

**Die Anwendung alkoholischer
Calciumhydroxid- Nanodispersionen und
Calciumsulfat- Dispersionen für die
Konservierung von Putz, Stuck
und Malschichten**

**Verwendung und Modifizierung als Konservierungsmittel unter besonderer
Berücksichtigung der Auswirkung auf physikalische Eigenschaften der Substrate**

Inauguraldissertation

Zur Erlangung des Grades eines Doctor rerum naturalium

im Fachgebiet

Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut

an der Hochschule für Bildende Künste Dresden

vorgelegt von

Arnulf Christian Dähne

geb. am 15.02.1972 in Zittau

Termin der Verteidigung: 30.05.2013

Betreuer:

Prof. Dr. Christoph Herm, Hochschule für Bildende Künste Dresden

Gutachter:

Prof. Dr. Christoph Herm, Hochschule für Bildende Künste Dresden

Prof. Dipl. Rest. Roland Lenz, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart

Inhalt

Zusammenfassung	IV
Summary	V
Vorbemerkung	1
Einleitung	3
1 Kalk- und gipsgebundene Baustoffe	4
1.1 Bindemittel Kalk und Gips	4
1.2 Mörtel, Putz, Stuck: Definition und Klassifizierung	6
1.3 Historisches	9
2 Eigenschaften von Mörteln	11
3 Phänomenologie von Schäden	13
3.1 Systeme der Schadenserfassung	13
3.2 Phänomenologie Putz- und Stuckschäden	15
3.3 Schadensdimension	17
4 Grundlegendes zur Gefügefestigung von Putz und Stuck	18
4.1 Wesen und Ziel	18
4.2 Historische Entwicklung	19
4.3 Grenzen und Nachteile von gebräuchlichen Festigungsmitteln	21
4.4 Kompatibilität - Reversibilität - Materialidentität	22
4.5 Festigungsmittel auf Kalkbasis	25
4.6 Festigungsmittel auf Gipsbasis	30
5 CaLoSiL[®]-Nanodispersionen	31
5.1 Grundlegendes	31
5.2 Forschungsstand	36
5.3 Forschungsaufgabe	40
5.4 Allgemeine Vorgehensweise	41
6 Verwendete Nanodispersionen und deren Modifikationen	43
7 Versuche mit Lockersubstraten	45
7.1 Zielstellung	45
7.2 Experimentelles	45
7.3 Porosität des Substrats	48
7.4 Verdunstungsbedingungen	48
7.5 Relative Luftfeuchtigkeit	49
7.6 Lösliche Salze im Substrat	50
7.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	52

8	Verbesserung von Eindringverhalten und Tiefenverteilung	53
8.1	Zielstellung	53
8.2	Vorgehen	53
8.3	Prüfmethoden für die Materialkennwerte	54
8.4	Mörtelprüfkörper	59
8.5	Eindringverhalten der Nanodispersionen und Feststoffverteilung im Substrat	64
8.6	Änderung physikomechanischer Eigenschaften durch die Behandlung mit Nanodispersionen	78
8.7	Probeanwendungen mit CaSO ₄ -Dispersion	92
9	Modifizierung für die Behandlung größerer Schadensdimensionen	94
9.1	Zielstellung	94
9.2	Vorgehen	95
9.3	Vortests an Lockersubstraten	95
9.4	Anwendung von modifizierten Nanodispersionen an Kalksteinproben	100
9.5	Nano- und Mikrodispersionen als Bindemittel für zuschlaghaltige Massen	105
9.6	Zusammenfassende Bewertung/ Diskussion	113
10	Probeanwendung an Objekten	114
10.1	Allgemeines zu den Praxisobjekten	114
10.2	Schloss Leuben: Risalitgiebel der Ostfassade	120
10.3	Schloss Leuben: Raum 012, Ostwand	143
10.4	Schloss Dahlen: Weißer Saal, Westwand	166
11	Schlussfolgerungen	193
	Literaturverzeichnis	194
	Aktenverzeichnis	209
	Anhang A	211
	Anhang B	317
	Versicherung gem. §5 Abs. 1 Promotionsordnung	373
	Tabellarischer Lebenslauf	374
	Danksagung	377

Zusammenfassung

Die Produktreihe CaLoSiL[®] umfasst verschiedene alkoholbasierte Dispersionen von Calciumhydroxid und Calciumsulfat. Die Arbeit beinhaltet Untersuchungen zur Anwendbarkeit dieser neuartigen Materialien für Konservierungsaufgaben an Putz, Stuck und Malschichten mit dem Ziel, die Möglichkeit der Realisierung komplexer Konservierungsaufgaben auf der Basis praktisch wasserfreier Mittel mit reiner Kalk- oder Gipsbindung zu prüfen.

Untersuchungen im Labor unter Verwendung inerter Lockersubstrate und definiert zusammengesetzter Mörtelprüfkörper schlossen sich Anwendungen an entnommenem Probematerial historischer Substanz und Behandlungsproben an realen Objekten an.

Verschiedene Faktoren beeinflussen die Wirkungsweise der Calciumhydroxid-Nanodispersionen. Neben Lösungsmittelart und Feststoffgehalt der Dispersionen haben Materialfeuchtigkeit und Porosität des Substrates und der Gehalt löslicher Salze ebenso Einfluss wie die klimatischen Bedingungen während der Trocknungs- und Reaktionszeit.

Ein Problem ist die mangelhafte oder inhomogene Tiefenverteilung der Wirkstoffe. Diese ist primär nicht auf mangelnde Penetration sondern auf Rückwanderung der Nanopartikel während der Lösungsmittelverdunstung zurückzuführen. Durch Modifizierung der Mittel und der Applikationsmethoden kann die Tiefenverteilung verbessert werden.

Die Festigungswirkung ist bei einer praktikablen Anzahl einzelner Applikationen begrenzt und daher nicht für jeden Schädigungsgrad ausreichend.

Die Calciumhydroxid-Dispersionen eignen sich für die Herstellung von Kitt- und Hinterfüllmassen.

Anwendungsversuche mit Calciumsulfat-Dispersion erbrachten vollkommen unbefriedigende Ergebnisse.

Summary

The CaLoSiL[®] range of products comprises of different alcohol-based sols of calcium hydroxide and calcium sulphate. This paper contains trials concerning the applicability of these new materials for conservation purposes regarding plasters, plaster mouldings and paint layers with the aim to test their potential for the realization of complex conservation tasks on the basis of practically waterless sols with a pure lime or gypsum bond.

Laboratory tests using inert loose substrates and mortar specimens of predefined composition were followed by trials on samples taken from historic material and field trials on conservation objects.

The effect of calcium hydroxide nano sols is influenced by different factors. Beside the solvent variety and the amount of solids in the sols, moisture levels and porousness of the substrate as well as the presence of dissolved salts have an impact, as do the climatic conditions during the drying and reaction periods.

Poor and in-homogeneous depth distribution of the active agents pose a problem. This is not primarily due to a lack of penetration but is effected by the reverse migration of the nano particles during solvent evaporation. Depth distribution can be enhanced by modifications of the sols and the method of application.

Assuming a feasible amount of applications, the consolidation effect is limited and hence is not sufficient for all degrees of damage.

Calcium hydroxide sols can be used for the preparation of putties and injection mortars.

Trials with Calcium sulphate sols rendered wholly dissatisfactory results.

Vorbemerkung

Die vorliegende Arbeit basiert auf im Rahmen des Forschungsprojektes STONECORE unternommenen Untersuchungen und deren Ergebnissen. Im 7. Rahmenprogramm für Forschung, Technologische Entwicklung und Demonstration (FP 7) übernahm die Europäische Union die Finanzierung dieses interdisziplinären, internationalen Forschungsvorhabens (Grant Agreement Number: 213651). Hauptgegenstand des Projektes war die Entwicklung und Anwendung von Nano-Dispersionen an Natur- und Kunststein. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung von Methoden zur berührungslosen Gesteinsuntersuchung.

Die Projektleitung und -organisation erfolgte durch Prof. Dr. Ziegenbalg und sein Unternehmen, die IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG (Freiberg, Deutschland). Daneben waren Forschungsgruppen aus privatwirtschaftlichen Unternehmen sowie aus Hochschulen beteiligt. Die insgesamt zwölf Projektpartner stammen aus sieben europäischen Staaten.

Die Projektgruppe der Hochschule für Bildende Künste (HfBK) Dresden war innerhalb des Projektes mit der Anwendungsforschung der CaLoSiL[®] Nano-Dispersionen an kalk- und gipsgebundenen Putz- und Stuckmaterialien befasst. Unter der Leitung von Prof. Dr. Herm übernahm der Verfasser der vorliegenden Arbeit die Forschungs- und Untersuchungsaufgaben. Technische Unterstützung während der Laborarbeit und verschiedene Untersuchungsleistungen wurden durch Prof. Dr. Herm und die Mitarbeiterinnen des archäometrischen Labors der HfBK Dresden sowie durch Diplomgeologen Köberle als Projektmitarbeiter geleistet.

Teile der Arbeit wurden bereits veröffentlicht:

Dähne, A., Herm, C.: Calcium hydroxide nanosols for the consolidation of porous building materials - Results from EU-STONECORE. In: Brereton, R. (Hg.): Heritage Science (Chemistry Central Online Journal) 2013, 1 :11., 06.04.2013

Dähne, A.; Herm, C.: Calcium hydroxide nanosols for the consolidation of porous building materials. Results from EU-STONECORE. In: Xi'an Jiatotong University: International Conference on Modern Chemical Technology in the Protection of Cultural Heritage, China 2012. S. 30 - 41

Dähne, A.: Evaluation of Lime Nanosols for Conservation of Wall Paintings, Mortar and Stucco. In: Cultural Heritage Preservation. Berlin, Germany, September 26 to 28 2011. Proceedings of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation. Hrsg.: M. Krüger; MPA Universität Stuttgart 2011, S. 262-266

Einleitung

Mit den Lösungsmittelbasierten mineralischen Nanodispersionen stehen neuartige Substanzen zur Verfügung, die eine praktisch wasserfreie, materialidentische Konservierung von kalk- und gipsgebundenen Materialien ermöglichen sollen. Dies sind vor allem Baustoffe und Werkstoffe der baugebundenen Kunst, deren Erhaltung eine zentrale Aufgabe restauratorischer Tätigkeit darstellt.

Zur Erläuterung dieser Aufgabe erfolgen im ersten Kapitel zunächst einige grundlegende Betrachtungen zu den gegenständlichen Bindemitteln und aus ihnen hergestellten Baustoffen sowie zu deren Verwendungsgeschichte, bevor in den Kapiteln 2 bis 4 auf die Eigenschaften und Schäden an diesen Materialien sowie auf die Prinzipien und bisherigen Ansätze zu deren Behandlung eingegangen wird. Hierbei wird ein Schwerpunkt auf die Frage der materialidentischen Konservierung/ Restaurierung gelegt.

Anschließend wird der Forschungsgegenstand, die Nanodispersionen der Produktreihe CaLo-SiL[®], vorgestellt. Zur Einordnung der vorliegenden Arbeit in die seit Jahren laufende Forschung wird in Kapitel 5 eine Übersicht vorheriger Auseinandersetzungen mit der Thematik gegeben und die eigene Vorgehensweise erläutert.

In den Kapiteln 6 bis 9 werden die durchgeführten Experimente und deren Ergebnisse dokumentiert und bewertet. Für das Untersuchungsprogramm war eine Auswahl zu prüfender Substrate und anzuwendender Prüfmethode zu treffen. Systematisch wurden Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen sowie mögliche Modifizierungen der Dispersionen untersucht. Vorversuche dienten zielorientiert der Vorbereitung von Anwendungsproben an reeller historischer Substanz, welche Gegenstand des Kapitels 10 sind.

Die Ergebnisse waren hinsichtlich ihrer Verallgemeinerbarkeit zu beurteilen und sollen damit konkrete Antworten auf Anwendungsfragen der Restaurierungspraxis liefern. Die Arbeit soll so eine grundlegende Einschätzung zur Eignung dieser Nanodispersionen für die Konservierung von kalk- und gipsgebundenem Putz, Stuck und von Wandmalerei geben.

1 Kalk- und gipsgebundene Baustoffe

1.1 Bindemittel Kalk und Gips

1.1.1 Kalk

Der Begriff Kalk leitet sich vom lateinischen „calx“ ab, was in Antike und Mittelalter als Bezeichnung verschiedenster carbonatischer Materialien benutzt wurde.¹ Als Kalk werden heute sowohl Calciumoxid (CaO) als auch Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bezeichnet.

Calciumoxid (Branntkalk) wird durch Glühen bzw. technisch durch Brennen von Calciumcarbonat (Kalkstein, CaCO_3) bei Temperaturen oberhalb ca. 900°C hergestellt und ist Rohstoff für das eigentliche Kalkbindemittel Calciumhydroxid (Kalkhydrat, Löschkalk), das durch Hydratisierung bei Wasserzugabe (Löschen) entsteht. In stark vereinfachter Darstellung komplexer Prozesse erfolgt die Aushärtung des Calciumhydroxids durch Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft durch neuerliche Bildung von Calciumcarbonat (Kalkkreislauf).²

Der Rohstoff Kalkstein kann auf unterschiedliche Weise entstanden sein. Als Ablagerungsstein kann er verschiedene natürliche Beimengungen aufweisen, wie vor allem Tonminerale, Eisenoxide, Silikate, Phosphate, Pyrit oder Bitumen, aber auch Gips. Je nach dem tatsächlichen Calciumcarbonatgehalt wird zwischen sehr großer Reinheit ($> 98,5\%$ CaCO_3) und unreinem Kalkgestein ($< 85,0\%$ CaCO_3) in fünf Kategorien unterschieden.³

Aus Kalkstein mit einem natürlichen Gehalt an Dolomit (Calcium-Magnesiumcarbonat ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)) wird Dolomitmalk hergestellt. Beim Brennen entsteht neben Calciumoxid auch Magnesiumoxid, das beim Löschen zu Magnesiumhydroxid ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) umgesetzt wird, hierbei aber reaktionsträger als Calciumoxid ist und daher nicht immer vollständig hydrolysiert. Dolomitmalkhydrat wird bei unvollständiger Umsetzung des Magnesiumoxids als „halbgelöschter Kalk“ bezeichnet. Beim Abbinden bildet sich durch Aufnahme von Luftkohlendioxid Magnesiumcarbonat. Diese Reaktion verläuft je nach Magnesiumhydroxidanteil verzögert und nicht selten unvollständig. Es liegen stattdessen anteilig wasserhaltige Magnesiumcarbonate vor.⁴

In Kalken mit hydraulischen Anteilen wird die Carbonatisierung von der hydraulischen Erhärtung überlagert. Beim Brennen werden diese Hydraulefaktoren aufgeschlossen und verbinden sich bei Wasserzugabe mit den Kalkanteilen zu di-, tri- und tetracalcitischen Verbindungen.⁵

¹ GOTTHARDT/ KASIG (1996), S. 131

² WINNACKER/ BIENER (1974), S. 199

³ Vgl. GEYSSANT (2001), S.26

⁴ Nach SIEDEL (2003), S. 57f.

⁵ Nach HÄRIG et al. (2003), S. 97

Am Bauwerk verwendeter Kalk wird nach der Industrienorm als „Baukalk“ bezeichnet und besteht in seinen analytischen Hauptbestandteilen aus Calciumoxid sowie geringen Anteilen an Magnesium-, Silizium-, Aluminium- und Eisenoxiden⁶. Die alte DIN 1060⁷ unterschied die Arten Weißkalk, Dolomitkalk, Wasserkalk, hydraulischer Kalk sowie hochhydraulischer Kalk.⁸ Die erstgenannten drei Kalkarten wurden je nach Calcium- und Magnesiumoxidanteil im gebrannten Rohstoff definiert. Weißkalk und Dolomitkalk werden als „Luftkalk“ bezeichnet, da diese Kalkarten ausschließlich durch Luftkohlendioxid carbonatisieren bzw. – in Abgrenzung zu den anderen Kalkarten – unter Luftabschluss nicht abbinden.

Die heute gültige Einordnung der Baukalke nach DIN EN 459-1⁹ unterscheidet in die Kategorien Weißkalk, Dolomitkalk, natürlich hydraulischer Kalk und hydraulischer Kalk, die nach Zusammensetzung und Erhärtungsverhalten weiter unterteilt werden.¹⁰

Als Baustoff ist bis heute sowohl gebrannter ungelöschter als auch gelöschter Kalk handelsüblich.

1.1.2 Gips

Der Begriff Gips ist von der griechischen Bezeichnung „gypsos“ abgeleitet und bezeichnet im Deutschen sowohl den Rohstoff Gipsstein, Calciumsulfat-Dihydrat ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) als auch den durch Brennen desselben hergestellten gebrannten Gips, Calciumsulfat-Halbhydrat ($\text{CaSO}_4 \times 1/2 \text{H}_2\text{O}$).¹¹

Je nach Brennverfahren liegen zwei in ihrer Kristallmorphologie verschiedene Modifikationen vor: beim Nassbrennverfahren im geschlossenen Autoklaven entsteht α -Halbhydrat (Brenntemperatur 80-180°C) und bei weiterem Erhitzen α -Anhydrit III (bei 110-220°C). Durch das offene Trockenbrennverfahren werden β -Halbhydrat (bei 120-180°C) und β -Anhydrit III (bei 290-310°C) gebildet. Weiteres Brennen von α - oder β -Anhydrit III erzeugt die höheren Anhydritphasen I und II. Alle gebrannten Gipsphasen sind als Bindemittel einsetzbar, indem sie unter Zugabe von Wasser wieder Dihydrat bilden und Abbinden. Anhydrit II benötigt hierfür allerdings einen Anreger, wozu meist Calciumoxid, Kaliumsulfat oder Portlandzement dienen.¹²

Baugipse werden in Sorten mit und ohne werksseitig beigefügte Zusätze unterschieden.

⁶ WISSER (1989), S. 43 hier ohne Nennung der Aluminiumoxide; sowie HERM (1997), S. 61

⁷ DIN 1060-1 Baukalk / Jan. 1986

⁸ WISSER (1989), S. 43

⁹ DIN EN 459-1 Europäische Norm Baukalk / Dez. 2010

¹⁰ Vgl. IfS (2006), S.1

¹¹ BINNEWIES et al. (2011), S. 382 sowie STARK/ WICHT (1998), S. 53

¹² AURAS (2010), S. 79

1.2 Mörtel, Putz, Stuck: Definition und Klassifizierung

Definiert werden Mörtel als Gemische aus „Bindemitteln, Zuschlägen und Zusatzstoffen“¹³ oder etwas präziser als „*breiartige Gemische aus Bindemittel, mehr oder weniger feinkörnigem Zuschlagstoff und Wasser [Frischmörtel], welche nach teilweiser oder vollständiger Abgabe des Anmachwassers erhärten [Festmörtel]*“¹⁴.

Nach der mittlerweile gültigen Norm DIN EN 998-1¹⁵ für Putzmörtel wird ausschließlich nach Festmörteleigenschaften klassifiziert (Druckfestigkeit, kapillare Wasseraufnahme und Wärmeleitfähigkeit).¹⁶ In der gleichzeitig wirksamen deutschen Vornorm DIN V 18550 (erstellt 2005) wird in der Mörtelgruppe P1 Kalkmörtel unterschieden in P1a Luftkalkmörtel, P1b Wasserkalkmörtel und P1c hydraulische Kalkmörtel. Bei der Putzmörtelnormung gilt somit zurzeit noch die alte Nomenklatur, während sie für die Bindemittel bereits abgeschafft wurde.

Bei Gipsmörteln ist die obige Definition des Begriffs „Mörtel“ nicht uneingeschränkt zu gebrauchen. Zwar wird nach DIN EN 13279-1¹⁷ der zuschlagfreie reine Baugips nicht als Mörtel, sondern als „Gipsbinder“ definiert, jedoch sind unter der Definition „Gipstrockenmörtel“ alle gipshaltigen Massen mit mehr oder weniger großem Gipsanteil zusammengefasst, die nicht zwingend Zuschläge enthalten müssen (Unterscheidung in Gips-Putztrockenmörtel, gipshaltiger Putztrockenmörtel, Gips-Kalk-Putztrockenmörtel usw.).¹⁸ In der in Deutschland gleichzeitig gültigen Einteilung nach DIN V 18 550¹⁹ werden Gipsmörtel als Mörtelgruppe IV klassifiziert. Die Mörtelgruppe IVa bedeutet auch hier den zuschlagfreien reinen Putzgips. Die mit Zuschlägen versetzten Putzmörtel mit definiertem Gips- und Kalkanteil werden in die Gruppen IVb Gipsandmörtel, IVc Gipskalkmörtel sowie IVd Kalkgipsmörtel unterschieden.²⁰

Ein Putz ist laut gültiger DIN V 18 550 ein ein- oder mehrlagig in bestimmter Dicke aufgetragener Belag aus Mörtel an Wänden und Decken.²¹ Neben der schützenden hat ein Putz gestalterische Funktion. Er kann als Träger für weitere gestaltende Beschichtungen dienen oder selbst plastisch gestaltet werden.²² Dieser Definition folgend, wäre Stuck als Sonderform von Putz zu bezeichnen.

¹³ KNOEPFLI/ EMMENEGGER (1990), S. 32

¹⁴ NEY (1965), S. 7

¹⁵ DIN EN 998-1 - Europäische Norm Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 1: Putzmörtel / Dez. 2010

¹⁶ WEBER (2008), S. 16f.

¹⁷ DIN EN 13279-1 – europäische Norm Gipsbinder und Gips-Trockenmörtel / Nov. 2008

¹⁸ KRASS et al. (2009), S. 249

¹⁹ DIN V 18 550 – Vornorm Putz und Putzsysteme / April 2005

²⁰ HÄRIG et al. (2003), S. 128

²¹ Nach NEROTH / VOLLENSCHAAR (2011), S.406

²² Vgl. KNÖFEL (1994), S. 5

Die moderne Industrienorm (DIN V 18 550) kann aber nur die unserem heutigen technischen Verständnis entsprechend hergestellten Materialien hinreichend erfassen. Im Umgang mit historischen Baustoffen aller Regionen und Zeiten muss festgestellt werden, dass bei der Herstellung und Verarbeitung von Mörtel über die Grundformel „Bindemittel + Zuschläge + Zusätze“ hinaus eigentlich alles nur Denkbare an Variation und Modifizierung vorstellbar ist und womöglich auch realisiert wurde. Bei der ohnehin unüberschaubaren rohstoff- und verarbeitungsbedingten Materialvariation der Bindemittel sind auch immer wieder – bewusst oder unbeabsichtigt – Bindemittel gemischt oder mit Zusätzen versetzt worden.

Für die restauratorische Bestandsaufnahme und Denkmalerfassung ist eine Klassifizierung historischer Putze unter nur einem Aspekt, wie Bindemittelart, Mörtelzusammensetzung, Funktion oder Gestaltung des Putzes, nicht ausreichend. Eine in der Denkmalpflege gebräuchliche Einordnung in Mörtelarten wird nach ihrer Anwendung und Funktion vorgenommen: Es wird in Mauermörtel, Fugen-/ Verfugmörtel, Putzmörtel, Estrich-/ Verlegemörtel, Steinerfüllmörtel, Injektionsmörtel sowie Sondermörtel für spezielle Anwendungen unterschieden.²³ Die Klassifizierung von Putzen anhand ihrer Verarbeitung und Gestaltung ist kaum erschöpfend möglich. Die Applikationstechniken für Putzmörtel lassen sich zumindest in Setzmörtelverstrich, manueller Antrag und maschineller Antrag einteilen. Für die Klassifizierung historischer Putzmörtel kann das nicht ausreichen, da neben der Applikationsweise vor allem die glättende, polierende, aufrauende oder in irgendeiner Form reliefierende Behandlung den Oberflächencharakter der Putze bestimmt und dies auch als Identifikationsmerkmal von großer Bedeutung ist. Ettl hat vier teils weiter untergliederte Putzweisen und 12 Arten der Oberflächenbearbeitung definiert. Da hier unter anderem auch stuckierte Formen genannt werden, wird der Anspruch einer möglichst allumfassenden Kategorisierung für historischen Putz und Stuck deutlich.²⁴ EMMENEGGER unterschied in einer „Zusammenstellung historischer Putztechniken“ bereits 23 Techniken und PURSCHE hat diese aus seiner Kenntnis der bayerischen Denkmallandschaft um sechs weitere ergänzt.²⁵ Die Liste ließe sich mit Blick auf weitere Regionen sicher noch erheblich erweitern.

Eine Einordnung von Putzen kann nach der Funktion im Beschichtungssystem als Ausgleichsputz/ Spritzbewurf, Unterputz (Arriccio), Deckputz (Intonaco), Glätte sowie als Trägerputz für Applikationen erfolgen.

Stuck umfasst nach einer Begriffserklärung von KÜHN „sowohl plastisch geformten Mörtel als auch in ebener Lage als Schicht aufgetragenen Mörtel“ und auch hier ist von einem „fließenden Übergang“ zum Begriff des „Verputzes“²⁶ die Rede - so können als Stuck bezeichnete Beschichtungen wie Stuckmarmor (Scagliola) und Glanzstuck (Stucco lustro) auch ebene Wandflächen bedecken. Während die Schichten ebenflächiger Stucktechniken durch die Putzklassifizierung ebenfalls erfassbar sind, stellt der plastische Stuck eine eigene Kategorie dar. Er

²³ nach KNÖFEL (1994), S. 5

²⁴ Ettl (1993), S. 37

²⁵ PURSCHE (1988)

²⁶ KÜHN (1996), S. 17

kann entsprechend seiner Verarbeitung in Antragsstück, Form- und Gussstück, Versatzstück und Zugstück klassifiziert werden.²⁷

Bei der Auseinandersetzung mit der Konservierung von historischem Putz und Stuck spielen konstruktiver Aufbau und Materialkombination eine erhebliche Rolle. Mörtel wird seit jeher auf die unterschiedlichsten Trägermaterialien mit oder ohne Bewehrung appliziert, als Einschichtputz direkt auf der Mauerwerksoberfläche oder in mehrschichtig, zuweilen vielschichtig aufgebauten Putz- und Stucksystemen mit Armierungen, Bewehrungen und Applikationen. Putze und Stuckaturen können nachträglich mit festigenden, hydrophobierenden, oberflächenvergütenden oder färbenden Substanzen behandelt oder mit weiteren Beschichtungen versehen sein.

Sind allein die ursprünglichen material- und herstellungstechnischen Möglichkeiten schier unüberschaubar, wird dies am historischen Bestand durch nachträglich ergangene Ergänzungen und Veränderungen, durch verschiedentliche Überdeckung und nicht zuletzt durch restauratorische Behandlung noch um ein Vielfaches an möglichen Varianten erweitert.

Vor allem seitens der Denkmalbehörden gab es immer wieder Initiativen, historische Mörtel systematisch zu erfassen. In Datenbanken lassen sich die mit den verschiedenen erfassbaren Eigenschaften verbundenen Klassifizierungsansätze recht gut verwalten. Einen Pilotversuch stellt hier die datenbankgestützte Erfassung im Rahmen des Projektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) „Erforschung und Erhaltung historischer Putze und Mörtel in Brandenburg“ dar²⁸. Andere ambitionierte Versuche, wie das „Thüringische Mörtelregister“²⁹ sind über eine erste Entwicklungsstufe nicht hinausgekommen.

²⁷ Ebenda

²⁸ OBERMEIER (1998)

²⁹ Eine Publikation zu dieser 1997 auf Initiative des damaligen Thüringischen Landesamtes für Denkmalpflege erarbeiteten datenbankgestützten Mörtelerfassung existiert leider nicht. Mittlerweile gibt es ein neues Projekt gleicher Zielrichtung. Vgl. ECKART et. al. (2008)

1.3 Historisches

Die Erhaltung von Objekten aus Kalk und Gips sowie aus kalk- und gipsgebundenen Materialien stellt einen wichtigen restauratorischen Aufgabenbereich dar. Die enorme Vielgestaltigkeit, in der uns diese Stoffe begegnen, ist schon durch ihre Jahrtausende alte Anwendungsgeschichte begründet. Kalk und Gips gehören zu den ältesten Baustoffen der Welt. Ihre Anwendung wird schon für das 12. Jahrtausend v. Chr. angenommen³⁰ und ist bislang frühestens für Bauwerke in Mesopotamien vor etwa 9000 Jahren belegt. In dieser Frühzeit waren sowohl gips- als auch kalkgebundene Versatzmörtel in Gebrauch, während die Wandbeschichtungen aus Gips- oder Kalk-Deckschichten auf tonhaltigem, mit Stroh vermengtem „Schlicker“ bestanden.³¹ Aus dem alten Ägypten sind neben der Herstellung von Flussschlamm-Stroh-Putzen mit Gipsputzüberdeckung auch einfache Gipslagen als Flächenverputz direkt auf Natursteinwände bekannt³². Gips fand während der ägyptischen Hochkulturen für Stuckaturen „fast ausschließlich“³³ Verwendung. Die nach heutigem Wissen frühesten Beispiele für die Herstellung von Kalkputzen, die zudem bereits a fresco bemalt wurden, sind für das mesopotamische Atachan um 2500 v. Chr.³⁴ belegt. In der kretisch-minoischen Kultur um 1600 v. Chr. gibt es schließlich erste Beispiele für Kalkstuck.³⁵

Gips- und kalkgebundener Putz und Stuck waren auch bei den frühesten Hochkulturen des europäischen Festlandes, bei Etruskern und Griechen in Gebrauch³⁶. Während der römischen Antike wurde aber vor allem die Kalkmörteltechnik praktiziert.

In den Regionen nördlich der Alpen war lange vor der Einführung der Kalkmörteltechnologie durch die Römer bereits die Verwendung von Gipsmörteln tradiert, entsprechende Befunde gehen bis in die Jungsteinzeit zurück.³⁷ Auch gebrannter Kalkstein fand nach archäologischen Funden im Donaugebiet schon in dieser Frühzeit (5600 – 5000 v. Chr.) als Baustoff Verwendung.³⁸

In Deutschland ist die Gipsmörteltechnologie nach weitgehender Verdrängung durch die von den Römern präferierte Verwendung von Kalkmörteln erst seit dem 10. Jahrhundert wieder nachweisbar.³⁹ Seit dem Mittelalter sind kalk- und gipsgebundene Wandbeschichtungen und -verzierungen auf dem ganzen Kontinent verbreitet.

³⁰ KASIG/ WEISKORN (1992), S. 52

³¹ FRÖSSEL (2003), S.14 und KÜHN (1981), S.14

³² KÜHN (1981), S. 14 sowie PHILIPPOT (1983), S. 29

³³ STEINBRECHER (2006), S. 14

³⁴ KÜHN (1981), S. 14

³⁵ EMMENEGGER (1997)

³⁶ Befunde aus mykenischer Kultur werden bei FRÖSSEL (2003), S. 14 genannt. Etruskische Beispiele führen KNOEPFLI/ EMMENEGGER (1990), S. 29 an.

³⁷ STEINBRECHER (2006), S. 14

³⁸ STARK/ WICHT (1998), S. 56

³⁹ STEINBRECHER (2006), S. 16

Der Einsatz von Gipsbaustoffen blieb hierbei zunächst lokal begrenzt und fand vor allem in den damaligen Abbauregionen und an von diesen ausgehenden Handelswegen statt.⁴⁰ Die historischen hochgebrannten Gipse sind abbindefähige Phasengemische, die sich in Zusammensetzung, Zerkleinerungsgrad, Durchmischung der unterschiedlichen Modifikationen (hauptsächlich Anhydrit II) sowie verarbeitungsbedingte Verunreinigungen stark unterscheiden können.⁴¹

Während in Kalkmörteln aller Zeitalter inerte Sande als gebräuchlichster Zuschlag Verwendung fand⁴², bestehen Zuschläge mittelalterlicher Hochrandgipsmörtel vorwiegend aus Gipsstein, Zuschläge sind für historische Hochbrandgipse aber nicht die Regel⁴³.

Mit der Erfindung des Stuckmarmors und seiner rasanten Verbreitung seit dem 16. Jahrhundert begann eine vorrangige Nutzung von gipsgebundenen Mörteln für Stuckarbeiten.⁴⁴

Erst mit einsetzender Industrialisierung im 19. Jahrhundert gerieten die historischen Mörteltechnologien allmählich in Vergessenheit. Gips- und Kalkmörtel wurden nun weitgehend durch moderne meist zementhaltige Mörtel ersetzt.⁴⁵

Seit dem 20. Jahrhundert wird Gips am Bau überwiegend und massenhaft für vorgefertigte Elemente sowie für Anhydritestriche verwendet.⁴⁶

Reinkalkmörtel finden in den letzten Jahrzehnten verstärkt Verwendung als Reparatur- und Rekonstruktionsmaterial in der denkmalpflegerischen Praxis.⁴⁷ Zudem gewinnen sie vor allem im „ökologischen Bauen“ neue Wertschätzung.

⁴⁰ VISSER (2008)

⁴¹ LENZ / SOBOTT (2008), S.24ff.

⁴² KASIG / WEISKORN (1992), S.72

⁴³ LENZ / SOBOTT (2008), S.28

⁴⁴ STARK/ WICHT (1998), S. 55

⁴⁵ VISSER (2008), S. 20 und STEINBRECHER (2006), S. 25

⁴⁶ STARK/WICHT (1998), S. 56

⁴⁷ Vgl. FISCHER (2004)

2 Eigenschaften von Mörteln

Naturwissenschaftlich betrachtet weisen Mörtel unterschiedliche chemisch-mineralogische und physikalisch-mechanische Kennwerte und Eigenschaften auf.

Die für die Charakterisierung historischer Mörtel wichtigsten chemisch-mineralogischen Kennwerte sind die Art der Bindemittel, Zuschläge, Zusatzstoffe und Zusatzmittel sowie das Mörtelgefüge. Darüber hinaus werden Materialfeuchtigkeit und Gehalt an löslichen Salzen zu den chemisch-mineralogischen Eigenschaften gezählt.⁴⁸

Neben den bereits thematisierten Aspekten der rein qualitativen stofflichen Zusammensetzung von Mörteln (vgl. Abschnitt 1.2, S. 6ff.) sind die Mischungsverhältnisse, die Größe und Form des Zuschlags und der Mineralbestand kennzeichnend. Ein hierdurch mitbestimmtes, wesentliches Charakteristikum ist das Mörtelgefüge, welches die räumliche Verteilung der Mörtelkomponenten beschreibt. Angelehnt an die petrographische Terminologie sind unter dem Oberbegriff des Gefüges die Eigenschaften der Struktur (Art, Größe und Menge der Bestandteile) und der Textur (ihre räumliche Anordnung zueinander) zusammengefasst.⁴⁹

Durch stoffliche Zusammensetzung und Gefüge werden die physikalisch-mechanischen Eigenschaften eines Mörtels bestimmt. SCHUBERT hat diese in vier Gruppen geordnet und anhand möglicher Prüfverfahren untergliedert.⁵⁰

1. Farbe, Dichte, Porositätseigenschaften

Farbe

Rohdichte, lufttrocken, trocken

Dichte

Gesamtporosität

Porengrößenverteilung

2. Feuchtetechnische Eigenschaften

Kapillare Wasseraufnahme

Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Wasseraufnahme unter Druck von 15 N/mm²

Wasseraufnahme unter Vakuum

Sättigungswert

Austrocknungsverhalten

Sorptionsfeuchte

Wasserdampfdurchlässigkeit

3. Formveränderungen und Dauerhaftigkeit

Wärmedehnungskoeffizient

Feuchtedehnung - Schwinden, Quellen

Frostwiderstand

⁴⁸ Nach MEHLMANN (1993)

⁴⁹ Vgl. SALMANG/ SCHOLZE (2007), S. 145

⁵⁰ SCHUBERT (1993)

4. Festigkeiten und Verformungskennwerte unter Belastung

Druckfestigkeit teilflächige Belastung

Druckfestigkeit vollflächige Belastung

Zugfestigkeit, E-Modul, δ - ϵ -Linie

Biegezugfestigkeit

Haftzugfestigkeit

Oberflächenzugfestigkeit

Abriebfestigkeit/ Oberflächenverschleiß

Dynamischer E-Modul

Für die Prüfung dieser Eigenschaften stehen teilweise Verfahren aus der genormten Materialprüfung zur Verfügung. Da die Prüfung historischer Mörtel meist an Proben ungleicher, unregelmäßiger, nicht normengerechter Form und oft geringer Dimension erfolgt, müssen Prüfmethoden mehr oder weniger stark abgeändert und angepasst werden. Darüber hinaus wurden und werden hierfür spezielle Prüftechniken entwickelt.

Für die vorliegende Arbeit waren wegen der enormen Vielzahl von Einzelproben bestimmte zu überprüfende Eigenschaften und praktikable Prüfmethoden auszuwählen.

Für eine Einschätzung der Wirksamkeit von Festigungsmitteln galt hierbei der Festigkeitsprüfung der Materialien vor und nach der Behandlung das größte Interesse. Darüber hinaus sollten Veränderungen des Wasseraufnahmeverhaltens der Materialien überprüft werden, um Auswirkungen der Festigung auf die Porosität der Substrate erkennen zu können (Methodendiskussion Abschnitt 8.2, S. 53f.).

Geprüfte Eigenschaft	Methode	Abschnitt/ Seite
Dichte (Rohdichte)	Auftriebsswägung	8.3.1 / S. 54f.
Sorptionsisotherme	Gravimetrisch	8.3.4 / S. 57
Biegezugfestigkeit	Dreipunktverfahren	8.3.5 / S. 57f.
Festigkeitsprofil	Bohrwiderstandsmessung	10.2.5 / S. 129f
Oberflächenfestigkeit	„Peelingtest“	10.2.6 / S. 138
Haftzugfestigkeit	Abzugsversuch	9.5.3 / S. 107f.
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	Gravimetrisch	8.3.3 / S. 56f.
Wasseraufnahmekoeffizient	Prüfröhrchen	8.3.2 / S. 55f.

Tab.01: Prüfung der Eigenschaften von Mörteln in der vorliegenden Arbeit: geprüfte Eigenschaften, angewendete Methoden und Verweis auf den Abschnitt mit der jeweiligen Methodenbeschreibung

3 Phänomenologie von Schäden

Die Interpretation von Schadensursachen und Zusammenhängen, der Schadensentwicklung und –dynamik ist für die Konzipierung wirksamer konservatorischer Behandlungsstrategien von großer Bedeutung. Für die hier vorgelegte Arbeit ist allein die präzise Schadensphänomenologie zu klären, die der Analyse und Bewertung von Schadensprozessen bei der restauratorischen Voruntersuchung vorangehen sollte.

Die strikte Trennung einer möglichst objektiven, weil beschreibenden und wenn möglich mit Maßangaben versehenen Schadensbilderfassung von allen mehr oder weniger subjektiven und hypothetischen Interpretationen wäre als Standard restauratorischer Voruntersuchung wünschenswert. Nur so erscheint eine systematische, mithin nachvollziehbare Konzepterstellung möglich. Die präzise Definition der Materialschäden ist Voraussetzung für die Formulierung der konservatorischen Zielstellung und der angestrebten Ergebnisse jeder Behandlung.

Die Analyse der Ursachenzusammenhänge und Schadensabläufe ist für die Beseitigung oder Minderung negativer Einwirkungen, aber auch für zu berücksichtigende Aspekte bei der Auswahl einzusetzender Behandlungsmittel und -methoden von Bedeutung.

3.1 Systeme der Schadenserfassung

Ein mehr oder weniger verbindliches Schadensbildglossar, wie es vom International Council on Monuments and Sites/ International Scientific Committee for Stone (ICOMOS/ISCS) für Schadensbilder am Naturstein seit 2000 erarbeitet wurde⁵¹, gibt es für Schäden an Putz und Stuck bisher nicht⁵². Auch in diesem vor allem für die internationale terminologische Abstimmung sehr hilfreichen Bildkatalog sind zur Einordnung der Steinschäden rein phänomenologische Schadensbildbeschreibungen teilweise mit Interpretationen zur Entwicklung oder zur Ursache der Schäden vermischt.

Erheblich präziser und rein phänomenologisch ist das bereits 1989/90 entwickelte Klassifikationsschema der Verwitterungsformen von Naturstein von FITZNER/ KOWNATZKI.⁵³ Die Schadensbilder sind in Hauptverwitterungsformen und, je nach Dimension oder besonderer Ausprägung, in Einzelverwitterungsformen gegliedert. Die für Natursteinverwitterung typischen Phänomene sollten definitorisch voneinander abgegrenzt werden. Die Hauptverwitterungsformen erscheinen hierbei gleichberechtigt nebeneinander gelistet:

Rückverwitterung

Relief

Ausbruch

Absanden

⁵¹ ICOMOS-ISCS (2008)

⁵² Die am Beispiel der Putze und Wandmalereien der Alten Kirche Idensen von EMMENEGGER, PURSCHE und MÖLLER (1994) entwickelte Schadensphänomenologie ist leider nie zu einer solchen fortentwickelt worden.

⁵³ FITZNER/ KOWNATZKI (1991), S. 55f.

Schuppen
Schale
Abbröckeln
Übergangsformen
Aufblättern
Risse
Verfärbung
Verschmutzung
Kruste
Salzkruste
Salzausblühung
biogener Aufwuchs

Die festgelegten Hauptverwitterungsformen sind als Auflistung ohne Hierarchie oder Gruppierung dargestellt. Eine Übertragung des Schemas auf andere Materialgruppen, zum Beispiel auf Putz und Stuck, erscheint kaum möglich.

Die Herstellung eines übergeordneten und übertragbaren Bezugssystems ist mit der Erarbeitung einer Grundordnung für Natursteinschäden unter dem Aspekt der reinen Phänomenologie im Rahmen des EU-Forschungsprojektes MEDISTONE (2005-2008) versucht worden⁵⁴: Die auftretenden Veränderungen und Schäden werden klassifiziert in:

- 1 Materialverlust*
- 2 Materialzerstörung*
- 3 Formveränderung*
- 4 Auflagerungen*
- 5 Änderung optischer Eigenschaften*

Die Schadensbilder werden entsprechend ihrer Phänomenologie weiter in Untergruppen unterschieden. Für die Phänomene der Materialzerstörung in folgender Weise:

- 2.1 Risse/ Brüche*
- 2.2 Zerfall*
 - 2.2.1 Zerfall in Einzelaggregate*
 - 2.2.2 stückiger Zerfall*
 - 2.2.3 lagiger Zerfall*

Die auch hier ganz materialtypischen Verwitterungsformen (z.B. Absanden, Abpudern) werden entsprechend zugeordnet, weitere Untergliederungen nach der Dimension des Schadensbildes (unter definitorischer Abgrenzung der einzelnen Kategorien anhand der Geometrie) oder besonderer Ausprägung (z.B. Rissgeometrien oder mehrlagiger Zerfall) sind möglich.

⁵⁴ LINKE/ DÄHNE (2009) / vgl. Anhang A, S. 289

3.2 Phänomenologie Putz- und Stuckschäden

Die Ordnung des MEDISTONE-Glossars lässt sich auf die Schadensdefinierung von Putz und Stuck übertragen. Für die vorliegende Arbeit sind die Erscheinungen der Materialzerstörung mit und ohne überlagernde Formveränderungen von Belang, da allein diesen mit konsolidierenden Behandlungen begegnet werden kann.

In Anlehnung an das Glossar lassen sich die Schadensbilder an Putz und Stuck rein phänomenologisch folgendermaßen kategorisieren: Je nach Dimension des Materials liegt ein Zerfall in Einzelaggregate, also die vollständige Gefügebrauflösung als Kreiden, Pudern oder Sanden vor. In größerer Dimension erfolgt lagiger und stückiger Zerfall in zusammenhängenden, in sich konsistenten Schuppen, Bröckchen oder Schalen.

Je nach Homogenität des Auflösungsprozesses und der Stabilität des Bindemittels erfolgt der Zerfall in den unterschiedlichen Ausprägungen. Im Extremfall kann lagige Auftrennung innerhalb einer Schicht erfolgen.

Die Ablösung der gesamten Putzschicht von ihrem Träger ist als Schadensbild erst bei nachfolgender oder zusätzlich vorhandener Verformung oder Verlust erfassbar. Auch lagiger Zerfall kann mit Verformungen verbunden sein oder von solchen überlagert werden. Einerseits sind dies Abhebungen und Verschiebe der gelösten Substanz, andererseits Verwölbungen und Blasenbildung, die eigentlich immer mit oberflächenparallelen Ablösungserscheinungen einhergehen.

Risse, die mehr oder weniger vertikal zur Baustoffoberfläche verlaufen, werden phänomenologisch je nach Ausprägung in Haarrisse und Spaltrisse (oder „klaffende Risse“⁵⁵) mit und ohne Höhenversatz eingeteilt, wobei die definitorischen Abgrenzungen hier nicht präzise sind. Die in der Werkstoffphysik übliche Einteilung von Rissphänomenen in Spaltrisse (ohne rissparallele oder vertikale Verschiebe der Rissflanken), Längsscherrisse (entspricht dem Spaltriss mit Höhenversatz) und Querscherrisse (Spaltriss mit in Rissrichtung verschobenen Flanken)⁵⁶ zu übernehmen, wäre sicher sinnvoll, ist aber in der restauratorischen Schadenserkennung bislang nicht üblich.

Ob ein Riss die Materiallage vollkommen durchtrennt, ist oft nicht erkennbar. Die in der Werkstoffphysik definierte Unterscheidung zwischen Riss und Bruch⁵⁷ als Bezeichnung für teilweise und vollständige Durchtrennung des Körpers ist bei der phänomenologischen Schaderfassung an Putz und Stuck nicht sinnvoll und unüblich.

In der phänomenologischen Erkennung kann auch die Klassifizierung von Rissen entsprechend ihres Verlaufes, ihrer „Rissgeometrie“ Berücksichtigung finden, da diese für die Ursachenforschung bedeutsam sein kann. Die geläufige Einteilung in „gerade verlaufende Einzelrisse“, „unregelmäßig, netzartig verlaufende Risse“ sowie „Risse im Verlauf der Fugen des Putzgrundes“⁵⁸ gibt

⁵⁵ ROOSS (1995), S. 127

⁵⁶ LUDWIG(2005), S.895

⁵⁷ Ebenda, S. 896

⁵⁸ ROOSS (1995), S. 126

allerdings bereits interpretatorischen Spielraum, der nicht dem Wesen der rein phänomenologischen Schadensbilderfassung entspricht.

Für die Klassifizierung von Schadensformen wird zuweilen zwischen Kohäsions- und Adhäsionsschäden unterschieden.⁵⁹ In der Physik werden Kohäsion und Adhäsion auf Körper bezogen: Kohäsionskräfte (oder Zusammenhangskräfte) halten demnach einen einzigen homogenen Körper zusammen, während die Adhäsionskräfte (oder Anhangskräfte) das Zusammenhaften zweier Körper bewirken.⁶⁰

Die eindeutige Einordnung von Schadensbildern des Materialzerfalls an Mörteln in die beiden Kategorien kann genau genommen keine Methode der Schadensbilderfassung sein, sondern setzt bereits Ursachenforschung voraus. Die Definition von Homogenität der vorliegenden Körper kann für Stoffgemische und Materialkombinationen, wie sie mit Putzen, ihren Beschichtungen und Trägern in aller Regel vorliegen, nur relativ zum Betrachtungsmaßstab erfolgen. Inhomogenitäten verschiedener Dimension und Ausprägung liegen bereits als ursprüngliche Eigenschaft all dieser durch Menschen hergestellten, modifizierten und verarbeiteten Materialien vor. In einem Putz können schon durch ungenügende Mörteldurchmischung oder durch unterschiedliche Applikations- und Nachbearbeitungsweise Bereiche mit bereits ursprünglich unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften enthalten sein. Es liegt also im Ermessen des Betrachters, ob es sich bei einem Putz um einen homogen anzusehenden Körper handelt, dessen innere Bindungsdefekte folglich als Kohäsionsschäden definiert werden können.

Wird der relativ grobe Maßstab akzeptiert, eine dem Befund nach einheitlich hergestellte Putz- oder Stuckschicht ad definitionem als „homogen“ zu betrachten, ist die Klassifizierung der Schäden folgendermaßen möglich:

Als Kohäsionsschäden sind Materialzerfall in Einzelaggregate sowie lagiger und stückiger Zerfall mit Schadgrenzen innerhalb des Materials zu bezeichnen. Hierunter werden auch schichtparallele Aufspaltungen von Materiallagen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften gezählt.

Adhäsionsschäden sind demnach ausschließlich die mit Haftungsverlust der Schicht zu ihrem Trägermaterial verbundenen Schadformen.

Verformungen können sowohl Adhäsions- als auch Kohäsionsschäden überlagern und stellen ebenso wenig eine eigene Kategorie dar wie alle Formen von tendenziell vertikal zur Oberfläche verlaufenden Rissen, die als Sonderform der Kohäsionsschäden zu betrachten sind.

⁵⁹ z.B. SIMON (2003), S.178

⁶⁰ DOBRINSKI et al. (2010), S. 130f./ Ebenfalls gebräuchlich ist der Bezug der Kohäsion auf einen „Stoff“ und der Adhäsion auf „Phasen“. vgl. GREULICH (1998), S. 30 und GREULICH (1999), S. 257

3.3 Schadensdimension

Neben der Klassifizierung von Schadensbildern nach ihrer Form ist nicht zuletzt im Hinblick auf die Konsolidierung ihre geometrische Dimension von Bedeutung. FITZNER/KOWNATZKI haben in ihrer Klassifikation die meisten Einzelverwitterungsformen in „*schwach*“, „*mittel*“ und „*stark*“ unterschieden⁶¹, was erheblichen Interpretationsspielraum erlaubt. Die möglichst präzise Erfassung von geometrischen Schadensdimensionen ist aber für die spätere Konzipierung ihrer Behandlung erforderlich. Konsolidierungsmittel sind in unterschiedlicher Weise in der Lage, Defekte verschiedener Dimension zu erreichen und entstandene Öffnungen zu überbrücken oder zu verfüllen. So hat GRASSEGGGER in einer Arbeit über die Möglichkeiten der Rissbehandlung an Kalksteinen die Rissphänomene nach Spaltbreiten in „*Haarrisse oder Mikrorisse*“ mit Öffnungsweite von ca. 0,1mm bis <1mm, „*feine Risse*“ mit 1-2 mm sowie „*grobe Risse*“ über 2 mm eingeteilt.⁶²

Für die in der hier vorgelegten Arbeit gegenständliche Erprobung von Festigungsmitteln für die Konsolidierung von Gefügeschäden an Putz und Stuck ist eine solche dimensionelle Schadensbetrachtung von großer Bedeutung. Risse und Zerfallsphänomene werden deshalb auch nach ihrem Spaltmaß unterschieden.

⁶¹ FITZNER/ KOWNATZKI (1991)

⁶² GRASSEGGGER/ KÖHLER (2005)

4 Grundlegendes zur Gefügefestigung von Putz und Stuck

4.1 Wesen und Ziel

Möglichkeiten zur Minderung und Behebung von Schäden in Mörtelgefügen können einerseits die Reaktivierung verlorener Bindekraft der Substanz selbst oder das Einbringen eines zusätzlichen Bindemittels darstellen. In kalk- und gipsbasierten Systemen ist eine Wiederherstellung verlorener Bindung durch Lösung und Rekristallisation des vorhandenen Bindemittels zwar theoretisch vorstellbar, jedoch ist eine Lösung und Umlagerung des vorhandenen Bindemittels nicht kontrolliert durchführbar. Die Gefügedefekte können selbst auf einen Bindemittelabbau durch Löse- und Transportprozesse zurückzuführen sein oder sie sind durch verschiedentlich ausgelöste mechanische Belastungen (z.B. durch Salzkristallisationsdruck, hygische oder thermische Spannungen) unter Vergrößerung des Gefügevolumens und damit einhergehenden Rissen entstanden. In jedem Falle stünde nicht mehr ausreichend Bindemittel zur Verfügung, um die entstandenen Mikro- und Makroöffnungen zu überbrücken.

Zusätzlich eingebrachte Mittel zur Gefügefestigung müssen eine ausreichende Verbindung zum Substrat herstellen und selbst ein ausreichend festes Gefüge aufbauen. Die Festigkeitszunahme wird durch die Kohäsion im Festigungsmittel sowie durch die mechanische Verklammerung und Adhäsion des Festigungsmittels im Substratgefüge bestimmt.

Neben der Festigkeit werden durch die mit dem Materialeintrag veränderte Porengeometrie sowie die Porosität des erhärteten Festigungsmittels selbst die Wasseraufnahmefähigkeit und die Wasserdampfdiffusionseigenschaften des Substrats verändert. Ziel ist im Idealfall die Wiedererlangung der physikalischen Eigenschaften des ungeschädigten Materials, PURSCHE sprach in diesem Zusammenhang von den „*bewährten Eigenschaften der Umgebung*“⁶³. Alle darüber hinaus gehenden Veränderungen physikalisch-mechanischer Materialeigenschaften sind nur zulässig, wenn aus der Schadens- und Schadursachenanalyse hervorgeht, dass die Substanz solcher Veränderungen in Form zusätzlicher Ertüchtigung auch tatsächlich bedarf. Die Einbringung von Bindemitteln bedingt die Änderung physikalisch-mechanischer Eigenschaften des geschädigten Substrats, in diesem Fall zuerst dessen (mangelnde) mechanische Festigkeit und die durch Schädigung vergrößerte Porosität.

Für die Bewertung der Eignung eines Festigungsmittels ist die Erfüllung dieser rein technischen und am eigentlichen Behandlungsziel orientierten Anforderungen eine erste Maßgabe. Das setzt voraus, dass die zu erreichenden Kennwerte auch bekannt sind. Es wird also zunächst festzustellen sein, inwiefern die entsprechende Festigkeit überhaupt erreicht werden kann oder ob und in welchem Grade sie andererseits durch die Behandlung überschritten wird. In der Fachliteratur wird hierzu gefordert, durch Festigungen „*ähnliche oder niedrigere*

⁶³ PURSCHE (2001), S. 23

*mechanische Eigenschaften*⁶⁴ zu erreichen. Die mechanische Festigkeit des eingebrachten Mediums soll folglich höchstens der (erreichten) Festigkeit des umgebenden Substrates entsprechen. Dabei muss das Festigungsmittel idealerweise so in das Substrat eindringen und in ihm erhärten, dass alle geschwächten Bereiche erreicht und keine Inhomogenitäten durch überfestigte Zonen oder Horizonte entstehen. Thermische und hygrische Einflüsse dürfen keine neue Gefügeschädigung hervorrufen.

Zum Zweiten ist das Vermögen des Konservierungsmittels ausschlaggebend, Gefügedefekte zu überbrücken und damit Lücken im porösen Gefüge zu schließen, ohne dass sich Gesamtporengehalt und Porengeometrie vom ungeschädigten Materialzustand signifikant unterscheiden oder Diffusionsgrenzen geschaffen werden. Die Verfüllungen sollten folglich selbst eine dem behandelten Material entsprechende Porosität aufweisen oder veränderte Porosität wieder in ihren ursprünglichen Zustand versetzen.

Über die Anforderungen an die Wirksamkeit hinaus haben Festigungsmittel die Vorgaben jedes Konservierungsmittels zu erfüllen: Es dürfen keine schädigenden Stoffe eingebracht werden. Die optischen Eigenschaften müssen unverändert bleiben.

Einen weiteren Aspekt stellt die Alterung der eingebrachten Mittel dar. Im Allgemeinen wird von Konservierungsmitteln eine gute Alterungsbeständigkeit bzw. Alterungsresistenz verlangt, hierbei werden Wasserunlöslichkeit und die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Einflüsse und mikrobiologischen Befall sowie generell gegen Witterungseinflüsse gefordert.⁶⁵

4.2 Historische Entwicklung

In einer von FELDTKELLER vor wenigen Jahren vorgelegten Quellensammlung sind Technologien zur „Putzsicherung“ des 19. und 20. Jahrhunderts erfasst.⁶⁶ Die nachfolgenden Daten und Fakten entstammen, so weit nicht gesondert ausgewiesen, dieser Arbeit.

Die Bewahrung geschädigter Putz- und Stucks substanz durch konservierende Behandlung ihrer Schäden ist im deutschsprachigen Raum erst mit dem Aufkommen der modernen Denkmalpflege seit dem späten 19. Jahrhundert praktiziert worden.

Bereits aus den 1890er Jahren finden sich erste Hinweise auf Gefügefestigungen an geschädigter Putzsubstanz, ausgeführt mit Kasein bzw. mit Wasserglas (beide Bezeichnungen ohne weitere Präzisierung). Beide Materialien sind seither in großem Umfang für Putz- und Wandmalereifestigungen eingesetzt worden und finden zuweilen noch heute Anwendung. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts kamen zur Putzfestigung überdies Leim, Wachs und Paraffin zum Einsatz. Auch für die Gipsfestigung werden Anfang des 20. Jahrhunderts Tränkungen mit Wachs- oder Paraffinlösungen sowie Stearinsäure genannt, aber auch mit Fluat.⁶⁷ Die damit gemeinten Metall-Hexafluorsilikate⁶⁸ sind seit Anfang des 20. Jahrhunderts

⁶⁴ DOMASLOWSKI (2000), S. 17

⁶⁵ Vgl. z.B. PURSCHE (2001), S. 23 sowie HEINEN (2000), S. 101

⁶⁶ FELDTKELLER (2008)

⁶⁷ KRUPP (1915) und KRATZ (1964)

auch für die Putzfestigung in Gebrauch.⁶⁹ Seit 1926 wurden bereits Kieselsäureverbindungen empfohlen. RATHGEN und BORRMANN haben 1904 für die Gefügefestigung von Gips das so genannte „*Dechandsche Tränkverfahren*“ mit Kaliumborat und „Barythydrat“ (Bariumhydroxid) als einziges bezeichnet, welches damals „*größere Verbreitung gefunden*“ habe und experimentierten mit einer Lösung von Zelluloid in Amylacetat (hier als „*Zapon*“ bezeichnet).⁷⁰

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind verstärkt, 1970-1990 wohl überwiegend, polymere Kunststoffe, vor allem Polyvinylalkohol, Polyvinylacetat sowie verschiedene Acrylate, als Lösung oder Dispersion eingesetzt worden und teilweise noch heute in Gebrauch.⁷¹ Parallel erfolgten aber auch weiterhin rein mineralische Festigungen. Neben Wasserglas (zunächst noch Alkali-Wassergläser, später Lithiumwasserglas) kommen seither und bis heute Silikatlösungen (z.B. Keim[®]Fixativ) sowie „Barytwasser“ (Bariumhydroxidlösung) zur Anwendung, letzteres auch für Gipsstuck.⁷² Die Festigung mit Kalkwasser (Calciumhydroxid-Lösung), Kalksinterwasser (Calciumcarbonat-Lösung) sowie Calciumhydrogencarbonat-Lösung wurde in den 1950er Jahren von SCHMUDERER, WEHLTE und DENNINGER⁷³ vor allem für geschädigte Kalksekko-Malschichten und Freskomalereien empfohlen. Die Verwendung von Kalkwasser als Festigungsmittel ist seit Ende des 20. Jahrhunderts wieder stärker ins Bewusstsein gerückt.⁷⁴ Von VIERL wurde sie auch für die Festigung von „*leidlich festem*“⁷⁵ Kalkstuck empfohlen. HAMMER befürwortete für die Festigung von „*sehr porösen Verputzen*“⁷⁶ die Anwendung von dünner Kalkmilch.

Kieselsäureester (KSE) werden nach ersten Pilotarbeiten 1978⁷⁷ seit den 1980er Jahren verstärkt zur Wandmalerei-, Putz- und Stuckfestigung⁷⁸ eingesetzt, seit den 1990er Jahren auch vorhydrolysierte Produkte⁷⁹ sowie Mischungen mit Cellulosederivaten⁸⁰ und elastifizierte Kieselsäureester⁸¹. Jüngere Forschungen dienen der weiteren Modifizierung von Kieselsäurederivaten, viel versprechende Ergebnisse wurden mit Lithiumsilikatlösung⁸² sowie mit Ammoniumoxalat⁸³ erlangt. Aktuell werden Versuche der Festigung durch Biomineralisierung durchgeführt.⁸⁴

⁶⁸ BENEDIX (2011), S. 390

⁶⁹ Vgl. LEHMANN (2004/a), S. 72

⁷⁰ RATHGEN/ BORRMANN (1904)

⁷¹ Vgl. z.B. TAUBERT (2001) sowie AMIDEI (2003)

⁷² Vgl. VIERL (1984), S. 78 und S.127

⁷³ SCHMUDERER (1953), WEHLTE (1958), DENNINGER (1958)

⁷⁴ Vgl. z.B. BRAJER (1999) und ARNOLD (2001)

⁷⁵ VIERL (1984), S.77

⁷⁶ HAMMER (2003), S. 194

⁷⁷ KOBLISCHEK (2001)

⁷⁸ Vgl. VIERL (1984), S.127

⁷⁹ Z.B. HANGLEITER/ SALTZMANN (2004)

⁸⁰ Vgl. PURSCHE (2001), S. 24

⁸¹ Vgl. BOOS et al. (1997)

⁸² REUL (1993)

⁸³ HAMMER (2003)

⁸⁴ ZEUGSWETTER (2008)

4.3 Grenzen und Nachteile von gebräuchlichen Festigungsmitteln

Auf der immerwährenden Suche nach möglichst wirksamen Putz- und Stuckfestigungsmitteln ohne negative Folgeerscheinungen für das behandelte Objekt wurden und werden die Ergebnisse früherer Maßnahmen immer wieder kritisch bewertet.

Organische Mittel zeigen eine Anfälligkeit für das Wachstum von Mikroorganismen. Wachse, Paraffine, „Zapon“, Kunstharzlösungen und -dispersionen sowie Celluloseether besitzen mehr oder weniger filmbildende Eigenschaften bis zum Porenverschluss. Teilweise zeitigen sie optische Veränderungen (Dunkelung, Farbvertiefung, Vergilbung, Glanz).⁸⁵ Kasein und Kunstharzdispersionen besitzen zudem ein oft unzureichendes Eindringverhalten. Kasein kann zu erheblichen Spannungen führen.

Kalium- und Natriumwassergläsern werden nicht nur ihre schwierige Anwendungstechnik und die Veränderung des optischen Eindruckes der Wandmalerei bescheinigt. Es können sich Alkalisalze und Krusten bilden⁸⁶ und es besteht die Gefahr von Scherspannungen durch thermische Dilatation⁸⁷.

Kieselsäureethylester sind nur begrenzt in der Lage, größere Räume zu überbrücken – die dies teilweise ermöglichende Schnellhydrolyse ist großflächig nicht anwendbar⁸⁸. Auch Kieselsäureester können Farbveränderungen verursachen. Oft ist eine deutliche Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme festzustellen. Ihre temporäre hydrophobe Wirkung vor und während der Gelphase stellt ein Problem für die Weiterbearbeitung der betreffenden Bereiche dar.⁸⁹ Für Kieselsäureester mit Haftvermittlern wurde zum Teil unzureichende Festigungswirkung nachgewiesen.⁹⁰ Andererseits besteht die Gefahr einer Überfestigung von oberflächennahen Bereichen, sofern Gelabscheidungsrate und Applikationsmenge nicht durch eingehende Voruntersuchungen genau eingestellt wurden.

Kolloidale Kieselsäuredispersion besitzt ein für die Putzfestigung oft zu geringes Eindringvermögen und inhomogene Verteilung im Gefüge, bewirkt teilweise Farbveränderungen und eine oft deutlich reduzierte kapillare Wasseraufnahmefähigkeit, manchmal bis zum Porenverschluss.⁹¹

Bariumhydroxid ist stark toxisch und teuer. Das Festigungsvermögen ist begrenzt. Es besteht die Gefahr von oberflächiger Weißschleierbildung.⁹² Ganz allgemein ist der Einsatz wässriger

⁸⁵ Vgl. RATHGEN/ BORRMANN (1904) sowie HAMMER (2003)

⁸⁶ WEHNER et al. (2001), S. 158

⁸⁷ HAMMER (1998)

⁸⁸ Vgl. z.B. KLARNER (2003)

⁸⁹ WEHNER et al. (2001), S. 164

⁹⁰ Vgl. ARNOLD (2001), S.23

⁹¹ WEHNER et al. (2001), S. 164 sowie KOBLSICHEK (2001), S. 89

⁹² Nach DENNINGER (1958), VIERTL (1987), S.78 und S.127 sowie HAMMER (2003)

Lösungen (z.B. auch Kaliumborat) für die Gipsstuckkonservierung mit einer Beeinflussung der Kanten und Konturen durch das Anlösen des Gipses verbunden.⁹³

Calciumcarbonat-Lösung und Calciumhydrogencarbonat-Lösung besitzen nur begrenzte Festigungswirkung. Ihre Anwendung ist wegen der zahlreich erforderlichen Applikationen zeitaufwendig und mit einer sehr hohen Feuchtigkeitsbelastung für das Objekt verbunden.⁹⁴ Kalkmilch dringt nicht gut ein und festigt bei entsprechender Verdünnung oft nicht ausreichend.⁹⁵

4.4 Kompatibilität - Reversibilität - Materialidentität

In der Vergangenheit ist unter Restauratoren intensiv und kontrovers über die Widersprüchlichkeit der Forderungen nach Kompatibilität und Reversibilität von eingebrachten Mitteln diskutiert worden. Die Reversibilitätsforderung ist maßgeblich mit der verbreiteten Einführung von Polymerkunststoffen in der Konservierung als wesentliche Begründung für deren Einsatz eingeführt worden.⁹⁶ Bevor die immensen Nachteile und Probleme kunststoffbehandelter poröser Systeme in den Fokus der Aufmerksamkeit rückten⁹⁷, stand die Reversibilität (oder mit gleicher Bedeutung „Löslichkeit“ bzw. „Wiederlöslichkeit“⁹⁸) unter den Anforderungen an einzusetzende Mittel an vorderster Stelle⁹⁹. Indem vor allem die Anwendung neuartiger und modifizierter Kieselsäurederivate sowie die „Barium-Methode“¹⁰⁰ Ende des 20. Jahrhunderts in der Wandmalerei- und Putzfestigung ermöglichten, dass der Charakter und die physikalischen Eigenschaften der porösen Systeme nach der Behandlung erhalten blieben, entbrannte die Diskussion über die Wertigkeit der Forderungen nach Reversibilität, Kompatibilität und Dauerhaftigkeit zwischen Befürwortern von organischen bzw. anorganischen Mitteln.¹⁰¹ Wie LEITNER verkürzt wiedergab „*sind organische Materialien leichter löslich und damit reversibel, so sind anorganische Materialien irreversibel, aber in ihrer Wirkungsweise den ursprünglichen Materialien näher*“¹⁰².

Noch immer finden beide Materialgruppen in der Konservierungspraxis Anwendung. Dass Festigungen aus löse- bzw. quellfähigen Kunststoffderivaten in bestimmtem Rahmen reversibel sein können, belegen erfolgreiche „Entrestaurierungsmaßnahmen“ an derartig behandelten Objekten.¹⁰³ Gleichzeitig zeigen genau diese Beispiele, dass zugunsten der Reversibilität andere Forderungen an das Konservierungsmittel missachtet wurden.

⁹³ RATHGEN/ BORRMANN (1904)

⁹⁴ Nach WEHLTE (1958); PRICE (1985) und HEINEN (2000)

⁹⁵ HEINEN (2000)

⁹⁶ EMMERLING (1992)

⁹⁷ Vgl. z.B. ZEUGSWETTER (2008)

⁹⁸ EMMERLING (1992), S. 37

⁹⁹ Vgl. z.B. KÜHN (1981), S. 50

¹⁰⁰ Vgl. MATTEINI (1979)

¹⁰¹ Vgl. MATTEINI (2003)

¹⁰² LEITNER (2002), S. 163

¹⁰³ Z.B. bei der Konservierung der Malereien in der Krypta der Quedlinburger Stiftskirche; vgl. LEHMANN (2004b)

An sich erscheint der Anspruch nachvollziehbar, eine durch Alterung oder neue Schädigungsprozesse nicht mehr wirksame (oder selbst schädigend wirkende) Festigung komplett aus dem System entfernen zu wollen, um sie durch eine neue zu ersetzen. Die mit Extraktionsmaßnahmen einhergehende gewaltige Beanspruchung läuft dem scheinbar so objektfreundlichen Bestreben aber zuwider, vom immensen Aufwand solcher Maßnahmen ganz abgesehen. SINOS räumte ein, „... daß Reversibilität nur in ganz seltenen Fällen zu verwirklichen sei“ und forderte, dass der Begriff der Reversibilität „auf keinen Fall zum Vokabular von Rahmenbestimmungen gehören“¹⁰⁴ sollte.

Entsprechend rückte die Forderung nach „Wiederbehandelbarkeit“ und „neutralem Langzeitverhalten“¹⁰⁵ in den Vordergrund. Sollte neuerlicher Handlungsbedarf auftreten, muss eine weitere bzw. neue Behandlung möglich bleiben – ohne vorher die letzte Festigung wieder auflösen und hierbei naturgemäß Substanzverluste in Kauf nehmen zu müssen.

Es bleibt zunächst aber offen, wie weit der Anspruch nach Kompatibilität einzusetzender Mittel gehen soll. Kompatibel behandeln heißt für PETZET ein „in seinen Eigenschaften ‚unschädliches‘ Ersatzmaterial“¹⁰⁶ anzuwenden. Ähnlich definierte LEITNER: „By compatibility is meant that the added materials will not introduce new and harmful stress“¹⁰⁷. „Kompatibel“ wurde durch diese Autoren also nicht im Sinne einer wirklichen Materialidentität von Behandlungsgegenstand und Behandlungsmittel ausgelegt. Es wird vielmehr auf den mineralischen und porösen bzw. hydrophilen Charakter von Konservierungsmitteln für ebensolche Materialien abgezielt.¹⁰⁸ MATTEINI ging hier jedoch weiter, indem er feststellte, „dass der mineralische Charakter eines Restaurierungsmaterials nicht notwendigerweise Kompatibilität mit dem mineralischen Substrat mit sich bringt“. Er hielt weitere Übereinstimmungen chemischer und kristallographischer Art für nötig und forderte „Respekt vor der Materialidentität“¹⁰⁹.

Die Frage der stofflichen Identität von Konservierungsmittel und zu behandelndem Material wird sonst selten thematisiert. Das geschieht eigentlich nur dort, wo sie Erprobung oder Anwendung fand. Wirklich materialidentische Konservierung kalk- bzw. gipsgebundener Stoffe bedeutet, auf Kalk und Gips als Konservierungsmittel zurückzugreifen. Gips für die Reapplikation und Hinterfüllung sowie die Ergänzung von Gipsstuck zu verwenden, ist gängige Praxis. Für Gefügefestigungen gibt es jedoch kein Mittel auf materialidentischer Basis.

Auch die Verwendung von kalkbasierten Mitteln zur Behandlung ebensolcher Objekte hat eine lange Tradition; HAMMER formulierte dazu: „Als Reparaturmaterial braucht der Kalk seine Kompatibilität nicht erst zu beweisen, sie ist bereits historische Tatsache“¹¹⁰. Im Zuge eines gewissen Purismus ist mittlerweile fast eine Unbedingtheit des möglichst materialidentischen Konservierens zu beobachten. Dass das zuweilen in eine völlig falsche Richtung führen kann,

¹⁰⁴ SINOS (1990), S. 48

¹⁰⁵ LEITNER (2002), S. 163

¹⁰⁶ PETZET (1992), S.11

¹⁰⁷ LEITNER (1997), S. 37

¹⁰⁸ Vgl. HAMMER (1998) sowie HAMMER (2003)

¹⁰⁹ MATTEINI (2003), S. 173

¹¹⁰ HAMMER (1998), S. 200

wird deutlich, wenn beispielsweise die „*bevorzugte Verwendung*“ von Kalkkasein für die Festigung von kalkgebundenem Mörtel mit „*seiner Verwandtschaft mit dem Kalkbindemittel*“¹¹¹ begründet wird.

Die Anwendung von Calciumhydroxid- und Calciumcarbonat-Lösungen als Festigungsmittel folgt hingegen der Grundidee, verlorene Kalkbindung schlicht durch neue zu ersetzen und damit materialidentisch zu konservieren. KRATZ nannte bereits 1964 die Anwendung von Kalkwasser als Festigungsmittel für Kalkstein „*dem Stein gemäß*“¹¹². PRICE kommentierte seine Versuche der Festigung von Kalkstein mit Calciumcarbonat-Lösungen mit der Bemerkung: „...*for what could be more natural than to put lime into a limestone*“¹¹³.

Es darf dabei nicht außer Acht bleiben, dass immer wieder die geringe Eignung von Kalk als Festigungs- und Bindemittel festgestellt wurde. Oft ist auf der Grundlage negativer Erfahrungen reiner Kalk als Bindemittel für Bau- und Konservierungsstoffe grundsätzlich in Frage gestellt worden.¹¹⁴ Neben der Verwitterungsanfälligkeit hat vor allem die Rissneigung von Putz-, Reparatur- und Hinterfüllmörteln auf Kalkbasis¹¹⁵ ein „*Misstrauen in die Kalktechnik*“¹¹⁶ begünstigt.

Hingegen beweisen historische Kalkputze per se das Vermögen langer Haltbarkeit, was vor allem an ihrem relativ geringen Verformungswiderstand und der hohen Wasserdampfdiffusionsfähigkeit liegt.¹¹⁷ Die Verwendung von Mitteln auf Kalkbasis erfordert aber einige Sorgfalt. Die Art des verwendeten Kalkbindemittels, seine Herstellung und Verarbeitung sind hier von großer Bedeutung. Trockengelöschte Kalkmörtel weisen gegenüber Mörteln auf Sumpfkalkbasis wegen des deutlich geringeren Wasserbedarfs ein geringeres Schwundverhalten auf und können zudem höhere Druckfestigkeit und Dichte erreichen. Die Rissbildung in Luftkalkmörteln kann mit einem geeigneten Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis, richtiger Verarbeitung und Nachsorge vermieden werden. Eine angemessene Dauerhaftigkeit ist schließlich von den Rahmenbedingungen abhängig.

Für Putzergänzungen und Anböschungen werden Luftkalkmörtel daher als geeignetes Material empfohlen. Die Gefügefestigung mit kalkbasierten Mitteln wird im folgenden Abschnitt ausführlicher behandelt (Abschnitt 4.5, S.25ff.). Anwendung finden Konservierungsmittel auf der Bindemittelbasis von Kalk heute auch als Ver- bzw. Hinterfüllmassen und als Mörtel, Tünchen und Schlämmen für Ergänzungen und Rekonstruktionen sowie für Schutzbeschichtungen und Opferputze. In allen genannten Anwendungsbereichen werden die Bindemittel sowohl rein als auch untereinander oder mit anderen Bindemitteln gemischt angewendet.

¹¹¹ KÜHN (1981), S. 52

¹¹² KRATZ (1964), S.46

¹¹³ PRICE (1985), S. 148

¹¹⁴ Z.B. KÜNZEL (1994) S. 73-76 vgl. auch FISCHER (2004)

¹¹⁵ Vgl. z.B. BÖTTGER (1997), S. 46 und RIECKE (2000)

¹¹⁶ HAMMER (1998), S.201

¹¹⁷ AURAS (2004)

Wo kalkgebundene Materialien geschädigt wurden, ist vor einem erneuten Einsatz von Kalk eine Ursachenforschung der Schädigungsprozesse allerdings von ganz erheblicher Bedeutung für die Wirksamkeit und Nachhaltigkeit der Behandlung. Vorhandenen negativ wirksamen Einflüssen und Prozessen sind die materialidentischen Konservierungsmittel in gleicher Weise ausgesetzt und so können bedenkenlos verwendete Kalkmaterialien bei bestimmten Feuchtigkeitsverhältnissen, vorhandenen Alkaligehalten oder bei Vergipsung in Gegenwart von Magnesiumcarbonaten nicht nur selbst schnell wieder Schaden nehmen, sondern sogar neue Schädigungsprozesse auslösen.¹¹⁸

4.5 Festigungsmittel auf Kalkbasis

4.5.1 Einleitung

Die Verfestigung eines porösen Gefüges erfolgt durch flüssig eingebrachte und sich in den Hohlräumen verfestigende Mittel. Je nach Porengeometrie und Porenoberflächen des Substrats einerseits sowie Partikelgröße sowie Viskosität des Festigungsmittels andererseits werden hierbei Hohlräume verfüllt oder Poren ausgekleidet.

Reine kalkbasierte Festigungsmittel ohne Zusatzstoffe unterscheiden sich in:

- Art des gelösten oder dispergierten Feststoffs
- Art und Qualität des Lösungsmittels oder Dispersionsmittels
- Konzentration und Reinheit der Feststoffe
- Partikelgröße, Partikelgrößenverteilung
- Wirkstoffform/en (Ionen, Einzelkristalle, Agglomerate)

bei Injektionsmassen zusätzlich:

- Art und Qualität der Zuschläge
- Bindemittel- Zuschlag-Verhältnis

Davon abhängig sind Eindringverhalten und Wirkstoffmenge.

4.5.2 Festigungsmittel und ihre Anwendung

Mittel zur Gefügefestigung

Traditionelle Festigungsmittel auf Kalkbasis sind „Kalksinterwasser“ und „Kalkwasser“, wobei diese Begriffe oft nicht korrekt verwendet werden. Nach DENNINGER ist unter Kalksinterwasser eine Calciumcarbonat-Lösung zu verstehen, die durch Lösen der Kalksinterhaut hergestellt wird, welche sich auf dem Wasserüberstand auf Sumpfkalk bildet. Diese mit destilliertem Wasser herzustellende Lösung enthält maximal 13 mg $\text{Ca}(\text{CO})_3$ pro Liter und weist einen pH-Wert von etwa 8 auf.¹¹⁹ SCHMUDERER beschrieb die Anwendung von Kalksinterwasser für die Festigung reiner Kalkmalerei als wirkungsvoll und vor allem wegen der spannungslosen Verfestigung als alternativlos.¹²⁰ WEHLTE bestätigte: „*Ofmaliges Fixieren hat*

¹¹⁸ Vgl. BÖTTGER (1997), S. 46, PURSCHE (2001) sowie AURAS (2004)

¹¹⁹ DENNINGER (1956)

¹²⁰ SCHMUDERER (1953)

sich in vielen Fällen bewährt, doch die Herstellung ist etwas mühsam und zeitraubend, und die Bindekraft reicht bisweilen nicht aus.“¹²¹ DENNINGER zweifelte jedoch, dass wegen der geringen Feststoffkonzentration „mit einer solchen Lösung [...] keine merkbare Festigung der Malschicht einer Freskomalerei erreicht werden“¹²² könne. Er stellte vielmehr fest, dass es sich bei der „zur Festigung von Freskomalereien im allgemeinen verwendete Lösung, die zwar meistens als Kalksinterlösung bezeichnet wird,“ um „Calciumbicarbonatlösung“¹²³ (Calciumhydrogencarbonat-Lösung) handelte. Diese wird durch Einleitung von Kohlendioxid in eine Calciumcarbonatlösung hergestellt und enthält bei 20°C 1100 mg Ca(CO)₃ pro Liter Wasser, der pH-Wert beträgt 6.

In systematischen Festigungsversuchen an Freskoputzen konnte DENNINGER für Calciumhydrogencarbonat-Lösungen jedoch nur eine äußerst geringe Festigungswirkung nachweisen.¹²⁴ Auch PRICE erreichte mit seinen Behandlungsversuchen mit Calciumcarbonat- und Calciumhydrogencarbonat-Lösungen an Kalkstein keine Festigkeitszunahme.¹²⁵

Als gebrauchsfertige Produkte sind Calciumcarbonat-Lösung und Calciumhydrogencarbonat-Lösung nicht erhältlich.

„Kalkwasser“ ist eine Calciumhydroxid-Lösung, die aus dem Wasserüberstand gewonnen wird, der beim Löschen von gebranntem Kalkstein zu Sumpfkalk entsteht. Sie kann auch durch Zentrifugieren von Sumpfkalk oder durch Filtration einer aus Calciumoxid und Wasser erzeugten Calciumhydroxid-Suspension („Kalkmilch“) hergestellt werden.¹²⁶ Die gesättigte Lösung enthält bei 20°C 1700 mg Ca(OH)₂ pro Liter Wasser und weist einen pH-Wert von 9 auf. Bei allen heute marktgängigen Produkten, die unter der Bezeichnung „Kalksinterwasser“ angeboten werden, handelt es sich um Calciumhydroxid-Lösungen, also eigentlich um „Kalkwasser“ (erhältlich sind entsprechende Produkte beispielsweise bei Keimfarben GmbH & CO. KG, Diedorf/ Deutschland, Dullinger GmbH, Elenau/ Österreich oder Cannabric, Guadix/ Spanien). Kalkwasserfestigungen werden in der Literatur zunächst für „wischende Freskomalereien“¹²⁷, aber auch für geschädigten Kalkstuck¹²⁸ und, in Kombination mit anderen Behandlungen, für Kalkstein¹²⁹ erwähnt. In jüngerer Vergangenheit wurden einige Pilotprojekte zur Anwendung von Calciumhydroxid-Lösung an Kalkmalereien und Kalkputzen publiziert. Die Ergebnisse waren höchst unterschiedlich. So konnte beispielsweise ARNOLD nach mehrfacher Flutung mit Kalkwasser auf geschädigten Kalkputz „keine strukturelle Festigung des desolaten Bindemittels“¹³⁰ feststellen, während etwa bei BRAJER Wischproben an pudernder Kalkmalerei nach 70-maliger (!) Sprühapplikation eine nachweisbare Festigkeits-

¹²¹ WEHLTE (1958), S. 22

¹²² DENNINGER (1958), S. 68

¹²³ Ebenda, S. 67

¹²⁴ DENNINGER (1956)

¹²⁵ PRICE (1985)

¹²⁶ Vgl. DVGW (2010), S.18ff.

¹²⁷ WEHLTE (1958) und DENNINGER (1958)

¹²⁸ VIERL (1984), S. 77

¹²⁹ PRICE (1985)

¹³⁰ ARNOLD (2001), S.23

zunahme zeigten.¹³¹ Der mit diesen Festigungen verbundene umfangreiche Wassereintrag wurde unter anderen von HEINEN kritisch bewertet.¹³²

KOLLER zweifelte die Festigungswirkung von Kalkwasser grundsätzlich an und führte sie lediglich auf die Umlagerung im Mörtel vorhandenen Calciumhydroxids zurück.¹³³ WEISSENBACH vermutete, dass die hohe Alkalität der Calciumhydroxid-Lösung diese Prozesse begünstigt. Das konnte jedoch in späteren Laborversuchen nicht nachgewiesen werden.¹³⁴

In einem Projekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) wurde 2005 bis 2008 die Anwendung von „Carbonatwasser“¹³⁵ für die Festigung von Putzen geprüft. Diese Calciumcarbonat-Lösung wurde durch Einleiten von Kohlendioxid in eine 3 bis 7°C kalte, übersättigte Lösung von Weißkalkhydrat in Wasser hergestellt. Im Laborversuch an Probenmaterial wurde nachgewiesen, dass durch Nutzung der Restalkalität der Mörtel „ein höherer Festigungszuwachs als mit Kalkwasser“¹³⁶ erzielt werden kann.

Durch die Amtliche Materialprüfanstalt (MPA) Bremen wurden im „Pilotprojekt Eilsun“ Festigungsversuche mit Calciumhydroxid-Lösung in einem Wasser-Ethanol-Gemisch durchgeführt und 1995 publiziert¹³⁷. In den Versuchsreihen konnte hierbei eine deutliche Druckfestigkeitssteigerung an entsprechend behandelten Kalkmörtelprismen nachgewiesen werden. Weiterführende Forschungen sind nicht bekannt. Als Konservierungsmittel werden derartige Produkte bislang nicht vertrieben.

Andere Festigungsmittel auf Kalkbasis beinhalten Calciumhydroxid in dispergierter Form. Wässrige Calciumhydroxiddispersionen wurden seit 1995 systematisch entwickelt¹³⁸ und werden mittlerweile auch als Konservierungsmittel verkauft (beispielsweise Produkte der Reihe Calxnova[®] von Deffner & Johann GmbH, Röthlein/ Deutschland oder Solubel[®] Weißkalkhydrat von der Solubel Vertriebs GmbH, Lauf-Neunhof/ Deutschland). Konservierungsmittel auf der Basis dispergierten Weißkalkhydrats sind vor allem an der Fachhochschule Köln in zahlreichen Forschungs- und Diplomarbeiten entwickelt und erprobt worden. Im Jahr 2000 fand hierzu in Köln eine eigene Fachtagung statt, im Tagungsband werden auch verschiedene objektbezogene Anwendungsbeispiele behandelt.¹³⁹

Durch das Consorzio Interuniversitario per lo Sviluppo dei Sistemi a Grande Interfase (CSGI) in Florenz wurde in langjähriger Forschungsarbeit erstmals eine alkoholische Calciumhydro-

¹³¹ BRAJER (1999)

¹³² HEINEN (2000)

¹³³ KOLLER (1996)

¹³⁴ WEISSENBACH / NEUBARTH (1997)

¹³⁵ DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Projektkennblatt AZ 23055, Referat 45

¹³⁶ Ebenda

¹³⁷ SCHOSTAK et al. (1995)

¹³⁸ Vgl. JÄGERS (2000), S.7

¹³⁹ JÄGERS (2000)

xid-Dispersion als Festigungsmittel entwickelt und 1996 patentiert.¹⁴⁰ Die Dispersion wird durch Fällungsreaktion beim Versetzen einer alkoholischen Lösung von Calciumchloridhydrat mit einer wässrigen Natriumhydroxidlösung hergestellt. Die nach Filtrieren in Isopropylalkohol dispergierten Calciumhydroxid-Partikel haben eine mittlere Partikelgröße von 100 nm, der Feststoffgehalt der Dispersion beträgt 5 g/l. Seit einigen Jahren wird dieses Festigungsmittel auf dem Markt angeboten (Produkt Nanorestore[®] von c.t.s. srl, Altavilla Vicentina/ Italien). In poröse Mörtelgefüge dringt die Nanodispersion nur sehr begrenzt ein¹⁴¹, sie kann aber für die Festigung von abblättrender und pudernder Malschicht verwendet werden¹⁴². BÖTTCHER, PRATESI und SCHIRMER haben systematische Anwendungsversuche an Probelplatten zur Malschichtfestigung durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass die in verschiedenen Konzentrationen angewendeten Dispersionen „keine ausreichende Festigkeit“ erzielten, „ohne gleichzeitig zu Weißschleiern zu führen“.¹⁴³ Bei einer von DI GREGORIO publizierten Untersuchung ist eine Verringerung der Festigungswirkung der Nanodispersion durch den Einfluss löslicher Salze festgestellt worden.¹⁴⁴

Injektionsmörtel

Füllstoffhaltige Injektionsmassen auf reiner Kalkbasis können mit Sumpfkalk oder mit „Kalkmilch“ (in Wasser aufgeschwämmtem gelöschtem Kalk) oder mit dispergiertem Kalhydrat hergestellt werden. Letztere sind mittlerweile auch als gebrauchsfertige Frischmörtel auf dem Markt (Calxnova[®] Injektionsmörtel und, mit hydraulischem Bindemittel, die Produkte der Reihe Ledan[®]D von Tecno Edile Toscana, Latina/ Italien). Daneben werden seit mehr als 20 Jahren vorkonfektionierte Trockenmörtel angeboten, die für die Anwendung nur noch mit einer entsprechenden Wassermenge versetzt werden müssen (teils mit hydraulischen Anteilen, so beispielsweise Produkte der Reihe PLM[®] von c.t.s. srl, Altavilla Vicentina/ Italien sowie Produkte der Reihe Ledan[®]T von Tecno Edile Toscana, Latina/ Italien). Hinterfüllmörtel wurden und werden umfassend eingesetzt und erforscht, es liegen umfangreich Publikationen und Forschungsberichte, Diplom- und Doktorarbeiten vor, die sich (auch) mit kalkbasierten Injektionsmaterialien befassen.¹⁴⁵

¹⁴⁰ Italienisches Patent FI/96/A/000255 (1996)

¹⁴¹ ROMANOWSKI (2003), S.43

¹⁴² GIORGI et al. (2000), S. 158 f.

¹⁴³ BÖTTCHER et al.(2009), S. 103

¹⁴⁴ DI GREGORIO (2010)

¹⁴⁵ z.B. HEERMANN (1995), BÖTTGER (1997), RIECKE (2000), PIASCZYNSKI (2002)

4.5.3 Wirkungsweise der Kalkfestigung

Die Verfestigung der genannten Bindemittel erfolgt in unterschiedlicher Weise.

Zusätze können ebenso die Vorgänge beeinflussen wie bestimmte, beispielsweise in Injektionsmassen enthaltene Zuschlagstoffe.

Bei Calciumcarbonat-Lösungen erfolgt eine Kristallisation festen Calciumcarbonats nach der Verdunstung des Wassers.

Calciumhydrogencarbonat-Lösungen lagern bei der Verdunstung des Lösungsmittels festes Calciumhydrogencarbonat ab, welches aber nicht stabil ist und zu Calciumcarbonat, Kohlendioxid und Wasser zerfällt.¹⁴⁶

Aus Calciumhydroxid-Lösungen bei der Lösungsmittelverdunstung ausgeschiedenes Calciumhydroxid bildet im Substrat unter entsprechendem Wasser- und Kohlendioxidangebot Calciumcarbonat. Feuchtigkeit ist für den Abbindevorgang unabdingbar, da nur gelöstes oder in gelöster Form eindringendes Kohlendioxid für die Carbonatisierung wirksam werden kann.¹⁴⁷ Herkömmliche kalkgebundene Mittel sind prinzipiell wasserbasiert oder wasserhaltig, dennoch ist im Verlauf der Carbonatisierung oft zusätzliche Wasserzugabe erforderlich.

Nach NEY laufen drei Stadien der carbonatischen Erhärtung ab. Diese erfolgen von außen nach innen und können während des Abbindevorgangs gleichzeitig vorliegen, durch Wanderungen von Flüssigkeitsschichten bestehen keine klaren Grenzen.

1. Anfangsstadium:

Die Umwandlung von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu CaCO_3 erfolgt ausschließlich über die Lösung durch die Reaktion mit Kohlensäure:



2. Übergangsstadium

Das außen bereits gebildete CaCO_3 bildet mit Kohlensäure Calciumhydrogencarbonat-Lösungen. Wenn in diese $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Lösung eindiffundiert, fällt CaCO_3 aus. Zuletzt ist sämtliches Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat umgesetzt.

3. Endstadium

Im „ausgehärteten“ Mörtel kommt es immer wieder zur Lösung von CaCO_3 in Wasser (13 mg/l), das bei ausreichendem Kohlendioxidangebot erneut Calciumhydrogencarbonat bildet:



Folglich benötigen Festigungsmittel und Mörtel auf Calciumhydroxidbasis ausreichend Feuchtigkeit, um vollständig carbonatisieren zu können. In Kalk-Frischmörteln soll daher ein notwendiger Gehalt an kondensiertem, flüssigem Wasser 0,8 bis 4 Ma% betragen. Ist der Mörtel zu feucht, werden Poren durch Wasser verstopft und die Diffusion behindert.

¹⁴⁶ Nach DENNINGER (1958)

¹⁴⁷ NEY (1966), S. 10

In trockenerem Mörtel ist hingegen die erforderliche Wasserschicht auf den Kornoberflächen nicht durchgehend vorhanden oder zu dünn und unbeweglich. Die optimale Feuchtigkeit stellt sich, abhängig von den Gegebenheiten (Klima), durch Aufnahme von Wasserdampf und Kapillarkondensation diskontinuierlich immer wieder ein. Die Kapillarstruktur des Mörtels hat entsprechend großen Einfluss. Zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und dem Wassergehalt des Materials besteht ein spezifischer Gleichgewichtszustand, der durch die Sorptionsisotherme grafisch als Kurve dargestellt werden kann. Abhängig von Umgebungsbedingungen und Sorptionsverhalten braucht ein Mörtel einige Zeit, bis er vollständig carbonatisiert; bei Reinkalkmörtel kann das bis zu Jahren dauern.

4.6 Festigungsmittel auf Gipsbasis

Gips wird bis heute als Kitt- und Hinterfüllmaterial zur Behebung von Rissen, Ausbrüchen und Ablösungen an Gipsstuck, Gips- und Anhydritmörteln verwendet.¹⁴⁸

Historisch fand Gips bis ins frühe 20. Jahrhundert zunächst auch für die Hinterfüllung von Kalkputzen Verwendung, später wurde nur noch eine geringe Gipszugabe für Hinterfüllmörtel empfohlen.¹⁴⁹

Über einen Einsatz von Mitteln zur Gefügefestigung auf Gipsbasis sind in der umfangreichen Forschungsarbeit von FELDTKELLER keine Beispiele in der Restaurierungsgeschichte zu finden.¹⁵⁰ Ein Pilotprojekt zur Anwendung gipsbasierter Festigungsmittel stellt die Konservierung des romanischen Estrichbodens in der Kollegiatskirche Wíslca (Polen) dar, die in den 1990er Jahren durchgeführt wurde.¹⁵¹ Neben der Anwendung von Gipswasser zur Oberflächenfestigung des aus Hochbrandgips bestehenden Schmuckbodens fand zur Gefügefestigung eine Suspension aus Halbhydrat, Calciumoxid und Estrichgips in Methylalkohol Anwendung. Die Verwendung der nichtwässrigen Suspension erfolgte hier zur Ermöglichung des tiefen Eindringens der Festigungsmittel in feinste Haarrisse. Nach der Verdunstung des Lösungsmittels ist durch Wasserzugabe die Verfestigung eingeleitet worden.

¹⁴⁸ Vgl. z.B. SCHÖNBURG (2012), S.118

¹⁴⁹ FELDTKELLER (2008), S. 485ff.

¹⁵⁰ Vgl. FELDTKELLER (2008)

¹⁵¹ ZALEWSKI, STEC (1994)

5 CaLoSiL®-Nanodispersionen

5.1 Grundlegendes

5.1.1 Produktentwicklung und Herstellung

Durch den Chemiker Prof. Dr. Ziegenbalg (Freiberg/ Deutschland) wurde seit Ende der 1990er Jahre die Herstellung von Calciummethanolat $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_2$ entwickelt und 2003 patentiert.¹⁵² Dieses Metallalkoholat reagiert stark hygroskopisch. Bei Wasserzufuhr hydrolysiert es zu Calciumhydroxid und Ethanol:



Nach Herstellerangaben kann dabei je Liter Calciummethanolat bis zu 50 g Calciumhydroxid abgeschieden werden.

In Forschungsarbeiten an der Hochschule für Bildende Künste Dresden erfolgten in den Jahren 1999 bis 2004 verschiedene Versuche zur Anwendung von Calciummethanolat als Festigungsmittel für Malschichten und Mörtel.¹⁵³ Es stellte sich heraus, dass die hohe Reaktivität des Calciummethanolats ein Eindringen in poröse Substrate stark behinderte.¹⁵⁴

Es folgten weitere Forschungen am Ingenieurbüro Dr. Ziegenbalg GbR (IBZ) in Freiberg, die zur Entwicklung eines neuen Mittels führten. Durch gezielte Hydrolyse von Calciumalkoholaten wurden Suspensionen von Calciumhydroxid in Alkohol hergestellt und mit geringen Tensidzusätzen stabilisiert. Die Patentierung erfolgte 2008¹⁵⁵.

Trotz umfangreicher Untersuchungen waren mit dieser Herstellungsmethode jedoch keine reproduzierbaren, stabilen Calciumhydroxid-Nanodispersionen zu erhalten. Durch Prof. Dr. Ziegenbalg wurde daher ein neuer Syntheseweg entwickelt, der auf der direkten Umsetzung von Calcium mit Wasser und der nachfolgenden Dispergierung der Partikel in Ethanol beruht. Die Patentierung dieses Verfahrens ist noch nicht erfolgt, daher werden vom Entwickler bisher keine präziseren Angaben mitgeteilt.

Der Feststoffgehalt der Dispersionen beträgt 50 g/l und kann durch nachträgliche Reduzierung des Dispergiermittels noch erhöht werden. Auf dieser Grundlage entwickelte Produkte werden seit 2006 unter der Markenbezeichnung „CaLoSiL®“ durch den Hersteller, die IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG (Freiberg), vertrieben.¹⁵⁶

¹⁵² Patent Nr. DE 103 27 514

¹⁵³ LENZNER (2000); ROMANOWSKI (2003); BÜCKNER (2004)

¹⁵⁴ Vgl. BÜCKNER (2004)

¹⁵⁵ Patent Nr. DE 102 006049923

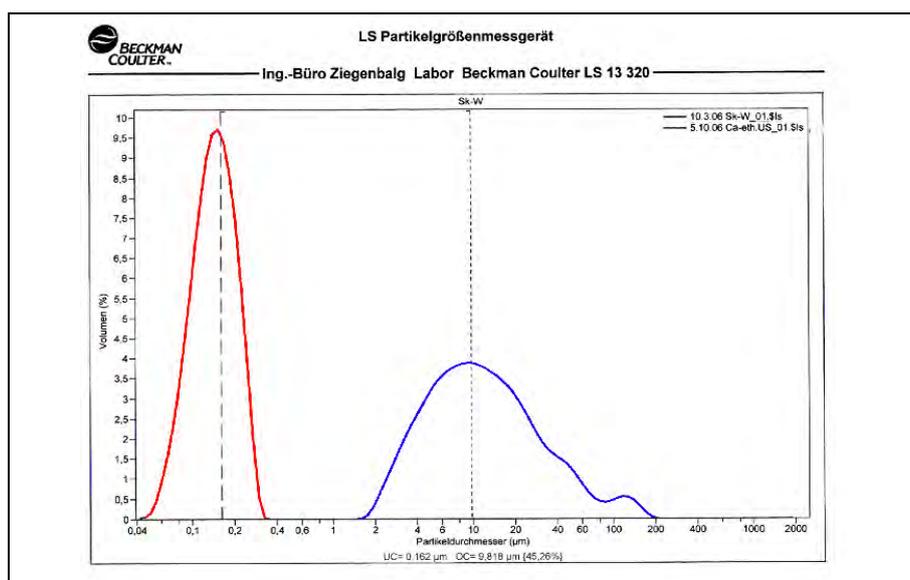
¹⁵⁶ Technische Merkblätter siehe Anhang B, S. 310ff.

5.1.2 Calciumhydroxid-Nanodispersionen

Zusammensetzung

Bei den Produkten der Reihe CaLoSiL® liegen feinst verteilte Calciumhydroxidteilchen in verschiedenen Alkoholen vor. Es handelt sich um Dispersionen aus dem Dispersionsmittel (der kontinuierlichen Phase) Ethanol, n-Propanol oder Isopropanol und der in ihr feinst verteilten dispersen Phase Calciumhydroxid.¹⁵⁷ Von der dispersen Phase wird kein Dispersionsmittel aufgenommen, es handelt sich um eine lyophile Feststoffdispersion.¹⁵⁸ Als heterogenes Gemisch aus feinst verteiltem Feststoff in einer Flüssigkeit werden sie als Suspensionen definiert.¹⁵⁹

Die Feststoffpartikel besitzen die für Calciumhydroxid typische hexagonal-plättchenhafte Kristallform.¹⁶⁰ Der mittlere Wert der Teilchengröße des in den Nanodispersionen vorliegenden Calciumhydroxids wird vom Hersteller mit ca. 130 nm angegeben, der Hauptanteil der Partikel ist 50 bis 300 nm groß (Partikelgrößenmessung Graphik 01). Es handelt sich kolloidchemisch demnach um eine Mischform einer so genannten groben Dispersion (Partikelgrößen >100nm) und eines Kolloids (1-100 nm).¹⁶¹



Graph.01: Partikelgrößenmessung einer CaLoSiL®-Dispersion (rot) und eines wässrig dispergierten Weißkalkhydrats (blau). Abbildung mit freundlicher Genehmigung der IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG, Freiberg/ Deutschland

¹⁵⁷ Nach SCHWUGER (1996), S.282

¹⁵⁸ Vgl. WEDLER (2004), S. 444

¹⁵⁹ Nach DÖRFLER (1994), S. 5f.

¹⁶⁰ Rasterelektronische Untersuchung durch das Institut für anorganische Chemie der RWTH Aachen. In: SCHÖNHOFER (2006), S.13

¹⁶¹ Nach WITTNEBEN (1980), S. 3

Eigenschaften und Wirkungsweise

Die Eigenschaften von Suspensionen sind abhängig von den Eigenschaften der Dispersionsflüssigkeit, der Konzentration der suspendierten Phase, der Größe und Form der suspendierten Teilchen sowie der Ladung der Teilchen und Wechselwirkung zwischen ihnen.¹⁶² Im Falle der CaLoSiL®-Nanodispersionen wird zunächst ein positiver Einfluss des Dispersionsmittels Alkohol auf das Eindringverhalten wegen dessen geringer Oberflächenspannung erwartet. Die geringe Partikelgröße sowie deren eher symmetrische Form und monomere Verteilung sollten geringen Fließwiderstand und niedrige Viskosität bedingen.¹⁶³ Allerdings sind die Eigenschaften einer Suspension nur dann vor allem aus den Eigenschaften der an ihr beteiligten Bestandteile ableitbar, wenn es sich um eine grobe Dispersion handelt. Dem hingegen werden in Kolloiden „mit ihrer äußerst hohen Phasengrenzfläche die in diesen Phasengrenzen wirkenden Kräfte für das Verhalten des ganzen Systems bestimmend“¹⁶⁴. Bei der Beschäftigung mit den CaLoSiL®-Nanodispersionen muss immer die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass sie sich teilweise wie grobe Dispersionen, teilweise wie Kolloide verhalten könnten.

Theoretisch ist davon auszugehen, dass bei der Festigung mit alkoholischen, fast wasserfreien Calciumhydroxid-Dispersionen diese zunächst – besser als wässrige Medien – in das kapillare Porengefüge des Substrats eindringen und die Feststoffe nach Verdunsten des Lösungsmittels als mehr oder weniger kompakte Schicht im Gefüge verbleiben. Wie bei der Austrocknung wässrigen Kalkbindemittels sollten sich bei der Verdunstung des Dispersionsmittels durch Schrumpfen und Verfestigen „kryptokristalline Calciumhydroxidansammlungen“¹⁶⁵ bilden. Dünnschliffe eigener Proben belegen, dass diese Schichten die Wände größerer Poren und Risse auskleiden und kleinere Poren verschließen können oder aber kompakt auf der Substratoberfläche liegen (Abbildungen 01 und 02).

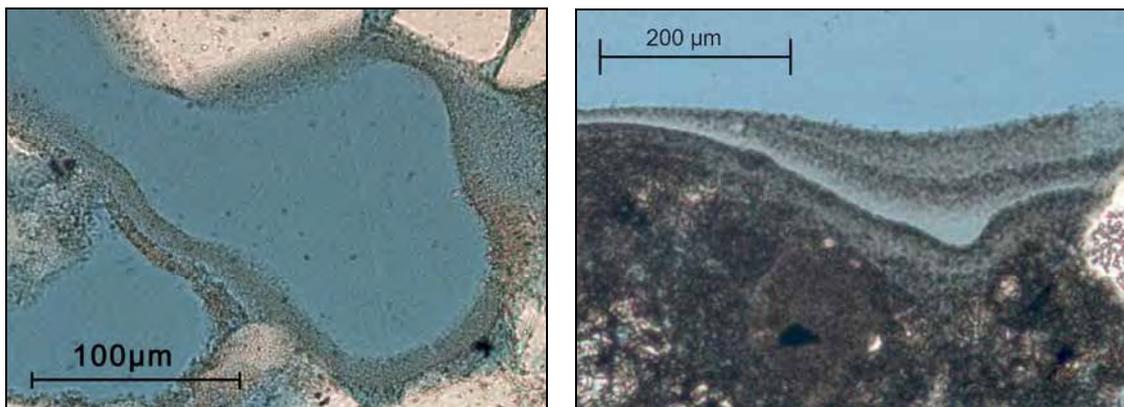


Abb.01,02: Dünnschliffaufnahmen (Polarisatoren ||) jeweils dreimal mit CaLoSiL® getränkter Kalkmörtelproben¹⁶⁶
Aufnahmen: T. Köberle 2010

¹⁶² Ebenda, S. 66

¹⁶³ WITTNEBEN (1980), S. 70ff.

¹⁶⁴ Ebenda, S. 4

¹⁶⁵ Vgl. HOFFMANN (1995), S. 57

¹⁶⁶ Abb.01: Abschnitt 8.6.2, S. 79, Tabelle 03, Probe 1-4. Abb.02: Abschnitt 10.2.4, S. 125f., Probe L_012-4

Schon vor dem Verdunsten des Dispersionsmittels kann eine Koagulation der Nanopartikel einsetzen. Die Stabilität der Dispersion ist maßgeblich auf eine an der Phasengrenze zwischen dispergierter Phase und Dispersionsmittel vorhandene elektrische Doppelschicht zurückzuführen. Wird diese beseitigt, tritt eine irreversible Koagulation der Partikel ein.¹⁶⁷ Dies kann durch Adsorbieren von Ionen im Phasengrenzgebiet geschehen. Daher kann die Gegenwart von Elektrolyten (Salzlösungen) zum Ausflocken von Dispersionen führen.

Ist die Dispersion nicht durch derartige Vorgänge gestört, wird die Verfestigung der dispergierten Phase (Calciumhydroxid) durch „Eintrocknen“ nach Verdunstung des Dispersionsmittels erfolgen. Ob eine Koagulation überhaupt eintritt, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Für das hier vorliegende monodisperse System mit isometrischen Teilchen ist eine eher geringere Koagulationsneigung anzunehmen.¹⁶⁸ Mit der Verdunstung des Dispersionsmittels werden die Teilchenabstände aber immer geringer und schließlich überwinden die Anziehungskräfte der Teilchen die Abstoßungskräfte, welche die Dispersion stabilisieren. Auch ohne die Gegenwart von Elektrolyten wird somit Koagulation ausgelöst. Es ist möglich, dass dafür auch der im Dispersionsmittel enthaltene Wasseranteil eine Rolle spielt. Neben dem Wassergehalt der für Verdünnungen verwendeten technischen Alkohole enthalten alle CaLoSiL® Nanodispersionen einen geringen Wasseranteil, der während der Herstellung entsteht.¹⁶⁹ Der Wassergehalt der Dispersionen ist nach Auskunft des Herstellers bisher nicht bestimmt worden. Er erhöht sich bei der Verdunstung des schneller flüchtigen Alkohols, bis der azeotrope Punkt erreicht ist und die weitere Verdunstung als azeotropes Gemisch erfolgt. Die azeotrope Verdunstung ist allerdings von Temperatur, Luftströmung und Luftfeuchtigkeit abhängig¹⁷⁰. Sollte sie tatsächlich stattfinden, würde die enthaltene Feuchtigkeit für die anschließende Carbonatisierung des Calciumhydroxids nicht zur Verfügung stehen. Wie oben beschrieben, ist ein gewisser Gehalt an flüssigem Wasser aber erforderlich, um Kohlendioxid aus der Luft aufzunehmen und carbonatisieren zu können (vgl. Abschnitt 4.5.3, S. 29f.). Die Carbonatisierung des Calciumhydroxids kann jedoch erst nach Freigabe der Porenräume durch die Verdunstung des Dispersionsmittels beginnen. Dies ist für die notwendige Zufuhr von Kohlendioxid maßgeblich.

Der für die Carbonatisierung erforderliche Wassergehalt muss im Ausgleich des Substrates mit der Luftfeuchtigkeit durch Adsorption sowie durch Kapillarkondensation in den Calciumhydroxidschichten verfügbar werden. Wegen der Feinheit der Partikel und des dadurch bedingten engen Gefüges der Calciumhydroxidlagen ist davon auszugehen, dass in diesen vor allem Mesoporen (>2nm<50nm) und Mikroporen (< 2nm) vorliegen¹⁷¹. Die geringe Porendimension begünstigt die Feuchtigkeitsaufnahme durch Adsorption und Kapillarkondensation. Die Dicke der Calciumhydroxidschichten nach einer einmaligen Applikation mit Nanodispersion betrug an eigenen Proben 10 bis 100 µm (vgl. S. 33, Abbildungen 01 und 02). Diese

¹⁶⁷ WEDLER (2004), S.445

¹⁶⁸ Nach BREZESINSKI/ MÖGEL (1993), S.185

¹⁶⁹ Freundliche Mitteilung von Prof. Dr. Ziegenbalg/ IBZ Salzchemie GmbH

¹⁷⁰ JÜLKE (1962), S.13f.

¹⁷¹ Porenradieneinteilung nach International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)/ vgl. SING et al. (1985)

geringe Dimension sollte, abhängig vom vorhandenen Feuchtigkeitsangebot, eine recht zügige Carbonatisierung begünstigen. Die für die Carbonatisierung von Kalkmörtel von NEY genannte Größenordnung von 0,8 bis 4 Ma% Wasseranteil¹⁷² kann hier nur als Vergleichsgröße gelten (vgl. Abschnitt 4.5.3, S. 29f.).

Flüssiges Wasser kann schon in geringen Mengen zu Porenverschlüssen innerhalb der Calciumhydroxidschichten und damit zur Behinderung der Kohlendioxiddiffusion führen. Je stärker die Schichten sind, desto langsamer dürfte daher eine vollständige Carbonatisierung erreicht werden. Um auch nach mehrfacher Festigung mit Calciumhydroxid-Dispersionen eine zügige, vollständige Carbonatisierung zu gewährleisten, sollte daher die Umsetzung jeder Calciumhydroxidschicht vor der folgenden Applikation abgewartet werden.

5.1.3 Calciumhydroxid-Mikrodispersion

In Erweiterung der Produktpalette wurde 2009 durch die IBZ-Salzchemie GmbH & Co KG eine Calciumhydroxid-Mikrodispersion entwickelt. Nach Herstellerangaben besitzen die Feststoffpartikel eine Größe von 1 bis 3 µm, der Feststoffgehalt beträgt 120 g/l. Als Dispersionsmittel dient Ethanol.¹⁷³

Die Mikrodispersion wird unter der Bezeichnung „CaLoSiL® mikro“ durch den Hersteller vertrieben.

5.1.4 Calciumsulfat-Dispersionen

Das Verfahren zur Produktion der Calciumhydroxid-Nanodispersionen wurde 2007 durch den Hersteller für die Herstellung einer Calciumsulfat-Dispersion modifiziert.

Für die vorliegende Arbeit standen erste Produktproben unter der Bezeichnung „CaSO₄-Sol 1a“ zur Verfügung. Bisher ist das Mittel nicht auf dem Markt.

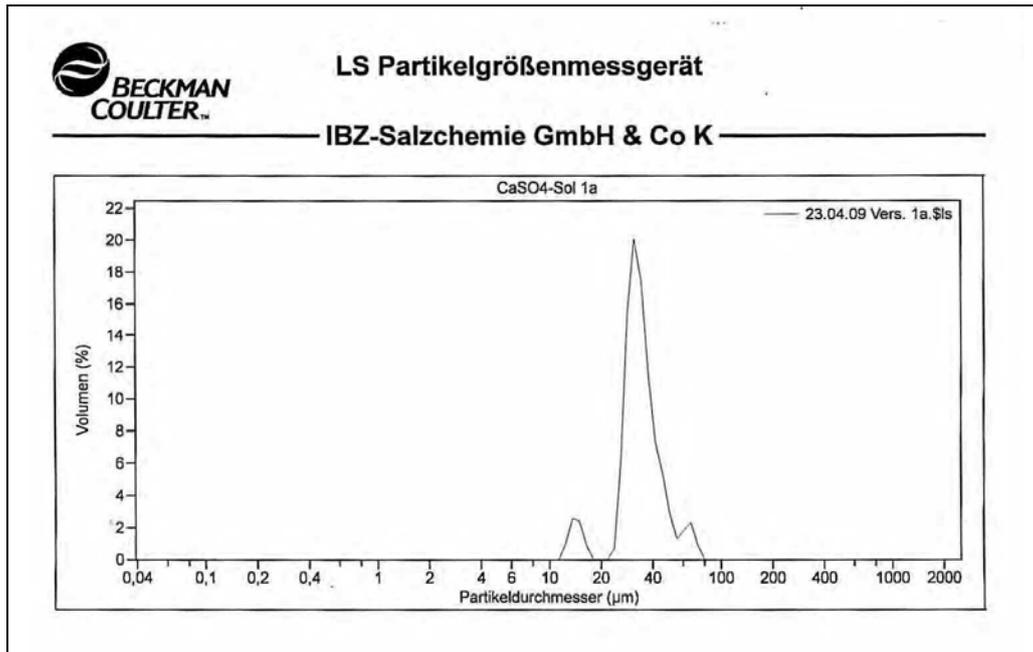
Die Herstellung erfolgte durch Fällung aus Calciumchlorid (CaCl₂) und Natriumsulfat (Na₂SO₄), nach einem „Waschen“ wurde das Calciumsulfat dispergiert.¹⁷⁴

Der Calciumsulfatgehalt im CaSO₄-Sol 1a entsprach 10 g/l. Die Partikelgröße der dispergierten Calciumsulfatteilchen betrug ca. 12 bis 80 µm, der Hauptanteil war ca. 25 bis 45 µm groß (Graphik 02). Es handelte sich um eine Mikrodispersion.

¹⁷² Vgl. NEY (1966) S. 11f.

¹⁷³ Technisches Merkblatt siehe Anhang B, S. 323ff.

¹⁷⁴ Nach freundlicher Mitteilung von Herrn Prof. Dr. Ziegenbalg.



Graph.02: Partikelgrößenmessung der Calciumsulfat-Dispersion „CaSO₄-Sol 1a“. Abbildung mit freundlicher Genehmigung der IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG, Freiberg/ Deutschland

5.2 Forschungsstand

Seit der Entwicklung der ersten CaLoSiL®-Produkte sind Forschungsarbeiten zu diesen Mitteln in verschiedenen Hochschulen als Seminar- oder Abschlussarbeiten durchgeführt worden:

- KEEDING (2005), Diplomarbeit Fachhochschule Potsdam
- SCHÖNHOFER (2005), Chemiesemesterarbeit Fachhochschule Köln
- ADOLFS (2005), Chemiesemesterarbeit Fachhochschule Köln
- SCHÖNHOFER (2006), Diplomarbeit Fachhochschule Köln
- ADOLFS (2007), Diplomarbeit Fachhochschule Köln
- WILKE (2007), Bachelor Thesis Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/ Holzminden/ Göttingen
- WENNEMER (2007), Bachelor Thesis Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/ Holzminden/ Göttingen
- KRAUSE (2009) Chemiesemesterarbeit Fachhochschule Köln

Zudem wurden Ergebnisse erster Pilotprojekte veröffentlicht:

- Konservierung des „Lichfield Angel“ durch HOWE (2007)
- Konservierung des Nordportals der Abteikirche Tholey. Institut für Steinkonservierung (IFS) e.V.: DBU-Projekt Az 18636, durch PIASZCZYNSI und EGLOFFSTEIN (2007)

KEEDING (2005) befasste sich eingehend mit der Festigung von Kalkmörtel mit verschiedenen Kalk-Alkohol-Dispersionen und bezog hierbei CaLoSiL® auf Basis n-Propanol mit einem

relativ niedrigen Feststoffgehalt von 10 g/l ein. Bei allen Anwendungsversuchen wurden oberflächige Auflagerungen festgestellt, es wird sogar von „*filmartigen Schichten*“¹⁷⁵ berichtet. Als Ursache wurde angenommen, dass durch die Verdünnung der Dispersion eine sehr schnelle Agglomeration erfolgte und daher das Eindringen be- bzw. verhindert wurde.

Die Chemiesemesterarbeiten von SCHÖNHOFER (2005) und ADOLFS (2006) sind nicht zugänglich und nur in Form kurzer Ergebnisdarstellungen in einer sekundären Quelle bekannt.¹⁷⁶ Die Arbeit von SCHÖNHOFER (2005) hatte Festigungsversuche an verwittertem Naturstein mit CaLoSiL® auf Ethanol-Basis zum Gegenstand. Alle mit Dispersionen unterschiedlichen Feststoffgehaltes (ab 28 g/l) durchgeführten Versuche an Kalksandstein, Sandstein und Trachyt zeigten keinerlei Tiefenverteilung des eingebrachten Calciumhydroxids. Für das „*schlechte Eindringverhalten*“¹⁷⁷ (unter 1 mm) wurde einerseits das schnelle Verdunsten des Ethanols und damit die rasche Gelbildung der Dispersion, andererseits eine zügige Koagulation wegen der hohen Feststoffgehalte ursächlich vermutet. Durch Verdünnung der Dispersion mit n-Propanol konnte eine etwas verbesserte Tiefenverteilung erreicht werden.

Formuliertes Ziel der Semesterarbeit von ADOLFS (2005) war es, durch Modifizierung des Festigungsmittels dessen mangelhaftes Eindringverhalten zu verbessern. Die Anwendung von in Ethanol gelösten Tensiden bewirkte eine Verringerung der Weißschleierbildung. Wässrig gelöste Tenside führten recht schnell zur Gelbildung in der Dispersion. Reiner Wasserzusatz rief ab einem Wasseranteil von 10 Vol% eine starke Herabsetzung der Stabilität der Dispersion hervor. Bei Tränkversuchen an Mörtelprüfkörpern wurde festgestellt, dass wasserfreie Nanodispersion am besten eindringt. Die erreichte Festigkeitszunahme wurde prinzipiell als gering eingeschätzt.

Erprobt wurde auch ein Zusatz von unpolarem n-Pentan, wohl wegen dessen geringer Viskosität. An Sandprüfkörpern soll sich hierdurch das Eindringverhalten verbessert haben. Methoden und Bedingungen der durchgeführten Experimente und ihrer Evaluierung sind nicht bekannt.

Auch in der Diplomarbeit von SCHÖNHOFER (2006) stand die Frage des Eindringverhaltens im Mittelpunkt. Testreihen mit erhöhten Tensidzusätzen erbrachten „*keine eindeutigen Tendenzen*“¹⁷⁸ für eine Verbesserung des Penetrationsverhaltens. Die Gesamtporosität der Substrate zeigte keinen erkennbaren Einfluss auf die Tiefenverteilung, wohl aber die Porenradienverteilung. Es seien, verglichen mit dem Partikeldurchmesser der Dispersionen, deutlich größere Porenradien erforderlich, um ein gutes Eindringen zu ermöglichen. Ein anderer Erklärungsansatz für die Ursachen der mangelhaften Tiefenverteilung ging von einer massiven und schnellen Anlagerung der polaren Calciumhydroxidteilchen im polaren Porengefüge der Mörtel aus. Diesem Effekt sollte die Beimischung von unpolarem n-Pentan entgegenwirken. Tatsächlich konnte bei Versuchen mit steigendem n-Pentan-Anteil (bis zu 30 Vol%) eine geringere Weiß-

¹⁷⁵ KEEDING (2005), S. 67

¹⁷⁶ ADOLFS (2007), S. 56f und 58ff.

¹⁷⁷ Ebenda, S. 56

¹⁷⁸ SCHÖNHOFER (2006), S. 60

schleierbildung auf Sandprüfkörpern beobachtet werden. Behandelte Kalkmörtel zeigten hingegen ausnahmslos Weißschleier.

Als weiterer Aspekt wurde ein Einfluss der konzentrationsabhängigen Viskosität auf das Eindringverhalten angenommen. Mit unterschiedlich konzentrierten Nanodispersionen getränkte Mörtelprobekörper sind nach vollständiger Verdunstung der Lösungsmittel zerteilt und mit Indikatorlösung besprüht worden, um die Calciumhydroxidverteilung in den Strukturen nachzuweisen. Es zeigte sich, dass die Tiefenverteilung mit zunehmender Feststoffkonzentration abnimmt. Die Schlussfolgerung war, dass die Viskosität als „Schlüssel zur Optimierung des Penetrationsverhaltens“¹⁷⁹ zu bewerten sei und auch die positiven Ergebnisse der n-Pentan-Zugabe wohl auf der geringeren Viskosität des Zusatzes zurückzuführen wäre. In einer weiteren Testreihe konnte durch die Kombination der Veränderung der Zusammensetzung des Dispersionsmittels durch bis zu 33 Vol% niedrigviskosen n-Pentans oder Acetons und der Verringerung des Feststoffgehaltes (auf 12,5 g/l) an Mörtelprüfkörpern eine vergleichsweise gute Tiefenverteilung ohne Weißschleierbildung erreicht werden.

Gegenstand der Diplomarbeit von ADOLFS (2007) war die praktische Umsetzung dieser Ergebnisse. An einer Musterfläche wurden zwei historische Kalkputze mit CaLoSiL® auf Basis von Ethanol mit 12,5 bzw. 25 g/l Feststoffgehalt und einem anteiligem Acetongehalt von 25 bis 30 Vol% in mehreren Arbeitsgängen behandelt. Die Klimabedingungen sind protokolliert und wiesen erhebliche Schwankungen auf. Die Wartezeit zwischen den einzelnen Applikationen war sehr unterschiedlich und betrug wenige Stunden bis einige Wochen. Im Ergebnis entstand auf der gesamten Fläche ein starker Weißschleier. Die haptische Prüfung erwies eine deutliche Festigkeitssteigerung. Bohrwiderstandsmessungen haben aber keine auswertbaren Daten erbracht.

Umfangreiche Test- und Prüfreihen wurden an Mörtelprismen durchgeführt, wobei diese durch Nachstellung der beiden historischen Mörtel in zwei Serien hergestellt wurden.

Anwendung fanden:

- 1) CaLoSiL® auf Ethanol-Basis, 12,5 g/l Feststoffgehalt und 30 Vol% Acetonanteil
- 2) CaLoSiL® auf Ethanol-Basis, 25 g/l Feststoffgehalt und 25 Vol% Acetonanteil
- 3) CaLoSiL® auf Isopropanol-Basis, 15 g/l Feststoffgehalt
- 4) CaLoSiL® auf Isopropanol-Basis, 15 g/l Feststoffgehalt bei zusätzlicher Nachbehandlung mit einem Carbonatisierungshilfsmittel (DiLoCarB®, IBZ GbR Freiberg).

Die nach der Behandlung durchgeführte Prüfung der Eindringtiefe mit einem Indikator brachte höchst unterschiedliche Ergebnisse, die auf oberflächennahe Verdichtungen im Gefüge der Mörtelprismen zurückgeführt wurden. Geschlussfolgert wurde „der enorme Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit eines Baustoffes auf das Penetrationsverhalten von Calciumhydroxid-Sol“.¹⁸⁰ Auf allen Probekörpern war nach der Aushärtung ein Weißschleier zu beobachten. Die Gesamtporosität und das kapillare Wasseraufnahmevermögen zeigten sich bei allen behandelten Proben gegenüber der Referenz verringert, das E-Modul und die Biegezugfestigkeit erhöht.

¹⁷⁹ Ebenda, S. 68

¹⁸⁰ ADOLFS (2007), S.86

Abgesehen von der gleichen Tendenz fielen die Ergebnisse an beiden Substraten teilweise sehr unterschiedlich aus. Insgesamt zufrieden stellende Ergebnisse wurden lediglich für das Festigungsmittel 1) an einer der Mörtelserien festgestellt. Die Anzahl der jeweiligen Prüfungen ist nicht dokumentiert, wahrscheinlich handelt es sich um Einzelwerte. Aussagekraft und Bewertung der Messergebnisse sind daher kritisch zu sehen.

WILKE (2007) hat in ihrer Bachelor-Arbeit die Festigung von Marmor mit CaLoSiL® erprobt. Die Behandlung künstlich entfestigten Marmors mit CaLoSiL® auf Ethanol- und Isopropanol-Basis (25 g/l Feststoffgehalt) hat teilweise Weißschleier erzeugt und zeigte keine nennenswerte Zunahme der Biegezugfestigkeit bei nur geringer Erhöhung der Druckfestigkeit. Eine zweite Testreihe zur Verfestigung von Lockermaterial (Marmormehl) hatte keinen Erfolg.

Die Arbeit von WENNEMER (2007) ist dem Titel nach der Steinfestigung gewidmet. Für die Versuche fand aber ausschließlich Lockermaterial Verwendung. Brechsand aus Sandstein wurde mit CaLoSiL® gemischt und nach Aushärtung nochmals mit CaLoSiL® getränkt. Es ist nicht dokumentiert, wie viel Festigungsmittel eingebracht wurde. Weißschleier stellten sich schon bei der ersten Behandlung ein, die Festigungszunahme war zuletzt sehr gering.

Die Arbeit von HOWE (2007) beinhaltet die Behandlung von Prüfkörpern aus Kalkstein mit CaLoSiL® auf Ethanol- und Isopropanol-Basis (15 und 25 g/l Feststoffgehalt). Die behandelten Proben sind nur hinsichtlich der Schleierbildung beurteilt und nicht weiter untersucht worden. Die ethanolbasierte Dispersion zeigte gegenüber isopropanolbasierten eine geringere Tendenz der Weißschleierbildung. Ein Abdecken mit Folie konnte die Schleierbildung ebenso etwas verringern wie die Reduzierung der Feststoffkonzentration. Weißschleier sind aber in jedem Fall festzustellen gewesen.

Von PIASZCZYNSI und EGLOFFSTEIN (2007) sind im Rahmen eines DBU-Projektes durchgeführte Vortests und Konservierungsproben für die Konservierung von Sandstein veröffentlicht worden. Da keine Angaben zur Lösungsmittelbasis der angewendeten Festigungsmittel genannt werden, sind die dargestellten Ergebnisse nicht aussagekräftig. Bei den Anwendungen wurden in allen Fällen Weißschleier erzeugt.

KRAUS (2009) hat CaLoSiL® im Vergleich mit anderen Festigungsmitteln für die Konsolidierung von natriumchloridbelasteten Lockermaterialgemischen aus Gips- und Kalkstein erprobt. In Vorproben zeigte sich, dass in der ethanolbasierten Dispersion in Gegenwart von Natriumchlorid die Koagulation der Feststoffpartikel beschleunigt wird. Während der mehrmaligen Behandlung der Lockersubstrate entstanden starke Weißschleier und Salzausblühungen. Erst nach acht Festigungsgängen wurde eine als ausreichend eingeschätzte Festigkeit erreicht.

Zur weiteren Produkt- und Anwendungsforschung der CaLoSiL® Nano-Dispersionen wurde ab 2008 das EU-Projekt STONECORE durchgeführt (siehe Vorbemerkung, S. 6), in deren Rahmen die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Untersuchungen geleistet wurden.

Das Projekt fand im August 2011 mit einer in Freiberg veranstalteten Tagung seinen Abschluss. Eine umfängliche Publikation der Projektarbeit steht noch aus, eine erste Auswahl

von Ergebnissen ist im Rahmen des European Workshop on Cultural Heritage Preservation während einer Tagung im September 2011 in Berlin durch verschiedene Projektpartner vorgestellt und in einem Tagungsband veröffentlicht worden.¹⁸¹

5.3 Forschungsaufgabe

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Prüfung der Anwendbarkeit von Nanodispersionen der CaLoSiL® Produktreihe für Konservierungsaufgaben an Putz, Stuck und Wandmalerei.

Zwei Hauptaspekte waren hierfür ausschlaggebend. Einerseits erschienen die Nanodispersionen aufgrund ihrer Produkteigenschaften für die Gefügefestigung von porösen Systemen besonders geeignet zu sein. Die geringe Partikelgröße der Feststoffe und der im Vergleich zu herkömmlichen kalkbasierten Festigungsmitteln sehr hohe Wirkstoffgehalt lassen erwarten, dass die Mittel in Poren und Gefügedefekte gut eindringen können und hier ein mineralisches, mithin nicht filmbildendes Stützgerüst auszubilden vermögen. Für kalk- und gipsgebundene Mörtel stünden mit den Calciumhydroxid- bzw. Calciumsulfat-Dispersionen materialidentische Festigungsmittel zur Verfügung, die der Forderung nach Kompatibilität von Konservierungsmitteln in hohem Maße gerecht werden können. Andererseits ermöglichen die alkoholischen Nanodispersionen praktisch wasserfreies Arbeiten. Probleme, die von wässrigen bzw. wasserhaltigen Konservierungsmitteln beispielsweise durch Quell- oder Löseprozesse an wasserempfindlichen Putzgrund- oder Mörtelbestandteilen sowie Fassungen hervorgerufen werden können, wären hierdurch möglicherweise ebenso vermeidbar wie Löse- und Transportprozesse von Salzen. Es sollte weiterhin untersucht werden, ob auf der Basis der Nanodispersionen modifizierte Konservierungsmittel für die Behandlung verschieden gearteter und dimensionierter Putz- und Stuckschäden hergestellt werden können und damit eine praktisch wasserfreie, rein mineralische Konservierung umsetzbar ist. Hierfür wurde untersucht, inwieweit die Nanodispersionen durch geeignete Zusätze und Zuschläge für die überbrückende Verfestigung größerer Gefügedefekte in Mörteln sowie für Hinterfüllungen und Kittungen eingesetzt werden können.

¹⁸¹ KRÜGER (2011)

5.4 Allgemeine Vorgehensweise

Die Prüfung der Anwendbarkeit der Lösungsmittelbasierten Nanodispersionen war einerseits durch die Anforderungen von Gefügefestigungen an Putz- und Stuckmaterial bestimmt, andererseits durch die Verwendungsmöglichkeit als Bindemittel oder Bindemittelkomponente für Hinterfüllungen und Kittmassen.

Eine Übersicht über die angewendeten Stoffe folgt in Kapitel 6 (S. 43f.).

Mittel für konservatorische Gefügefestigungen haben eine Reihe von Bedingungen zu erfüllen, die oben dargelegt sind (Abschnitt 4.1, S. 18f.). Im Zuge dieser Arbeit sind folgende Aspekte überprüft worden:

- Eindringverhalten des Festigungsmittels
- Festigungswirkung
- Tiefenverteilung des festen Bindemittels
- Auswirkungen auf Porosität und Wasseraufnahmefähigkeit des Substrats

Untersucht wurden folgende Einflussfaktoren:

- Qualität des Substrats
- Gehalt löslicher Ionen im Substrat
- Porosität des Substrats
- Bedingungen während der Verdunstung des Lösungsmittels
- Klimabedingungen
- Applikationstechnik und -methode

Für die ersten Testreihen wurden lose Sande als Substrate verwendet. Dies basiert auf der Vorüberlegung, dass hierbei die Beeinflussung von Vorgängen, Abläufen und Ergebnissen durch Bindemittel im Substrat ausgeschlossen werden kann. Unter Berücksichtigung der hierbei gewonnenen Ergebnisse schlossen sich umfangreiche Testbehandlungen von Mörtelprüfkörpern an. Die Mörtelmuster orientierten sich dabei an der Zusammensetzung und Festigkeit von historischen Mörteln, an denen sowohl an Proben im Labor als auch unter realen Bedingungen Anwendungen durchzuführen waren. Die Behandlungsmethode und die wirksamen Einflüsse sowie vor allem die Festigungsmittel waren in vielfacher Modifizierung zu untersuchen. Jede Behandlung war an einer Serie mehrerer Prüfkörper durchzuführen, um durch den Vergleich der Beobachtungen und gemessenen Werte eine fundierte Bewertung und Interpretation vornehmen zu können. Für das realisierbare Forschungsprogramm mussten daher Untersuchungsschwerpunkte festgelegt und wenige, möglichst aussagekräftige Prüfmethode ausgewählt werden.

Den Bearbeitungsschwerpunkt der Laborversuche stellte die Anwendung von Kalkmörteln mit Calciumhydroxid-Nanodispersionen dar. An Prüfkörpern aus Gipsmörtel wurden vergleichende Anwendungsversuche durchgeführt. Während der bereits laufenden Untersuchungen

wurde durch den Hersteller eine Calciumsulfat-Dispersion entwickelt. Deren Anwendbarkeit war in zusätzlichen Experimenten zu prüfen (Abschnitt 5.1.4, S.35).

Die im Rahmen des STONECORE-Projektes ursprünglich geplante Entwicklung von Bariumhydroxid-Nanodispersionen konnte nicht realisiert werden.

Aufgrund des Arbeitsumfangs beschränkte sich das Untersuchungsprogramm auf die Anwendung reiner Calciumhydroxid- und Calciumsulfat-Dispersionen. Versuche zur Wirkungsweise von Gemischen mit Kieselsäurederivaten sind parallel von anderen Partnern des STONECORE-Projektes unternommen worden.¹⁸²

Die im Laborversuch an Mörtelmustern erlangten Ergebnisse sollten an realen Objekten überprüft werden. Hierzu sind, gemeinsam mit dem Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, Bearbeitungsbereiche an zwei ruinösen Schlössern des 18. Jahrhunderts ausgewählt worden. Schloss Leuben bei Oschatz besitzt fragmentierte Reste von Fassadenstuck und gefassten Innenputzen aus dolomitischem Kalkmörtel, im Schloss Dahlen befindet sich ein Raum mit stark geschädigtem Gipsstuck und –putzbestand.

Vorbereitend wurden zunächst Behandlungstests an Proben der zur Musterbehandlung vorgesehenen historischen Mörtel unter definierten Bedingungen im Labor durchgeführt.

¹⁸² Bisher publizierte Ergebnisse siehe PIASZCZYNSKI / WOLF (2011), siehe auch Technisches Merkblatt, Anhang B, S. 320

6 Verwendete Nanodispersionen und deren Modifikationen

Unmodifizierte Produkte

Basis Ethanol:

CaLoSiL[®]E25

(25g Ca(OH)₂ in 1 Liter Ethanol, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

CaLoSiL[®]E50

(50g Ca(OH)₂ in 1 Liter Ethanol, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

CaLoSiL[®]E25AC

(25g Ca(OH)₂ in 1 Liter ca. 95 Ma% Ethanol + 5 Ma% Aceton, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

CaLoSiL[®]E25H

(25g Ca(OH)₂ in 1 Liter ca. 95 ma% Ethanol + 5 Ma% Heptan, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

CaLoSiL[®]pastös

(250g Ca(OH)₂ pro Liter Ethanol, mittlere Partikelgröße 50 nm...1 µm)¹⁸³

Basis Isopropanol:

CaLoSiL[®]IP25

(25g Ca(OH)₂ in 1 Liter Isopropanol, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

CaLoSiL[®]IP50

(50g Ca(OH)₂ in 1 Liter Isopropanol, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

CaLoSiL[®]IP25AC

(25g Ca(OH)₂ in 1 Liter ca. 95 Ma% Isopropanol + 5 Ma% Aceton, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

CaLoSiL[®]IP25H

(25g Ca(OH)₂ in 1 Liter ca. 95 Ma% Isopropanol + 5 Ma% Heptan, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

Basis n-Propanol:

CaLoSiL[®]NP25

(25g Ca(OH)₂ in 1 Liter n-Propanol, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

CaLoSiL[®]NP50

(25g Ca(OH)₂ in 1 Liter n-Propanol, mittlere Partikelgröße 50...250 nm)

Neben den Nano-Dispersionen wurde die Ca(OH)₂-Mikro-Dispersion **CaLoSiL[®]mikro** verwendet (Abschnitt 5.1.3, S. 35).

¹⁸³ Technisches Merkblatt siehe Anhang B, S. 321f.

Modifikationen

Verdünnungen wurden aus unmodifizierten CaLoSiL[®]-Nanodispersionen mit 25g/l oder 50g/l Feststoffgehalt hergestellt.

Die mit dem jeweiligen Alkohol hergestellten Verdünnungen werden analog der Produktbezeichnung mit dem Kürzel des Lösungsmitteltyps und der Konzentration als Zahl (entspricht jeweils dem Feststoffanteil g/l) angegeben:

z.B. *[E5]* für mit Ethanol auf 5 g/l verdünntes CaLoSiL[®] auf Ethanolbasis.

Von SCHÖNHOFER (2006) und ADOLFS (2007) wurden durch die Beimischung von Aceton positive Ergebnisse hinsichtlich der Vermeidung von Weißschleiern erreicht (vgl. Abschnitt 5.2, S. 37). Daher sind auch hier Verdünnungen mit Acetonanteil erprobt worden. Sie erfolgten immer mit einer anteiligen Acetonmenge von 40 Vol% bezogen auf das Gesamtvolumen der Dispersion. Dies entspricht der maximal möglichen Zugabemenge, eine Beimischung von über 40 Vol% Aceton führt zu einer Destabilisierung der Nanodispersionen¹⁸⁴. Bei der Herstellung von niedrigen Feststoffkonzentrationen wurde entsprechend mit Aceton und dem jeweiligen Lösungsmittel der Stammdispersion gearbeitet. Die acetonhaltigen Verdünnungen werden analog der Produktbezeichnung mit dem Kürzel des Lösungsmitteltyps der Stammdispersion und der Konzentration als Zahl (entsprechend [g/l] Feststoffanteil) sowie dem Zusatz *AC* angegeben:

z.B. *[NP15AC]* für mit Aceton und n-Propanol auf 15 g/l verdünntes CaLoSiL[®] auf n-Propanolbasis mit 40 Vol% Acetonanteil.

¹⁸⁴ Vgl. SCHÖNHOFER (2006), S. 74

7 Versuche mit Lockersubstraten

7.1 Zielstellung

Die Vorversuche sollten einen ersten Aufschluss über grundsätzliche Wirkung und Verhalten der Nanodispersionen geben. Diese Vorversuche erfolgten ausschließlich mit Calciumhydroxid-Nanodispersionen. Überprüft wurde der Einfluss der Umgebungsfeuchte, der Materialfeuchte und Porosität des Substrates, der Verdunstungsbedingungen nach erfolgter Applikation sowie der Gehalt verschiedener löslicher Salze im Substrat auf das Eindringverhalten, die Verteilung im Mörtelgefüge nach Aushärtung sowie auf den Carbonatisierungsgrad der CaLoSiL[®]-Sorten.

7.2 Experimentelles

7.2.1 Materialien

Sandmischungen:

- 1) Quarzsand 0,04...1,0 mm

Das Mischungsverhältnis von verschiedenen Korngrößenfraktionen erfolgte hinsichtlich einer optimierten Sieblinie.¹⁸⁵

- 2) Quarzsand 0,71...1,0 mm (Grobmischung mit enger Korngrößenverteilung durch Fraktionierung von Quarzsand hellgrau/ feiner Sand 0,5...1,0 mm mit Normsieb 0,71 mm)

- 3) Quarzmehl 0,125...0,15 mm (Feinmischung mit enger Korngrößenverteilung durch Fraktionierung von Quarzmehl gesiebt/ 0,04...0,15 mm mit Normsieb 0,125 mm)

Alle Ausgangsmaterialien wurden von der Kremer Pigmente GmbH & Co. KG, Aichstetten, bezogen. Eine Vorkonditionierung der Sande (Temperatur, Materialfeuchtigkeit) erfolgte nicht.

Calciumhydroxid-Dispersionen:

unmodifizierte Nanodispersionen von IBZ Salzchemie GmbH & Co. KG, Freiberg:

CaLoSiL[®]E25

CaLoSiL[®]IP25

CaLoSiL[®]NP25

CaLoSiL[®]E25AC

CaLoSiL[®]E25H

CaLoSiL[®]IP25AC

CaLoSiL[®]IP25H

¹⁸⁵ Die Vorbereitung der Substrate erfolgte durch Dipl. Geol. T. Köberle. Zur Ermittlung der Mischungsverhältnisse siehe Bericht STONECORE 09/06/25, Anhang B, S. 326f.

Salze:

Calciumchlorid (CaCl_2) ($\geq 97\%$, getrocknet, Granulat)

Kaliumnitrat (KNO_3)

Natriumchlorid (NaCl)

Magnesiumsulfat (MgSO_4) ($\geq 99\%$, getrocknet, reinst, Magnesiumsulfathydrat)

Für die Versuche mit salzhaltigen Substraten (Durchführung und Ergebnisse Abschnitt 7.6, S. 50f.) wurden trockene Salze unter die entsprechenden Sande gemischt (keine Fraktionierung). In einer weiteren Versuchsreihe wurden wässrige Salzlösungen mit der Pipette zum Substrat gegeben.

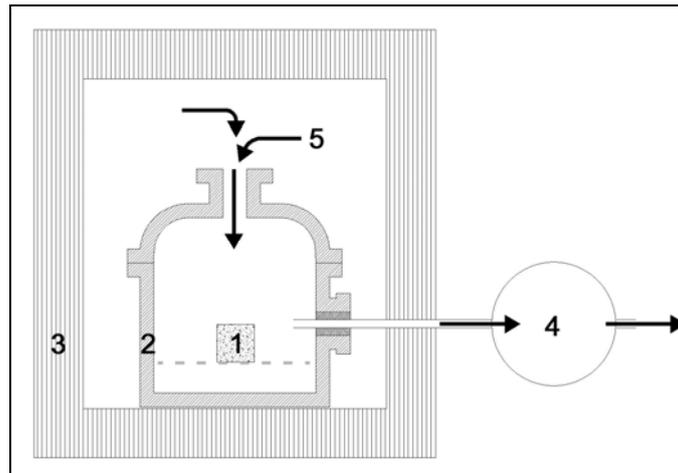
7.2.2 Versuchsaufbau

Definierte Massen der verschiedenen losen Sandmischungen wurden in oben offene, transparente Polymerkunststoffbehälter (Grundfläche $2,7 \times 2,7$ cm) gefüllt und die definierten Massen der jeweiligen Nanodispersionen anschließend mit der Pipette appliziert. Erste Vorproben zeigten, dass die einfache Tränkung des Sandes durch Applikation der Nanodispersion bis zur Sättigung in keinem Fall eine Verfestigung erbrachte. Daher wurde mit höheren Mengen Nanodispersion gearbeitet, der Überschuss blieb im Polymerkunststoffbehälter zunächst über dem Substrat stehen.

Für die ersten Testreihen sind zu 3g Sandmischung jeweils 4g Nanodispersion gegeben worden. Für die Behandlungsproben mit anschließender Lagerung im Klimaschrank (Mytron KPK120) wurden zugunsten einer besseren Bewertbarkeit der Verteilung in der Tiefe die Mengen verdoppelt (6g Sand + 8g Nanodispersion).

Für die Beobachtung des Verhaltens in Gegenwart von Salzen (Abschnitt 7.6, S. 50f.) erfolgte für die geringeren Salzkonzentrationen eine Änderung des Verhältnisses zugunsten des Substrats (15g Sandmischung mit variiertem Salzgehalt + 5g Nanodispersion).

Die Applikation erfolgte stets unter unkonditionierten Laborbedingungen. Unmittelbar danach wurden die Proben bis zur Aushärtung, wenigstens aber sieben Tage, unter verschiedenen Feuchtigkeitsbedingungen gelagert. Hierfür sind in Exsikkatoren mithilfe vorgetrockneten Silikagels relative Luftfeuchtigkeiten von ca. 3 % sowie ca. 100 % durch eingestellte Wasserschalen eingestellt worden. Im Klimaschrank wurden Werte von 40 %, 55 %, 70 % sowie 85 % realisiert. In Exsikkatoren und Klimaschrank erfolgte eine zusätzliche CO_2 -Zufuhr (CO_2 -Atmosphäre 3,0 %). Die Messsensoren im Klimaschrank können durch das verdunstende Lösungsmittel beeinflusst und beschädigt werden. Daher wurden die Proben auf Siebeinsätzen in gläsernen Exsikkatoren gelagert und diese in den Klimaschrank gestellt (Graphik 03). Durch eine kleine Pumpe wurde eine geringe Luftmenge permanent aus dem Behälter und aus dem Schrank geleitet. Durch die unverschlossene Deckelöffnung im Exsikkator strömte die klimatisierte Luft nach.



Graph.03: Schematische Darstellung der Lagerung behandelter Prüfkörper: Probe auf Sieb (1), Exsikkator (2), Klimaschrank (3), Pumpe (4), in den Exsikkator nachströmende, klimatisierte Luft (5)

Für die unter unkonditionierten Laborbedingungen belassenen Proben betrug die gemessene relative Luftfeuchtigkeit ca. 35-40 %, die Raumtemperatur ca. 18-20°C.

7.2.3 Prüfmethoden

Die durchsichtigen Behälter ermöglichten eine Einschätzung der nach Aushärtung erreichten Feststoffverteilung der Dispersionen im Substrat nach Augenschein.

Weißfärbung, Schleier- und Krustenbildung sowie Schwundrisse wurden nach visuellem Erscheinungsbild beurteilt.

Durch Aufsprühen einer Phenolphthaleinlösung (0,1 %ig in 70 %igem Ethanol) wurde festgestellt, ob eine vollständige Carbonatisierung vorlag. Im pH-Bereich 8,2-10 schlägt die Phenolphthaleinlösung in rote Farbe um¹⁸⁶ und zeigt somit an, ob noch basisches Calciumhydroxid im Substrat vorliegt.

Die Überprüfung der Verfestigung des Lockermaterials erfolgte durch manuelle Kratzprobe mit dem Spatel. Da im besten Falle eine nur äußerst geringe Bindung erreicht werden konnte, wurde bei diesen Vorproben keine weitere Festigkeitsprüfung unternommen.

¹⁸⁶ STRÄHLE/ SCHWEDA (2006), S. 72

7.3 Porosität des Substrats

Zielstellung

Der Vorversuch hatte zum Inhalt, die Wirkung der Nanodispersionen gegenüber Substraten mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung und davon abhängig unterschiedlicher Porosität zu prüfen.

Durchführung

Die Sandmischungen 1, 2 und 3 wurden mit CaLoSiL[®]E25, IP25 sowie NP25 versetzt. Der gesamte Versuch erfolgte unter unkonditionierten Laborbedingungen.

Ergebnisse

Unter den vorherrschenden Bedingungen zeigte CaLoSiL[®]E25 eine deutliche Tendenz zur Aufkonzentration an der Substratoberfläche/ Verdunstungsfläche. Diese war bei allen drei Substraten festzustellen, fiel aber an den eng fraktionierten Sanden (Mischungen 2 und 3) sichtbar stärker aus. CaLoSiL[®]IP25 zeigte ähnliche Wirkung, allerdings weniger stark ausgeprägt. CaLoSiL[®]NP25 entwickelte eine homogene Verfestigung der Substrate ohne sichtbare Veränderungen an der Oberfläche.

Die einzelnen Ergebnisse sind im Protokoll Nr. 01-1 dokumentiert.¹⁸⁷

Bewertung

Da die Phänomene vor allem zwischen den Festigungsmitteln, weniger zwischen den Substraten größere Unterschiede zeigten, ist hierfür eher die Sensibilität der Dispersionen bzw. ihrer Wirkungsweise gegenüber den vorherrschenden (klimatischen) Bedingungen ursächlich.

7.4 Verdunstungsbedingungen

Zielstellung

Die Testreihen dienten zur Prüfung der Wirkung einer Abdeckung der Probenbehälter nach erfolgter Applikation, wodurch die Verdunstung verzögert werden sollte.

Durchführung

Die Sandmischung 1 wurde in je zwei Behältern mit CaLoSiL[®]E25, IP25 sowie NP25 versetzt. Für die Abdeckung fanden eine bzw. vier Lagen Zellstofftuch Verwendung. Der gesamte Versuch erfolgte unter unkonditionierten Laborbedingungen.

Ergebnisse

Prinzipiell war eine Aufkonzentration der Festigungsmittel an der Oberfläche (Verdunstungsfläche) zu beobachten. Bei CaLoSiL[®]IP25 ist dieser Effekt deutlich geringer als bei E25 und NP25 ausgeprägt. Während CaLoSiL[®]E25 und IP25 eine homogene Verfestigung des Substrates auch in der Tiefe erreichten, war dies bei CaLoSiL[®]NP25 nicht der Fall.

¹⁸⁷ Siehe Anhang A, S. 213

In der Testreihe mit dichter Abdeckung waren die Beobachtungen in gleicher Art festzustellen, zeigten sich hier aber etwas stärker ausgeprägt als bei einfacher Abdeckung.

Die einzelnen Ergebnisse sind im Protokoll Nr.01-2 dokumentiert.¹⁸⁸

Bewertung

Die Regulierung der Verdunstung der Lösungsmittel durch Abdeckung mit dampfdurchlässigem Material bewirkte eine Aufkonzentration der Festigungsmittel an der Oberfläche/ Verdunstungsfläche.

7.5 Relative Luftfeuchtigkeit

Zielstellung

Mit systematischen Testreihen sollte festgestellt werden, ob die Luftfeuchtebedingungen während der Verdunstungs- und Carbonatisierungszeit einen Einfluss auf Tiefenverteilung, Festigungswirkung und Carbonatisierungsgrad der Nanodispersionen haben.

Durchführung

Es wurden jeweils 8 g Substrat mit 6 g Festigungsmittel behandelt. Es kamen die Produkte CaLoSiL[®] E25, IP25 und NP25 zur Anwendung. Anschließend lagerten die Proben bis zur Aushärtung im Klimaschrank mit jeweils abgestuften relativen Luftfeuchtwerten und einem erhöhten CO₂-Angebot (vgl. Abschnitt 7.2.2, S. 46f.).

Ergebnisse

Die in Isopropanol oder Gemischen mit Isopropanol dispergierten Mittel zeigten in allen Fällen eine starke oberflächige Aufkonzentration.

Die in Ethanol oder Gemischen mit Ethanol dispergierten Mittel haben sich hingegen als Bodensatz verfestigt, bei der höchsten eingestellten Luftfeuchte von 85 % war zusätzlich eine geringe Aufkonzentration an der Oberfläche zu beobachten – das zwischenliegende Substrat war vollkommen ungefestigt.

Abweichend verhält sich das CaLoSiL[®] auf n-Propanol-Basis. Bei höheren Feuchtwerten ist eine größere Tendenz zur Bodensatzbildung vorhanden, bei geringeren Feuchtwerten 40 % und 55 % ist eine gewisse Neigung zur oberflächigen Aufkonzentration festzustellen, die sich aber nur lokal in der Mitte der Verdunstungsfläche zeigt.

Die unter unkonditionierten Laborbedingungen behandelten Substrate zeigten eine sehr unvollständige Carbonatisierung des eingebrachten Ca(OH)₂. Demgegenüber erwiesen sich die unter erhöhter CO₂-Konzentration gelagerten Proben auch bei vergleichbaren Feuchtebedingungen (40 % rF) weitgehend carbonatisiert.

In den mit Ethanol- und Ethanolgemisch-Dispersionen behandelten Substraten war das Ca(OH)₂ in diesem relativ trockenen Milieu bereits vollständig carbonatisiert, während die mit Dispersionen in n-Propanol und noch mehr die in Isopropanol und Isopropanolgemischen behandelten Substrate noch uncarbonatisiertes Ca(OH)₂ enthielten. Der Carbonatisierungs-

¹⁸⁸ Siehe Anhang A, S. 214

grad zu einem bestimmten Zeitpunkt erhöht sich erwartungsgemäß mit zunehmender Luftfeuchtigkeit.

Die einzelnen Ergebnisse sind im Protokoll Nr. 01-3 dokumentiert.¹⁸⁹

Bewertung

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass bei Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit die Tendenz der Dispersionen zur oberflächigen Aufkonzentration steigt.

Der natürliche CO₂-Gehalt der Luft ist für eine schnelle vollständige Carbonatisierung des Calciumhydroxids, im vorliegenden Fall nach einer Woche Standzeit, nicht ausreichend. Erhöhte Werte der relativen Luftfeuchtigkeit verbessern den Carbonatisierungsgrad zu einem bestimmten Zeitpunkt, wobei sich der erforderliche Feuchtebedarf für die unterschiedlichen Nanodispersionen sehr verschieden darstellte. Die ethanolbasierten Nanodispersionen erwiesen in den durchgeführten Proben hinsichtlich des Carbonatisierungsverhaltens die besten Eigenschaften. Auch unter relativ trockenen Bedingungen von 40% rF war eine vollständige Carbonatisierung festzustellen.

7.6 Lösliche Salze im Substrat

Zielstellung

Für die Evaluierung der Einsetzbarkeit von Nanodispersionen für konservatorische Maßnahmen an Putz- und Stucksubstanz ist ihr Verhalten und ihre Wirkungsweise in Gegenwart von Mauersalzen von großer Bedeutung. Durch die Anwendung von reinen Sandsubstraten mit der gezielten Zugabe bestimmter reiner Salze oder deren Lösungen sollten die entsprechenden Wechselwirkungen möglichst ungestört festgestellt werden. Hierbei kamen auch extrem hohe Salzzugaben von 5 Ma% zur Anwendung. Geringere Gehalte von 0,5 Ma% entsprechen realistischen Versalzungssituationen während 0,1 Ma% Salz eine in der Restaurierungspraxis nur im Falle der Chloride maßnahmerelevante Größenordnung darstellt (Tabelle 02).

verwendete Salze	Salzgehalt	enthaltene Anionen	Anionengehalt	Grenzwert Anionengehalt: „Maßnahmen dringend erforderlich“ ¹⁹⁰
CaCl ₂ und NaCl	0,10 Ma% 0,50 Ma% 5,00 Ma%	Cl ₂ ⁻	0,06 Ma% 0,30 Ma% 3,00 Ma%	0,10 Ma%
KNO ₃	0,10 Ma% 0,50 Ma% 5,00 Ma%	KNO ₃ ⁻	0,06 Ma% 0,30 Ma% 3,00 Ma%	0,15 Ma%
MgSO ₄	0,10 Ma% 0,50 Ma% 5,00 Ma%	SO ₄ ²⁻	0,08 Ma% 0,40 Ma% 4,00 Ma%	0,25 Ma%

¹⁸⁹ Siehe Anhang A, S.215f.

¹⁹⁰ nach WTA (2003), S. 4

Tab.02: Darstellung der Gesamtsalz- und der Anionengehalte in den Substraten bei den unterschiedlichen angewendeten Konzentrationen

Durchführung

Zur Beobachtung von Einflüssen von löslichen Salzen im Substrat sind die im Mörser zerkleinerten Salze in Masseanteilen von 5 Ma%, 0,5 Ma% bzw. 0,1 Ma% vor Applikation des Festigungsmittels unter das trockene Substrat gemischt worden. Eine Wiederholung der Tests unter veränderten Feuchtebedingungen sollte den zusätzlichen Einfluss der Umgebungfeuchte nachweisen. In Exsikkatoren wurden hierfür relative Luftfeuchtwerte um 3 % bzw. 100 % eingestellt. Es kam erneut hoher Salzgehalt (5 Ma%) zur Anwendung, um eventuelle Phänomene möglichst deutlich zu provozieren.

Eine weitere Testreihe beinhaltete die Applikation von Festigungsmitteln auf mit Salzlösungen getränktes Substrat. Hierzu wurde jeweils 3g Sandmischung mit 0,8 ml 20 %iger wässriger Lösung des entsprechenden Salzes getränkt, die Applikation der Dispersion erfolgte unmittelbar im Anschluss.

Ergebnisse

Unter unkonditionierten Laborbedingungen bewirkten lösliche Salze auch in sehr geringem Anteil deutliche, teils erhebliche Veränderungen im Verhalten aller Festigungsmittel. Die Ergebnisse der Untersuchungen mit den Festigungsmitteln CaLoSiL[®] E25, IP25 und NP25 fallen sehr ähnlich aus. Prinzipiell ist die Tendenz zur oberflächigen Aufkonzentration des Festigungsmittels durch im Substrat enthaltene lösliche Salze in allen untersuchten Fällen nachweisbar. Unter Beeinflussung der Salze CaCl₂, KNO₃ und NaCl liegt das erhärtete Festigungsmittel als kompakte Kruste auf, die mehr oder weniger stark von Schwundrissen geprägt ist. Die Dicke ist bei geringeren Salzkonzentrationen weniger stark, aber selbst bei 0,1 Ma% CaCl₂, KNO₃ als eigene Schicht deutlich ausgebildet. Demgegenüber ist der Effekt von MgSO₄ weniger gravierend. Bei 5 Ma% liegt eine sehr dünne weiße Kruste auf der Substratoberfläche, bei 0,5 % lediglich ein feiner weißer Schleier.

Die in feuchter Umgebung (ca. 100 %rF) gelagerten Proben waren sämtlich nach drei Wochen noch immer nicht erhärtet, weshalb sie anschließend wieder in normale Raumluft genommen wurden.

Bei allen durchgeführten Behandlungen war eine starke Aufkonzentration mit daraus folgender oberflächiger Krustenbildung durch das Festigungsmittel durchgängig festzustellen. Unterschiede zeigten die Krusten in ihrem Schwundverhalten. Je trockener die Umgebungssituation, desto stärker war die Rissneigung und Aufschüsselung der Krusten zu beobachten. Die Kohäsion in den Krusten über mit Calciumchlorid belastetem Material erwies sich hierbei als deutlich höher als bei den Krusten über Substrat mit Natriumchlorid- oder Kaliumnitratanteil. Die einzelnen Ergebnisse sind in den Protokollen Nr. 01-4 bis 01-7 dokumentiert.¹⁹¹

¹⁹¹ Siehe Anhang A, S. 217ff.

Bewertung

Die Beeinflussung des Verhaltens der Nanodispersionen durch lösliche Salze im Substrat ist erheblich und in ihrer Wirkung deutlich stärker als alle anderen untersuchten Einflüsse. Die oberflächige Aufkonzentration und Krustenbildung zeigt keine eindeutige Abhängigkeit von der vorliegenden Feuchtesituation.

7.7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Grundsätzlich war anhand der Versuche mit Lockersubstraten eine Abhängigkeit der Wirkungsweise der Nanodispersionen von äußeren Feuchtigkeitsbedingungen während der Aushärtung festzustellen. Erhöhte Luftfeuchtigkeit über 70% verstärkt die Tendenz oberflächiger Aufkonzentration des Festigungsmittels. Gleichzeitig ist eine erhöhte Luftfeuchtigkeit für eine rasche vollständige Carbonatisierung des eingebrachten Calciumhydroxids zuträglich, wobei sich die Dispersionstypen mit ihrer jeweils verschiedenen Lösungsmittelbasis unterscheiden (vgl. Abschnitt 7.5, S. 49f.). Für die folgenden Experimente wurde in Abwägung der Nachteile zu trockener und zu feuchter Bedingungen eine Einstellung des Klimas während der Aushärtung von 65% rF bei 20°C vorgenommen. Für die Nanodispersionen auf Ethanol- und n-Propanol-Basis kann dies als Optimalbedingung eingeschätzt werden. Die isopropanolbasierten Dispersionen zeigten in den durchgeführten Tests die größte Tendenz zur Oberflächenanreicherung und das schlechteste Carbonatisierungsverhalten. Die weiteren Untersuchungen sind daher schwerpunktmäßig mit CaLoSiL[®]E und CaLoSiL[®]NP durchgeführt worden.

Prinzipiell muss mit einem erheblichen Einfluss der vorhandenen Klimabedingungen auf die Wirkungsweise der reinen CaLoSiL[®]-Dispersionen gerechnet werden. In der restauratorischen Praxis ist die Realisierung konstanter Klimabedingungen nur im entsprechend eingerichteten Atelier durchführbar. Am immobilen Objekt ist das nicht möglich. Jede Vorprobe ist nur unter Berücksichtigung der herrschenden Bedingungen während der Aushärtungszeit bewertbar und eine Übertragbarkeit ist bei veränderten Klimabedingungen nicht gegeben.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus den Ergebnissen der Experimente mit salzhaltigen Substraten. Auch hier ist ein erheblicher Einfluss nachgewiesen worden. Die Annahme, mit den praktisch wasserfreien Festigungsmitteln ein ideales Konservierungsmittel für versalzten Objekte zur Verfügung zu haben, ist falsch. Selbst ein geringer Gehalt an festen oder gelösten Salzen hat in allen durchgeführten Tests zu oberflächiger Krustenbildung durch die Festigungsmittel geführt. An einem Objekt mit heterogener Verteilung von Mauersalzen ist mit ebenso heterogener Wirkung eines großflächig aufgetragenen Festigungsmittels zu rechnen. Die Übertragbarkeit von lokal begrenzten Vorproben stellt sich auch hier problematisch dar.

Der durch CaloSiL[®]-Behandlung erreichte Verfestigungsgrad der Lockersubstrate war verhältnismäßig gering und nur tendenziell mit Kratzproben festzustellen. Konsistente Festkörper waren durch keine der durchgeführten Behandlungen herstellbar. Es ist davon auszugehen, dass einmalige Festigungsbehandlungen für das Erreichen erforderlicher Gefügefestigkeit von entsprechend geschädigtem Material nicht ausreichen.

8 Verbesserung von Eindringverhalten und Tiefenverteilung

8.1 Zielstellung

In allen vorherigen Forschungen mit CaLoSiL[®]Nanodispersionen war deren ungenügendes Eindringverhalten festgestellt und auf verschiedene Weise zu beheben versucht worden (vgl. Abschnitt 5.2, S.36ff.).

Es war zu prüfen, ob die unzureichende Tiefenverteilung sowie die oberflächige Weißschleierbildung tatsächlich auf ein schlechtes Eindringverhalten zurück zu führen ist.

Mit systematischen Untersuchungen war festzustellen, ob durch gezielte Modifizierung der Dispersionen und der Applikationstechnik eine Verbesserung der Tiefenverteilung im Mörtelgefüge erreicht werden kann.

8.2 Vorgehen

Die weiteren Untersuchungen zu Einsetzbarkeit und Wirkungsweise der Nanodispersionen für die Gefügefestigung von Putz und Stuck sollten in einem nächsten Schritt an Mörteln mit definierter Zusammensetzung und geprüften Eigenschaften erfolgen.

Aus bekannten Ausgangsstoffen selbst hergestellte Mörtelprüfkörper mit definierten Mengenverhältnissen und definierten Herstellungsvorgaben ermöglichten serielles, statistisch auswertbares Arbeiten.

Die Größe und Form der Prüfkörper musste einerseits der Durchführung festgelegter Prüfmethoden entsprechen (vgl. Tabelle 01, S.12). Andererseits sollte ihre Größe minimiert werden, um die Mengen eingesetzter Festigungsmittel und damit auch die erforderlichen Reaktionszeiten zu reduzieren. Dies kam wegen der begrenzten Kapazitäten auch der gleichzeitigen Bearbeitung einer größeren Anzahl von Prüfkörpern entgegen.

Zunächst war eine Festlegung zu treffen, welche Materialgruppen unter der Vielzahl denkbarer Mörtelzusammensetzungen für die Untersuchungen verwendet werden sollten.

Es war geplant, die umfangreichen Untersuchungen sowohl mit Kalk- als auch mit Gipsmörteln durchzuführen. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse sollten an historischer Originalsubstanz überprüft werden (Objektauswahl in Abschnitt 5.4, S.41). An den für Musterbehandlungen ausgewählten historischen Kalk- und Gipsmörteln orientierte sich die Entwicklung der Prüfkörpermaterialien.

Entsprechend den historischen Putzen von Schloss Leuben wurde ein dolomitischer Kalkmörtel entwickelt und unter Verwendung historischen Mörtelmaterials aus Schloss Dahlen ein Gipsmörtel hergestellt.

Um die Anwendbarkeit der Nanodispersionen für Gefügefestigung an Mörteln überprüfen und evaluieren zu können, hatten die unbehandelten Mörtelprüfkörper einen möglichst hohen Festigungsbedarf aufzuweisen. Bei der Entwicklung der Mörtel ist daher der Bindemittelan-

teil bis auf ein Minimum reduziert worden, welches die Formstabilität und verlustfreie Handhabung der Prüfkörper gerade noch gewährleistete. Auf diese Weise sollte die weitgehende Entsprechung mit dem originalen Mörtel mit nahezu abgebautem Bindemittel erlangt werden. Bei der Planung und Durchführung der Testreihen waren die Ergebnisse der Untersuchungen mit Lockersubstraten zu berücksichtigen (Kapitel 7, S.45ff.). Negative Einflüsse durch die herrschenden Bedingungen wurden im Ergebnis dieser Experimente durch Einstellung eines optimalen Klimas bis zur Aushärtung der behandelten Proben ausgeschlossen.

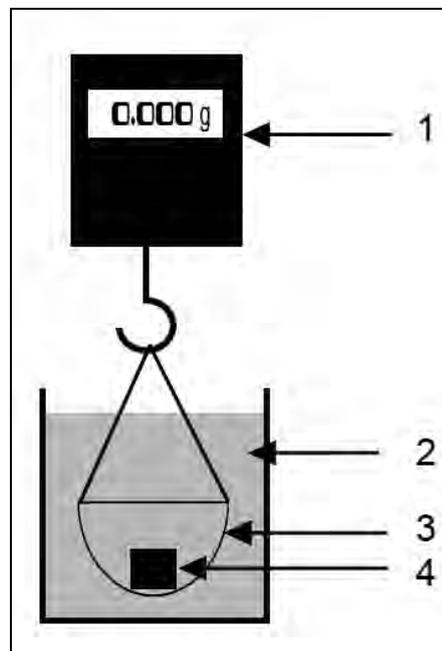
8.3 Prüfmethoden für die Materialkennwerte

Die Auswahl und die Methodik von Prüfungen am unbehandelten und behandelten Material war durch die Vielzahl der zu untersuchenden Proben und die vergleichsweise geringe Probengröße begründet (Mörtelprismen 2 x 2 x 10 cm/ siehe nachfolgende Abschnitte).

8.3.1 Rohdichte

Die Rohdichte der Mörtel wurde durch Auftriebswägung bestimmt (Versuchsaufbau Graphik 03).

Die zuvor bis zur Massekonstanz getrockneten Proben (Kalkmörtel bei 105°C, Gipsmörtel bei 40°C) wurden nach Bestimmung der Trockenmasse im Wasserbad unter Atmosphärendruck getränkt. Die Behälter wurden mit destilliertem Wasser langsam aufgefüllt. Die Probekörper lagerten zuerst mindestens 60 Minuten zur Hälfte im Wasserbad und anschließend weitere 60 Minuten bei vollständiger Überdeckung (Anlehnung an DIN 52103¹⁹²).



Graph.04: Versuchsaufbau Auftriebswägung (schematisch) 1 = Waage, 2= Behälter mit Wasserbad, 3 = Drahtsieb 4 = Probe

¹⁹² DIN 52103 / Okt. 1988. Das Verfahren wurde bei Neufassung der Norm 2002 nicht mehr aufgenommen.

Nach DIN EN 14617-1¹⁹³ erfolgte nach der Ermittlung des Gesamtvolumens sowie der Masse und des Volumens aufgenommenen Wassers die Berechnung der Rohdichte:

$$(4) \quad m_w = m_t - m_0$$

$$(5) \quad V_P = m_W / \rho_w$$

$$(6) \quad V_1 = (m_t - m_a) / \rho_w$$

$$(7) \quad \rho_0 = m_0 / V_1$$

m_0 ...	Trockenmasse (Masse nach Trocknung bis zur Massenkonstanz) [g]
m_a ...	Auftriebsmasse (Masse der wassergetränkten Probe im Wasserbad) [g]
m_t ...	Masse der wassergetränkten Probe [g]
m_w ...	Masse des aufgenommenen Wassers; Wasseraufnahme [g]
V_P ...	Volumen der wasseraufnahmefähigen Poren [cm ³]
ρ_w ...	Dichte von Wasser [g/cm ³] = 0,9982 (bei 20°C)
V_1 ...	Gesamtvolumen/ äußeres Volumen [cm ³]
ρ_0 ...	Rohdichte des Probenmaterials [g/cm ³]

8.3.2 Wasseraufnahmekoeffizient

Das Wasseraufnahmeverhalten von Baustoffen wird gängigerweise durch den Wasseraufnahmekoeffizienten charakterisiert.¹⁹⁴ Er beschreibt die Abhängigkeit der flächenbezogenen kapillaren Wasseraufnahme und der Quadratwurzel der Zeit:¹⁹⁵

$$(8) \quad \omega = W / \sqrt{t}$$

ω ...	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/(m ² x h ^{0,5})]
W ...	Flächenbezogene Wasseraufnahme [kg/m ²]
t ...	Zeit [h]

Für die Prüfung der flächenbezogenen, zeitabhängigen Wasseraufnahme war eine der geringen Probengröße angepasste Methode anzuwenden. Hierzu ist ein Prüfröhrchen in Anlehnung an eine Entwicklung von LEHMANN¹⁹⁶ verwendet worden. Ähnlich der Kapillarprüfung nach MIROWSKI¹⁹⁷ wird Wasser aus einer Pipette über einen Kontaktschwamm auf die zu untersuchende Oberfläche gebracht. Wegen der geringen Dimension der Prüfkörper sollte ein Einfluss der Gewichtskraft der Wassersäule für die kapillare Aufnahme ausgeschlossen werden. Daher wurde die Pipette an ihrem Ausgang über einen kurzen Schlauch mit dem Kon-

¹⁹³ DIN EN 14617-1 - Künstlich hergestellter Stein - Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme / Sept. 2012

¹⁹⁴ Vgl. NEHROTH/ VOLLENSCHAAR (2011), S. 1083

¹⁹⁵ Nach SCHUBERT (1993), S. 63

¹⁹⁶ LEHMANN (2004/b), S.33f.

¹⁹⁷ Kapillartränkungsprüfer von Ryszard Mirowski, polnisches Patent Nr. 125504 (1981)

taktschwammaufsatz verbunden, um sie winklig zur Prüfoberfläche anordnen zu können (Abbildung 03). Die Pipette wurde während der Messungen fast horizontal (Neigung ca. 15 %) gelagert. Die kreisrunde Kontaktfläche hatte einen Durchmesser von 0,90 cm, ihr Flächeninhalt betrug $\approx 0,636 \text{ cm}^2$.

Es wurden jeweils fünf Prüfkörper geprüft.

Die Messwertdarstellung erfolgte nicht nach aufgenommener Wassermenge je Zeit, sondern nach Zeit pro aufgenommene Wassermenge. Für jeweils 0,1 ml eingedrungenes Wasser erfolgte eine Zeitnahme, insgesamt wurden jeweils 2,0 ml Wasser eingebracht. Mit dieser Flüssigkeitsmenge war der Prismenquerschnitt durchtränkt.

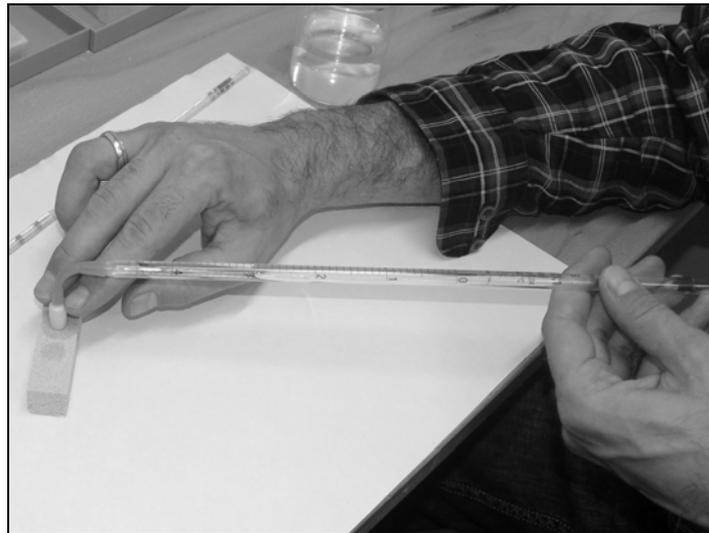


Abb.03: Durchführung der Prüfung des Wasseraufnahmeverhaltens mit Prüfröhrchen
Aufnahme: Köberle 2010

Die Prüfmethode ist in der hier angewendeten sehr kleinen Dimension relativ fehleranfällig. Wegen des starken Saugverhaltens waren die kleinen Probenquerschnitte auch bei dieser angepassten Methode sehr schnell durchtränkt und eine gleichmäßige Ausbreitung des Wassers im Gefüge durch Erreichen der Stoffgrenzen nicht möglich. Problematisch sind zudem die Realisierung eines gleich bleibenden Andrucks und die dichte Anbindung des Kontaktschwammes auf der Prüfoberfläche. Bereits kleinste Mengen unkontrolliert entweichenden Wassers verfälschen die Ergebnisse erheblich.

8.3.3 Wasseraufnahmevermögen

Wegen der Fehleranfälligkeit der Prüfmethode zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (siehe oben), wurde ergänzend die in der Baustoffprüfung übliche Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme bei Wasserlagerung unter Atmosphärendruck durchgeführt. Das erfolgte im Zuge der zur Rohdichtebestimmung angewendeten Methode der Auftriebswägung (siehe oben: Rohdichte). Aus den dort gewonnenen Mess- und Berechnungswerten wurden die massenbezogene und die volumenbezogene kapillare Wasseraufnahme ermittelt¹⁹⁸

¹⁹⁸ Nach WESCHE (1996), S.143

$$(9) \quad W_m = m_w / m_0 \times 100 \text{ [Ma\%]}$$

$$(10) \quad W_v = (m_w \times \rho_d) / (m_0 \times \rho_w) \times 100 \text{ [Vol\%]}$$

$W_m \dots$	massenbezogene Wasseraufnahme [Ma%]
$m_0 \dots$	Trockenmasse [g]
$m_w \dots$	Masse des aufgenommenen Wassers [g]
$W_v \dots$	volumenbezogene Wasseraufnahme [Vol%]
$\rho_w \dots$	Dichte des Wassers [g/cm ³]
$\rho_d \dots$	Rohdichte des Probekörpers [g/cm ³]

8.3.4 Sorptionsisotherme

Zur Charakterisierung der unbehandelten Substrate sind die Sorptionsisotherme ermittelt worden. Die aufgrund des hygrischen Gleichgewichts im Gefüge vorhandene Wassermenge ist für das Abbinden der eingebrachten Wirkstoffe von Bedeutung. Die Bestimmung erfolgte bei Adsorption¹⁹⁹. Die Prüfkörper wurden im Klimaschrank jeweils eine Woche lang bei 40, 60, 80, 90 und 95 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert und die Masse gravimetrisch bestimmt. Die Messungen erfolgten an drei Proben je Material.

Die Ergebnisse sind im Protokoll Nr. 02-05 dokumentiert.²⁰⁰

8.3.5 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit ist an Mörteln geringer als die Druckfestigkeit²⁰¹. Festigkeitszunahme ist an gering dimensionierten Proben daher bei Anwendung einer ausreichend genauen Prüfmethode für die Biegezugfestigkeit präziser bestimmbar. Zugfestigkeitsmessungen waren mit den ungefestigten, extrem weichen Mörtelproben nicht durchführbar, da sie dem erforderlichen Druck durch die Einspannvorrichtung nicht standgehalten hätten.

Die Biegezugfestigkeit wurde mit Dreipunkt-Messverfahren mit der Universal-Prüfmaschine ZWICK/ROELL ZMART.PRO (Software testXpert V10.1) ermittelt (Abbildungen 04, 05).

Auf das zweifach gelagerte Mörtelprisma (Auflagerweite $l = 6 \text{ cm}$) wurde mittig, normal zur Längsachse eine ansteigende Kraft bis zum Bruch des Prismas gegeben.

Lagegeregelte Prüfgeschwindigkeit: $v = 0,15 \text{ mm/min}$; Kraftaufnehmer Typ KAP - Z [1 KN], von A.S.T. Angewandte System - Technik GmbH Dresden)

Dreipunktwerkzeug: Institut für Theoretische und Angewandte Mechanik (ÚTAM), Prag²⁰²

¹⁹⁹ Nach Empfehlung von SCHUBERT (1993), S. 69

²⁰⁰ Siehe Anhang A, S. 232

²⁰¹ NEHROTH/ VOLLENSCHAAR (2011), S. 23f.

²⁰² Herrn Prof. Dr. Miloš Drdácý und Mitarbeitern ist für die Anfertigung herzlich zu danken.

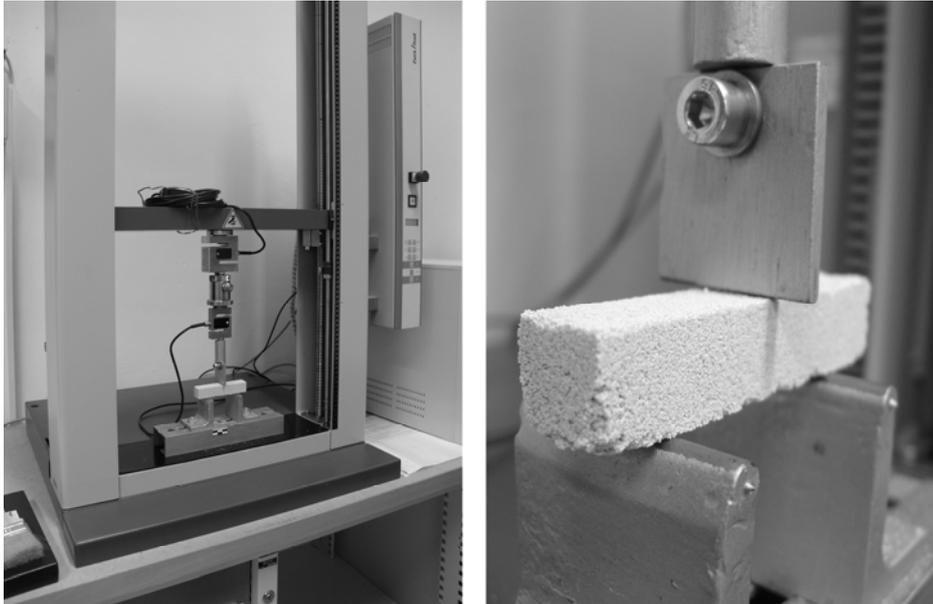


Abb.04 und 05: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Gesamtaufnahme, Detail)

Die Prüfung erfolgte unter konditionierten klimatischen Bedingungen von 20°C und 65 %rF, die Proben lagerten vor der Prüfung für wenigstens zwei Wochen in diesem Klima.

Die Biegezugfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN EN 12 372²⁰³ berechnet:

$$(11) \quad \beta = M_B / W$$

$$(12) \quad M_B = (F_{\max} \times l) / 4$$

$$(13) \quad W_y = (b \times h^2) / 6$$

β ... Biegezugfestigkeit [MPa = N/mm²]

M_B ... Biegemoment [mm³]

W_y ... Widerstandsmoment [mm³]

F_{\max} ... Höchstkraft (Bruchkraft) [N]

l ... Stützweite [mm] = 60 mm

b ... Prismenbreite [mm] = 20 mm

h ... Prismenhöhe [mm] = 20 mm

²⁰³ DIN EN 12 372 - Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Biegefestigkeit unter Mittellinienlast / Juni 1999

8.4 Mörtelprüfkörper

8.4.1 Prüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel

Herstellung

Für die durchzuführenden Versuche wurden Mörtelprismen mit den äußeren Abmessungen von ca. 2 x 2 x 10 cm hergestellt. Die Produktion konnte mittels einer speziell angefertigten Form in Serien von je 20 Stück erfolgen (Abbildung 06)²⁰⁴.



Abb.06: Form aus Kunststoff und Multiplex für die Herstellung von Mörtelprismen, nach Vorgabe von T. Köberle in der Tischlerei der HfBK Dresden hergestellt

Bindemittel: Dolomitkalkhydrat EN 459-1 DL 85-S; Schüttdichte: 0,66 kg/l
(Materialmuster von Rheinkalk Akdolit, Kasselburger Weg, 54570 Pelm)

Zuschlag: Quarzsand 0,04...1,0 mm; Schüttdichte 1,71 kg/l

(Mischung von fünf Quarzmehl- bzw. Quarzsandfraktionen, Mischungsverhältnis für optimierte Sieblinie²⁰⁵)

Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis: 1+13 (V/V), entspricht ca. 1+34 (m/m)

Das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis wurde durch Vorproben ermittelt. Ziel war es, Prüfkörper mit einer möglichst geringen Festigkeit herzustellen. Die Festigkeit sollte gerade noch ausreichen, die Körper ohne Verluste für die Versuchsdurchführungen bewegen zu können.

Nach dem Mischen der Komponenten und Einbringen in die Form verblieb diese zunächst 2 h an der Luft (22°C, 38 % rel. Luftfeuchtigkeit) und anschließend für wenigstens eine Woche

²⁰⁴ Die Herstellung der Mörtelprüfkörper erfolgte durch Dipl. Geol. T. Köberle. Angaben zu Materialien und Herstellungstechnik siehe Bericht STONECORE 10/01/13, Anhang B, S. 328f.

²⁰⁵ Entsprechend Bericht STONECORE 09/06/25, Anhang B, S. 326f.

im Klimaschrank (20°C, 85 % rF, 2 % CO₂-angereicherte Atmosphäre). Nach dem Ausschalen lagerten die Prismen nochmals eine Woche im Klimaschrank.

Materialeigenschaften Festmörtel (Mittelwerte):

Dünnschliff:

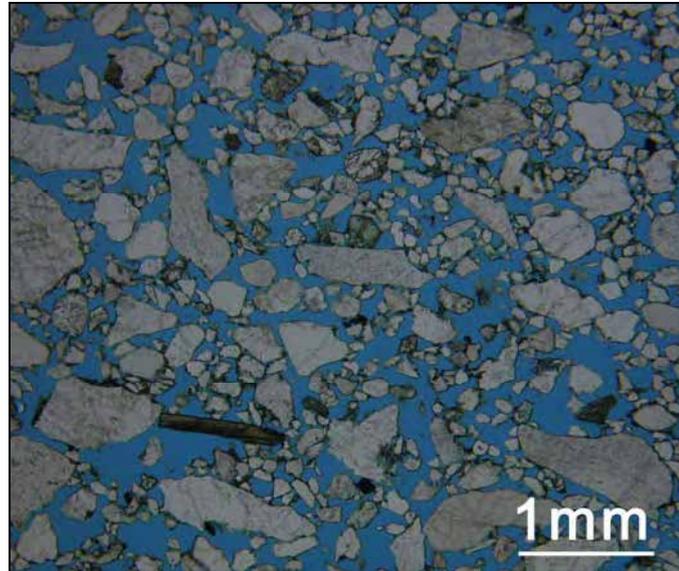
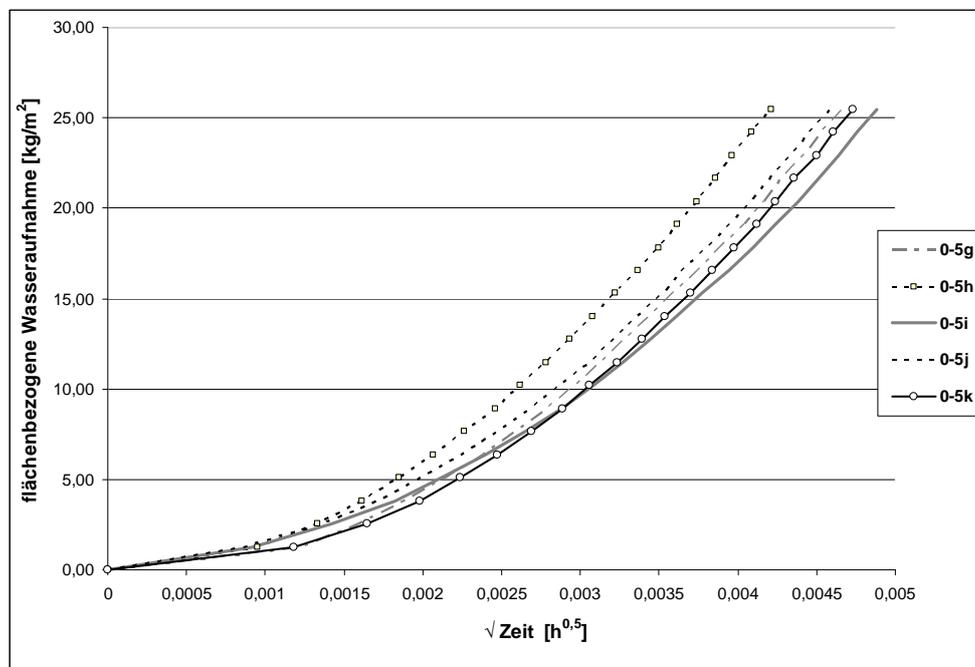


Abb.07: Im Labor hergestellter dolomitischer Kalkmörtel, Detail aus einer Dünnschliffaufnahme²⁰⁶ (Polarisator \parallel)

Aufnahme: T. Köberle 2010

Wasseraufnahme²⁰⁷:



Graph.05: Wasseraufnahme - Wurzel Zeit- Diagramm für fünf Proben an unbehandelten Prismen aus dolomitischem Kalkmörtel

²⁰⁶ Dünnschliffherstellung durch T. Beckmann, Schwülper-Lagesbüttel/ Deutschland

²⁰⁷ Protokoll 4, Blatt 1, siehe Anhang A, S. 246

Auffällig ist bei allen Datenreihen, dass die graphische Darstellung der Abhängigkeit zwischen der flächenbezogenen Wasseraufnahme und der Quadratwurzel der Zeit nicht linear, sondern als ansteigende Kurve vorliegt. Für die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten sind die Werte daher nicht verwendbar. Würde die Formel für die Berechnung des w -Wertes auf die vorhandenen Datenreihen angewendet, nähme er während der Wasseraufnahmedauer stetig zu. Zwar reduziert sich die Größe dieser Zunahme sukzessive, ein konstanter w -Wert wurde jedoch in keinem einzigen Fall erreicht.

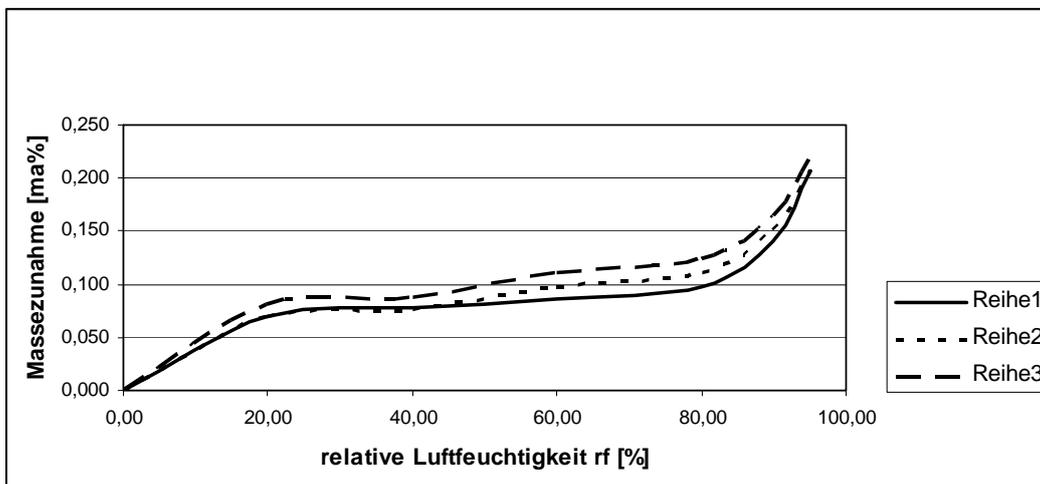
Massenbezogenes Wasseraufnahmevermögen²⁰⁸: 19,5 Ma% +/- 1,1

Volumenbezogenes Wasseraufnahmevermögen²⁰⁹: 37,5 Vol% +/-1,5

Rohdichte²¹⁰: 1,55 g/cm³ +/- 0,08

Biegezugfestigkeit²¹¹: 0,14 N/mm² +/- 0,03

Sorptionsisotherme²¹²: 0,21...0,22 Ma% (95 % rF)



Graph.06: Im Labor hergestellter dolomitischer Kalkmörtel, Darstellung der Adsorptionsisotherme von drei Probekörpern aus dolomitischen Kalkmörtel

Es wird vergleichsweise wenig Wasser aus der Umgebungsluft adsorbiert. Der flache Kurvenverlauf (Graphik 05) ist für grobporige Baustoffe charakteristisch, da nur begrenzt Kapillarkondensation vorliegt²¹³.

²⁰⁸ Protokoll 5-01, Blatt 3, siehe Anhang A, S. 252

²⁰⁹ Protokoll 5-01, Blatt 2, siehe Anhang A, S. 251

²¹⁰ Protokoll 5-01, Blatt 3, siehe Anhang A, S. 252

²¹¹ Protokoll 3-03, Blatt 1, siehe Anhang A, S. 244

²¹² Protokoll 2-05, siehe Anhang A, S. 232

²¹³ REINHARDT (2010)

8.4.2 Prüfkörper aus Gipsmörtel

Herstellung

In gleicher Art und Abmessung erfolgte die Herstellung von Prismen aus Gipsmörtel.²¹⁴

Bindemittel: aufgemahlener historischer Gipsmörtel aus Dahlen (D_033)²¹⁵, angeteigt mit Wasser.

Zuschlag: Quarzsand 0,04...1,0 mm

Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis: ca. 1+10,5 (m/m)

Die Ermittlung des Mischungsverhältnisses erfolgte nach den genannten Kriterien eines minimalen Bindemittelgehaltes (vgl. Abschnitt 8.2, S.53f.).

Materialigenschaften Festmörtel:

Dünnschliffaufnahme:

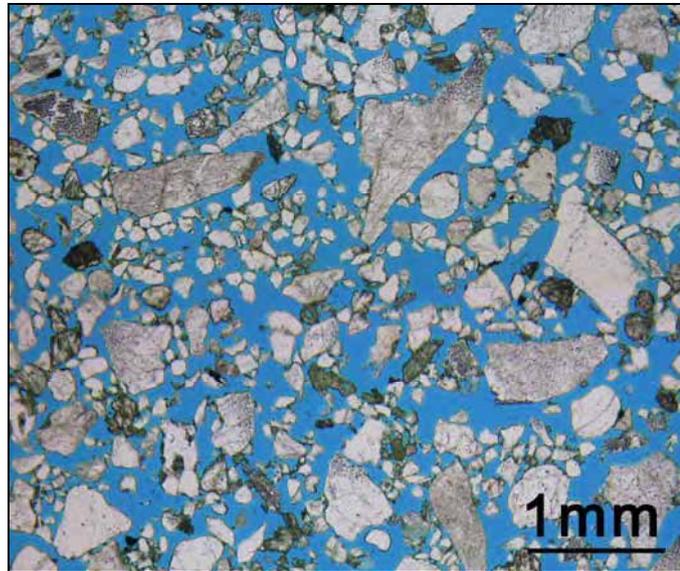


Abb.08: Im Labor hergestellter Gipsmörtel, Detail aus einer Dünnschliffaufnahme²¹⁶ (Polarisator \parallel) Aufnahme: T. Köberle 2010

Die Durchführung der Wasseraufnahmeprüfung mit Prüfröhrchen war an dem extrem weichen Festmörtel nicht möglich, da an dem unter Wassereinfluss aufweichenden Material kein ausreichender Andruck des Kontaktschwammes zu gewährleisten war (Methode Abschnitt 8.3.2, S. 55).

Da der Mörtel im Wasserbad zerfiel, war auch eine Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit nicht möglich (Methode Abschnitt 8.3.3, S. 56f.).

²¹⁴ Die Herstellung der Mörtelprüfkörper erfolgte durch Dipl. Geol. T. Köberle. Angaben zu Materialien und Herstellungstechnik siehe Bericht STONECORE 10/03/29, Anhang B, S. 330f.

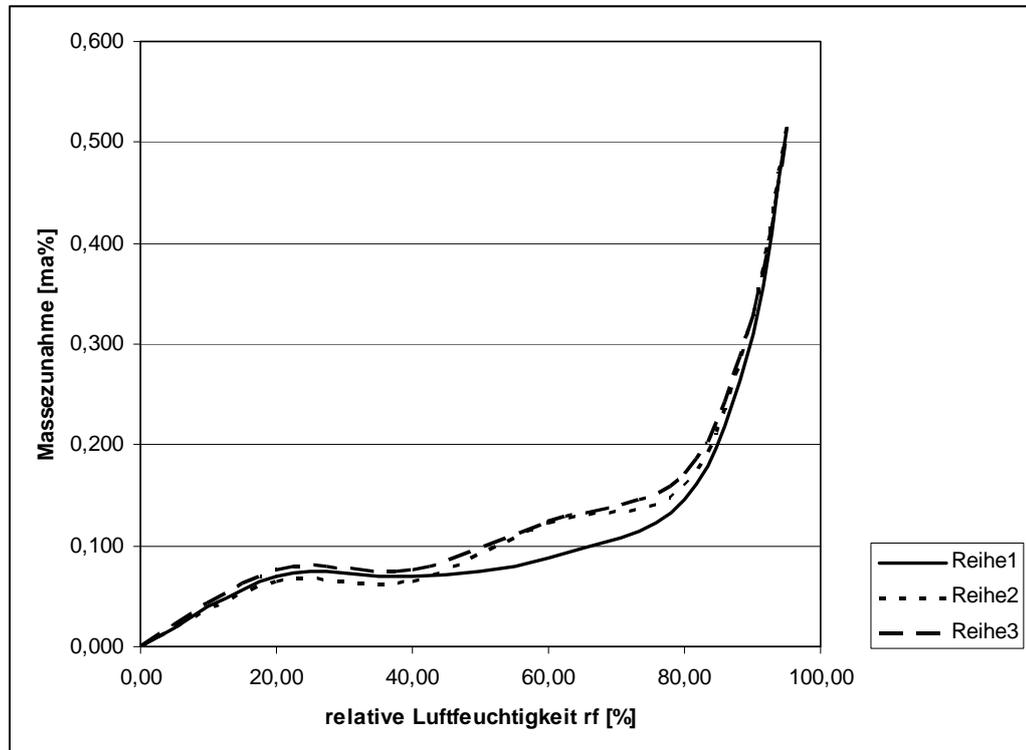
²¹⁵ Mörtelanalyse siehe Untersuchungsbericht vom 30.08.2012, Anhang B, S. 352f.

²¹⁶ Dünnschliffherstellung durch T. Beckmann, Schwülper-Lagesbüttel/ Deutschland

Rohdichte²¹⁷: 1,54 g/cm³

Biegezugfestigkeit²¹⁸: 0,11 N/mm² +/- 0,02

Sorptionsisotherme²¹⁹: 0,51...0,52 Ma% (95% rF)



Graph.07: Im Labor hergestellter Gipsmörtel, Darstellung der Adsorptionsisotherme von drei Probekörpern

Die erst bei sehr hoher Luftfeuchtigkeit stark zunehmende Wasseraufnahme ist für Gips und Gipsbaustoffe charakteristisch.²²⁰

²¹⁷ Nach Untersuchungsbericht vom 30.08.2012 Anhang B, S. 352f.

²¹⁸ Protokoll 3-03, Blatt 1, Anhang A, S. 244

²¹⁹ Protokoll 2-05, Anhang A, S. 232

²²⁰ Vgl. KRISCHER (1956), S.58 und RAMOS/ DE FREITAS (2012)

8.5 Eindringverhalten der Nanodispersionen und Feststoffverteilung im Substrat

8.5.1 Zielstellung

Es sollte festgestellt werden, wie weit die Nanodispersionen beim Tränken von Prüfkörpern in diese eindringen und wie sich die Feststoffverteilung während sowie nach der Verdunstung des Lösungsmittels darstellt.

Untersucht wurde in einer ersten Testreihe die Tiefenverteilung während der Verdunstungsphase in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration und von der Art des Lösungsmittels.

Bei früheren Forschungen wurde die durch die Festigungsmittel verursachte Schleier- und Krustenbildung darauf zurückgeführt, dass die Nanodispersionen in die Substrate ungenügend eindringen würden (Kapitel 5.2, S.36ff.). Diese Hypothese war zu überprüfen.

In einer weiteren Testreihe sollten Möglichkeiten zur Verbesserung der Tiefenverteilung erprobt werden.

8.5.2 Experimentelles

Materialien

Substrate:

Prismenförmige Mörtelprüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel und Gipsmörtel (Herstellung und Eigenschaften Abschnitt 8.4, S.59ff.)

Nanodispersionen:

CaLoSiL[®]E25

CaLoSiL[®]NP25

Modifikationen:

Verdünnungen mit jeweiligem Lösungsmittel, teils mit Aceton (vgl. Kapitel 6, S.44)

Substanzen für Nachbehandlungen:

Hydroxypropylcellulose Klucel[®]G (Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Aichstetten)

Aerosil[®]R972 (pyrogene Kieselsäure von Evonic Degussa GmbH/ Essen)

Versuchsaufbau

Die Prüfkörper im Trockenschrank bei 105°C bis zur Massenkonstanz vorgetrocknet und im Exsikkator abgekühlt. Anschließend erfolgte mit einer Pipette die Applikation des jeweiligen Festigungsmittels bis zur Sättigung des Mörtelkörpers.

Die behandelten Prüfkörper wurden umgehend bis zum Abschluss der Verdunstung des Lösungsmittels in einer Klimakammer bei 20°C und 65 %rF gelagert. Die hierfür erforderliche Zeit ist für das am langsamsten verdunstende n-Propanol durch Massenkontrolle ermittelt worden und betrug 24 Stunden.²²¹

²²¹ Protokoll Nr. 2-01, Anhang A, S. 226

Prüfmethoden

Nach der Applikation ist das eingebrachte Calciumhydroxid aufgrund des hohen pH-Wertes durch Indikation mit Phenolphthaleinlösung nachweisbar. (vergleiche Abschnitt 7.2.3, S. 51) Zur Prüfung der Verteilung des eingebrachten Calciumhydroxids wurden die Prismen vorsichtig zerbrochen und die Bruchfläche mit der Indikatorlösung eingesprüht. Das Ergebnis wurde visuell begutachtet und fotografisch dokumentiert.

Die Prüfung musste zeitnah nach vollständigem Abschluss der Lösungsmittelverdunstung durchgeführt werden, da die Carbonatisierung unmittelbar einsetzt und danach das eingebrachte Calciumhydroxid mit dem Indikator nicht mehr nachweisbar wäre. Vorproben erwiesen, dass erste sichtbare Störungen für den Indikatornachweis erst weitere 24 Stunden nach der Trocknung eintraten. Die Prüfung der vorhandenen Wirkstoffverteilung erfolgte nach definierten Zeiträumen während der Verdunstungsphase, die Prüfung des jeweils erreichten Endzustandes war 25-40 Stunden nach der Behandlung durchzuführen.

8.5.3 Unmodifizierte Nanodispersionen

Durchführung

Im ersten Test fand CaLoSiL[®]NP25 Verwendung, die Prüfung der Wirkstoffverteilung im Mörtelgefüge erfolgte 2, 5,5, 20 und 24 Stunden nach der Behandlung. Dies entspricht nach Vorversuchen einer Verdunstung von ca. 43 %, 95 %, 99 % und 100 %.²²²

Die Ergebnisse wurden für die Behandlung mit CaLoSiL[®]E25 auf dem gleichen Substrat (Kalkmörtel) sowie auf dem laborseits hergestellten Gipsmörtel durch Indikatorrest überprüft.

Ergebnisse

Die Indikation mit Phenolphthaleinlösung belegte, dass die verwendeten Nanodispersionen die Prüfkörper aus Kalkmörtel zunächst vollständig durchdrangen und das Calciumhydroxid in den ersten Stunden nach der Behandlung im gesamten Prismenquerschnitt vorlag. Konzentrationsunterschiede waren optisch nicht festzustellen (Abbildung 09, links).

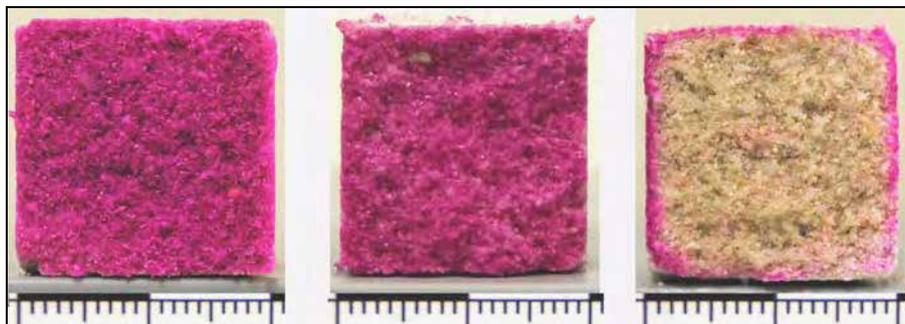


Abb.09: Mit Indikatorlösung angefärbte Proben sofort nach der Applikation von CaLoSiL[®]NP25 (links), nach ca. 95 % Lösungsmittelverdunstung (mitte) und nach vollständiger Evaporation (rechts)

²²² Protokoll 2-01, siehe Anhang A, S. 226

Auch nach weitgehender Verdunstung des Lösungsmittels zeigte sich die Tiefenverteilung der Wirkstoffe nicht sichtbar verändert (Abbildung 09, Mitte). Nach abgeschlossener Verdunstung wurde im Falle der Behandlung mit CaLoSiL[®]NP25 das Calciumhydroxid jedoch nur noch in den äußersten, oberflächennahen Bereichen angezeigt (Abbildung 09, rechts). Auch an dem mit CaLoSiL[®]E25 getränkten Prüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel nimmt nach vollständiger Verdunstung die Feststoffkonzentration von den Oberflächen her zu einem völlig ungefestigten Kernbereich ab.

Der aus Gipsmörtel bestehende Prüfkörper erwies sich ebenfalls zunächst vollkommen durchtränkt und das Calciumhydroxid war offenbar gleichmäßig verteilt. Nach beendeter Verdunstung des Alkohols zeigte die Indikatorbehandlung, dass Calciumhydroxid im innersten Kern des Prismas (ca. 40 % der Querschnittsfläche) verblieb, jedoch an den Oberflächen Calciumhydroxid konzentriert ist. Dazwischen befindet sich ein Bereich ohne nachweisbares Calciumhydroxid.

Die einzelnen Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 2-02 dokumentiert.²²³

Bewertung

Die Prismen aus dolomitischem Kalkmörtel sowie aus Gipsmörtel wurden von den Nano-dispersionen CaLoSiL[®]NP25 und E25 vollständig durchtränkt. Mangelndes Eindringen lag also ebenso wenig vor wie eine Trennung der Dispersion durch etwaiges Ausfiltern des Feststoffs beim Eindringen.

Die nach Abschluss der Verdunstung festgestellte Veränderung der Feststoffverteilung kann nur durch eine Remigration der Calciumhydroxidpartikel zur Verdunstungsfläche erklärt werden.

Im dolomitischen Kalkmörtel hat sich das eingebrachte Calciumhydroxid aus dem Inneren des Prüfkörpers demnach vollständig wieder heraus bewegt. Im Falle des CaLoSiL[®]NP25 konnte nachgewiesen werden, dass diese Remigration erst während der allerletzten Phase der Verdunstung stattfindet (zwischen 95 % und 100 % Verdunstungsrate). Es lässt sich hypothetisch schlussfolgern, dass die Dispersion während des Verdunstungsprozesses sehr lange stabil bleibt. Erst nach weitgehender Verdunstung sind die Partikelabstände der nun hoch konzentriert vorliegenden Feststoffpartikel so gering, dass die Anziehungskräfte der Teilchen zur Koagulation führen (diffusionskontrollierte Koagulation²²⁴). Bis zum Erreichen dieser kritischen Konzentration ist die Dispersion aus dem Gefügenderen in die durch Verdunstung an den Substratoberflächen frei werdenden Porenräume nachgeströmt.

Im Gipsmörtelprisma fand die Remigration nur in den oberflächennahen Bereichen bis etwa 0,5 cm Tiefe statt. Möglicherweise erfolgte hier eine Koagulation der Calciumhydroxidteilchen durch die Wirkung der in geringster Menge gelösten Sulfate im Mörtelgefüge. Sulfate können die positive Ladung der Kalkhydratteilchen und damit ihr Zetapotenzial verringern, was Koagulation auslöst.²²⁵

²²³ Siehe Anhang A, S. 227

²²⁴ Vgl. hierzu DÖRFLER (2002), S. 569 ff.

²²⁵ Nach WITTNEBEN (1980), S. 77

Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Nachdem in den vorliegenden Fällen die mangelnde Feststoffverteilung nach der Behandlung von Mörteln mit Nanodispersionen nicht als Problem mangelnden Eindringens, sondern als Problem einer Rückwanderung der Teilchen erklärt wurde, sind Ergebnisse früherer Forschungen neu zu bewerten (vgl. Abschnitt 5.2, S.39ff.). Die Arbeiten von SCHÖNHOFER (2006) und ADOLFS (2007) befassten sich grundsätzlich mit der Fragestellung „*weshalb eine Dispersion mit Partikeln dieser minimalen Größendimension nicht in der Lage ist ausreichend kapillar in einen porösen Baustoff einzudringen*“²²⁶.

Insbesondere ist zu überdenken, warum bestimmte Lösungsansätze, die aus dem Bestreben eines verbesserten Penetrationsverhaltens heraus gesucht und teilweise auch gefunden wurden, positiv wirkten.

SCHÖNHOFER und ADOLFS haben mit Aceton-Beimischungen die Viskosität der Dispersionen verringern und damit das Eindringen verbessern wollen. Die dadurch erzielte Verbesserung der Feststoffverteilung im Mörtel wurde von ADOLFS mittels Phenolphthaleinlösung nachgewiesen.²²⁷ Diese Prüfungen sind in der dokumentierten Form allerdings nur bedingt aussagekräftig, da nicht angegeben wurde, ob der Zeitfaktor und die Verdunstungsrate berücksichtigt worden sind.

Dennoch sollte die Acetonbeimischung als denkbare Modifizierung zur Verbesserung der Feststoffverteilung in den folgenden Versuchen Berücksichtigung finden, weil ein positiver Effekt bereits nachgewiesen worden ist.

Daneben war von ADOLFS ein Zusammenhang von Eindringverhalten und Dampfdruck des Lösungsmittels hergestellt worden.²²⁸ Unter den drei Lösungsmitteln der CaLoSiL[®]-Dispersionen weist Ethanol den höchsten, n-Propanol den geringsten Dampfdruck auf (40 mmHg bzw. 21 mmHg/ 20 °C²²⁹). Beide Dispersionstypen sollten bei den folgenden Versuchen vergleichsweise Anwendung finden, um entsprechende Zusammenhänge zu prüfen. Sofern diese existieren, muss dennoch neu überlegt werden, ob dafür tatsächlich der unterschiedliche Dampfdruck verantwortlich ist.

Ein anderer Erklärungsansatz könnte in den ganz unterschiedlichen azeotropen Gemischen der Alkohole mit Wasser zu finden sein. (vgl. Abschnitt 5.1.2, S. 34) Während die Zunahme des Wassergehaltes während der Alkoholverdunstung bei Ethanol recht schnell erreicht wird, ist der erreichbare Wasseranteil in den anderen Alkoholen weit größer: Ethanol bildet mit ca. 4 Ma% Wasser ein azeotropes Gemisch, Isopropanol mit ca. 13 Ma% und n-Propanol mit ca. 28 Ma% Wasser.²³⁰ Nach ADOLFS beginnen die Dispersionen ab einem Wasseranteil von etwa 10 Vol% (entspricht etwa 11 Ma%) instabil zu werden.²³¹

²²⁶ ADOLFS (2007), S. 61

²²⁷ Ebenda, S. 85ff.

²²⁸ Ebenda, S.57

²²⁹ Nach TORRACA (1984), S.85

²³⁰ Nach FALBE/ REGITZ (1992), S. 3632 / Wobei dies die Zusammensetzung bei der jeweiligen Siedetemperatur darstellt. Sie ist, auch abhängig von der Luftfeuchtigkeit, bei Verdunstung anders. Vgl. MISCHKE (2007), S.75

²³¹ ADOLFS (2007), S. 60

Ein weiterer Ansatz für die Verbesserung der Feststoffverteilung wurde von ADOLFS in der Verdünnung der Dispersionen gesehen, aber nicht systematisch untersucht.²³² Dem sollte in den folgenden Versuchen nachgegangen werden.

Ausgehend von der Hypothese der Remigration der Feststoffe während der Verdunstung der Lösungsmittel sollten weitere Lösungsansätze geprüft werden. Sofern die Verdunstungsgeschwindigkeit für den Prozess der Remigration eine Rolle spielt, könnte sich deren Verzögerung positiv auswirken. Eine experimentelle Überprüfung stellte die Verdunstungsverzögerung durch Lagerung des behandelten Prüfkörpers in einem alkoholisch gesättigtem Dampfraum dar. Unter dem Aspekt des Praxisbezugs kam daneben die Oberflächenabdeckung des behandelten Materials in Betracht. In den Vorversuchen an Lockermaterial ist durch die Abdeckung der behandelten Sandproben während der Verdunstungszeit mit Zellstoff sogar ein negativer Effekt beobachtet worden (vgl. Abschnitt 7.4, S. 52f.). Eine dichte, mechanische Abdeckung mit Oberflächenkontakt ist in der Praxis ohnehin schwer umsetzbar und kann vor allem mit Verlusten an der geschädigten Oberfläche einhergehen. Daher wurde die Anwendung von Lösungsmittelgelen erwogen. Die darin enthaltenen Lösungsmittel verdunsteten langsamer und die Gele sperren zudem die poröse Oberfläche des Substrats.

Die Rückwanderung der eingebrachten Calciumhydroxidpartikel dürfte durch deren geringe Dimension und wegen der während der Verdunstungsphase wahrscheinlich noch nicht oder nur sehr begrenzt beginnenden Agglomeration begünstigt werden. Für das Eindringen der Dispersionen in das poröse Substrat stellt dies sicher einen großen Vorzug dar. Um die am Ende der Verdunstungsphase einsetzenden Wanderungseffekte zu behindern, müsste die Koagulation der Feststoffpartikel früher ausgelöst werden. Dies wäre beispielsweise durch Elektrolytlösungen möglich. Jedoch kann kein nachträglich eingebrachtes Medium in das poren-gesättigte System eindringen. Befinden sich hingegen destabilisierende Mittel bereits vor der Applikation der Dispersion im Substrat, dürfte die einsetzende Koagulation das Eindringverhalten negativ beeinflussen (vgl. Abschnitt 7.6, S. 50ff.). Da auch reines Wasser die Nanodispersionen destabilisieren kann²³³, könnte eine entsprechende Vorbehandlung des Substrats mit Wasser entsprechend wirkungsvoll sein.

Ein anderer Ansatz ergibt sich aus den Gesetzmäßigkeiten der so genannten „Ostwald-Reifung“: In kolloidalen Dispersionen verändert sich die Teilchengrößenverteilung durch Wachsen größerer Teilchen auf Kosten der kleinen, besser löslichen Partikel.²³⁴ Für die Prozesse der „Ostwald-Reifung“ wird eine gewisse Löslichkeit der dispersen Phase im Dispergiermedium vorausgesetzt. Durch den herstellungsbedingt im Dispersionsmittel enthaltenen Wasseranteil ist diese Voraussetzung erfüllt (vgl. Abschnitt 5.1.2, S.32ff.). Der zunächst geringe Wasseranteil nimmt theoretisch mit der anhaltenden Alkoholverdunstung in der verbleibenden Flüssigkeit bis zum azeotropen Punkt ständig zu, im Falle der ethanolbasierten Dispersion ist der enthaltene Wasseranteil wahrscheinlich sogar höher als im azeotropen Gemisch. Damit würde der Wasseranteil während der gesamten Verdunstung ständig zunehmen.

²³² Vgl. ebenda, S. 56ff.

²³³ Vgl. ebenda, S. 60

²³⁴ LAGALY et al. (1997), S.170

CaLoSiL[®] Nanodispersionen sind entsprechend ihrer Partikelgröße zwar nicht mehr als Kolloide zu definieren (Partikelgrößen in Kolloiden = 0,1µm bis 1,0 nm²³⁵), dennoch sollte geprüft werden, ob die Beimischung von größeren Calciumhydroxidteilchen die Partikelmigration beeinflussen kann.

Ein zusätzlicher Effekt der Beimischung einer Dispersion mit größeren Partikeln ist denkbar, indem die Nanoteilchen im Substratgefüge durch Verschluss oder Verengung feiner Poren nach Anlagerung der größeren Partikel immobilisiert werden.

8.5.4 Verdünnte Nanodispersionen

Zielstellung

Es sollte geprüft werden, ob die Stärke und Ausprägung der Partikelmigration in Abhängigkeit zum Feststoffgehalt der verwendeten Dispersionen stehen und ob daher durch die Verringerung der Konzentration eine verbesserte Tiefenverteilung erreicht werden kann.

Durchführung

Die Nanodispersionen CaLoSiL[®]E25 und NP25 wurden mit dem jeweiligen Lösungsmittel auf einen Feststoffgehalt von 12,5 g/l verdünnt.

(Applikation, Lagerung, Prüfung in Abschnitt 8.5.2, S. 64f.)

Ergebnisse

Die mit verdünnten Nanodispersionen behandelten Prismen wiesen nach Abschluss der Verdunstung des Dispergiermediums eine deutliche Konzentration des Calciumhydroxids im oberflächennahen Bereich auf. Im Inneren der Kalkmörtelprismen ist die Wirkstoffkonzentration nach Behandlung mit verdünnter Dispersion auf n-Propanol-Basis augenscheinlich größer als bei ethanolbasiertem CaLoSiL[®]. In beiden Fällen ist sie aber innen deutlich geringer als in den Randzonen und insgesamt inhomogen. Beim Gipsmörtel zeigt sich neben der auch hier ausgeprägten Oberflächenkonzentration der Feststoffe eine etwas höhere Anreicherung im innersten Kern des Prismas.

Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 2-03, Blatt 1 dokumentiert.²³⁶

Bewertung

Verdünnte Nanodispersionen zeigen prinzipiell die gleichen Phänomene wie die unverdünnten, sie sind nur weniger stark ausgeprägt. Auch hier findet während der Verdunstung der Lösungsmittel eine Partikelmigration statt, die zu inhomogener Feststoffverteilung im Mörtel und vor allem zu oberflächiger Aufkonzentration mit der Gefahr der Überfestigung, Schalen- und Krustenbildung führt. Durch Verdünnung allein ist das Problem nicht lösbar.

²³⁵ Nach WITTNEBEN (1980) S. 3

²³⁶ Proben Nr. 1.1 bis 1.3, siehe Anhang A, S. 228

8.5.5 Acetonbeimischung

Zielstellung

Bezugnehmend auf die positiven Ergebnisse von SCHÖNHOFER²³⁷ sollte die Wirkung eines Acetonanteils im Dispersionsmittel bei unveränderter und bei reduzierter Feststoffkonzentration getestet werden.

Durchführung

Getestet wurde die Acetonbeimischung für die Anwendung von ethanol- und n-propanol-basierten Nanodispersionen an Kalkmörtelprismen.

Verwendet wurden die Modifizierungen (Nomenklatur in Kapitel 6, S. 43)

[E25AC]

[E12,5AC]

[E5AC]

[NP25AC]

[NP12,5AC]

Ergänzend wurde mit der am stärksten verdünnten Modifikation [E5AC] ein Vergleichstest am Gipsmörtel durchgeführt.

(Applikation, Lagerung, Prüfung in Abschnitt 8.5.2, S. 64f.)

Ergebnisse

Alle in dieser Testserie behandelten Prismen wiesen nach Abschluss der Verdunstung des Dispergiermediums eine erkennbare Konzentration des Calciumhydroxids im oberflächennahen Bereich auf. Bei ethanolbasiertem, mit Aceton versetztem CaLoSiL[®] nahm mit abnehmender Feststoffkonzentration auch die erreichte Tiefenverteilung im Substrat ab, die oberflächige Konzentrationsneigung blieb unverändert. Das auf 5 g/l verdünnte Festigungsmittel war im Inneren der Prüfkörper – bei Kalk- als auch bei Gipsmörtel - überhaupt nicht mehr nachzuweisen.

Verdünntes CaLoSiL[®] auf n-Propanol-Basis mit niedrigerem Feststoffgehalt entwickelte hingegen eine geringere Neigung zur Oberflächenkonzentration und eine gleichzeitig verbesserte Tiefenverteilung.

Die einzelnen Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 2-03, Blatt 1 dokumentiert.²³⁸

Bewertung

Die Beimischung von Aceton kann die Oberflächenanreicherung abmildern.

Nach Anwendung von acetonhaltigen Dispersionen mit 25 g/l und 12,5 g/l Feststoffgehalt an Kalkmörtelprismen ist die Oberflächenkonzentration deutlich geringer als ohne Acetonbeimischung. Bei stärkerer Verdünnung scheint dieser positive Effekt jedoch auszubleiben. Die Tendenz zur Oberflächenanreicherung ist in den behandelten Mörteln auch bei Acetonbeimischung nachzuweisen.

²³⁷ SCHÖNHOFER (2006), S. 76 - 78

²³⁸ Proben Nr. 2.1 bis 2.6, siehe Anhang A, S. 228

8.5.6 Vorbehandlung des Substrats mit Wasser

Zielstellung

Es sollte geprüft werden, ob durch die Vorbehandlung des Substrats mit Wasser eine verbesserte Tiefenverteilung der eingebrachten Feststoffe erreicht werden kann.

Durchführung

Auf einen Prüfkörper aus Kalkmörtel wurde destilliertes Wasser gesprüht (ca. 20 Ma%, bezogen auf Substrat) und die Verdunstungsrate der Flüssigkeit gravimetrisch geprüft. Nach Verdunstung von 50 % des applizierten Wassers erfolgte die Behandlung mit unmodifiziertem CaLoSiL[®]E25 im Flutverfahren (Applikation, Lagerung, Prüfung: Abschnitt 8.5.2, S. 64f.).

Ergebnisse

Nach Abschluss der Verdunstung war am Prisma eine starke Feststoffkonzentration im oberen Probenbereich sowie in geringerem Maße an den anderen Oberflächen. Im Inneren des Prüfkörpers war Calciumhydroxid in nur geringem Umfang festzustellen

Die einzelnen Ergebnisse sind in den Protokoll Nr. 2-03 Blatt 2 dokumentiert.²³⁹

Bewertung

Im untersuchten Fall konnte die Vorbehandlung mit Wasser keine Verbesserung der Feststoffverteilung im Mörtel zeitigen. Der Ansatz wurde nicht weiter verfolgt.

8.5.7 Lagerung im ethanolisch gesättigten Dampfraum

Zielstellung

Es sollte geprüft werden, ob die Partikelmigration durch Verzögerung der Verdunstungsgeschwindigkeit verändert oder verhindert werden kann. In einem Vorversuch wurde festgestellt, dass die Verdunstungsgeschwindigkeit bei der Lagerung des getränkten Prüfkörpers in einem ethanolisch gesättigten Dampfraum erheblich reduziert wird (Ergebnisse in Protokoll Nr. 2-01).²⁴⁰

Durchführung

Ein mit CaLoSiL[®]NP25 im Flutverfahren behandelter Prüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel wurde nach der Applikation in einem Exsikkator auf einem Sieb über Ethanol gelagert. (Applikation, Lagerung, Prüfung in Abschnitt 8.5.2, S. 64f.)

Ergebnisse

Das Calciumhydroxid war sowohl in den oberflächennahen Bereichen als auch im Kern des Prismas konzentriert, dazwischen befand sich eine etwa 0,2 bis 0,3 cm starke Schicht, in der nahezu kein Wirkstoff verblieben war.

Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 2-03, Blatt 2 dokumentiert.²⁴¹

²³⁹ Probe Nr. 3.1, siehe Anhang A, S. 229

²⁴⁰ Probe Nr. 2, siehe Anhang A, S. 226

²⁴¹ Probe Nr. 4.1, Siehe Anhang A, S. 229

Bewertung

Durch die Lagerung im ethanolisch gesättigten Dampfraum und wahrscheinlich durch die dadurch bewirkte Reduzierung der Verdunstungsgeschwindigkeit hat die Remigration der Partikel nur im äußeren Bereich des Prismas stattgefunden. Möglicherweise könnte eine noch stärkere Verzögerung der Verdunstung zu besseren Ergebnisse führen. Für die praktische Anwendung sind hierzu aber andere, technisch machbare Lösungen erforderlich. Der Versuch diente primär dem Verständnis der Abläufe, der Ansatz wurde in dieser Form nicht weiter verfolgt.

8.5.8 Nachbehandlung mit Lösungsmittelgelen

Zielstellung

Die Verdunstungsgeschwindigkeit kann auch durch Abdeckung der Verdunstungsflächen beeinflusst werden. An sensiblen Oberflächen mit Gefügeschäden kann jede mechanische Abdeckung zu Beschädigungen führen. Daher wurde der Einsatz von Flüssigkeiten für den temporären Porenverschluss erwogen. Um die Stabilität der eingebrachten Dispersion dadurch nicht zu beeinträchtigen, erschien die Nachbehandlung mit dem jeweiligen Dispersionsmedium sinnvoll. Das zusätzlich applizierte Lösungsmittel sollte den Verschluss der Verdunstungsflächen bewirken und nicht selbst in das Mörtelgefüge eindringen und damit lediglich die Dispersion verdünnen. Daher sollten viskose Lösungsmittelgele verwendet werden.

Experimentelles

Vergleichend wurden zwei Arten von Lösungsmittelgelen angewendet. Für die Oberflächenreinigung von Gemälden werden mithilfe verschiedener Cellulosederivate hergestellte Lösungsmittelgele seit einigen Jahrzehnten benutzt.²⁴² Um einen zusätzlichen Einfluss von Wasser auszuschließen, sollten wasserfreie Gele durch einen Zusatz von alkohollöslicher Hydroxypropylcellulose (HPC) hergestellt werden. In den Untersuchungen von FELLER und WILT wurde Klucel[®]G (Hersteller: Ashland inc., Covington, USA) im Vergleich zu anderen HPC hohe Stabilität ohne festzustellender Farbveränderung bei der Alterung bescheinigt.²⁴³ Eine weitere Möglichkeit der Gelherstellung bieten Verdickungsmittel aus pyrogener Kieselsäure.

Durchführung

(Applikation, Lagerung, Prüfung in Abschnitt 8.5.2, S. 64f.)

Lösungsmittelgele wurden aus dem jeweiligen Alkohol und einem Zusatz von 0,5 Ma% HPC Klucel[®]G hergestellt. In einem Einzeltest fand ein Gel aus Ethanol und 5,0 Ma% Aerosil[®]R972 (Hersteller: Evonic Degussa GmbH, Essen, Deutschland) Verwendung.

Die Applikation erfolgte nach erfolgter Festigung durch kurzzeitiges Eintauchen. Da die vorangegangenen Untersuchungen zeigten, dass die Remigration der Feststoffe erst am Ende der

²⁴² KHANDEKAR (2004), S. 6f.

²⁴³ FELLER/ WILT (1990), insbesondere S.71

Lösungsmittelverdunstung stattfindet, sollte der Behandlungszeitpunkt möglichst in dieser Phase liegen. Die Verdunstung wurde indirekt durch Messung mit einem elektronischen Feuchtigkeitsmessgerät (GANN Hydromette Compact B, Hersteller: Gann Mess- u. Regeltechnik GmbH, Gerlingen) kontrolliert. Durch Vorversuche wurde diese Messmethode für die Verdunstungsmenge zunächst geprüft und geeicht (Messprinzip Abschnitt 10.3.5, S. 153, Messergebnisse in Protokoll Nr. 2-04).²⁴⁴

Geprüft wurde die Anwendung von Gelen für Behandlung mit unmodifiziertem CaLo-SiL[®] (25 g/l), mit verdünnter sowie mit Aceton versetzter Dispersion auf Ethanol- und n-Propanol-Basis. Die Testreihe fand an Prüfkörpern aus dolomitischen Kalkmörteln statt, eine Gegenprobe wurde mit Gipsmörtel durchgeführt.

Eine zusätzliche Prüfung hinsichtlich der Anfälligkeit des mit HPC behandelten Probenmaterials gegenüber biologischer Besiedelung erfolgte an drei Prüfkörpern durch die Industrial Microbiological Services LTD (IMSL/ Hampshire, Großbritannien).

Ergebnisse

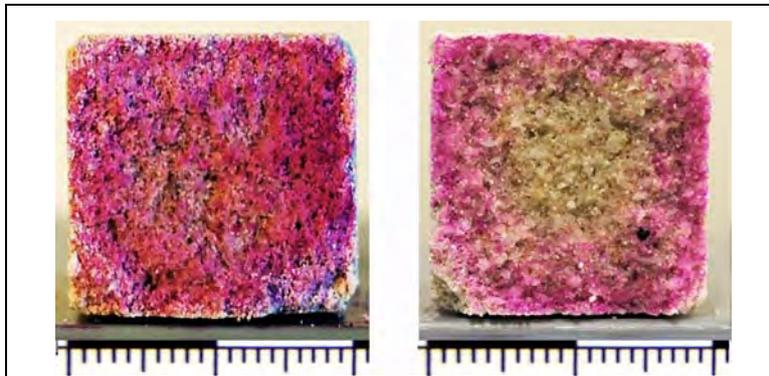


Abb.10: Proben aus dolomitischem Kalkmörtel (links) und aus Gipsmörtel (rechts), behandelt mit [NP12,5] und nach 4,5 Stunden mit 0,5 %iger Klucel[®]-Lösung, mit Indikatorlösung nach beendeter Evaporation angefärbt

Bei den Anwendungen mit verschiedenen konzentrierten Dispersionen ohne Acetonanteil sowie mit acetonhaltigen Dispersionen mit hohem Feststoffgehalt (25 g/l) war auch bei der Nachbehandlung mit Lösungsmittelgelen eine Aufkonzentration im oberflächennahen Bereich zu verzeichnen, eine oberflächige Weißschleierbildung war jedoch nicht festzustellen. Folglich befand sich die Konzentrationszone wenige Millimeterbruchteile unter der Substratoberfläche. Der Konzentrationsabfall nach innen war unterschiedlich stark ausgeprägt.

Bei Anwendung von Aerosil[®]R972 als Gelbildner verbleibt dieses als weißer Belag auf den Oberflächen.

Mit der acetonhaltigen Verdünnung [NP12,5AC] und nachträglicher Behandlung mit n-Propanol-Gel konnte eine nahezu homogene Calciumhydroxidverteilung erreicht werden (Abbildung 10, links).

Die gleichen Mitteln und Methoden durchgeführte Gegenprobe am Gipsmörtel erbrachte eine Aufkonzentration der Feststoffe im oberflächennahen Bereich, die erheblich deutlicher ausfiel als bei gleichartiger Behandlung des Kalkmörtels (Abbildung 10, rechts).

²⁴⁴ Siehe Anhang A, S. 231

Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 2-03, Blatt 2 dokumentiert.²⁴⁵

Bei der Prüfung von mit HPC behandelten Proben auf Anfälligkeit gegenüber biologischer Besiedelung wurde keinerlei Wachstum von Mikroorganismen festgestellt. Die Ergebnisse sind im betreffenden Bericht des IMSL im Anhang dokumentiert.²⁴⁶

Bewertung

Die nachträgliche Behandlung mit Lösungsmittelgelen wirkte in allen untersuchten Fällen einer Konzentration auf den Substratoberflächen entgegen. Oberflächige Krusten oder Weißschleier sind durch die Anwendung der Gele auf Hydroxycellulosebasis vermeidbar. Aerosil®R972 eignet sich nicht als Gelbildner, da es als oberflächige Auflagerung zurückbleibt. Meist befindet sich eine erhöhte Feststoffkonzentration unmittelbar unter den Oberflächen. Während bei allen bisherigen Untersuchungen eine oberflächlich sichtbare Schleierbildung bereits auf inhomogene Feststoffverteilung im Mörtel hinwies, sind hier die kritischen Konzentrationsunterschiede nur durch die weitere Untersuchung erkennbar. Für die Praxis ergibt sich die nachdrückliche Forderung, den Erfolg von Behandlungen mit Nanodispersionen durch geeignete Prüfung der Tiefenverteilung und des Festigkeitsprofils nachzuweisen.

Die Nachbehandlung mit Lösungsmittelgelen kann in Kombination mit der Modifizierung der Dispersionen durch Verdünnung und Acetonbeimischung zum Erreichen des gewünschten Erfolges beitragen. In den einzelnen Testreihen haben die Methoden der Verdünnung, Acetonbeimischung und Gel-Nachbehandlung jeweils für sich betrachtet kaum eine relevante Verbesserung bewirken können. Positive Tendenzen brachten kombinierte Anwendungen von jeweils zwei dieser Methoden. Erst mit der Kombination aller drei Methoden konnte eine zufrieden stellende Feststoffverteilung im Mörtel erreicht werden (vergleiche Probe Nr. 5.7 in Protokoll Nr. 2-03 Blatt 2²⁴⁷). Wie sich zeigte, ist das aber nur bei der genau zu ermittelnden Abstimmung der Modifizierungen möglich.

Das am Gipsmörtel festgestellte Ergebnis der Behandlung mit [NP12,5] und Nachtränkung mit n-Propanol-Gel steht in Kontrast zu den Beobachtungen am Tränkversuch ohne Acetonanteil und Nachbehandlung (vergleiche Protokoll Nr. 2-02)²⁴⁸. War bei letzterer noch eine größere Feststoffmenge im Inneren des Prismas verblieben, ist die Partikelmigration nach der Gelbehandlung sichtbar stärker vonstatten gegangen. Modifikationen, die am Kalkmörtel eine Verbesserung der Tiefenverteilung der Wirkstoffe bewirkten, haben am Gipsmörtel gegenteilige Wirkung (vergleiche Abbildung 10). Die Effekte sind folglich stark vom Substrat abhängig. Eine Übertragbarkeit von bestimmten Methoden von einem Anwendungsfall zu einem anderen darf ohne Überprüfung nicht erfolgen.

Die Gefahr, durch die Anwendung der Cellulosederivat enthaltenden Lösungsmittelgele eine größere Anfälligkeit gegenüber biologischer Besiedelung zu bewirken, besteht offenbar nicht.

²⁴⁵ Proben Nr. 5.1 bis 5.8, siehe Anhang A, S. 229

²⁴⁶ Siehe Anhang B, S. 364ff.

²⁴⁷ Siehe Anhang A, S. 227

²⁴⁸ Proben 1.3 und 5.8, siehe Anhang A, S. 227

8.5.9 Bimodale Dispersionen

Zielstellung

Es sollte geprüft werden, ob die Beimischung von größeren Partikeln in die Nanodispersionen eine Koagulation der Nanopartikel im Gefüge begünstigen und damit den Verbleib in der Tiefe bewirken könne. Die entsprechenden Versuche sind zunächst an Prüfkörpern aus Kalkmörtel durchgeführt worden, Vergleichsproben zur Einschätzung der Übertragbarkeit von Ergebnissen erfolgten dann auch an Gipsmörtel.

Durchführung

Den CaLoSiL[®] Nanodispersionen wurden in unterschiedlichen Mengenanteilen CaLoSiL[®] mikro zugesetzt, eine ethanolische Calciumhydroxiddispersion mit Partikelgrößen von 1 bis 3 µm und Feststoffgehalt von 120 g/l (vgl. Abschnitt 5.1.3, S. 35). Diese bimodalen Dispersionen wurden frisch verarbeitet.

Zunächst fanden Mischungen mit relativ hohem Anteil an CaLoSiL[®] mikro Anwendung (5+1 Massenanteile Nanodispersion+Mikrodispersion), anschließend wurde die Menge erheblich reduziert (10+1, 30+1 und 100+1 Massenanteile).

Getestet wurde die Modifizierung von CaLoSiL[®] auf Ethanol-Basis mit 50 g/l bzw. 25 g/l Feststoffgehalt zunächst an Prismen aus dolomitischem Kalkmörtel. Einige Vergleichstests erfolgten an Gipsmörtelprismen mit CaLoSiL[®]E25 und NP25.

(Applikation, Lagerung, Prüfung in Abschnitt 8.5.2, S. 64f.)

Ergebnisse

Die aus hoch konzentriertem CaLoSiL[®]E 50 und CaLoSiL[®] mikro im Massenverhältnis 5+1 hergestellte bimodale Dispersion vermochte nicht, den 2 x 2 cm starken Prüfkörper zu durchdringen. Von der Applikationsseite aus drang das Mittel nur etwa 1,2 cm tief ein. In diesem Bereich erwies sich die Feststoffverteilung nach abgeschlossener Verdunstung als vollkommen homogen.

Die mit CaLoSiL[®]E25 hergestellten Dispersionen drangen unabhängig vom zugesetzten Anteil an CaLoSiL[®] mikro problemlos in das Mörtelmaterial ein. Im Endergebnis zeigte sich bei all diesen Versuchen die Feststoffkonzentration im untersten Probenbereich etwas geringer (0,2 bis 0,4 cm oberhalb der Auflagefläche), sonst aber homogen verteilt. Bei der Anwendung der bimodalen Dispersion mit dem geringsten Anteil Mikrodispersion war auch in den Eckbereichen im oberen Probenbereich ein deutlich geringerer Calciumhydroxidgehalt festzustellen (Abbildung 11, links).

Die an Gipsmörtel erprobten bimodalen Dispersionen, hergestellt aus CaLoSiL[®]E25 und CaLoSiL[®] mikro (30+1 bzw. 100+1 Massenanteile) bzw. NP25 und CaLoSiL[®] mikro (100+1 Massenanteile) erreichten sämtlich eine homogene Feststoffverteilung im gesamten Probenquerschnitt (Beispiel Abbildung 11, rechts). Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 2-03, Blatt 3 dokumentiert.²⁴⁹

²⁴⁹ Proben 6.1 bis 6.8, siehe Anhang A, S. 230

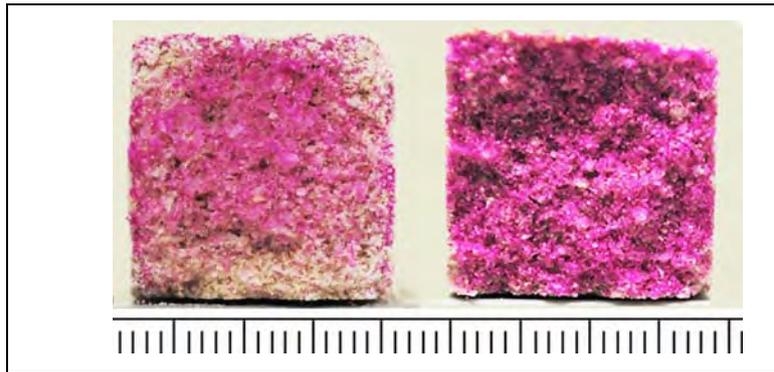


Abb.11: Proben aus dolomitischem Kalkmörtel (links) und aus Gipsmörtel (rechts), behandelt mit CaLoSiL[®]E25 + CaLoSiL[®]mikro (100+1 m/m), mit Indikatorlösung nach beendeter Evaporation angefärbt

Vergleichend sind Dünnschliffuntersuchungen an einmalig mit bimodalen Dispersionen behandelten Prüfkörpern durchgeführt worden.²⁵⁰ Die Ergebnisse der Indikatorprüfung konnten hierbei nur tendenziell bestätigt werden. Zwar waren die eingebrachten Wirkstoffe im gesamten Probenquerschnitt auch im Dünnschliff nachzuweisen, jedoch lag auch hier eine deutlich höhere Konzentration in den oberflächennahen Bereichen vor (Abbildung 12).

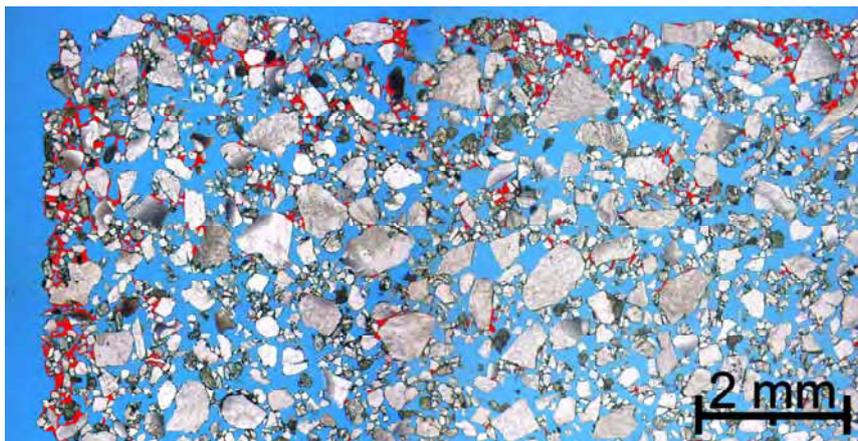


Abb.12: Dünnschliffaufnahme eines Probekörpers aus dolomitischem Kalkmörtel (Detail: oben und links Prüfkörperoberflächen), behandelt mit bimodaler Dispersion aus CaLoSiL[®]NP 25 und CaLoSiL[®]mikro (100+1 m/m), die Feststoffanlagerungen sind im Bild rot markiert²⁵¹ (Polarisator \parallel) Aufnahme: T. Köberle 2012

Bewertung

Die Beimischung eines Anteils einer Mikrodispersion mit (im Mittel) 10 bis 30 mal größeren Teilchen zur Nanodispersion hat deutliche Auswirkung auf die Partikelmigration. Die Feststoffe verbleiben im Inneren des Mörtelgefüges. Hierfür ist der Anteil der Mikrodispersion nicht ausschlaggebend – zumindest im untersuchten Bereich zwischen 9 Ma% und < 1 Ma% ist das Ergebnis vergleichbar.

²⁵⁰ Die Dünnschliffe stellte T. Beckmann, Schwülper-Lagesbüttel her. Die Untersuchungen erfolgten an der HfBK Dresden durch Dipl. Geol. T. Köberle.

²⁵¹ Das im Ergebnis der mikroskopischen Untersuchung erstellte Mapping der Einlagerungen wurde von Dipl. Geol. T. Köberle durchgeführt.

Die an behandelten Kalkmörtelprismen festgestellte Konzentrationsabnahme im untersten Probenbereich liegt ebenfalls bei allen Versuchen in ähnlicher Ausprägung vor und ist somit nicht abhängig von der Menge der zugesetzten groben Bestandteile. Es ist daher nicht anzunehmen, dass dieser Effekt auch auf ein inhomogenes Eindringen der Dispersion in das Material zurückzuführen wäre. Dagegen spricht auch die Konzentrationsabnahme an den oberen Eckbereichen der Probe im Falle der bimodalen Dispersion mit geringstem Grobanteil (Abbildung 11, links). Die Applikation erfolgte von der Oberseite her und die betreffenden Bereiche wurden hierbei direkt penetriert. Eine endgültige Erklärung bleibt offen.

Dass Porenverschlüsse durch die größeren Partikel der Mikrodispersion das Verbleiben der Nanoteilchen im Substratgefüge bewirken, ist für Gemische mit sehr hohem Mikrodispersionsanteil denkbar. Hier verhinderte möglicherweise dieser Effekt ein vollständiges Durchdringen der Probe. In den Versuchen mit geringerem Anteil Mikrodispersion lag jedoch eine vollständige Durchdringung der Probekörper vor. Wenn das Eindringen nicht behindert wurde, wäre auch eine Remigration möglich gewesen.

An Gipsmörtel wurde die angestrebte Feststoffverteilung im gesamten Mörtelquerschnitt erreicht. Auch hier wird deutlich, dass bereits die geringe Beimischung einer Mikrodispersion von $< 1 \text{ Ma}\%$ zu den erwünschten Ergebnissen führen kann und dies gleichermaßen für Nanodispersionen auf Ethanol- als auch auf n-Propanol-Basis gilt.

Die Prüfmethode durch Anfärben mit Indikatorlösung ist für den Nachweis der Verteilung der Wirkstoffe im Mörtelgefüge zwar grundsätzlich geeignet. Es können, zumindest in der angewendeten Weise, aber nur begrenzt Konzentrationsunterschiede erfasst werden. Es sind daher zwar Aussagen zur Tiefenverteilung der Wirkstoffe, aber nur bedingt zu ihrer Homogenität sicher abzuleiten.

8.5.10 Zusammenfassung und Diskussion

Die durch Partikelmigration verursachte oberflächige Aufkonzentration der Wirkstoffe im Substrat kann durch Verdünnung der Dispersion, durch Acetonbeimischung und durch Verzögerung der Evaporation verringert werden. Die kombinierte Anwendung aller drei positiv wirksamen Methoden kann weitere Verbesserung bringen. Die Wirksamkeit ist jedoch substratabhängig und nur in ihrer Tendenz verallgemeinerbar.

Bimodale Dispersionen weisen gegenüber den reinen Nanodispersionen eine erheblich verringerte Neigung zur Remigration der Wirkstoffpartikel auf.

Für die praktische Anwendung ergibt sich die unbedingte Notwendigkeit systematischer Vorproben zum Verhalten der Festigungsmittel im jeweiligen Substrat. Hierbei sollten Festigungsproben zuerst mit bimodalen Dispersionen erfolgen. Ist keine homogene und ausreichend tiefe Verteilung der Wirkstoffe erreichbar, stellen die Modifizierungen durch Verdünnung und Acetonbeimischung sowie die Nachbehandlung mit Lösungsmittelgelen weitere Optionen dar.

Diese zwingend erforderlichen Vorproben erfordern allerdings Probeentnahmen zum Nachweis der erreichten Wirkstoffverteilung.

8.6 Änderung physikomechanischer Eigenschaften durch die Behandlung mit Nanodispersionen

8.6.1 Zielstellung

Für die Beurteilung der Wirkung von Behandlungen mit mineralischen Nanodispersionen an Mörteln wurde eine Auswahl zu prüfender Eigenschaften getroffen. Gegenständlich waren Haupteigenschaften der Substrate, mit denen eine erste grundlegende Einschätzung der Wirkung der unterschiedlichen Behandlungen möglich erscheint: die Festigkeit, Porosität und Wasseraufnahmefähigkeit. Die Eigenschaften wurden vor der Behandlung und nach Aushärtung der behandelten Materialien geprüft, um deren Veränderung zu ermitteln.

8.6.2 Behandlung der Proben

Vorgehensweise

Da die an Lockersubstraten festgestellte Festigungswirkung sehr gering war (vgl. Abschnitt 7.7, S. 52), sollten die Probebehandlungen an Mörtelprüfkörpern in mehreren Applikationszyklen erfolgen. Damit eine folgende Behandlung die Trocknung, Aushärtung und Carbonatisierung der jeweils vorangegangenen nicht behindert (vgl. Abschnitt 5.1.2, S. 32 ff.), wurde jeweils eine Reaktionszeit von wenigstens einer Woche unter den definierten Klimabedingungen (65%rF, 20°C) eingehalten.

Die Untersuchungen erstreckten sich auf Behandlungen mit den verschiedenen CaLo-SiL[®]Nanodispersionen und mit unterschiedlichen Modifikationen derselben sowie verschiedenen Applikationsmethoden.

Die Modifizierungsmöglichkeiten Verdünnung, Acetonbeimischung, Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel und bimodale Dispersion sollten hierbei in mehrstufigen Applikationszyklen Anwendung finden. Zum Vergleich wurden drei Behandlungen mit unmodifizierten Nanodispersionen (25 g/l) an Mörtelprismen vorgenommen.

Bei allen erprobten Methoden wurde in der Summe aller Behandlungsschritte die gleiche Feststoffmenge appliziert, um eine Vergleichbarkeit der ermittelten Werte zu gewährleisten.

Die Proben wurden bis zur Massenkonstanz vorgetrocknet (Kalkmörtelproben bei 105°C, Gipsmörtelproben bei 40°C im Trockenschrank).

Applikationstechnik

Die Applikation der Dispersionen erfolgte per Tauchverfahren. Hierzu wurde der entsprechende Probekörper in einen Kunststoffbehälter gelegt und die Dispersion bis zu dessen Überdeckung (wenigstens 3-4 mm Überstand) eingefüllt. Der Behälter erhielt eine Abdeckung mit einer Glasplatte, die Einwirkzeit betrug eine Stunde.

Die nur zum Vergleich angewendete Applikation mit Pipette (Flutverfahren) erfolgte durch kontinuierliches Auftropfen von der Oberseite des liegenden Mörtelprismas bis zum Herauslaufen auf der Unterseite. Die Behandlung fand unter unkonditioniertem Laborklima statt.

Unmittelbar nach jeder Behandlung verblieben die Probekörper eine Woche lang in einem klimatisierten Raum bei 20°C und 65 %rF, anschließend sind sie für die Vorbereitung der

8 Verbesserung von Eindringverhalten und Tiefenverteilung

nächsten Applikation erneut im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz gelagert worden (105 bzw. 40°C). Die Messungen der physikomechanischen Eigenschaften erfolgten frühstens nach einer Woche Lagerung im konditionierten Klima nach der letzten Behandlung.

Substrate

Die Untersuchungen erfolgten an den im Labor hergestellten prismenförmigen Probekörpern aus dolomitischem Kalkmörtel sowie aus Gipsmörtel (Herstellung in Abschnitt 8.4, S. 59ff.). Alle Behandlungen und Prüfungen sind an Serien aus jeweils mindestens drei Einzelproben durchgeführt worden.

Nr.	Festigungsmittel	Methode	Substrat (Prisma)
Testreihe 1			
1-1	3x CaLoSiL [®] E25	T	Dolom. Kalkmörtel
1-2	3x CaLoSiL [®] E25	F	Dolom. Kalkmörtel
1-3	3x CaLoSiL [®] IP25	T	Dolom. Kalkmörtel
1-4	3x CaLoSiL [®] NP25	T	Dolom. Kalkmörtel
1-5	3x CaLoSiL [®] E25	T	Gipsmörtel
1-6	3x CaLoSiL [®] E25	F	Gipsmörtel
1-7	3x CaLoSiL [®] IP25	T	Gipsmörtel
1-8	3x CaLoSiL [®] NP25	T	Gipsmörtel
Testreihe 2			
2-1	[E5], [E7,5], [E10], [E12,5], [E15], CaLoSiL [®] E25	T	Dolom. Kalkmörtel
2-2	[E5], [E7,5], [E10], [E12,5], [E15], CaLoSiL [®] E25	T	Gipsmörtel
Testreihe 3			
3-1	6 x [E12,5AC]	T	Dolom. Kalkmörtel
3-2	6 x [E12,5AC]	T	Gipsmörtel
Testreihe 4			
4-1	[E5AC],[E7,5AC],[E10AC],[E12,5AC],[E15AC],[E25AC]	T	Dolom. Kalkmörtel
4-2	[E5AC],[E7,5AC],[E10AC],[E12,5AC],[E15AC],[E25AC]	T	Gipsmörtel
Testreihe 5			
5-1	[E5AC], 2x[E12,5AC], 2x[E25AC]	T	Dolom. Kalkmörtel
5-2	[NP5AC], 2x[NP12,5AC], 2x[NP25AC]	T	Dolom. Kalkmörtel
Testreihe 6			
6-1	6x [NP12,5] und Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel ¹	T	Dolom. Kalkmörtel
Testreihe 7			
7-1	3x CaLoSiL [®] E25 + CaLoSiL [®] mikro (100+1 m/m)	T	Dolom. Kalkmörtel
7-2	3x CaLoSiL [®] IP25 + CaLoSiL [®] mikro (100+1 m/m)	T	Dolom. Kalkmörtel
7-3	3x CaLoSiL [®] NP25 + CaLoSiL [®] mikro (100+1 m/m)	T	Dolom. Kalkmörtel
¹ ... n-Propanol mit einem Zusatz von 0,5 Ma% Klucel [®] G		T= Tauchverfahren F=Flutverfahren	

Tab.03: Durchgeführte Testreihen zur Prüfung der Änderung von physikomechanischen Mörtel Eigenschaften

Testreihe 1

Die erste Testreihe beinhaltete einen Festigungszyklus von jeweils drei Behandlungen mit den reinen Nanodispersionen CaLoSiL[®]E25, IP25 und NP25. Die Behandlungen erfolgten im Tauchverfahren, bei einer Prüfkörperserie wurde zum Vergleich ein Flutverfahren (Auftröpfen) durchgeführt.

Die Testreihe beinhaltete fünf Serien mit Kalkmörtel- und drei mit Gipsmörtelprismen.

Testreihe 2

Die Anwendung verdünnter Nanodispersion erfolgte als „aufbauende Festigung“²⁵² mit schrittweise zunehmender Feststoffkonzentration in den Dispersionen (Applikation mittels Tauchverfahren). Verwendet wurden Verdünnungen von CaLoSiL[®]E25. Nacheinander fanden in den einzelnen Applikationsschritten Dispersionen mit zunehmendem Feststoffgehalt Anwendung. In der Summe ergibt sich der gleiche applizierte Feststoffgehalt wie bei den vorigen Testreihen.

Die Testreihe beinhaltete zwei Serien mit jeweils sechs Einzelbehandlungen von Prismen aus Kalkmörtel und Gipsmörtel.

Testreihe 3

Die Behandlung mit verdünnter Nanodispersion mit anteilig Aceton im Dispersionsmittel (Tauchverfahren) wurde am Beispiel einer ethanolbasierten Dispersion mit einem Feststoffgehalt von 12,5 g/l und einem Acetonanteil von 40 Vol% erprobt. Um die gleiche Feststoffmenge wie bei der dreimaligen Behandlung mit unverdünnten Dispersionen (Testreihe 1) zu erreichen, waren hier sechs Applikationen erforderlich.

Die Testreihe beinhaltete zwei Serien mit Prismen aus Kalkmörtel und aus Gipsmörtel.

Testreihe 4

Testreihe 2 wurde wiederholt, das Dispersionsmittel enthielt aber jeweils 40 Vol% Aceton. Die Testreihe beinhaltete zwei Serien mit jeweils sechs Einzelbehandlungen von Prismen aus Kalkmörtel und aus Gipsmörtel.

Testreihe 5

Bei dieser Testreihe wurde eine erste Behandlung mit sehr stark verdünnter Dispersion (Feststoffgehalt 5 g/l), anschließend zwei Behandlungen mit halbverdünnter Dispersion (Feststoffgehalt 12,5 g/l) und schließlich zwei Behandlungen mit unverdünnter Dispersion mit 25 g/l Feststoff durchgeführt (alle Behandlungen im Tauchverfahren). Hierbei fanden Dispersionen auf der Basis von Ethanol sowie n-Propanol Anwendung. Dies ergab eine insgesamt etwas höhere Feststoffmenge als bei den vorigen Testreihen (+6,7 Ma%). Die Testreihe beinhaltete zwei Serien mit jeweils sechs Behandlungen von Kalkmörtelprismen.

Testreihe 6

Die Kombination von Verdünnung, acetonhaltigem Dispersionsmittel und der Nachbehandlung mit einem Lösungsmittelgel wurde mit modifiziertem CaLoSiL[®]NP25 durchgeführt. Der Feststoffgehalt wurde auf 12,5 g/l reduziert, der Acetonanteil im Dispersionsmittel betrug 40 Vol%, die Applikation erfolgte im Tauchverfahren. Für die Nachbehandlung fand

²⁵² Begriff aus der Natursteinkonservierung für die Gefügestiftung in mehreren Arbeitsgängen bei jeweils erhöhter Wirkstoffkonzentration. Vgl. DANZ (2003)

n-Propanol mit einem Zusatz von 0,5 Ma% Klucel[®]G Verwendung. Die Applikation des Lösungsmittelgels erfolgte durch einmaliges, kurzzeitiges Eintauchen des Prüfkörpers jeweils fünf Stunden nach Ende jeder Behandlung mit Nanodispersion. Es wurden insgesamt sechs Behandlungen und Nachbehandlungen durchgeführt, um die applizierte Feststoffmenge entsprechend Testreihe 1 zu erreichen. Die Testreihe beinhaltet eine Serie Kalkmörtelprismen.

Testreihe 7

Aus CaLoSiL[®]E25, IP25 und NP25 sind durch Zugabe von CaLoSiL[®]mikro (jeweils 1 Ma%) bimodale Dispersionen hergestellt und analog Testreihe 1 angewendet worden (Applikation im Tauchverfahren). Die Testreihe beinhaltet drei Serien mit jeweils drei Behandlungen von Kalkmörtelprismen.

8.6.3 Feststoffaufnahme

Zielstellung

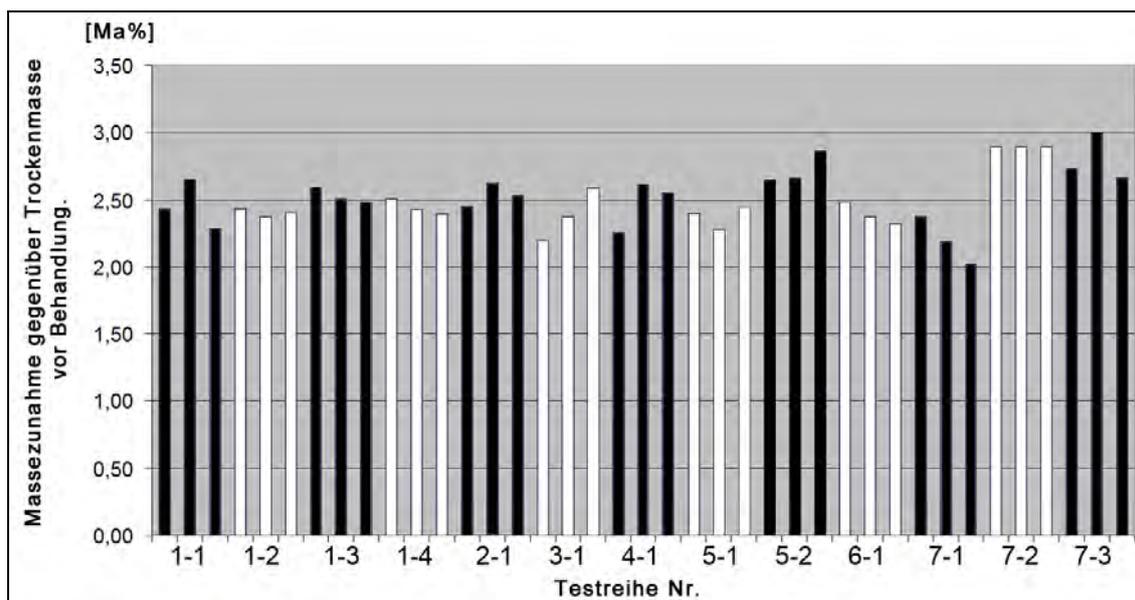
Es war festzustellen, wie viel Feststoff durch die verschiedenen Methoden in die Substrate eingebracht wurde. In der Summe war theoretisch immer die gleiche Feststoffmenge appliziert worden.

Durchführung

Während der Behandlungen wurde die Masseveränderung der Probekörper kontrolliert:

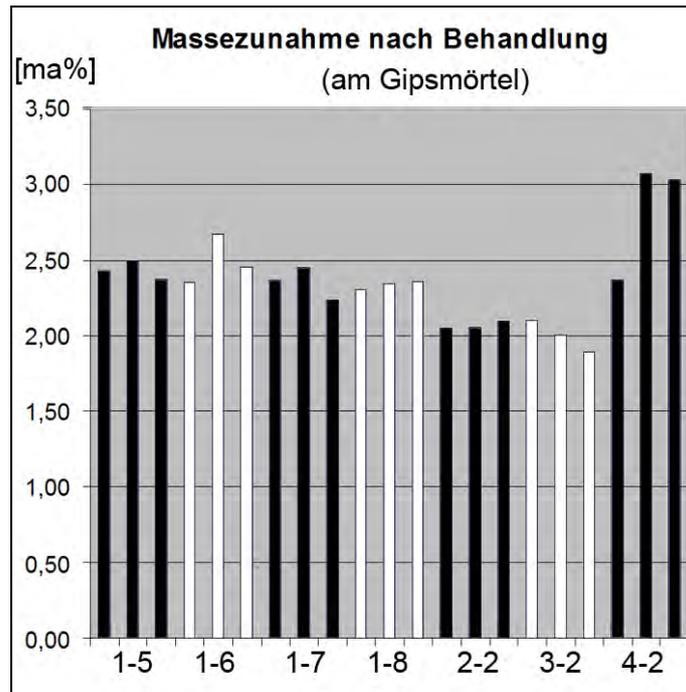
- 1.) Trockenmasse vor erster Behandlung nach Entnahme aus dem Trockenschrank
- 2.) Masse unmittelbar nach erfolgter Applikation
- 3.) Masse nach wenigstens einwöchiger Lagerung im konditionierten Klima (20°C, 65 %rF) und anschließender erneuter Trocknung bis zur Massenkonstanz

Ergebnisse



Graph.08: Massezunahme der Mörtelprismen aus dolomitischem Kalkmörtel nach Abschluss der unterschiedlichen Behandlungen und Trocknung

Bei fast allen angewendeten Applikationstechniken und Modifizierungen zeigten die Probekörper aus dolomitischem Kalkmörtel eine sich nur gering verändernde Feststoffaufnahme, die bei Auswertung von Mittelwerten einer Massezunahme von 2,2 % bis 2,9 % entspricht (Graphik 08). Die höchsten Werte erzielten hierbei die bimodalen Dispersionen auf Isopropanol - und n-Propanol -Basis (Nr. 7-2 und 7-3) sowie die in sechs Konzentrations-schritten erfolgte Anwendung von n-Propanol- Dispersionen mit 40 Vol% Acetonanteil (Nr. 5-2). Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 3-01 dokumentiert.²⁵³



Graph.09: Massezunahme der Mörtelprismen aus Gipsmörtel nach Abschluss der unterschiedlichen Behandlungen und Trocknung

Bei Gipsmörtel entspricht die im Substrat verbliebene Feststoffmenge bei Anwendung unmodifizierter Nanodispersion (Graphik 09, Testreihe 1) recht genau den bei Kalkmörtel gemessenen Werten. Durch die Anwendung von verdünnten Nanodispersionen war mit nur ca. 2,0 bis 2,5 Ma% ein deutlich geringerer Massenzuwachs als am Kalkmörtel zu beobachten (Nr. 2-2). Die Ergebnisse der mit Aceton versetzten Mittel sind ambivalent. Während nach dem Applikationszyklus mit einer Dispersion gleich bleibender Konzentration (Nr. 3-2) eine eher geringe Massenzunahme festzustellen war, sind bei der Behandlung mit Dispersionen mit schrittweise zunehmendem Feststoffgehalt (Nr. 4-2) erheblich größere Mengen Bindemittel im Mörtelmaterial verblieben.

Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 3-02 dokumentiert.²⁵⁴

²⁵³ Siehe Anhang A, S. 233ff.

²⁵⁴ Siehe Anhang A, S. 240ff.

Berechnungen

Für Kalkmörtel kann die Veränderung des Bindemittel-Zuschlag-Verhältnisses kalkuliert werden.

Rechnerisch ergibt sich für den Bindemittelgehalt:

Massenverhältnis Bindemittel + Zuschlag bei der Herstellung = $1 + 34$ ²⁵⁵

Faktor der Massenzunahme durch die Carbonatisierung:

$100,09 \text{ g/mol CaCO}_3 / 74,1 \text{ g/mol Ca(OH)}_2 \approx 1,35$

Massenverhältnis Bindemittel + Zuschlag nach Aushärtung = $1,35 + 34$

Das entspricht 3,82 % Masseanteil Bindemittel im ungefestigten Material.

Mindestmenge eingebrachten Bindemittels im Mittel = 2,2 Ma%

In 102,2 Massenanteilen sind $3,82 + 2,2 = 6,02$ Massenteile Bindemittel enthalten.

Das entspricht 5,89 % Bindemittelgehalt nach Behandlung und Aushärtung oder 154 % bezogen auf Bindemittelgehalt vor Behandlung.

Der in den Versuchen maximal erreichte Bindemittelintrag betrug 2,99 %, demnach 6,61 % Bindemittelgehalt nach Behandlung und Aushärtung oder 173 % bezogen auf Bindemittelgehalt vor Behandlung.

Bewertung

Die Erhöhung des Bindemittelgehaltes durch die Festigungen lag bei den durchgeführten Tests im Minimum bei ca. 54 %, im Maximum bei ca. 73 %. Zur Einschätzung dieser Werte für den zu erwartenden Festigungseffekt muss allerdings berücksichtigt werden, dass im ungefestigten Substrat ein extrem niedriger Bindemittelgehalt vorlag, der im Vergleich zu einem „üblichen“ Mörtelansatz kaum ein Viertel betrug. Es ist folglich nicht zu erwarten, dass mit der nun nach jeder der verschiedenen Behandlungen enthaltenen Bindemittelmenge bereits hohe Festigkeit erreicht werden konnte. Das künstlich hergestellte Substrat wurde bewusst so entwickelt, dass ein großer Festigungsbedarf vorlag (Anforderungen Abschnitt 8.4, S. 59). Das Probenmaterial enthält sehr wenig, aber intaktes Bindemittel. Im Gegensatz zu diesem simulierten Material enthalten gefügeschädigte Altmörtel erheblich mehr Bindemittel, jedoch mit verringerter oder verlorener Bindungskraft. Unterschiede müssten hier vor allem in der Porenstruktur bestehen.

Ob dieser Unterschied für die Feststoffaufnahme eine Rolle spielt, kann am Vergleich mit den Gipsmörtelproben diskutiert werden. Der Gipsmörtel wurde unter Wiederverwendung aufgemahlener historischen Gipsmörtels hergestellt und enthält somit große Mengen nicht wirksamen Bindemittels. Es sind aber bei der Behandlung mit nicht modifizierten Nanodispersionen keine bemerkenswerten Unterschiede zwischen Kalkmörtel und Gipsmörtel festzustellen (vergleiche Graphiken 06 und 07). Die feinporigen Bindemittelreste im Gefüge hatten auf die Menge eingelagerten Feststoffs offenbar keinen Einfluss.

²⁵⁵ Siehe Bericht STONECORE 10/01/13 im Anhang B, S. 328f.

8.6.4 Biegezugfestigkeit

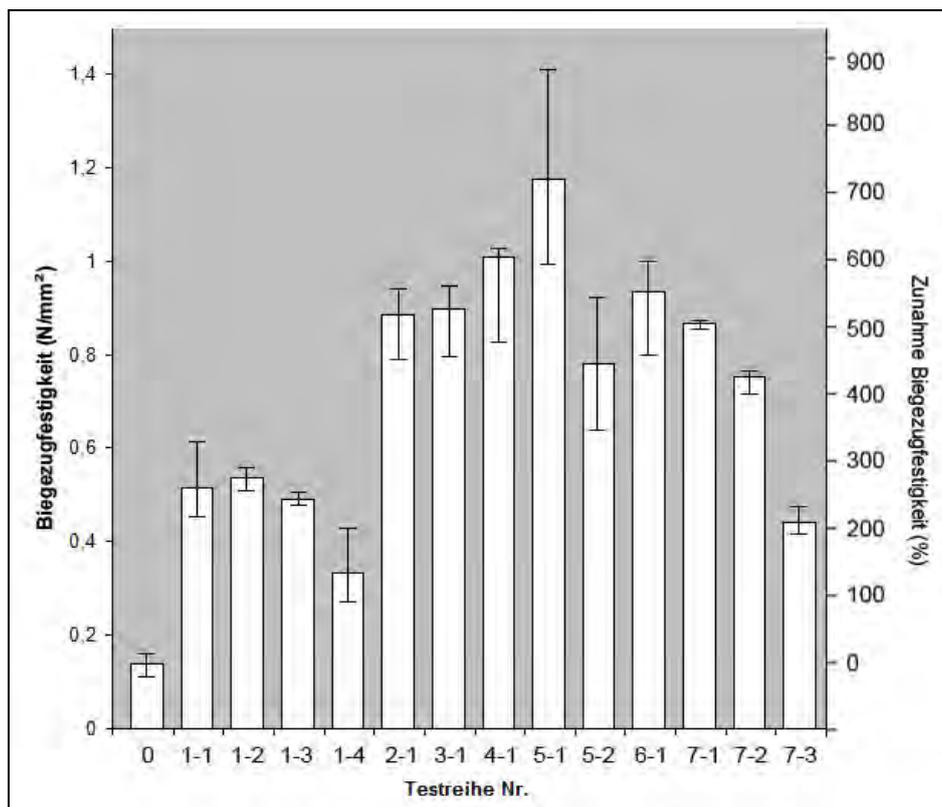
Zielstellung

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit diente dem Nachweis des Festigungseffekts durch die unterschiedlichen Behandlungen an den Probematerialien.

Durchführung

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit erfolgte mit Dreipunkt-Messverfahren wie in Abschnitt 8.2.5 beschrieben (S. 57f.).

Ergebnisse



Graph.10: Biegezugfestigkeit der unterschiedlich behandelten Prüfkörper aus dolomitischen Kalkmörtel mit Darstellung der Durchschnittswerte sowie dem Wertebereich. (Nr. 0 = Messergebnisse am unbehandeltem Material)

Bei allen behandelten Proben konnte eine gegenüber unbehandeltem Material deutlich erhöhte Biegezugfestigkeit festgestellt werden (Ergebnisse Graphik 10).

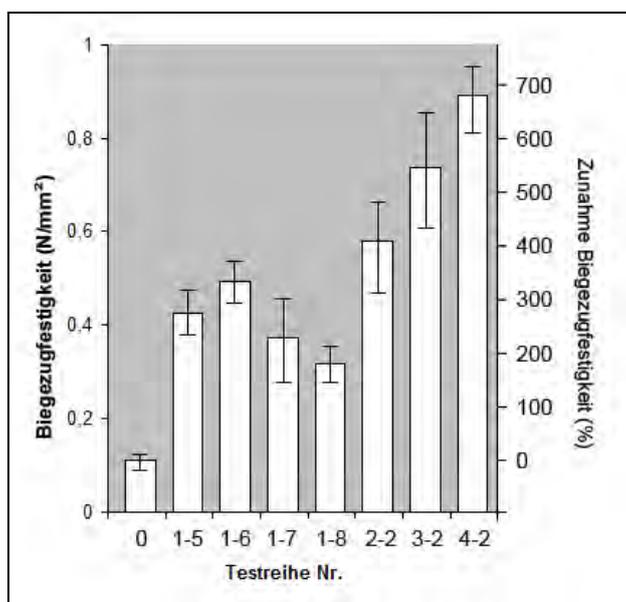
Die Werte für den unbehandelten, sehr schwach gebundenen dolomitischen Kalkmörtel liegen im Bereich von 0,12 bis 0,16 N/mm². Als Bezugswert für die Auswertung ist ein Mittelwert aus neun Messungen an ungefestigten Proben gebildet worden (0,143 N/mm²), auf den sich die folgenden Werte beziehen.

Durch die dreimalige Behandlung mit unmodifizierten Nanodispersionen ist eine mittlere Zunahme der Biegezugfestigkeit um 135 % (mit NP25) bis 276 % (mit E25) erreicht worden. Die Applikation von verdünnten Dispersionen mit schrittweise steigender Feststoffkonzentration hatte eine nochmals deutlich größere Festigkeitszunahme von im Mittel 520 % zur Folge,

vergleichbare Werte erbrachten die Behandlung mit verdünnter Dispersion mit Acetonanteil (529 % Zunahme im Mittel) sowie die Behandlung mit verdünnter Dispersion auf Basis von n-Propanol [NP12,5] bei Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel (durchschnittlich 554 % Zunahme).

Die „aufbauende Festigung“ mit Dispersionen, die jeweils 40 Vol% Aceton enthielten, zeigte bei Anwendung der Mittel auf Basis von n-Propanol eine vergleichsweise nur moderate Festigkeitszunahme von 446 % im Mittel. Die gleiche Methode mit ethanol-basierten Dispersionen bewirkte hingegen den höchsten im Experiment erreichten Zuwachs von durchschnittlich 723 %, der höchste gemessene Einzelwert liegt hier bei über 885 % Festigkeitszunahme gegenüber dem gemittelten Ausgangswert.

Die bimodalen Dispersionen haben je nach angewendeter Lösungsmittelbasis sehr unterschiedliche Festigkeitssteigerungen bewirkt. Die bimodale Dispersion auf Basis von n-Propanol erhöhte die Biegezugfestigkeit um durchschnittlich 210 %, die isopropanol-basierte Dispersion um durchschnittlich 426 %, die ethanol-basierte um durchschnittlich 507 %. Alle Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 3-03 dokumentiert.²⁵⁶



Graph.11: Biegezugfestigkeit der unterschiedlich behandelten Prüfkörper aus Gipsmörtel mit Darstellung der Durchschnittswerte sowie dem Wertebereich. (Nr. 0 = Messergebnisse am unbehandelten Material)

An den Gipsmörtelprismen belief sich die Festigkeitszunahme durch die Behandlung mit unmodifizierten CaLoSiL[®]Dispersionen ähnlich wie an Kalkmörtelprismen, wobei gegenüber diesen eine durchschnittlich etwas geringere Ausgangsfestigkeit vorlag (Ergebnisse Graphik 11). Die Werte der Biegezugfestigkeit wiesen nach der Behandlung mit CaLoSiL[®]E25 eine durchschnittliche Zunahme von 275 % (Tauchbehandlung) bzw. 335 % (Flutung) auf. Die Behandlung mit CaLoSiL[®]IP25 bewirkte eine Festigkeitssteigerung um 329 %, die Behandlung mit CaLoSiL[®]NP25 eine Zunahme um 180 %.

²⁵⁶ Siehe Anhang A. S. 244f

Durch die „aufbauende Festigung“ mit verdünnten Dispersionen auf Ethanol-Basis wurde die Biegezugfestigkeit um 413 % im Mittel gesteigert. Die Anwendung von verdünnter, mit 40 Vol% Aceton versetzter Dispersion [E12,5AC] führte zu einer durchschnittlichen Festigkeitszunahme von 550 %. Die besten Werte wurden durch die Anwendung der „aufbauenden Festigung“ mit acetonhaltigen Dispersionen erreicht, hier betrug die durchschnittliche Festigkeitssteigerung 684 %, der höchste gemessene Einzelwert wies dabei eine Steigerung von 738 % auf.

Alle Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 3-03 dokumentiert.²⁵⁷

Bewertung

Die dreimalige Behandlung mit unmodifizierten CaLoSiL[®] Dispersionen führte zu einer erheblichen Steigerung der Biegezugfestigkeit der sehr weichen Probemörtel auf der Basis von dolomitischem Kalk sowie auf der Basis von Gips. Obwohl die Werte der durch alle drei CaLoSiL[®]-Varietäten erreichten Festigkeit sehr ähnlich ausfallen und die Streuung der Einzelwerte recht groß ist, fällt die Tendenz auf, dass die Dispersionen auf Ethanol-Basis an beiden Substraten, an Kalkmörtel auch die Isopropanol-Dispersion, etwas bessere Festigungsergebnisse erreichten als die n-Propanol-Dispersionen. Die Werte für die mit CaLoSiL[®]IP25 behandelten Gipsmörtelproben weisen eine für den Vergleich zu große Streuung auf.

An den Kalkmörtelprismen haben fast alle erprobten Modifizierungen von Festigungsmitteln und Applikationstechniken eine nochmals überdeutliche Festigkeitssteigerung bewirkt. „Aufbauende Festigung“ und Acetonzumischung sowie Nachbehandlung mit Lösungsmittelgelen und die Beimischung von Mikrodispersion zeigten in der angewendeten Form eine sehr positive Wirkung auf den mechanischen Festigungseffekt. Da bei allen Methoden etwa die gleiche Feststoffmenge eingebracht wurde (Abschnitt 8.6.3, S. 81f.), ist wohl ihre verbesserte Verteilung im Mörtel für die erhöhte Festigungswirkung ursächlich (Abschnitt 8.5, S. 64ff.).

Abweichend hat die Anwendung einer bimodalen Dispersion auf Basis von n-Propanol kaum Verbesserung gegenüber der Behandlung mit unmodifizierter Dispersion gebracht. Die Gründe hierfür sind unbekannt.

²⁵⁷ Siehe Anhang A. S. 244f.

8.6.5 Wasseraufnahmekoeffizient

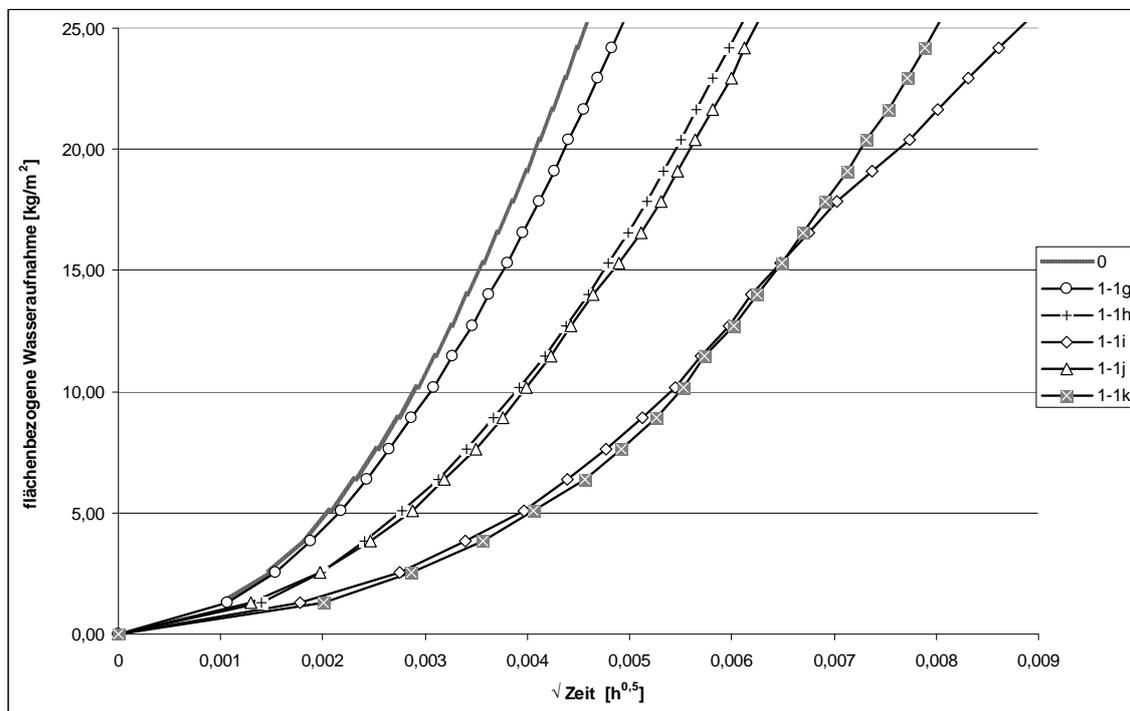
Zielstellung

Es sollte geprüft werden, ob sich durch die Behandlung mit CaLoSiL[®] Dispersion der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) ändert.

Durchführung

Die Prüfung der flächenbezogenen, zeitabhängigen Wasseraufnahme Messungen zur erfolgte mit einem Prüfröhrchen wie in Abschnitt 8.3.2 beschrieben (S. 55f.).

Ergebnisse



Graph.12: Wasseraufnahme - Wurzel Zeit- Diagramm für Proben an unbehandelten Mörtelprismen (1= behandelt) im Vergleich mit unbehandeltem Material (0 = Durchschnittswert)

Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 4 dokumentiert.²⁵⁸

Bewertung

Aufgrund der Fehleranfälligkeit der Methode (vgl. Abschnitt 8.3.2, S.55f.) sind die vorliegenden Ergebnisse mit großem Vorbehalt zu bewerten. Die Messwerte zeigen, dass die kapillare Wasseraufnahme nach der CaLoSiL[®]-Behandlung grundsätzlich verzögert geschieht (Graphik 12). Auch bei den Datenreihen der Werte für behandelte Materialien verläuft die graphische Darstellung der Abhängigkeit zwischen der flächenbezogenen Wasseraufnahme und der Quadratwurzel der Zeit nicht linear. Für die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten sind die Werte daher nicht verwendbar.

²⁵⁸ Siehe Anhang A, S. 246ff.

8.6.6 Wasseraufnahmevermögen

Zielstellung

Mit der Ermittlung des Wasseraufnahmevermögens unter Atmosphärendruck sollte festgestellt werden, ob durch die Festigungsmittel Veränderungen der Porosität verursacht wurden.

Durchführung

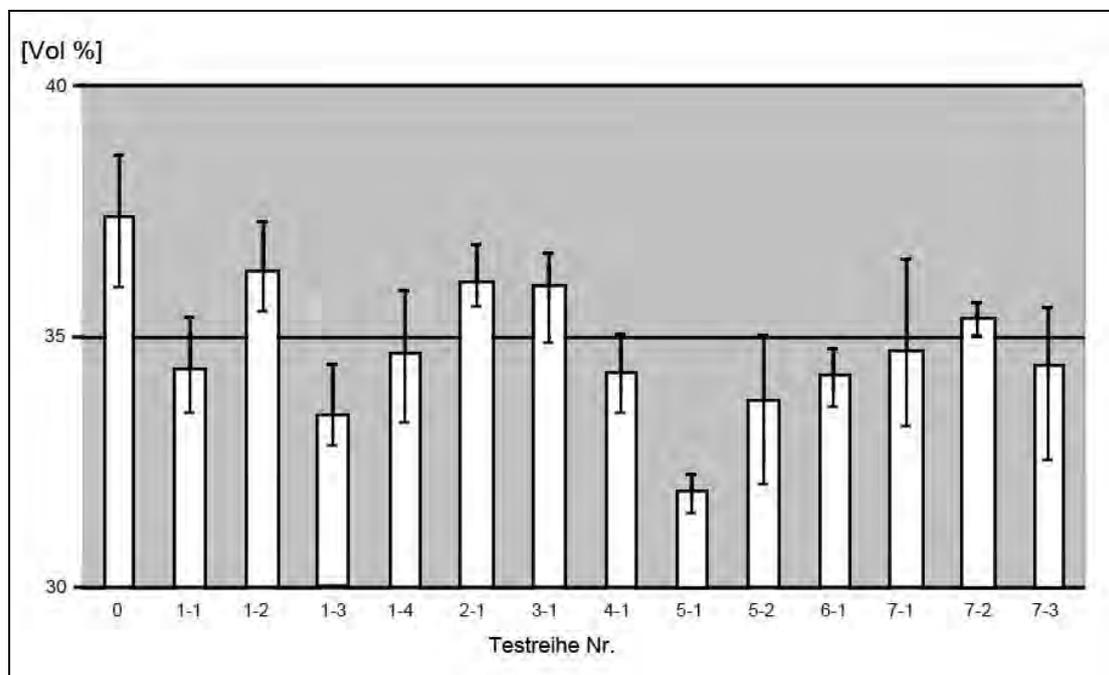
Die Prüfung der flächenbezogenen, zeitabhängigen Wasseraufnahme Messungen zur erfolgte mittels Auftriebswägung wie in Abschnitt 8.3.3 beschrieben (S. 56f).

Ergebnisse

Der Vergleich von unbehandeltem und behandeltem Material war nur für die Proben aus dolomitischem Kalkmörtel möglich. Die ungefestigten Gipsmörtelprismen erwiesen sich als zu instabil, sie zerfielen im Wasserbad, es liegen somit keine Werte für die Wasseraufnahme unbehandelten Gipsmörtels vor.

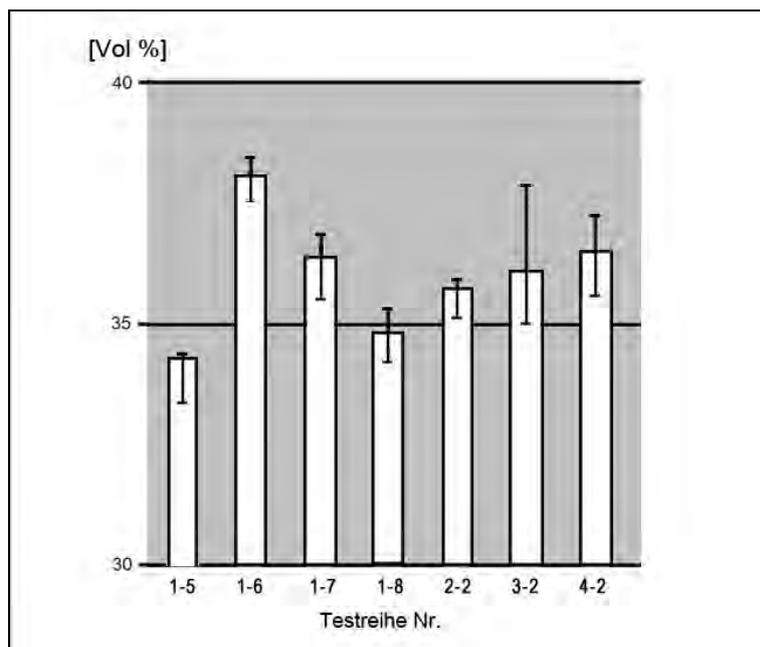
Alle behandelten Kalkmörtelproben wiesen eine verringerte Wasseraufnahmefähigkeit auf.

Bei fast allen Testreihen lag die durchschnittliche Wasseraufnahme bei 32,5 bis 34,2 Vol% und damit etwas geringer als bei den unbehandelten Proben (Graphik 13). Noch geringer fielen die Werte lediglich bei den mit CaLoSiL[®]IP25 behandelten Proben (Reihe 1-3; Durchschnittswert 31,5 Vol%) sowie bei der „aufbauenden Festigung“ mit drei Konzentrationsstufen und Acetonbeimischung aus (Reihe 5-1 mit Durchschnittswert 30,1 Vol% sowie Reihe 5-2 mit Durchschnittswert 31,8 Vol%). Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 5-01 dokumentiert.²⁵⁹



Graph.13: Kapillare Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck für alle Behandlungstests an dolomitischem Kalkmörtel im Vergleich zu unbehandeltem Material (0), Darstellung der Durchschnittswerte der Serien sowie der Wertestreuung im Bereich 30 bis 40 Vol%

²⁵⁹ Siehe Anhang A, S. 250ff.



Graph.14: kapillares Wasseraufnahmevermögen unter Atmosphärendruck für alle Behandlungstests am Gipsmörtel, Darstellung der Durchschnittswerte der Serien sowie der Wertestreuung im Bereich 30 bis 40 Vol%

Das kapillare Wasseraufnahmevermögen behandelter Gipsmörtelproben erwies sich bei den im Flutverfahren mit CaLoSiL[®]E25 behandelten Prismen am höchsten und betrug hier durchschnittlich 38,2 Vol%. Bei allen anderen behandelten Proben wurden sehr nahe beieinander liegende Durchschnittswerte zwischen 34,4 bis 36,5 Vol% ermittelt (Graphik 14). Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 5-02 dokumentiert.²⁶⁰

Bewertung

Serie	Probe Nr.	Wasseraufnahme W_V [Vol%]	Durchschnittswerte je Serie	max.Differenz Durchschnittswerte	max. Differenz je Serie	max.Differenz aller Werte		
0-1	0-1d	37,6	37,6	1,8	0,7	2,8		
	0-1e	37,9						
	0-1f	37,2						
0-2	0-2d	38,1	38,3		1,8		0,7	2,8
	0-2e	38,7						
	0-2f	38,0						
0-3	0-3d	36,7	36,5	1,8	1,1	2,8		
	0-3e	37,0						
	0-3f	35,9						

Tab.04: Berechnete volumenbezogene Wasseraufnahme (Volumenanteil von wasseraufnahmefähigen Poren in den Mörtelprüfkörpern) bei den unbehandelten Prüfkörpern aus dolomitischem Kalkmörtel

Die Wertestreuung bei den Messungen an neun unbehandelten Kalkmörtelprismen weist darauf hin, dass die im Labor hergestellten Mörtel in einem bestimmten Maße in ihrer Porosität variieren. Trotz der immer gleichen Ausgangsstoffe und der Einhaltung präziser Herstell-

²⁶⁰ Siehe Anhang A, S. 254ff.

lungsvorgaben waren an den Prismen Unterschiede im Wasseraufnahmevermögen festzustellen. Dabei liegen die Werte der jeweils drei Probekörper aus derselben Produktionscharge relativ eng beieinander (Tabelle 04, Serien 0-1, 0-2 bzw. 0-3). Die Chargen zeigen vielmehr untereinander größere Abweichung, was auf herstellungs- oder lagerungsbedingte Ursachen hinweist.

Die maximale Abweichung von berechneten Einzelwerten für die prozentuale Wasseraufnahme an unbehandelten Prismen beläuft sich auf +/- 2,8 %. Diese maximale Toleranz ist bei der Auswertung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Um zu bestimmen, ob und wie sich der Anteil ursprünglich wasseraufnahmefähiger Poren nach der Festigung verändert hat, ist das Volumen des durch das Festigungsmittel eingebrachten und im Gefüge ausgehärteten Calciumcarbonats zu berücksichtigen.

Von Bedeutung ist der Vergleich des volumenbezogenen Wasseraufnahmevermögens des unbehandelten Materials mit der Summe des nach der Behandlung wasseraufnahmefähigen Porenvolumens und des Volumens des eingelagerten Calciumcarbonats. Entstehen hier Differenzen, ist von einem Verschluss von Poren im Mörtelgefüge durch die Festigung auszugehen.

Unter Berücksichtigung der bei unbehandelten Proben festgestellten Maximalabweichung und bei Einbeziehung des durch das Festigungsmittel besetzten Porenvolumens ist festzustellen, dass bei einigen Behandlungen mit der durchgeführten Meßmethode praktisch keine Reduzierung der Wasseraufnahmefähigkeit festgestellt werden kann. Dies betrifft mit CaLoSiL[®]E25 im Flutverfahren getränkte Proben (Serie 1-2), die „aufbauende Festigung“ (Serie 2-1) und die Festigung mit verdünnter und mit Aceton versetzter Dispersion (Serie 3-1).

Die Proben nach Tränkung mit CaLoSiL[®]NP25 (Serie 1-4), nach „aufbauender Festigung“ mit Acetonbeimischung (Serie 4-1) sowie alle mit bimodalen Dispersionen behandelten Prismen (Serien 7-1 bis 7-3) weisen Maximalwerte im Größenbereich unbehandelten Materials auf. Auch in diesen Fällen ist von einer nahezu unveränderten kapillaren Wasseraufnahmefähigkeit zu sprechen. Die im Durchschnitt etwas niedrigeren Werte können als Tendenz bezeichnet werden. Für präzisere Aussagen ist die Anzahl verwendeter Einzelwerte zu klein.

Die etwas geringeren Werte nach den Tauchbehandlungen mit unmodifiziertem CaLoSiL[®]E25 sowie IP25 (Serien 1-1 und 1-3) und nach der Anwendung von verdünnter n-Propanol-Dispersion mit Nachbehandlung durch Lösungsmittelgel (Serie 6-1) sowie nach der „aufbauenden Festigung“ mit Dispersionen auf n-Propanol-Aceton-Basis (Serie 5-2) liegen im Durchschnitt 2,7 bis 4,0 Vol% unter denen des unbehandelten Materials.

Etwas deutlicher fällt der Anteil nicht wasseraufnahmefähiger Poren bei den durch „aufbauende Festigung“ mit Dispersionen auf Ethanol-Aceton-Basis (Serie 5-1) behandelten Proben aus. Hier liegt im Durchschnitt ein um 5,5 % geringerer wasseraufnahmefähiger Volumenanteil vor.

Wegen der großen Streuung der Werte erscheint nur eine tendenzielle Bewertung möglich. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die durchgeführten Behandlungen mit den CaLoSiL[®]Dispersionen und ihren Modifikationen am dolomitischen Kalkmörtel in den meisten Fällen keine signifikante Auswirkung auf die kapillare Wasseraufnahmefähigkeit hatte. Bestimmte Applikationsmethoden scheinen jedoch zu einer Reduzierung der Wasser-

aufnahme zu führen. Unter den angewendeten Methoden trifft dies für die „aufbauende Festigung“ mit Acetonanteil im Dispersionsmittel sowie für die Anwendung verdünnter n-Propanol-Dispersion mit Nachbehandlung durch Lösungsmittelgel zu.

Ein direkter Zusammenhang mit der makroskopischen Feststoffverteilung im Mörtelgefüge (Abschnitt 8.5, S. 64ff.) kann nicht hergestellt werden. Mangelnde Tiefenverteilung der Feststoffe hat keine erkennbare negative Auswirkung auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Mörtels.

Für die Gipsmörtel fehlen Ausgangswerte für die Wasseraufnahme ungefestigten Materials sowie entsprechende Erkenntnisse über Abweichungen in den Aufnahmeeigenschaften. Daher ist die Bewertung des auffällig unterschiedlichen Wasseraufnahmevermögens der Behandlung mit CaLoSiL[®]E25 im Tauch- bzw. im Flutverfahren nur unter Vorbehalt möglich. Die Behandlungen erfolgten in größerem zeitlichen Abstand an Prismen aus verschiedenen Produktionschargen.

Volumenbezogen stellt sich die Wasseraufnahme der behandelten Gipsmörtelproben ähnlich der am Kalkmörtel ermittelten dar. Die Durchschnittswerte liegen hier noch enger beieinander. Keine der angewendeten Methoden hat eine signifikante Auswirkung auf das Wasseraufnahmevermögen.

8.7 Probeanwendungen mit CaSO₄-Dispersion

Während des Untersuchungszeitraumes wurde durch IBZ Freiberg GmbH ein in Entwicklung befindliches, neues Produkt zu Testzwecken zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um eine Dispersion von Calciumsulfat-Halbhydrat in Ethanol [Bezeichnung CaSO₄-Sol 1a], die Herstellung wurde bereits beschrieben (Abschnitt 5.1.4, S. 35).

CaSO₄-Sol 1a wurde an Prismen aus Gipsmörtel und, zu Vergleichszwecken, auch an dolomitischem Kalkmörtel angewendet.

Durchführung

Die Applikation der Dispersion erfolgte im Tauchverfahren an vorgetrockneten Proben (40°C bis zur Massekonstanz), nach 60-minütiger Verweilzeit im Tauchbad schloss sich eine einwöchige Lagerung im konditionierten Klima bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit an. Vor der nächsten Behandlung wurden die Proben erneut vorgetrocknet. Der Behandlungszyklus umfasste drei Applikationen.

Nach der letzten Aushärtungsfrist sind an den Proben Messungen der Biegezugfestigkeit und der Wasseraufnahme analog oben beschriebener Vorgehensweisen (Abschnitt 8.3.5, S. 57 und Abschnitt 8.3.3, S. 56f.) durchgeführt worden.

Ergebnisse

Während der Tauchbehandlung war in allen Fällen eine Erhöhung der Viskosität der Dispersion festzustellen. Bereits nach der ersten Behandlung bildeten sich starke Oberflächenauflagerungen auf den Prismen, die mit jeder weiteren Behandlung stark zunahmen.

Verglichen mit den Calciumhydroxid-Nanodispersionen wurde bei der dreimaligen Behandlung mit CaSO₄-Sol trotz erheblich geringerer Feststoffkonzentration in der Dispersion ein wesentlich größerer Feststoffeintrag erreicht. Bei den Gipsmörtelproben betrug dieser 5,6 bis 5,8 Ma%, bei den Proben aus dolomitischem Kalkmörtel sogar 10,6 bis 11,3 Ma%.

Die ermittelte Biegezugfestigkeit betrug an den behandelten Gipsmörtelprismen 0,29 bis 0,35 N/mm², an den Kalkmörtelprismen 0,41 bis 0,50 N/mm².

Die Wasseraufnahmekapazität lag beim Gipsmörtel zwischen 0,30 und 0,32 cm³/cm³, beim Kalkmörtel betrug sie in allen drei untersuchten Proben 0,29 cm³/cm³.

Alle Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 6 dokumentiert.²⁶¹

Bewertung

Die Ursache für den gegenüber den Calciumhydroxid-Dispersionen deutlich erhöhten Feststoffeintrag mag in der Verklammerung der erheblich größeren Feststoffpartikel im Gefüge der Probematerialien zu suchen sein. Das Calciumsulfat war an den Proben jedoch vor allem als massive Oberflächenauflagerung verblieben. An den Kalkmörtelproben ist die wesentlich geringere Menge aufgenommenen Wirkstoffs bei wiederholter Behandlung auffällig. Wahrscheinlich behinderte die nach der ersten Applikation verbliebene Oberflächenauflagerung

²⁶¹ Siehe Anhang A, S. 256f.

durch Porenverschlüsse das Eindringen von Festigungsmittel bei weiteren Behandlungen. An den Gipsmörtelproben war dieses Phänomen nicht zu beobachten, der Feststoffeintrag erfolgte hier durch die drei Behandlungen in gleich bleibender Größenordnung.

Die nur geringe Festigungswirkung dürfte ebenfalls auf die ungenügende Verteilung im Mörtelgefüge zurück zu führen sein. Für die Gipsmörtel entspricht die nach CaSO_4 -Sol-Tränkung erreichte Biegezugfestigkeit mit 0,29 bis 0,35 N/mm^2 den geringsten Werten, die nach Festigung mit Calciumhydroxid-Dispersion erreicht wurden.²⁶²

Auch den Kalkmörtel vermochte das CaSO_4 -Sol nur in einem vergleichsweise geringen Maße zu verfestigen (Durchschnittswerte 0,45 N/mm^2 gegenüber 0,14 N/mm^2 an unbehandelten Referenzproben²⁶³. Nur die durch NP25 erreichten Festigkeitswerte liegen noch darunter (Durchschnittswert 0,34 N/mm^2)²⁶⁴.

Die Wasseraufnahmefähigkeit der mit CaSO_4 -Sol behandelten Mörtelproben lag unter allen Werten, die nach Behandlung der jeweiligen Materialien mit Calciumhydroxid-Dispersionen ermittelt wurden. Die Beobachtungen legen nahe, dass die eingebrachten Feststoffe auf der Substratoberfläche verblieben und eine Abdichtung durch Verstopfen der kapillar wirksamen Poren verursachten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Anwendung von CaSO_4 -Sol in den untersuchten Fällen eine ungenügende Festigungswirkung bei gleichzeitiger Verringerung der kapillaren Wasseraufnahmefähigkeit erreichte.

Diese Ergebnisse und die Beobachtungen während der Applikation führten zu der Entscheidung, das Material nicht weiter zu untersuchen.

²⁶² Biegezugfestigkeit der Serie 1-8 in Protokoll Nr. 3-03 (0,28 bis 0,36 N/mm^2), siehe Anhang A, S. 244

²⁶³ Protokolle Nr. 6, siehe Anhang A , S. 256f. bzw. Nr. 3-03, siehe Anhang A , S. 244

²⁶⁴ Siehe ebenda

9 Modifizierung für die Behandlung größerer Schadensdimensionen

9.1 Zielstellung

Aufgrund der geringen Dimension der dispergierten Feststoffpartikel ist durch die Behandlung von Mörteln mit Calciumhydroxid-Nanodispersionen im besten Fall die Ausbildung von äußerst dünnen Lagen und von stabilisierenden Brücken in den Hohlräumen der Substrate zu erreichen. Diese an Dünnschliffen behandelter Mörtelmaterialien nur selten zu beobachtenden Überbrückungen wiesen Dimensionen von wenigen Millimeterbruchteilen auf (Abbildung 13).

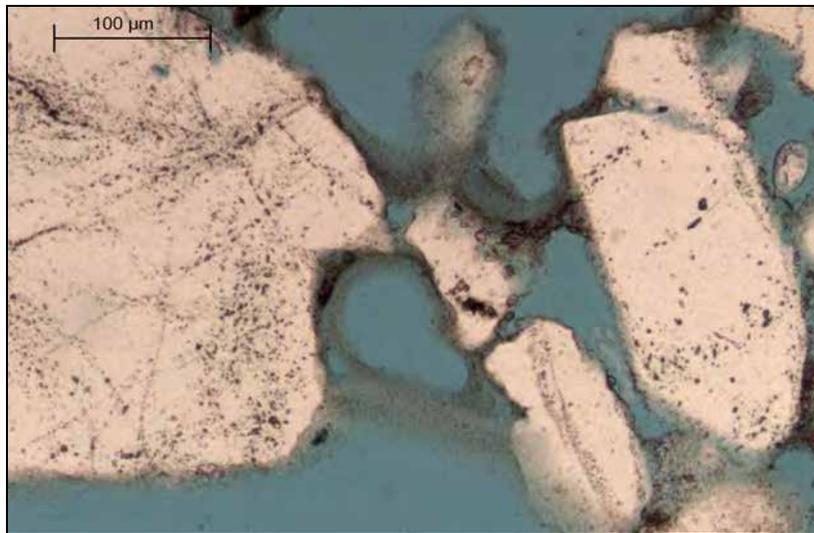


Abb.13: Dünnschliffaufnahme/ Ausschnitt: Kalkmörtelprisma nach dreimaliger Behandlung mit CaLoSiL® E25²⁶⁵ (Polarisator II) Aufnahme: T. Köberle 2010

Für die Strukturfestigung an Mörtelmaterial ist zumeist eine kraftschlüssige Verfüllung von größeren Hohlräumen erforderlich. Die Übergänge vom nicht visuell erkennbaren Mikroriss zu einer Rissausbildung bei lagigem oder stückigem Zerfall sind fließend. Es sollte geprüft werden, ob durch geeignete Modifizierung der Nanodispersionen eine Konsolidierung von größer dimensionierten Strukturschäden möglich ist und eine Behandlung gegebenenfalls in verschiedenen Modifizierungsschritten abgestuft erfolgen kann. Im Weiteren war zu prüfen, ob durch fortgesetzte Modifizierung auch größere Risse und Hohlräume behandelt werden können, um auch diese Anforderungen an eine Mörtelkonservierung auf der Basis dieser Mittel erfüllen zu können und somit über ein praktisch wasserfreies Behandlungssystem auf Kalkbasis zu verfügen. In der Konsequenz war zuletzt auch die Möglichkeit der Verwendung der Calciumhydroxiddispersionen als Bindemittel für Hinterfüllmassen und Restaurierungsmörtel zu erproben.

²⁶⁵ Dünnschliffherstellung durch T. Beckmann, Schwülper-Lagesbüttel/ Deutschland

9.2 Vorgehen

Zunächst sollte die Modifizierbarkeit der Nanodispersionen und der Mikrodispersion geprüft und erste Erkenntnisse über das Vermögen bestimmter Mischungen und Applikationsmethoden für die Verfestigung von Substraten mit größere Hohlräumen gewonnen werden. Hierzu erfolgten Vortests an Lockersubstraten, wobei relativ grober Sand mit sehr enger Korngrößenverteilung Verwendung fand.

Neben der Anwendung von Nanodispersion mit erhöhtem Feststoffgehalt (50 g/l) wurde die Wirksamkeit von Gelzusätzen mit und ohne Wassergehalt sowie Mischungen aus Nano- und Mikrodispersionen erprobt. Bewertungen erfolgten hinsichtlich des Eindringverhaltens, der Festigungswirkung, auftretender Oberflächenveränderung und der Tiefenverteilung. Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Vorproben war zu entscheiden, welche Modifizierungen für die vorgesehene Anwendung geeignet erscheinen. Mit den entsprechend ausgewählten Mitteln war anschließend die Behandlung größerer Öffnungen zur Rissüberbrückung und zur Festigung von stückigem und lagigem Zerfall zu erproben. Diese Schadensformen sollten an geeigneten Probekörpern nachgestellt werden. Hierfür wurde ein feinkristalliner Kalkstein verwendet. An diesem Material ließen sich durch Brennen und Löschen künstlich die entsprechenden Schadensbilder erzeugen (Abschnitt 9.4, S.100).

9.3 Vortests an Lockersubstraten

9.3.1 Experimentelles

Materialien

Sande:

Quarzsand 0,71...1,0 mm

Marmorgries Mori Gelb (0,7...1,2 mm)

Die Ausgangsmaterialien wurden von der Kremer Pigmente GmbH & Co. KG, Aichstetten, bezogen. Eine Vorkonditionierung der Sande erfolgte nicht.

Calciumhydroxid-Dispersionen:

CaLoSiL[®] E50

CaLoSiL[®] E25

CaLoSiL[®] mikro

(Eigenschaften in Kapitel 6, S. 43 sowie Anhang B, S.310ff.)

Ausgangsstoffe für Zusätze:

Hydroxypropylcellulose Klucel[®]G

Ethanol 96 %

destilliertes Wasser

9 Modifizierung für die Behandlung größerer Schadensdimensionen

Test Nr.	CaLoSiL®	Klucel® G	Mischung (V/V)	Ethanol [ma%]	Wasser ¹ [ma%]	Ca(OH) ₂ [ma%]
1	E25	-	-	96,48	0,38	3,15
2	E50	-	-	93,53	0,37	6,10
3	E25	reines Wasser	100+10	85,68	11,52	2,80
4	E50	reines Wasser	100+5	88,15	6,10	5,75
5	E50	0,5% in E	100+10	94,01	0,37	5,58
6	E25	0,5% in E	100+20	96,91	0,38	2,63
7	E25	0,1% in EW 1	100+20	91,81	5,57	2,60
8	E25	0,1% in EW1	100+10	93,92	3,22	2,85
9	E25	0,25% in EW1	100+20	91,79	5,57	2,60
10	E25	0,25% in EW1	100+10	93,91	3,22	2,85
11	E25	0,25% in EW2	100+10	91,12	6,02	2,83
12	E25	0,5% in EW1	100+20	91,75	5,56	2,60
13	E25	0,5% in EW1	100+10	93,89	3,22	2,85
14	E25	0,5% in EW2	100+20	86,71	10,63	2,57
15	E25	1,0% in EW3	100+20	90,00	7,23	2,59
16	E25	1,0% in EW3	100+100	77,52	20,45	1,52
17	E25+Cm 1	-	-	94,22	0,37	5,41
18	E25+Cm 2	-	-	95,44	0,37	4,19
19	E25+Cm 1	0,5% in EW2	100+20	85,05	10,42	4,44
20	E25+Cm 2	0,5% in EW2	100+20	85,95	10,53	3,43
21	E25+Cm 1	0,5% in EW1	100+10	91,90	3,15	4,91
22	E25+Cm 2	0,5% in EW1	100+10	92,97	3,19	3,80
23	E25+Cm 1	0,25% in EW1	100+10	91,92	3,15	4,91
24	E25+Cm 2	0,25% in EW1	100+10	92,99	3,19	3,80
25	-	0,5% in E	-	-	-	-
26	-	0,5% in EW1	-	-	-	-
27	-	0,5% in EW2	-	-	-	-
28	-	1,0% in E	-	-	-	-
29	-	1,0% in EW3	-	-	-	-

HPC = Hydroxypropylcellulose
E25+Cm 1 = CaLoSiL®E25 + CaLoSiL® mikro (4+1 V/V)
E25+Cm 2 = CaLoSiL®E25 + CaLoSiL® mikro (10+1 V/V)
E = Ethanol
EW1 = Gemisch aus 75 Vol% Ethanol und 25 Vol% Wasser
EW2 = Gemisch aus 50 Vol% Ethanol und 50 Vol% Wasser
EW3 = Gemisch aus 67 Vol% Ethanol und 33 Vol% Wasser
¹ herstellungsbedingter Wassergehalt in Dispersionen nicht berücksichtigt, da nicht bekannt

Tab.05: Für die ersten Testreihen mit Lockermaterial angewendete modifizierte Nanodispersionen und deren Gehalt an Ethanol, Wasser und Calciumhydroxid (Durchführung aller Tests jeweils mit Quarzsand und mit Marmorgries als Substrat)

9.3.2 Durchführung

Für die Vortests wurden, ähnlich den Untersuchungen mit unmodifizierten Dispersionen (Abschnitt 7.2.2, S. 46), gewaschene Sande in durchsichtige Kunststoffbehälter gegeben und die jeweiligen Festigungsmittel mit der Pipette bis zur Sättigung des Substrates appliziert. Es erfolgten jeweils drei Behandlungen. Die Proben lagerten nach der ersten Applikation für 12 Stunden im konditionierten Klima bei 20°C, 65 %rF in CO₂ angereicherter Atmosphäre (2 %), nach der zweiten Applikation dauerte die klimatisierte Lagerung fünf Tage. Die Bewertung des Endzustandes erfolgte nach einer Woche Aushärtungszeit unter den genannten Bedingungen.

Zur Anwendung kamen mit Wasser oder mit Klucel[®]-Lösungen in Ethanol oder Wasser-Ethanol-Gemisch versetzte Nanodispersionen sowie Mischungen aus Nano- und Mikrodispersionen (Tabelle 05) Variiert wurden die Mengenverhältnisse, der Feststoffgehalt der Nanodispersion sowie die Lösungsmittelmischung der Hydroxypropylcellulose. Zum Vergleich dienten Probebehandlungen mit unmodifizierten Nanodispersionen sowie mit den reinen Klucel[®]-Lösungen ohne Dispersionsanteil.

9.3.3 Ergebnisse

Alle an Quarzsand und Marmorgries in gleicher Weise durchgeführten Anwendungen zeigten sämtlich gleichartige Ergebnisse.

Eindringverhalten

Unmodifiziertes CaLoSiL[®]E50 zeigte bei der dritten Behandlung ein verzögertes Eindringen in das Substrat (Tabelle 05, Nr. 2). Mit den erprobten viskositätssteigernden Zusätzen war schon bei der ersten Applikation kein Eindringen möglich (Nr. 4, 5), von weiterer Behandlung wurde in diesen Fällen abgesehen.

CaLoSiL[®]E25 zeigte bei allen erprobten Modifikationen ein augenscheinlich gutes Eindringverhalten ohne Verzögerung oder oberflächige Aufstauung (Nr. 1, 3, 6 bis 24).

Festigkeit

Unmodifiziertes CaLoSiL[®]E25 (Nr. 1) ließ keinerlei Festigungswirkung erkennen. Unmodifiziertes CaLoSiL[®]E50 (Tabelle 05, Nr. 2) konnte die losen Sande nur in geringem Maße verfestigen und zeigte dabei eine in der Tiefe abnehmende Konzentration.

Auch der Zusatz von reinem Wasser brachte kein besseres Ergebnis (Nr. 3, 4). Der Zusatz von Klucel[®]-Lösungen konnte bei niedrigen Klucel[®]-Konzentrationen von 0,1 % bzw. 0,25 % keine bzw. nur sehr geringe Verfestigung erreichen (Nr. 8, 10, 11), auch die Verdoppelung der Zusatzmenge (auf +20 Vol%) zeigte noch keine Verbesserung (Nr. 7, 9). Die Mischungen aus CaLoSiL[®]E25 und CaLoSiL[®]mikro ohne weiteren Zusatz bewirkten in beiden angewendeten Mischungsverhältnissen keine erkennbare Verfestigung (Nr. 17, 18).

CaLoSiL[®]E25 mit Zusatz einer rein ethanolischen 0,5 %igen Klucel[®]-Lösung bewirkte eine oberflächige Verfestigung des Substrates, in der Tiefe nahm die Festigkeit deutlich ab (Nr. 5, 6). Bei Verwendung einer zu 30 Vol% wasserhaltigen Klucel[®]-Lösung höherer Konzentration (1,0 %) war das gleiche Ergebnis festzustellen (Nr. 15). Auch die deutliche Erhöhung des Anteils der Klucel[®]-Lösung (+100 Vol%) zeigte die gleiche Wirkung (Nr. 16). Ähnliche Ergebnisse waren bei allen Mischungen aus CaLoSiL[®]E25 und CaLoSiL[®]mikro mit Zusätzen von Klucel[®]-Lösungen zu verzeichnen, mit leichter Festigkeitserhöhung bei zunehmender Klucel[®]-Konzentration (Nr. 19 bis 24).

Eine vollständige Durchfestigung der lockeren Substrate erreichten CaLoSiL[®]E25 Modifikationen mit 0,5 %iger Klucel[®]-Lösung mit 25 Vol% bzw. mit 50 Vol% Wasseranteil (jeweils +20 Vol% zu 100 Vol% Dispersion, Nr. 12, 14). Eine leichte Zunahme der Festigkeit im Oberflächenbereich war auch hier festzustellen.

Die reinen Klucel[®]-Lösungen (Nr. 25 bis 29) haben bei einer Applikationsmenge, die ungefähr dem Celluloseethergehalt der dreimaligen Anwendung von Modifikationen mit Zusatz von 0,5 %igen Klucel[®]-Lösungen entspricht, allesamt eine nur oberflächige Verfestigung der Substrate erreichen können²⁶⁶. Bei verdreifachter Applikationsmenge erzielte die 0,5 %ige Lösung in 75 Vol% Ethanol und 25 Vol% Wasser (Nr. 26) eine vollständige Verfestigung des Sandes bei etwas erhöhter Festigkeit der Oberfläche. Alle anderen Ansätze haben die Substrate nur gering verfestigen können, eine höhere Oberflächenfestigkeit war hier in allen Fällen festzustellen.

Oberflächen

Alle Anwendungen mit CaLoSiL[®]E50 hinterließen weiße Oberflächenauflagerungen auf dem Substrat (Tabelle 05, Nr. 2, 4, 5). Alle Mischungen mit CaLoSiL[®]mikro sowie das mit reinem Wasser versetzte CaLoSiL[®]E25 erzeugten Weißschleier (Nr. 3, 4, 17 bis 24). Eine geringe Weißschleierbildung war auch bei Anwendung der CaLoSiL[®]E25-Modifikationen mit wasserfreier Klucel[®]-Lösung festzustellen. Der Zusatz von 1,0 %iger Klucel[®]-Lösung mit 30 Vol% Wasseranteil erzeugte im geringeren Beimischungsverhältnis (+20 Vol%) einen leichten Schleier (Nr. 15), bei stark erhöhtem Beimischungsverhältnis (+100 Vol%) war hingegen kaum eine optische Veränderung augenfällig (Nr. 16). Alle CaLoSiL[®]E25-Modifikationen mit Klucel[®]-Lösungen geringerer Konzentration von 0,1 % bzw. 0,25 % haben ebenso kaum optische Veränderungen hervorgerufen wie die Modifikationen durch Zusatz verschieden wasserhaltiger Klucel[®]-Lösungen mit 0,5 % Konzentration (Nr. 8 bis 14).

Alle Ergebnisse sind in den Protokoll Nr. 7 dokumentiert.²⁶⁷

9.3.4 Bewertung

Es ist festzustellen, dass es keinen Hinweis auf Unterschiede in der Wirkung von modifizierten Nanodispersionen bei Anwendung an calcitischen und an nichtcalcitischen Substraten gab.

Die Ergebnisse belegen, dass die CaLoSiL[®]Nanodispersionen durch geeignete Zusätze so modifiziert werden können, dass sie das relativ grobe Lockersubstrat verfestigen. Hierbei erwies sich die Anwendung von Dispersionen mit hoher Feststoffkonzentration und mit größeren Partikeln nicht zielführend, vor allem neigten diese zur oberflächigen Aufkonzentration. Erfolgreich gestalteten sich die Versuche der Modifizierung von CaLoSiL[®]E25.

Die Verbesserung der Festigungswirkung ist dabei nicht durch die Zugabe reinen Wassers zu erreichen, wohl aber durch Hydroxypropylcellulose-Lösungen. Offensichtlich ist hierbei die Konzentration der Celluloseetherlösung von größerer Bedeutung als der Mengenanteil des Zusatzes im Verhältnis zur Dispersion. Bei Verwendung von Lösungen mit zu geringer Konzentration war noch kein zufrieden stellender Festigungserfolg festzustellen (im Versuch 0,1 %ige und 0,25 %iger Klucel[®]-Lösung/ Tabelle 05, Nr. 7 bis 11). Bei zu hoher Konzentra-

²⁶⁶ Proben 25-1, 26-1, 27-1 in Protokoll Nr. 7, Blatt 2 und 3, siehe Anhang S. 259f.

²⁶⁷ Siehe Anhang S. 258ff.

tion stellte sich eine Überfestigung der Substratoberfläche ein (im Versuch 1,0 %ige Klucel[®]-Lösung, Nr. 15 und 16), wie sie auch bei der Anwendung reiner Klucel[®]-Lösungen entsteht (Nr. 25 bis 29).

Anwendbar erwiesen sich Lösungen mit der Konzentration von 0,5Ma% Klucel[®]. Während eine Zusatzmenge von 10 Vol% zu 100 Vol% Dispersion sich noch nicht ausreichend wirksam erwies (Nr. 13), stellte sich nach Beimischung von 20 Vol% der erwünschte Erfolg ein.

Für die Feststoffverteilung spielt der im Lösungsmittel des Klucels[®] enthaltene Wasseranteil eine wesentliche Rolle. Dabei ist offensichtlich nicht entscheidend, wie groß dieser Anteil ist, im Versuch bewirkten bei gleicher Cellulosekonzentration sowohl ein Volumenanteil von 50 % als auch von 25 % Wasser (Nr. 12 bis 14) eine deutlich homogenere Verfestigung als rein ethanolische Lösungen (Nr. 5, 6).

Die Menge eingebrachter Hydroxypropylcellulose war äußerst gering und betrug bei den Beimischungen von +20 Vol% zur Dispersion ca. 0,06 Ma% im Substrat. Dass die Festigungserfolge nicht schlicht auf die Bindekraft der Hydroxypropylcellulose zurückzuführen sind, belegen die Ergebnisse von der Anwendung reiner Klucel[®]-Lösungen. Bei etwa gleicher Cellulosemenge, wie sie an anderen Proben als Dispersionszusatz eingebracht wurde, vermochten die reinen Klucel[®]-Lösungen nur die Substratoberfläche zu verfestigen.

9.4 Anwendung von modifizierten Nanodispersionen an Kalksteinproben

9.4.1 Experimentelles

Materialien

Kalkstein:

– Fuping-County-Limestone II aus China²⁶⁸

Umfassende Materialuntersuchungen erfolgten durch das Zentrallabor des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege im Rahmen des „China Projects“. Das Material wird hier als „*sehr dicht, extrem feinkritisch und geschichtet*“²⁶⁹ charakterisiert.

Bindemittelzusammensetzung (Röntgendiffraktometrieanalyse):

ca. 86 % Calcit, ca. 13 % Dolomit, ca. 1 % Quarz

Aufbereitung des Probenmaterials:

Durch Brennen und Löschen des vorhandenen, intakten Kalksteinmaterials konnten Gefügeschäden in Form multipler lagiger Aufspaltung und Rissbildung in Dimensionen von bis zu ca. einem Millimeter Öffnungsbreite erzeugt werden.²⁷⁰

Hierzu sind vom Bohrkern (d=45mm) jeweils 5mm dicke Scheiben abgetrennt worden.

Für die erste Testreihe wurden vier Steinscheiben in einer Keramikschaale in ein Sandbett (gewaschener Quarzsand) gelegt, mit Sand bedeckt und 24 Stunden lang einer Hitzebehandlung bei ca. 700°C ausgesetzt. Anschließend erfolgte ein Ablöschen durch Aufsprühen von destilliertem Wasser.

Für die zweite Testreihe sind drei Kalksteinscheiben jeweils geviertelt und anschließend der Hitzebehandlung bei ca. 700°C (17 Stunden) ausgesetzt, danach durch Aufsprühen mit Wasser „gelöscht“ worden (Abbildung 14).

Von den drei geviertelten Scheiben (drei Probenreihen) wurden jeweils drei Viertelstücke behandelt, das vierte als Referenz unbehandelt belassen.

²⁶⁸ Das Material wurde von Restauratoren des *Chinaprojekts* des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege und der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Restaurierung unter Leitung von Prof. Emmerling zur Verfügung gestellt. Das so genannten *Chinaprojekt* ist seit 1990 mit Fragen der Konservierung der Terrakottaarmee aus der Grabanlage des ersten chinesischen Kaisers Qin Shihuangdi (259-210 v. Chr.) befasst. Bei einer Ortsbegehung regte Prof. Dr. Herm, HfBK Dresden, an, für die Festigung von Brustpanzern aus Kalksteinplättchen CaLoSiL[®] zu erproben. Die damals mit der Konservierung befasste Dipl. Restauratorin Bucher, TU München, übersendete im Juni 2009 Proben des chinesischen Kalksteinmaterials (Bohrkern aus der authentischen Lagerstätte). Sie hat bereits 2003 Festigungsversuche an diesem Material mit Kieselsäurederivaten und Polymerlösungen vorgenommen und publiziert. Siehe BUCHER (2003)

²⁶⁹ BAYERISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE (2006), S. 8

²⁷⁰ Verschiedene Aufbereitungsmethoden für die Herstellung von *Kalksteindummies* für Festigungsversuche sind durch BUCHER durchgeführt und publiziert worden. BUCHER (2003), S. 170ff.



Abb.14: Drei Proben aus einer geviertelten Scheibe des Fuping-County-Limestones nach der Vorbehandlung durch Brennen und Löschen, vor Beginn der Behandlung

Calciumhydroxid-Dispersionen:

Als Ausgangsmaterialien für die hergestellten Modifikationen dienten die Produkte von IBZ Salzchemie GmbH & Co. KG, Freiberg:

CaLoSiL[®] E50

CaLoSiL[®] E25

CaLoSiL[®] mikro

(Eigenschaften in Kapitel 6, S. 43 sowie Anhang B, S. 310ff.)

Ausgangsstoffe für Zusätze:

Hydroxypropylcellulose Klucel[®]G

Ethanol 96 %

destilliertes Wasser

9.4.2 Festigung von Kalksteinproben im Sandbett

Zielstellung und Prüfmethode

Die erste Versuchsanordnung, bei der die Vorbehandlung im Sandbett erfolgte, orientierte sich an der speziellen Aufgabenstellung. Bei Ausgrabungen von Terrakottaskulpturen in einer Grabanlage in China erwiesen sich die Kalksteinplättchen der Brustpanzer aufgrund früherer Hitzeeinwirkung durch Bröckelzerfall und Pulverisierung so stark geschädigt, dass eine Freilegung und Bergung nicht möglich erschien. Ziel der Konsolidierungsmaßnahmen sollte die verlustfreie Entnahme von entsprechend geschädigten Kalksteinobjekten aus dem archäologischen Befund sein. Geprüft wurde die Durchführbarkeit an stark geschädigten, in einem Sandbett lagernden Proben.

Durchführung

Um die durch die Vorbehandlung stark geschädigten Kalksteinscheiben festigen zu können, war zuerst der aufliegende Sand mit dem Pinsel zu entfernen. Die extreme Fragilität des Kalksteines bedingte ein äußerst vorsichtiges Vorgehen.

In mehreren Arbeitsgängen erfolgte die Applikation unterschiedlicher Modifikationen von CaLoSiL[®] E25 auf die nun frei liegenden Oberflächen mittels Spritze. Durch geeignete Zusätze sollte die Viskosität des Festigungsmittels erhöht und eine Verfestigung in den unterschiedlich großen Rissen erreicht werden. Angewendet wurden Hydroxypropylcellulose-Lö-

sungen mit Konzentrationen von 2,0 bzw. 0,5 Ma% in Ethanol bzw. in Ethanol-Wasser-Gemischen. Zum Vergleich fand auch unmodifiziertes CaLoSiL[®]E25 Anwendung.

Nr.	CaLoSiL [®]	Zusatz HPC (Klucel [®] G)	Mischung [V/V]	Ethanol ma%	Wasser ¹ ma%	Ca(OH) ₂ ma%	HPC ma%
I.1	E25	-	-	96,48	0,38	3,15	0,00
I.2	E25	2,0% in E	100+100	97,06	0,38	1,58	0,97
I.3	E25	2,0% in E	100+50	96,87	0,38	2,11	0,65
I.4	E25	2,0% in E	100+33	96,77	0,38	2,38	0,49
I.5	E25	2,0% in E	100+25	96,71	0,38	2,52	0,39
I.6	E25	2,0% in E	100+20	96,67	0,38	2,63	0,32
I.7	E25	0,5% in EW2	100+20	86,71	10,63	2,57	0,09
I.8	E25	0,5% in EW2	100+100	68,28	29,97	1,49	0,26

HPC ... Hydroxypropylcellulose
 E ... Ethanol
 EW2 ... Gemisch aus 50Vol% E + 50Vol% H2O
¹ ... herstellungsbedingter Wassergehalt in Dispersionen nicht berücksichtigt, da nicht bekannt

Tab.06: Für Festigungsversuche an künstlich geschädigten Kalksteinproben verwendete Modifizierungen

Zur Überprüfung des Festigungserfolges dienten Freilegungsversuche mit Pinsel und Skalpell. Wurde der Probekörper hierbei beschädigt, erfolgte ein weiterer Festigungsversuch bis zum Erreichen einer ausreichenden Festigkeit oder aber bis zur völligen Zerstörung der Probe durch die Freilegungstests. Die Wartezeit zwischen den einzelnen Applikationen betrug jeweils 24 bis 30 Stunden, die Proben wurden in konditioniertem Klima gelagert (65% rF bei 20°C).

Ergebnisse

Die Behandlung mit unmodifiziertem CaLoSiL[®]E25 führte zu keiner Verfestigung (Probe Nr. I.1). Auch der Zusatz von ethanolischer Klucel[®]-Lösung mit 2,0 bzw. 0,5 %iger Konzentration konnte bei keinem der angewendeten Beimischungsverhältnisse eine ausreichende Festigung des Materials bewirken (Probe Nr. I.2 bis I.6). Mit der Anwendung von 0,5 %iger Klucel[®]-Lösung mit 50 Vol% Wasseranteil wurde bei einer Zusatzmenge von +20 Vol% nach dreimaliger Applikation eine ausreichende Festigung im Sinne der Aufgabenstellung erreicht (Probe Nr. I.7). Das Material war stabil genug, um verlustfrei freigelegt und geborgen zu werden. Größere Risse waren jedoch noch nicht verfüllt.

Bei Erhöhung der Zusatzmenge der Klucel[®]-Lösung auf +100 Vol% war die Festigungswirkung wiederum geringer und blieb auf kleinere Schadensdimensionen beschränkt (Probe Nr. I.8).

Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 8 dokumentiert.²⁷¹

Bewertung

Die Behandlungstests zeigten, dass es prinzipiell möglich ist, die multiplen Gefügedefekte am geschädigten Kalkstein mit nur einem modifizierten Mittel wirkungsvoll zu behandeln.

Die Vorversuche an Lockersubstraten bestätigend wird deutlich, dass Hydroxypropylcellulose-Lösungen mit einer relativ niedrigen Konzentration (hier 0,5 Ma%) und einem enthalte-

²⁷¹ Siehe Anhang A, S.261

nen Wasseranteil die Überbrückung von Gefügeschäden im Größenbereich bis etwa 0,5mm durch die Nanodispersion ermöglichen. Die Zusatzmenge von +20 Vol% zur Dispersion scheint hierbei erforderlich und ausreichend.

9.4.3 Behandlung von Gefügeschäden bis Imm Rissweite

Zielstellung und Prüfmethode

Im diesem Versuch wurde auf ein Sandbett verzichtet. Die vorbehandelten Kalkstein-Probekörper waren durch die Gefügeschäden viellagig durchtrennt. Die sich in der vorherigen Versuchsreihe als wirksam erwiesene Festigung mit modifiziertem CaLoSiL[®] sollte überprüft und durch eine zweite Bearbeitungsfolge die Möglichkeit einer Behandlung von Gefügeschäden größerer Dimension (0,5...1,0mm) erprobt werden. Die Prüfung des Festigungserfolgs wurde manuell vorgenommen, Ziel war die Wiederherstellung konsistenter Probekörper, die ohne Verluste gehandhabt werden können.

Durchführung

Drei Proben wurden mit der im Vortest bestgeeignet ermittelten Modifikation von CaLoSiL[®] behandelt (Tabelle 06, Probe Nr. I.7) An den anderen Proben sind Variationen dieser Modifizierung erprobt worden. Bei Probenserie II.2 (Tabelle 07) wurde der Wasseranteil in der Klucel[®]-Lösung reduziert, bei Probenserie II.3 zusätzlich der Dispersionsanteil verdoppelt

Nr.	Calosil [®]	Zusatz HPC (Klucel [®] G)	Mischung [V/V]	Ethanol ma%	Wasser ¹ ma%	Ca(OH) ₂ ma%	HPC ma%
II.1	E25	0,5% in EW2	100+20	86,71	10,63	2,57	0,09
II.2	E25	0,5% in EW3	100+20	90,08	7,24	2,59	0,09
II.3	E25	0,5% in EW3	100+10	92,97	4,14	2,84	0,04
HPC ...		Hydroxypropylcellulose					
E ...		Ethanol					
EW2 ...		Gemisch aus 50Vol% E + 50Vol% H ₂ O					
EW3 ...		Gemisch aus 67Vol% E + 33Vol% H ₂ O					
¹ ...		herstellungsbedingter Wassergehalt der Dispersionen nicht berücksichtigt, da nicht bekannt					

Tab.07: Angewendete Modifizierungen beim ersten Behandlungszyklus der zweiten Probenserie an künstlich geschädigten Kalksteinproben

Die Festigung erfolgte jeweils in drei Applikationszyklen (Wartezeit jeweils wenigstens 24 Stunden Lagerung bei 65% rF bei 20°C).

In einem zweiten Behandlungszyklus sind anschließend an sechs ausgewählten Proben unterschiedliche Modifikationen von CaLoSiL[®] zur Behandlung größerer Risse (0,5...1,0mm) erprobt worden.

Bessere Verfülleigenschaften sollten durch die Anwendung von CaLoSiL[®] mit höherer Feststoffkonzentration (50 g/l) und die Beimischung von der ethanolischen Mikrodispersion CaLoSiL[®] mikro erreicht werden (Eigenschaften Abschnitt 5.1.3, S. 35). Es wurden verschiedene Mischungsverhältnisse sowie der Zusatz von Wasser sowie von den bereits erfolgreich verwendeten wasserhaltigen Klucel[®]-Lösungen erprobt (Tabelle 08, S.104).

9 Modifizierung für die Behandlung größerer Schadensdimensionen

Nr.	Calosil®	Zusatz HPC (Klucel®G)	Mischung [V/V]	Ethanol ma%	Wasser ¹ ma%	Ca(OH) ₂ ma%	HPC ma%
II.1-1	E50+Cm 1	0,5% in EW2	100+20	83,55	9,61	6,76	0,08
II.1-3	E50+Cm 2	0,5% in EW2	100+20	82,11	9,45	8,37	0,08
II.2-1	E50+Cm 3	0,5% in EW2	100+20	84,65	8,15	7,11	0,08
II.3-1	E50+Cm 2	reines Wasser	100+10	84,42	6,12	9,46	0,00
II.3.3	E50+Cm 2	-	-	85,46	4,96	9,58	0,00
HPC ...		Hydroxypropylcellulose					
E ...		Ethanol					
EW2 ...		Gemisch aus 50Vol% E + 50 Vol% H2O					
E50+Cm 1 ...		CaLoSiL®E50 + CaLoSiL®mikro 3+1 V/V					
E50+Cm 2 ...		CaLoSiL®E50 + CaLoSiL®mikro 1+1 V/V					
E50+Cm 3 ...		CaLoSiL®E50 + CaLoSiL®mikro 2+1 V/V					
¹ ...		herstellungbedingter Wassergehalt nicht berücksichtigt, da nicht bekannt					

Tab.08: Angewendete Modifizierungen beim zweiten Behandlungszyklus der zweiten Probenserie an künstlich geschädigten Kalksteinproben

Jeweils drei Applikationszyklen jeder Modifikation erfolgten mit Spritzen, die Wartezeit betrug erneut jeweils mindestens 24 Stunden (Lagerung bei 65% rF und 20°C).

Ergebnisse

Nach dem ersten Festigungszyklus wiesen alle Proben eine substantielle Verfestigung auf. Grundsätzlich waren aber die großen Brüche und aufgerissenen Lagen (über ca. 0,5 mm Weite, mehrere Millimeter Tiefe) nicht überbrückt oder gar verfüllt.

In der zweiten Behandlungsserie konnten alle erprobten Modifikationen die noch offenen Risse in den Probekörpern wirkungsvoll verkleben, die drei Applikationen waren jedoch in keinem Fall für eine völlige Verfüllung ausreichend. Brüche, die die Probekörper ganz durchtrennen, waren nur durch Mischungen aus CaLoSiL®E50 und einem vergleichsweise hohen Anteil an CaLoSiL®mikro sowie Zusatz mit wasserhaltiger Klucel®-Lösung behandelbar (Tabelle 08, Nr. II.3-1). Mit zunehmendem Anteil an CaLoSiL®mikro war eine geringe Schwundrissneigung zu beobachten.

Bewertung

Am Probematerial mit nachgestellter Schädigung war durch die Kombination von zwei Festigungsgängen mit unterschiedlichen Modifizierungen von CaLoSiL®E25 und E50 eine Verfestigung in ausreichendem Maße erreichbar. Für die zuletzt noch notwendige Rissverfüllung sind füllstoffhaltige Injektionsmassen erforderlich.

9.5 Nano- und Mikrodispersionen als Bindemittel für zuschlaghaltige Massen

9.5.1 Zielstellung

Die Behandlung von Gefügeschäden in Mörteln bis etwa 1,0 mm zu überbrückender Öffnungsweite wurde überprüft und erscheint mit entsprechender Modifizierung der Nanodispersionen umsetzbar. Gefügeschäden an Putz und Stuck in größeren Dimensionen erfordern die Anwendung von füllstoffhaltigen Injektionsmassen.

Ein Hinterfüllmörtel auf CaLoSiL[®]-Basis ist bereits marktseits erhältlich (CaLoXiL[®] Kalk-Injektionsmasse)²⁷². Allerdings enthält dieser einen Wasseranteil von 20 Ma%. Es war zu prüfen, ob sich die CaLoSiL[®]-Dispersionen auch als Bindemittel für die Herstellung praktisch wasserfreier Hinterfüllmörtel eignen.

Weiterführend sollte auch die Möglichkeit der Herstellung von spachtelfähigen Kittmassen auf der Bindemittelbasis von alkoholischen Calciumhydroxid-Nano- und Mikrodispersionen geprüft werden. Kittmassen werden bei der Konservierung von Putz und Stuck für Anböschungen, Riss- und Fehlstellenverschlüsse verwendet.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit hat dieser Teil der Untersuchungen lediglich ergänzenden Charakter. Die durchgeführten Versuche sind exemplarisch und sollen die prinzipielle Eignung zur Herstellung von Massen bzw. Mörteln auf der Bindemittelbasis der Lösungsmittelbasierten Calciumhydroxid-Dispersionen aufzeigen. Es sind nicht alle denkbaren Möglichkeiten systematisch verfolgt worden. Weitere Forschungen erscheinen daher notwendig und sehr wünschenswert.

Es sollte vor allem geprüft werden, ob mit diesen Materialien eine Herstellung von angepassten Konservierungsmassen durch den Restaurator selbst erfolgen kann. Hierbei spielte die Handhabbarkeit eine Rolle, aber auch die Ermittlung bestimmter grundsätzlicher Eckdaten (Grenzen der Mischbarkeit, Wirkung bestimmter Zusätze etc.) für den Umgang mit den Mitteln.

9.5.2 Materialien

Füllstoffe

Champagner Kreide (Calciumcarbonat)

(Teilchendurchmesser durchschnittlich 5 µm, maximal 30 µm²⁷³)

Hohlglaskügelchen

Scotchlite[™] S22 (Partikelgröße max. 75 µm) und Scotchlite[™] K1 (Partikelgröße max. 120µm) (Produzent: 3M Co., St. Paul, USA)

Die Herstellung einer Mischung aus Champagner Kreide und beiden Sorten Hohlglaskügelchen erfolgte zugunsten einer optimierten Packungsdichte²⁷⁴

²⁷² Technisches Merkblatt siehe Anhang B, S. 324f.

²⁷³ Fa. Kremer Pigmente GmbH, Produktdatenblatt Nr. 58000

²⁷⁴ Siehe Protokoll STONECORE 10/08/27 im Anhang B, S. 332f.

Marmormehl (Sorte Marmormehl extra, Partikelgröße maximal 23 μm ²⁷⁵)

Meerschaumpulver

(natürlicher Sepiolith: 85 % Sepiolith, 15 % andere Tontypen; Faserlänge durchschnittlich 2 μm ²⁷⁶)

Bologneser Kreide (natürliche Mischung aus Calciumcarbonat und Calciumsulfat)

Ockerpigment SOFOROUGE

Lieferant aller Füllstoffe: Kremer Pigmente GmbH & Co. KG, Aichstetten

Calciumhydroxid-Dispersionen:

CaLoSiL[®]E25

CaLoSiL[®]E50

CaLoSiL[®]NP50

CaLoSiL[®]mikro

CaLoSiL[®]pastös

(Eigenschaften in Kapitel 6, S. 43 sowie Anhang B, S. 310ff.)

Ausgangsstoffe für Zusätze:

Hydroxypropylcellulose Klucel[®]G

Ethanol 96 %

destilliertes Wasser

handelsübliche Hinterfüllmörtel für Vergleichsuntersuchungen:

CaLoXiL[®]Injektionsmasse (verarbeitungsfertiges Produkt)²⁷⁷

Produzent: IBZ Salzchemie GmbH Freiberg

PLM-A (Trockenmörtel)

Produzent: c.t.s., Altavilla Vicentina, Italien

9.5.3 Injektionsmassen

Durchführung

Vorversuch

Zunächst wurden verschiedene Füllstoffe und Füllstoffmischungen mit verschiedenen Bindemitteln auf CaLoSiL[®]-Basis zu Mörteln mit injektionsfähiger Konsistenz vermischt.

Jeweils 5,0 ml der Mörtel wurden in Kunststoffbehälter (2,7 x 4 cm Grundfläche) gegeben und in konditioniertem Klima von 20°C und 65 % rF für eine Woche gelagert.

Die Ergebnisse des Vorversuches ergaben eine Auswahl geeignet erscheinender Massen für die Durchführung von Abzugsversuchen zur Festigkeitsprüfung.

²⁷⁵ Fa. Kremer Pigmente GmbH, Produktdatenblatt Nr. 58500-58580, 59001-59690

²⁷⁶ Fa. Kremer Pigmente GmbH, Produktdatenblatt Nr. 58945

²⁷⁷ Technisches Merkblatt siehe Anhang B, S. 324f.

Verbundproben

Hierzu sind im Labor aus unglasierten Ziegelplatten Probekörper mit den Abmessungen von etwa 2 x 2 x 1 cm hergestellt worden. Dieses Material wurde ausgewählt, da auf diese Weise eine große Anzahl von kleinen Probekörpern vergleichbarer Dimension und Eigenschaften herstellbar waren. Auf diese keramischen Probekörper erfolgte die Applikation der Massen. Anschließend wurde auf den applizierten Mörtel ein zweites Ziegelstück gelegt. Die Probekörper wurden kurz vor der Anwendung mit Ethanol eingesprüht. Zur Aushärtung lagerten diese Verbundproben („Sandwichproben“) für eine Woche im konditionierten Klima von 20°C, 65 % rF. Auf die oberen Probekörper wurde jeweils auf der Oberseite ein Hartholzklötzchen aufgeklebt und in dieses wiederum oberseitig eine kleine Metallöse eingeschraubt. Dies diente später zur Durchführung der Abzugsversuche (siehe unten).

Prüfmethoden

Vorversuch

Die Einschätzung des Schwindverhaltens erfolgte nach Augenschein anhand von Rissbildung der in die Kunststoffbehälter gegebenen Mörtel nach Aushärtung. Die Beurteilung der Schwundrissneigung erfolgte als

- „keine“ (+++ visuell keinerlei Rissbildung wahrnehmbar),
- „kaum“ (+ geringste Rissbildung am Randbereich),
- „gering“ (o/+ Rissbildung nur am Rand),
- „mäßig“ (o Risse am Rand und vereinzelt innen),
- „stark“ (- Risse auf der gesamten Fläche) und
- „sehr stark“ (--- Probe durch Risse in Schollen zerteilt).

Für die Überprüfung der Fließfähigkeit ist eine Menge von 0,5 ml Mörtel auf eine geneigte Glasplatte (Neigung ca.80°) injiziert und die Lauflänge des abfließenden Mörtels gemessen worden. Die Lauflängen ergaben eine Einschätzung der Fließfähigkeit als

- „schlecht“ (0...10 cm),
- „mäßig“ (10...20 cm),
- „gut“ (20...30 cm) und
- „sehr gut“ (>30 cm).

Verbundproben

Die Abzugsversuche an den Verbundproben erfolgten an der Universalprüfmaschine ZWICK Z 007. Die unteren Ziegelkörper der Verbundproben wurden fest eingespannt. In die an den Verbundproben angebrachten Metallösen konnte ein Metallhaken eingeführt werden, der seinerseits am Kraftaufnehmer der Prüfmaschine befestigt war (Abbildung 15).

Die Zuggeschwindigkeit betrug 0,15 mm/min.

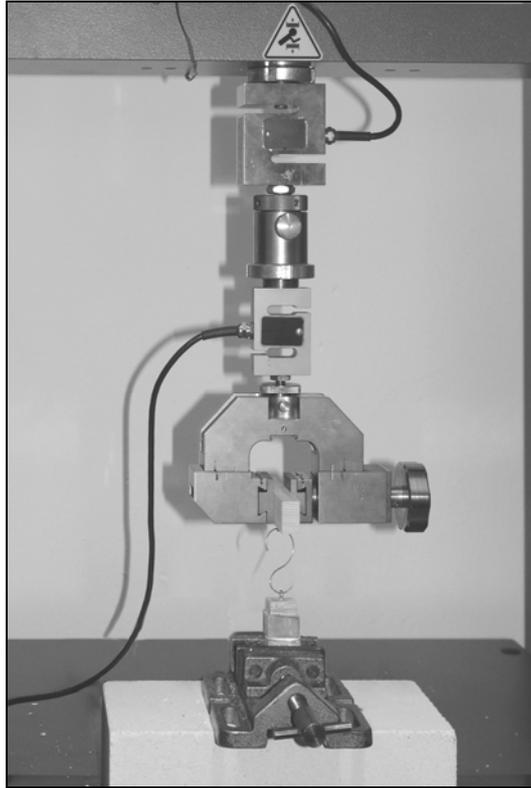


Abb.15:: Geräteeinrichtung beim Abzugsversuch zur Prüfung der Haftzugfestigkeit an Verbundproben

An der auseinander gerissenen Probe ist festgestellt worden, ob der Abriss im Mörtel erfolgte (Kohäsionsbruch) oder an der Grenzfläche zum Substrat (Adhäsionsbruch).

Die Zugfestigkeit wurde aus der maximalen Zugkraft und der Fläche der Injektionsmörtelschicht berechnet. War der Mörtel nicht auf der gesamten Probekörperfläche verlaufen, ist die Kontaktfläche als Kreisfläche angenommen, gemessen und berechnet worden.

$$(14) \quad \beta_Z = F_{\max} / A$$

β_Z ...	Zugfestigkeit [N/mm ²]
F_{\max} ...	maximale Zugkraft [N]
A ...	Querschnittfläche der Mörtellage [mm ²]

Während der Messungen musste festgestellt werden, dass die Werte innerhalb der aus jeweils drei Einzelproben bestehenden Serien teilweise sehr stark differierten. Obwohl die Proben mit großer Vorsicht gehandhabt wurden, sind möglicherweise während der erforderlichen Proben Transporte einzelne Proben beschädigt worden. Ein besonderes Problem stellte das Einspannen der kleinen Proben in die Prüfmaschine und das Einhängen des Hakens vom Kraftaufnehmer dar, wobei geringes Verkanten zu Beschädigungen der Probe führen konnte. Zur Auswertung sind immer die größten gemessenen Werte jeder Probenserie herangezogen worden, die anderen Messungen wurden nicht berücksichtigt.

Ergebnisse

Nr.	Bindemittel	Mischg. (m/m/m)	Füllstoffe	Mischung (m/m/m)	FF	SV	ZF [N/mm ²]
H1	E50	3,5	S22		+	+++	0,003
H2	E50+ 0,5% K in E	4,5+0,5	S22	1,0	o	+	0,006
H3	E50+ 0,5% K in E	5,5+0,5	S22	1,0	+	+	0,001
H4	E50	8,0	K1	1,0	+++	+	0,002
H5	E50+ 0,5% K in E	10+0,5	K1	1,0	+	+	0,003
H6	E50+ 0,5% K in E	8,0+0,5	K1	1,0	o	+	0,001
H8	Mikro	2,7	ChK	1,0	-	-	n.b.
H9	Mikro	4,0	ChK	1,0	o	o	0,007
H10	Mikro+E50	4,0+2,0	ChK	1,0	o	-	n.b.
H11	Mikro+E50	1,0+6,0	S22	1,0	-	o	n.b.
H12	Mikro + E50 + E	1,5+2+0,5	ChK + S22	0,7+0,3	o	o	n.b.
H13	Mikro + E	2,0+1,0	ChK + S22	0,7+0,3	o	+	n.b.
H14	Mikro + E	4,0+1,0	ChK	1,0	+	o/+	0,013
H15	Mikro + E	8,0+2,0	S22	1,0	o	+++	0,008
H16	Mikro	8,0	ChK	1,0	+	-	n.b.
H17	Mikro	8,0	ChK + S22	0,75+0,25	+	-	n.b.
H18	Pas	8,0	S22	1,0	o	-	n.b.
H19	Pas	8,0	ChK	1,0	+	---	n.b.
H20	Mikro + E	4,0+1,0	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	+	o	0,007
H21	Mikro + E	3,0+1,5	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	+	o	n.b.
H22	Mikro + E	8,0+1,5	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	+	-	n.b.
H23	Mikro + E	4,0+3,0	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	+++	o/+	0,022
H24	Mikro + E50	4,0+2,0	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	+	o	0,024
H25	Mikro + E50	8,0+2,0	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	o	-	n.b.
H26	Mikro + E50 + E	3,0+1,0	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	+	o/+	0,017
H27	Mikro + E50 + E	8,0+1,0	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	o/+	-	n.b.
H28	Mikro + E50	4,0+4,0	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	o	o/+	0,027
H29	Mikro + E50	6,0+6,0	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	+++	o/+	0,046
H30	CaLoSiL				+++	o	0,072
H31	Mikro + E50	8,0+8,0	ChK + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	+++	-	0,041
H32	Mikro + E50	6,0+6,0	Mm + S22 + K1	0,72+0,16+0,12	+	o	0,063
	PLM-A				+++	-	0,09
E50 = CaLoSiL®E50			S22 = Scotchlite™ S22		FF = Fließfähigkeit		
Mikro = CaLoSiL® mikro			K1 = Scotchlite™ K1		SV= Schwundverhalten		
Pas = CaLoSiL® pastös			ChK = Champagner Kreide		ZF = Zugfestigkeit		
E = Ethanol			Mm = Marmormehl		(höchster Einzelwert)		
K = Klucel®G			n.b.= nicht bestimmt				

Tab.09: Hinterfüllmassen für Verbundproben, Zusammensetzung und Zusammenfassung der Ergebnisse

Die untersuchten Massen mit CaLoSiL®E50 als Bindemittel zeichneten sich durch recht gute Fließeigenschaften und gutes bis sehr gutes Schwundverhalten aus, konnten aber nur äußerst geringe Festigkeit entwickeln (Tabelle 09, Nr. H1 bis H6). Alle mit reinem CaLoSiL® mikro oder CaLoSiL® pastös gebundenen Massen zeigten eine starke Schwundrissbildung und teilweise auch ein schlechtes Fließverhalten (Nr. H8, H16 bis 19). Wurde CaLoSiL® mikro mit Ethanol verdünnt, konnte eine Verbesserung der Fließeigenschaften nur zu Lasten stärkerer Schwundneigung erreicht werden (Nr. H13, H15, H20 bis 23). Einzig der Ansatz mit reinem Kreidezuschlag konnte im angewendeten Mischungsverhältnis gute Fließ- und Schwund-eigenschaften aufweisen, entwickelte aber nur geringe Festigkeit (H14).

Auch unter den Bindemittelgemischen aus CaLoSiL[®] mikro, Ethanol und CaLoSiL[®]E50 wies die in Fließ- und Schwundverhalten einzig akzeptable Mischung keine hohe Festigkeit auf (Nr. H26).

Die besten Ergebnisse lieferten Massen mit einer Bindemittelmischung aus CaLoSiL[®] mikro und CaLoSiL[®]E50. Für eine gute Fließfähigkeit sind der Anteil der Nanodispersion im Bindemittelgemisch sowie der Bindemittelanteil in der Masse abzuwägen. Insgesamt gute bis sehr gute Eigenschaften zeigte eine Mischung aus 50 Ma% CaLoSiL[®] mikro und 50 Ma% CaLoSiL[®]E50 und einer Zuschlagmischung aus Kreide und Hohlglaskügelchen²⁷⁸ mit einem Bindemittel – Füllstoffverhältnis von 12+1 (m/m) (Nr. H29). Die im Abzugsversuch gemessene Zugfestigkeit entsprach mit 0,046 N/mm² etwa 64 % des von CaLoXiL[®]Injektionsmasse erreichten Wertes und 51 % dessen von PLM-A. Die Festigkeit konnte durch Verwendung von Marmormehl statt Kreide in der Füllstoffmischung erhöht werden (Nr. H32) und betrug bei der angewendeten Mischung maximal 0,063 N/mm², somit etwa 88 % der Festigkeit von CaLoXiL[®]Injektionsmasse und ca. 70 % der von PLM-A. Die Mischung mit Kreideanteil (H29) besaß eine höhere innere Bindekraft als Haftfestigkeit, beim Abzugsversuch lag ein Adhäsionsbruch zwischen Masse und Ziegelkörper vor. Die Mischung mit Marmormehl zeigte in allen drei Abzugsversuchen hingegen Kohäsionsbrüche, die Haftfestigkeit war folglich höher als die Bindekraft in der Masse.

Die Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 9 dokumentiert.²⁷⁹

Bewertung

Auch wenn die Versuchsreihe nur begrenzte Variationen von Bindemittelmischungen und vor allem hinsichtlich anwendbarer Füllstoffe umfasste, lassen sich verallgemeinerbare Aussagen zum Potenzial von CaLoSiL[®]-Dispersionen für die Herstellung von wasserfreien, mineralischen Injektionsmassen ableiten, die als „Baustellenmischungen“ ohne Dispergiermittel oder andere Mikrozusätze auskommen können.

Es ist zunächst festzuhalten, dass CaLoSiL[®]-Dispersionen hierfür grundsätzlich geeignet sind. Das größte Problem für die Herstellung von wirkungsvollen Injektionsmassen stellte die Suche nach einem Bindemittelgemisch dar, welches einerseits ausreichende Festigkeit entwickeln kann, andererseits gut injizierbar ist und beim Aushärten keinen starken Volumenschwund aufweist.

So erreichen die Nanodispersionen mit geringerem Feststoffgehalt (50 g/l) nicht annähernd eine ausreichende Festigkeit, während Ansätze mit CaLoSiL[®] pastös, einer Nanodispersion mit besonders hohem Feststoffgehalt, oder mit der Mikrodispersion CaLoSiL[®] mikro zu starker Schwundrissebildung neigten und oft unzureichendes Fließverhalten besaßen. Die Versuchsreihe zeigt, dass eine Lösung dieses Problems in der Verdünnung von Massen auf der Basis von CaLoSiL[®] mikro mit der Nanodispersion CaLoSiL[®]E50 gefunden werden kann. Mit der Variation der Füllstoffe sind weitere Verbesserungen möglich, die Versuchsreihe hat hier nur den Ansatz aufzeigen können. Auch wenn noch nicht die Festigkeitswerte bewährter

²⁷⁸ Zusammensetzung der Mischung siehe Protokoll STONECORE 10/08/27 im Anhang B, S. 332f.

²⁷⁹ Siehe Anhang A, S. 262f.

Hinterfüllmörtel erreicht wurden, ist zu erwarten, dass dies bei fortgesetzter systematischer Erprobung möglich sein kann.

Da die Möglichkeit der Selbstherstellung von wasserfreien Hinterfüllmaterialien auf Kalkbasis für die praktischen Konservierungsaufgaben an Putz, Stuck und Wandmalereien von erheblichem Interesse ist, erscheint weitere Forschung auf diesem Gebiet wünschenswert. Wirkung und Grenzen von Injektionsmassen auf der Basis dieser Dispersionen sind noch vollkommen unbekannt. Einsatzbedingungen und Einflüsse, etwa durch Materialfeuchtigkeit oder Salze, bedürfen der eingehenden Erforschung. Es muss bedacht werden, dass Hinterfüllmaterialien nach ihrer Applikation am Objekt nicht beobachtet und nur indirekt kontrolliert werden können.

9.5.4 Kittmassen

Durchführung

Verschiedene Dispersionen und aus diesen hergestellte Bindemittelgemische wurden bis zu einer verarbeitbaren Konsistenz mit den Füllstoffen manuell mit dem Spatel vermischt. Die zehn hergestellten Massen wurden in Kunststoffbehälter (3 x 4 cm Grundfläche) gegeben und in konditioniertem Klima von 20°C und 65 % rF für eine Woche gelagert, um anschließend das Schwindverhalten beurteilen zu können. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse sind erneut zehn Mischungen hergestellt und in gleicher Weise in Kunststoffbehälter gegeben worden.

Parallel erfolgte die Herstellung von Verbundproben analog zu den Versuchen mit Hinterfüllmassen für die Festigkeitsprüfung durch Abzugsversuche (vgl. Abschnitt 9.5.3, S. 106ff.) In der zweiten Testreihe sind neben Kreidezuschlägen auch Pigmentbeimischungen erprobt worden.

Prüfmethoden

Die Einschätzung des Schwindverhaltens erfolgte nach Augenschein anhand von Rissbildung der in die Kunststoffbehälter gegebenen Massen nach Aushärtung. Die Beurteilung der Schwundrissneigung erfolgte als

- „keine“ (+++ keine sichtbare Rissbildung),
- „gering“ (+ vereinzelte feine Risse),
- „stark/vielfach“ (- große Einzelrisse oder Risse auf der gesamten Fläche) und
- „sehr stark“ (--- Probe durch Risse in Schollen zerteilt).

Die Abzugsversuche an den Verbundproben erfolgten an der Universalprüfmaschine ZWICK Z 007 analog zu der Prüfung der Injektionsmassen (Abschnitt 9.5.3, S. 107).

Auch bei dieser Messreihe sind große Differenzen innerhalb der aus jeweils drei Einzelproben bestehenden Serien festgestellt worden. Zur Auswertung dienten immer die größten gemessenen Werte jeder Probenreihe, die anderen Messungen wurden nicht berücksichtigt.

Ergebnisse

Nr.	Bindemittel	Mischung	Füllstoffe	Mischung	Schwundverhalten	Zug-festigkeit*
		(Vol.-anteile)		(Vol.-anteile)		
K1	E25+mikro	1,0+2,0	BK	9,0	+	n.b.
K2	E25+mikro	1,0+2,0	ChK	9,0	+	n.b.
K3	E25+mikro	1,0+2,0	Ms	6,0	---	n.b.
K4	E25+mikro	1,0+2,0	BK	6,0	-	n.b.
K5	E25+mikro	1,0+2,0	ChK	6,0	-	n.b.
K6	NP50	1,0	BK	2,0	-	n.b.
K7	NP50	1,0	ChK	2,0	-	n.b.
K8	Mikro	1,0	BK	1,5	-	n.b.
K9	Mikro	1,0	BK	2,0	+	n.b.
K10	Mikro	1,0	ChK	1,5	-	n.b.
K11	E25+mikro	1,0+2,0	BK	9,0	+	0,019
K12	E25+mikro	1,0+2,0	ChK	7,5	-	0,015
K13	E50	1,0	BK	2,0	-	0,016
K14	Mikro	1,0	ChK	2,0	-	0,014
K15	E25+mikro	1,0+2,0	BK+P	3,0+3,0	+++	0,013
K16	E25+mikro	1,0+2,0	ChK+P	3,0+3,0	+	0,023
K17	mikro	1,0	BK+P	1,0+1,0	+	0,006
K18	mikro	1,0	BK+P	0,8+0,8	-	0,021
K19*	mikro	1,0	BK	2,0	+	0,023
K20	mikro	1,0	BK	2,0	+	0,012

* Probe K19 wurde mit E25 vorgenetzt, alle anderen mit Ethanol

E25 ...	CaLoSiL®E25	BK ...	Bologneser Kreide	+++	kein	* ... höchster
NP25 ...	CaLoSiL®NP25	ChK ...	Champagner Kreide	+	gering	Einzelwert
mikro ...	CaLoSiL®mikro	Ms ...	Meerschaumpulver	-	stark	
		P ...	Pigment	---	sehr stark	

Tab. 10: Erprobte Kittmassen, Zusammensetzung und Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei Verwendung von reiner Champagner- oder Bologneser Kreide als Zuschlagsstoff blieben nur die Massen mit relativ hohem Zuschlaggehalt (Bindemittel+Zuschlag 1+3 V/V) relativ frei von Trocknungsrissen, ganz unabhängig vom verwendeten Bindemittel. Eine Ausnahme stellt die Mischung aus CaLoSiL® mikro und Bologneser Kreide dar, die auch bei einem Bindemittelanteil von 33 Vol% nur geringen Trocknungsschwund zeigte (Tabelle 10, Nr. K9, K19, K20). Positiv wirkte sich die Beimischung von Erdpigment aus, sofern der Zuschlagsanteil nicht unter 66 Vol% lag (K15 bis K18).

Die erreichbare Haftzugfestigkeit – es sind bei den Abzugsversuchen ausschließlich Adhäsionsbrüche zwischen Kitt und Ziegelkörper entstanden – ist im Vergleich zu den Werten der Injektionsmassen gering (vergleiche Abschnitt 9.5.3, S.109). Einige aus CaLoSiL® mikro und Bologneser Kreide hergestellte Kitte weisen etwas höhere Haftfestigkeit auf (K18, K19), auch das Gemisch aus CaLoSiL® mikro und CaLoSiL®E25 konnte mit einem Zuschlag aus Champagner Kreide und Pigment einen etwas höheren Festigkeitswert erreichen (K16).

Bewertung

Mit den durchgeführten Testreihen wurde noch kein überzeugender Ansatz für Kittmassen mit alkoholischen Dispersen als Bindemittel gefunden. Es ist bei richtiger Einstellung der Mischungsverhältnisse zwar möglich, gut verarbeitbare und trockenschwundfreie Kittmassen herzustellen, es mangelt aber an Haftfestigkeit. Da während der Abzugsversuche ausschließlich Abrisse der Kittmassen vom Substrat entstanden, sind die gemessenen Werte nur untereinander sowie mit den Messungen an Injektionsmassen vergleichbar, da letztere mit gleichem Substrat und gleicher Probenkomposition erfolgten (Abschnitt 9.5.3, S.106f.). Schwundfreie Kittmassen mit ausreichender Festigkeit sind auf dieser Basis wahrscheinlich nicht herzustellen. Anwendbare Massen können vielleicht durch Beimischung anderer Bindemittel erreicht werden. Eine Möglichkeit ohne Variierung des Bindemittelsystems kann die nachträgliche Festigung der Kittungen mit Calciumcarbonatdispersionen darstellen. Dies wurde bei Musteranwendungen an Objekten erprobt (Abschnitt 10.2.6, S. 136ff.).

9.6 Zusammenfassende Bewertung/ Diskussion

Die alkoholischen Calciumcarbonatdispersionen der CaLoSiL[®]-Reihe bieten eine Alternative für die Konservierung von kalk- und gipsgebundenem Putz und Stuck. Prinzipiell erscheint es möglich, auf dieser Basis praktisch wasserfreie Konservierungsmethoden für die Behandlung von Gefügeschäden jeder Dimension zu entwickeln. Die Wirksamkeit dieser Mittel ist jedoch von unterschiedlichen Einflussfaktoren maßgeblich abhängig. Grenzen der Einsetzbarkeit sind vor allem durch erhöhte Materialfeuchtigkeit, besonders trockene oder feuchte Klimabedingungen sowie durch im Substrat enthaltene Mauersalze oder Salzlösungen gegeben.

Unabhängig davon stellt bei der Anwendung als Festigungsmittel die angestrebte Tiefenverteilung festigender Wirkstoffe im porösen Substrat das größte Problem dar. Es konnten durch die Laborversuche Methoden gefunden werden, die eine weitgehend homogene Verteilung der Wirkstoffe ermöglichen. Bei gleichen Bedingungen wirken diese Methoden allerdings substratabhängig unterschiedlich. Die positive Wirkung der unterschiedlichen Modifizierungen, Vor- und Nachbehandlungen ist nur in ihrer Tendenz verallgemeinerbar. Um den gewünschten Behandlungserfolg zu erreichen, muss für jedes Substrat unter den jeweiligen Bedingungen eine eigene Methode gefunden werden. Die gewonnenen Erkenntnisse können dazu dienen, diese spezifischen Lösungen in systematischem Vorgehen zu finden.

Eine große Schwierigkeit für eine praktische Anwendung stellt die Kontrolle der erreichten Wirkstoffverteilung dar. Es konnte nachgewiesen werden, dass jede sichtbare Schleierbildung auf den Substratoberflächen ein sicheres Indiz für mangelhafte Tiefenverteilung ist, aber ein Ausbleiben von Schleiern nicht zwangsläufig auf homogene Verteilung im Gefüge schließen lassen kann. Folglich ist Kontrolle nur durch die Untersuchung entnommener Proben oder durch Festigkeitsprüfungen möglich.

Unabdingbare Voraussetzung für eine praktische Anwendung am Objekt müssen systematische Vorproben und deren Erfolgskontrolle sein, sowie serielle Vergleichsproben an unterschiedlichen Objektteilen. Materialfeuchtigkeit, Salzgehalt und äußere Bedingungen sind bei den Voruntersuchungen zwingend zu berücksichtigen.

10 Probeanwendung an Objekten

Einleitung

Versuche zur praktischen Anwendbarkeit der Nanodispersionen sollten an Objekten mit historischem Bestand an kalk- und gipsgebundenem Putz und Stuck durchgeführt werden. Um ein experimentelles Arbeiten verantworten zu können, sollte hierfür Putz- bzw. Stuckbestand ausgewählt werden, der akut gefährdet ist, jedoch absehbar nicht erhalten werden kann. Gemeinsam mit dem Landesamt für Denkmalpflege Sachsen wurden in zwei Schlössern im Oschatzer Land in Nordsachsen entsprechende Möglichkeiten für diese Forschungsarbeit gefunden.

Praxisobjekt für die Untersuchungen an Kalkmörteln war das Schloss in Leuben, für die Untersuchungen an Gipsputz und Gipsstuck das Schloss in Dahlen.

Vorgehensweise

An beiden Gebäuden wurden Untersuchungsbereiche mit geschädigtem historischem Putz- oder Stuckbestand ausgewählt. Hier erfolgten Voruntersuchungen zur Klärung des Bestandes und zur Erfassung der Schäden. An entnommenen Proben wurden im Labor Materialanalysen durchgeführt. Erste Behandlungsversuche an entnommenen Materialproben dienten der Untersuchung der Wirkungsweise der Festigungsmittel.

Es folgten Behandlungsproben am Objekt. Nach deren Auswertung fanden Musterkonservierungen an ausgewählten Bereichen statt.

10.1 Allgemeines zu den Praxisobjekten

10.1.1 Schloss Leuben

Beschreibung und Geschichte

Das kleine Dorf Leuben liegt etwa fünf Kilometer südwestlich der Stadt Oschatz im Landkreis Nordsachsen. Das Schloss befindet sich am Nordrand des Ortes und wurde im 18. Jahrhundert durch die Familie von Thielau anstelle einer Wasserburg errichtet. Es wird bis heute von einem Wassergraben umgeben und steht auf einer zweistufigen Terrasse.

Der zweigeschossige Bau hat einen rechteckigen Grundriss von ca. 16 x 42 m, die Längsachse ist etwa in Nord-Süd-Ausrichtung angelegt (Nordnordost-Südsüdwest). Die Fassaden sind zwischen einem durchgehenden Sockel und einem starken Hauptgesims regelmäßig durch Lisenen gegliedert, die Längsseiten besitzen neun, die Schmalseiten fünf Fensterachsen. Mittig an beiden Hauptfassaden ist jeweils ein nur gering vorspringender Risalit gebildet. Auf der Ostfassade nimmt dieser die mittleren drei Achsen ein, auf der Westfassade nur die mittlere. Beide Risalite werden von flachen Dreiecksgiebeln bekrönt. Plastisches Stuckdekor ist auf die Fensterverzierung der Risalite und das östliche Giebelfeld beschränkt.

Der kastenartige Bau besitzt ein hohes Walmdach mit Gaubenfenstern und Firstbekrönungen.

Die innere Raumstruktur ist weitgehend symmetrisch angelegt. In der Querachse folgen zwei Vestibülräume aufeinander, an diese schließen sich in der Längsachse seitlich Gänge an, die die Raumfolgen der Ost- und der Westseite trennen.



Abb.16: Schloss Leuben, Ansicht von Osten (2008)

Das Schloss ist baustrukturell kaum verändert überkommen. Über die Bauzeit liegen keine Quellen vor, sie wird für die erste Hälfte des 18. Jahrhunderts²⁸⁰ oder aber um 1770²⁸¹ angenommen. Über spätere Baumaßnahmen ist kaum etwas bekannt. Nach 1890 erfolgte der Abriss eines Balkons an der Westfassade²⁸², eine am Bestand ablesbare Fassadensanierung soll Anfang des 20. Jahrhunderts stattgefunden haben.²⁸³ Das Schloss befand sich bei der Enteignung seiner Besitzer 1945 wohl noch in gutem Bauzustand. Die Objektakte im Landesamt für Denkmalpflege Sachsen gibt Aufschluss über die weitere Objektgeschichte: 1952 ging Schloss Leuben in die Rechtsträgerschaft der Landwirtschaftlichen Produktionsgenossenschaft (LPG) Leuben, später LPG Naundorf, über. Es wurden ein Lebensmittelgeschäft und ein Kindergarten eingerichtet, im Obergeschoss befanden sich Wohnungen. Schon 1968 wurde in einer gutachterlichen Stellungnahme des damaligen Instituts für Denkmalpflege festgestellt, dass *„durch mangelnde Pflegemaßnahmen die Räume sehr verbraucht wirken“*²⁸⁴ und auch der Außenputz dringender Erneuerung bedürfte. Ohne Maßnahmen zu ergreifen dauerte die Nutzung an, so waren hier zeitweise auch das Gemeindeamt und die LPG-Verwaltung untergebracht. 1973 berichtete der „Kreisvertrauensmann für Denkmalpflege“: *„Der Bauzustand ist dadurch, daß in der rd. 28 jährigen Nutzung [...] keine durchgreifenden Instandsetzungen durchgeführt wurden, sehr schlecht“*. Im gleichen Jahr war das Gebäude dann auch bis auf eine „Kon-

²⁸⁰ MAGIRIUS: Kunstgeschichtlich-architektonische Beschreibung, 1978. In: AKTEN des Sächsischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie

²⁸¹ GURLITT (1905), S. 159

²⁸² Ebenda

²⁸³ Mündliche Mitteilung von Herrn Schurig, dem Vorsitzenden des Schlossvereins Leuben e.V.

²⁸⁴ Scholze/Helbig: Gutachterliche Stellungnahme des Instituts für Denkmalpflege vom 21.06.1968. In: AKTE

sum-Verkaufsstelle“ vollkommen beräumt. Im Oktober 1974 erging eine baupolizeiliche Sperrung und das Haus wurde sich selbst überlassen. 1978 plante der Rat des Kreises Oschatz den Abriss, aber es fehlten selbst dafür die Mittel. In stetigem weiteren Verfall überdauerte das Schloss bis zur „politischen Wende“ 1990, wurde dann zunächst durch Privatleute 1994 gekauft und 2004 wieder zwangsversteigert, ohne dass sich am Bauzustand etwas verbessert hätte, mittlerweile bestand akute Einsturzgefahr. Das Haus ging nun in das Eigentum des Leubener Schloßvereins e.V. über, der sich seither um die Bewahrung des noch Erhaltenen bemüht. Das Dach wurde bereits 2005 erneuert, das Gebäudeinnere beräumt. Noch immer fehlen alle Zwischendecken, Bodenbeläge und Fensterverschlüsse. Alle Wände und Fassaden blieben im vorgefundenen Zustand. Die Fassadenputze sind zu kaum 30 % erhalten, die Stuckdekorationen stark fragmentiert. Innenputze, die bereichsweise unter abgängigen Überdeckungen die bauzeitlichen Raumausmalung zeigen, sind in verschiedenen großen Restflächen überkommen.

Untersuchungsbereiche

Untersuchungen an Fassadenstuck erfolgten am ostseitigen Risalitgiebel (Ostfassade Abbildung 16). Das gesamte, mit plastischem Stuck verzierte Tympanonfeld wurde in die Bearbeitung einbezogen.

Für Untersuchungen an Innenputzen mit Farbfassung wurde ein Wandbereich des Erdgeschossraumes 012 ausgewählt (Grundriss Abbildung 17).

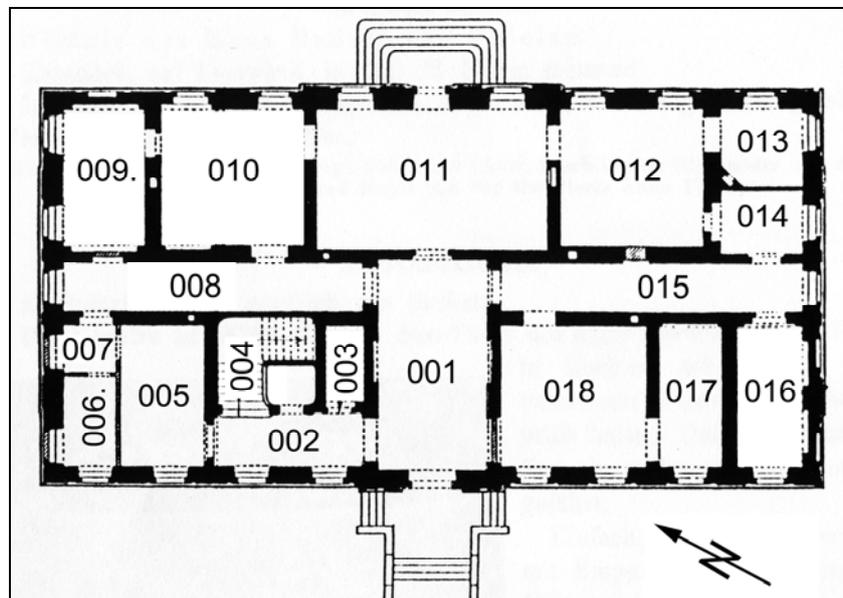


Abb.17: Schloss Leuben, Grundriss Erdgeschoss mit Raumbezeichnungen (unter Verwendung der Fig. 159 aus GURLITT (1905), S.160)

10.1.2 Schloss Dahlen



Abb18: Schloss Dahlen, Ansicht von Osten (2008)

Beschreibung und Geschichte

Die Stadt Dahlen liegt im Landkreis Nordsachsen zwischen den Städten Wurzen und Riesa am Südrand der Dahleener Heide.

Das Schloss liegt nördlich des Marktes. Es wurde 1744-51 für den Grafen von Büнау anstelle eines Vorgängerbaus errichtet.²⁸⁵

Der zweigeschossige Bau hat einen H-förmigen Grundriss (äußere Abmessung ca. 40 x 40 m). Der Mittelbau ist in seiner Längsachse etwa in Nord-Süd-Ausrichtung angelegt (Nord-nordwest-Südsüdost). Auf der Westseite ist dem Schloss ein Hof vorgelagert, östlich liegt der weitläufige Schlosspark (Abbildung 18).

Mittig an beiden Hauptfassaden des Mittelbaus ist jeweils ein nur gering vorspringender Risalit gebildet. Die Fensterachsen sind regelmäßig angeordnet. Das Dach ist nicht mehr vorhanden.

Innen sind Mittelgebäude und Seitenflügel jeweils durch hofseitig vorgelagerte kleinere Erschließungsräume und dahinter liegende größere Säle strukturiert. Innerhalb dieser Raumflucht befindet sich in der zentralen Achse des Mittelbaus ein Stuckkabinett, der so genannte „Weiße Saal“. Im Eckbereich zwischen Mittel- und Südflügel liegt das große Haupttreppenhaus.

Der Baukörper ist, vom verlorenen Dach abgesehen, baustrukturell kaum verändert überkommen. Über Umbaumaßnahmen ist nichts bekannt, lediglich eine „Erneuerung“²⁸⁶ des

²⁸⁵ GURLITT (1905), S. 87

²⁸⁶ Ebenda, S. 92

Weißer Saal 1870 ist belegt. Bis Ende des Zweiten Weltkrieges befand sich das Schloss in Privatbesitz und war in außerordentlicher Qualität erhalten. Bei der Erfassung der Baudenkmäler im Zuge der Enteignungen wurde 1945 festgestellt: „*In einzigartiger Weise ist die alte, mit dem Bau zusammen geschaffene Ausstattung des 18. Jahrhunderts erhalten. Stuckierung, Ausmalung, Mobiliar, Gemälde schon im Einzelnen von hervorragender Bedeutung, bilden durch ihre Vereinigung ein Gesamtkunstwerk, welches in Sachsen einzig ist und welches unter allen Umständen als solches für die Öffentlichkeit erhalten werden muß.*“²⁸⁷ Kurz darauf entstanden jedoch schwere Schäden und Verluste durch plündernde russische Soldaten. Das Gebäude wurde nach verschiedentlicher provisorischer Nutzung als Wohn- und Schulungsort schließlich spätestens ab 1953 zur Fachschule für Berufe der Lebensmittelherstellung umgenutzt.²⁸⁸ Ab 1961 diente es als Ingenieurschule.

1971 begannen umfangreiche Restaurierungsarbeiten in Eingangshalle, Treppenhaus, Weißem Saal und Festsaal. Die Arbeiten waren kaum abgeschlossen, als am 19.03.1973 ein verheerender Brand große Teile des Schlosses vernichtete und durch die Löscharbeiten weiterer schwerer Schaden entstand. Die umgehend vom Rat des Kreises Oschatz bereits geforderte Sprengung der Brandruine fand ebenso wenig Umsetzung wie alle in den Folgejahren vor allem durch das Institut für Denkmalpflege angestellten Bemühungen um eine Sanierung. Wenigstens die Errichtung eines Notdaches konnte 1974 realisiert werden.

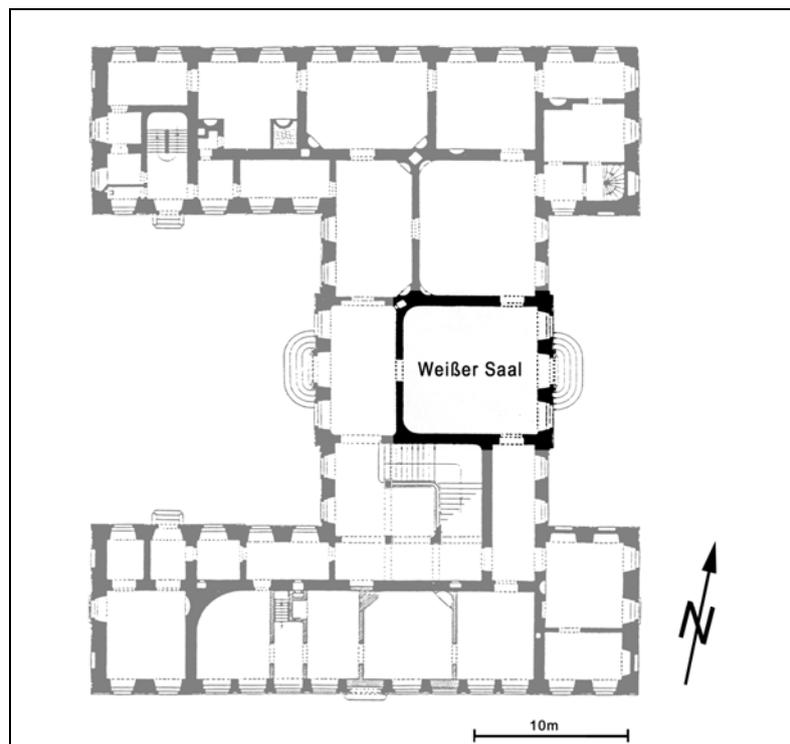


Abb.19: Schloss Dahlen, Grundriss Erdgeschoss mit Lokalisierung des Weißen Saales (unter Verwendung der Fig. 100 aus GURLITT (1905), S.92)

²⁸⁷ Brief des Landesmuseumspfleger Dr. Hentschel an den Bürgermeister von Dahlen vom 26.10.1945. In: Akten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Objektakte Schloss Dahlen

²⁸⁸ Laut Briefverkehr in : Akten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Objektakte Schloss Dahlen

1978 wurde das Dahleener Schloss nach Entscheidung der „Interessengemeinschaft für Denkmalpflege des Kreises Oschatz“ schließlich aufgegeben. Letzte Versuche des Instituts für Denkmalpflege in den 1980er Jahren, eine Sanierung doch noch zu erwirken, blieben ergebnislos. Im März 1989 beantragte der Rat des Kreises Oschatz die Aufhebung der Denkmalerklärung und plante den Abriss.

Die „politische Wende“ rettete die Schlossruine. 1994 wurde durch die Stadt Dahlen ein Bauantrag für erste Sanierungsmaßnahmen gestellt. Seitdem wurde das Mauerwerk gesichert, Decken saniert und das Dach abgedichtet. Seitdem finden durch den Schloss- und Parkverein Dahlen e.V. Führungen und Veranstaltungen in provisorisch hergerichteten Räumen statt.

Untersuchungsbereiche

Im Dahleener Schloss fanden Untersuchungen an Gipsputz und Gipsstuck des Weißen Saales statt (Lokalisierung Abbildung 19). In die Voruntersuchungen wurden alle Wandflächen einbezogen, die praktischen Versuche fanden ausschließlich am Nordteil der Westwand statt.

10.2 Schloss Leuben: Risalitgiebel der Ostfassade

10.2.1 Voruntersuchungen

Beschreibung

Der flache Dreiecksgiebel ist etwa 14 Meter breit und 3,50 Meter hoch und bekrönt den Mittelrisalit der Ostfassade. Das von einem profilierten Gesims umrahmte Tympanonfeld ist vollständig mit plastischem Reliefschmuck in Form von Waffen und Kriegstrophäen verziert, in der Mittelachse befindet sich, von Voluten und Blattfächern flankiert, ein kleines Okulusfenster mit profilierter Rahmung.

Ergänzungen und Veränderungen

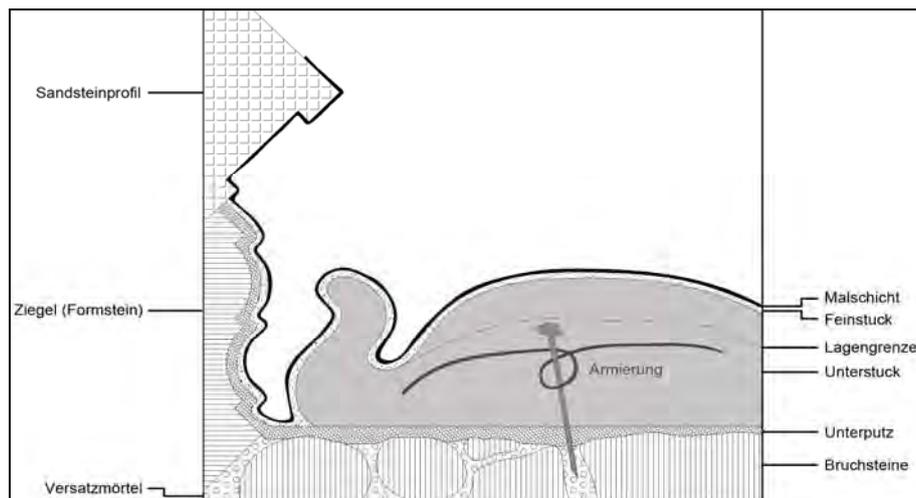
Im oberen Bereich des Tympanons wurden die Stuckformen vor 1945 zu großen Teilen rekonstruiert, genauere Informationen zu dieser Maßnahme sind nicht bekannt.

Mit der Dacherneuerung 2005 wurden auch die Gesimse und Profilrahmen des Giebels restauriert, teilweise rekonstruiert und mit Verblechungen versehen.

Nach 1990 sind akut gefährdete Stuckbereiche durch das Landesamt für Denkmalpflege Sachsen mit Mörtelanböschungen gesichert worden.

Konstruktion, Materialien, Herstellungstechnik

Das Mischmauerwerk des Giebels besteht aus Ziegelsteinen (Format 34 x 13,5 x 7cm) und wenigen kleinen, hammerrechten Natursteinen. Die profilierten Gesimse sind in ihrem unteren Teil im Kern aus Profilziegeln gesetzt, die mit einer Feinstuckschicht überzogen sind. Für den oberen, weiter auskragenden Teil wurden steinmetzmäßig bearbeitete Sandsteinwerkstücke verwendet, die Oberflächen wurden überschleiffen.



Graph.15: Schloss Leuben, Schematische Schnittdarstellung zum technologischen Aufbau des Fassadenstückes am Tympanon der Ostfassade

Die Reliefformen der Tympanonfläche bestehen aus stuckiertem Kalkmörtel. Der mit Grobzuschlag versehene Unterstuck wurde mehrlagig appliziert. Als Armierungen sind schmiedeeiserner Nägel ins Mauerwerk getrieben worden, an ihnen wurden teilweise zusätzlich Eisen-

drähte befestigt. Über dem Unterstück folgt eine dünnlagige Feinstuckschicht, darüber liegen Farbschichten (Graphik 15).

Ergebnisse der Mörtelanalysen

Die Mörtelanalysen wurden im Archäometrischen Labor der HfBK Dresden durch Dr. S. Hoblyn und T. Köberle durchgeführt, die Ergebnisprotokolle befinden sich im Anhang.²⁸⁹

Unterstück

Zusammensetzung:

Bindemittel dolomitischer Kalk
überwiegend quarzitische Zuschläge, wenig Feldspat, vereinzelt Sandstein,
gut sortiert, Größtkorn 2,2 mm

Gefüge:

partikelgestützt, Matrix-Partikel-Verhältnis ca. 70:30

Feinstuck

Zusammensetzung:

Bindemittel dolomitischer Kalk
quarzitische Zuschläge, gut sortiert, Größtkorn 1,5 mm

Gefüge:

matrixgestützt, Matrix-Partikel-Verhältnis ca. 70:30

Die Materialien von Mauerwerk und Ausgleichsputz sowie die Fassungsmaterialien wurden nicht untersucht.

Bedingungen und Einflüsse

Als Teil der Außenfassade ist das Tympanon frei exponiert und den herrschenden Klimabedingungen und äußeren Witterungseinflüssen unmittelbar ausgesetzt. Das Tympanon stellt die Außenwand des ungeheizten Dachraumes dar. Feuchteinträge sind nur von außen zu erwarten.

Außenseitig sind lediglich die nach oben exponierten Flächen der rahmenden Profile vor Niederschlagsfeuchte geschützt, da sie mit Verblechungen versehen sind. Gegen direkte Sonnen- und Niederschlagseinwirkungen bietet sonst lediglich die Reliefform selbst Schattenwirkung für entsprechend weniger erhabene Bereiche, abhängig von Sonnenstand bzw. Windrichtung. Direkte Sonneneinstrahlung ist bis in die Mittagsstunden möglich.

Vor den Baumaßnahmen im Jahre 2005 war das Dach stark beschädigt, die Dachhaut nahezu vollständig zerstört. Es ist davon auszugehen, dass das Tympanon mehrere Jahre, wenn nicht Jahrzehnte lang als nahezu frei stehende Wandscheibe allseitiger direkter Bewitterung ausgesetzt war.

²⁸⁹ Siehe Anhang B. S. 335f., S. 343, S. 351

Schäden

Schadensbilder und Schadumfang

Die Definitionen der im Folgenden angeführten Schadensbilder sind mit Bildbeispielen im Schadensbildkatalog im Anhang zu entnehmen²⁹⁰. Exemplarisch wurden die Verluste und Schadensbilder in einem Teilbereich in einer Kartierung dokumentiert.²⁹¹

Konstruktive Schäden am Mauerwerk des Tympanons in Form von Verschieben oder Rissen waren nicht festzustellen. In den untersten Bereichen des Giebels sowie in beiden unteren Eckzonen zeigte sich das Mauerwerk aber durch Verluste und Gefügeschädigung an Stein- und Fugenmaterial geschwächt.

Die Ziegelsteine wiesen in den offen liegenden Bereichen, vor allem in der untersten Wandzone, erhebliche Schäden durch Schalenbildung verschiedener Dimension auf. Es waren bereits Formverluste entstanden. Hier konnten auf den frei liegenden Mauerwerksoberflächen teils erhebliche Salzausblühungen beobachtet werden.

Fugenmörtel waren stellenweise sehr stark zurückgewittert und wiesen oberflächige Absandung auf.

Umfangreicher Materialverlust war am Stuckmörtelbestand festzustellen. Etwa 20 % der Tympanonfläche haben sämtliche Mörtelaufträge verloren. Der Kompletterlust an Feinstuck belief sich flächenmäßig auf fast 50 %, wobei dies zum Großteil rekonstruierte Bereiche beinhaltete. Der bauzeitliche Feinstuckbestand war zu etwa 80 % verloren.

Wo der Unterstuck offen lag, zeigte er verschiedentlich Spaltrisse mit Öffnungen von bis zu 3 mm sowie großflächig Abblätterung, dünnlagige Schalenbildung und Aufschieferung. Während viele vorgeschädigte Oberflächen durchaus recht hohe Stabilität aufwiesen, besaß der Mörtel bereichsweise wenig Festigkeit (mürbe Substanz).

Den bauzeitlichen Feinstuck durchzogen Spaltrisse, in einigen Bereichen, vor allem in der unteren Wandzone, hat ein dichtes Rissnetz zu stückigem Zerfall der Stuckschicht geführt, der Feinstuck war stellenweise an Randbereichen der erhaltenen Fragmente in Ablösung vom Träger begriffen. Die meisten Feinstuckfragmente wiesen oberflächige Formverluste auf. Stellenweise lag auch hier Aufschieferung vor.

Der überwiegende Teil der Malschichten war verloren gegangen (Kompletterlust). Die erhaltenen geringen Reste wiesen Haarrisse auf und waren durch Ablösung vom Träger gefährdet. Die gelösten Malschichtbereiche zeigten oft zusätzlich randliche Aufwölbungen.

Analyse von Salzausblühungen

An unterschiedlichen Fassadenbereichen wurden Salzausblühungen beprobt und mittels Röntgen-Pulverdiffraktometrie im Labor für Archäometrie an der HfBK Dresden (Proben L_013 bis L_016) sowie am Mineralisch-Petrografischen Labor der Technischen Universität Dresden (Proben L_029 und L_030) qualitativ analysiert. (Probeenthamedaten, Methodenbe-

²⁹⁰ Siehe Anhang A, S. 291f.

²⁹¹ Kartierungspläne siehe Anhang A, S. 293ff.

schreibung und Ergebnisse sind den Protokollen im Anhang zu entnehmen²⁹²). Die Ausblühungen am Tympanon (Proben L_29 und L_030) sowie zwei der im Sockelbereich untersuchten Effloreszenzen (Proben L_015 und L_016) wurden als Magnesiumsulfate in den Hydratstufen Epsomit und Hexahydrit identifiziert. Nur im Sockelbereich wurde in einem Fall Kaliumnitrat nachgewiesen (Probe L_014). Eine weitere Probe aus der Sockelzone erwies sich als reiner Gips.

Schadgenese und Ursachen

Die Schadensprozesse am Tympanon sind zuerst auf die Wirkung eingebrachter Feuchtigkeit zurück zu führen. Der Schädigungsgrad ist im Spritzwasserbereich über dem Hauptgesims, auf dem das Tympanon fußt, am größten. Hier ist auch die größte Menge direkt auftreffender Niederschlagsfeuchte anzunehmen, da die oberen Bereiche einen gewissen Schutz durch die auskragenden Gesimse der Giebelseiten erhalten.

Der Eintrag von schwefelhaltigen Verbindungen, der wohl vor allem auf belastete Niederschläge und Luftschadstoffe in der Vergangenheit zurück zu führen ist, hat in den magnesiumhaltigen Mörteln zur Bildung von Magnesiumsulfaten geführt. Durch die der Salzbildung vorangehende Auflösung des Bindemittels sowie durch Auskristallisation und klimabedingte Phasenwechsel der Magnesiumsulfate haben diese großen Anteil an der Gefügezerstörung der Mörtel. Auch diese Prozesse dürften in den unteren Bereichen des Tympanons besonders stark wirksam geworden sein. Hier sind expositionsbedingt der größte Schadstoffeintrag und eine höhere Schwankung der Materialfeuchte anzunehmen. Neben schädigenden Kristallisationsdrücken der Salze dürften hierdurch auch Zerstörungsprozesse durch gefrierendes Porenwasser bei Frost auftreten. Die hierdurch verursachte Materialzerstörung erfolgt tendenziell von außen nach innen durch Zersprengung des Gefüges. Der Schädigungsverlauf und die Ausprägung werden hierbei aber durch inhomogene Porosität sowie bereits vorhandene Risse oder oberflächige Verdichtung beeinflusst; es entstanden Hohllagen und schichtiger Zerfall.

Mit fortschreitender Materialschädigung an den Stuckelementen hat die Durchfeuchtung schließlich zur Korrosion der eingebetteten Eisenarmierungen geführt. Die rostenden Metallteile haben aufgrund der Volumenzunahme weitere Schäden an den Mörteln hervorgerufen. Durch die wirkenden Kräfte wird dabei der Stuckkörper auseinander getrieben und schließlich zerteilt; es entstehen Risse und Abbrüche.

Ausprägung und Vordringlichkeit

Gefügeschäden (Schalenbildung, Aufschieferung) an den Stuckmaterialien mussten prinzipiell als akut eingeschätzt werden, es lag anhaltender, rascher Substanzerfall vor.

Ablösungen von Feinstuck und Malschichtresten schienen zwar vielerorts in einem stabilen Zwischenstadium, da gleichzeitig Verformungen oder Verschiebe nur stellenweise bzw. in geringer Dimension zu beobachten waren. Absehbar war mit großen Verlusten zu rechnen.

²⁹² Lokalisierung Probeentnahmestellen im Anhang A, S. 287, Analyseergebnisse im Anhang A, S. 269 sowie im Anhang B, S. 354ff.

Materialverluste, die auf Ablöseerscheinungen zurückgehen, besitzen in der Regel eine verhältnismäßig große Dimension.

10.2.2 Konservatorischer Handlungsbedarf am Stuck

Alle sichtbaren bauzeitlichen Stuckbereiche wiesen konservatorischen Handlungsbedarf auf, im überwiegenden Fall war dieser als dringend einzuschätzen.

Es ergaben sich vor allem für den Unterstuck Anforderungen für die Gefügekonsolidierung. Am durch Aufschieferung und dünnlagige Schalenbildung geschädigten Mörtel waren Öffnungsweiten von Millimeterbruchteilen bis etwa drei Millimeter zu überbrücken, darüber hinaus bedurfte bindungsschwacher Mörtel einer Gefügefestigung. Risse und Brüche mussten kraftschlüssig verfüllt werden. Abgelöste Feinstuck- und Malschichtfragmente waren mit dem Träger zu verbinden. Verformungen sollten belassen werden, die entstandenen Hohlräume waren zu verfüllen. Zusätzliche Stabilität sollte durch Anböschung von Abbruchkanten und Kittung kleiner Ausbrüche erreicht werden.

Die schadauslösende Bedeutung der Magnesiumsulfate ist hoch einzuschätzen. Eine umfangreiche Klärung des Bedarfs und der Wirksamkeit salzreduzierender Maßnahmen war nicht Gegenstand der aktuellen Bearbeitung. Eine Kompressenbehandlung wäre am stark geschädigten Bestand praktisch nicht umsetzbar und hätte erhebliche Beschädigungen verursacht. Wegen des fragilen Oberflächenzustandes wäre sie wohl auch nicht wirksam gewesen, da eine ausreichende Anbindung der Kompresse nicht hätte gewährleistet werden können. Daher waren die genannten Konsolidierungsmaßnahmen, abgesehen von den Kittungen, als Vorbedingung für die Realisierung salzreduzierender Behandlungen zu sehen und daher zuerst umzusetzen. Der Bedarf weiterer Konservierungsschritte wäre nach erfolgter Kompressenbehandlung zu prüfen.

10.2.3 Einsetzbarkeit von Nanodispersionen

Theoretisch kann die Festigung mit Calciumhydroxid-Nanopartikeln eine Vorzugsvariante für die Behandlung der vorgefundenen Schäden darstellen.

Die Festigung bindungsschwacher Mörtelsubstanz erfolgt über die vorhandenen Porenräume. Eine Erhöhung der Materialfestigkeit kann durch ein Verfüllen, durch Überbrücken oder durch Auskleiden der Poren mit einem Stoff erfolgen, der am Substrat und in sich selbst feste Bindung entwickeln kann. Für die Konsolidierung absandender Mörtel könnten die Nanodispersionen geeignet sein. Die darüber hinaus erforderliche Behandlung makroskopischer Schäden, vor allem lagigen Materialzerfalls (Aufschieferung, dünnlagige Schalenbildung), sollte durch modifizierte Nanodispersionen möglich sein. Auch größer dimensionierte Schäden (Risse, stückiger Zerfall, Ablösungen und Aufwölbungen) sollten auf dieser Basis mit Injektionsmörteln behandelt werden können.

Das denkbare Ergebnis wäre ein gefestigtes, poröses, stofflich nahezu unverändertes Material. Die Laborversuche haben aber bereits die Sensibilität der Nanodispersionen gegenüber klimatischen Bedingungen, Materialfeuchtigkeit und Mauersalzen und die in ihren Ursachen bislang nicht vollumfänglich geklärte Problematik ungenügender Tiefenverteilung aufgezeigt.

Für die Gefügefestigung musste eine möglichst große Tiefenwirkung und eine möglichst homogene Tiefenverteilung der eingebrachten Feststoffe erreicht werden, gleichzeitig war eine ausreichende, hier recht große Erhöhung der Materialfestigkeit zu erreichen. Auch durch die Behandlung der makroskopischen Schäden durfte keine Überfestigung der oberflächennahen Bereiche auftreten.

10.2.4 Vorversuche mit Probenmaterial

Experimentelles

Am Tympanonrelief gestaltete sich die Entnahme von geeignetem Probematerial für Vorversuche schwierig. Am stark geschädigten Stuckbestand war die Entnahme konsistenter Proben nicht möglich. Lockermaterial, welches sich in großer Menge auf dem Hauptgesims gesammelt hatte, war zu stark verunreinigt, enthielt viel abgewittertes Ziegelmaterial und erschien für das Erreichen aussagekräftiger und auf das Objekt übertragbarer Ergebnisse ungeeignet.

Für Vorversuche zur grundsätzlichen Wirkung der Nanodispersionen auf das Mörtelmaterial des Tympanons ist ein Fundstück abgängigen Unterstückmaterials vom Tympanon verwendet worden, welches allerdings keine Gefügeschädigung mit Festigungsbedarf aufwies.

Materialien

Proben (Substrat):

Schloss Leuben, Ostfassade, Unterstück vom Tympanonrelief

Fundstück (Probe-Nr. L_012)

Fundort: Fußgesims des Tympanons

Entnahmedatum: 17.10.2008

Herstellung von Einzelproben á ca. 40 g mit Steinsäge (unregelmäßige Form)

Calciumhydroxid-Dispersion:

CaLoSiL[®] NP25 (25g Ca(OH)₂ pro Liter n-Propanol, Partikelgröße 50...250 nm)

Durchführung

Die Proben wurden bei 40°C im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. Nach Abkühlung im Exsikkator erfolgte die Applikation der Dispersion im Tauchverfahren analog der in Abschnitt 8.6.2 (S. 78) beschriebenen Vorgehensweise unter unconditioniertem Labor-klima.

Der Versuch umfasste einen Festigungszyklus von drei Behandlungen mit CaLoSiL[®] NP25 an drei Proben.

Die Lagerung der behandelten Proben dauerte wenigstens eine Woche in einem klimatisierten Raum bei 20°C und 65 %rF.

Prüfungen

Gravimetrisch wurde die Menge eingelagerten Feststoffs bei jeder Einzelbehandlung nach Aushärtung und anschließender Trocknung bis zur Massenkonstanz gemessen.

Die Prüfung des Wasseraufnahmevermögens erfolgte gravimetrisch (Durchführung Abschnitt 8.3.3, S. 56f..).



Abb.20: Mit „Prothesen“ (nach DRDÁCKÝ) versehene Proben historischer Mörtel für die Durchführung der Biegezugfestigkeitsprüfung im Dreipunktverfahren

Sie wurde an behandelten Proben nach der letzten Applikation und Aushärtung sowie vergleichsweise an ungefestigtem Material durchgeführt.

Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit erfolgte nach der letzten Behandlung und Aushärtung mittels Dreipunktverfahren (Durchführung Abschnitt 8.3.5, S. 65f.). Zum Vergleich fanden Messungen an unbehandelten Proben statt. Da die Proben für den Auflagerabstand von 6 cm zu klein waren, sind sie, entsprechend einer Methode von DRDÁCKÝ²⁹³, beidseitig durch „Prothesen“ aus Holz verlängert worden (Abbildung 20). Hierzu wurden Holzlättchen (ca. 2,5 x 1,0 x 5,0 cm) mit einem sehr steifen Klebstoff an die Proben geklebt (Polyurethan Konstruktionsklebstoff PU MAX von UHU GmbH & Co. KG Bühl/ Baden).

Ergebnisse

Probe Nr.	Ausgangsmasse (getrocknet)	Massezunahme nach Applikation			Massezunahme gesamt
		1	2	3	
L_012-4	42,14 g	42,67 g	42,81 g	42,99 g	0,85 g = 2,02 Ma%
L_012-5	34,23 g	34,64 g	34,88 g	35,04 g	0,81 g = 2,38 Ma%
L_012-6	45,69 g	45,69 g	45,83 g	45,98 g	0,81 g = 1,79 Ma%

Tab.11: Massezunahme der Stückproben vom Tympanon/ Schloss Leuben (Probe L_012) nach den drei durchgeführten Applikationen von CaLoSiL[®] NP25

Die Menge neu gebildeten Calciumcarbonats nach der dreimaligen Applikation von CaLoSiL[®]NP25 und Aushärtung betrug 1,8 bis 2,4 Ma% (Tabelle 11). Auf den Oberflächen der Prüfkörper waren starke Weißschleier festzustellen.

²⁹³ DRDÁCKÝ (2007), S.135ff.

Die Wasseraufnahmefähigkeit aller sechs Proben ist sehr ähnlich. Die unbehandelten Proben weisen im Tauchbad eine Wasseraufnahmefähigkeit von 10,1 bis 11,7 Ma% auf, die behandelten Proben 9,6 bis 11,8 Ma%.

Die Biegezugfestigkeit betrug durchschnittlich bei unbehandelten Proben $3,55 \text{ N/mm}^2$, bei behandelten $3,39 \text{ N/mm}^2$.

Alle Ergebnisse sind in Protokoll Nr. 10 dokumentiert.²⁹⁴

Bewertung

Die oberflächigen Auflagerungen zeigen, dass sich die mit der Nanodispersion eingebrachten Feststoffe an der Oberfläche angelagert haben. Bei nur drei Behandlungen muss das als deutlicher Hinweis gelten, dass keine oder nur sehr geringe Verteilung der Feststoffe im Mörtelgefüge vorliegt.

Es waren durch die Behandlung keine Veränderungen in den untersuchten Materialeigenschaften festzustellen. Die Biegezugfestigkeit des unbehandelten, nicht gefügeschädigten Materials ist vergleichsweise zu hoch, als dass eine messbare weitere Erhöhung durch die geringe Bindemittelzufuhr zu erwarten wäre. Die verwendete Nanodispersion mit 25 g/l Feststoffgehalt besitzt bei einer geringen Zahl von Applikationen ein offenbar nur sehr begrenztes Festigungspotenzial.

Die Untersuchungen des Wasseraufnahmevermögens zeigen, dass auch relativ kompakt an den Oberflächen gebildete Feststoffkonzentrationen keine negativen Auswirkungen auf die Wasseraufnahme des Mörtels haben.

²⁹⁴ Siehe Anhang A, S. 264ff.

10.2.5 Vorversuche am Objekt

Zielstellung

Durch Testreihen am Objekt war festzustellen, ob sich die in Laborversuchen positiv erwiesenen Modifikationen der Nanodispersionen (Abschnitt 8.5, Bewertung S. 77.) für die Gefügesteigerung des Stuckmörtels eignen:

„aufbauende Festigung“ mit verdünnten Nanodispersionen bei schrittweise erhöhtem Feststoffgehalt und jeweils 40 Vol% Acetonanteil

bimodale Dispersionen aus Nanodispersionen mit Zusatz von Mikrodispersion

Hier sollten die erreichbare Festigkeit und Veränderungen des optischen Erscheinungsbildes am behandelten Material geprüft werden.

Durchführung

Die Behandlung geschädigten Unterstucks wurde an lokal begrenzten Einzelflächen von 10 bis 20 cm² Größe erprobt.

Die Applikation der Festigungsmittel sowie von Lösungsmittelgelen zur Nachbehandlung erfolgte im Flutverfahren mit der Pipette.

Die erste Testserie umfasste vier Probeflächen (Abbildung 21 sowie Tabelle 12, S. 131):

1.1 geschädigter Feinstuck mit Fassungsresten

1.2 geschädigter Unterstuck mit starken Salzausblühungen

1.3 und 1.4 geschädigter Unterstuck ohne sichtbare Effloreszenzen.

Die Testserie umfasste die Erprobung der „aufbauenden Festigung“ unter Verwendung von ethanolischem CaLoSiL[®]. Nacheinander wurden Dispersionen mit einem Feststoffgehalt von 5 g/l, 7,5 g/l, 10 g/l, 12,5 g/l, 15 g/l und 25 g/l und einem Acetongehalt von jeweils 40 Vol% angewendet. Auf einer der Flächen (Nr.1.4) erfolgte unmittelbar nach jeder Applikation eine Nachbehandlung mit einer 0,5 %igen Klucel[®]G-Lösung in 75 Vol% Ethanol und 25 Vol% Wasser als einmalige Flutung mit der Pipette. Die einzelnen Behandlungen der „aufbauenden Festigung“ fanden im Abstand von jeweils ein bis zwei Wochen statt.



Abb.21: Schloss Leuben, Ostfassade, Tympanon: Verortung der Testflächen

Die zweite Testserie umfasste jeweils einmalige Festigungen mit bimodalen Dispersionen. Die Testflächen waren auf der gesamten Tympanonfläche verteilt und lagen auf Unterstuckbereichen mit optisch ähnlichem, stark gefügedeschädigtem Zustand sowie ohne sichtbare Salzausblühungen (Abbildung 21, Tabelle 12, S. 131).

CaLoSiL[®]-Dispersionen auf Basis von Ethanol, n-Propanol und Isopropanol, in unterschiedlicher Feststoffkonzentration und teilweise mit Acetonbeimischung wurde in verschiedenem Massenanteil CaLoSiL[®]-mikro zugesetzt. Erprobung fanden Vorbehandlungen der Probefläche mit destilliertem Wasser, das eine Stunde vor der Festigung aufgesprüht wurde, sowie Nachbehandlungen mit einer 0,5 % iger Klucel[®]-G-Lösung in 75 Vol% Ethanol und 25 Vol% Wasser, appliziert unmittelbar nach der Festigung durch einmaliges Fluten mit der Pipette. Nach Auswertung von zunächst 14 durchgeführten Tests wurden die sich positiv erwiesenen Methoden noch einmal an anderer Stelle angewendet und zusätzlich nochmals modifiziert.

Prüfmethoden

Optische Eigenschaften

Die Schleierbildung wurde visuell eingeschätzt.

Festigkeit

Die erreichte Materialfestigkeit der Mörtel am Objekt kann nur durch Probenahme oder durch zerstörende Messmethoden bestimmt werden. Da die Entnahme konsistenter Proben aus dem fragmentierten Stuckbestand praktisch nicht möglich war oder mit einem erheblichen Materialverlust verbunden gewesen wäre, erfolgte die Durchführung von Bohrwiderstandsmessungen. Diese Methode erschien besonders akzeptabel, da die Bohrlochdurchmesser von nur 4mm einen sehr geringen Eingriff darstellen.

Hierbei fand das neu entwickelte Bohrwiderstandsmessgerät TERSIS T2 der Firma Geotron Elektronik GmbH (Pirna) in einer Entwicklungsversion Anwendung (Abbildung 22).

Bei diesem Gerät wird der Andruck des Prüfbohrers über eine Niederdruck-Pneumatik mittels angeschlossener Druckluftversorgung ermöglicht, wodurch die Messung ohne Stativ als „Freihand-Messung“ erfolgen kann. Damit sind auch Prüfungen an schwer zugänglichen Bereichen oder die Messung vom Baugerüst aus durchführbar. Die Messungen führte ein Mitarbeiter der Herstellerfirma aus.

Die von Geotron-Elektronik gelieferten Messdaten wurden für die graphische Darstellung und Auswertung nachträglich bearbeitet.

Die Bohrwiderstandsmessung konnte auch mit dem sehr flexibel einsetzbaren Messgerät nicht an allen Testflächen durchgeführt werden. Um die Bohrung verwackelungsfrei ausführen zu können, muss das Gerät mit seinen drei Auflagertellern an der Objektoberfläche fest aufsitzen bzw. bei horizontaler Messausführung fest angedrückt werden. Die Auflagerteller sind an Stäben mit flexibel einstellbarer Länge befestigt. Sie waren beim verwendeten Prototyp in festem, nicht veränderlichen Abstand vom Prüfbohrer angeordnet. Am stark gefährdeten Stuckbestand erwies sich die Geräteeinrichtung ohne Substanzbeschädigung kaum möglich.

Es war ausgesprochen schwierig, stabile Aufsetzpunkte für die Fußpunkte zu finden und gleichzeitig mit dem Bohrer eine geeignete Position in der jeweiligen Testfläche zu treffen.



Abb.22: Das Bohrwiderstandsmessgerät TERSIS T2 der Firma Geotron Elektronik (Abb. Mit freundlicher Genehmigung der Geotron Elektronik GmbH) Aufnahme: Geotron 2011

In Abwägung von Nutzen und Risiko der Messdurchführung wurde entschieden, wenigstens ein Minimum an Prüfungen zu realisieren. Von den Flächen 2.1 bis 2.6 wurde jeweils nur die mit Lösungsmittelgel nachbehandelte Fläche gemessen (2.2, 2.4, 2.6). An einigen Testflächen, die sich in oder neben stark reliefierten Stuckbereichen befanden, war eine Geräteeinrichtung überhaupt nicht möglich, hier konnten entsprechend keine Ergebnisse gewonnen werden (gesamte Testserie 1 und Nr. 2.15 bis 2.19). An allen anderen Testflächen ist jeweils wenigstens eine Einzelmessung durchgeführt worden, darüber hinaus erfolgten zwei Referenzmessungen an unbehandeltem Material (Graphik 16, S. 134).

Die gelieferten Daten waren für die Auswertung zu bearbeiten. Die Wegwerte der Datenreihen waren zu korrelieren.

Ergebnisse

Nr.	Festigungsmittel	Mischung (m/m/m)	Vor- behandlg.	Nach- behandlg.	Veränderungen an den Oberflächen
Serie 1					
1.1	„aufbauende Festigung“ in sechs Schritten: [E5AC], [E7,5AC], [E10AC], [E12,5AC], [E15AC], [E25AC]		nein	nein	starke Schleier
1.2			nein	nein	starke Schleier
1.3			nein	nein	starke Schleier
1.4			nein	Ja	partiell Schleierbildung
Serie 2					
2.1	E50+E+mikro	20+5+0,1	nein	nein	partiell Schleierbildung
2.2	E50+E+mikro	20+5+0,1	nein	Ja	keine Veränderung
2.3	IP50+mikro	20+0,1	nein	nein	Schleier
2.4	IP50+mikro	20+0,1	nein	Ja	Schleier
2.5	NP50+mikro	20+0,1	nein	nein	partiell Schleierbildung
2.6	NP50+mikro	20+0,1	nein	Ja	partiell Schleierbildung
2.7	NP50+AC+mikro	20+5+0,1	nein	nein	keine Veränderung
2.8	IP50+AC+mikro	20+5+0,1	nein	nein	keine Veränderung
2.9	NP50+AC+mikro	20+5+0,2	ja	nein	Schleier
2.10	NP50+E+AC+mikro	10+2+8+0,2	Ja	nein	Schleier
2.11	NP50+E+AC+mikro	10+2+8+0,2	Nein	nein	Schleier
2.12	NP50+E+AC+mikro	10+2+8+0,2	Nein	Ja	Schleier
2.13	NP50+AC+mikro	20+5+0,2	Nein	nein	Schleier
2.14	NP50+AC+mikro	20+5+0,2	Nein	Ja	Schleier
2.15	E50+E+mikro	20+5+0,1	Nein	Ja	keine Veränderung
2.16	IP50+AC+mikro	20+5+0,1	Nein	nein	Schleier
2.17	IP50+AC+mikro	20+5+0,1	Nein	Ja	geringe Schleierbildung
2.18	IP50+AC+mikro	20+13,3+0,1	Nein	nein	keine Veränderung
2.19	IP50+AC+mikro	20+13,3+0,1	Nein	Ja	keine Veränderung
E = Ethanol AC = Aceton E50 = CaLoSiL [®] E50 IP50 = CaLoSiL [®] IP50 NP50 = CaLoSiL [®] NP50 mikro = CaLoSiL [®] mikro					

Tab.12: Schloss Leuben, Tympanon des östlichen Risalitgiebels, Darstellung der an Testflächen angewendeten Mittel und Methoden sowie Beobachtungen zu optischen Veränderungen an den Oberflächen nach der Aushärtung

Die „aufbauende Festigung“ führte zu starken oberflächigen Auflagerungen (Tabelle 12, Nr. 1.1 bis 1.3), die bei der Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel (Nr. 1.4) deutlich geringer ausfiel (Abbildung 23, S.132).

Mit bimodalen Dispersionen mit einem CaLoSiL[®]mikro-Anteil von ca. 1 Ma% behandelte Bereiche zeigten, unabhängig vom Lösungsmittel der verwendeten Dispersion sowie von den erprobten Vor- oder Nachbehandlungen, Schleierbildung (Tabelle12, Nr. 2.9 bis 2.14). Mischungen aus Nanodispersionen mit 50 g/l Feststoffgehalt und CaLoSiL[®]mikro-Anteil von 0,5 Ma% erzeugten Schleier, die bei Verwendung von CaLoSiL[®]IP50 (Nr. 2.3, 2.4) stärker ausfielen als bei CaLoSiL[®]NP50 (Nr. 2.5, 2.6), Nachbehandlungen hatten keine Auswirkung auf dieses Verhalten. Bei Anwendung von CaLoSiL[®]E50 und geringem Ethanolzusatz ver-

blieben nur partielle Auflagerungen, bei Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel waren keine Veränderungen sichtbar (Nr. 2.1, 2.2, 2.15).

Ohne optische Veränderung blieben auch die Anwendungen mit acetonhaltigen biomodalen Dispersionen (CaLoSiL[®] mikro-Anteil 0,4 Ma% bzw. 0,33 Ma%) in den meisten Fällen (Nr. 2.7, 2.8, 2.12, 2.19). Die Wiederholung einer dieser Anwendungen an anderer Stelle (Nr. 2.16) hat jedoch Schleier hinterlassen. Die Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel konnte den Effekt verringern (Nr. 2.17).



Abb.23: Testfläche 1.3 (links) und 1.4 (rechts) nach Abschluss der Behandlungen

Ergebnisse der Festigkeitsprüfung durch Bohrwiderstandmessungen liegen aus genannten Gründen nur für eine Auswahl der Testflächen vor. (Messwerte und graphische Auswertungen in Protokoll Nr. 12-01)²⁹⁵

Hierbei zeigen die Tests Nr. 2.4, 2.6, 2.8, 2.9 und 2.13 einen ähnlichen Tiefenverlauf der Bohrwiderstände. Die Festigkeit der obersten vier bis sechs Millimeter liegt im Bereich der Referenzmessungen am ungefestigten Material oder sogar darunter (ca. 0,4 ... 0,6 s/mm). Weiter innen ist eine gewisse Festigkeitszunahme festzustellen (ca. 0,6 ... 0,8 s/mm), die über den Referenzwerten liegt. Ab ca. 12 mm Tiefe differieren die Werte stark.

Höhere Oberflächenfestigkeiten wurden an den Flächen 2.2, 2.7, 2.10, 2.11 und 2.14 gemessen (ca. 0,7 ... 0,8 s/mm). Bei Nr. 2.10, 2.11 und 2.14 liegen die Festigkeitswerte bereits in etwa 2 Millimeter Tiefe wieder im Bereich der Referenzmessungen. Bei Fläche Nr. 2.2 wurde hingegen ein fast gleich bleibender Bohrwiderstand bis in drei Millimeter Tiefe gemessen, dann steigt der Messwert abnormal an (Maximum 2,97 s/mm) und erreicht erst in etwa 12 mm Tiefe wieder Werte ähnlich den Referenzen. Die Messung in Fläche Nr. 2.7 weist zwei Festigkeitsmaxima in etwa 2 mm und 13 mm Tiefe auf (jeweils ca. 1,5 s/mm), die Werte liegen bis 14 mm Tiefe insgesamt über den Referenzen (Minimum 0,65 s/mm).

²⁹⁵ Siehe Anhang A, S. 270f.

Bewertung

Die Weißschleierbildung weist auf das größte Problem bei der Anwendung von Nanodispersionen als Festigungsmittel hin. Dies ist auf mangelnde Tiefenverteilung zurück zu führen.

Nach Durchführung der sechsstufigen „aufbauenden Festigung“ zeigen die sehr starken weißen Auflagerungen bei den Tests ohne Nachbehandlung (Tabelle 12, Nr.1.1 bis 1.3), dass zumindest ein großer Teil des Wirkstoffs nicht im Mörtelgefüge verblieben ist. Bei der Testfläche mit zusätzlicher Nachbehandlung mit Lösungsmittelgelen (Nr.1.4) kann trotz geringer Schleierbildung von einem Verbleib größerer Feststoffmengen in der Tiefe ausgegangen werden.

Bei den einmaligen Applikationen von bimodalen Dispersionen ist davon auszugehen, dass bei der geringen Menge eingebrachter Feststoffe ein auftretender Weißschleier praktisch keine Tiefenwirkung bedeutet. Zielführend können nur Mittel und Methoden sein, die bei den Vorproben keinerlei optische Veränderung hervorrufen, was ein Anzeichen für den Verbleib des Wirkstoffs in der Tiefe ist.

Unter den erprobten Modifikationen kommen daher nur folgende Mittel und Methoden in Betracht:

CaLoSiL[®]E50 + Ethanol + CaLoSiL[®]mikro (massenanteilig 20+5+0,1) bei Nachbehandlung mit einem Lösungsmittelgel aus 0,5 Ma% Klucel[®]G (Tabelle 12, Nr. 2.2, 2.15)

CaLoSiL[®]IP50 + Aceton + CaLoSiL[®]mikro (massenanteilig 20+5+0,1 oder 20+13,3+0,1) ohne Nachbehandlung (Nr. 2.8, 2.17, 2.18)

CaLoSiL[®]NP50 + Aceton + CaLoSiL[®]mikro (massenanteilig 20+5+0,1) ohne Nachbehandlung (Nr. 2.7)

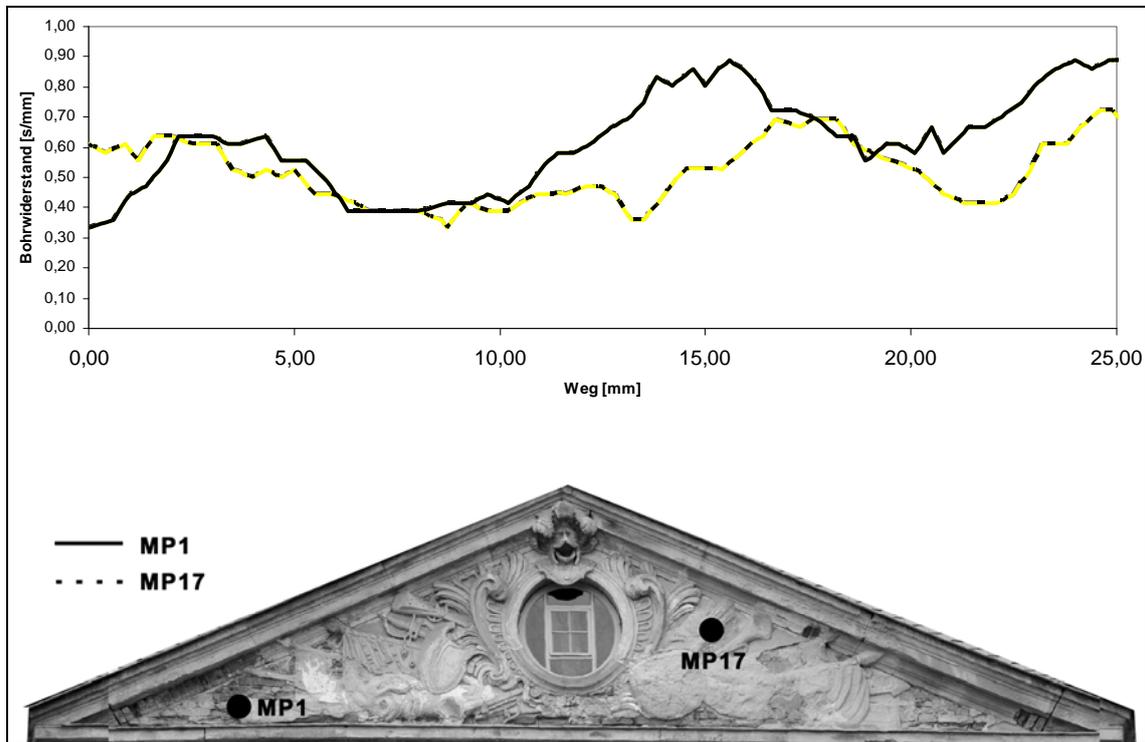
Dass die genannte Anwendung von bimodaler Dispersion auf Ethanol-Basis mit Nachbehandlung an zwei örtlich verschiedenen Testflächen gleichermaßen positive Ergebnisse zeigte (Nr. 2.2, 2.15), weist auf eine gewisse Übertragbarkeit. Dass am Objekt nicht erkennbare Unterschiede in Materialeigenschaften oder Bedingungen zu verschiedenen Ergebnissen führen können, zeigt die Anwendung von isopropanolbasierter Dispersion. Hier musste im Wiederholungstest eine geringe Schleierbildung festgestellt werden (Nr. 2.8, 2.17).

Die Bohrwiderstandsmessungen sind wegen der geringen Zahl von Messungen nur unter großem Vorbehalt zu bewerten. Einige Messungen sind wahrscheinlich durch Zuschlagskörner im Prüfbereich gestört. Wenigstens bei Nr. 2.2 und Nr.2.9, Messung 1 ist das unzweifelhaft der Fall.

Die oft nur sehr geringen Differenzen der Messwerte zu den Referenzwerten dürfen nicht überinterpretiert werden. Die an weit auseinander liegenden Positionen ermittelten Referenzwerte zeigen in den ersten 12 mm Tiefe sehr große Ähnlichkeit (Graphik 16). Der um ca. 0,3 s/mm unterschiedliche Anfangswert wird auf unterschiedlichen Verwitterungsgrad an den Oberflächen zurückzuführen sein, die höchsten Bohrwiderstände in den ersten 5 mm betragen jeweils ca. 0,6 s/mm. Davon abgesehen liegen die Differenzen zwischen beiden Datenreihen bis in eine Tiefe von knapp 12 mm bei maximal 0,12 s/mm. Ein erstes Festigkeitsmaximum wird bei ca. 15 mm bzw. ca. 8 mm Tiefe erreicht und weist Bohrwiderstände von ca. 0,9 bzw.

0,7 s/mm auf. Die in weiterer Tiefe erneut geringere Festigkeit ist möglicherweise durch die Lagigkeit des Mörtelauftrages begründet.

Der Vergleich von Festigkeitswerten innerhalb der geschwächten Zone in den ersten ca. 15 mm erscheint für die Bewertung eines Behandlungseffekts besonders relevant. Ideal sollte hier nach der Behandlung eine homogene Festigkeit von mindestens 0,7 s/mm bis in diese Tiefe sein.

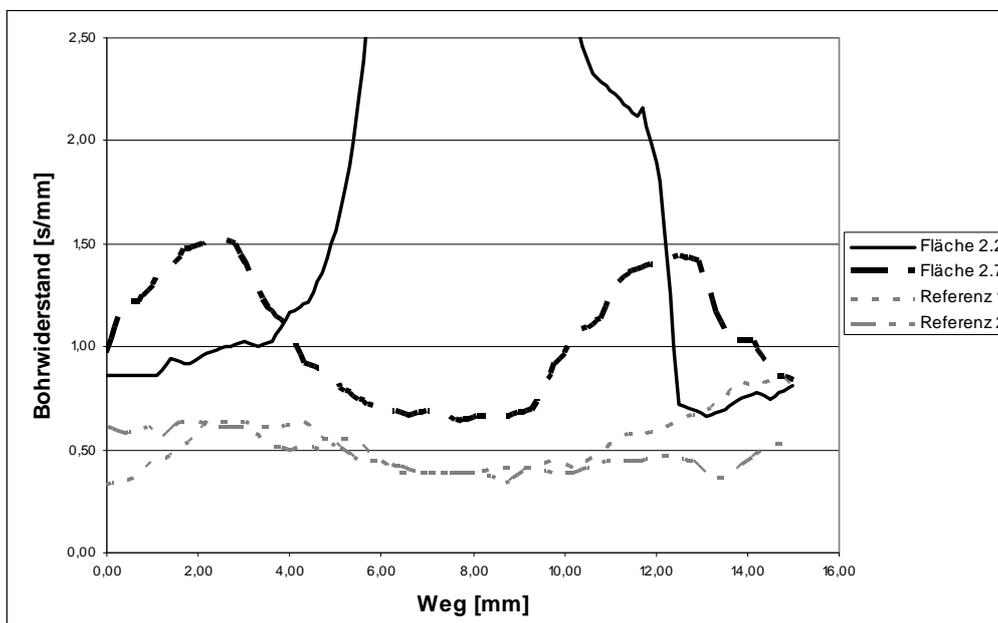


Graph.16: Schloss Leuben, Ostfassade, Tympanon: Bohr widerstandmessung an unbehandeltem Unterstück (MP1 = Referenzprobe 1, MP17 = Referenzprobe 2), Graphische Darstellung des Festigkeitsprofils und Verortung der Messpunkte

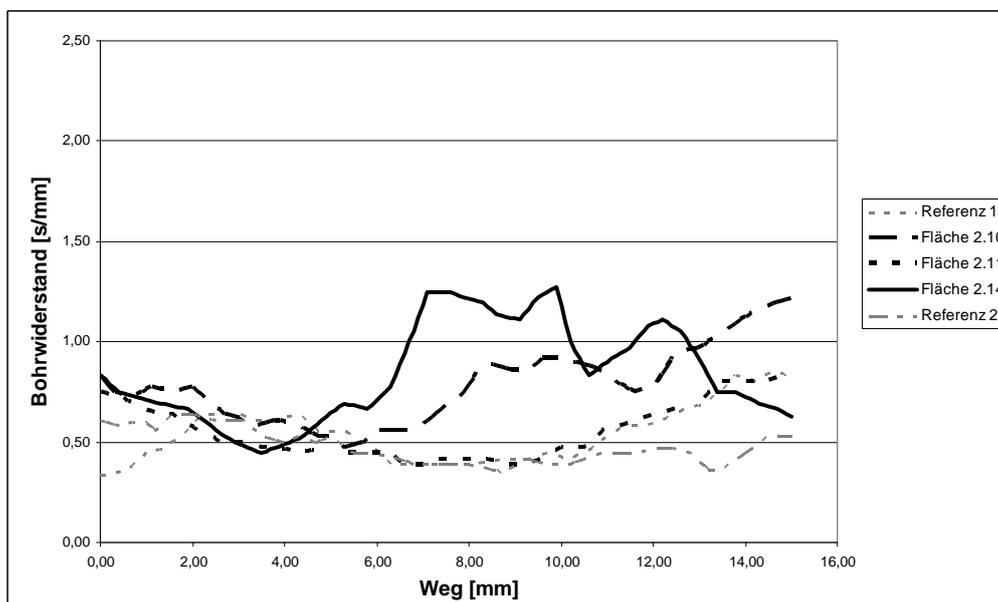
Nur bei der Testfläche Nr. 2.2 wurde eine vergleichsweise hohe Oberflächenfestigkeit gemessen, die sich fast gleichmäßig ins Innere fortsetzt, ab etwa 4 mm Tiefe ist die Messung aber durch ein vom Bohrer getroffenes Zuschlagkorn nicht mehr auswertbar (Graphik 17). Die Messung an Testfläche Nr. 2.7 weist relativ hohe Festigkeitswerte auf. Sie erscheint aber nicht interpretierbar. Vermutlich störten hier Zuschlagkörner am Rande des Prüfbereichs die Messung.

Die Messwerte an den Testflächen Nr. 2.10, 2.11 und 2.14 können mit Vorsicht als Tendenz zur Überfestigung der Oberfläche gedeutet werden (Graphik 18). Die Anwendungen an den Testflächen Nr. 2.4, 2.6, 2.8, 2.9 und 2.13 scheinen ohne nachweisbare Festigungswirkung geblieben zu sein. Die gegenüber den Referenzen etwas erhöhten Festigkeitswerte zwischen 4 und 12 mm Tiefe lassen eher den Schluss zu, dass die geschwächte Zone hier nicht so tief reichte.

Dass für die aus der optischen Bewertung Erfolg versprechenden Testflächen Nr. 2.15 bis 2.19, vor allem aber für die „aufbauende Festigung“ keine Messungen möglich waren, ist sehr bedauerlich. Dieser Vergleich steht somit aus.



Graph17: Schloss Leuben, Ostfassade, Tympanon: Bohrwiderstandmessung an Testflächen Nr. 2.2 und 2.7 im Vergleich mit Werten unbehandelter Referenzflächen 1 und 2



Graph18: Schloss Leuben, Ostfassade, Tympanon: Bohrwiderstandmessung an Testflächen Nr. 2.10, 2.11 und 2.14 im Vergleich mit Werten unbehandelter Referenzflächen

10.2.6 Musterkonservierung

Zielstellung

In einem Musterbereich sollten die je nach Schadensdimension modifizierten Methoden und Mittel auf der Basis der CaLoSiL[®]-Dispersionen kombiniert und in größerem Flächenzusammenhang exemplarisch Anwendung finden.

Lokalisierung

Der ausgewählte Bereich maß etwa 0,40 x 0,40 m und befand sich im linken Teil des Tympanons vom östlichen Risalitgiebel. Er umfasste bauzeitlichen Unterstuck sowie größere Fragmente an bauzeitlichem Feinstuck.



Abb.24: Leubens, Schloss, Tympanon des östlichen Risalitgiebels - Bereich der Musterkonservierung

Vorzustand

Der Feinstuck ist in größeren zusammenhängenden Flächen fragmentiert erhalten, seine Oberfläche ist durch Verwitterung reduziert und hat alle Farbauflagen verloren. Die erhaltenen zwei bis zehn Millimeter dicken Feinstuckschichten waren von Rissnetzen durchzogen und wiesen viele Ausbrüche verschiedener Dimension auf, die teils bis in die Unterstuckschicht reichten. Die Abbruchkanten sandeten ab und die Randbereiche begannen sich vom Träger zu lösen.

Der von starken Formverlusten geprägte Unterstuck besaß insgesamt schwache Bindung im Gefüge und wies auf der gesamten Oberfläche Absandung und multiple, dünnschichtige Schalenbildung auf.

Die Verluste und Schadensbilder im Bereich der Musterkonservierung wurden in einer Kartierung dokumentiert.²⁹⁶

²⁹⁶ Siehe Anhang A, S. 291ff.

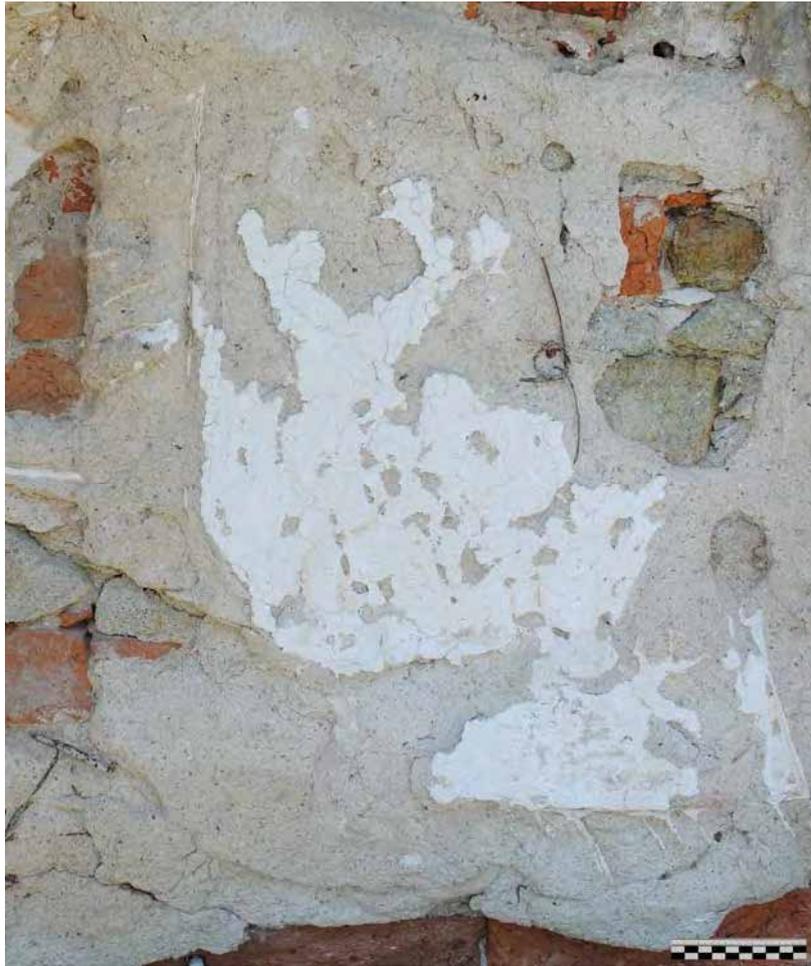


Abb.25.: Leuben, Schloss, Tympanon des östlichen Risalitgiebels - Musterfläche vor der Konservierung

Erforderliche Maßnahmen

Die Behandlungen sollten vor allem der anhaltenden Materialzerstörung entgegenwirken. Der Unterstuck bedurfte dringender Gefügefestigung.

Am Feinstuck war über eine Gefügefestigung hinaus die Wiederanbindung abgelöster und in Ablösung begriffener Bereiche notwendig. Des Weiteren sollten die Abbruchkanten gesichert und kleinere Ausbrüche sowie Risse geschlossen werden.

Unterstuck

Gefügefestigung

Feinstuck

Rissverfüllung, Risskittung

Sicherung loser und gelöster Bereiche durch Anböschung und Hinterfüllung

Anböschungen von Fragmenten und Abbruchkanten

Kittung kleinerer Fehlstellen

Methodenauswahl

Ausgehend von den Ergebnissen der Vorversuche sollten für die Gefügefestigung des Unterstucks bimodale Dispersionen auf der Basis von CaLoSiL[®] Nanodispersionen angewendet werden.

Die Schäden am Feinstuck waren mit modifizierten Nanodispersionen zu behandeln. Da die zu überbrückenden Öffnungen von Ablösungen und feinen Rissen im Bereich von Millimeterbruchteilen lagen, kamen ausschließlich Injektionen von füllstofffreien Mitteln in Betracht. Für die Anböschung und Kittung sollten Massen auf der Bindemittelbasis von CaLoSiL[®]-Dispersionen erprobt werden.

Prüfmethoden

Optische Eigenschaften

Die Veränderung der optischen Erscheinung (Schleierbildung) wurde visuell eingeschätzt.

Gefügefestigkeit

Eine Einschätzung der erreichten Festigungswirkung gaben manuelle Prüfungen, nach Abschluss der Maßnahmen wurden Bohrwiderstandmessungen durchgeführt (Methode Abschnitt 10.2.5, S. 129f.).

Oberflächenfestigkeit

Darüber hinaus erfolgten Prüfungen der Oberflächenfestigkeit mit dem so genannten „Peelingtest“ bzw. „Klebebandtest“. Es handelt sich um die Abwandlung eines standardisierten, bereits 1935 entwickelten Verfahrens aus der Beschichtungsindustrie, bei dem ein Klebeband auf eine Oberfläche aufgetragen und sofort wieder abgezogen wird.²⁹⁷ Anhand anhaftenden, abgerissenen Materials wird die Haftfestigkeit einer zu prüfenden Beschichtung eingeschätzt, die Methode wird aber auch zur Prüfung von Verunreinigungen auf Oberflächen genutzt.

Von DRDÁCKÝ ist diese einfache Methode für die Prüfung von Oberflächenfestigkeit an historischen Steinoberflächen adaptiert worden.²⁹⁸ In dieser Form fand der Test an den Stuckoberflächen in Leuben Anwendung.

Doppelseitiges Klebeband wurde in Streifen á 2 x 5 cm geschnitten und einseitig auf Papier geklebt (Produkt: tesa[®] doppelseitiges Klebeband universal von tesa SE, Hamburg). Mit der anderen Seite ist der Streifen auf die zu prüfende Oberfläche geheftet und mit Finger ange-drückt worden. Die Masse des anhaftenden Materials wurde gravimetrisch bestimmt. Die Prüfung wurde nacheinander an jeder Stelle zehn mal durchgeführt. Als aussagekräftig erwies sich auch die Summe des jeweils mit allen zehn Streifen abgenommenen Materials.

Durchführung

Für die Gefügefestigung des Unterstucks wurde eine bimodale Dispersion mit der Pipette im Flutverfahren bis zur Sättigung aufgebracht:

CaLoSiL[®] NP50 + Aceton + CaLoSiL[®] mikro (massenanteilig 20 + 0,1 + 5)
(entspricht Tabelle 12, S. 131, Testfläche Nr. 2.7).

In einem kleinen Teilbereich ist die Nachbehandlung mit einem Lösungsmittelgel als einma-lige Flutung mit der Pipette geprüft worden:

0,5 %ige Klucel[®]G-Lösung in 75 Vol% Ethanol und 25 Vol% Wasser.

Klimabedingungen während der Behandlung: 21°C, 28 % rF

²⁹⁷ PULKER (1999), S. 89

²⁹⁸ DRDÁCKÝ et .al. (2011)



Abb.26: Leuben, Schloss, Tympanon des östlichen Risalitgiebels - Musterfläche nach erfolgten Maßnahmen

Am Feinstuck wurden alle Rissöffnungen und Ablösungen per Injektion, basierend auf den Versuchsreihen im Labor (Abschnitt 9.4, S. 100ff.), mit einer Mischung aus Nano- und Mikrodispersion und Gelzusatz behandelt:

100 Vol% CaLoSiL[®]E50 + CaLoSiL[®]mikro (2+1 V/V) + 20 Vol% (0,5 Ma% Klucel[®]G in einem Lösungsmittelgemisch aus 50 Vol% Ethanol+ 50 Vol% Wasser).

Abhängig von der Risstiefe waren drei bzw. vier Applikationen im Abstand von wenigstens einer Woche erforderlich, bis eine Verfüllung erreicht war.

Klimabedingungen während der Behandlung: 20°-22°C, 26-28 % rF

Für Anböschungen und Kittungen fand eine mit CaLoSiL[®]mikro gebundene Kreide (Calciumcarbonat) Verwendung. Das Mischungsverhältnis orientierte sich an der Verarbeitbarkeit, die auch durch das Saugverhalten des Untergrundes bestimmt wurde:

CaLoSiL[®]mikro + Champagner Kreide (4,5 + 8 m/m)

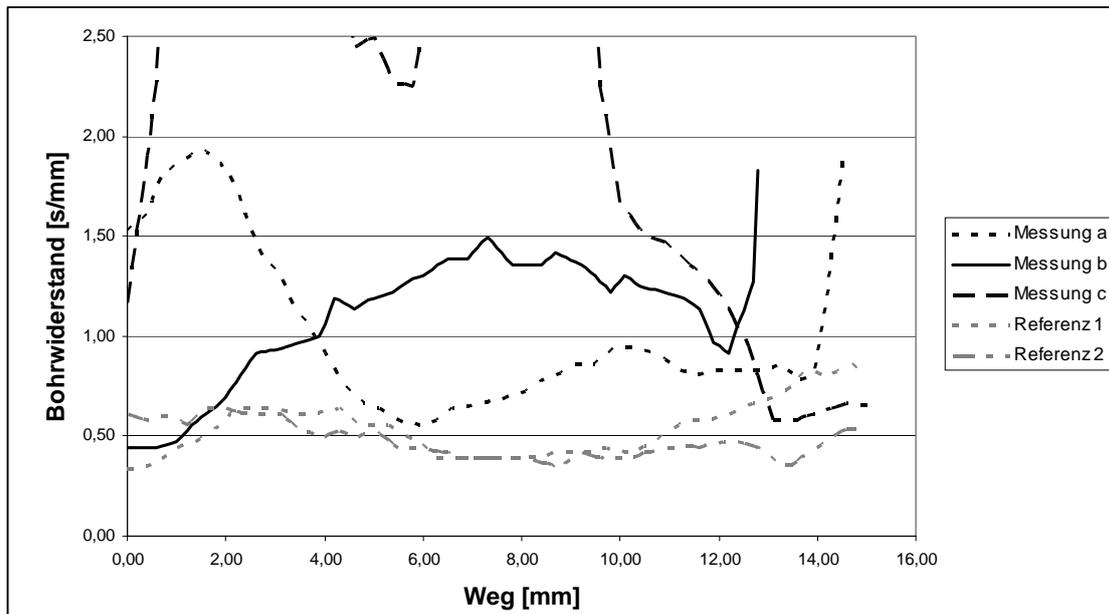
Die Applikation erfolgte nach Vornetzen mit Ethanol mittels Spatel. Die nahezu weiße Materialfarbigkeit des Feinstucks machte ein Anfärben der Kittmasse überflüssig.

Klimabedingungen während der Behandlung: 21°-24°C, 38-40 % rF

Ergebnisse

Die Festigung des Unterstucks mit bimodaler Dispersion erzeugte stellenweise Weißschleier. Auf eine weitere Applikation wurde deshalb verzichtet. Die Oberfläche erwies sich beim manuellen Abtasten deutlich stabilisiert. An stärker geschädigten Bereichen (Schalenbildung) war noch keine ausreichende Verfestigung festzustellen.

Die drei im Bearbeitungsbereich durch die Firma Geotron Elektronik durchgeführten Bohrwiderstandsmessungen erbrachten kaum auswertbare Ergebnisse. Zwei Messungen wurden offenbar durch Zuschläge gestört (Graphik 19, Messung a und c), die dritte (Messung b) zeigte keinerlei Festigungseffekt im oberflächennahen Bereich, in einer Tiefe von ca. 2 bis 12 mm aber deutlich stärkere Festigkeit als bei den Referenzmessungen.



Graph.19: Schloss Leuben, Ostfassade, Tympanon: Bohrwiderstandmessung im Bereich der Musterkonservierung im Vergleich mit Werten unbehandelter Referenzflächen

Die Maßnahmen am Feinstuck waren nach augenscheinlicher Einschätzung sehr erfolgreich. Die Festigung von Ablösungen erwies sich bei manueller Prüfung als sehr stabil.

Die Anböschungen und Kittungen sind ohne Schwundrisse erhärtet und ebenfalls sehr fest. Sie wiesen zunächst eine pudernde Oberfläche auf. Durch eine Nachfestigung mit einer Mischung aus CaLoSiL[®]E50 und CaLoSiL[®]mikro (massenanteilig 100 + 1) konnte dies aber behoben werden.

„Peelingtests“ wurden an drei behandelten Unterstuckbereichen im Bereich der Musterkonservierung (B1 bis B3) sowie an drei unbehandelten Oberflächen in unmittelbarer Nachbarschaft durchgeführt (U1 bis U3, Verortung Abbildung 29, Ergebnisse Graphik 20). In zweien der Bereiche ohne Behandlung wurden mit den ersten Prüfschritten relativ hohe Materialmengen gelöst, ab der sechsten bzw. siebenten Prüfung nimmt die Menge dann stark ab (U1 und U2). Auf der dritten unbehandelten Fläche wurde eine eher niedrige, aber während aller Prüfschritte etwa gleich bleibende abgängige Materialmenge festgestellt, lediglich in Durchgang 6 ist eine größere Putzschale im Ganzen mitgerissen worden und erhöhte die Bilanz (U3). An den behandelten Flächen entstand eine nur geringe Materialabnahme, die mit fortge-

setzter Prüfung weiter abnahm. Ab der vierten Prüfung liegt die Masse abgängigen Materials unter allen Messungen am unbehandelten Stück.

Die Gesamtmasse abgerissenen Materials betrug an den unbehandelten Flächen im Durchschnitt 1,59 g, bei den behandelten Flächen 0,51 g.

Die Ergebnisse der „Peelingtests“ sind in Protokoll Nr. 13-01 dargestellt.²⁹⁹

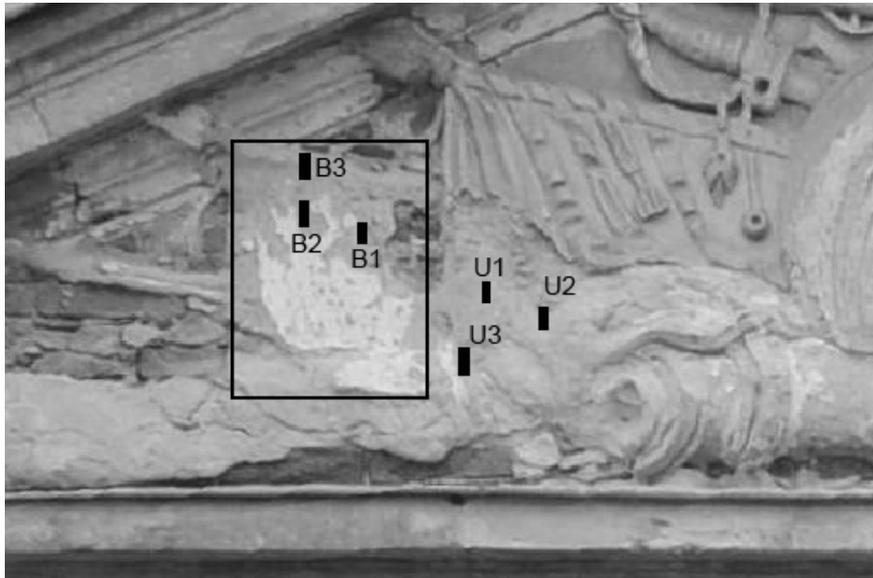
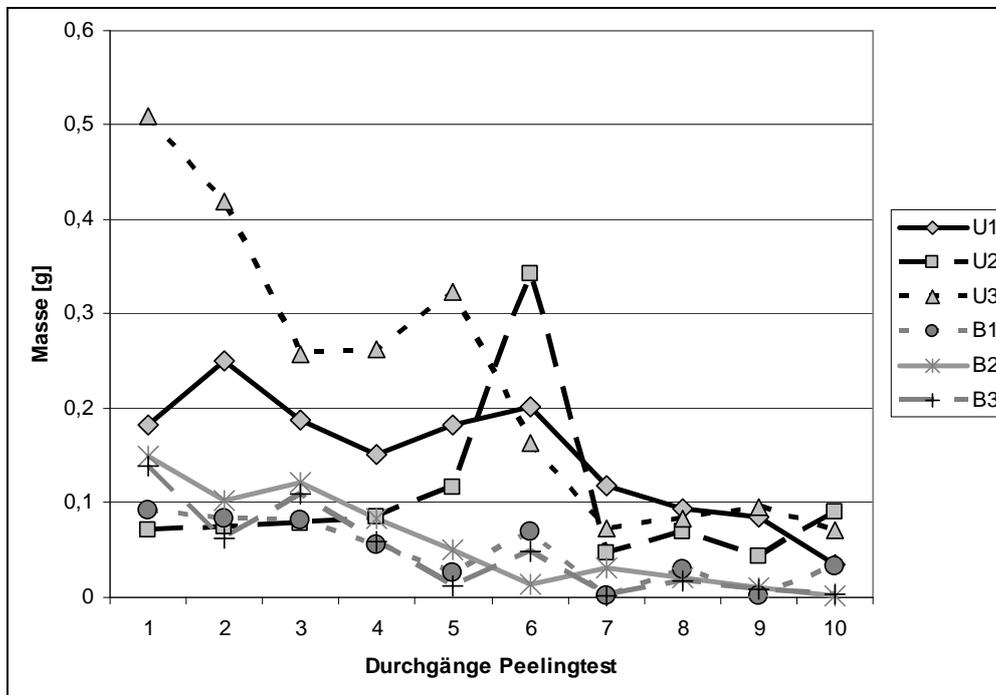


Abb.27: Leuben, Schloss, Tympanon des östlichen Risalitgiebels - Prüfflächen „Peelingtests“



Graph.20: Leuben, Schloss, Tympanon des östlichen Risalitgiebels, Unterstück: Masse abgerissenen Materials bei jeweils 10 Durchgängen des „Peelingtests“ an unbehandelten (U) Flächen sowie an behandelten Flächen im Bereich der Musterkonservierung (B)

²⁹⁹ Siehe Anhang A, S. 284

Bewertung

Das Auftreten von Weißschleiern bei der Anwendung einer bimodalen Dispersion, die im Vortest keinerlei optische Veränderung hervorrief, zeigt die Sensibilität dieser Konservierungsmittel. Beide Applikationen fanden bei sehr ähnlichen und für die Applikation eigentlich recht zuträglichen, weil trockenen Witterungsbedingungen statt (20-21°C, 28-30 % rF). Insofern sind eher materialimmanente Ursachen, möglicherweise die Gegenwart und Menge von Salzen, anzunehmen. Das Beispiel zeigt, dass die Methodensuche und -festlegung bei Anwendung der Festigungsmittel auf der Basis von Nanodispersionen in größerem Maßstab ein systematisches Problem darstellt. Die Schleierbildung bedeutet hierbei nicht nur ein ästhetisches Problem, welches bei derart stark geschädigten Materialien wie in diesem Fall auch nicht durch geeignete Nachreinigung behoben werden kann. Vielmehr zeigt die Schleierbildung eine unzureichende Tiefenwirkung des Festigungsmittels an.

Für die Prüfung der erreichten Festigkeit bei der Mörtelkonsolidierung sind Bohrwiderstandsmessungen die einzige Alternative zur Prüfung entnommenen Probenmaterials. Die angewandte „Freihandmethode“ der Bohrwiderstandsmessung erwies sich nur bedingt praktikabel.³⁰⁰ Nachteil der Bohrwiderstandsmessung an Mörteln ist außerdem, dass sie aufgrund der die Messung störenden Zuschläge hier sehr fehlerbehaftet ist.

Für eine sichere Ergebnisbewertung ist eine erheblich größere Anzahl von Messungen erforderlich, als sie im vorliegenden Fall wegen beschriebener Probleme durchgeführt werden konnten (Abschnitt 10.2.5, S. 130). Die einzige anscheinend ungestörte Messung (b) wies keine erhöhte Oberflächenfestigkeit nach, obwohl eine solche wegen der Schleierbildung zu erwarten gewesen wäre.

Durch die „Peelingtests“ müssen durchaus erhebliche Beschädigungen in Kauf genommen werden. Als Prüfmethode eignet sich dieses für die Anwendung vor Ort sehr praktikable Verfahren nur, wo diese verantwortet werden können.

Die Ergebnisse des „Peelingtests“ können eine deutliche Stabilisierung der Oberflächen des Unterstucks durch die Behandlung belegen. Die Menge des durch die Klebestreifen abgerissenen Materials betrug nach der Behandlung im Durchschnitt weniger als ein Drittel im Vergleich zum unbehandelten Material. Die Wirksamkeit der Gefügefestigung am Stuck kann der angewendeten bimodalen Dispersion somit zumindest für die Oberflächenbereiche bescheinigt werden. Die Festigungswirkung ist durch die im Bearbeitungsbereich vorhandenen Mauersalze (Magnesiumsulfate, vgl. Abschnitt 10.2.1, S. 122) offenbar nicht gestört worden. Ob die Konsolidierung für die beschädigungslose Durchführung salzreduzierender Maßnahmen ausreichend ist, konnte im Rahmen der Bearbeitung nicht mehr überprüft werden.

³⁰⁰ Der Entwickler hat mittlerweile das Gerät „TERSIS T2“ mit Verlängerungselementen für eine flexiblere Anordnung der Auflagerteller ausgestattet, was die Einsetzbarkeit erheblich verbessern dürfte.

10.3 Schloss Leuben: Raum 012, Ostwand

10.3.1 Voruntersuchungen

Lokalisierung und Beschreibung

Der Raum 012 befindet sich im südöstlichen Bereich des Erdgeschosses (Abbildung 28). Der Raum ist etwa 5,95 m x 5,45 m x 3,95 m groß. Er besitzt im aktuellen Zustand keinen Bodenbelag, keine Sockelleisten, keine Decke und keinerlei Öffnungsverschlüsse.

Nördlich schließt das gartenseitige Vestibül (Raum 011) an, im Süden zwei kleinere Räume (Räume 013, 014). Im Westen ist der Mittelgang (Raum 015) vorgelagert. Zu allen angrenzenden Räumen führt jeweils ein Türdurchgang. Die Ostwand ist Außenwand und ist durch zwei hohe, flach korbbogige Fensternischen und ein dazwischen liegendes geschlossenes Wandstück gleichmäßig in drei Teile gegliedert. Der untere Teil dieses mittleren Wandstückes wurde als Bearbeitungsfläche für die Untersuchungen ausgewählt (ca. 1,40 x 2,00 m). Hier haben sich Reste einer polychromen Raumfassung erhalten. In der Sockelzone befanden sich auf gelbem Fond grau marmorierte Spiegelfelder mit eingezogenen Ecken und ockerfarbigen und roten Rahmungen, illusionistisch durch verschiedene Licht- und Schattenkanten gestaltet. Der darüber liegende Wandfond war monochrom weiß.

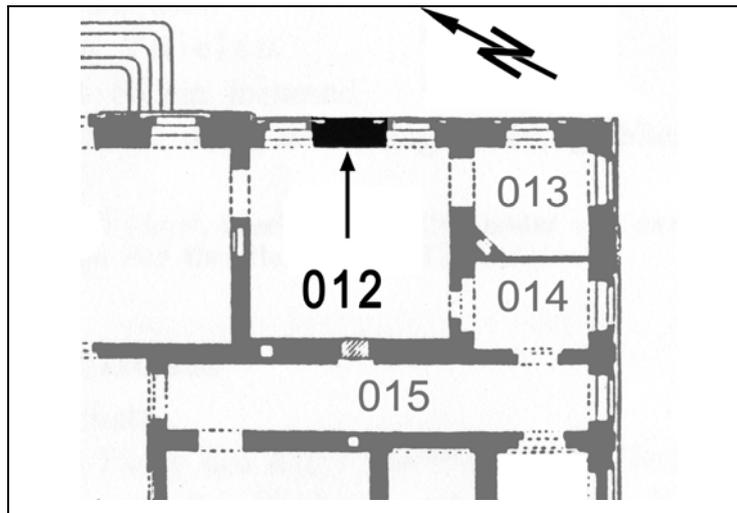


Abb.28: Schloss Leuben, Ausschnitt Grundriss des Erdgeschosses mit Lokalisierung des Untersuchungsbereiches in Raum 012 (unter Verwendung der Fig. 159 aus GURLITT (1905), S.160)



Abb.29: Schloss Leuben, Erdgeschoss, Raum 012, Ostwand mit Angabe des Untersuchungsbereiches

Ergänzungen und Veränderungen

Die Sockelzonen aller Wände des Raumes R012 sind temporär mit Holzverkleidungen verbaut gewesen. Erhalten blieben hiervon nur wenige Reste in den Fensternischen. Am Wandstück des Bearbeitungsbereiches befinden sich zudem an beiden seitlichen Kanten oberhalb der Sockelzone Bretter, die als Unterkonstruktion für Wandbespannungen gedient haben dürften. Der Verkleidung ist zu verdanken, dass die barocke Raumfassung ohne Farbüberdeckung erhalten geblieben ist.

Sonst sind in diesem Bereich, abgesehen von Schäden und Verlusten, keine verbliebenen Hinweise auf zwischenzeitliche Ergänzungen oder Veränderungen festzustellen.

Konstruktion, Materialien, Herstellungstechnik

Die Ostwand besteht aus (vermutlich teilweise hammerrechtem) Bruchsteinmauerwerk mit unregelmäßigen Steingrößen, die Eckaufmauerungen an den Kanten zu den beidseitig anschließenden Nischen wurden aus Ziegelsteinen hergestellt (offenbar regelmäßiger Läufer-Binder-Verband).

Auf der Wandfläche liegt ein ausgleichender Unterputz, auf diesem ein Feinputz.

Beide Putzlagen sind gut geglättet. Die Feinputzoberfläche wurde über einer Grundierschicht polychrom gefasst.

Ergebnisse der Materialanalysen

Die Mörtelanalysen wurden im Archäometrischen Labor der HfBK Dresden durch Dr. S. Hoblyn und T. Köberle durchgeführt, die Ergebnisprotokolle befinden sich im Anhang.³⁰¹

Der Ausgleichsputz wurde nicht untersucht.

Deckputz:

Zusammensetzung:

Bindemittel dolomitischer Kalk

quarzitische Zuschläge sowie Sandstein, mäßig sortiert, Größtkorn 1,5 mm

Gefüge:

partikelgestützt, Matrix-Partikel-Verhältnis ca. 30:70

Die Materialien des Mauerwerks wurden nicht untersucht.

Bei der Malerei handelt es sich um eine Sekkotechnik, möglicherweise Kalkkaseinmalerei. In der Malschicht wurde ein Kalkgehalt festgestellt, weitere Untersuchungen sind nicht durchgeführt worden.

Bedingungen und Einflüsse

Die Klimasituation im Innenraum des gesamten Gebäudes ist wegen der überall fehlenden Öffnungsverschlüsse von den äußeren Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen unmittelbar abhängig. Die Temperatur dürfte der Außentemperatur etwas verzögert und geglättet folgen. Feuchteinträge durch Niederschläge finden im Erdgeschossraum R012 trotz fehlender Fenster nicht statt, zumindest sind im Untersuchungszeitraum keine entsprechenden Beobachtungen gemacht worden. Wahrscheinlich war der Raum aber vor der Dachinstandsetzung 2005 durch eindringende Niederschlagswässer lange Zeit beeinflusst. Decke und Bodenbelag haben so stark Schaden genommen, dass sie vollständig entfernt werden mussten. Hierdurch sind auch alle Indizien verloren gegangen, die auf die Wege und Mengen eingedrungenen Wassers schließen lassen.

Da sich der Musterbereich an einer Außenwand befindet, geschehen heute entsprechende Feuchteinträge in das Mauerwerk nur noch von der rückseitigen, frei exponierten Fassadenfläche, deren schützender Verputz nur noch fragmentiert erhalten ist.

Weder das Mauerwerk noch der unbefestigte Boden geben Hinweis auf dauerhafte Durchfeuchtung aufgrund aufsteigender Feuchtigkeit.

Die im unteren Wandbereich befindliche Musterfläche ist frei zugänglich und gegen mechanische Beanspruchungen während Reinigungs- und Aufräumarbeiten im Schloss oder durch Besucher nicht geschützt.

³⁰¹ Siehe Anhang B, S. 334 und S. 350

Schäden

Schadensbilder und Schadumfang

Die Definitionen der im Folgenden angeführten Schadensbilder sind mit Bildbeispielen im Schadensbildkatalog im Anhang zu entnehmen.³⁰² Die Verluste und Schadensbilder im Untersuchungsbereich wurden in einer Kartierung dokumentiert.³⁰³

Konstruktive Schäden in Form von Mauerwerksrissen, - verschieben oder -ausbrüchen sind nicht festzustellen.

Die Ziegelsteine zeigten an den von ihnen gebildeten Mauerkanten Formverluste, vor allem im untersten Bereich der linken (nördlichen) Seite. Die sichtbaren Ziegeloberflächen waren verschieden stark durch Aufschieferung, teils auch durch Schalenbildung und Risse geschädigt.

Die sichtbaren Natursteinoberflächen wiesen keine erkennbaren Schäden auf.

In den offen liegenden Mauerwerksbereichen zeigten die Fugenmörtel oberflächige Absandung, stellenweise waren sie bereits zurückgewittert.

Der Putzbestand war stark fragmentiert. Im untersten Wandbereich und in den seitlichen Kantengebieten lag bis auf das Mauerwerk reichender Kompletterverlust von Fein- und Unterputz vor. Vereinzelt waren auch in anderen Bereichen kleine, lokal begrenzte Kompletterfehlstellen festzustellen. Im Musterbereich umfasste der Kompletterverlust mehr als 25% der Fläche. Angrenzend an die großen Fehlbereiche entstanden im linken und mittleren Sockelbereich auf größeren Flächen Feinputzverluste. Die erhaltene Putzfläche löste sich in ihrem untersten Bereich stellenweise vom Träger, die Spaltweite zwischen Mauerwerksoberfläche und Putz betrug bis zu 15mm.

Vor allem in den unteren Bereichen waren viele Spalttrisse augenfällig.

Alle offen liegenden Putzoberflächen zeigten Absandung und waren oberflächlich bereits reduziert, die Gefügefestigkeit des Mörtels war gering. An Randbereichen der Putzflächen lag vielfach Schalenbildung in verschiedener Ausprägung vor, vereinzelt sind Blasen entstanden.

Malschichten der polychromen Raumbfassung waren im Bereich der Musterfläche zu etwa 30% in verschiedenen großen Flächen erhalten und nahezu überall akut von Ablösung vom Träger betroffen. Unter den in sich recht stabilen, doch oft von Rissen durchzogenen Malschichtflächen befand sich stark absandender Putz. Die Malschichten lagen vielerorts in zum Teil großen Flächenzusammenhängen (über 10 cm²) hohl, rückseitig hafteten Mörtelbestandteile an. Die oberflächenparallelen Spaltöffnungen waren nur Millimeterbruchteile stark, in den Randbereichen betrugen sie bis zu zwei Millimeter.

Schadensgenese und Ursachen

Die Putzverluste betrafen die seitlichen Randbereiche sowie die bodennahe Zone des Wandstückes. Sie können zum Teil durch mechanische Einwirkungen bereits bei der Herstellung der temporären Sockelverschalungen verursacht worden sein. Auch im Zuge deren späterer Entfernung und des Rückbaus des beschädigten Fußbodens sind möglicherweise Putzabbrü-

³⁰² Siehe Anhang A, S. 291f.

³⁰³ Siehe Anhang A, S. 301ff.

che entstanden. Daneben ist die Materialzerstörung vor allem auf Feuchtigkeitseinwirkung zurück zu führen. Der nach unten zunehmende Schädigungsgrad lässt annehmen, dass Feuchtigkeit während der langzeitigen Ruinensituation in besonderem Maße von einem durchnässen Boden im Raum ausgegangen sein dürfte. Hierbei sind vermutlich vor allem die von Wasser selbst ausgelösten Löseprozesse, hygri-sche Dehnung und Frostschäden für Bindungsverlust und Gefügeschwächung in den Mörteln Ausschlag gebend. Kristallisationsvorgänge durch eingebrachte Salzbildner spielten zunächst kaum eine Rolle, da die Substanz dauerhaft feucht war und sich die Ionen in Lösung befanden. Die festgestellten Gehalte an löslichen Anionen in einer Putzmörtelprobe erwiesen eine nur geringe Belastung durch Chlorid und Sulfat und keine Nitratbelastung (Einschätzung nach WTA³⁰⁴, Messwerte Protokoll Nr. 11³⁰⁵). Systemtische Untersuchungen an Höhen- und Tiefenprofilen wurden nicht durchgeführt. Auch wenn eher geringe Mengen löslicher Sulfate und Chloride vorhanden sind, verursachen die entstehenden Salze die aktuelle Gefügezerstörung wahrscheinlich erheblich. Im dolomitischen Kalkmörtel werden stark hygroskopische Magnesiumsalze gebildet. Im andauernden Austrocknungsprozess der Substanz seit Errichtung des neuen Daches gewinnt die Salzbildung an Dynamik. Die durch Kristallisationsprozesse bedingte Gefügebrauchlösung der Mörtel erfolgt hinter den relativ dichten, sperrend wirkenden Malschichten. Deren Adhäsion wird dadurch allmählich zerstört und die in sich stabilen, aber nur bis zu einem Millimeter dicken Malschichtflächen fallen schließlich in teils sehr großen Schollen von der Wand. Im vorgefundenen Zustand stellten sich fast alle Malschichtflächen als bereits nur noch äußerst schwach haftend und in höchstem Maße verlustbedroht dar. Während der Bearbeitungsdauer sind erhebliche weitere Malschichtverluste beobachtet worden, die vor allem durch mechanische Einwirkungen bei Räum- und Raumreinigungsarbeiten durch den Nutzer – unbeabsichtigt, aber fahrlässig – entstanden.

10.3.2 Konservatorischer Handlungsbedarf

Für den überkommenen Putz- und Malereibestand war dringlichster konservatorischer Handlungsbedarf festzustellen. Der Substanzverlust befand sich in einem akuten, schnell fortschreitenden Stadium. Dies ist einerseits durch die anhaltende Austrocknung und damit verbundene Salzkristallisation begründet, andererseits durch den mittlerweile erreichten Grad der Schwächung des Schichtensystems.

Die Putzmörtel bedurften gefügefestigender Maßnahmen, abgelöste Putzbereiche und Malschichten waren durch geeignete Hinterfüllung wieder fest mit dem Träger zu verbinden. Risse waren kraftschlüssig zu verfüllen.

Für die Malschichtfragmente sollte durch Anböschung der Abbruchkanten und Kittung der Ausbrüche zusätzliche Stabilität erreicht werden.

Umfängliche Klärung des Bedarfs und der Wirksamkeit salzreduzierender Maßnahmen war nicht Gegenstand der aktuellen Bearbeitung. Eine Kompressenbehandlung wäre am stark

³⁰⁴ WTA (2003), S. 5

³⁰⁵ Siehe Anhang A, S. 269

geschädigten Bestand praktisch nicht umsetzbar gewesen und hätte erhebliche Beschädigungen, im Falle der Malschichten sogar den weitgehenden Verlust bedeutet. Mit den vorgesehenen Konsolidierungsmaßnahmen musste ausreichende Stabilität für die Durchführung weiterer Maßnahmen, wie salzreduzierender Kompressenbehandlungen, erreicht werden.

10.3.3 Einsetzbarkeit von Nanodispersionen

Gefügedefekte und Ablösungserscheinungen erfordern die Überbrückung und Auffüllung in sehr unterschiedlicher Dimension. Während Anböschungen und die Hinterfüllung von Putzablösungen auch mit herkömmlichen kalkbasierten Injektions- und Restaurierungsmörteln materialidentisch erfolgen könnten, wären Gefügefestigungen der Mörtel sowie Hinterfüllungen der relativ großflächigen und gleichzeitig sehr dünnen Hohlräume unter den Malschichten wegen des begrenzten Eindringvermögens dieser Materialien nur begrenzt Erfolg versprechend. Für deren Behandlung kommen unter den herkömmlichen Konservierungsmaterialien – von Kunstharzprodukten, Leim und Kasein abgesehen – nur Cellulose- oder Kieselsäurederivate in Frage.

Calciumhydroxid-Nanodispersionen sollten es ermöglichen, auch diese Aufgaben auf der Basis der objektspezifischen Kalkbindung zu erfüllen.

Da die Schädigung und Schadensdynamik vor allem auf wasserabhängige Prozesse zurückgeführt wurden, erschien ein weitgehender, möglichst völliger Verzicht auf Wassereinträge bei der Konservierung wünschenswert. Dies sollte bei der Umsetzung aller erforderlichen Behandlungen auf der Basis der alkoholischen Dispersionen möglich sein. Von entscheidender Bedeutung war dabei, ob und in welcher Weise die vorhandenen Salze und Salzlösungen die Wirkungsweise der Mittel beeinflussen würden.

10.3.4 Vorversuche mit Probenmaterial

Experimentelles

Ähnlich wie am Tympanon (vgl. Abschnitt 10.2.4, S. 125.) war die Entnahme geeigneten Probenmaterials an der Musterfläche in Raum 012 nicht möglich. Für Vorversuche diente ein Fundstück abgängigen Putzmörtels mit Fassungsresten. Es stammt aus der Fensternische rechts neben dem Musterbereich in Raum 012 (Probe L_026).

Diese Mörtelfragmente wiesen keine Gefügeschädigung mit Festigungsbedarf auf, so dass durch die Vorproben nur allgemeine Erkenntnisse zum Eindringverhalten der Nanodispersionen zu erlangen waren.

Materialien

Proben (Substrat):

Schloss Leuben, Raum 012, Putzpaket (Unterputz und Feinputz) mit aufliegenden Malschichten

Fundstück (Probe-Nr. L_026)

Fundort: Raum 012, Ostwand, südliche Fensternische

Entnahmedatum: 24.04.2009

Herstellung von Einzelproben á ca. 30 g mit Steinsäge

Calciumhydroxid-Dispersion:

CaLoSiL[®] NP25

Durchführung

Die Proben wurden bei 105°C im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. Nach Abkühlung im Exsikkator erfolgte die Applikation der Dispersion im Tauchverfahren analog der in Abschnitt 8.6.2 (S.78) beschriebenen Vorgehensweise unter unkonditioniertem Labor-klima.

Der Versuch beinhaltete einen Festigungszyklus von drei Behandlungen mit CaLoSiL[®] NP25 an drei Proben.

Die Lagerung der behandelten Proben dauerte wenigstens eine Woche in einem klimatisierten Raum bei 20°C und 65 %rF.

Prüfungen

Alle Messungen (Feststoffaufnahme, Wasseraufnahmevermögen, Biegezugfestigkeit) erfolgten analog zu den beschriebenen Untersuchungen (Durchführung Abschnitt 8.3, S. 56ff.).

Ergebnisse

Probe Nr.	Ausgangs- masse (getrocknet)	Massezunahme nach Applikation			Massezunahme gesamt
		1	2	3	
L_026-1	82,19 g	82,51 g	82,75 g	82,78 g	0,59 g = 0,72 Ma%
L_026-2	79,64 g	80,11 g	80,26 g	80,40 g	0,76 g = 0,96 Ma%
L_026-3	82,36 g	82,72 g	82,89 g	82,90 g	0,54 g = 0,67 Ma%

Tab.13: Massezunahme der Proben aus Raum 012/ Schloss Leuben nach den Applikationen mit CaLoSiL[®] NP25

Die Menge neu gebildeten Calciumcarbonats nach der dreimaligen Applikation von CaLo-SiL[®] NP25 und Aushärtung betrug 0,7 bis 1,0 Ma% (Tabelle 13 sowie Protokoll Nr. 10-01³⁰⁶). Auf den Oberflächen aller Prüfkörper waren starke Weißschleier festzustellen. Bei der dritten Applikation erfolgte kaum noch Feststoffeinlagerung bzw. –anlagerung.

Die Wasseraufnahmefähigkeit aller untersuchten Proben ist sehr ähnlich (Ergebnisse Proto-koll Nr. 10-02³⁰⁷). Die volumenbezogene kapillare Wasseraufnahmefähigkeit der unbehandel-ten Proben betrug 20,4 bis 20,7 Vol%. Bei den behandelten Proben lag sie bei 19,5 bis 19,8 Vol%.

Bei der Durchführung des Biegezugversuchs ist bei beiden Probserien (unbehandelte bzw. behandelte Proben) jeweils eine Fehlmessung zu verzeichnen, da die Proben von der Prothese abgerissen wurden. Die an den verbliebenen Proben ermittelten Werte für die Biegezugfestig-keit betragen bei den unbehandelten Proben 1,74 und 1,86 N/mm², bei den behandelten 1,58 und 1,80 N/mm² (Ergebnisse Protokoll Nr. 10-03³⁰⁸).

³⁰⁶ Siehe Anhang A, S. 265

³⁰⁷ Siehe Anhang A, S. 266f.

³⁰⁸ Siehe Anhang A, S. 268

Bewertung

Die oberflächigen Auflagerungen nach nur drei erfolgten Applikationen und die gravimetrisch nachgewiesene, abnehmende Feststoffaufnahme weisen auf eine ungenügende Verteilung der Feststoffe im Mörtelgefüge hin.

Es waren durch die Behandlung keine gravierenden Veränderungen in den untersuchten Materialeigenschaften festzustellen. Die Biegezugfestigkeit des unbehandelten Materials ist weniger hoch als es beim Fassadenstück der Fall war (Abschnitt 10.2.4, Ergebnisse S. 126). Aufgrund der relativ hohen Divergenz der Werte ist jedoch auch hier eine geringe Festigkeitserhöhung durch die Behandlung nicht nachweisbar. Das Festigungsmittel liegt vor allem als abkreibende Auflagerung vor und bildete keine feste Schicht oder Kruste.

Die Untersuchungsergebnisse zum Wasseraufnahmevermögen zeigen, dass die Behandlungen keine negative Auswirkung auf die Kapillarität des Mörtels haben.

10.3.5 Vorversuche am Objekt

Zielstellung und Vorgehensweise

Da die Entnahme von gefügeschädigtem Material für Laboruntersuchungen nicht möglich war, konnte die Wirkung von Nanodispersionen und deren Modifikationen nur am Objekt selbst erfolgen.

Eine erste Testreihe beinhaltete die Gefügestärkung geschädigten Putzmörtels. Hierbei sollten auf begrenzten Probenflächen alle im Labor erprobten Modifizierungen von Mittel und Technologie überprüft werden:

- Festigung mit unmodifizierten Nanodispersionen

- Vorbehandlung mit Wasser bzw. mit Lösungsmittel

- Nachbehandlung mit Lösungsmittel bzw. mit Lösungsmittelgel

- Beimischung von Gelbildnern

- Anwendung von verdünnten Nanodispersionen

- „aufbauende Festigung“ mit verdünnten Nanodispersionen bei schrittweise erhöhtem Feststoffgehalt mit 40 Vol% Acetonanteil im Dispersionsmittel

- bimodale Dispersionen aus Nanodispersionen mit Zusatz von Mikrodispersion.

Die unterschiedliche Materialfeuchtigkeit war hierbei zu berücksichtigen.

Erstes Bewertungskriterium war die Veränderung des optischen Erscheinungsbildes durch Aufhellung, Weißschleier- oder Krustenbildung, was auf eine ungenügende Tiefenwirkung des Festigungsmittels hinweist.

In einer zweiten Testreihe sind Modifikationen der CaLoSiL[®]-Dispersionen zur Behandlung abgelöster Malschichtbereiche erprobt worden. Ausgehend von den Versuchen im Labor (Kapitel 9, S. 94ff.) erfolgten Festigungsproben mit Mischungen aus Nano- und Mikrodispersionen. Ziel war die Wiederherstellung einer festen Anbindung der gelösten Malschichtbereiche auf deren gesamter Fläche.

Durchführung

Die Probefelder wurden in Fehlbereichen der Malschicht an Putzflächen mit vergleichbarem Schädigungsgrad angelegt. Unterschiedliche Bedingungen waren durch die jeweilige Materialfeuchtigkeit gegeben. Diese wurde mit einem elektronischem Feuchtemessgerät (GANN Hydromette Compact B, vergleiche Abschnitt 8.5.8, S. 72). Die Messung erfolgt über eine Kugelsonde nach dem „Dielektrizitätskonstante / Hochfrequenz-Messprinzip“. Die elektromagnetischen Wellen dringen einige Zentimeter tief in die Oberfläche ein. Das Messergebnis ist ein mittlerer Wert innerhalb der erreichten Materialtiefe und wird graduell in 0 ... 100 Digits angegeben. Da Ionen gelöster Salze die Dielektrizitätseigenschaften beeinflussen, können die ermittelten Werte nur eine gewisse Orientierung über die Feuchteverteilung geben. Bei den ersten Behandlungsproben wurden Bereiche mit unterschiedlichen Feuchtigkeitswerten mit unmodifizierter Nanodispersion behandelt. In einem weiteren Versuch erfolgte vor der Applikation eine lokale Trocknung des Putzes mit Rotlicht (150 W/ 50 Hz, Abstand ca. 30 cm). Nach 2,5 Stunden zeigten sich die vom Messgerät ermittelten Feuchtigkeitswerte im Probefeld von 66 ... 81 auf 57 ... 71 verringert.

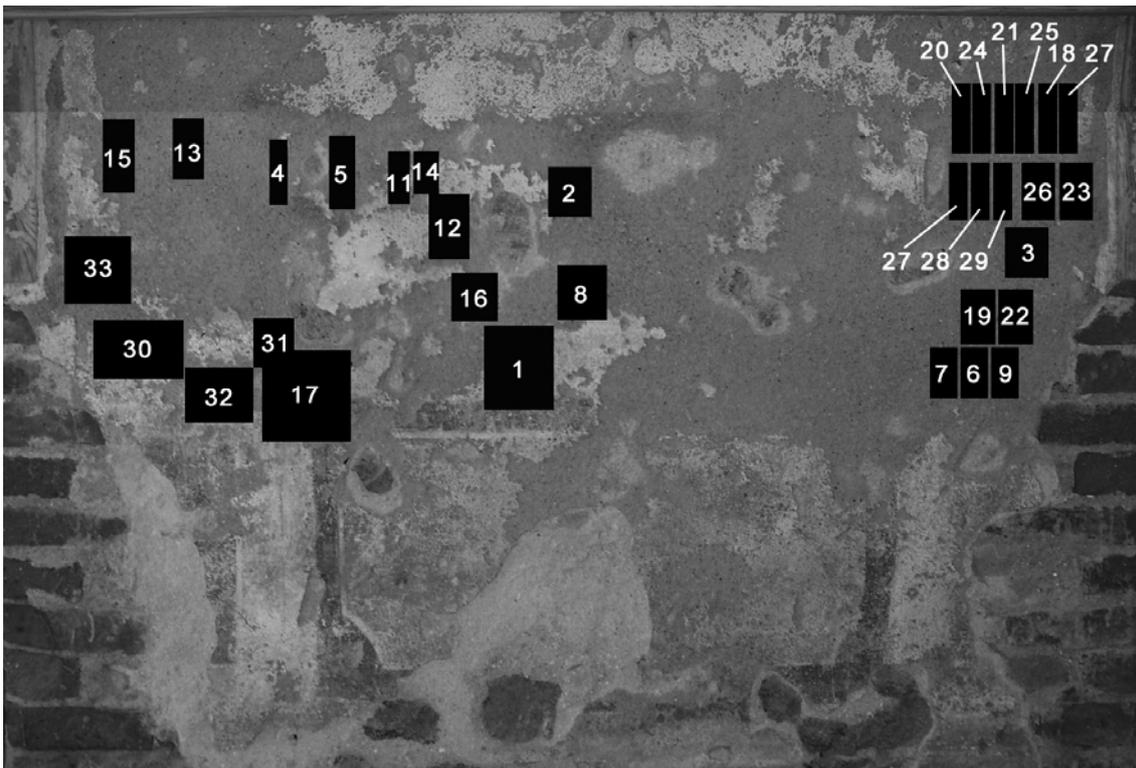


Abb.30: Leuben, Schloss, Raum 012, Ostwand Mittelteil, Sockelbereich - Lokalisierung der Vortests am Objekt

Die Einzelproben der Testserie zur Gefügefestigung sind in nachfolgender Tabelle 14 dargestellt.

10 Probeanwendung an Objekten

Probe Nr.	Feuchte-wert ¹	Vorbe-handlung	Festigung	Nachbe-handlung ²
1	59...66	keine	CaLoSiL [®] E25	keine
2	72...78	keine	CaLoSiL [®] E25	keine
3	57...71	IR	CaLoSiL [®] E25	keine
4	76...78	keine	CaLoSiL [®] IP25	keine
5	65...73	keine	CaLoSi [®] NP25	keine
6	60...62	keine	CaLoSiL [®] NP50	keine
7	63...65	Ethanol ³	CaLoSiL [®] NP50	keine
8	60...62	keine	CaLoSiL [®] NP50	LMG 3
9	60...62	keine	CaLoSi [®] NP50	LMG 3 ⁴
10	76...82	keine	CaLoSiL [®] E25	LMG 2
11	66...73	keine	CaLoSiL [®] E25+LMG 2 (4+1 V/V)	keine
12	73...85	keine	3 x [E12,5]	keine
13	60...82	keine	3 x [E12,5]	Ethanol
14	66...73	keine	3 x [E12,5]	LMG 2
15	62...76	keine	6 x [NP12,5]	LMG 2
16	74...84	keine	[E5AC],[E7,5AC],[E10AC], [E12,5AC],[E15AC],[E25AC]	LMG 1
17	58...80	keine	[E5AC],[E7,5AC],[E10AC], [E12,5AC],[E15AC],[E25AC]	LMG 2
18	56...61	keine	[E40] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	keine
19	60...70	keine	[NP40] + CaLoSiL [®] mikro (100+1 m/m)	keine
20	70...75	keine	[NP40AC] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	keine
21	69...78	keine	[IP40AC] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	keine
22	63...70	keine	[NP40] + CaLoSiL [®] mikro (100+1 m/m)	LMG 3
23	47...61	keine	[NP40] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	LMG 3 ⁴
24	77...78	keine	[NP40AC] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	LMG 3 ⁴
25	61...68	keine	[IP40AC] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	LMG 3 ⁴
26	48...73	keine	[IP40AC] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	LMG 3 ⁴
27	59...86	H ₂ O ⁵	[E40] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	keine
28	63...84	H ₂ O ⁵	[NP40] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	keine
29	76...80	H ₂ O ⁵	[IP40AC] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	keine

¹ ... Messwerte GANN Hydromette compact B

² ... wo nicht anders vermerkt, erfolgte die Nachbehandlung unmittelbar nach Festigung

³ ... 40 Minuten Wartezeit vor der Festigung

⁴ ... 60 Minuten Wartezeit vor Nachbehandlung

⁵ ... 120 Minuten Wartezeit vor der Festigung

IR ... Infrarot-Trocknung (150W, 50Hz, 2,5 h)

LMG 1 ... 0,1 Ma% Klucel[®] G in Ethanol+Wasser (1+1 V/V)

LMG 2 ... 0,5 Ma% Klucel[®] G in Ethanol+Wasser (1+1 V/V)

LMG 3 ... 0,5 Ma% Klucel[®] G in Ethanol+Wasser (3+1 V/V)

Tab.14: Leuben, Schloss, Raum 012, Ostwand: Testreihe zur Gefügefestigung der Putzmörtel, Mittel und Methoden

Die Applikation der Festigungsmittel sowie von Substanzen zur Nachbehandlung erfolgte im Flutverfahren mit der Pipette. Das Vornässen mit Wasser bzw. Ethanol erfolgte mit einem Pumpsprüher.

Vorproben zur Festigung abgelöster Malschichtflächen wurden an drei Einzelflächen mit vergleichbarem Schädigungsgrad durchgeführt.

Vorfestigungen erfolgten mit der Pipette im Flutverfahren, die Wartezeit vor der weiteren Bearbeitung betrug wenigstens eine Woche.

Die Applikation der Mittel zur Malschichtfestigung konnte per Injektage mit Spritzen seitlich von den Rändern sowie durch winzige Risse und Ausbrüche hinter die abgelöste Malschicht durchgeführt werden. Es wurde erprobt, ob ein Anlegen abgehobener Malschichtbereiche (vor allem der Ränder) möglich ist. Nach der Einbringung des Festigungsmittels sind die betreffenden Malschichtbereiche unter Verwendung einer Trennschicht aus Silikonpapier mit dem Finger angedrückt worden. Die an einer Fläche erprobte Nachbehandlung mit Lösungsmittel gel beinhaltete ein Nachwaschen der Oberflächen mit dem Pinsel und Abtupfen mit Zellstoff. Die in den jeweiligen Testflächen erprobten Mittel sind nachfolgend in Tabelle 15 dargestellt.

Probe Nr.	Feuchte-wert ¹	Vorbe-handlung	Festigung	Nachbe-handlung
30	51...61	keine	100 Vol % CaLoSiL [®] E50 + CaLoSiL [®] mikro (2+1 V/V) + 20 Vol % LMG 2	keine
31	47...60	2 x CaLoSiL [®] E25 ²	100 Vol % CaLoSiL [®] E50 + CaLoSiL [®] mikro (2+1 V/V) + 20 Vol % LMG 2	keine
32	50...62	keine	100 Vol % CaLoSiL [®] E50 + CaLoSiL [®] mikro (2+1 V/V) + 20 Vol % LMG 3	LMG 3
33	53...62	LMG 3	100 Vol % CaLoSiL [®] E50 + CaLoSiL [®] mikro (2+1 V/V) + 20 Vol % LMG 3	LMG 3

¹ ... Messwert GANN Hydromette
² ... eine Woche wartezeit zwischen den Festigungen
 LMG 2 ... 0,5 Ma% Klucel[®] G in Ethanol+Wasser (1+1 V/V)
 LMG 3 ... 0,5 Ma% Klucel[®] G in Ethanol+Wasser (3+1 V/V)

Tab 15: Schloss Leuben, Raum 012, Ostwand Mittelteil, Sockelbereich - Vorproben zur Malschichtfestigung

Prüfmethoden

Die Veränderung der optischen Erscheinung durch Schleierbildung wurde visuell eingeschätzt.

Eine Einschätzung der erreichten Verfestigung ist an den Putzoberflächen durch manuelles Abtasten im Vergleich zum unbehandelten Material vorgenommen worden.

An ausgewählten Testflächen, die keine Hinweise auf schlechte Tiefenverteilung des Festigungsmittels durch Schleierbildung aufwiesen, sind Bohrwiderstandsmessungen und „Peelingtests“ mit Klebeband durchgeführt worden. (Methodenbeschreibung Abschnitt 10.2.6, S. 138f.).

Ergebnisse

Probe Nr.	Oberflächenerscheinung	Festigkeit
1	leichter Weißschleier	Oberfläche relativ stabil
2	starker Weißschleier	Oberfläche relativ stabil
3	Weißschleier	geringe Stabilisierung
4	starker Weißschleier	keine Konsolidierung bemerkbar
5	Weißschleier	keine Konsolidierung bemerkbar
6	leichter Weißschleier	geringe Stabilisierung
7	leichter Weißschleier	geringe Stabilisierung
8	Aufhellung	geringe Stabilisierung
9	leichter Weißschleier	geringe Stabilisierung
10	leichter Weißschleier	geringe Stabilisierung
11	leichter Weißschleier	keine Konsolidierung bemerkbar
12	leichter Weißschleier	Oberfläche relativ stabil
13	lokal leichter Weißschleier	geringe Stabilisierung
14	Aufhellung	keine Konsolidierung bemerkbar
15	leichte Aufhellung	mäßige Stabilisierung
16	leichter Weißschleier	mäßige Stabilisierung
17	keine Veränderung	mäßige Stabilisierung
18	Weißschleier	geringe Stabilisierung
19	Aufhellung	geringe Stabilisierung
20	Weißschleier	geringe Stabilisierung
21	Aufhellung	geringe Stabilisierung
22	Weißschleier	geringe Stabilisierung
23	Weißschleier	geringe Stabilisierung
24	Weißschleier	geringe Stabilisierung
25	leichter Weißschleier	geringe Stabilisierung
26	Weißschleier	geringe Stabilisierung
27	leichter Weißschleier	geringe Stabilisierung
28	leichter Weißschleier	geringe Stabilisierung
29	leichter Weißschleier	geringe Stabilisierung

Tab.16: Schloss Leuben, Raum 012, Ostwand, Sockelzone – Auswertung der Vorproben

An den Probeflächen Nr. 8, 14 und 15 (Tabelle 16), die alle nach der Behandlung nur eine leichte Aufhellung zeigten, sind durch die Firma Geotron Elektronik jeweils drei bis vier Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt worden (Methode Abschnitt 10.2.5, S. 129f., Messdaten in Protokoll Nr. 12-01³⁰⁹). Zum Vergleich dienten Messwerte vom unbehandelten Putzmörtel in drei verschiedenen Bereichen (jeweils zwei Messungen, Lokalisierung in Abbildung 31).

³⁰⁹ Siehe Anhang A, S. 285

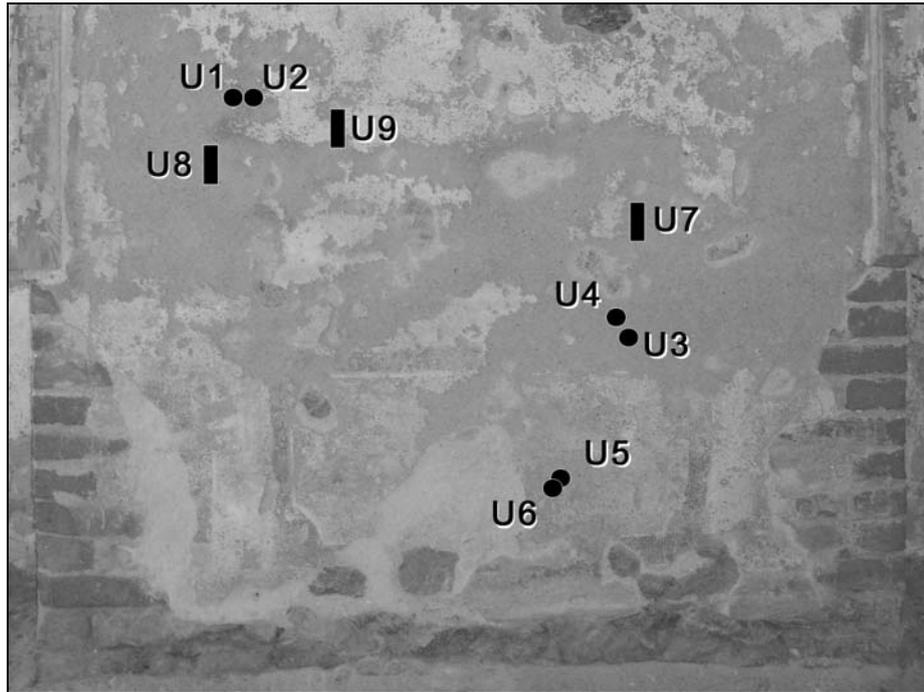
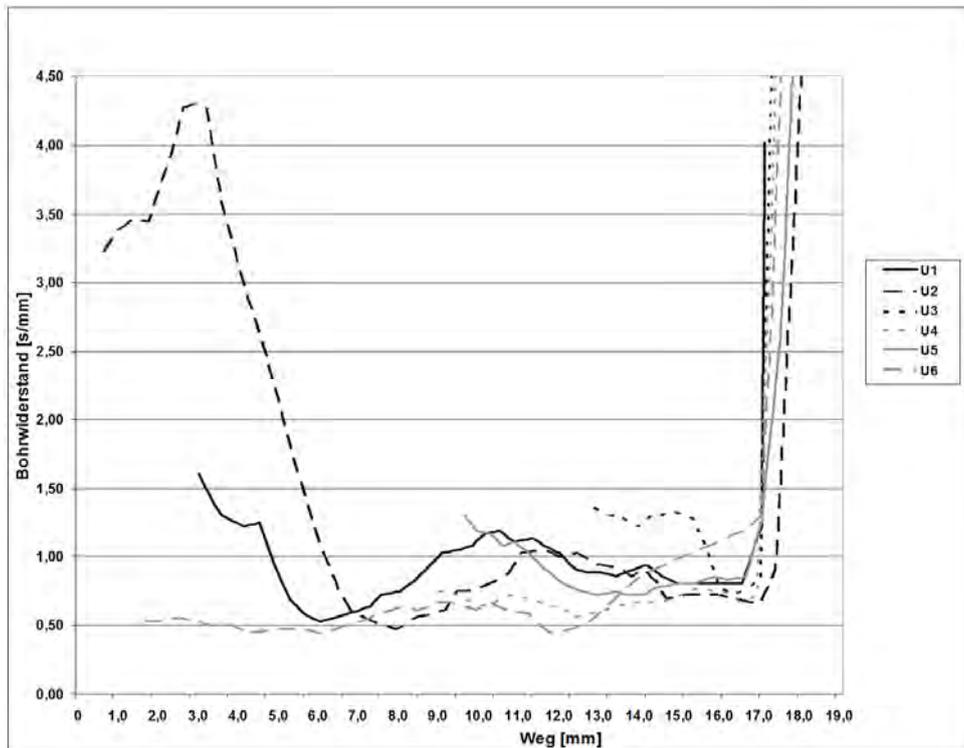


Abb.31: Leuben, Schloss, Raum 012, Ostwand Mittelteil, Sockelbereich - Lokalisierung der Referenzmessungen in unbehandelten Referenzbereichen (U1 bis U6 Bohrwiderstandsmessungen, U7 bis U9 „Peelingtests“)

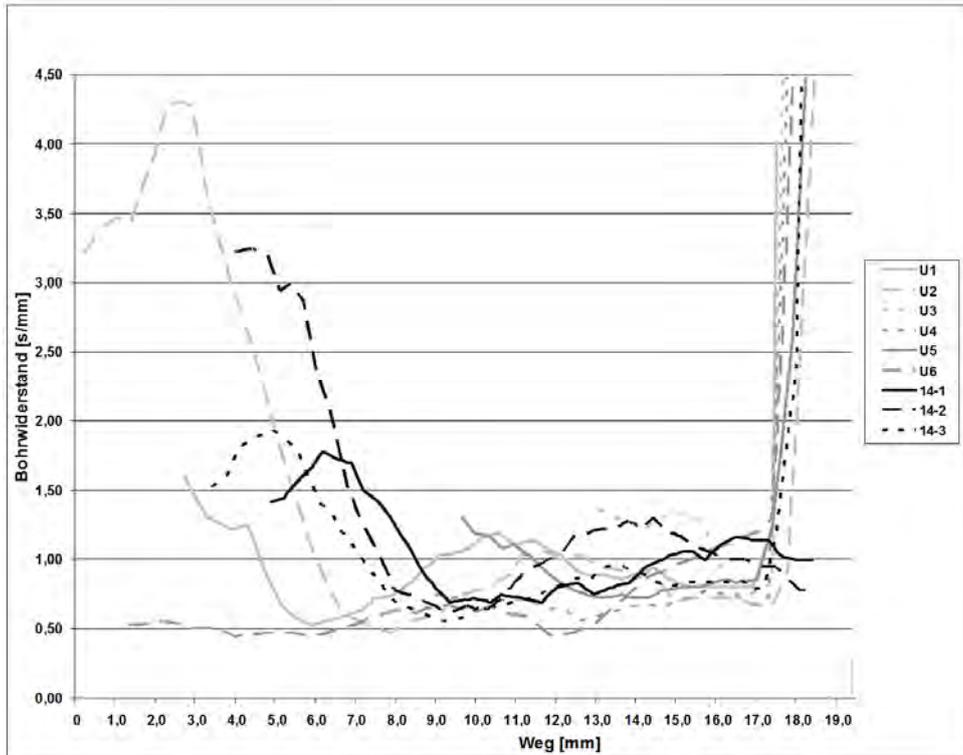


Graph.21: Schloss Leuben, Raum 012, Ostwand, Sockelzone - Bohrwiderstandmessung an unbehandelten Referenzflächen

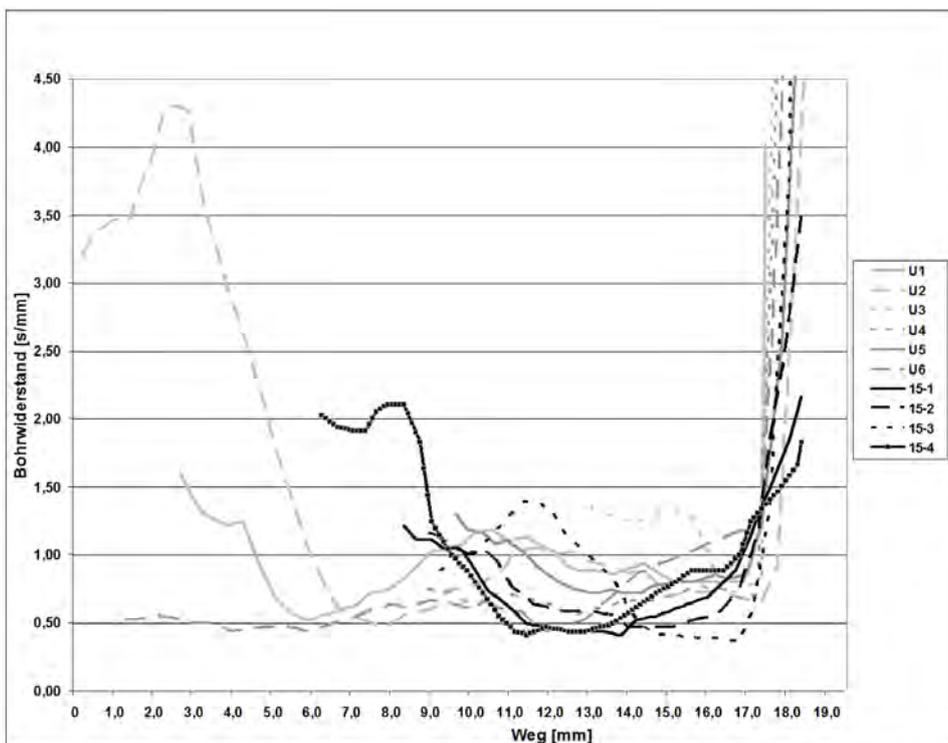
Die Messungen an ungefestigtem Material zeigten, dass sich im Vorzustand unter der Absandungszone des Putzmörtels teilweise eine dünne, feste Schicht befindet (Graphik 21, Messpunkt U1 und vor allem U2), unter welcher sich der Mörtel bis zum Träger sehr gefügeschwach darstellt.

10 Probeanwendung an Objekten

Für die behandelten Testflächen 14 und 15 war keine erkennbare Festigkeitsveränderung anhand der Bohrwiderstandsmessung festzustellen, die Festigkeitsprofile entsprechen dem unbehandelten Mörtel (Graphiken 22, 23).

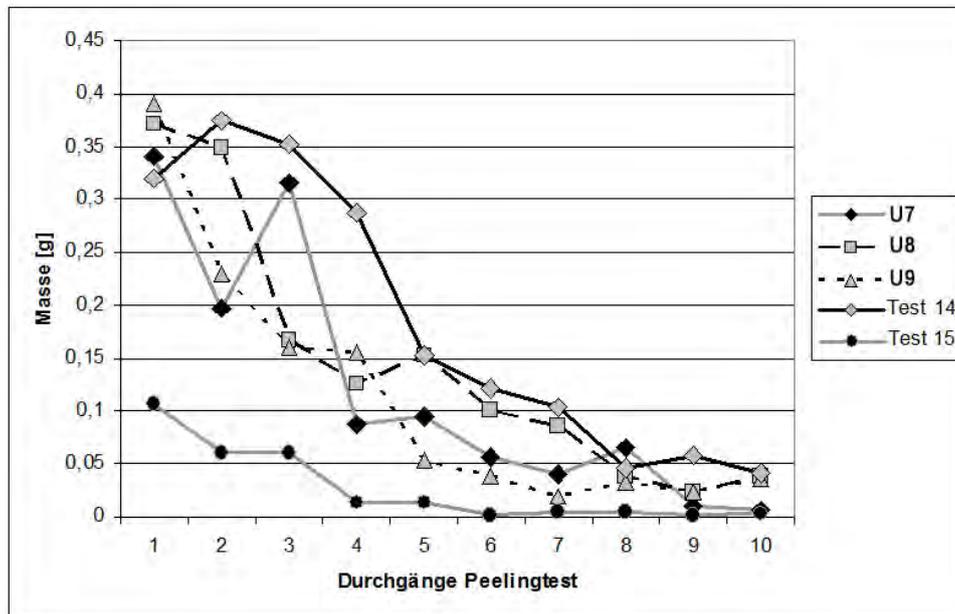


Graph.22: Schloss Leuben, Raum 012, Ostwand - Bohrwiderstandsmessung im Bereich der Musterfläche an Testfläche 14 im Vergleich zu unbehandelten Referenzflächen



Graph.23: Schloss Leuben, Raum 012, Ostwand - Bohrwiderstandsmessung im Bereich der Musterfläche an Testfläche 15 im Vergleich zu unbehandelten Referenzflächen

„Peelingtests“ erfolgten an den Probeflächen 14 und 15, sowie zum Vergleich an drei unterschiedlich positionierten ungefestigten Bereichen (Abbildung 31).



Graph.24: Leuben, Schloss, Raum 012, Ostwand – Ergebnisse von „Peelingtests“ an Putzflächen ohne Malschicht: Masse abgerissenen Materials bei jeweils 10 Testdurchgängen an Testflächen 14 und 15 im Bereich der Musterkonservierung sowie an unbehandelten Flächen (U7 bis U9)

Wie schon bei der manuellen Prüfung festgestellt, war nach einer dreimaligen Behandlung mit verdünnter Nanodispersion [E12,5] und Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel (Tabelle 14, Test Nr. 14) noch keine Festigkeitszunahme zu beobachten. Der Materialabtrag während der zehn Abzugsproben mit Klebeband entwickelte sich ähnlich den Prüfungen am unbehandelten Material (Graphik 24, Prüfungen U7 bis U9), es lag lediglich eine etwas höhere Oberflächenfestigkeit vor.

Nach einer sechsmaligen Festigung mit verdünnter Nanodispersion [NP12,5] und Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel ist dann aber durch den „Peelingtest“ eine erhebliche Festigkeitszunahme festzustellen (Test Nr. 15). Eine Überfestigung der Oberfläche scheint nicht vorzuliegen. Die Ergebnisse der „Peelingtests“ sind in Protokoll Nr. 13-02 dokumentiert.³¹⁰

Bei den Musterbehandlungen zur Malschichtfestigung ist an allen Probeflächen eine deutliche und als ausreichend eingeschätzte Verfestigung von vollkommen fragilen Schichten über gefügestörtem Träger erreicht worden. Auch der Putzgrund wurde mit stabilisiert, nur im besonderen Fall erscheint Vorfestigung erforderlich (Test Nr. 31).

Problematisch stellte sich die nicht vermeidbare Verunreinigung der Malschichtoberflächen mit dem Festigungsmittel dar, was schon bei geringsten Mengen zu einer erheblichen Weißschleierbildung führte. Die Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel (Tets Nr. 32, 33) ist aufwendig aber wirksam. Eine Vorimprägnierung der Malschichtoberflächen mit Cellulose (Test Nr.33) brachte keine Verbesserung.

³¹⁰ Siehe Anhang A, S. 285

Die Niederlegung von Abhebungen ist in der Regel möglich, sehr kleinteilige Abhebungen legen sich durch den Saugeffekt nach der Festigung selbst nieder. Größere, in sich instabile Schollen müssen zuerst vorgefestigt werden.

Bewertung

Die Ergebnisse der Testreihe zur Gefügefestigung zeigen, dass die meisten Festigungsversuche mit unmodifizierten sowie modifizierten Nanodispersionen bereits nach einer Behandlung Weißschleier verschiedener Stärke hervorrufen können. Die sichtbare Anreicherung der eingebrachten Feststoffe an der Materialoberfläche ist ein Hinweis auf ungenügende Tiefenverteilung, die entsprechenden Methoden kommen für eine Anwendung an diesem Objekt nicht in Betracht.

Die Materialfeuchte hat Einfluss auf das Eindringverhalten und muss daher bei der Interpretation der Ergebnisse Berücksichtigung finden. Der Versuch der Vortrocknung mit Infrarotbestrahlung hat keine Verbesserung herbeiführen können, obwohl eine Verringerung der mit dem Feuchtemessgerät erfassten Werte vorlag (Test Nr. 3). Das kann als Hinweis interpretiert werden, dass möglicherweise gelöste Salze einen größeren Einfluss auf die Festigung haben als das vorhandene Wasser. Durch die Trocknung hat sich lediglich der Sättigungsgrad der Salzlösung erhöht.

Es ist festzustellen, dass Weißschleierbildung bei nahezu allen durchgeführten Variationen auftrat. Auch die im Labor vielversprechend erprobten bimodalen Dispersionen zeigten eine Tendenz der oberflächigen Feststoffanreicherung. Das Festigungspotenzial einer einmaligen Behandlung ist bei allen eingesetzten Materialien gering.

Nur zwei Methoden haben auch bei relativ hohen Werten der Feuchtigkeitsmessung keine oder nur sehr geringe Aufhellung der Oberfläche sogar bei mehrfacher Anwendung bewirkt: die Anwendung von Verdünnungen mit Gel-Nachbehandlung sowie die „aufbauende Festigung“ mit Gel-Nachbehandlung (Tests Nr. 14, 15, 17).

Für die Malschichtfestigung scheinen die entwickelten Modifikationen sehr wirkungsvoll zu sein, auch die Niederlegung von aufgewölbten Malschichtschollen war ohne Verlust möglich. Die Praktikabilität war an größeren Flächen zu überprüfen.

10.3.6 Musterkonservierung

Zielstellung

Die exemplarische Umsetzung von Konservierungsmaßnahmen an einem größeren Flächenbereich sollte einerseits der Überprüfung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse dienen, andererseits weitere Konservierungsaufgaben beinhalten; die Anböschung, Fehlstellenkittung und die Hinterfüllung abgelöster Putzflächen.

Die Maßnahmen erfolgten an einem etwa 0,45 x 0,70 m großen Feld in linken unteren Bereich der Musterfläche (Abbildung 32).

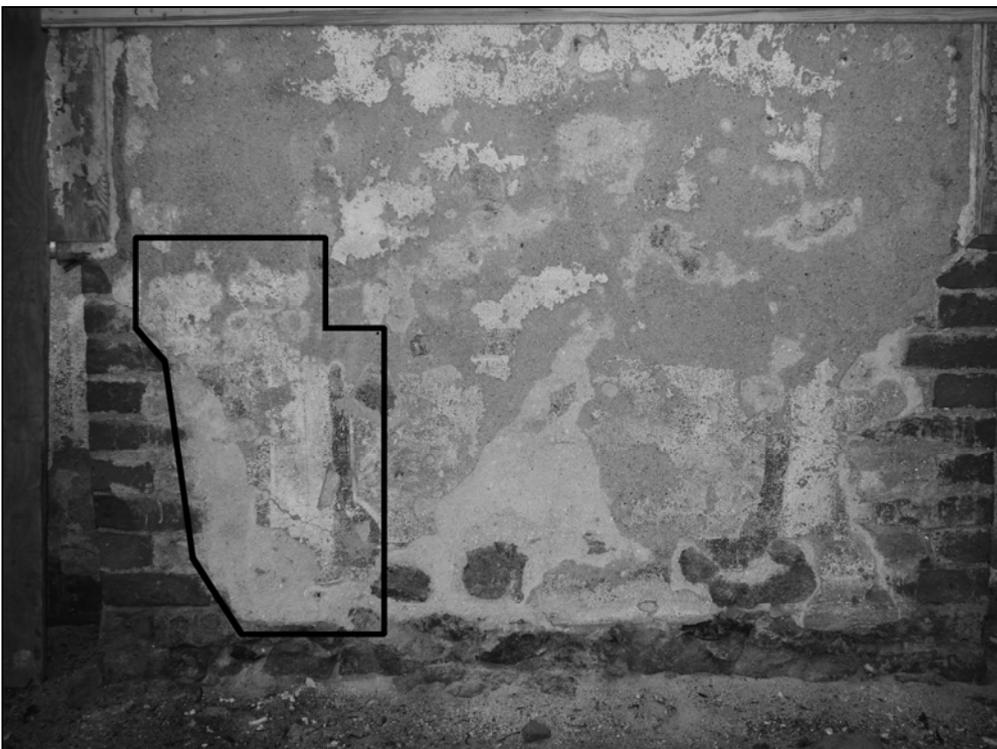


Abb.32: Leuben, Schloss, Raum 012, Ostwand, Mittlerer Wandabschnitt, Sockelzone - Bereich der Musterkonservierung

Vorzustand

Die Fläche beinhaltet auf etwa 50% noch erhaltene Malschicht, auf etwa 15% der Fläche ist sämtlicher Putzbestand verloren gegangen.

Die offen liegenden Putzflächen wiesen geringe Festigkeit auf und sandeten ab.

Die Malschichtflächen zeigten sich akut verlustbedroht, Ablösungen waren vor allem im oberen Musterflächenbereich großflächig festzustellen, in den Randbereichen betrug die Spaltöffnungen zum Träger bis zu zwei Millimeter Weite. Viele Bereiche erwiesen sich erst beim Abtasten hohl liegend. In den geschlossenen Malschichtflächen waren stellenweise kleinteilige Abhebungen und verschiedene Ausbrüche unterschiedlicher Dimension entstanden, die bis in die unterliegende Putzschicht und teilweise bis auf das Mauerwerk reichten. Spaltrisse mit bis zu 1 mm Öffnungsweite zeigten sich vor allem im unteren Bereich der Musterfläche,

sie reichten wenigstens bis in die Putzschicht. Ausgehend vom unteren Rand der erhaltenen Putzfläche war diese vom Träger gelöst und lag hohl. Die Hohlstelle erstreckte sich über ca. 300 cm², der Spalt zwischen Träger und Putz betrug bis zu 2 cm Weite. Die Verluste und Schäden wurden in Kartierungen graphisch dokumentiert.³¹¹

Erforderliche Maßnahmen

Konservierende Behandlungen dienten der unmittelbaren Substanzrettung. Maßnahmen zur Gefügefestigung des Putzmörtels waren am gesamten frei liegenden Putzbestand sowie unter den in Ablösung befindlichen Malschichtflächen dringend erforderlich. Der abgelöste Putzbereich drohte abzufallen und bedurfte der Hinterfüllung zur stabilen Wiederbefestigung am Träger, auch die Spaltrisse waren zu verfüllen.

An den erhaltenen Malschichten musste großflächig eine Wiederanbindung an den Putz erreicht werden. Die hohl liegenden Malschichtträger waren zu sichern. Die in Vielzahl vorhandenen kleinteiligen Ablösungen waren gegebenenfalls anzulegen und zu festigen.

Über die konservatorischen Maßnahmen zur Bestandserhaltung hinaus sollten Fehlstellenkittungen als restauratorische Maßnahmen erfolgen. Durch die Schließung lokaler Putzfehlstellen und die Kittung von Ausbrüchen in den Malschichtflächen sollte der verbliebene Bestand zusätzlich gesichert werden.

Putz

- Gefügefestigung
- Randsicherung (Anböschung) bedrohter Bereiche
- Hinterfüllung hohl liegender Bereiche
- Rissverfüllung
- Kittung lokaler Fehlstellen

Malschichten

- Festigung von dünnlagigen Ablösungen ohne Verformung
- Anlegen und Festigen verformter Ablösungen und Ränder
- Hinterfüllung hohl liegender Bereiche
- Kittung von Rissen und kleinere Fehlstellen

Methodenauswahl

Für die Gefügefestigung der Putzflächen ohne Malschicht wurde unter den am Objekt vorher erprobten Methoden und Mitteln die bimodale Dispersion mit der geringsten visuell wahrnehmbaren Veränderung ausgewählt:

[NP40] + CaLoSiL[®] mikro (100+1 m/m) (Tabelle 14, S. 152, Nr. 19)

Für die Hinterfüllung abgelöster Malschichtbereiche fand eine in den Vorproben bewährte Modifikation Anwendung (Tabelle 15, S. 153, Nr. 32):

100 Vol% [CaLoSiL[®]E50 + CaLoSiL[®] mikro (2+1 V/V)]
+ 20 Vol% [0,5 Ma% Klucel[®] G in Ethanol+Wasser (3+1 V/V)].

³¹¹ Siehe Anhang A, S.297ff.

Für die Anböschung der Putz- und Malschichtträger sind Kittmörtel auf der Bindemittelbasis alkoholische Calciumcarbonat- Dispersionen erprobt worden (Tabelle 17). Kleine Mengen der Kittmörtel wurden an einer Abbruchkante des Putzes probeweise angetragen und nach der Aushärtung die Schwundrissneigung visuell eingeschätzt sowie die Haftfestigkeit manuell geprüft. Neben der Variation der Bindemittelmischung ist die Wirkung einer Vornetzung mit Ethanol erprobt worden. Als Füllstoff diente Champagner Kreide. Die Kittmasse mit den besten Eigenschaften wurde schließlich durch die Beimischung von Erdpigmenten farblich dem Putzmörtel angeglichen, die überprüften Eigenschaften änderten sich dadurch nicht. Es fanden Umbra natur, Terra di Siena sowie Grüne Erde Anwendung (Bezug von Kremer Pigmente GmbH & Co. KG).

Nr.	Bindemittel	Mischung (V/V)	Füllstoffe	Bindemittel- Zuschlag- Verhältnis (m/m)	Vor- netzung Ethanol	Schwund- rissbildung	Haft- festigkeit
1a	E25+mikro	1,0+2,0	ChK	1,0+3,0	ja	o	o
1b					nein	o	-
2a	mikro		ChK	1,0 + 2,0	ja	-	+
2b					nein	o	-
3a	E50+mikro	1,0+2,0	ChK	1,0 + 3,0	ja	o	o
3b					nein	+	-
4a	mikro		ChK	1,0 + 2,0	ja	+	+
4b					nein	+	o
5a	mikro		ChK+P	1,0+(1,5+0,5)	ja	+	+
5b					nein	+	o
E25 ... CaLoSiL®E25 ChK ... Champagner Kreide - stark - gering E50 ... CaLoSiL®E50 P ... Erdpigmente o gering o mäßig mikro ... CaLoSiL®mikro + keine + gut							

Tab.17: Leuben, Schloss, Raum 012, Ostwand - Vorproben zu Kittmischungen und Ergebnisse

Die Kittmischung aus CaLoSiL® mikro und Kreide zeigte bei Anwendung einer Vornetzung mit Ethanol gute Eigenschaften (Tabelle 17, Kitt Nr. 4). Für die Anwendung an der Musterfläche war der Kitt entsprechend einzufärben. Die Zumischung von Erdpigmenten bewirkte keine negativen Veränderungen (Kitt Nr. 5).

Für die Ergänzung von über 1 cm tiefen, lokalen Putzfehlstellen sollte ein Mörtel aus und mit Erdpigmenten eingefärbtem Sandzuschlag erprobt werden:

20 Ma% CaLoSiL® mikro + 80 Ma% Quarzsand (0,04...1,0 mm)
(Pigmentanteil im Zuschlag 0,013 Ma%)

Für Ergänzungsmörtel mit Sandzuschlägen sind keine systematischen Vorproben durchgeführt worden, die hier unternommene praktische Erprobung stellte einen Pilotversuch dar.

Für die Putzhinterfüllung waren Hinterfüllmörtel auf der Basis der alkoholischen Calciumcarbonat-Dispersionen anzuwenden. Anhand der Ergebnisse der Vorversuche im Labor wurde hierfür der Injektionsmörtel H29 (Abschnitt 9.5.3, Tabelle 09, S. 109) ausgewählt:

CaLoSiL®E50 + CaLoSiL®mikro + Champagner Kreide + Scotchlite™S22
+Scotchlite™K1
Mischungsverhältnis (Massenteile): 6,0 + 6,0 + 0,72 + 0,16 + 0,12

Prüfmethoden

Die Veränderung der optischen Erscheinung durch Schleierbildung nach den Gefüge- und Malschichtfestigungen wurde visuell eingeschätzt. Die Prüfung der erreichten Festigungswirkung von Konsolidierungen und Kittungen erfolgte durch manuelle Prüfung. Die Festigung des Putzes ohne Malschicht ist außerdem mit vier Bohrwiderstandsmessungen und zwei „Peelingtests“ überprüft worden (Methodenbeschreibung Abschnitt 10.2.5, S. 129f. bzw. Abschnitt 10.2.6, S. 138f.).

Im Bereich der Putzhinterfüllung wurde eine manuelle Percussionsuntersuchung durchgeführt, eine Bohrwiderstandsmessung sollte das Festigkeitsprofil im behandelten Bereich nachweisen.

Durchführung

Die Gefügefestigung der Putzflächen ohne Malschicht mit bimodaler Dispersion erfolgte durch Flutung mit der Pipette. An einigen Flächen wurde eine zusätzliche Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel erprobt. Unmittelbar nach der Festigung erfolgte hier eine einmalige Flutung mit 0,5 Ma% Klucel®G in n-Propanol. Die Festigung wurde nach einer Woche in gleicher Weise wiederholt. Die klimatischen Bedingungen während der Bearbeitungen waren 11 - 19°C und 54 - 58 % rF.

Alle in Ablösung befindlichen bzw. hohl liegenden Malschichtbereiche wurden per Injektage mit der modifizierten Dispersionsmischung behandelt. Das Festigungsmittel wurde seitlich an den Abbruchkanten der Malschichtfragmente sowie durch Risse und Ausbrüche eingebracht. Jede Applikation erfolgte in mehreren Schritten, indem das jeweils frisch hergestellte Mittel zunächst bis zur Sättigung injiziert und nach dem Eindringen sofort erneut eingebracht wurde. Dies wurde so oft wiederholt, bis kurzfristig kein Mitteleintrag mehr möglich war. Da in der Folgezeit weiteres Eindringen festzustellen war, ist die Behandlung im Abstand von jeweils einer Woche bis zu einer endgültigen Sättigung wiederholt worden. Hierzu erwiesen sich vier bis sechs Applikationsgänge erforderlich (Abbildungen 33 bis 35).

An dünnlagig abgelösten Malschichten war eine Applikation nur über winzige Ausbrüche möglich. Hier erwies sich das ausgewählte Festigungsmittel oft als zu viskos, um alle Bereiche der oft mehrere Quadratzentimeter großen Ablösungen zu erreichen. In diesen Fällen erfolgte die Injektion einer bimodalen Dispersion ohne Gelzusatz:

CaLoSiL® E25 + CaLoSiL® mikro (100+1 m/m).

Für die Anböschung der Putz- und Malschichtränder fand die nach den Vorproben ausgewählte Kittmischung aus CaLoSiL® mikro und der Kreide-Pigment-Mischung Verwendung (Tabelle 17, Kitt Nr. 5). Vor dem Antragen erfolgte eine Vornetzung mit Ethanol (Sprühverfahren). Das Material erwies sich gut verarbeitbar und konnte wegen des feinteiligen Zuschlags auch in kleinster Dimension angewendet werden.

Der erprobte wasserfreie Ergänzungsmörtel mit Sandzuschlag für Putzergänzungen wies eine Konsistenz ohne spürbare Klebkraft auf („schlammartig“) und haftete trotz Vornetzens mit Ethanol nicht sonderlich gut.

Es wurden zunächst die tieferen Fehlstellenbereiche bis etwa 3 – 4 mm unter der Putzoberfläche geschlossen. Die Deckschicht wurde mit Erdpigmenten entsprechend der Farbigkeit des originalen Materials eingefärbt. Die Applikation der Deckschicht erfolgte nass-in-nass.



Abb. 33, 34, 35: Leuben, Schloss, Raum 012, Ostwand, Bereich Musterkonservierung: Behandlung abgelöster Malschicht, Detail vor (links), während (Mitte) und nach (rechts) der Behandlung

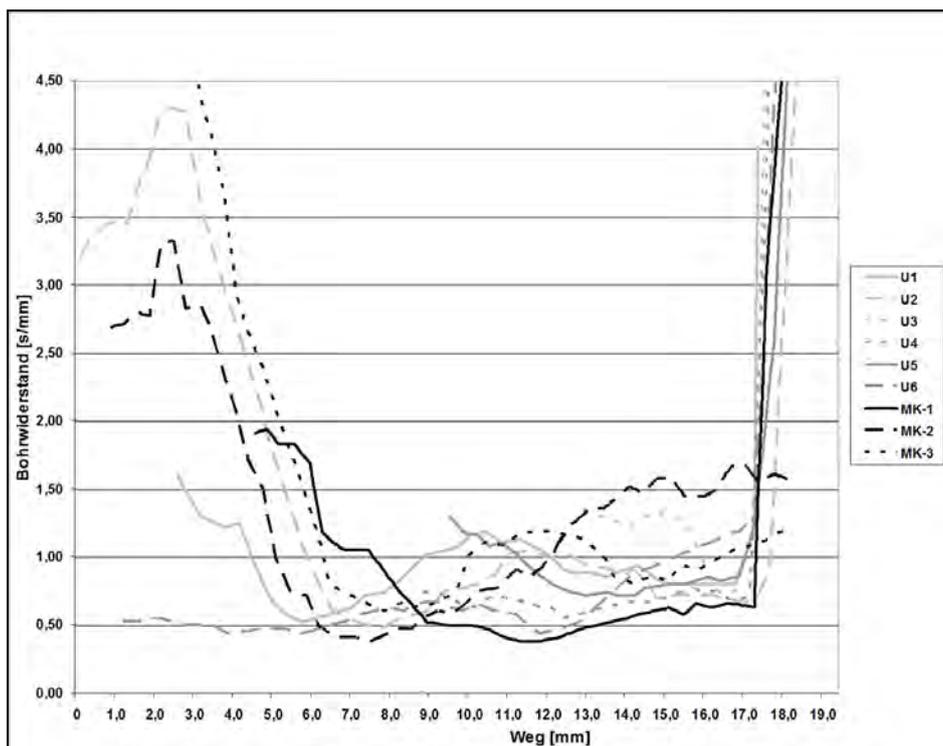
An der großflächigen Putzablösung im unteren Musterflächenbereich mussten zuerst alle Ränder geschlossen werden. Hierzu sind Anböschungen mit dem verwendeten Kittmörtel hergestellt worden (Tabelle 17, Kitt Nr. 5). Injektionsöffnungen waren hierbei zu belassen. Der Hinterfüllmörtel wurde jeweils unmittelbar vor seiner Verwendung frisch hergestellt. Die Applikation erfolgte per Injektion mit Spritzen. Für die Behandlung der etwa 300 cm² großen Fläche waren insgesamt sechs Arbeitsgänge erforderlich, zwischen denen jeweils wenigstens eine Woche Wartezeit eingehalten wurde.

Ergebnisse

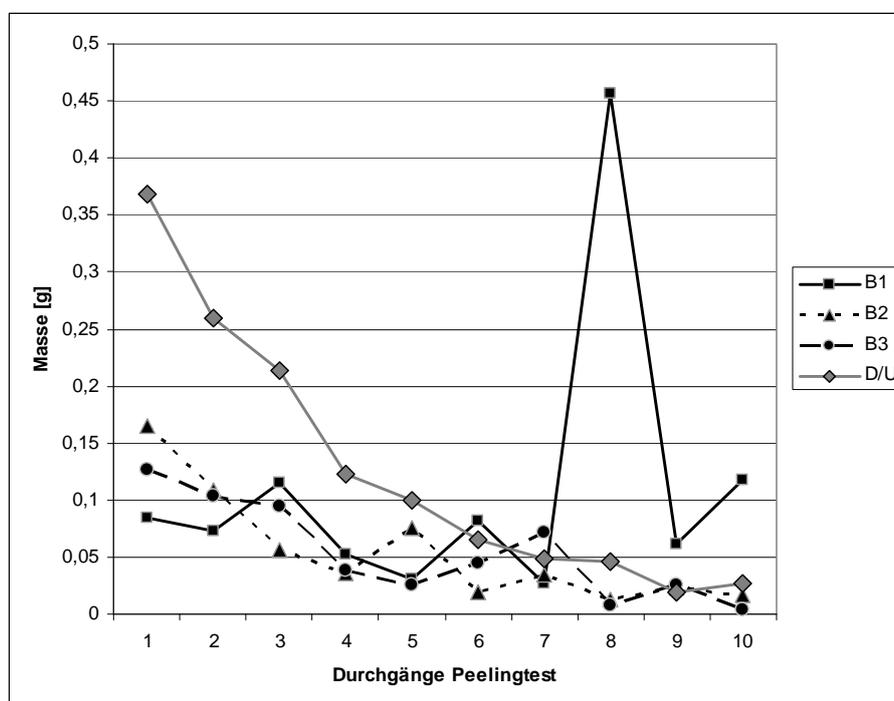
Die manuelle Prüfung erwies auf den gefestigten Putzflächen ohne Malschicht eine spürbare Festigkeitszunahme. Absandung war nicht mehr festzustellen, der Mörtel ist aber immer noch recht schwach gebunden. Gleichzeitig traten bereits nach zwei Behandlungen auf einigen Flächenbereichen Weißschleier auf, weshalb von weiteren Applikationen abgesehen wurde. Mit den im Bereich der Musterkonservierung von der Firma Geotron Elektronik durchgeführten Bohrwiderstandsmessungen konnten keine positiven Veränderungen des Festigkeitsprofils der Putzschicht nachgewiesen werden (Messdaten in Protokoll 12-02)³¹².

Die „Peelingtests“ am Putz ohne Malschicht haben zumindest für die oberflächennahen Bereiche einen deutlichen Festigkeitszuwachs durch die Behandlung mit bimodalen Dispersionen und Nachbehandlung mit Lösungsmittelgelen nachweisen können (Ergebnisse Graphik 26).

³¹² Siehe Anhang A, S. 272f.



Graph.25: Schloss Leuben, Raum 012, Ostwand - Bohr widerstandmessung im Bereich der Musterkonservierung im Vergleich zu unbehandelten Referenzflächen



Graph.26: Leuben, Schloss, Raum 012, Ostwand – Ergebnisse der „Peelingtests“ an Bereichen ohne Malschicht, Masse abgerissenen Materials bei jeweils 10 Durchgängen an behandelten Flächen im Bereich der Musterkonservierung (B1 bis B3) sowie an unbehandelten Flächen (D/U - Durchschnittswert der Messungen U7 bis U9 aus Graphik 24)

Der hohe Einzelwert beim achten Test an der Fläche B2 wurde durch den Abriss einer Putzscholle durch das Klebeband verursacht. Eine erhöhte Oberflächigkeit war an allen drei gefestigten Flächen nicht festzustellen.

Die Ergebnisse der „Peelingtests“ sind in Protokoll 13-02 dargestellt.³¹³

Für die Malschichtfestigungen waren in allen Fällen durch die manuelle Prüfung sehr gute Ergebnisse festzustellen. Die vordem akut verlustgefährdete Substanz konnte in hohem Maße stabilisiert werden.

Die Abreinigung von unvermeidbaren Oberflächenauflagerungen an Festigungsmittel während der Bearbeitung erwies sich ebenfalls erfolgreich. Es verblieben keinerlei Schleier auf den Malschichten.

Mittels Percussionsuntersuchung im Bereich der Putzhinterfüllung konnte nachgewiesen werden, dass die Hohlstellen vollständig verfüllt sind. Nach manueller Prüfung besteht keine unmittelbare Verlustgefahr mehr. Bei der Bohrwiderstandsmessung verkantete sich der Prüfbohrer, so dass die dünne Putzscholle in diesem Bereich (etwa 20 cm²) vom Hinterfüllmörtel abgerissen wurde.

Einerseits konnte hierdurch noch einmal bestätigt werden, dass die Injektionsmasse die Hohlstelle tatsächlich vollumfänglich verfüllt hatte. Andererseits muss gefolgert werden, dass die Haftfestigkeit des Hinterfüllmörtels am anzubindenden Putz wohl recht gering war. Auch die Druckfestigkeit der Hinterfüllung erwies sich nach manueller Prüfung als äußerst schwach.

Die Kittungen mit Kreidezuschlag sind zwar nach manueller Prüfung stabil, kreideten aber teilweise oberflächlich leicht ab. Optisch sind sie durch die Einfärbung nicht augenfällig.

Die Putzergänzungen erwiesen sich nach der Aushärtung sehr bindungsschwach und sandeten oberflächlich und randlich ab. Eine Nachfestigung mit CaLoSiL[®]E50 + CaLoSiL[®]mikro (100+1 m/m) konnte die Stabilität erhöhen, doch ist die Festigkeit nach manueller Prüfung bei Weitem nicht mit üblichen Ergänzungsmörteln auf Kalkbasis vergleichbar.

Bewertung

Eine wirkungsvolle Gefügefestigung von Mörteln war selbst nach umfassenden Vorproben in Labor und am Objekt nicht umsetzbar. Schleierbildung weist auf unzureichende Tiefenverteilung hin. Die Mittel sind in jedweder Modifizierung in dieser Hinsicht sehr sensibel, die heterogenen Bedingungen am Objekt erwiesen sich praktisch nicht kalkulierbar. Festigungswirkung an gefügeschwachen Mörteln kann erreicht werden, doch scheint sie mit einer praktikablen Anzahl von Behandlungen nicht ausreichend zu erreichen zu sein.

Die Möglichkeiten der Malschichtfestigung erscheinen hingegen vielversprechend. Hier sind weniger hohe Festigkeiten erforderlich. Der Vorzug der Mittel besteht in ihrer Modifizierbarkeit, die eine Abstimmung hinsichtlich des Eindringverhaltens ermöglicht und damit eine Konservierung von Schäden unterschiedlicher Dimension im gleichen System ermöglicht.

³¹³ Anhang A, S. 285

Niederlegung von Schollen und Hinterfüllung von nur um Millimeterbruchteile abgelösten Schichten ist mit bestem Erfolg durchführbar.

Die Behandlung ist jedoch zeitaufwändig. Jeder Applikation muss eine Ausreaktionszeit folgen, nach welcher der weitere Festigungsbedarf erst deutlich wird.

Die Hinterfüllung von Putzen mit praktisch wasserfreien Injektionsmörteln auf der Basis der Calciumhydroxid-Dispersionen zeigte sich zwar praktisch gut ausführbar, doch wird offenbar eher eine Ausfüllung von Hohlräumen als eine kraftschlüssige, nachhaltig stabile Wiederanbindung erreicht.



Abb.36: Schloss Leuben, Raum 012, Ostwand, mittlerer Wandbereich, Sockelzone: Musterfläche nach der Beendigung der Konservierungsmaßnahmen

10.4 Schloss Dahlen: Weißer Saal, Westwand

10.4.1 Voruntersuchungen

Lokalisierung und Beschreibung

Der so genannte Weiße Saal befindet sich in zentraler Lage im Erdgeschoss des Mittelflügels des Schlosses Dahlen. Der etwa 8,55 m x 8,55 m x 4,50 m große Raum liegt in der Quermittelachse auf der Parkseite (Ostseite). Er besitzt im aktuellen Zustand keinen Bodenbelag und keine Öffnungsverschlüsse.

Westlich ist dem Weißen Saal ein Vestibül vorgelagert. Die Zugangstür befindet sich in der Mittelachse beider Räume und mithin des gesamten Gebäudes. Die Ostwand ist Außenwand mit mittig angeordneter Korbogennische mit großer Türöffnung zum Schlosspark sowie beidseitig jeweils einer Korbogennische mit über zurückgesetzter Brüstung liegender großer stichbogiger Fensteröffnung.

Rechteckige Türöffnungen befinden sich im jeweils östlichen Randbereich beider Seitenwände. Im Norden schließt hier ein nur wenig kleinerer Raum (ehemals „*Damenzimmer*“³¹⁴) an, im Süden ein relativ schmaler, gangartiger Flur (ehemals „*Galerie zum Arbeitszimmer*“). In der südwestlichen und nordwestlichen Raumecke ist die Wand eingezogen und jeweils ein Kamin platziert.

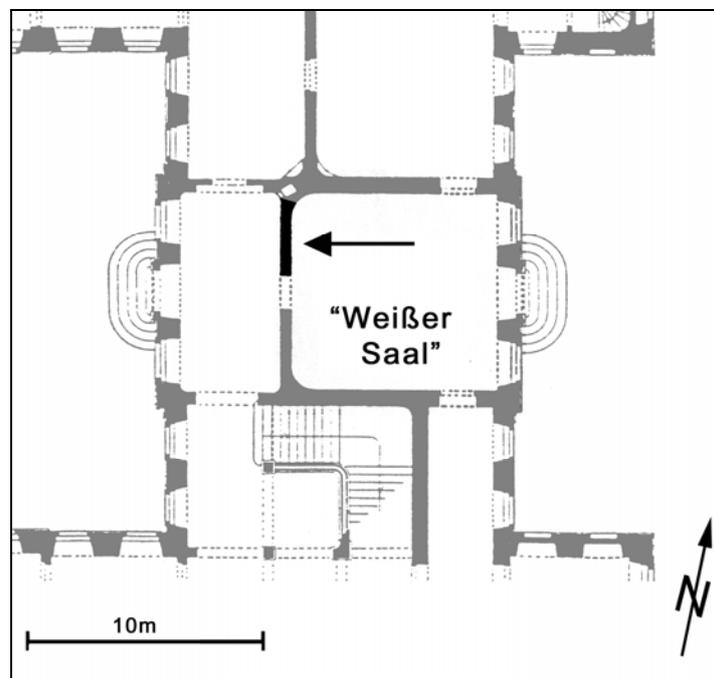


Abb.37: Schloss Dahlen, Detail Grundriss Erdgeschoss mit Lokalisierung des Untersuchungsbereiches im Weißen Saal (unter Verwendung der Fig. 100 aus GURLITT (1905), S.92)

³¹⁴ Historische Raumbezeichnungen nach GURLITT (1905), S. 89

Die heutige ziegelsichtige Decke wurde in jüngster Zeit eingebracht und ist völlig eben. An den Wandflächen sind Reste der einstigen Stuckverzierung erhalten. Die Wände waren in alternierend breite und schmale Felder geteilt, die jeweils über niederen Sockelfeldern (Höhe ca. 0,80 m) bis zum früheren Kranzgesims unter der Voutendecke reichten. Die Begrenzung der Felder bildeten schmale Profilrahmungen. Auf den großen Flächen befanden sich erhabene Reliefdarstellungen mit *„Emblemen der Künste und Wissenschaften, die von Kindern gehalten werden“*³¹⁵. Über den Türöffnungen waren Supraporten mit reliefierten Ruinenlandschaften gestaltet.

Der Untersuchungsbereich befindet sich auf der Westwand, rechts (nördlich) der Tür zum Vestibül (Abbildungen 37, 38).



Abb.38: Schloss Dahlen, Weißer Saal, Westwand mit Lokalisierung des Untersuchungsbereiches

Ergänzungen und Veränderungen

Baustrukturell ist der Weiße Saal nie verändert worden. Die Stuckaturen haben sich schon vor dem Brandereignis in einem handlungsbedürftigen Zustand befunden. In einer wahrscheinlich 1960 erstellten Aktennotiz von MAGIRIUS heißt es: *„Auch der Weiße Saal und der Kaisersaal befinden sich in schlechtem Zustand und werden nicht ihrer Bedeutung entsprechend genutzt“*. Der Brand 1973 hat den Raum nicht unmittelbar geschädigt. Allerdings ist die ursprünglich vor-

³¹⁵ Nach GURLITT (1905), S. 90

handene, von OESER bemalte Decke durch Löschwasser stark in Mitleidenschaft gezogen worden.³¹⁶ Wann sie schließlich einstürzte oder abgerissen wurde, ist nicht bekannt.

Die Stuckzier hat schon bald nach der Brandkatastrophe erheblichen Schaden genommen. 1980 wird berichtet, „daß die Verwitterung inzwischen sehr weit fortgeschritten ist. Die äußere Schicht der Figuren und der meisten Ornamente ist durch Ausblühungen völlig zerrieben und morbid, so daß von der ursprünglichen Form nichts mehr vorhanden ist.“³¹⁷ Daher erfolgte 1980 durch den VEB Denkmalpflege Leipzig eine Bergung aller hierfür noch ausreichend stabil befundenen Stuckaturen. Die 23 Stücke wurden in Schloss Hubertusburg eingelagert.³¹⁸ Sie befinden sich heute noch immer dort sowie teilweise im Heimatmuseum Dahlen. Seit 1973 reduzierte sich der Stuck- und Unterputzbestand durch die anhaltenden Verwitterungsprozesse erheblich. Im Zuge der Deckenerneuerung nach 1994 sind offenbar zumindest im Bereich des Kranzgesimses nochmals erhebliche Verluste entstanden. Mit Sicherheit wurde der fortschreitende Materialverlust an den Wänden durch die nun beginnende Austrocknung nochmals beschleunigt.

Auch die Öffnungsverschlüsse und der Fußbodenbelag wurden während der etwa zwanzig Jahre langen Verwahrlosung allmählich zerstört, die Reste wurden im Zuge der Notsicherungs- und Instandsetzungsmaßnahmen nach 1994 entfernt.

Konstruktion, Materialien, Herstellungstechnik

Das Mauerwerk aller Wände ist eine Kombination von Ziegelmauerwerk für die Bögen, eingezogene Kanten sowie Türlaibungen und einem Mischmauerwerk, überwiegend aus hammerrechten Bruchsteinen sowie wenigen Ziegeln und Sandsteinen. Der Versatzmörtel wurde nicht untersucht.

Auf allen Wandflächen liegt ein Unterputz, der in Einzelflächen entsprechend der vorgesehenen Felderteilung aufgebracht wurde. In bis zu drei Lagen wurden die Niveaus vorgeformt sowie ein Unterbau für die plastischen Stuckaturen vormodelliert. Hierbei sind schmiedeeiserne Armierungen (vor allem Nägel und entsprechend gebogene Rundeisen) verwendet worden.

Auf dem Unterputz-Kern liegen die Feinstuckschichten und Stuckmarmorflächen. Die Profile wurden teilweise vor Ort gezogen, teilweise vorgefertigt und appliziert. Die Reliefs sind frei modelliert, die Fondflächen geglättet und vermutlich überschliffen. Die Oberflächen waren wenigstens teilweise poliert.

³¹⁶ Laut einem Bericht des Instituts für Denkmalpflege vom 22.03.1973. In: Akten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachen, Objektakte Schloss Dahlen

³¹⁷ Brief des Restaurators Thiele an Dr. Magirius vom Institut für Denkmalpflege vom 26.07.1980. In: Akten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachen, Objektakte Schloss Dahlen

³¹⁸ Laut Brief des VEB Denkmalpflege Leipzig an das Institut für Denkmalpflege Dresden vom 18.11.1980. In: Akten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachen, Objektakte Schloss Dahlen

Ergebnisse von Materialuntersuchungen

Die Mörtelanalysen wurden im Archäometrischen Labor der HfBK Dresden durch Dr. S. Hoblyn sowie durch T. Köberle durchgeführt, die Ergebnisprotokolle befinden sich im Anhang.³¹⁹

Unterputz

Zusammensetzung:

Bindemittel Gips mit sehr geringem Anteil an dolomitischem Kalk
quarzitische Zuschläge und Steinpartikel (Granit und Sandstein) sowie Holzkohle, gut sortiert, Größtkorn ca. 2,0 mm

Gefüge:

partikelgestützt, Matrix-Partikel-Verhältnis ca. 60:40

weißer Stuck

Zusammensetzung:

Bindemittel Gips mit geringem Anteil an Kalk
ohne Zuschläge, geringe Holzkohle- und Holzbestandteile

Gefüge:

matrixgestützt, Matrix-Partikel-Verhältnis 100:0

grau-brauner Stuckmarmor

Zusammensetzung:

Bindemittel Gips mit geringem Anteil an Kalk
ohne Zuschläge, geringe Holzkohle- und Holzbestandteile
eingefärbt mit Pigment, nicht untersucht

Gefüge:

matrixgestützt, Matrix-Partikel-Verhältnis 100:0

schwarzer Stuckmarmor

Zusammensetzung:

Bindemittel Gips mit geringem Anteil an Kalk
ohne Zuschläge, geringe Holzkohle- und Holzbestandteile
in Schliiffuntersuchungen keine Pigmente erkennbar, nicht weiter untersucht

Gefüge:

matrixgestützt, Matrix-Partikel-Verhältnis 100:0

Die Materialien des Mauerwerks wurden nicht untersucht.

³¹⁹ Siehe Anhang B, S. 337ff., S. 344ff. und S. 352ff.

Bedingungen und Einflüsse

Die Klimasituation im Innenraum des gesamten Gebäudes ist wegen der überall fehlenden Öffnungsverschlüsse von den äußeren Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen unmittelbar abhängig. Im Weißen Saal sind 2011 Fenster eingesetzt und ein provisorischer Verschluss in die Außentür eingebracht worden, wodurch sich der direkte Außenklimateinfluss etwas verringern wird.

Vor dem nach 1994 erfolgten Einzug der neuen Decke war der Raum durch eindringende Niederschlagswässer lange Zeit beeinflusst. Die Schäden an Decke und Bodenbelag führten zum Komplettverlust.

Für den gegenüber der Außenwand liegenden Musterbereich sind seit der Deckenerneuerung keine direkten Feuchteinträge mehr anzunehmen.

Es ist davon auszugehen, dass der Austrocknungsprozess vor allem der inneren Mauerwerke noch nicht vollständig abgeschlossen ist.

Das Schloss wird temporär genutzt. Erst seit Beginn dieser Arbeit ist der Weiße Saal gesperrt worden. Bis dahin waren alle Wandbereiche während durchgeführter Veranstaltungen frei zugänglich und gegen mechanische Beanspruchungen nicht geschützt.

Vorzustand



Abb.39: Dahlen, Schloss, Weißer Saal: südwestlicher Raumbereich im vorgefundenen Zustand (Oktober 2008)

Im 2008 vorgefundenen Zustand waren schätzungsweise 70 bis 75 % der Stuckzier vollkommen oder weitgehend verloren. Unzählige Abbruchstücke unterschiedlichster Größe lagen vor allen Wänden zwischen mindestens knöchelhohen Ansammlungen pulverisierten Stucks und Mörtels (Abbildung 39). Sie wurden vor Beginn der Bearbeitung geborgen, dokumentiert und

katalogisiert. Sie lagern derzeit in offenen Kunststoffbehältern in einem Raum im Südostteil des Schlosses.

Der noch in situ befindliche Stuck- und Putzbestand ist durchgehend akut verlustgefährdet. Die Substanzerstörung durch Gefügelösung sowie der Verlust der Kohäsion der Materiallagen untereinander sowie zum Träger führen zu anhaltendem weiterem Verlust.

Im Untersuchungsbereich sind etwa 70 % des weißen Gipsstucks bereits verloren gegangen. Die noch vorhandene Substanz weist erhebliche Gefügeschäden auf und löst sich bereichsweise vom Träger (s.u.).

Die aus grau-braunem Stuckmarmor bestehenden Flächen sind noch zu über 60 % erhalten, jedoch oberflächlich reduziert und von Rissen durchzogen. Vereinzelt löst sich der Stuckmarmor vom Unterputz.

Der Unterputz ist zwar noch vollflächig erhalten, jedoch in frei liegenden Bereichen oberflächlich reduziert und von starken Gefügeschäden und lagiger Ablösung geprägt.

Während der Bearbeitungszeit 2008 bis 2011 waren keine weiteren sichtbaren Verluste festzustellen.

Schäden

Schadensbilder und Schadumfang

Die Definitionen der im Folgenden angeführten Schadensbilder sind mit Bildbeispielen im Schadensbildkatalog im Anhang zu entnehmen.³²⁰ Die Verluste und Schadensbilder im Untersuchungsbereich wurden in einer Kartierung dokumentiert.³²¹

Konstruktive Schäden in Form von Mauerwerksrissen, -verschieben oder -ausbrüchen waren im Untersuchungsbereich nicht festzustellen, der Zustand des Mauerwerks wegen der noch vollflächigen Putzüberdeckung nicht einzuschätzen.

Entsprechend der drei einzeln applizierten Putzschichten trennte sich der Unterputz in den offen liegenden Bereichen durch Ablösung lagig auf. In teilweise mehrere Quadratdezimeter großen Schalen lösten sich die oberen beiden Putzlagen vom jeweiligen Träger, die Spaltöffnungen betragen bis zu 3 mm. Die hierdurch bereits entstandenen Kompletterluste umfassten für die zweite Putzlage etwa 25%, für die oberste etwa 50 % der ursprünglichen Fläche im Untersuchungsbereich. Eine Vielzahl meist 20 bis 30cm langer und weniger als 1 mm breiter Spaltrisse durchzog die Putzoberflächen, vor allem in den offen liegenden Bereichen der untersten Putzlage.

Das Putzgefüge wies im gesamten offen liegenden Bereich erhebliche Gefügeschäden durch Absandung und dünnlagige Schalenbildung auf.

Der durch Ablösung vom Träger verursachte Kompletterlust am Gipsstuck der Fondflächen umfasste etwa 95 %. Die im Untersuchungsbereich erhaltenen, sichtbaren Oberflächen wiesen im unteren Bereich Abblätterungen und kleinteilige Aufschieferungen auf, die Oberflächen puderten ab.

³²⁰ Siehe Anhang A, S. 291ff.

³²¹ Siehe Anhang A, S. 309ff.

Vom figürlichen Relief aus weißem Antragsstück ist im Untersuchungsbereich nur ein kleiner Bereich vollständig verloren. Die Stuckschicht ist auf einer Fläche von mehreren Quadratzentimetern vom Träger abgelöst, die Spaltöffnung beträgt 1 bis 2 mm. Der gesamte im Untersuchungsbereich erhaltene Antragsstück weist erhebliche Formverluste durch akute Gefügezerstörung, vor allem durch Abblätterung, verschieden starke Schalenbildung und Aufschieferrung, auf. Das Material ist weich, die Oberflächen pudern ab.

Der über Unterputz gezogene weiße Stuck der Profilrahmungen ist zu mehr als 50 % komplett verloren. Mehr als 80 % der erhaltenen Substanz ist durch Aufschieferrung und Abpudern geschädigt.

Der grau-braune Stuckmarmor ist vergleichsweise hart. Die aus diesem bestehenden schmalen Streifen sind vielfach in ganzer Breite durchgebrochen, die Spaltöffnungen betragen weniger als 1 mm. Im rechten oberen Bereich war die Stuckmarmorschicht vom Träger abgelöst, durch Verwölbung betrug die Spaltöffnung bis zu etwa 1 cm. Etwa 60 % der Stuckmarmoroberflächen wiesen oberflächige Formverluste auf und pudern ab.

Schadensgenese und Ursachen

Die Verluste und Gefügeschäden an Putzmörtel und Stuck sind primär auf starke, lang anhaltende Durchfeuchtung zurück zu führen. In welchem Maße auch der Untersuchungsbereich unmittelbar vom Löschwasser der Brandbekämpfung 1973 beeinträchtigt wurde, ist nicht nachzuweisen. Als hauptsächliche Feuchtigkeitsquelle ist Niederschlagswasser anzunehmen, welches wegen der unzureichenden oder schadhafte Notüberdachung allmählich bis in diese innersten Bereiche des Gebäudes vordringen konnte. In der Folge haben Löseprozesse an den Bindemitteln von Putz und Stuck schließlich zu irreparablen Gefügeveränderungen geführt. Auch Sprengwirkung durch im porösen Material gefrierendes Wasser dürfte für Materialschädigung mitverantwortlich sein. Eine besondere Dynamik erfuhren die Schädigungsprozesse aber wahrscheinlich durch Mauersalze. Nachgewiesen wurden an mehreren Proben, die in unterschiedlichen Bereichen im Raum entnommen wurden, Magnesiumsulfate (Hexahydrat $\text{MgSO}_4 \times 6 \text{H}_2\text{O}$ sowie Epsomit $\text{MgSO}_4 \times 7 \text{H}_2\text{O}$)³²². Als Quelle der Magnesiumionen sind magnesiumhaltige Baustoffe (Dolomitmalkmörtel) zu vermuten, geringe Anteile dolomitischen Kalks sind im Unterputz nachgewiesen worden.³²³ Die Schädigungswirkung der Salze entsteht vor allem durch den luftfeuchte- und temperaturbedingten Hydratstufenwechsel des hygroskopischen Salzes und die damit einhergehende Volumenänderung und entsprechende Sprengwirkung. Die Prozesse der Hydratstufenwechsel von Magnesiumsulfat finden je nach vorliegendem Salzmisch – hier vor allem mit Gips – unter bestimmten Bedingungen des Umgebungsklimas statt. Sie können je nach herrschender Temperatur schon bei 10 % rF ausgelöst werden.³²⁴

³²² Untersuchungsbericht siehe Anhang B, S. 358ff.

³²³ Untersuchungsbericht siehe Anhang B, S. 352ff.

³²⁴ SIEDEL (2003), S.62f.

10.4.2 Konservatorischer Handlungsbedarf

Für den Putz- und Stuckbestand des Weißen Saales besteht seit dreißig bis vierzig Jahren dringlichster konservatorischer Handlungsbedarf. Die Zerstörung schreitet mit unverminderter Dynamik voran, wahrscheinlich hat sie im Zuge der anhaltenden Austrocknung des Mauerwerks sogar zugenommen.

Um weiterer Schädigung entgegen zu wirken, müsste einerseits die Gefügefestigkeit der Putz- und Stuckmaterialien wiederhergestellt und die stabile Wiederanbindung gelöster Schichten an den jeweiligen Träger erfolgen. Andererseits sind Maßnahmen zur weitgehenden Minimierung der schädigenden Salze erforderlich, die durch den vorhandenen Zustand der Materialien aber ohne vorherige ausreichende Konsolidierung nicht durchführbar ist. Umfängliche Klärung des Bedarfs und der Wirksamkeit salzreduzierender Maßnahmen war nicht Gegenstand der aktuellen Bearbeitung.

Am gefügegeschädigten Putz und Stuck sind ausreichend tief wirksame Festigungsmittel einzusetzen. Abgelöste Putz- und Stuckbereiche sind durch geeignete Hinterfüllung wieder fest mit dem Träger zu verbinden. Risse sind kraftschlüssig zu verfüllen.

Lagige Materialzerstörung kann durch Kittung zusätzlich stabilisiert werden.

10.4.3 Einsetzbarkeit von Nanodispersionen

Ursprünglich bestand die Intention, die Möglichkeit der Verwendung von Konservierungsmitteln auf der Basis von Calciumsulfat-Dispersion für die Behandlung geschädigter Gipsbaustoffe und damit für eine materialidentische Konservierung zu prüfen.

Trotz unzureichender Ergebnisse der Vorproben mit Calciumsulfat-Dispersion (Abschnitt 8.7, S. 92f.) wurden am Objekt vergleichende Anwendungsproben mit diesem Mittel durchgeführt. Es war zu prüfen, ob das Festigungsmittel an den stark gefügegeschädigten Materialien vor Ort andere Wirkungen entwickelt.

Bei Behandlungsversuchen im Labor war an Prismen aus selbst hergestelltem Gipsmörtel (Abschnitt 8.4.2, S. 62f.) eine Festigungswirkung der Calciumhydroxid-Nanodispersionen nachgewiesen worden (Abschnitt 8.6.4, S.84).

Am Beispiel Dahlen sollte nunmehr überprüft werden, ob diese positiven Ergebnisse der Laborversuche sowie die in Schloss Leuben an Kalkmörteln erzielten Ergebnisse der Anwendung von Calciumhydroxid-Nanodispersionen und deren Modifizierungen auch an Gipsmaterial am historischen Objekt bestätigt werden können.

Wenngleich es sich nicht um eine materialidentische Methode handelt, sollte der erprobte Ansatz einer praktisch wasserfreien Konservierung auch für Gipsbaustoffe Erprobung finden. In dieser Hinsicht gelten, auch aufgrund durchaus ähnlicher Schädigung und Bedingungen an den untersuchten Objekten, die gleichen Vorüberlegungen wie für die Behandlung von Kalkmörteln mit Nanodispersion (Abschnitt 10.2.3, S. 124 sowie Abschnitt 10.3.3, S. 148.).

10.4.4 Vorversuche mit Probenmaterial

Experimentelles

An Probematerial wurde die Behandlung mit Calciumsulfat-Dispersion erprobt. Hierfür stand umfangreich geborgenes Fundmaterial aus dem Weißen Saal zur Verfügung. Ausgewählt wurden Proben der Materialgruppen Gipsmörtel (Unterputz), weißer Gipsstuck.

Materialien

Proben (Substrate): Schloss Dahlen, Weißer Saal

Gipsmörtel (Unterputz): Fundstück (Probe Nr. D_033)

Fundort: Weißer Saal, Ostwand, südlicher Bereich

Entnahmedatum: 19.02.2009

Gipsstuck: Fundstück (Probe Nr. D_029)

Fundort: Weißer Saal, Nordwestwand

Entnahmedatum: 19.02.2009

Herstellung von Einzelproben á ca. 30 g mit Steinsäge

Calciumsulfat-Dispersion:

CaSO₄-Sol 1a

(Eigenschaften Abschnitt 5.1.4, S. 35)

Durchführung

Die Proben wurden bei 40°C im Trockenschrank bis zur Massenkonzanz getrocknet. Anschließend erfolgte die Behandlung im Tauchverfahren analog der in Abschnitt 8.6.2 (S.78) beschriebenen Vorgehensweise unter unkonditioniertem Laborklima. Erneut sind drei Applikationen an jeweils drei Proben durchgeführt worden, nach jeder Tränkung erfolgte die Lagerung für wenigstens eine Woche bei 20°C und 65 %rF.

Prüfungen

Alle Messungen (Feststoffaufnahme, Wasseraufnahmevermögen und Biegezugfestigkeit) erfolgten analog zu den beschriebenen Untersuchungen (Durchführung Abschnitt 8.3, S. 54ff.).

Ergebnisse

Auffällig war bei allen Versuchen eine Verdickung der Festigungsmittel während der Behandlung. Am Gipsmörtel (Proben D_033) erfolgte während der drei Behandlungen eine relativ gleichmäßige Massezunahme, die insgesamt mit 0,7 Ma% sehr gering blieb (Tabelle 18). Schon nach der ersten Applikation bildeten sich deutliche Oberflächenauflagerungen.

10 Probeanwendung an Objekten

Probe Nr.	Ausgangsmasse (getrocknet)	Massezunahme nach Applikation			Massezunahme gesamt
		1	2	3	
D_033-1	186,12 g	0,45 g	0,40 g	0,43 g	1,28 g = 0,69 Ma%
D_033-2	213,84 g	0,56 g	0,40 g	0,45 g	1,41 g = 0,66 Ma%
D_033-3	254,32 g	0,74 g	0,52 g	0,61 g	1,87 g = 0,74 Ma%
D_029-1	51,62 g	1,16 g	0,08 g	0,70 g	1,94 g = 3,76 Ma%
D_029-2	58,41 g	2,21 g	0,13 g	0,85 g	3,19 g = 5,46 Ma%
D_029-3	59,62 g	2,13 g	0,20 g	0,86 g	3,19 g = 5,35 Ma%

Tab.18: Proben aus Schloss Dahlen, Weißer Saal - Massezunahme der Proben nach dreimaliger Behandlung mit CaSO₄-Sol (jeweils nach Trocknung gemessen)

Am Dünnschliff der behandelten Gipsmörtelprobe (D_033) wird deutlich, dass das Festigungsmittel auf der Substratoberfläche aufgelagert wurde und keinerlei Eindringen nachzuweisen ist (Abbildung 40).

Die Calciumsulfatschichten sind von Rissen durchzogen, sie sind in Schollen zerteilt und lösen sich ab.

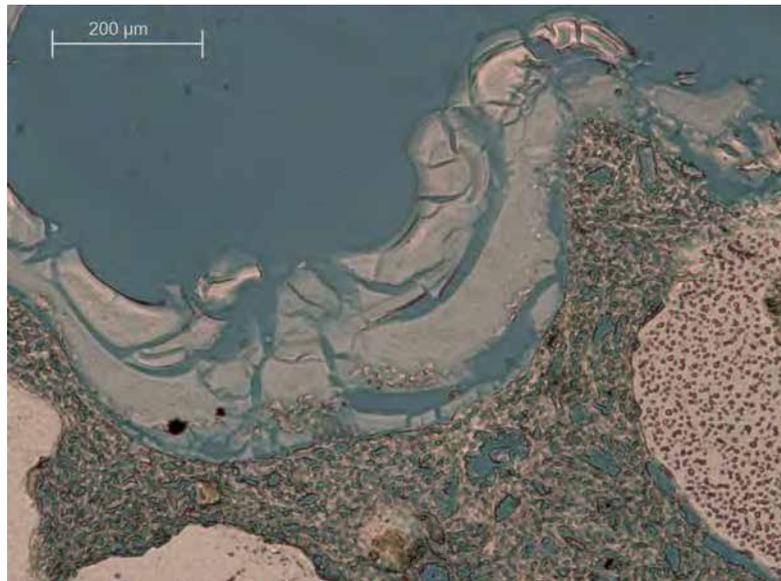


Abb.40: Dünnschliffaufnahme der behandelten Probe D_033 (Ausschnitt; Polarisorator: ||) Aufnahme: T. Köberle 2009

Am Gipsstück lag bei allen drei Proben eine deutlich größere Massenzunahme nach der ersten Behandlung vor, insgesamt waren bis zu 5,5 Ma% Zunahme festzustellen (Tabelle 18). Am Dünnschliff war das Festigungsmittel hingegen nicht eindeutig nachzuweisen (Abbildung 41). Da Auflagerungen wie am Gipsmörtel hier nicht vorliegen, kann aufgrund der deutlich größeren Massenzunahme davon ausgegangen werden, dass das Festigungsmittel weitgehend in das Gefüge eingedrungen ist.

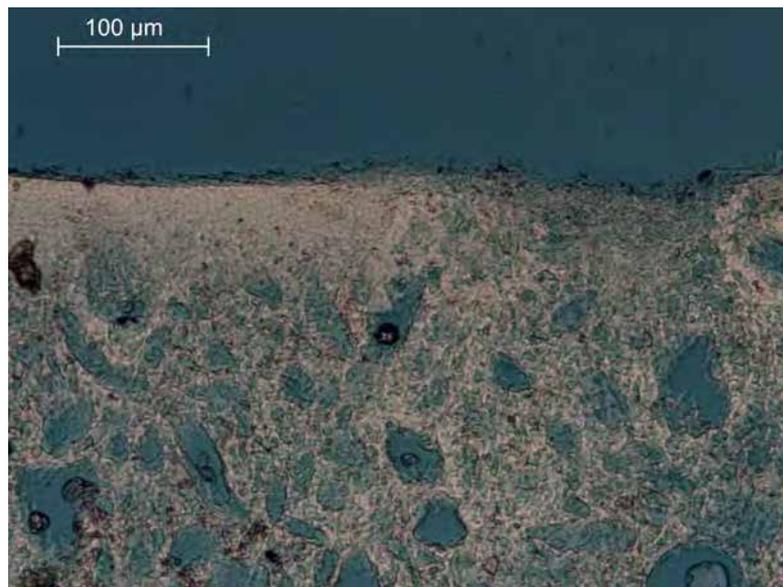


Abb.41: Dünnschliffaufnahme der behandelten Probe D_029 (Ausschnitt; Polarisator: \parallel)
Aufnahme: T. Köberle 2009

Die Wasseraufnahmefähigkeit aller unbehandelten Materialien ist ähnlich (Ergebnisse Protokoll Nr. 10-02)³²⁵. Beim Gipsmörtel betrug die volumenbezogene Wasseraufnahme von 16,7 bis 18,2 Vol%, beim Gipsstuck 19,8 bis 23,9 Vol%. Die Verringerung der Wasseraufnahmefähigkeit nach der Behandlung betrug bei beiden Materialien 1 bis 1,5 Vol%.

Die ermittelten Werte für die Biegezugfestigkeit betragen bei den unbehandelten Proben des Gipsmörtels 3,24 bis 4,24 N/mm², bei den behandelten 3,77 bis 4,46 N/mm² (Ergebnisse Protokoll Nr. 10-03)³²⁶. Die Gipsstuckproben ohne Behandlung wiesen Festigkeiten von 2,90 bis 4,01 N/mm² auf, die behandelten Proben zeigten deutlich geringere Festigkeitswerte von 1,45 bis 2,27 N/mm².

Bewertung

In die Gipsmörtelproben drang die Calciumsulfat-Dispersion nicht ein. Eine Festigungswirkung hatten die lediglich aufliegenden Calciumsulfatschichten nicht. Für die Gefügefestigung der Unterputze ist das Mittel nicht geeignet.

Am Gipsstuck ist sogar ein signifikanter Entfestigungseffekt festgestellt worden. Die Ursachen bleiben unklar. Wahrscheinlich ist das am Dünnschliffpräparat der Gipsmörtelprobe beobachtete Schwinden des eingetragenen Calciumsulfats auch hier aufgetreten, allerdings im Gefüge des Gipsstucks. Denkbar ist, dass die schrumpfenden Calciumsulfatschichten Material mitgerissen haben und das Substratgefüge damit geschwächt wurde. Das eingedrungene Festigungsmittel hat zudem wohl durch Porenverschlüsse das kapillare Wasseraufnahmevermögen deutlich reduziert.

³²⁵ Siehe Anhang A, S. 266f.

³²⁶ Siehe Anhang A, S. 268

10.4.5 Vorversuche am Objekt

Zielstellung und Vorgehensweise

In einer Testreihe war die Wirkung der Calciumsulfat-Dispersion auf begrenzten Probeflächen an geschädigtem Unterputz und Stuck zu überprüfen. Zum Vergleich sollten einige der am Kalkmörtel erprobten Mittel und Technologien der Gefügefestigung angewendet werden:

- Festigung mit unmodifizierten CaSO_4 -Dispersion und Ca(OH)_2 -Nanodispersionen
- „aufbauende Festigung“ mit verdünnten Ca(OH)_2 -Nanodispersionen bei schrittweise erhöhtem Feststoffgehalt, mit 40 Vol% Acetonanteil im Dispersionsmittel
- bimodale Ca(OH)_2 -Dispersionen aus Nanodispersionen mit Zusatz von Mikrodispersion, teils mit zusätzlicher Verdünnung, teils mit Nachbehandlung mit Lösungsmittelgel

Die unterschiedliche Materialfeuchtigkeit war hierbei zu berücksichtigen.

Daneben wurden Kittmassen erprobt. Für die Vorversuche vor Ort fanden Fundstücke von Stuckmarmor und Gipsmörtel des Unterputzes Verwendung.

Durchführung

Die Probebehandlungen zur Gefügefestigung mit unmodifizierten Nanodispersionen erfolgten am Unterputz, am weißen Gipsstuck sowie am grauen Stuckmarmor jeweils vergleichend in Bereichen mit unterschiedlicher Materialfeuchtigkeit. Diese wurde mit einem elektronischem Feuchtemessgerät ermittelt (Messgerät und Messprinzip Abschnitt 10.3.5, S. 153). In einem Fall wurde die Vortrocknung des Putzes mit Rotlicht erprobt (150 W/ 50 Hz, Abstand ca. 30 cm, vor jeder Applikation). Nach einer Stunde zeigten sich die vom Messgerät ermittelten Feuchtwerte im Probefeld um 10 bis 12 Skalenwerte verringert.

Für die Dauer des ersten halben Jahres der Bearbeitungszeit sind Klimadaten (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit) messtechnisch erfasst und aufgezeichnet worden. Diese kontinuierliche Messung wurde durch einen Gerätedefekt abgebrochen. Für die später durchgeführten Bearbeitungen konnte das Klima daher nur für den jeweiligen Zeitpunkt protokolliert werden.

Die Applikation erfolgte im Flutverfahren mittels Pipette. Die Festigung wurde so oft wiederholt, bis sich auswertbare Ergebnisse zeigten. Zwischen den einzelnen Applikationen wurden jeweils Wartezeiten von wenigstens einer Woche eingehalten.

Die Testserie zur Gefügefestigung umfasste 32 Einzelproben (Lokalisierung Abbildung 42), die Zusammensetzung der angewendeten Mittel sowie die Bedingungen sind in nachfolgender Tabelle 19 dargestellt.

10 Probeanwendung an Objekten

Test Nr.	Feuchte-wert ¹	Festigungsmittel	Anzahl Applikationen/ Klimabedingungen
UNTERPUTZ			
1	39...41	CaSO ₄ -Sol 1a	5 / 14...20°C, 57...72%rF
2	33...36	CaSO ₄ -Sol 1a	5 / 14...20°C, 57...72%rF
3	36...40	CaSO ₄ -Sol 1a	3 / 18...27°C, 50...68%rF
4	47...50	CaSO ₄ -Sol 1a	3 / 18...27°C, 50...68%rF
5	61...78	CaSO ₄ -Sol 1a	3 / 18...27°C, 50...68%rF
6	41...44	CaLoSiL [®] E25	6 / 18...27°C, 50...69%rF
7	31...39	CaLoSiL [®] E25	6 / 18...27°C, 50...69%rF
8	27...38	CaLoSiL [®] E25	3 / 21...24°C, 50...69%rF
9	42...60	CaLoSiL [®] E25	3 / 21...24°C, 50...69%rF
10	56...72	CaLoSiL [®] E25	3 / 21...24°C, 50...69%rF
11	53...65	CaLoSiL [®] E25	3 / 20...27°C, 50...68%rF
12	41...55 ⁴	IR, CaLoSiL [®] E25	3 / 20...27°C, 50...68%rF
13	44...75	[E5AC],[E7,5AC],[E10AC], [E12,5AC],[E15AC],[E25AC]	6 / 14...20°C, 67...87%rF
14	30...33	CaLoSiL [®] E25 + CaLoSiL [®] mikro ²	1 / 13°C, 82%rF
15	32...37	CaLoSiL [®] E50 + CaLoSiL [®] mikro ²	1 / 13°C, 82%rF
16	35...42	[E40] + CaLoSiL [®] mikro ² + LMG ³	1 / 13°C, 82%rF
17	32...34	CaLoSiL [®] NP50 +CaLoSiL [®] mikro ²	1 / 13°C, 82%rF
18	28...32	1 x CaLoSiL [®] E25, 2 x CaLoSiL [®] E25 + CaLoSiL [®] mikro ²	3 / 11...13°C, 69...82%rF
WEISSER GIPSSTUCK			
19	28...29	CaSO ₄ -Sol 1a	5 / 14...20°C, 57...72rF
20	61...66	CaSO ₄ -Sol 1a	5 / 14...20°C, 57...72rF
21	23...34	CaLoSiL [®] E25	6 / 18...27°C, 50...69%rF
22	59...66	CaLoSiL [®] E25	6 / 18...27°C, 50...69%rF
23	23...29	[E5AC],[E7,5AC],[E10AC], [E12,5AC],[E15AC],[E25AC]	6 / 14...20°C, 67...87%rF
24	24...29	CaLoSiL [®] NP50 +CaLoSiL [®] mikro ²	1 / 13°C, 82%rF
25	22...24	1 x CaLoSiL [®] E25, 2 x CaLoSiL [®] E25 + CaLoSiL [®] mikro ²	3 / 12...14°C, 70...82%rF
26	25...29	[E40] + CaLoSiL [®] mikro (250+1 m/m)	1 / 15°C, 74%rF
GRAU-BRAUNER STUCKMARMOR			
27	28...31	CaSO ₄ -Sol 1a	3 / 18...27°C, 50...55%rF
28	44...59	CaSO ₄ -Sol 1a	4 / 18...27°C, 50...55%rF
29	28...29	CaLoSiL [®] E25	4 / 18...27°C, 50...55%rF
30	38...50	CaLoSiL [®] E25	4 / 18...27°C, 50...55%rF
31	42...50	CaLoSiL [®] NP50 +CaLoSiL [®] mikro ²	1 / 13°C, 82%rF
32	44...50	CaLoSiL [®] E25 + CaLoSiL [®] mikro ²	3 / 11...13°C, 73...82%rF
IR ... Infrarot-Trocknung vor jeder Applikation (150W, 50 Hz, 1,0 h) ¹ ... Messwert GANN Hydromette ² ... Mischungsverhältnis 100+1 m/m ³ ... 0,5 ma% Klucel [®] G in Ethanol ⁴ ... Messwert nach der IR-Trocknung			

Tab.19: Dahlen, Schloss, Weißer Saal, Westwand nördlicher Bereich: Testreihe zur Gefügefestigung von Unterputz, Gipsstuck und Stuckmarmor



Abb.42: Dahlen, Schloss, Weißer Saal, Westwand Nordteil - Lokalisierung der Testflächen
(Der Musterbereich wurde im Verlauf der Bearbeitung ausgeweitet)

Für die Anwendung von Kittmörtel auf Basis der Calciumhydroxid-Nanodispersionen sind für Vortests Fundstücke des grauen Stuckmarmors mit einem Fundstück des Unterputzes verkittet worden.

- K1) Bologneser Kreide – CaLoSiL[®] mikro (2 + 1 m/m)
- K2) Bologneser Kreide – CaLoSiL[®] mikro + 0,5 Ma% Klucel[®]G in Ethanol
(2 + 0,75 + 0,25 m/m/m)
- K3) Bologneser Kreide – CaLoSiL[®] E25 (3 + 1 m/m)
- K4) Bologneser Kreide – CaLoSiL[®] E25 + 0,5 Ma% Klucel[®]G in Ethanol
(3 + 0,75 + 0,25 m/m/m)

Die Mischungen wurden jeweils nach Vornetzen mit Ethanol (Sprühverfahren) appliziert.

Prüfungen

An den Proben zur Gefügefestigung wurde die Veränderung des optischen Erscheinungsbildes durch Aufhellung, Weißschleier- oder Krustenbildung als Hinweise auf eine ungenügende Tiefenwirkung des Festigungsmittels visuell eingeschätzt. Mittels haptischer Prüfung wurde die erreichte Oberflächenfestigkeit bewertet. An ausgewählten Testflächen sind jeweils zwei

bis drei Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt worden (Methode Abschnitt 10.2.5, S. 129f.). Zum Vergleich dienten Messungen an den unbehandelten Materialien in drei verschiedenen Bereichen (Lokalisierung Abbildung 39).

An den Kittmörtelproben wurde nach einer Woche das Schwundverhalten entsprechend der sichtbaren Rissbildung bewertet, die Gefügefestigkeit mittels Kratzprobe mit dem Skalpell eingeschätzt und die Haftfestigkeit anhand der Stabilität der verbundenen Probenstücke beim manuellen Auseinanderreißen beurteilt.

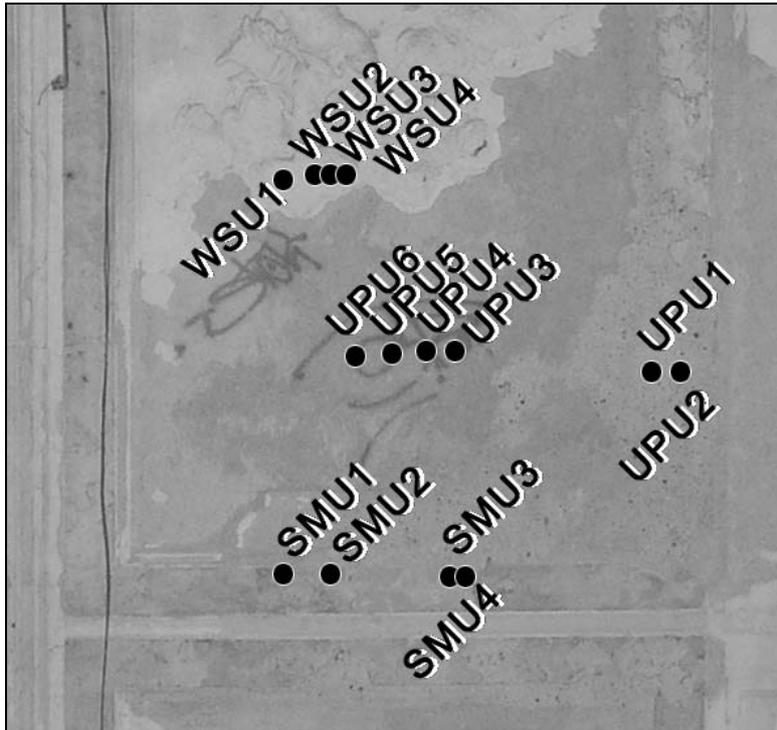


Abb.43: Dahlen, Schloss, Weißer Saal, Westwand Nordteil (Ausschnitt) - Lokalisierung der durchgeführten Bohrwiderstandsmessungen in unbehandelten Referenzbereichen

Ergebnisse

Die Probeflächen der Gefügefestigungstests wurden mindestens eine Woche nach Abschluss der letzten Applikation begutachtet und geprüft. Die festgestellten Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 20 (S. 183) dargestellt.

An Probeflächen, die nach der ersten Einschätzung vergleichsweise gute Eigenschaften zeigten, sind zur Überprüfung Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt worden.

Die Messungen erfolgte daher an den Testflächen Nr. 2, 13, 22 und 25 (Lokalisierung Abbildung 38).

10 Probeanwendung an Objekten

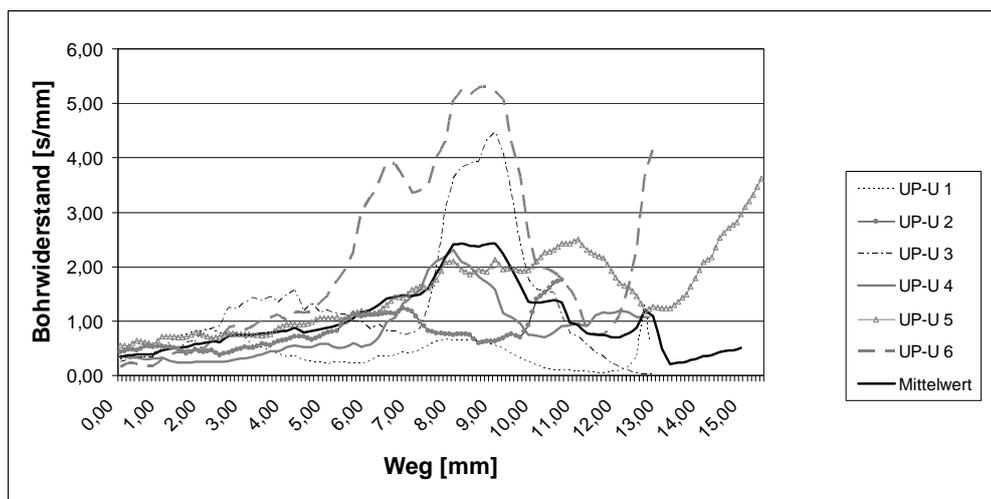
Probe Nr.	Oberflächenerscheinung	Verfestigung	
1	--- leichter Weißschleier, teils Krusten	-	gering
2	+++ keine Veränderung	o	nicht ausreichend
3	+++ keine Veränderung	---	nicht festzustellen
4	- leichter Weißschleier	---	nicht festzustellen
5	- leichter Weißschleier	---	nicht festzustellen
6	--- leichter Weißschleier, teils Krusten	-	gering
7	- teilweise Weißschleier	+	bedingt ausreichend
8	o Aufhellung in den Tiefen	---	nicht festzustellen
9	-- Weißschleier	---	nicht festzustellen
10	-- Weißschleier	---	nicht festzustellen
11	--- starker Weißschleier, teils Krusten	-	gering
12	+ geringe Aufhellung	-	gering
13	+ geringe Aufhellung	+	bedingt ausreichend
14	o Aufhellung	-	oberflächlich
15	--- Kruste	-	oberflächlich stabile Kruste
16	--- starker Weißschleier	-	gering, nur oberflächlich
17	- leichter Weißschleier	-	gering, nur oberflächlich
18	- leichter Weißschleier	-	gering, nur oberflächlich
19	+++ keine Veränderung	-	gering, nur oberflächlich
20	+++ keine Veränderung	---	nicht festzustellen
21	+++ keine Veränderung	-	gering, nur oberflächlich
22	+++ keine Veränderung	+++	deutlich, ausreichend
23	+++ keine Veränderung	-	gering
24	- leichter Weißschleier	---	nicht festzustellen
25	+++ keine Veränderung	o	bedingt ausreichend
26	+++ keine Veränderung	+++	deutlich, ausreichend
27	o geringe Aufhellung	+++	deutlich, ausreichend
28	+++ keine Veränderung	-	gering
29	- teilweise Weißschleier	+++	deutlich, ausreichend
30	- teilweise Weißschleier	+++	deutlich, ausreichend
31	- leichter Weißschleier	---	nicht festzustellen
32	+++ keine Veränderung	-	gering

Tab.20: Dahlen, Schloss, Weißer Saal, Westwand nördlicher Bereich - Ergebnisse der Testreihe zur Gefügefestigung von Unterputz, Gipsstück und Stuckmarmor

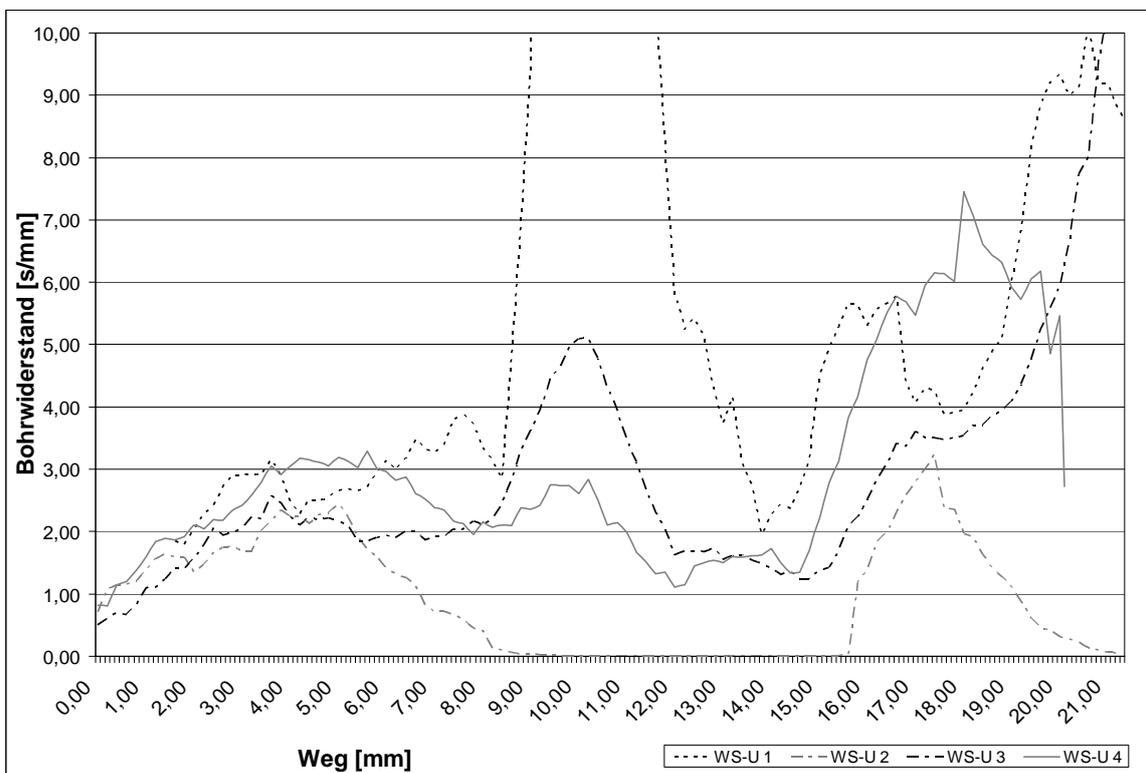
Die Prüfung an Testfläche Nr. 26 konnte aus technischen Gründen nicht durchgeführt werden (keine Aufsetzfläche für das Prüfgerät). Auch Testfläche Nr. 27 konnte nicht geprüft werden, da hier der behandelte Stuckmarmor unzureichende Haftung zum Träger aufwies und daher Beschädigung zu befürchten war. Am Stuckmarmor wurde die Behandlungsprobe Nr. 30 geprüft, die nach erster Einschätzung ebenfalls deutliche Festigkeitssteigerung – wenngleich mit gleichzeitiger Schleierbildung – aufgewiesen hatte (Tabelle 20).

Die Ergebnisse der Referenzmessungen am unbehandelten Material sind nachfolgend in den Graphiken 27 bis 29 dargestellt (Lokalisierung Abbildung 39).

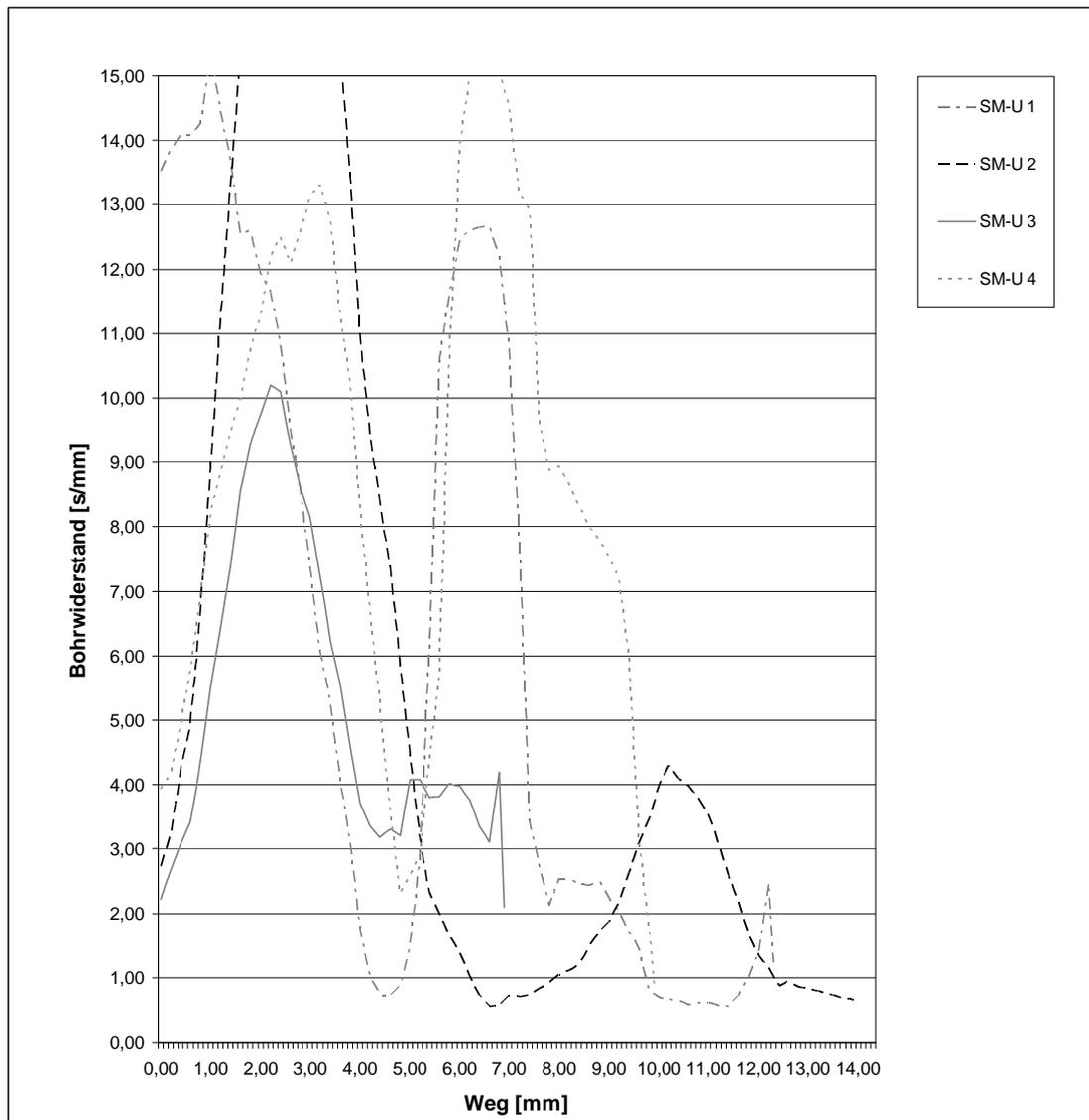
Die in gleicher Skalierung dargestellten Messwertdiagramme zeigen, dass der Unterputz erheblich geringere Festigkeit aufwies als die Stuckmaterialien. Der Stuckmarmor war hierbei deutlich fester als der Weiße Gipsstück.



Graph.27: Schloss Dahlen, Weißer Saal, Westwand, Musterfläche - Bohrwidstandmessung an un-
behandelten Referenzflächen des Unterputzes



Graph.28: Schloss Dahlen, Weißer Saal, Westwand, Musterfläche - Bohrwidstandmessung an un-
behandelten Referenzflächen des weißen Gipsstucks

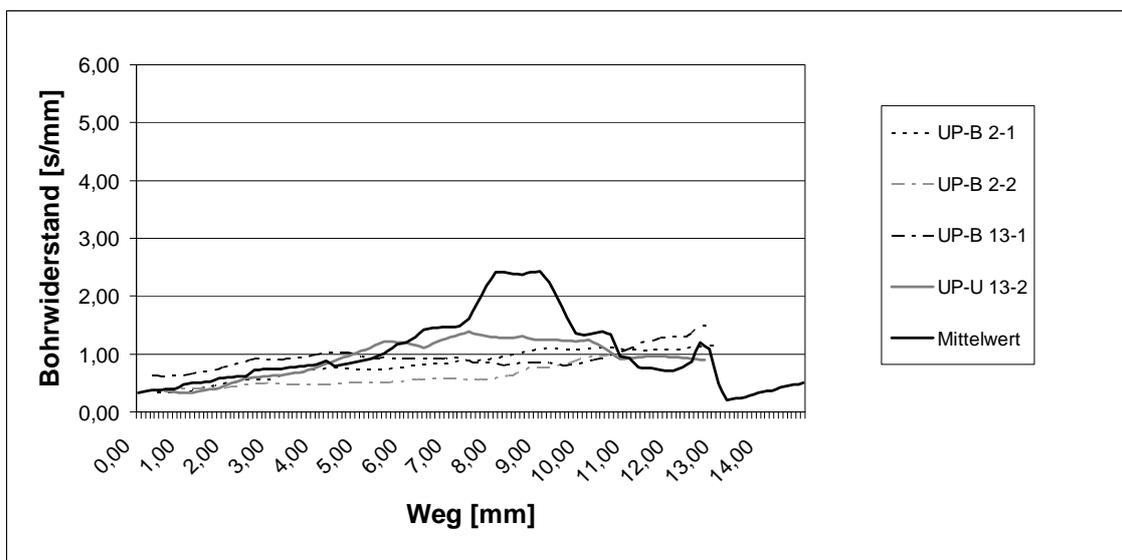


Graph.29: Schloss Dahlen, Weißer Saal, Westwand, Musterfläche - Bohrwidstandmessung an unbehandelten Referenzflächen des grauen Stuckmarmors

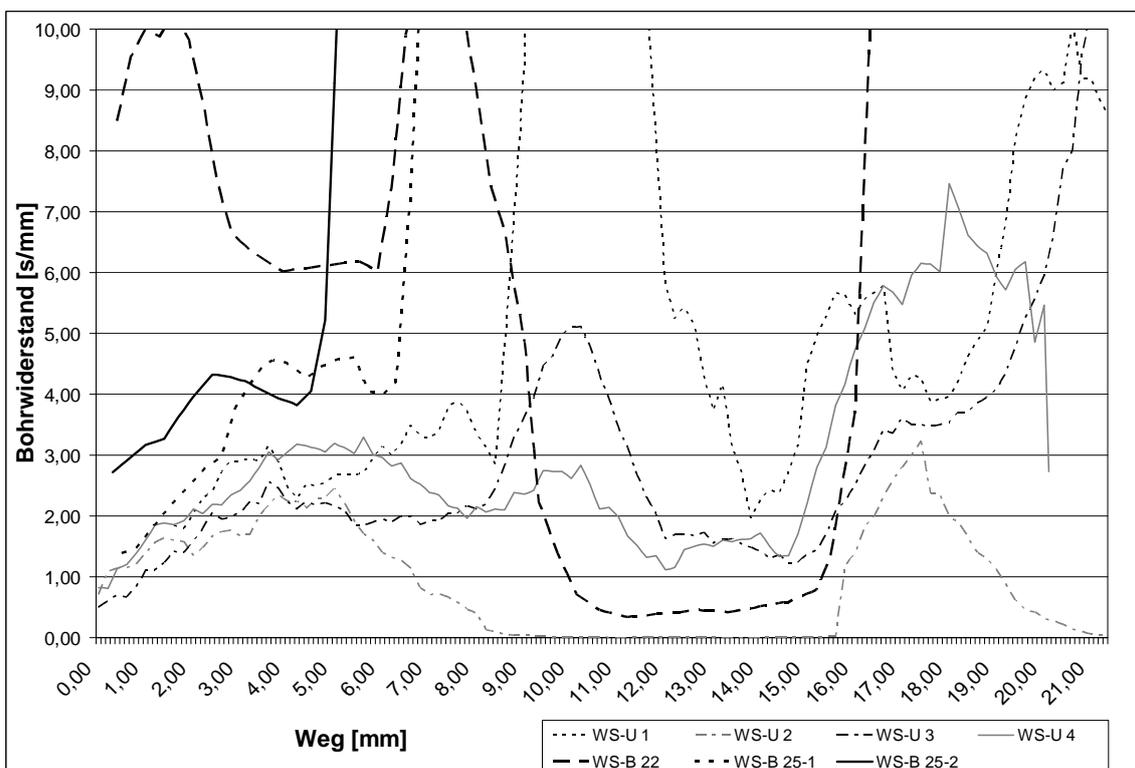
Der Unterputz (Graphik 27) war in der oberflächennahen Zone bis etwa 5 mm Tiefe nahezu aufgelöst, in Tiefen von 5 bis 12 mm wurden Bohrwidstandsmaxima von >2 bis >6 s/mm festgestellt. Am weißen Gipsstuck (Graphik 28) lag in allen vier geprüften Bereichen eine geringe Oberflächenfestigkeit vor (<1 s/mm), schon in zwei bis vier Millimeter Tiefe wurden mittlere Bohrwidstände von 2 bis 3 s/mm erreicht, nahmen aber in den meisten Fällen bis 15 mm Tiefe nicht mehr erheblich zu. Der starke Kurvenanstieg bei Messpunkt WS-U 1 wurde vermutlich durch ein Armierungseisen verursacht. Die anderen Werteschwankungen können auf lagige Ablösungen hindeuten.

Der Stuckmarmor (Graphik 29) zeigte einen vergleichsweise sehr hohen Bohrwidstand von über 10 s/mm (Messpunkt SM-U 3) bis über 20 s/mm (Messpunkt SM-U 2). Die starken Schwankungen der Werte dürften auf Materialgrenzen hinweisen. Der Stuckmarmor ist ein aus mehreren Farbstuckmassen zusammengesetztes Material.

10 Probeanwendung an Objekten



Graph.30: Schloss Dahlen, Weißer Saal, Westwand - Bohr widerstandsmessung am Unterputz – behandelte Testflächen Nr. 2 und 13 im Vergleich zum Mittelwert der Messungen an unbehandelten Referenzflächen



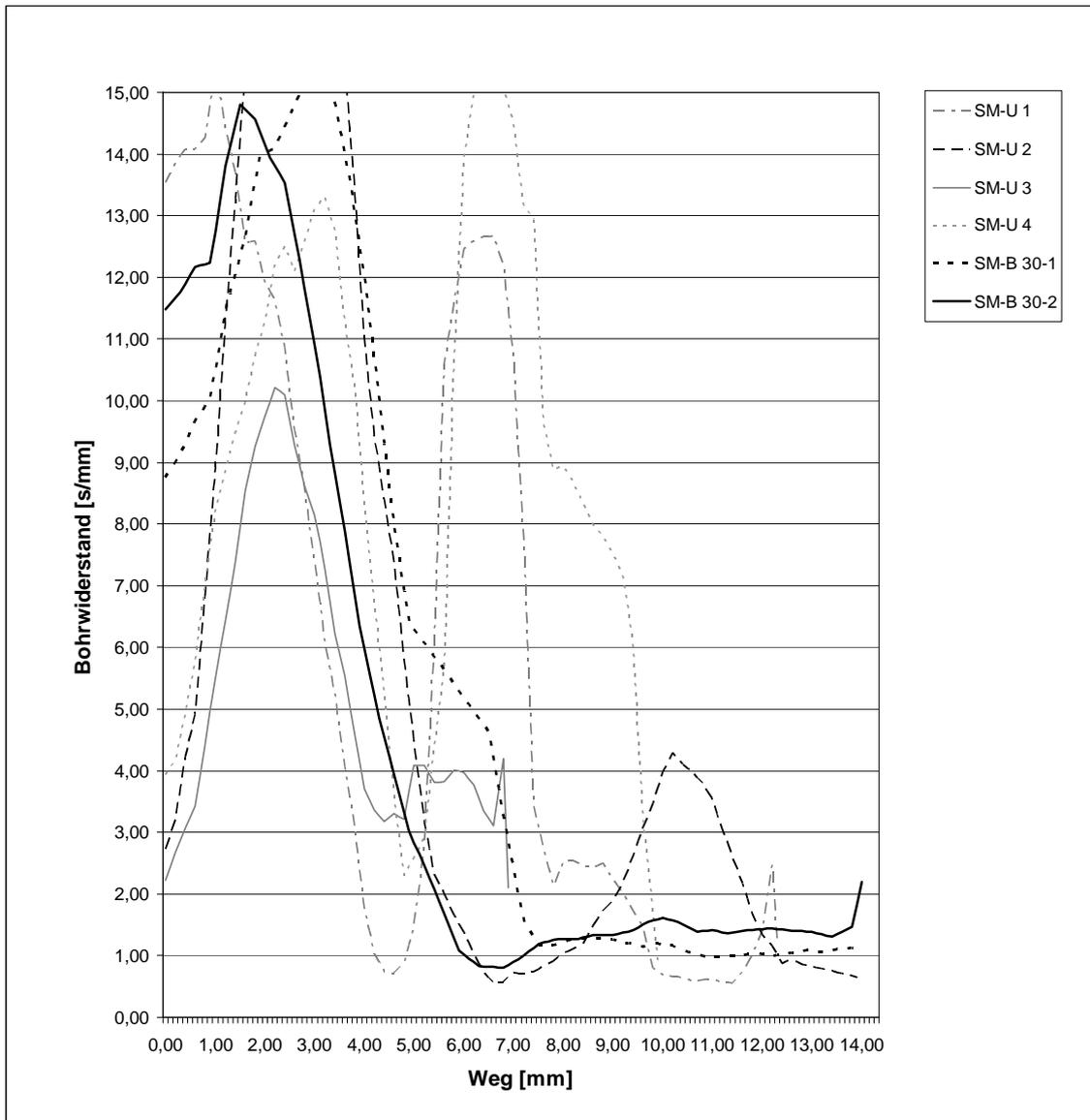
Graph.31: Schloss Dahlen, Weißer Saal, Westwand, Musterfläche: Bohr widerstandsmessungen am weißen Gipsstuck: Testflächen 22 und 25 (vergleiche Tabelle 20) im Vergleich zu den Messungen an unbehandelten Referenzflächen (vergleiche Graphik 27)

Die Bohr widerstandsmessung am Unterputz haben an den Testflächen mit den nach erster Einschätzung besten Eigenschaften keine Festigkeitssteigerung nachweisen können (Graphik 30).

Sowohl im mit Calciumsulfat-Dispersion behandelten Bereich (Tabelle 20, Test Nr.2) als auch im aufbauend mit Nanodispersionen gefestigten Bereich (Test Nr. 13) liegen alle gemessenen Werte bis 13 mm Tiefe deutlich unter 2 s/mm.

Am weißen Gipsstuck (Graphik 31) zeigen die Messungen an den ausgewählten Bereichen einen höheren Bohrwiderstand, in der oberflächennahen Zone wenigstens bis etwa 8 mm Tiefe (Tabelle 20, Testflächen Nr. 22, 25). Die starken Kurvenanstiege bei Messpunkt WS-B 25-1 (ab 6,3 mm Tiefe) und Messpunkt WS-B 25-2 (bei 4,5 mm Tiefe) gehen wahrscheinlich auf Metallarmierungen im Stuck zurück.

Die bei Probefeld Nr. 22 ab etwa 7,5 mm Tiefe stark abnehmende Festigkeit ist als beginnende Ablösung an einer Schichtengrenze zu interpretieren.



Graph.32: Schloss Dahlen, Weißer Saal, Westwand, Musterfläche - Bohrwiderstandsmessungen am grauen Stuckmarmor: - behandelte Testfläche Nr. 30 (vergleiche Tabelle 20) im Vergleich zu den Messungen an unbehandelten Referenzflächen (vergleiche Graphik 29)

Am Stuckmarmor (Graphik 32) wurde an dem mehrfach mit CaLoSiL[®]E25 behandelten Testfeld Nr. 30 in den obersten 3,5 mm ein Bohrwiderstand festgestellt, der deutlich über drei der vier Referenzwerte liegt. Die abweichenden Ergebnisse der Referenzprobe SM-U 1 lassen eine Interpretation nachweislicher Festigkeitssteigerung durch die Behandlung nicht zu.

Die Ergebnisse der Vorproben zur Anwendung von Kittmassen sind in nachfolgender Tabelle 21 dargestellt.

Nr.	Mischung	Festigkeit ¹	Haftfestigkeit ²	Schwundrisse
K1	BK + Mikro (2+1 m/m)	stabil	gut	vereinzelt
K2	BK + Mikro + LMG (2+0,75+0,25 m/m)	stabil	gering	vereinzelt
K3	BK + CaLoSiL [®] E25 (3+1 m/m)	weich	gering	vereinzelt
K4	BK + CaLoSiL [®] E25 + LMG (3+0,75+0,25 m/m)	weich	gering	vereinzelt
BK ... Bologneser Kreide LMG ... 0,5 Ma% Klucel [®] G in Ethanol ¹ ... Einschätzung der Widerständigkeit beim Kratztest (Skalpell) nach Aushärtung ² ... Einschätzung der Haftfestigkeit beim manuellen Abreißen nach Aushärtung				

Tab.21: Schloss Dahlen, Weißer Saal – Ergebnisse der Tests verschiedener Kittmassen

Bewertung

Das Problem der Weißschleierbildung ist bei den Behandlungsversuchen zur Gefügefestigung von Gipsmörtel und Gipsstuck weniger deutlich geworden. Einerseits waren die Auflagerungen sowohl bei Behandlungen mit Calciumsulfat- als auch mit Calciumhydroxid-Dispersionen tatsächlich seltener festzustellen. Andererseits ist eine optische Veränderung durch Aufhellung am weißen Stuck kaum wahrnehmbar.

Die Weißschleierbildungen nach Probebehandlungen am Unterputz schienen dabei unmittelbar mit erhöhten Werten der Feuchtigkeitsmessung am Substrat in Zusammenhang zu stehen (Tabelle 20, Tests Nr. 7 bis 11). Die Beeinflussung durch Salze kann hier nicht ausgeschlossen werden. Allerdings lassen die vergleichenden Behandlungen mit und ohne Vortrocknung des Putzes (Proben 11 und 12) den Schluss zu, dass die Materialfeuchte eine Bedeutung für die Schleierbildung hat.

Besser ließ sich an den stark gefügegeschädigten und dadurch extrem fragilen Materialien (Unterputz und weißer Gipsstuck) sowie an pudernden Oberflächen (Stuckmarmor) die festigende Wirkung beurteilen. Nur wenige Versuche haben merkliche Konsolidierung erreichen können. Der Unterputz war mit keinem der angewendeten Mittel und Methoden hinreichend konsolidierbar. Calciumsulfat-Dispersion zeigte erst nach fünfmaliger Anwendung eine festigende Wirkung (Testflächen Nr. 1, 2), die aber nicht ausreichend für jedwede weitere Bearbeitung erscheint. Auch die meisten Anwendungsversuche mit Calciumhydroxid-Nanodispersion waren ohne Erfolg. Eine merkliche Verfestigung der Schalen war durch die sechsmalige Behandlung relativ trockenen Mörtels mit CaLoSiL[®]E25 (Testfläche Nr. 7) sowie durch eine „aufbauende Festigung“ mit acetonhaltiger Dispersion (Testfläche Nr. 13) zwar erreichbar, doch blieb das Material äußerst fragil. Die in sich durchaus festeren Schalen fielen bei geringer mechanischer Beanspruchung leicht ab. Die ungenügende Festigungswirkung ist auch durch die Bohrwiderstandmessungen bestätigt worden (Graphik 30). Dies kann auf die zu große Dimension der zu überbrückenden Gefügedefekte zurückgeführt werden. Die erreichten Ergebnisse sind derart unzureichend, dass auch weiterführende Modifizierungen innerhalb des Bindemittelsystems nicht Erfolg versprechend scheinen.

Eine Weiterbehandlung des mit vorgenannten Methoden vorgefestigten Mörtels mit modifizierten Mitteln analog zur Malschichtfestigung in Leuben (Abschnitt 10.3.5., S. 150ff.) ist hier zwar theoretisch vorstellbar und bei sehr vorsichtigem Arbeiten wohl auch weitgehend verlustfrei durchzuführen. An den flächendeckend und vielerorts mehrfach übereinander vorhandenen Schäden am Unterputz wäre das jedoch mit vollkommen unangemessenem Aufwand verbunden.

Eine Konservierung des Unterputzes im vorgefundenen Zustand mit Nanodispersionen erscheint nach bisherigem Kenntnisstand nicht praktikabel.

Für den ebenfalls stark geschädigten weißen Gipsstuck konnten wirksame Festigungsmittel durch die Behandlungsproben gefunden werden. Hierbei war die sechsmalige Behandlung mit CaLoSiL[®]E25 in einem Bereich mit höheren Werten der Feuchtigkeitsmessung erheblich besser als in einem vergleichbar geschädigten Bereich mit geringeren Messwerten (Tabelle 20, Testflächen Nr. 21, 22). Beide Anwendungen fanden zeitparallel und daher unter gleichen Bedingungen statt. Die Probefelder liegen relativ weit auseinander und in unterschiedlicher Höhe (Testfläche Nr. 21 etwa 2,00m; Nr. 22 etwa 0,60m über Bodenniveau). Möglicherweise sind verschiedene Versalzungssituationen für die unterschiedliche Wirkung des Festigungsmittels ursächlich.

Gute Ergebnisse bei der Gefügefestigung des Gipsstucks haben auch beide Proben mit bimodalen ethanolischen Dispersionen (Testflächen Nr. 25 und 26) schon nach ein bis zwei Applikationen erreicht (im Probefeld 25 nach einmaliger Vorbehandlung mit reiner Nanodispersion). Die Wirkung bimodaler Dispersionen wurde in größerem Maßstab während der Musterkonservierung überprüft (Abschnitt 10.4.6., S. 188ff.).

Der Stuckmarmor wies weniger dramatische Gefügeschäden auf. Ziel der Behandlungsversuche war die Verfestigung der pudernden Oberflächen. Hier erwies sich Calciumsulfat-Dispersion wirksam, jedoch nur bei geringer Materialfeuchte (Proben 27 und 28). Die in bisherigen Versuchen festgestellte geringe Tiefenwirkung der Calciumsulfat-Dispersion (Abschnitt 8.7, S. 92.) ist bei der Anwendung für die hier vorhandene oberflächige Schädigung weniger erheblich. Für derartige Aufgaben scheint das Mittel unter bestimmten Bedingungen geeignet zu sein.

Mit CaLoSiL[®]E25 wurde die oberflächige Entfestigung des Stuckmarmors in beiden Probebehandlungen konsolidiert, jedoch traten Schleier auf. In diesem Falle sind Schleier vor allem als ästhetisches Problem zu betrachten, da für die Behandlung von abkrochenden Oberflächen nur eine sehr begrenzte Tiefenwirkung erforderlich ist (Graphik 32).

Bimodale Dispersionen waren nicht ausreichend wirksam, vielleicht liegt hier gerade durch die bessere Tiefenverteilung nach den durchgeführten ein bis zwei Applikationen eine noch ungenügende Festigungswirkung an der Oberfläche vor.

Die Vorproben zu Kittmassen ergaben, dass mit der Mischung aus Bologneser Kreide und CaLoSiL[®] mikro (Tabelle 21 Nr. K4) ein zur Rand-, Riss- und Fehlstellenkittung geeignetes Material zur Verfügung steht.

10.4.6 Musterkonservierung

Zielstellung

Eine exemplarische Umsetzung von Konservierungsmaßnahmen, die sich während der Vor-
tests positiv erwiesen haben, erschien nur für den weißen Gipsstuck sinnvoll. Zur Behandlung
der stark geschädigten Unterputze wurde keine praktikable Lösung gefunden (Abschnitt
10.4.5, Bewertung S. 186f.).

Die Festigung des Gipsstucks war an einem größeren Bereich zu prüfen. Ein Teil des Reliefs
oberhalb der Untersuchungsfläche (ca. 0,50 x 0,70 m) wurde hierfür ausgewählt (Abbildung
44). Am geschädigten Stuck waren neben der Gefügefestigung auch Sicherungskittungen an
größeren Abhebungen und Hinterfüllungen erforderlich.

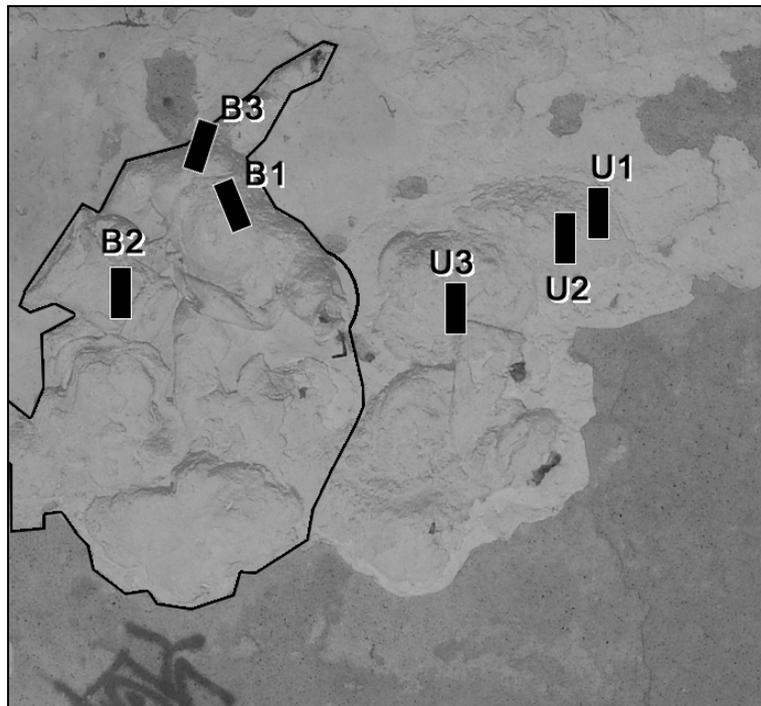


Abb.44: Dahlen, Schloss, Weißer Saal, Westwand, oberer Bereich – Verortung
der Musterfläche (Umrandung) sowie der Prüfflächen des „Peelingtests“ (U1 bis
U3 in ungeschädigten Bereichen, B1 bis B3 im Bereich der Musterfläche)

Vorzustand

Der ausgewählte Bereich des Stuckreliefs wies insgesamt eine oberflächlich sehr weiche Mate-
rialkonsistenz und abpudernde Oberflächen auf. Bereichsweise waren Aufschieferungen und
Schalenbildung unterschiedlicher Dimension festzustellen. Parallel zur Oberfläche verlau-
fende Risse befanden sich vor allem an Abbruchkanten bereits verlorener Abschaltungen. Vor
allem im rechten (nördlichen) Bereich löste sich der Stuck vom Träger. (Schadbildkatalog
und Schadenskartierung im Anhang).³²⁷

³²⁷ Siehe Anhang A, S. 291f. sowie S. 309ff.

Erforderliche Maßnahmen

Im gesamten Bereich waren Maßnahmen zur Gefügefestigung notwendig. Abgelöste Stuckbereiche waren durch Kittung und Hinterfüllung wieder mit dem Träger zu verbinden, Spaltrisse waren zu verfüllen.

Über die konservatorischen Maßnahmen zur Bestandserhaltung hinaus sollten im begrenzten Umfang Fehlstellenkittungen von lokalen Ausbrüchen erfolgen.

- Gefügefestigung
- Randsicherung (Anböschung) bedrohter Bereiche
- Hinterfüllung hohl liegender Bereiche
- Rissverfüllung
- Kittung lokaler Fehlstellen

Mittel und Methoden

Bei der Musterkonservierung fanden die in den Vorproben bewährten Mittel Anwendung. Daneben sind erfolgreich angewandte Mittel und Methoden der Bearbeitung in Schloss Leuben (Abschnitte 10.2, S. 120ff. und 10.3, S. 143ff.) eingesetzt worden.

Für die Gefügefestigung sollte die in Test Nr. 25 (Tabelle 19) verwendete bimodale Dispersion in größerer Dimension angewandt werden:

- 1.) CaLoSiL[®]E25 + CaLoSiL[®]mikro (100+1 m/m).

Die nachfolgende Behandlung von Gefügeschäden größerer Dimension (Risse und Ablösungen bis ca. 0,5 mm Spaltöffnung) sollte mit der in Leuben mit Erfolg angewendeten Modifizierung erfolgen:

- 2.) 100 Vol% CaLoSiL[®]E50 + CaLoSiL[®]mikro (2+1 V/V) + 20 Vol% (0,5 ma % Klucel[®]G in einem Lösungsmittelgemisch aus 50 Vol% Ethanol+ 50 Vol% Wasser)

Für Hinterfüllungen fand die Mischung H29 aus den Vorproben Anwendung (Abschnitt 9.5.3, Tabelle 09, S.109):

- 3.) CaLoSiL[®]E50 + CaLoSiL[®]mikro + Champagner Kreide + Scotchlite[™]S22 +Scotchlite[™]K1

Mischungsverhältnis (Massenteile): 6,0 + 6,0 + 0,72 + 0,16 + 0,12

Für die Kittung von Rissen und Ablösungen mit größerem Spaltmaß war nach den entsprechenden Vorproben die Mischung K4 (Tabelle 21) einzusetzen, die zur farblichen Anpassung mit einem geringen Anteil Erdpigment versetzt wurde:

- 4.) Bologneser Kreide + Terra di Siena + CaLoSiL[®]mikro
- Mischungsverhältnis (Massenteile): 2,0 + 0,01 + 1,0

Prüfmethoden

Die Prüfung der erreichten Festigungswirkung erfolgte durch „Peelingtests“ - (Methodenbeschreibung Abschnitt 10.2.6, S. 138f.).

Die Prüfung der erreichten Festigungswirkung der Kittungen erfolgte manuell (Kratzprobe).

Durchführung

Die Gefügefestigung mit bimodaler Dispersion (1) erfolgte durch Flutung mit der Pipette bis zur Sättigung. Sie wurde zweimal nach jeweils einer Woche Wartezeit in gleicher Weise wiederholt. Die klimatischen Bedingungen während der Bearbeitungen waren 18 - 21°C und 60 - 75 % rF. Alle Aufschieferungen und Risse wurden per Injektage mit der modifizierten Dispersionsmischung (2) behandelt. Jede Applikation erfolgte in mehreren Schritten, indem das jeweils frisch hergestellte Mittel mehrmalig bis zur Sättigung injiziert wurde. Die Behandlung erfolgte eine Stunde nach jeder Gefügefestigung und wurde wie diese im Abstand von jeweils einer Woche noch zweimal wiederholt. In den letzten beiden Arbeitsschritten ist der Injektionsmasse ein geringer Pigmentzusatz beigemischt worden (0,125 Ma% Umbra natur), um sie farblich an die Umgebung anzupassen.

Unmittelbar nach der dritten Gefügefestigung und Rissbehandlung wurde in noch nicht verfüllte, größere Risse und Spaltöffnungen die Hinterfüllmasse (3) injiziert. Anschließend erfolgte die Kittung von flachen Ausbruchstellen und die Anböschung von Bruchkanten mit Kittmasse (4). Vor dem Antragen erfolgte eine Vornetzung mit Ethanol (Sprühverfahren).

Ergebnisse

Nach manueller Prüfung eine Woche nach der letzten Applikation erwiesen sich die behandelten Stuckflächen erheblich verfestigt. Es war kein Abkreiden mehr festzustellen, das Material war deutlich härter als im Vorzustand. Auch die Verfestigung der lagigen Materialzerstörung durch die Injektionsmassen war erfolgreich, der Stuck erschien insgesamt stabilisiert. Die Kittungen und Hinterfüllungen mit Kreidezuschlag sind nach manueller Prüfung stabil, zeigten aber vereinzelt Haarrisse.

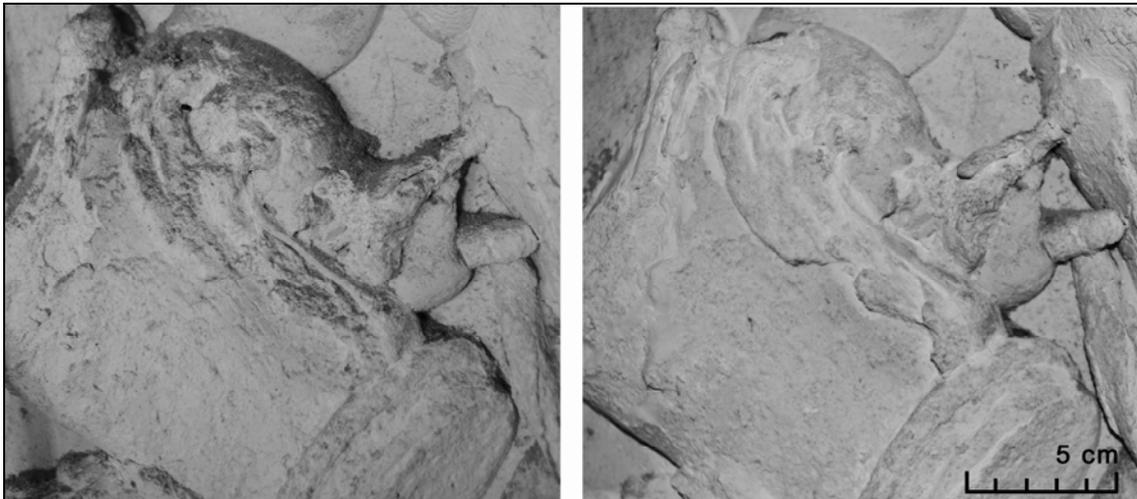


Abb.45: Dahlen, Schloss, Weißer Saal, Westwand, Bereich der Musterkonservierung – Detailaufnahme eines Bereiches vor und nach der Behandlung

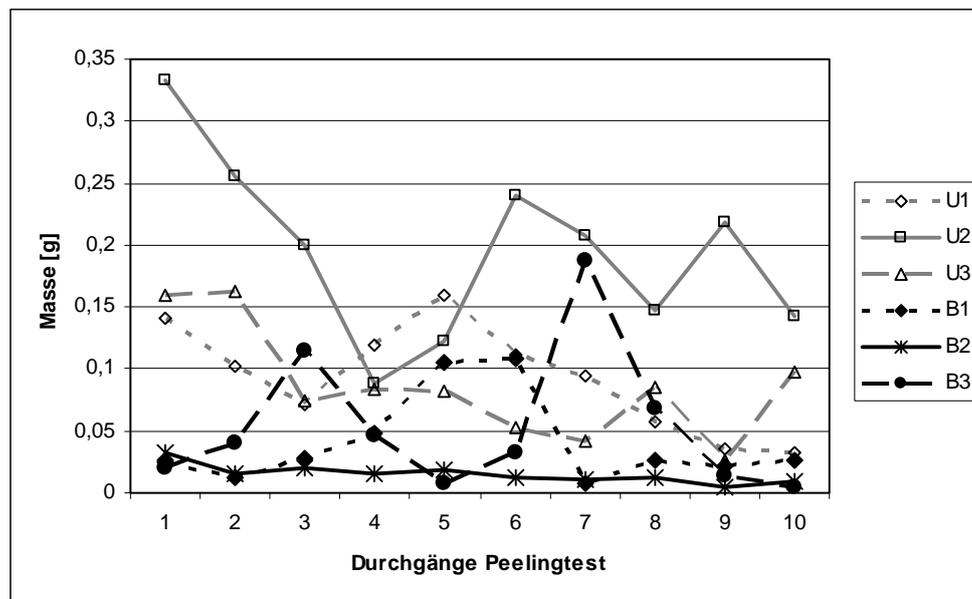
Mit „Peelingtests“ sollten die Ergebnisse überprüft werden. Die Prüfung erfolgte an drei Probestellen innerhalb des Konservierungsmusters sowie zum Vergleich an drei unbehandelten Stellen in unmittelbarer Nähe (Lokalisierung Abbildung 44, Ergebnisse Graphik 33).

Die zehnmalige Abzugsprüfung mit Klebestreifen konnte die höhere Materialfestigkeit der gefestigten Substanz bestätigen. Nur wenige Einzelwerte am behandelten Material liegen im

Bereich der Prüfergebnisse am unbehandelten Material, die Schwankungen gehen vor allem auf den Abriss flächig zusammenhängender Stuckpartikel zurück. In der Summe wurden bei den zehn Abrissproben am unbehandelten Stuck 0,9g (U3) bis 2,0 g (U2) Material abgenommen, am behandelten Stuck 0,2 g (B2) bis 0,5 g (B3).

Die Ergebnisse der „Peelingtests“ sind in Protokoll 13-03 dokumentiert.³²⁸

Vier Wochen nach der letzten Behandlung ist eine Oberflächenreinigung mit Glasfaserstiften erprobt worden, die sich nahezu verlustfrei durchführen ließ.



Graph.33: Dahlen, Schloss, Weißer Saal, Westwand – Ergebnisse des „Peelingtests“, Masse abgerissenen Materials bei jeweils 10 Durchgängen an unbehandelten Flächen (U1 bis U3) sowie an behandelten Flächen im Bereich der Musterkonservierung (B1 bis B3)

Bewertung

Für die Festigung der vorgefundenen Materialschäden am Gipsstuck erwies sich die Anwendung der verschiedenen Modifikationen der Calciumhydroxid-Nanodispersionen ausgesprochen wirkungsvoll. Im Besonderen ist festzustellen, dass eine hohe Stabilität des vorher sehr fragilen Materials bereits nach drei Behandlungen mittels Gefügefestigung und Rissverfüllung sowie einer einmaligen Hohlstelleninjektion erreicht werden konnte. Der Erfolg basiert auf den systematischen Vorproben zur Gefügefestigung mit modifizierten Mitteln und Methoden. Die hier erzielten Ergebnisse erwiesen sich auf den Musterbereich übertragbar. Für die Riss- und Spaltbehandlung größerer Dimension sind Mittel angewandt worden, die sich bei der Behandlung von Kalkmörteln bewährt haben. Offensichtlich ist die Übertragbarkeit von Ergebnissen der Anwendungen der Injektionsmassen weitgehend möglich, während dies für die Gefügefestigung durch Tränkmittel nicht der Fall ist.

Eine nahezu wasserfreie Konservierung von stark gefügegeschädigtem Gipsstuck mit Mitteln auf der Basis von Calciumhydroxid-Nanodispersionen war im erprobten Fall praktisch gut ausführbar und wirkungsvoll.

³²⁸ Anhang A, S. 286

11 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zur Wirksamkeit der alkoholischen Calciumhydroxid- und Calciumsulfat-Dispersionen haben gezeigt, dass für ihre Anwendung bei der Konservierung von Stuck, Putz und Wandmalerei viele Bedingungen zu beachten sind und das jeweilige Behandlungsergebnis sorgfältig überprüft werden muss.

Die Dispersionen zeigen in ihrem Verhalten und Wirken einige Unterschiede zu herkömmlichen Konservierungsmitteln auf Kalk- und Gipsbasis. Entsprechende Erfahrungen lassen sich daher nur begrenzt auf diese Mittel anwenden.

Eine Anwendung von CaLoSiL[®]-Calciumhydroxid-Nanodispersionen zur Gefügefestigung von Putz oder Stuck kann in bestimmten Fällen erfolgreich gelingen, doch bedarf es eingehender Voruntersuchungen und systematischer, gewissenhaft überprüfter Vorproben. Eine verbindliche Vorschrift, die zu den gewünschten Ergebnissen führt, kann es hierzu aber nicht geben, da zu viele Einflussgrößen das Verhalten der Nanodispersionen mitbestimmen. Diese Einflussgrößen, wie Materialfeuchtigkeit, Salzbelastung, Gefügeeigenschaften, können an einem zu behandelnden Objekt recht heterogen vorliegen. Daher ist außerdem eine Übertragbarkeit von Ergebnissen punktuell am Objekt oder an entnommenem Probematerial durchgeführter Behandlungsproben zur größerflächigen Anwendung mit Risiken behaftet.

Die Anwendung der Dispersionen für Gefügefestigungen auf reiner Kalkbasis kommt nur für Objekte in Frage, an denen die notwendigen Untersuchungen und Vorproben in ausreichender Dichte und Tiefgründigkeit durchführbar sind und deren Konsolidierungsbedarf das Festigungsvermögen der Mittel nicht übersteigt - die Festigungswirkung der Dispersionen ist, sofern keine anderen Bindemittel zugesetzt werden, bei einer praktikablen Anzahl einzelner Applikationen begrenzt und daher nicht für jeden Schädigungsgrad ausreichend.

Für die restauratorische Praxis interessant und womöglich vielerorts einsetzbar sind die wasserfreien, rein calcitisch gebundenen Kitt- und Hinterfüllmassen auf der Basis von Calciumhydroxid-Dispersionen. Hierzu muss aber eine weiterführende, systematische Anwendungsforschung auf der Grundlage der vorgelegten Ergebnisse folgen.

Die disparaten Ergebnisse von Anwendungsversuchen der Calciumsulfat-Dispersion CaSO₄-Sol 1a waren im Rahmen der Arbeit nicht zu klären. Auch hier bedarf es weiterer Forschung.

Literaturverzeichnis

ADOLFS, Nadine Cheryl: Die Anwendung von Calciumhydroxid-Sol als Festigungsmittel für historische Putze – erste Versuche und deren Überprüfung. Unveröff. Diplomarbeit an der Fachhochschule Köln, Fakultät Kulturwissenschaften, Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft. Köln: n.veröff. 2007

AMIDEI, Rosanna Barbiellini: restauro della volta di Sant' Ignazio a Roma di Andrea Pozzo. In: Salzburger Barockmuseum (Hg.): Barockberichte. Informationsblätter des Salzburger Barockmuseums zur bildenden Kunst des 17. und 18. Jahrhunderts. Salzburg: Eigenverlag 2003. S. 363-371

ARNOLD, Bärbel: Dokumentation von Putzen und ihren Schadensbildern. In: Boué, Andreas (Hg.): Historische Fassadenputze. Erhaltung und Rekonstruktion. 3. workshop des Institut für Bauchemie Leipzig e.V..Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2001. S. 19-26

AURAS, Michael: Erfahrungen mit modernen Kalkmörteln – Schadensursachen und Schadensvermeidung. In: Institut für Steinkonservierung e.V. (Hg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und morgen? IFS-Bericht Nr. 19. Mainz: Institut für Steinkonservierung 2004. S. 35-41

AURAS, Michael: Der Werkstoff Gips. In: Pursche, Jürgen (Hg.): Stuck des 17. und 18. Jahrhunderts. Geschichte, Technik, Erhaltung. Berlin: Bäßler Verlag 2010. S. 78–84

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE, Ref. Z5, Zentrallabor München; MUSEUM OF THE TERRACOTTA WARRIORS AND HORSES OF QIN SHIHUANG, Lington, Shaanxi, PR China (Hg.): Abschlussbericht 2006, Erprobung und Optimierung von Konservierungstechnologien für Kunst- und Kulturgüter der Provinz Shaanxi, VR China, Abschlussbericht 2004-2006 „Die Steinpanzer“, Band 4, München 2006

BENEDIX, Roland: Bauchemie. Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten. 5. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. 2011

BINNEWIES, Michael; JÄCKEL, Manfred; WILLNER, Helge; RAYNER-CANHAM, Geoff: Allgemeine und Anorganische Chemie. 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum 2011

BOOS, Markus, GROBE, Joseph, HILBERT, Georg , WENDLER, Eberhard: Kieselsäure-ester - Chemismus, Einsatzmöglichkeiten und Weiterentwicklung. In: Bautenschutz + Bau- sanierung 20, No. 8, Köln: Müller Verlag 1997. S. 39-41

BÖTTCHER, Silke; PRATESI, Ina; SCHIRMER, Elke: Malschichtfestigung. In: Staschull, Matthias; Rösch, Bernhard: Die Restaurierung eines Meisterwerks. Das Tiepolo-Fresko im Treppenhaus der Würzburger Residenz. München: Deutscher Kunstverlag 2009. S. 97-108

BÖTTGER, Karl Georg: Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze: Haftmörtel, Hin- terfüllmörtel und Kalkputze. Berlin: Logos Verlag 1997

BOUÉ, Andreas: Dokumentation historischer Putzoberflächen. In: Boué, Andreas (Hg.): Historische Fassadenputze. Erhaltung und Rekonstruktion. 3. Workshop des Institut für Bauchemie Leipzig e.V..Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2001. S. 69-74

BRAJER, Isabell: Limewater Impregnation of Wall Paintings. In: Bachmann, K.-W. u.a. (Hg): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung. 13. Jahrgang, Heft 2. Worms: Wernersche Verlagsgesellschaft 1999. S. 367-368

BREZESINSKI, Gerald; MÖGEL, Hans-Jörg: Grenzflächen und Kolloide. Physikalisch- chemische Grundlagen. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag 1993

BÜCKNER, Steffen: Calciumethanolat in der Konsolidierung von calcitisch gebundenen Mörtelgefügen. Untersuchungen zur Wirkungsweise, Anwendbarkeit und Applikationsfor- men. Unveröffentlichte Seminararbeit an der Hochschule für Bildende Künste Dresden, Fachklasse Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturfarbigkeit.. Dresden: n. veröff. 2004

BUCHER, Sandra: Festigungsversuche an künstlich entfestigtem Probematerial aus Fuping County Kalkstein. In: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Ref. Z V, Zentrallabor München; Museum of the Terracotta Warriors and Horses of Qin Shihuang, Lington, Shaanxi, PR China (Hg.): Schlussbericht 2003, Erprobung und Optimierung von Konservie- rungstechnologien für Kunst- und Kulturgüter der Provinz Shaanxi, VR China, München 2003. S. 169-183

DANZ, A.: Natursteinkonservierung und -restaurierung an der Pfarrkirche Gehofen. In: DBU-Modellprojekt; Konservierung und Restaurierung Sandsteinwerksteinen mit dolomiti- schen Bestandteil Beispiel der Pfarrkirche Gehofen (DBU-Modellprojekt AZ; 16456-45), 2003

DENNINGER, E.: Versuche zur Festigung von Wandmalerei. In: Maltechnik. Technische Mitteilungen für Malerei und Bildpflege. 62. Jahrgang, Heft 3. München: Callwey 1956, S. 65-69

DENNINGER, E.: Die chemischen Vorgänge bei der Festigung von Wandmalereien mit sogenanntem Kalksinterwasser. In: Maltechnik. Technische Mitteilungen für Malerei und Bildpflege. 64. Jahrgang, Heft 3, München: Callwey 1958, S. 67-69

DI GREGORIO, Sara: Nanorestore[®] for the consolidation of wall paintings. Influence of the thermohygro-metric parameters and the presence of saline contamination on the efficacy of the treatment. CeROArt E-Publikation 2010. URL: <http://ceroart.revues.org/1716>

DOBRINSKI, Paul / KRAKAU, Gunter / VOGEL, Anselm: Physik für Ingenieure. 12. aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. 2010

DÖRFLER, Hans-Dieter: Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme. Physik und Chemie. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2002

DÖRFLER, Hans-Dieter: Grenzflächen- und Kolloidchemie. Weinheim: VCH Verlag 1994

DOMASLOWSKI, Wieslaw: Modifizierung von mineralischen Mörteln für die Stein- und Ziegelkonservierung. In: Jägers, Elisabeth (Hg.): Dispergiertes Weisskalkhydrat für die Restaurierung und Denkmalpflege. Altes Bindemittel – Neue Möglichkeiten. Petersberg: Imhof Verlag 2000. S. 17-24)

DRDÁCKÝ, M.F.: Testing of historic mortars on non-standard small size specimens. In: Binda, Luigia; Drdácký, Miloš; Kasal, Bo (Hg.): In-situ evaluation & non-destructive testing of historic wood and masonry structures. Prag: ÚTAM AV ČR 2007, S. 130-139

DRDÁCKÝ, Miloš F. (Autorenkollektiv): Standardization of peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. Manuscript Number: MAAS4437R1. Materials and Structures (9.09.2011). S. 1-16.

DVWG Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (Hg.): Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 629 (A). Anlagen zum Herstellen und Dosieren von Kalkmilch und Kalkwasser. Bonn: DVGW 2010

ECKART, A.; WOITEK, H.; NEHRING: Datenbank historischer Mörtel und Saniermörtel – Nützliches Werkzeug bei der Instandsetzungsplanung gipshaltiger Mauerwerksbauten. In: Auras, Michael; Zier, Werner (Hg.): Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an den Fassaden. (= WTA-Schriftenreihe Band 30). München: WTA-Publications 2008

EMMENEGGER, Oskar; PURSCHE, Jürgen; MÖLLER, Roland: Die Alte Kirche in Iden-
sen – Maltechnik und Schadensbilder der Wandmalerei. In: Segers-Glocke, Christiane
(Hg.): Forschungsprojekt Wandmalerei-Schäden. Ein Förderprojekt des Bundesministeri-
ums für Forschung und Technologie. Schlussbericht zu den interdisziplinären Ergebnissen.
Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen Nr. 11. Hameln: Niemeyer 1994. S. 76-
81

EMMENEGGER, Oskar: Gipsstuck und Kalkstuck. Geschichte, Technik und Restaurie-
rung. In: Gesellschaft für Schweizerische Kunstgeschichte (Hg.): Kunst und Architektur in
der Schweiz, Jahrgang 48, Heft 4, Bern: 1997. S. 6-12

EMMERLING, Erwin: Reversibilität aus der Sicht des Restaurators in der Denkmalpflege.
In: ICOMOS Nationalkomitee der Bundesrepublik Deutschland: Reversibilität das Feigen-
blatt der Denkmalpflege? (= ICOMOS Hefte des Deutschen Nationalkomitees VIII). Stutt-
gart: Reichert 1992. S. 37-47

ETTL, Hans: Probenahme und Untersuchung am Objekt. In: Knöfel, Dietbert; Schubert,
Peter (Hg.): Handbuch Mörtel und Steingängungsstoffe in der Denkmalpflege. Sonderheft
aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege. Berlin: Verlag
Ernst & Sohn 1993. S. 17-38

FALBE, J., REGITZ, M. (Hg.): Roempp-Chemie-Lexikon, Band 5, Stuttgart: Georg Thie-
me Verlag 1992

FELLER, R.L.; WILT, M.: Evaluation of Cellulose Ethers for Conservation. (= Research in
Conservation No. 3/ 1990). The Getty Conservation Institute, Library of Congress Cata-
loging-in-Publication Data. Marina del Rey 1990

FELDTKELLER, Julia: Wandmalereirestauration. Eine Geschichte ihrer Motive und Me-
thoden. Wien: LIT Verlag 2008

FISCHER, Doris: Traditionelle Materialien in der denkmalpflegerischen Praxis. In: Institut
für Steinkonservierung e.V. (Hg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und mor-
gen? IfS-Bericht Nr. 19. Mainz: Institut für Steinkonservierung 2004. S. 31-34

FISCHER, Heinz-Martin u.a.: Lehrbuch der Bauphysik. 6. vollständig überarbeitete Auf-
lage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2008

FITZNER, B.; KOWNATZKI, R.: Klassifizierung der Verwitterungsformen und Kartierung von Natursteinbauwerken. In: Snethlage, Rolf (Hg.): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung. Band 1 – 1989. Berlin: Verlag Ernst&Sohn 1991. S. 1-13

FRÖSSEL, Frank: Handbuch Putz und Stuck. Herstellung, Beschichtung und Sanierung für Alt- und Neubau. München: Callwey Verlag 2003

GEYSSANT, Jacques: Geologie des Calciumcarbonats. In: Tegethoff, F. Wolfgang: Calciumcarbonat. Von der Kreidezeit ins 21. Jahrhundert. Basel/ Boston / Berlin: Birkhäuser Verlag 2001. S. 1-52

GIORGI, R.; DEI, L.; BAGLIONI, P.: A New Method for Consolidating Wall Paintings Based on Dispersions of Lime in Alcohol. Studies in Conservation. Vol. 45, Nr. 3 / 2000. S. 154 - 161

GOTTHARDT, R.; KASIG, W.: Karbonatgesteine in Deutschland – Rohstoff, Nutzung, Umwelt. Düsseldorf: Beton-Verlag 1996

GREULICH, Walter (Hg.): Lexikon der Physik: in sechs Bänden. Band 1. Heidelberg: Spektrum Verlag 1998

GREULICH, Walter (Hg.): Lexikon der Physik: in sechs Bänden. Band 3. Heidelberg: Spektrum Verlag 1999

GRASSEGGER, Gabriele; KÖHLER, Wolfram: Rissverklebungen und Rissverfüllungen an schwer geschädigten Kalksteinen – ein Verfahren entwickelt für das Rottweiler Münster. In: Siegesmund, Siegfried u.a. (Hg.): Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Band 156, Heft 1 (Themenheft: Geowissenschaften und Denkmalpflege). Stuttgart: Verlag Nägele u. Obermiller 2005. S.213-220

GURLITT, Cornelius: Beschreibende Darstellung der älteren Bau- und Kunstdenkmäler des Königreichs Sachsen, 27. Heft: Amtshauptmannschaft Oschatz (I. Teil). Dresden, Verlag C.C. Meinhold Verlag 1905

HÄFNER, Klaus: Die Verwendung von Kieselsäureester zur Festigung salzbelasteter Wandmalerei. In: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hg.): Konservierung von Wandmalerei. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Band 104. München: Lipp Verlag 2001. S. 147-156

HÄRIG, Siegfried; KLAUSEN, Dietmar; HOSCHEID, Rudolf: Technologie der Baustoffe. Handbuch für Studium und Praxis. 14. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: C.F. Müller Verlag 2003

HAMMER, Ivo: Bedeutung historischer Fassadenputze und denkmalpflegerische Konsequenzen. Zur Erhaltung der Materialität von Architekturoberfläche. In: Pursche, Jürgen (Hg.): Historische Architekturoberflächen. Kalk – Putz – Farbe. ICOMOS Hefte des deutschen Nationalkomitees Band 39. München: Lipp Verlag 2003. S. 183-199

HAMMER, Ivo: Zur Nachhaltigkeit mineralischer Beschichtung von Architekturoberflächen, Erfahrungen mit Kaliwasserglas und Kalk in Österreich, in: ETH Zürich, Institut für Denkmalpflege (Hrsg.): Mineralfarben, Beiträge zur Geschichte und Restaurierung von Fassadenmalereien und Anstrichen. Zürich: Hochschulverlag 1998. S. 191-204

HANGLEITER, Hans-Michael; SALTZMANN, Leonie: Sicherung und Konservierung historischer Kalkputze auf hölzernen Trägern. In: Institut für Steinkonservierung e.V. (Hg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und morgen? IfS-Bericht Nr. 19. Mainz: Institut für Steinkonservierung 2004. S. 51-59

HEERMANN, Kristina: Entwicklung einer injektionsfähigen Hinterfüllmasse für die Konservierung eines mittelalterlichen Putzes in der Krypta St. Andreas in Fulda-Neuenburg. Unveröffentlichte Diplomarbeit der Fachhochschule Köln, Fachbereich für Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut. Köln 1995

HEINEN, Sigrun: Festigung von historischem Verputz. In: Jägers, Elisabeth (Hg.): Dispergiertes Weisskalkhydrat für die Restaurierung und Denkmalpflege. Altes Bindemittel – Neue Möglichkeiten. Petersberg: Imhof Verlag 2000. S. 99-106

HERM, Christoph: Anstriche auf Naturstein – Untersuchungen zur Zusammensetzung historischer Fassungen, Kolloidchemie von Kalkfarbe und Bauphysik. Dissertation an der Ludwig-Maximilians –Universität München. München: 1997

HOFFMANN, Dirk: Zur Erhärtung und Verwitterung von Putzmörtel an der Fassade. In: Venzmer, H. (Hg.): 6. Hanseatische Sanierungstage des Bauwesens. Instandsetzung von umweltbelasteten Denkmalfassaden. (= FAS-Schriftenreihe, Heft 6). Berlin: Verlag Bauwesen 1995. S. 57-66

ICOMOS-ISCS (Hg.): Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns / Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre. (= Monument and Sites XV). Englisch-französische Ausgabe. Paris 2008

INSTITUT FÜR STEINKONSERVIERUNG (Hg.): Mitteilung Nr. 7 (08/2006). Mainz 2006

JÄGERS, Elisabeth (Hrsg.): Dispergiertes Weisskalkhydrat für die Restaurierung und Denkmalpflege. Altes Bindemittel – Neue Möglichkeiten. Petersberg: Imhof Verlag 2000

JÜLKE, Elias Kristoffer: Über die Verdunstung von Lösungsmitteln aus Lackschichten. Promotionsarbeit an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich: Verlag Schmidtberger & Müller, 1962

KASIG, W.; WEISKORN, B.: Zur Geschichte der deutschen Kalkindustrie und ihrer Organisationen. Düsseldorf: Beton-Verlag 1992

KEEDING, Wibke: Alkoholische Calciumhydroxid-Dispersionen, Charakterisierung und Wirkungsweise sowie Prüfung der Anwendbarkeit als strukturelles Festigungsmittel für Kalkputze. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit der Fachhochschule Potsdam, Fachbereich Architektur und Städtebau, Studiengang Restaurierung, Studienrichtung Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturfassung. Potsdam: n. veröff. 2005

KHANDEKAR, Narayan: Gelled Systems: Theory and Early Application. In: Dorge, Valérie (Hg.): Solvent Gels for the Cleaning of Works of Art: The Residue Question. Los Angeles: Getti Publications 2004, S. 5-11

KLARNER, Klaus: Entwicklung eines Restaurierungskonzepts im Rahmen einer Musterachse. Problemfeld Malschichtsicherung und Salzreduzierung. In: Leitner, Heinz / Siedel, Heiner (Hg.): Mauersalze und Architekturoberfläche. Dresden: Hochschule für Bildende Künste 2003. S. 157-166

KNÖFEL, Dietbert: Mörtel- Eine Übersicht mit Erläuterung an Beispielen. In: Zimmermann, Gerd (Hg.): Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar – Universität – Jahrgang 40, Heft 5/6/7. Weimar: HAB 1994

KNOEPFLI, Albert; EMMENEGGER, Oskar: Wandmalerei bis zum Ende des Mittelalters. In: Knoepfli, Albert / Emmenegger, Oskar / Koller, Manfred / Meyer, André: Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken Band 2, Wandmalerei Mosaik. Stuttgart: Reclam Verlag 1990

KOBLISCHEK, Peter: Festigen von historischen Kalkmörteln mit SiO₂-abgebeneden Produkten. In: Boué, Andreas (Hg.): Historische Fassadenputze. Erhaltung und Rekonstruktion. 3. workshop des Institut für Bauchemie Leipzig e.V.. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2001. S. 87-92

KOLLER, Manfred: Das Märchen von der Festigung mit "Kalkwasser". In: Restauratorenblätter 17, 20 Jahre Steinkonservierung 1976-1996. Wien: 1996. S. 17.

KRASS, Jens; RUPP, Gerhard; MITRANSKY, Bärbel: Grundlagen der Bautechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2009

KRATZ, Artur: Eine neue Methode der Steinfestigung. In: Gandert, Otto- Friedrich u. a. (Hg.): Restaurierung und Konservierung. Bericht der 5. Tagung der Arbeitsgemeinschaft des technischen Museumspersonals in Berlin 1964. Berlin: Verlag Hessling 1964. S. 46-55

KRAUS, Karin: Kalkarten gestern und heute. In: Institut für Steinkonservierung e.V. (Hg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und morgen? IfS-Bericht Nr. 19. Mainz: Institut für Steinkonservierung 2004. S. 1-14

KRISCHER, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik.. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer Verlag 1956

KRÜGER, Markus (Hg.): Cultural Heritage Preservation. Proceedings of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation. Berlin, Germany, September 26 to 28, 2011. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2011

KRUPP, Fried.: Gips. In: Blücher, H. (Hg.): Auskunftsbuch für die chemische Industrie. Neunte verbesserte und stark vermehrte Auflage. Leipzig: Verlag von Veit & Comp. 1915. S. 496-498

KÜHN, Herrmann: Erhaltung und Pflege von Kunstwerken und Antiquitäten, Bd. 2. München: Keyserische Verlagsbuchhandlung 1981

KÜHN, Hermann: Was ist Stuck? Arten – Zusammensetzung – Geschichtliches. In: Exner, Matthias (Hg.): Stuck des frühen und hohen Mittelalters. Geschichte, Technologie, Konservierung. (= ICOMOC Hefte des Deutschen Nationalkomitees XIX). München: Karl M. Lipp Verlag 1996. S. 17-24

KÜNZEL, Helmut: Schäden an Fassadenputzen (= Zimmermann, Günter (Hg.): Schadenfreies Bauen, Band 9), Stuttgart: Fraunhofer IRB 1994

LAGALY, Gerhard; SCHULZ, Oliver; ZIMEHL, Ralf: Dispersionen und Emulsionen. Eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich Tonminerale. Darmstadt: Steinkopff Verlag 1997

LEHMANN, Martin: Langfristige Schädigung von Wandmalerei durch die Wirkung eingebrachter Kunststoffe. Am Beispiel der Gewölbemalerei in der Krypta der Quedlinburger Stiftskirche St. Servatius. In: Bacon, A. u.a. (Hg.): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 18. Jahrgang 2004, Heft 1. Worms: Wernersche Verlagsgesellschaft 2004 (a). S. 71-92

LEHMANN, Martin: Die Gewölbemalereien in der Krypta der Stiftskirche St. Servatius in Quedlinburg, Erstellung eines Konservierungs- und Restaurierungskonzeptes. Unveröff. Diplomarbeit an Hochschule für bildende Künste Dresden, Fachklasse Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturfarbigkeit. Dresden: n. veröff. 2004 (b)

LEITNER, Heinz: Brittle and Flexible. The structural stabilisation of painted plaster on suspended wooden ceilings. Unveröff. Masterarbeit am Courtauld Institute of Art. University of London. London: n. veröff. 1997

LEITNER, Heinz: Restaurierung im Spannungsfeld wechselnder Auffassungen aus restauratorischer Sicht. In: Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten (Hg.): Jahrbuch der Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten. Forschungen und Berichte zu Schlössern, Gärten, Burgen und Klöstern in Thüringen. Band 5 für das Jahr 2001. Lindenberg: Kunstverlag Josef Fink 2002. S. 158-168

LENZ, R./ SOBOTT, R.: Beobachtungen zu Gefügen historischer Gipsmörtel. In: Auras, Michael/ Zier Hans-Werner: Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an Fassaden. WTA-Schriftenreihe Heft 30. München: WTA Publications 2008. S. 23-34

LENZNER, Sylvia: Mineralische Festigungsmittel zur Konservierung pudernder Malerschichten an Wandmalereien. Unveröffentlichte Seminararbeit an der Hochschule für Bildende Künste Dresden, Fachklasse Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturfarbigkeit. Dresden: n. veröff. 2000

LINKE, Jens / DÄHNE, Arnulf: Phenomenological systematic on stone deterioration patterns. Unveröff.. Ergebnisbericht des EU-Projektes MEDISTONE – Preservation of Ancient Mediterranean Sites in Term of their Ornamental and Building Stone (2006-2009). Mellingen: n. veröff. 2009

LUDWIG, K. Thomas: Werkstoffe. In: Kassing, Rainer (Hg.): Festkörper (= Lehrbuch der Experimentalphysik Band 6). 2. überarbeitete Auflage. Berlin, New York: Verlag Walter de Gruyter 2005, S. 821-950

MATTEINI, Mauro: Il metodo del bario nel restauro degli affreschi. In: Università Internazionale dell'Arte (Hg.): Critica d'Arte, 3. Serie, Nr. 44. Florenz 1979. S. 182-184

MATTEINI, Mauro: Mineralische Festigungsmittel zur Konservierung von Objekten aus porösem Material aus dem Bereich der Kunst und Archäologie. In: Leitner, Heinz / Siedel, Heiner (Hg.): Mauersalze und Architekturoberfläche. Dresden: Hochschule für Bildende Künste 2003. S. 173-184

MEHLMANN, Michael: Bestimmung von chemisch-mineralogischen Kennwerten sowie Untersuchungsmethoden. In: Knöfel, Dietbert; Schubert, Peter (Hg.): Handbuch Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege. Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege. Berlin: Verlag Ernst&Sohn 1993. S. 39-53

MISCHKE, Peter: Filmbildung in modernen Lacksystemen. Hannover: Vincentz Network 2007

NEHROTH, Günter; VOLLENSCHAAR, Dieter: Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz. 2. vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag 2011

NEY, Paul: Der Einfluß der Erhärtungsbedingungen auf die Kristallisationsformen des Calciumcarbonates. (= Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 1719). Köln/Opladen: Deutscher Verlag 1966

NEY, Paul: Einfluß der Mörtelbestandteile und der Mörtelherstellung auf die Eigenschaften von Frischmörteln. Köln, Opladen: Westdeutscher Verlag 1965

OBERMEIER, Christoph: Datenerfassung und Datenspeicherung in der denkmalpflegerischen Praxis: die Datenbank des DBU-Projekts „Erforschung und Erhaltung historischer Putze und Mörtel“. In: Mittelalterliche Putze und Mörtel im Land Brandenburg. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege Nr.9. Potsdam: Potsdamer Verlagsbuchhandlung 1998. S. 131-140

PHILIPPOT, Paul: Die Wandmalerei. Entwicklung Technik Eigenart. Lizenzausgabe. Leipzig: Verlag Koehler & Amelang 1983

PIASZCZYNSKI, Ewa: Konservierung und Restaurierung von architektonischen Details aus Stuck. Injektionsmassen und Schutzschlämmen auf der Basis dispergierten Weißkalkhydrat. In: Hoernes, Martin (Hg.): Hoch- und spätmittelalterlicher Stuck. Material – Technik – Stil – Restaurierung. Regensburg: Verlag Schnell & Steiner 2002. S. 193-198

PIASZCZYNSKI, Ewa; EGLOFFSTEIN, Petra: Entwicklung von Festigungsmittel. In: Institut für Steinkonservierung e.V. (Hg.): DBU-Projekt Az 18636, Modellvorhaben: Wirkung von Schutzbauten (Vorsorgemaßnahmen) auf die umweltschadensbedingten Verwitterungen von Sandsteinen am Beispiel des Nordportals der Benediktinerabtei Tholey (Saarland), Abschlussbericht, Mainz: IfS 2007. S. 67-140

PIASZCZYNSKI, Ewa; WOLF, Verena: The Combination of Nano-Lime and Silicic Acid Ester for Stone Conservation. In: KRÜGER, Markus (Hg.): Cultural Heritage Preservation. Proceedings of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation. Berlin, Germany, September 26 to 28, 2011. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2011. S. 254-261

PETZET, Michael: Reversibilität – das Feigenblatt in der Denkmalpflege? In: ICOMOS Nationalkomitee der Bundesrepublik Deutschland: Reversibilität das Feigenblatt der Denkmalpflege? (= ICOMOS Hefte des Deutschen Nationalkomitees VIII). Stuttgart: Reichert Verlag 1992. S.9-14

PRICE, Clifford A.: The Consolidation of Limestone Using a Lime Poultrice and Lime-water. In: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hg.): Natursteinkonservierung. Arbeitsheft 31. München: Lipp Verlag 1985. S. 148-151

PULKER, H.K.: Coatings on Glass. Second, revised edition. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1999

PURSCHE, Jürgen: Ursache und Wirkung. Die Problematik reaktiver Konservierungsmethoden bei Wandmalereien. In: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hg.): Konservierung von Wandmalerei. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Band 104. München: Lipp Verlag 2001. S. 11-29

PURSCHE, Jürgen: Historische Putze – Befunde in Bayern. Zu ihrer Typologie, Technologie, Konservierung und Dokumentation. In: Bachmann, K.-W. u.a. (Hg): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung. 2. Jahrgang, Heft 1. Worms: Wernersche Verlagsgesellschaft 1988. S. 7-52

RAMOS, Nuno M.M.; DE FREITAS, Vasco Peixoto: the Evaluation of Hygroscopic Inertia and Its Importance to the Hygrothermal Performance of Buildings. In: Delgado, J.M.P.Q. (Hg.): Heat and Mass Transfer in Porous Media. Heidelberg: Springer Verlag 2012. S. 25-46

RATHGEN, Friedr.; BORRMANN, R.: Tränkung von Gipsabgüssen zur Konservierung. In: Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte (Hg.): Zeitschrift für Ethnologie. 36. JG. Berlin: Verlag v. Ahser & Co. 1904. S. 163-165

REINHARDT, Hans-Wolf: Ingenieurbaustoffe. 2. überarbeitete Auflage. Berlin: Verlag Ernst & Sohn 2010

REUL, Horst: Die Verfestigung von Natursteinen, historischem Putz und Mörteln mit wäßriger Lithiumsilikatlösung. In: Arbeitsblätter für Restauratoren Jg. 26 1993, Nr.2, S.. 278-281

RIECKE, Uta-Barbara: Hinterfüllmaterialien für Hohlstellen in Verputzen.
(In: Jägers, Elisabeth (Hrsg.): Dispergiertes Weisskalkhydrat für die Restaurierung und Denkmalpflege. Altes Bindemittel – Neue Möglichkeiten. Petersberg: Imhof Verlag 2000. S. 73-86

ROMANOWSKI, Anja: Calciummethanolat in der Wandmalereikonservierung. Untersuchungen zur Eignung als Festigungsmittel. Unveröffentlichte Seminararbeit an der Hochschule für Bildende Künste Dresden, Fachklasse Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturfarbigkeit.. Dresden: n. veröff. 2003

ROOSS, Helmut: Schäden an geputzten Fassaden. Phänomene – Ursachen – Hilfen zur Beurteilung. In: Venzmer, H. (Hg.): 6. Hanseatische Sanierungstage des Bauwesens. Instandsetzung von umweltbelasteten Denkmalfassaden. (= FAS-Schriftenreihe, Heft 6). Berlin: Verlag Bauwesen 1995. S. 125-135

SALMANG, Herrmann; SCHOLZE, Horst: Keramik. 7. vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag 2007

SCHÖNBURG, Kurt: Techniken der Wandmalerei am Bauwerk: Planung, Ausführung und Bewertung. Berlin: Beuth Verlag 2012

SCHÖNHOFER, Katrin: Calciumhydroxid-Sol, Ein Festigungsmittel für historische Putze. Nicht veröffentlichte Diplomarbeit der Fachhochschule Köln, Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft. Köln: n. veröff. 2006.

SCHMUDERER, Joseph: Über die Festigung von Wandmalereien; In: Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.): Deutsche Kunst und Denkmalpflege. JG 1953, Heft1, Berlin: Deutscher Kunstverlag 1953. S. 51-52

SCHOSTAK, V.; FÜNDERS, W.; RECKER, B.; DRESCHER, G.; JULING, H.: Konservierungstechniken für die Wandmalerei in der Kirche in Eilsum/Ostfriesland. In: Restauo, Ausgabe 4 (1995), München: Callwey Verlag 1995. S. 252-258

SCHUBERT, Peter: Bestimmung von physikalisch-mechanischen Kennwerten sowie Prüfverfahren. In: Knöfel, Dietbert; Schubert, Peter (Hg.): Handbuch Mörtel und Steinerzeugungsstoffe in der Denkmalpflege. Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbandforschung zur Denkmalpflege. Berlin: Verlag Ernst & Sohn 1993. S. 54-85

SCHWUGER, Milan Johann: Lehrbuch der Grenzflächenchemie. Stuttgart/ New York: Georg Thieme Verlag 1996

SIEDEL, Heiner: Dolomitmörtel und Salzbildung an historischer Bausubstanz. In: Leitner, Heinz / Siedel, Heiner (Hg.): Mauersalze und Architekturoberfläche. Dresden: Hochschule für Bildende Künste 2003. S. 57-64

SIMON, Stefan: Historische Mörtel und Putze. Möglichkeiten und Grenzen der wissenschaftlichen Analytik. In: Pursche, Jürgen (Hg.): Historische Architekturoberflächen. Kalk – Putz – Farbe. ICOMOS Hefte des deutschen Nationalkomitees Band 39. München: Lipp Verlag 2003. S. 178-182

SING, K.S.W.; EVERETT, D.H.; HAUL, R.A.W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, M.L.; ROUQUEROL, R.A.J.; SIEMIENIEWSKA, T.: Reporting physical adsorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. (Recommendations 1984). Pure & Applied Chemistry. Vol.57, No.4. IUPAC: 1985. S. 603-619

SINOS, Stefan: Über die Prinzipien der Konservierung und Restaurierung von historischen Denkmälern und der sog. „Charta von Venedig“ In: Schmidt, Hartwig (Hg.): Erhaltungskonzepte. Methoden und Maßnahmen zur Sicherung historischer Bauwerke. Sonderforschungsbereich 315. Universität Karlsruhe. Sonderband 1990. Berlin: Verlag Ernst & Sohn 1993. S. 41-50

STARK, Jochen / WICHT, Bernd: Geschichte der Baustoffe. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag 1998

STEINBRECHER, Manfred: Historischer Gipsmörtel in Mitteleuropa. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006

STRÄHLE, Joachim / SCHWEDA, Eberhard: Jander/Blasius Lehrbuch der analytischen und präparativen anorganischen Chemie. 16., überarbeitete Auflage. Stuttgart: Hirzel Verlag 2006

TAUBERT, Peter: Restaurierung der Fassadenmalereien im Kloster Marienthal. In: Boué, Andreas (Hg.): Historische Fassadenputze. Erhaltung und Rekonstruktion. 3. Workshop des Institut für Bauchemie Leipzig e.V. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2001. S. 151-169

TORRACA, G.: Lösungsmittel und deren Lösungseigenschaften für restauratorische Probleme. In: Banik, Gerhard; Krist, Gabriela (Hg.): Lösungsmittel in der Restaurierung. (=Restaurierung – Konservierung - Technologie Band 1). Wien: Verlag Der Apfel 1984. S. 23-114

VIERL, Peter: Putz und Stuck. Herstellen Restaurieren. München: Callwey Verlag 1984

VISSER, H.: Die Verbreitung von Gipsrohstoffen und ihre Verwendung in historischen Bauten. In: Auras, Michael/ Zier Hans-Werner: Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an Fassaden. WTA-Schriftenreihe Heft 30. München: WTA Publications 2008. S.15-22

VITRUV: De Architectura Libri Decem. Neugesetzte und überarbeitete Auflage nach der Ausgabe Berlin 1908. Wiesbaden: Matrixverlag 2004.

WEBER, Helmut: Putze und Mörtel – Zusammenstellung der neuen Normen und Richtlinien. In: Fraunhofer IRB Verlag (Hg): Der Bausachverständige. Zeitschrift für Bauschäden, Grundstückswert und gutachterliche Tätigkeit. 4. Jahrgang, Heft 1. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2008. S. 16-19

WEDLER, Gerd: Lehrbuch der Physikalischen Chemie. Fünfte, vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag 2004

WEHLTE, Kurt: Technische Auskünfte: Kalksinterwasser als Konservierungsmittel. In: Maltechnik. Technische Mitteilungen für Malerei und Bildpflege. 64. Jahrgang, Heft 1, München: Callwey 1958. S. 22

WEHNER, Heike / WÖRZ, Stefan / HAMMER, Ivo: Wirksamkeit und Verhalten von Festigungen bindemittelreduzierter Malschichten mit Produkten auf Kieselsäurebasis. In: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hg.): Konservierung von Wandmalerei. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Band 104. München: Lipp Verlag 2001. S. 157-167

WEISSENBACH, Johannes; NEUBARTH, Karl: Die Restaurierung der Südfassade der ehemaligen Bibliothek, Kartause Mauerbach. In: Putzfassaden in Europa um 1900. Studien zur Technologie und Restaurierung. Österreichisches Bundesdenkmalamt (Hg.): Arbeitshefte zur Baudenkmalpflege / Kartause Mauerbach. Wien 1997

WENDLER, Eberhard: Hinterfüllung und Festigung mit dem KSE-Modulsystem. in: Boué, Andreas (Hg.): Historische Fassadenputze. Erhaltung und Rekonstruktion. 3. workshop des Institut für Bauchemie Leipzig e.V. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2001. S. 75-77

WESCHE, Karlhans: Baustoffe für tragende Bauteile Band 1. Grundlagen. 3. erw. u. überarb. Auflage. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag 1996

WINNACKER, Karl / BIENER, Hans: Grundzüge der Chemischen Technik. München, Wien: Hanser Verlag 1974

WISSER, Stefan: Historische und moderne Mörtel im Verbund mit Naturstein. Chemisch-mineralogische und mörteltechnische Eigenschaften. (= Hochschulsammlung Naturwissenschaft Mineralogie Band 1). Freiburg: Hochschulverlag 1989

WITTNEBEN, Ulrich: Untersuchungen zur Reaktionsfähigkeit und Viskosität wässriger Kalkhydratsuspensionen. Dissertation RWTH Aachen. Köln: Hansen Verlag 1980

WTA – Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): WTA-Merkblatt 3-13-01/D. Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen. München: WTA publications 2003

ZALEWSKI, Władysław; STEC, Mieczysław: Rytowana romańska posadzka w kolegiacie wiślickiej. Studium konserwatorskie (= Studia i Materiały. Wydział u konserwacji i restauracji. Dzieł sztuki. Akademii sztuk pięknych w Krakowie. Tom IV). Krakow: Wydawnictwo Literackie. 1994

ZEUGSWETTER, E.: Strukturelle Festigung von historischen Putzen. In: Venzmer, Helmut (Hrsg.): Altbausanierung 3. Bauphysik und Bausanierung: 19. Hanseatische Sanierungstage vom 13. Bis 15. November 2008 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag. 2008, S. 257-260

Aktenverzeichnis

Archiv des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen

Objektakte Schloss Limbach/ OT Leuben, o. Nr.

Objektakte Schloss Dahlen, o. Nr.

Anhang A

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-01/ Blatt 1/1

Aufgabe: Verhalten von unmodifizierten Nanodispersionen als Festigungsmittel für Lockersubstrate unterschiedlicher Porosität

Substrate: S1 Quarzsand 0,04...1,0 mm (Mischung von 5 Fraktionen, optimierte Sieblinie (FULLER))
 S2 Quarzsand 0,71...1,0 mm (Grobmischung mit enger Korngrößenverteilung)
 S3 Quarzmehl 0,125...0,15 mm (Feinmischung mit enger Korngrößenverteilung)

Festigungsmittel: CaLoSiL E25, IP25, NP25

Mengenansatz: 3g Substrat / 4g Festigungsmittel

Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette, Substrat im oben offenen Plastikbehälter (2,7x2,7cm)

Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Aushärtung: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Indikator: Phenolphthaleinlösung (0,1%ig in 70%igem Ethanol; aufgesprüht)

Tab 1

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Substrat	Nanodispersion	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Carbonatisierungsgrad
04.02.2009	10.02.2009		S1	E25	Festigung rel. homogen, oberflächlich weiße Haut		unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		S1	IP25	Festigung rel. homogen, weniger oberflächlich aufliegend		unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		S1	NP25	Festigung rel. homogen, keine Oberflächenanreicherung		unvollständig
10.02.2009	24.02.2009		S2	E25	Festigung rel. homogen, oberflächlich weiße Haut		unvollständig
10.02.2009	24.02.2009		S2	IP25	Festigung rel. homogen, dünner glänzender Weißschleier auf der Oberfläche		unvollständig
10.02.2009	24.02.2009		S2	NP25	Festigung in der Tiefe, keine sichtbare Ablagerung an der Oberfläche		unvollständig
10.02.2009	24.02.2009		S3	E25	Festigungsmittel als weiße ebene rauhe Schicht über dem Substrat, randlich starke Schwundrisse		unvollständig
10.02.2009	24.02.2009		S3	IP25	Festigungsmittel oberflächlich höher konzentriert (starke Weißfärbung) aber keine eigene Schicht bildend		unvollständig
10.02.2009	24.02.2009		S3	NP25	Festigung in der Tiefe, keine sichtbare Ablagerung an der Oberfläche		unvollständig

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-02/ Blatt 1/1

Aufgabe: Verhalten von unmodifizierten Nanodispersionen als Festigungsmittel für Lockersubstrate bei unterschiedlichen Verdunstungsbedingungen

Substrat: S1 Quarzsand 0,04...1,0 mm (Mischung von 5 Fraktionen, optimierte Sieblinie (FULLER))
Festigungsmittel: CaLoSiL E25, IP25, NP25
Mengenansatz: 3g Substrat / 4g Festigungsmittel
Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette, Substrat im oben offenen Plastikbehälter (2,7x2,7cm)
Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20°C, ca. 35-40% RF)
Bedingungen Aushärtung: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20°C, ca. 35-40% RF)
 Abdeckung mit Zellstoff
Indikator: Phenolphthaleinlösung (0,1%ig in 70%igem Ethanol; aufgesprüht)

Tab.1

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Nano-dispersion	Abdeckung nach Applikation	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Carbonatisierungsgrad
11.02.2009	24.02.2009		E25	1 Lage Zellstoff	Festigung rel. homogen, oberflächlich weiße Haut		unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		IP25	1 Lage Zellstoff	Festigung rel. homogen, kaum Anreicherung an der Oberfläche		unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		NP25	1 Lage Zellstoff	Festigungsmittel offb. nur bedingt in der Tiefe, oberflächlich als dünne Haut, teils als Schicht aufliegend		teilweise unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		E25	4 Lagen Zellstoff	Festigung offb. rel. homogen, oberflächlich weiße Haut		teilweise unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		IP25	4 Lagen Zellstoff	Festigung offb. rel. homogen, geringe Anreicherung an der Oberfläche		unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		NP25	4 Lagen Zellstoff	Festigungsmittel offb. nur bedingt in der Tiefe, oberflächlich weitgehend als Schicht aufliegend		teilweise unvollständig

Anhang A

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-03/ Blatt1/2

Aufgabe: Verhalten von unmodifizierten Nanodispersionen als Festigungsmittel für Lockersubstrate unter verschiedenen Bedingungen während der Evaporation und Aushärtung:
Verteilung, Festigungswirkung, Carbonatisationsgrad

Substrat: S1 Quarzsand 0,04...1,0 mm (Mischung von 5 Fraktionen, optimierte Sieblinie (FULLER))
Festigungsmittel: CaLoSiL E25, E25AC, E25H, IP25, IP25AC, IP25H, NP25
Mengenansatz: 6g Substrat / 8g Festigungsmittel
Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette, Substrat im oben offenen Plastikbehälter (2,7x2,7cm)
Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)
Bedingungen Aushärtung: konfektioniert (Klimakammer), zusätzliche CO₂-Zufuhr (3 Vol%)
Indikator: Phenolphthaleinlösung (0,1%ig in 70%igem Ethanol; aufgesprüht)

Bedingungen Aushärtung:	Datum Behandlg.:	Datum Auswertg.:	Nano-dispersion	Aufkonzentration	Verfestigung	Färbung nach Indikatorbehandlung		
40%RF / 20 °C	10.06.2009	18.06.2009	E25	unten	keine	keine		
			E25AC	unten	keine	keine		
			E25H	gering unten	keine	keine		
			IP25	oben	gering	mäßig		
			IP25AC	oben	keine	mäßig		
			IP25H	oben	keine	mäßig		
55%RF / 20 °C	04.06.2009	10.06.2009	NP25	oben, gering unten	keine	gering		
			E25	unten	keine	keine		
			E25AC	gering unten	keine	keine		
			E25H	gering unten	keine	keine		
			IP25	oben	keine	mäßig		
			IP25AC	oben	gering	mäßig		
70%RF / 20 °C	19.05.2009	04.06.2009	IP25H	oben	keine	mäßig		
			NP25	gering oben, unten	keine	gering		
			E25	unten	keine	keine		
			E25AC	unten	keine	keine		
			E25H	unten	keine	keine		
			IP25	gering oben und unten	keine	gering		
85%RF / 20 °C	13.05.2009	19.05.2009	IP25AC	gering oben und unten	keine	gering		
			IP25H	oben	keine	gering		
			NP25	unten	gering	keine		
			E25	gering oben, unten	keine	keine		
			E25AC	gering oben, unten	keine	keine		
			E25H	gering oben, unten	keine	keine		
			IP25	oben	keine	keine		
			IP25AC	oben	keine	keine		
			IP25H	oben	keine	keine		
			NP25	gering oben, unten	keine	keine		

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-03/ Blatt2/2

Tab.1: Proben nach Aushärtung

	E25	E25AC	E25H	IP25	IP25AC	IP25H	NP25
40%RF 20°C 3% CO ₂							
55%RF 20°C 3% CO ₂							
70%RF 20°C 3% CO ₂							
85%RF 20°C 3% CO ₂							

Tab.2: Proben nach Indikatorbehandlung (Phenolphthaleinlösung)

	E25	E25AC	E25H	IP25	IP25AC	IP25H	NP25
unkontaminierte Laborbedingungen							
40%RF 20°C 3% CO ₂							
55%RF 20°C 3% CO ₂							
70%RF 20°C 3% CO ₂							
85%RF 20°C 3% CO ₂							

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-04/ Blatt 1/4

Aufgabe: Verhalten von unmodifizierten Nanodispersionen als Festigungsmittel für Lockersubstrate mit Gehalt an löslichen Salzen (trocken) unter unkonfektionierten Laborbedingungen

Substrat: S1 Quarzsand 0,04...1,0 mm (Mischung von 5 Fraktionen, optimierte Sieblinie (FULLER) (vgl. Bericht in Anhang B)
Salze: CaCl₂, KNO₃, MgSO₄ und NaCl trocken, im Mörser zerkleinert

Festigungsmittel: CaLoSiL E25, IP25, NP25

Mengenansatz: 15g Substrat mit anteilig 5,0 bzw. 0,5 bzw. 0,1 Ma% Salz / 5g Festigungsmittel

Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette, Substrat im oben offenen Plastikbehälter (2,7x2,7cm)

Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Aushärtung: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Indikator: Phenolphthaleinlösung (0,1%ig in 70%igem Ethanol; aufgesprüht)

Tab1.: Vergleichsproben ohne Salzgehalt

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Salz im Substrat	Nano-dispersion	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Karbonatisierungsgrad
26.02.2009	12.03.2009		kein	E25	Festigung zumindest oberflächlich sehr gut, keine sichtbare Verfärbung		unvollständig
26.02.2009	12.03.2009		kein	IP25	Festigung zumindest oberflächlich sehr gut, leichte Weißfärbung in der Mitte		unvollständig
26.02.2009	12.03.2009		kein	NP25	Festigung zumindest oberflächlich sehr gut, keine sichtbare Verfärbung		unvollständig

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-04/ Blatt 2/4

Tab.2: 5,0 Ma% Salzgehalt im Substrat

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Salz im Substrat	Nano-dispersion	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Karbonatisierungsgrad
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% CaCl ₂ im Substrat	E25	nach ca. 4 Stunden: Flokkulation des Festigers. Nach Aushärtung: oberflächlich aufliegende Kruste, starke Schwundrisse		vollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% CaCl ₂ im Substrat	IP25	Ergebnis entspricht optisch dem entsprechenden Test mit E25		vollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% CaCl ₂ im Substrat	NP25	auffliegende Kruste, Schwundrisse treten erst sehr spät und geringer als bei IP25 auf		vollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% MgSO ₄ im Substrat	E25	Festiger tw. als dünne weiße Kruste aufliegend, sehr feines Schwundrissnetz		unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% MgSO ₄ im Substrat	IP25	Festiger tw. als dünne weiße Kruste aufliegend, unregelmäßiges Netz feiner Schwundrisse, randliche Schwundrisse		unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% MgSO ₄ im Substrat	NP25	Festiger tw. als dünne weiße stark glänzende Kruste aufliegend, Risse nur mittig		unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% KNO ₃ im Substrat	E25	Ergebnis entspricht optisch Test mit CaCl ₂ , Schwindverhalten ist stärker: großscholliges Schwundrissnetz Maschenweite 2-10mm		in geringem Maße unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% KNO ₃ im Substrat	IP25	Ergebnis entspricht optisch entspr. Test mit EP25. Schwundrissnetz sehr eng: Maschenweite max 1mm		in geringem Maße unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% KNO ₃ im Substrat	NP25	Ergebnis entspricht optisch entspr. Test mit EP25 und IP 25. Schwundrissnetz eng: Maschenweite 1-1,5 mm		unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% NaCl im Substrat	E25	Festiger bildet oberflächige Kruste, rel. großschollig und sehr locker		in geringem Maße unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% NaCl im Substrat	IP25	Ergebnis entspricht optisch entspr. Test mit E25. Schwundrissnetz sehr eng		in geringem Maße unvollständig
04.02.2009	10.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% NaCl im Substrat	NP25	Ergebnis entspricht optisch entspr. Test mit E25 und IP 25, Kruste etwas kompakter und stabiler, Schwundrissnetz eng		unvollständig

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-04/ Blatt 3/4

Tab.3: 0,5 Ma% Salzgehalt im Substrat

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Salz im Substrat	Nano-dispersion	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Karbonatisierungsgrad
26.02.2009	12.03.2009		anteilig, 0,5 Ma% CaCl ₂ im Substrat	E25	oberflächlich aufliegende dünne weiße Kruste, einzelne randliche Schwundrisse		vollständig
26.02.2009	12.03.2009		anteilig, 0,5 Ma% CaCl ₂ im Substrat	IP25	oberflächlich aufliegende dünne weiße Kruste, rel. starke Schwundrisse v.a. randlich		vollständig
26.02.2009	12.03.2009		anteilig, 0,5 Ma% CaCl ₂ im Substrat	NP25	oberflächlich aufliegende dünne weiße, teils glänzende Kruste, rel. starke randliche Schwundrisse		vollständig
26.02.2009	13.03.2009		anteilig, 0,5 Ma% KNO ₃ im Substrat	E25	oberflächlich aufliegende dünne weiße Kruste, rel. viele versch. starke Schwundrisse		teilweise unvollständig
26.02.2009	13.03.2009		anteilig, 0,5 Ma% KNO ₃ im Substrat	IP25	oberflächlich aufliegende dünne weiße Kruste, Schwundrissnetz		teilweise unvollständig
26.02.2009	13.03.2009		anteilig, 0,5 Ma% KNO ₃ im Substrat	NP25	oberflächlich aufliegende weiße Kruste, rel. viele sehr feine Schwundrisse		teilweise unvollständig
26.02.2009	13.03.2009		anteilig, 0,5 Ma% MgSO ₄ im Substrat	E25	oberflächlich weißer Schleier		teilweise unvollständig
26.02.2009	13.03.2009		anteilig, 0,5 Ma% MgSO ₄ im Substrat	IP25	oberflächlich weißer Schleier		unvollständig
26.02.2009	13.03.2009		anteilig, 0,5 Ma% MgSO ₄ im Substrat	NP25	oberflächlich weißer Schleier		unvollständig

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-04/ Blatt 4/4

Tab.4: 0,1 Ma% Salzgehalt im Substrat

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Salz im Substrat	Nano-dispersion	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Karbonatisierungsgrad
26.02.2009	13.03.2009		anteilig. 0,1 Ma% CaCl ₂ im Substrat	E25	oberflächlich aufliegende dünne weiße Kruste, wenige Schwundrisse		fast vollständig
26.02.2009	13.03.2009		anteilig. 0,1 Ma% CaCl ₂ im Substrat	IP25	oberflächlich aufliegende stärkere weiße Kruste, verschieden starke Schwundrisse		fast vollständig
26.02.2009	13.03.2009		anteilig. 0,1 Ma% CaCl ₂ im Substrat	NP25	oberflächlich aufliegende dünne weiße Kruste, wenige Schwundrisse		fast vollständig
13.03.2009	24.03.2009		anteilig. 0,1 Ma% KNO ₃ im Substrat	E25	oberflächlich aufliegende weiße Kruste, teils in Schollen aufgewölbt, rel. starke Schwundrisse,		teilweise unvollständig
13.03.2009	24.03.2009		anteilig. 0,1 Ma% KNO ₃ im Substrat	IP25	oberflächlich aufliegende dünne weiße Kruste, Schwundrissnetz		teilweise unvollständig
13.03.2009	24.03.2009		anteilig. 0,1 Ma% KNO ₃ im Substrat	NP25	oberflächlich weißer Schleier, lokal glänzende weiße Kruste, kaum Risse		unvollständig

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-05/ Blatt 1/1

Aufgabe: Verhalten von unmodifizierten Nanodispersionen als Festigungsmittel für Lockersubstrate mit Gehalt an Salzlösungen unter unkonfektionierten Laborbedingungen

Substrat: S1 Quarzsand 0,04...1,0 mm (Mischung von 5 Fraktionen, optimierte Sieblinie (FULLER)
Salzlösungen: 20%ige wässrige Lösungen von CaCl₂, KNO₃ und NaCl

Festigungsmittel: CaLoSiL E25, IP25, NP25

Mengenansatz: 3g Substrat + 0,8 ml Salzlösung / 4g Festigungsmittel

Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette, Substrat im oben offenen Plastikbehälter (2,7x2,7cm)

Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Aushärtung: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Indikator: Phenolphthaleinlösung (0,1%ig in 70%igem Ethanol; aufgesprüht)

Tab1

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Salz im Substrat	Nano-dispersion	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Karbonatisierungsgrad
11.02.2009	24.02.2009		20%ige NaCl Lösung	E25	Festiger liegt als kompakte, glatte, glänzende Schicht auf, oberflächlich auskristallisiertes Salz, seitliche Schwundrisse		in geringem Maße unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		20%ige NaCl Lösung	IP25	Festiger liegt als kompakte, glatte, glänzende Schicht auf, oberflächlich dendritisch auskristallisiertes Salz, v.a. seitlich Schwundrisse		in geringem Maße unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		20%ige NaCl Lösung	NP25	Festigungsmittel liegt als kompakte, sehr glatte, glänzende Schicht auf, einzelne Salzkristallationen, seitliche Schwundrisse		teilweise unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		20%ige CaCl ₂ Lösung	E25	Festigungsmittel liegt als sehr kompakte, glatte Schicht auf, seitliche Schwundrisse		vollständig
11.02.2009	24.02.2009		20%ige CaCl ₂ Lösung	IP25	Festigungsmittel liegt als kompakte, glatte, glänzende Schicht auf, seitliche Schwundrisse		nahezu vollständig
11.02.2009	24.02.2009		20%ige CaCl ₂ Lösung	NP25	Festigungsmittel liegt als kompakte, glatte, glänzende Schicht auf, seitliche Schwundrisse		nahezu vollständig
11.02.2009	24.02.2009		20%ige KNO ₃ Lösung	E25	Festigungsmittel liegt als kompakte, glatte, stark glänzende Schicht auf, oberflächlich netzartige Struktur, seitlich Schwundrisse		in geringem Maße unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		20%ige KNO ₃ Lösung	IP25	Festigungsmittel liegt als kompakte, glatte Schicht auf, oberflächlich netzartige Struktur, seitlich Schwundrisse		in geringem Maße unvollständig
11.02.2009	24.02.2009		20%ige KNO ₃ Lösung	NP25	Festigungsmittel liegt als sehr kompakte, glatte Schicht auf, seitliche Schwundrisse		nahezu vollständig

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-06/ Blatt 1/2

Aufgabe: Verhalten von unmodifizierten Nanodispersionen als Festigungsmittel für Lockersubstrate mit Gehalt an löslichen Salzen (trocken) unter extrem trockenen Umgebungsbedingungen

Substrat: S1 Quarzsand 0,04...1,0 mm (Mischung von 5 Fraktionen, optimierte Sieblinie (FULLER)
Salze: CaCl₂, KNO₃ und NaCl trocken, im Mörser zerkleinert

Festigungsmittel: CaLoSiL E25, IP25, NP25

Mengenansatz: 3g Substrat mit anteilig 5 Ma% Salz / 4g Festigungsmittel

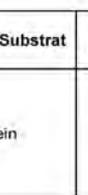
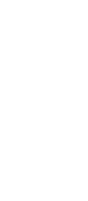
Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette, Substrat im oben offenen Plastikbehälter (2,7x2,7cm)

Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Aushärtung: im Exsikkator bei ca. 0% RF

Indikator: Phenolphthaleinlösung (0,1%ig in 70%igem Ethanol; aufgesprüht)

Tab1.: Vergleichsproben ohne Salzgehalt

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Salz im Substrat	Nano-dispersion	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Karbonatisierungsgrad
12.02.2009	26.02.2009		kein	E25	homogene Festigung, keine optische Aufhellung an der Oberfläche erkennbar		unvollständig
12.02.2009	26.02.2009		kein	IP25	homogene Festigung, keine optische Aufhellung an der Oberfläche erkennbar		unvollständig
12.02.2009	26.02.2009		kein	NP25	war im Exsikkator nach 2 Wochen noch nicht ausgehärtet / homogene Festigung, keine optische Aufhellung an der Oberfläche erkennbar		unvollständig

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-06/ Blatt 2/2

Tab.2: 5,0 Ma% Salzgehalt im Substrat

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Salz im Substrat	Nano-dispersion	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Karbonatisierungsgrad
12.02.2009	26.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% CaCl ₂ im Substrat	E25	Aushärtung des Festigungsmittels als kompakt aufliegende Kruste, starke Aufwölbung von den Rändern her		vollständig
12.02.2009	26.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% CaCl ₂ im Substrat	IP25	Aushärtung des Festigungsmittels als kompakt aufliegende Kruste, starke Aufwölbung von den Rändern her		vollständig
12.02.2009	26.02.2009		anteilig. 5,0 Ma% CaCl ₂ im Substrat	NP25	war im Exsikkator nach 2 Wochen noch nicht ausgehärtet / Festigungsmittel als kompakte, aufgerollte Schollen auf der Oberfläche		vollständig
29.04.2009	08.05.2009		anteilig. 5,0 Ma% KNO ₃ im Substrat	E25	Festigungsmittel als kompakte, aufgewölbte Schollen auf der Oberfläche (Schollen bis 2x2 mm)		unvollständig
29.04.2009	08.05.2009		anteilig. 5,0 Ma% KNO ₃ im Substrat	IP25	Festigungsmittel als kompakte, aufgewölbte Schollen auf der Oberfläche (Schollen bis 1x1 mm)		unvollständig
29.04.2009	08.05.2009		anteilig. 5,0 Ma% KNO ₃ im Substrat	NP25	war im Exsikkator nach 2 Wo. noch nicht ausgehärtet / mittig große, stark aufgerollte, randlich kleinere aufgewölbte Schollen a. d. Of.		unvollständig
29.04.2009	08.05.2009		anteilig. 5,0 Ma% NaCl im Substrat	E25	Festigungsmittel als kompakte, stark aufgewölbte Schollen auf der Oberfläche (Schollen bis 1,5x1,5 mm)		unvollständig
29.04.2009	08.05.2009		anteilig. 5,0 Ma% NaCl im Substrat	IP25	Festigungsmittel als kompakte, aufgewölbte Schollen auf der Oberfläche (Schollen bis 1x1 mm)		unvollständig
29.04.2009	08.05.2009		anteilig. 5,0 Ma% NaCl im Substrat	NP25	war im Exsikkator nach 2 Wo. noch nicht ausgehärtet / mittig größere, stark aufgerollte, randlich kleinere aufgewölbte Schollen a. d. Of.		unvollständig

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-07/ Blatt 1/2

Aufgabe: Verhalten von unmodifizierten Nanodispersionen als Festigungsmittel für Lockersubstrate mit Gehalt an löslichen Salzen (trocken) unter extrem feuchten Umgebungsbedingungen

Substrat: S1 Quarzsand 0,04...1,0 mm (Mischung von 5 Fraktionen, optimierte Sieblinie (FULLER)
Salze: CaCl₂, KNO₃ und NaCl trocken, im Mörser zerkleinert

Festigungsmittel: CaLoSiL E25, IP25, NP25

Mengenansatz: 3g Substrat mit anteilig 5 Ma% Salz / 4g Festigungsmittel

Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette, Substrat im oben offenen Plastikbehälter (2,7x2,7cm)

Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Aushärtung: im Exsikkator bei ca. 100% RF, nach 21 Tagen unkonfektionierte Laborbedingungen

Indikator: Phenolphthaleinlösung (0,1%ig in 70%igem Ethanol; aufgesprüht)

Tab1.: Vergleichsproben ohne Salzgehalt

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Salz im Substrat	Nano-dispersion	Beobachtungen	Probe nach Indikatorbehandlung	Karbonatisierungsgrad
26.02.2009	10.03.2009		kein	E25	Festiger als oberflächige, krakelurartig gerissene Haut, teils aufgewölbte Schollen bis zu 5qmm		unvollständig
26.02.2009	10.03.2009		kein	IP25	Festiger als oberflächige, krakelurartig gerissene Haut, Schollen bis zu 2qmm		unvollständig
26.02.2009	10.03.2009		kein	NP25	Festiger als oberflächige, krakelurartig gerissene Haut, teils aufgewölbte Schollen bis zu 5qmm		unvollständig

Anhang A

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 1-07/ Blatt 2/2

Tab.2: 5,0 Ma% Salzgehalt im Substrat

Datum Behandlung	Datum Auswertung	Probe nach Aushärtung	Salz im Substrat	Nano- dispersion	Beobachtungen	Probe nach Indi- katorbehandlung	Karbonati- sierungsgrad
26.02.2009	10.03.2009		anteilig. 5,0 Ma% CaCl₂ im Substrat	E25	war nach 3 Wo. noch nicht ausgehärtet / Festiger als kompakte, rel. glatte, nur randlich aufgewölbte und tw. abgerissene Kruste		vollständig
26.02.2009	10.03.2009		anteilig. 5,0 Ma% CaCl₂ im Substrat	IP25	war nach 3 Wo. noch nicht ausgehärtet / Festiger als kompakte, rel. glatte, nur randlich aufgewölbte Kruste		vollständig
26.02.2009	10.03.2009		anteilig. 5,0 Ma% CaCl₂ im Substrat	NP25	war nach 3 Wo. noch nicht ausgehärtet / Festiger als kompakte, rel. glatte Kruste		vollständig
26.02.2009	11.03.2009		anteilig. 5,0 Ma% KNO₃ im Substrat	E25	war nach 3 Wo. noch nicht ausgehärtet / Festiger als rel. kompakte unebene Kruste, kaum rissig -nur randliche Abrisse		unvollständig
26.02.2009	11.03.2009		anteilig. 5,0 Ma% KNO₃ im Substrat	IP25	war nach 3 Wo. noch nicht ausgehärtet / Festiger als rel. kompakte unebene Kruste, kaum rissig -nur randliche Abrisse		unvollständig
26.02.2009	11.03.2009		anteilig. 5,0 Ma% KNO₃ im Substrat	NP25	war nach 3 Wo. noch nicht ausgehärtet / Festiger als rel. kom-pakte unebene glänzen-de Kruste, kaum rissig -nur randliche Abrisse		teilweise unvollständig
26.02.2009	10.03.2009		anteilig. 5,0 Ma% NaCl im Substrat	E25	war nach 3 Wo. noch nicht ausgehärtet / Festiger als rel. kompakte unebene Kruste, kaum rissig -nur randliche Abrisse		teilweise unvollständig
26.02.2009	10.03.2009		anteilig. 5,0 Ma% NaCl im Substrat	IP25	war nach 3 Wo. noch nicht ausgehärtet / Festiger als rel. kompakte unebene Kruste, kaum rissig -nur randliche Abrisse		in geringem Maße unvollständig
26.02.2009	10.03.2009		anteilig. 5,0 Ma% NaCl im Substrat	NP25	war nach 3 Wo. noch nicht ausgehärtet / Festiger als rel. kom-pakte unebene glänzen-de Kruste, kaum rissig v.a. randliche Abrisse		in geringem Maße unvollständig

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 2-01/ Blatt 1/1

Aufgabe:	Feststellung der Dauer bis zur vollständigen Verdunstung des Lösungsmittels bei CaLoSiL-getränkten Prüfkörpern unter konditionierten Klimabedingungen
Substrat:	laborseits hergestellte Mörtelprüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel
Vorbehandlung Probe:	Trocknen bei 104 °C bis zur Massenkonstanz
Festigungsmittel:	CaLoSiL NP25
Applikationstechnik:	Auftropfen mit Pipette bis zur Sättigung
Bedingungen Applikation:	unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)
Bedingungen Evaporation:	20 °C, 65%RF , Probe 2 zusätzlich in alkoholischer Atmosphäre (im Exsikkator über einer Schale mit Alkohol)

Probe Nr.	1-1	1-2	1-2	2
Einwaage vor Behandlung	61,88 g	61,52 g	62,11 g	64,02 g
nach einmaliger NP25 Tränkung	73,64 g	73,17 g	74,01 g	75,60 g
Menge aufgenommenes CaLoSiL	11,76 g	11,66 g	11,90 g	11,58 g
davon Lösungsmittel (N-Propanol)*	11,40 g	11,30 g	11,54 g	11,23 g
nach 1 Stunde	70,95 g	70,51 g	71,30 g	74,43 g
Alkohol verdunstet	2,69 g	2,67 g	2,71 g	1,18 g
% des Alkohols verdunstet	23,58 %	23,59 %	23,50 %	10,49 %
nach 2 Stunden	68,72 g	68,15 g	69,06 g	73,28 g
Alkohol verdunstet	4,92 g	5,02 g	4,96 g	2,33 g
% des Alkohols verdunstet	43,16 %	44,43 %	42,94 %	20,73 %
nach 3 Stunden	65,63 g	65,18 g	65,97 g	71,70 g
Alkohol verdunstet	8,01 g	7,99 g	8,04 g	3,90 g
% des Alkohols verdunstet	70,24 %	70,73 %	69,64 %	34,72 %
nach 3,75 Stunden	64,52 g	64,04 g	64,87 g	70,91 g
Alkohol verdunstet	9,12 g	9,13 g	9,14 g	4,69 g
% des Alkohols verdunstet	79,96 %	80,82 %	79,21 %	41,79 %
nach 4,5 Stunden	63,35 g	62,89 g	63,61 g	69,98 g
Alkohol verdunstet	10,29 g	10,28 g	10,41 g	5,63 g
% des Alkohols verdunstet	90,26 %	90,99 %	90,16 %	50,09 %
nach 5,5 Stunden	62,84 g	62,41 g	63,12 g	68,44 g
Alkohol verdunstet	10,80 g	10,76 g	10,89 g	7,16 g
% des Alkohols verdunstet	94,69 %	95,24 %	94,36 %	63,78 %
nach 20 Stunden	62,32 g	61,91 g	62,57 g	64,50 g
Alkohol verdunstet	11,31 g	11,26 g	11,44 g	11,11 g
% des Alkohols verdunstet	99,21 %	99,67 %	99,09 %	98,90 %
nach 24 Stunden	62,25 g	61,89 g	62,50 g	64,47 g
Alkohol verdunstet	11,39 g	11,28 g	11,51 g	11,14 g
% des Alkohols verdunstet	99,86 %	99,84 %	99,73 %	99,14 %

* Berechnung der enthaltenen Lösemittelmasse:

Dichte N-Propanol	0,8 g/cm ³
Masse N-Propanol je Liter	0,8 x 1000 = 800 g/dm ³
Masse Ca(OH) ₂ je Liter	25 g
Masse CaLoSiL NP25 je Liter	800 g + 25 g = 825 g
Quotient Lösemittelmasse/Gesamtmasse =	800 g / 825 g = 0,9697

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 2-02/ Blatt 1/1

Aufgabe: Überprüfung der Feststoffverteilung an getränkten Prüfkörpern während der Evaporation des Lösemittels unter konditionierten Klimabedingungen

Substrat: laborseits hergestellte Mörtelprüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel oder Gipsmörtel

Vorbehandlung Probe: Trocknen bis zur Massenkonstanz

Festigungsmittel: CaLoSiL NP25 bzw. E25

Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette bis zur Sättigung

Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20°C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Evaporation: 20°C, 65%RF

CaLoSiL NP25 / dolomitischer Kalkmörtel			
Dauer nach Behandlung	VR*	Beobachtung	Bild
2 Stunden	ca. 43%	Prüfkörper weist im gesamten Gefüge $(CaOH)_2$ auf, es sind keine Konzentrationsunterschiede festzustellen	
3 Stunden	ca. 70%	keine sichtbare Veränderung	
3,75 Stunden	ca. 80%	keine sichtbare Veränderung	
5,5 Stunden	ca. 95%	keine sichtbare Veränderung	
20 Stunden	ca. 99%	die $Ca(OH)_2$ Konzentration ist im Inneren gering, deutliche Konzentration an den Oberflächen	
24 Stunden	ca. 100%	$Ca(OH)_2$ ist fast ausschließlich an den Oberflächen konzentriert	

CaLoSiL E25 / dolomitischer Kalkmörtel			
Dauer nach Behandlung	VR*	Beobachtung	Bild
unmittelbar		Prüfkörper weist im gesamten Gefüge $(CaOH)_2$ auf, es sind keine Konzentrationsunterschiede festzustellen	
24 Stunden	100%	$Ca(OH)_2$ ist in der oberflächennahen Zone konzentriert, weitere Konzentrationszunahme an den Oberflächen	

CaLoSiL E25 / Gipsmörtel			
Dauer nach Behandlung	VR*	Beobachtung	Bild
unmittelbar		Prüfkörper weist im gesamten Gefüge $(CaOH)_2$ auf, es sind keine Konzentrationsunterschiede festzustellen	
24 Stunden	100%	$Ca(OH)_2$ ist im Kern des Prismas und an den Oberflächen konzentriert, dazwischen liegt ein Bereich ohne Feststoff	

* VR = Verdunstungsrate (anhand der Ergebnisse in Protokoll 02-1)

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 2-03/ Blatt 1/3

Aufgabe: Überprüfung der Feststoffverteilung an getränkten Prüfkörpern nach Abschluss der Evaporation des Lösemittels unter konditionierten Klimabedingungen

Substrat: laborseits hergestellte Mörtelprüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel oder Gipsmörtel

Vorbehandlung Probe: Trocknen bis zur Massenkonstanz

Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette bis zur Sättigung (einmalige Applikation)

Bedingungen Applikation: unkonditionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Evaporation: 20 °C, 65%RF

Datum:

Verdünnung						
Nr.	Substrat	Vorbehandlung	applizierte Nanodispersion	Nachbehandlung	Beobachtung	Bild
1.1	DKM	keine	CaLoSiL E12,5	keine	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich bis ca. 0,3 cm Tiefe sehr stark konzentriert, im Inneren deutlich geringer	
1.2	DKM	keine	CaLoSiL NP12,5	keine	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich - außer an der Lagerfläche - 0,1 bis 0,3 cm tief sehr stark konzentriert, besonders an der Oberseite, im Inneren unregelmäßig	
1.3	GM	keine	CaLoSiL E12,5	keine	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich 0,1 bis 0,2 cm tief konzentriert, im Inneren deutlich geringer, im Kern etwas stärker	
Acetonanteil im Lösemittel						
Nr.	Substrat	Vorbehandlung	applizierte Nanodispersion	Nachbehandlung	Beobachtung	Bild
2.1	DKM	keine	CaLoSiL E25AC*	keine	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich - außer an der Lagerfläche - bis ca. 0,3 cm Tiefe stark konzentriert, im Inneren unregelmäßig verteilt	
2.2	DKM	keine	CaLoSiL E12,5AC*	keine	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich bis ca. 0,5 cm Tiefe konzentriert, im Inneren geringer	
2.3	DKM	keine	CaLoSiL E5AC*	keine	Ca(OH) ₂ ist an den Oberflächen - außer an der Lagerfläche - bis ca. 0,2 cm Tiefe stark konzentriert, im Inneren nicht nachweisbar	
2.4	DKM	keine	CaLoSiL NP25AC*	keine	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich bis ca. 0,5 cm Tiefe konzentriert, im Inneren geringer	
2.5	DKM	keine	CaLoSiL NP12,5AC*	keine	Ca(OH) ₂ ist teilweise im oberflächennahen Bereich konzentriert, innen recht gut verteilt, im unteren Bereich etwas höher konzentriert	
2.6	GM	keine	CaLoSiL E5AC*	keine	Ca(OH) ₂ ist lediglich an der Oberfläche der Oberseite nachweisbar	

* Die mit dem Zusatz "AC" versehenen Dispersionen enthielten 40 Vol% Aceton.

DKM ... Prüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel
GM ... Prüfkörper aus Gipsmörtel

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 2-03/ Blatt 2/3

Aufgabe: Überprüfung der Feststoffverteilung an getränkten Prüfkörpern nach Abschluss der Evaporation des Lösemittels unter konditionierten Klimabedingungen

Substrat: laborseits hergestellte Mörtelprüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel oder Gipsmörtel

Vorbehandlung Probe: Trocknen bis zur Massenkonstanz

Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette bis zur Sättigung (einmalige Applikation)

Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20°C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Evaporation: 20°C, 65%RF

Datum:

Vorbehandlung mit Wasser						
Nr.	Substrat	Vorbehandlung	applizierte Nanodispersion	Nachbehandlung	Beobachtung	Bild
3.1	DKM	Einsprühen mit destilliertem Wasser, Applikation nach ca. 50 % Verdunstung	CaLoSiL E25	keine	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich konzentriert, vor allem an der Oberseite, innen nur gering konzentriert	
Lagerung im ethanolisch gesättigten Dampfraum						
Nr.	Substrat	Vorbehandlung	applizierte Nanodispersion	Nachbehandlung	Beobachtung	Bild
4.1	DKM	keine	CaLoSiL NP25	Lagerung im Exsikkator über einer Schale mit Ethanol	Ca(OH) ₂ ist im Kern des Prismas und an den Oberflächen konzentriert, dazwischen liegt ein ca. 0,3 cm breiter Bereich ohne Feststoff	
Nachbehandlung mit Lösemittelgelen						
Nr.	Substrat	Vorbehandlung	applizierte Nanodispersion	Nachbehandlung	Beobachtung	Bild
5.1	DKM	keine	CaLoSiL NP25	nach 5 Stunden Bad in 0,5% Klucel in N-Propanol	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich bis ca. 0,3 cm Tiefe konzentriert - nicht jedoch an den Oberflächen selbst, innen nur sehr geringe Konzentration	
5.2	DKM	keine	CaLoSiL NP12,5	nach 5,5 Stunden Bad in 0,5% Klucel in N-Propanol	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich bis ca. 0,4 cm Tiefe stark konzentriert - nicht jedoch an den Oberflächen selbst, innen geringere Konzentration	
5.3	DKM	keine	CaLoSiL E25	nach 5 Stunden Bad in 0,5% Klucel in N-Propanol	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich bis ca. 0,3 cm Tiefe konzentriert - nicht jedoch an den Oberflächen selbst, innen nur sehr geringe Konzentration	
5.4	DKM	keine	CaLoSiL EP12,5	nach 5,5 Stunden Bad in 0,5% Klucel in Ethanol	Ca(OH) ₂ ist inhomogen verteilt mit Tendenz zur Konzentration im oberflächennahen Bereich des Prismas	
5.5	DKM	keine	CaLoSiL E25AC*	nach 5 Stunden Bad in Aerosil+ Ethanol	weiße Oberflächenaufflagerung, Ca(OH) ₂ zeigt Tendenz zur Konzentration unter der Oberfläche bis ca. 0,3 cm Tiefe, innen inhomogene Verteilung	
5.6	DKM	keine	CaLoSiL NP25AC*	nach 5 Stunden Bad in 0,5% Klucel in N-Propanol	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich bis ca. 0,3 cm Tiefe stark konzentriert - nicht jedoch an den Oberflächen selbst, innen nur geringe Konzentration	
5.7	DKM	keine	CaLoSiL NP12,5AC*	nach 4,5 Stunden Bad in 0,5% Klucel in N-Propanol	Ca(OH) ₂ ist weitgehend homogen verteilt, im unteren Bereich des Prismas etwas geringere Konzentration	
5.8	GM	keine	CaLoSiL NP12,5AC*	nach 4,5 Stunden Bad in 0,5% Klucel in N-Propanol	Ca(OH) ₂ ist im oberflächennahen Bereich bis ca. 0,6 cm Tiefe konzentriert - nicht jedoch an den Oberflächen selbst, innen nicht nachweisbar	
* Die mit dem Zusatz "AC" versehenen Dispersionen enthielten 40 Vol% Aceton.						
DKM ... Prüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel GM ... Prüfkörper aus Gipsmörtel						

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 2-03/ Blatt 3/3

Aufgabe: Überprüfung der Feststoffverteilung an getränkten Prüfkörpern nach Abschluss der Evaporation des Lösemittels unter konditionierten Klimabedingungen

Substrat: laborseits hergestellte Mörtelprüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel oder Gipsmörtel

Vorbehandlung Probe: Trocknen bis zur Massenkonstanz

Applikationstechnik: Auftropfen mit Pipette bis zur Sättigung (einmalige Applikation)

Bedingungen Applikation: unkonfektionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Evaporation: 20 °C, 65%RF

Datum:

Bimodale Dispersionen						
Nr.	Substrat	Vorbehandlung	applizierte Nanodispersion	Nachbehandlung	Beobachtung	Bild
6.1	DKM	keine	CaLoSiL E50 + CaLoSiL Mikro (5+1 m/m)	keine	Dispersion drang nur ca. 1,3 cm tief ein, hier ist Ca(OH) ₂ vollkommen homogen verteilt	
6.2	DKM	keine	CaLoSiL E25 + CaLoSiL Mikro (5+1 m/m)	keine	Ca(OH) ₂ ist im oberen Bereich konzentriert, zeigt insgesamt Tendenz zur Anreicherung unter den Oberflächen, innen inhomogene Verteilung	
6.3	DKM	keine	CaLoSiL E25 + CaLoSiL Mikro (10+1 m/m)	keine	Ca(OH) ₂ ist im unteren Bereich des Prismas geringer konzentriert, sonst homogen verteilt	
6.4	DKM	keine	CaLoSiL E25 + CaLoSiL Mikro (30+1 m/m)	keine	Ca(OH) ₂ ist im unteren Bereich des Prismas geringer konzentriert, sonst homogen verteilt	
6.5	DKM	keine	CaLoSiL E25 + CaLoSiL Mikro (100+1 m/m)	keine	Ca(OH) ₂ ist im unteren Bereich sowie in Eckbereichen geringer konzentriert, sonst homogen verteilt	
6.6	GM	keine	CaLoSiL E25 + CaLoSiL Mikro (30+1 m/m)	keine	Ca(OH) ₂ ist homogen verteilt	
6.7	GM	keine	CaLoSiL E25 + CaLoSiL Mikro (100+1 m/m)	keine	Ca(OH) ₂ ist homogen verteilt	
6.8	GM	keine	CaLoSiL NP25 + CaLoSiL Mikro (100+1 m/m)	keine	Ca(OH) ₂ zeigt eine leichte Tendenz zur oberflächigen Konzentration, innen im unteren Bereich etwas geringere, sonst homogene Konzentration	
DKM ... Prüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel						
GM ... Prüfkörper aus Gipsmörtel						

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 2-04/ Blatt 1/1

Aufgabe: Messung der Evaporation von Ethanol mit der GANN Hydromette

Substrat: laborseits hergestellter Mörtelprüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel

Tränkmittel: Ethanol

Applikationstechnik: Immersionsbad

Bedingungen Evaporation: 20 °C, 65%RF

Datum: 26.04.2011

	[g]	Verdunstung [%]	Messwert Hydromette
Masse trocken	61,553		19...21
Masse nach Ethanolbehandlung	72,961		
Masse Ethanol im Gefüge	11,431	0	42...46
	7,62	33,3	37...40
	5,32	53,5	32...34
	3,7	67,6	28...32
	2,8	75,5	27...30
	0,13	98,9	20...22
	0	100,0	19...21

gemessen wurde auf der Oberfläche der Oberseite, mittig.

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 2-05/ Blatt 1/1

Aufgabe: Bestimmung der Sorptionsisotherme von Labormörteln

Substrat: laborseits hergestellter Mörtelprüfkörper aus dolomitischem Kalkmörtel und aus Gipsmörtel

Methode: gravimetrische Bestimmung der Adsorption nach Lagerung unter definierten Bedingungen
20...95% rF / 20 °C

Datum: 16.02.2010 bis 01.04.2010

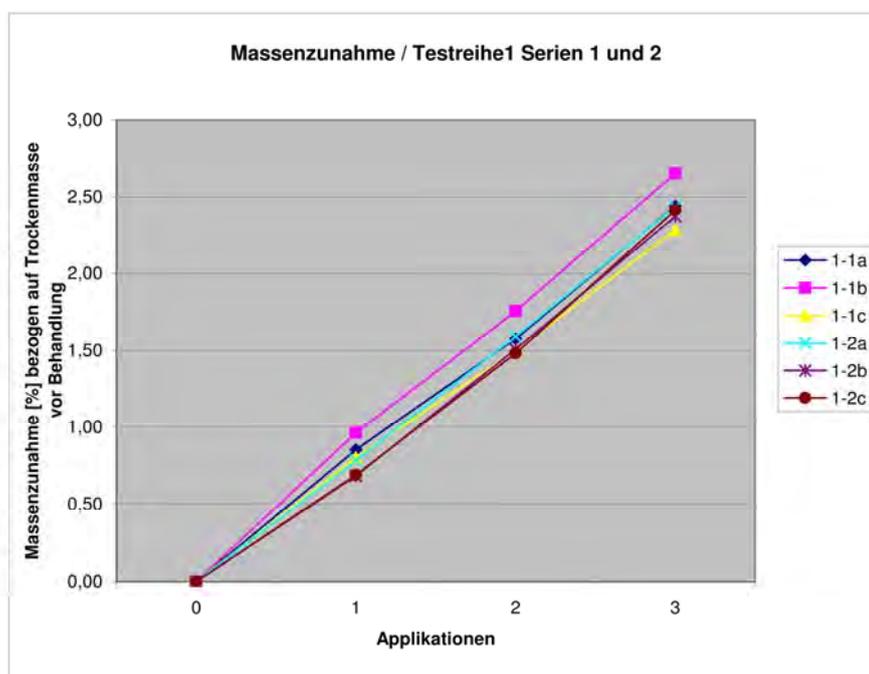
Material	Dolomitischer Kalkmörtel			Gipsmörtel		
	DKM-A	DKM-B	DKM-C	GM-A	GM-B	GM-C
Probe Nr.						
Trockenmasse	35,694	30,517	29,780	32,883	17,011	31,482
20%rF 20 °C	35,719	30,538	29,804	32,906	17,022	31,506
40%rF 20 °C	35,722	30,54	29,806	32,908	17,026	31,512
60%rF 20 °C	35,725	30,547	29,813	32,912	17,032	31,521
80%rF 20 °C	35,729	30,551	29,817	32,931	17,038	31,536
90%rF 20 °C	35,744	30,563	29,829	32,985	17,067	31,586
95%rF 20 °C	35,768	30,58	29,845	33,052	17,099	31,641
Wassergehalt bei 95%rF [Ma%]	0,21	0,21	0,22	0,51	0,51	0,50

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-01/ Blatt 1/7

Aufgabe: **Ermittlung der Massezunahme durch die Behandlung mit Nanodispersionen**

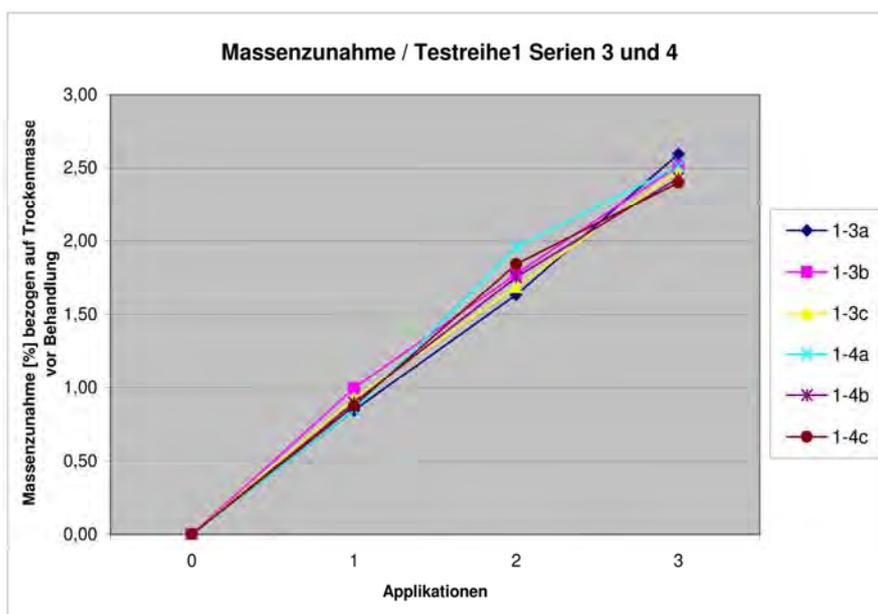
Substrat: laborseits hergestellte Prüfkörper aus dolomit. Kalkmörtel
Vorbehandlung Probe: Trocknen bei 105 °C bis zur Massenkonstanz
Bedingungen Applikation: unconditionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)
Bedingungen Aushärtung: 20 °C, 65%RF

Festigungsmittel/ Methode:		CaLoSiL E25 im Tauchverfahren			CaLoSiL E25 im Flutverfahren		
Probe Nr.		1-1a	1-1b	1-1c	1-2a	1-2b	1-2c
Trockenmasse	[g]	59,40	58,98	61,34	60,74	58,19	59,76
Behandlung 1							
Masse nach Applikation	[g]	71,57	71,60	73,71	72,87	68,17	70,20
Masse nach Aushärtung	[g]	59,91	59,55	61,84	61,22	58,58	60,18
Massezunahme	[g]	0,51	0,57	0,49	0,48	0,40	0,41
	Ma%	0,85	0,96	0,80	0,78	0,68	0,69
Behandlung 2							
Masse nach Applikation	[g]	69,46	69,92	71,84	72,17	68,84	70,45
Masse nach Aushärtung	[g]	60,34	60,02	62,26	61,71	59,06	60,65
Massezunahme	[g]	0,94	1,04	0,92	0,97	0,88	0,89
	Ma%	1,58	1,76	1,50	1,59	1,51	1,48
Behandlung 3							
Masse nach Applikation	[g]	71,67	71,80	73,51	73,32	70,73	73,26
Masse nach Aushärtung	[g]	60,85	60,55	62,75	62,22	59,57	61,21
Massezunahme	[g]	1,45	1,56	1,40	1,48	1,38	1,44
prozentuale Massezunahme	Ma%	2,44	2,65	2,28	2,43	2,37	2,41
Durchschnitt Serie	Ma%	2,46			2,41		



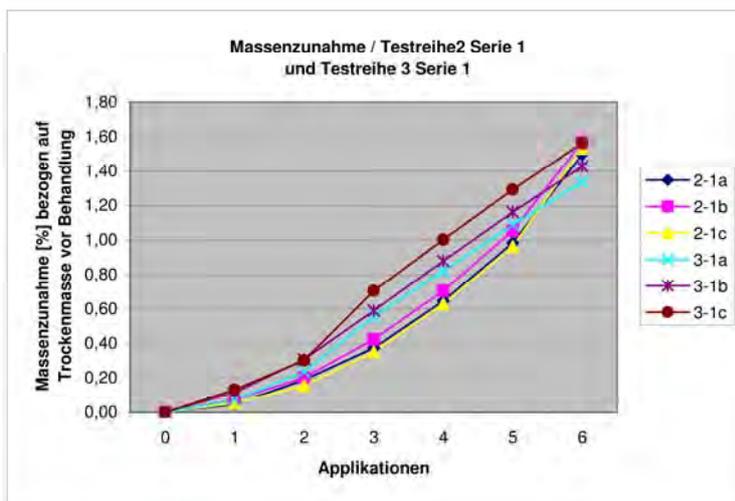
ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-01/ Blatt 2/7

Festigungsmittel/ Methode:		CaLoSiL IP25 im Tauchverfahren			CaLoSiL NP25 im Tauchverfahren		
Probe Nr.		1-3a	1-3b	1-3c	1-4a	1-4b	1-4c
Trockenmasse	[g]	59,18	57,48	57,20	60,79	59,09	61,88
Behandlung 1							
Masse nach Applikation	[g]	71,31	69,68	69,41	72,92	71,31	74,75
Masse nach Aushärtung	[g]	59,68	58,05	57,73	61,30	59,62	62,42
Massezunahme	[g]	0,50	0,57	0,53	0,52	0,53	0,54
	Ma%	0,85	0,99	0,92	0,85	0,90	0,88
Behandlung 2							
Masse nach Applikation	[g]	71,15	69,64	69,39	72,82	71,33	74,79
Masse nach Aushärtung	[g]	60,14	58,50	58,17	61,98	60,13	63,02
Massezunahme	[g]	0,97	1,02	0,97	1,19	1,04	1,14
	Ma%	1,63	1,78	1,69	1,96	1,76	1,84
Behandlung 3							
Masse nach Applikation	[g]	71,24	70,51	70,39	73,02	72,32	75,97
Masse nach Aushärtung	[g]	60,71	58,92	58,62	62,31	60,53	63,36
Massezunahme	[g]	1,53	1,44	1,42	1,53	1,44	1,48
prozentuale Massenzunahme	Ma%	2,59	2,51	2,48	2,51	2,43	2,40
Durchschnitt Serie	Ma%	2,53			2,45		



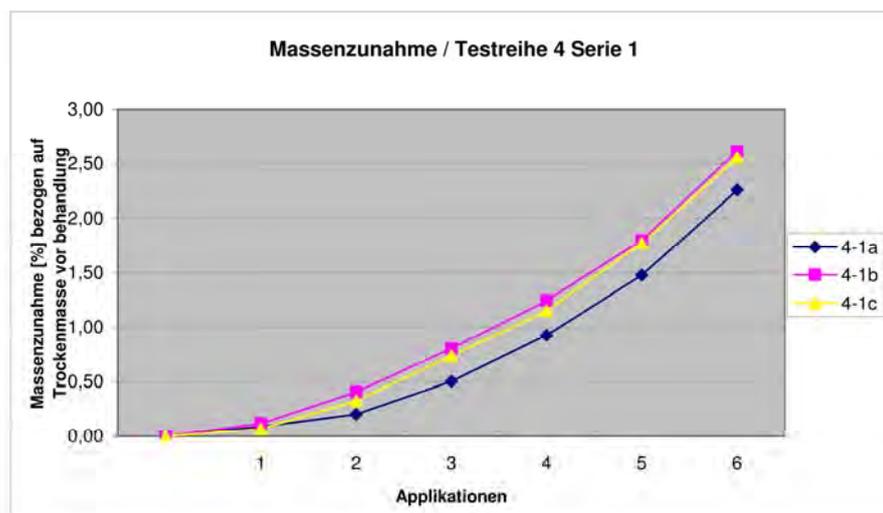
ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-01/ Blatt 3/7

Festigungsmittel/ Methode:		„aufbauend“ Typ E Tauchverfahren			CaLoSiL E12,5AC Tauchverfahren		
Probe Nr.		2-1a	2-1b	2-1c	3-1a	3-1b	3-1c
Trockenmasse	[g]	61,05	59,60	60,56	60,87	60,13	60,50
Behandlung 1							
Masse nach Applikation	[g]	72,82	71,73	71,92	72,29	72,54	72,82
Masse nach Aushärtung	[g]	61,10	59,67	60,61	60,94	60,24	60,63
Massezunahme	[g]	0,05	0,07	0,05	0,07	0,11	0,13
	Ma%	0,08	0,12	0,09	0,12	0,19	0,22
Behandlung 2							
Masse nach Applikation	[g]	72,85	71,55	72,20	72,60	72,22	72,57
Masse nach Aushärtung	[g]	61,24	59,80	60,72	61,11	60,43	60,80
Massezunahme	[g]	0,19	0,20	0,16	0,24	0,31	0,30
	Ma%	0,31	0,34	0,26	0,39	0,51	0,50
Behandlung 3							
Masse nach Applikation	[g]	73,13	71,77	72,31	72,78	72,79	73,28
Masse nach Aushärtung	[g]	61,42	60,02	60,91	61,43	60,72	61,20
Massezunahme	[g]	0,37	0,42	0,35	0,55	0,59	0,71
	Ma%	0,61	0,71	0,58	0,91	0,98	1,17
Behandlung 4							
Masse nach Applikation	[g]	73,06	71,84	72,40	72,37	72,65	73,34
Masse nach Aushärtung	[g]	61,70	60,30	61,19	61,69	61,01	61,50
Massezunahme	[g]	0,65	0,70	0,63	0,82	0,88	1,00
	Ma%	1,06	1,18	1,04	1,35	1,46	1,66
Behandlung 5							
Masse nach Applikation	[g]	73,21	72,05	72,60	72,81	72,87	72,83
Masse nach Aushärtung	[g]	62,03	60,65	61,53	61,96	61,29	61,79
Massezunahme	[g]	0,98	1,06	0,96	1,09	1,16	1,29
	Ma%	1,61	1,77	1,59	1,79	1,93	2,14
Behandlung 6							
Masse nach Applikation	[g]	73,36	72,15	72,94	73,03	73,13	73,55
Masse nach Aushärtung	[g]	62,55	61,16	62,09	62,21	61,56	62,06
Massezunahme	[g]	1,50	1,57	1,53	1,34	1,43	1,56
prozentuale Massezunahme	Ma%	2,45	2,63	2,53	2,20	2,37	2,59
Durchschnitt Serie	Ma%	2,54			2,39		



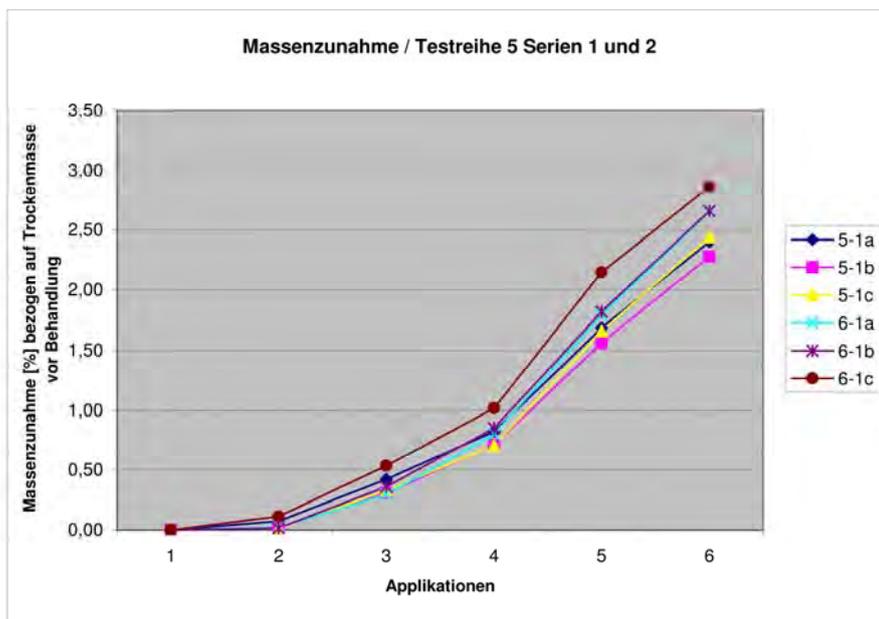
ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-01/ Blatt 4/7

Festigungsmittel/ Methode:		"aufbauend" Typ E Tauchverfahren		
Probe Nr.		4-1a	4-1b	4-1c
Trockenmasse	[g]	62,70	61,56	61,91
Behandlung 1				
Masse nach Applikation	[g]	74,03	73,25	73,52
Masse nach Aushärtung	[g]	62,75	61,63	61,95
Massezunahme	[g]	0,05	0,07	0,04
	Ma%	0,09	0,12	0,07
Behandlung 2				
Masse nach Applikation	[g]	73,76	72,89	73,13
Masse nach Aushärtung	[g]	62,82	61,81	62,11
Massezunahme	[g]	0,13	0,25	0,20
	Ma%	0,20	0,41	0,32
Behandlung 3				
Masse nach Applikation	[g]	73,91	73,06	73,40
Masse nach Aushärtung	[g]	63,01	62,05	62,36
Massezunahme	[g]	0,31	0,49	0,45
	Ma%	0,50	0,80	0,73
Behandlung 4				
Masse nach Applikation	[g]	74,00	73,18	73,06
Masse nach Aushärtung	[g]	63,28	62,32	62,62
Massezunahme	[g]	0,58	0,77	0,71
	Ma%	0,93	1,24	1,15
Behandlung 5				
Masse nach Applikation	[g]	74,29	73,73	73,85
Masse nach Aushärtung	[g]	63,62	62,67	63,01
Massezunahme	[g]	0,93	1,11	1,10
	Ma%	1,48	1,80	1,77
Behandlung 6				
Masse nach Applikation	[g]	74,40	73,58	73,96
Masse nach Aushärtung	[g]	64,11	63,16	63,49
Massezunahme	[g]	1,42	1,61	1,58
	Ma%	2,26	2,61	2,55
Durchschnitt Serie	Ma%	2,47		



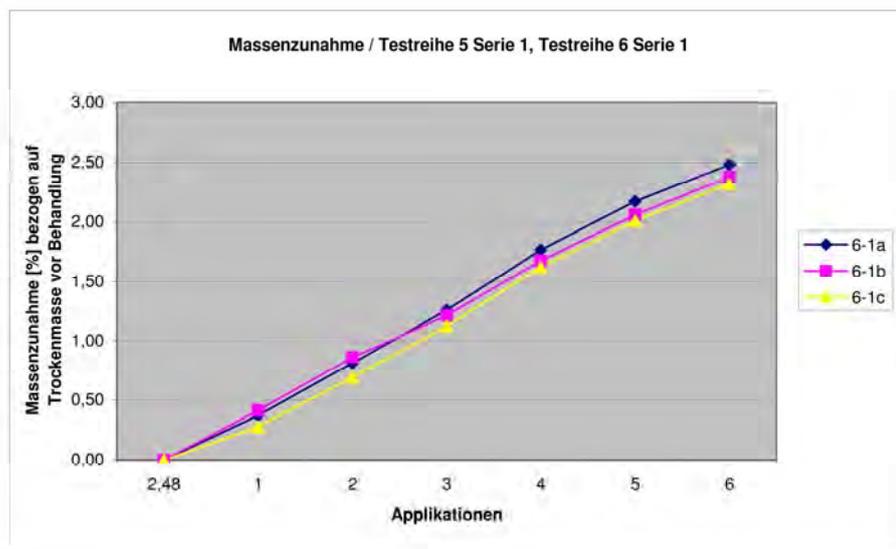
ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-01/ Blatt 5/7

Festigungsmittel/ Methode:		CaLoSiL E25 im Tauchverfahren			CaLoSiL E25 im Flutverfahren		
Probe Nr.		5-1a	5-1b	5-1c	5-2a	5-2b	5-2c
Trockenmasse	[g]	64,46	63,63	61,92	60,53	61,45	62,79
Behandlung 1							
Masse nach Applikation	[g]	75,77	75,00	72,93	72,72	73,29	74,00
Masse nach Aushärtung	[g]	64,51	63,64	61,93	60,55	61,46	62,86
Massezunahme	[g]	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01	0,07
	Ma%	0,07	0,02	0,02	0,02	0,01	0,11
Behandlung 2							
Masse nach Applikation	[g]	75,87	74,75	73,19	72,34	72,85	74,00
Masse nach Aushärtung	[g]	64,73	63,83	62,12	60,71	61,67	63,12
Massezunahme	[g]	0,27	0,20	0,20	0,18	0,22	0,34
	Ma%	0,42	0,31	0,32	0,29	0,36	0,53
Behandlung 3							
Masse nach Applikation	[g]	75,56	74,66	72,68	72,39	73,09	73,96
Masse nach Aushärtung	[g]	64,99	64,08	62,36	61,02	61,98	63,43
Massezunahme	[g]	0,53	0,45	0,44	0,49	0,52	0,64
	Ma%	0,82	0,71	0,71	0,80	0,85	1,02
Behandlung 4							
Masse nach Applikation	[g]	76,09	74,90	73,23	73,13	73,82	74,39
Masse nach Aushärtung	[g]	65,54	64,63	62,94	61,62	62,57	64,14
Massezunahme	[g]	1,09	1,00	1,03	1,08	1,12	1,35
	Ma%	1,68	1,56	1,66	1,79	1,82	2,15
Behandlung 5							
Masse nach Applikation	[g]	75,84	74,69	72,90	73,12	73,71	74,26
Masse nach Aushärtung	[g]	66,01	65,08	63,43	62,14	63,09	64,59
Massezunahme	[g]	1,55	1,45	1,51	1,60	1,63	1,80
prozentuale Massezunahme	Ma%	2,40	2,28	2,44	2,65	2,66	2,86
Durchschnitt Serie	Ma%	2,37			2,72		



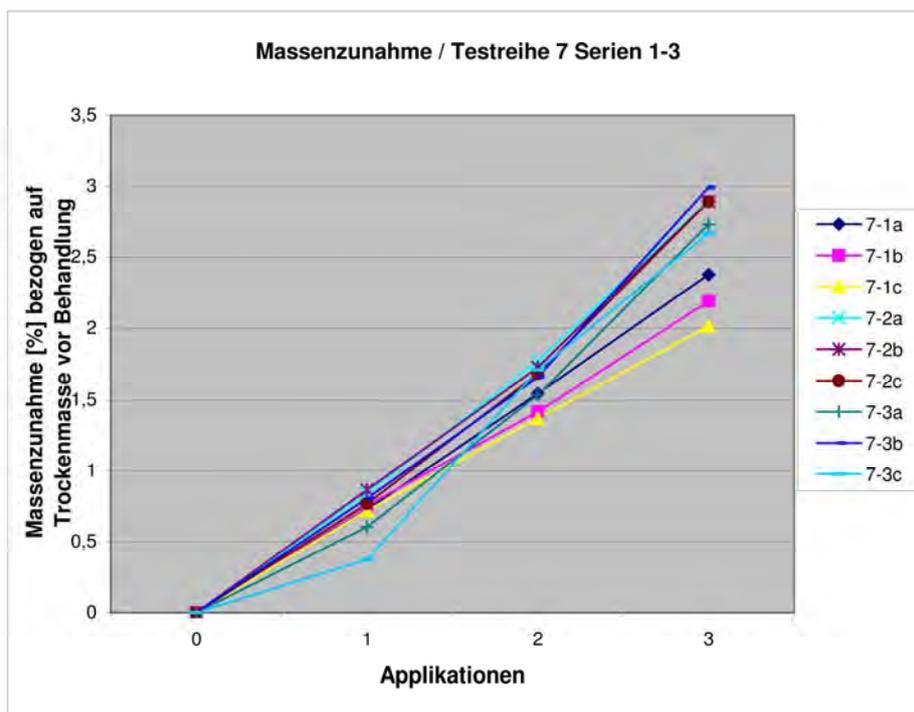
ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-01/ Blatt 6/7

Festigungsmittel/ Methode:		CaLoSiL E25 im Tauchverfahren		
Probe Nr.		6-1a	6-1b	6-1c
Trockenmasse	[g]	59,54	61,25	61,49
Behandlung 1				
Masse nach Applikation	[g]	71,14	73,15	73,74
Masse nach Aushärtung	[g]	59,76	61,51	61,67
Massezunahme	[g]	0,22	0,25	0,17
	Ma%	0,37	0,41	0,28
Behandlung 2				
Masse nach Applikation	[g]	71,42	72,99	73,20
Masse nach Aushärtung	[g]	60,03	61,78	61,92
Massezunahme	[g]	0,48	0,53	0,42
	Ma%	0,81	0,86	0,69
Behandlung 3				
Masse nach Applikation	[g]	71,39	72,69	73,13
Masse nach Aushärtung	[g]	60,29	62,00	62,18
Massezunahme	[g]	0,75	0,74	0,69
	Ma%	1,26	1,21	1,12
Behandlung 4				
Masse nach Applikation	[g]	71,57	72,80	73,32
Masse nach Aushärtung	[g]	60,60	62,28	62,49
Massezunahme	[g]	1,05	1,03	1,00
	Ma%	1,77	1,68	1,62
Behandlung 5				
Masse nach Applikation	[g]	71,23	73,13	73,28
Masse nach Aushärtung	[g]	60,84	62,52	62,73
Massezunahme	[g]	1,29	1,26	1,24
	Ma%	2,17	2,06	2,01
Behandlung 6				
Masse nach Applikation	[g]	71,45	73,14	73,31
Masse nach Aushärtung	[g]	61,02	62,71	62,92
Massezunahme	[g]	1,48	1,46	1,43
prozentuale Massenzunahme	Ma%	2,48	2,38	2,32
Durchschnitt Serie	Ma%	2,39		



ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-01/ Blatt 7/7

Festigungsmittel/ Methode:		bimodale Dis-persion Typ E			bimodale Dis-persion Typ IP			bimodale Dis-persion Typ NP		
Probe Nr.		7-1a	7-1b	7-1c	7-2a	7-2b	7-2c	7-3a	7-3b	7-3c
Trockenmasse	[g]	60,16	59,69	59,57	60,26	60,96	61,89	59,76	59,58	59,51
Behandlung 1										
Masse nach Applikation	[g]	72,58	71,84	71,59	72,32	72,66	73,96	71,99	71,39	70,86
Masse nach Aushärtung	[g]	60,60	60,14	60,00	60,77	61,49	62,37	60,12	60,06	59,73
Massezunahme	[g]	0,44	0,45	0,43	0,51	0,53	0,48	0,36	0,48	0,22
	Ma%	0,73	0,76	0,72	0,84	0,87	0,77	0,60	0,81	0,37
Behandlung 2										
Masse nach Applikation	[g]	72,87	71,75	71,70	72,56	72,85	73,85	72,23	71,44	71,17
Masse nach Aushärtung	[g]	61,09	60,53	60,38	61,33	62,01	62,93	60,68	60,57	60,53
Massezunahme	[g]	0,93	0,85	0,82	1,07	1,05	1,04	0,92	0,99	1,02
	Ma%	1,54	1,42	1,37	1,77	1,73	1,69	1,53	1,66	1,71
Behandlung 3										
Masse nach Applikation	[g]	72,12	71,01	69,48	72,62	72,98	74,08	72,24	71,76	71,62
Masse nach Aushärtung	[g]	61,59	61,00	60,77	62,01	62,72	63,68	61,39	61,36	61,09
Massezunahme	[g]	1,43	1,31	1,20	1,74	1,76	1,79	1,63	1,78	1,59
prozentuale Massenzunahme	Ma%	2,38	2,19	2,02	2,90	2,89	2,89	2,73	2,99	2,67
Durchschnitt Serie	Ma%	2,19			2,89			2,80		

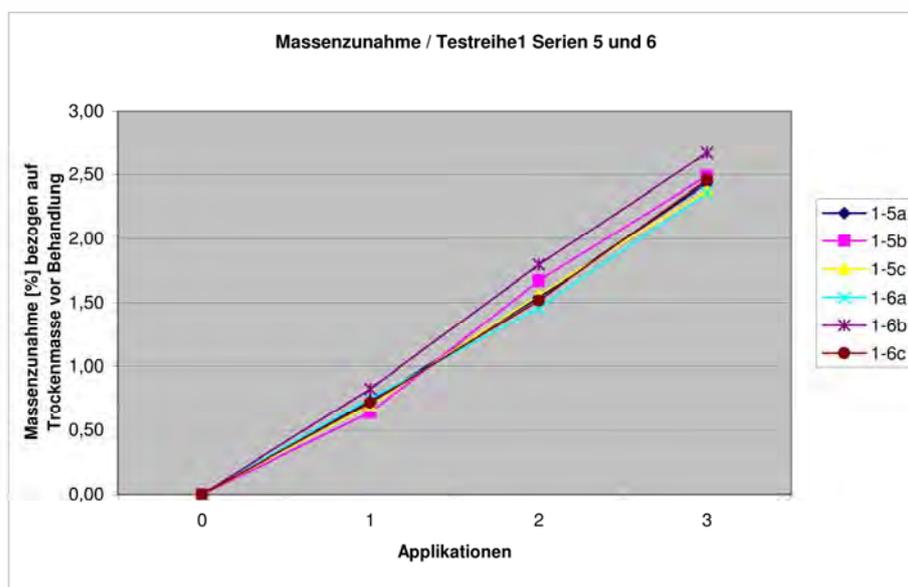


ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-02/ Blatt 1/4

Aufgabe: Ermittlung der Massezunahme durch die Behandlung mit Nanodispersionen

Substrat: laboreits hergestellte Prüfkörper aus Gipsmörtel
Vorbehandlung Probe: Trocknen bei 40 °C bis zur Massenkonstanz
Bedingungen Applikation: unkonditionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)
Bedingungen Aushärtung: 20 °C, 65%RF

Festigungsmittel/ Methode:		CaLoSiL E25 im Tauchverfahren			CaLoSiL E25 im Flutverfahren		
Probe Nr.		1-5a	1-5b	1-5c	1-6a	1-6b	1-6c
Trockenmasse	[g]	59,23	57,20	60,17	57,71	56,70	58,50
Behandlung 1							
Masse nach Applikation	[g]	70,51	68,05	72,56	68,23	67,84	68,47
Masse nach Aushärtung	[g]	59,66	57,57	60,59	58,15	57,16	58,91
Massezunahme	[g]	0,43	0,37	0,42	0,43	0,47	0,42
	Ma%	0,73	0,64	0,70	0,75	0,82	0,72
Behandlung 2							
Masse nach Applikation	[g]	70,02	69,12	70,87	66,78	69,00	69,60
Masse nach Aushärtung	[g]	60,14	58,16	61,11	58,56	57,71	59,38
Massezunahme	[g]	0,91	0,96	0,94	0,84	1,02	0,89
	Ma%	1,54	1,67	1,56	1,46	1,80	1,52
Behandlung 3							
Masse nach Applikation	[g]	71,52	70,70	72,63	70,58	69,29	71,81
Masse nach Aushärtung	[g]	60,67	58,63	61,60	59,07	58,21	59,93
Massezunahme	[g]	1,44	1,43	1,43	1,36	1,51	1,44
prozentuale Massenzunahme	Ma%	2,44	2,49	2,38	2,36	2,67	2,46
Durchschnitt Serie	Ma%	2,46			2,50		

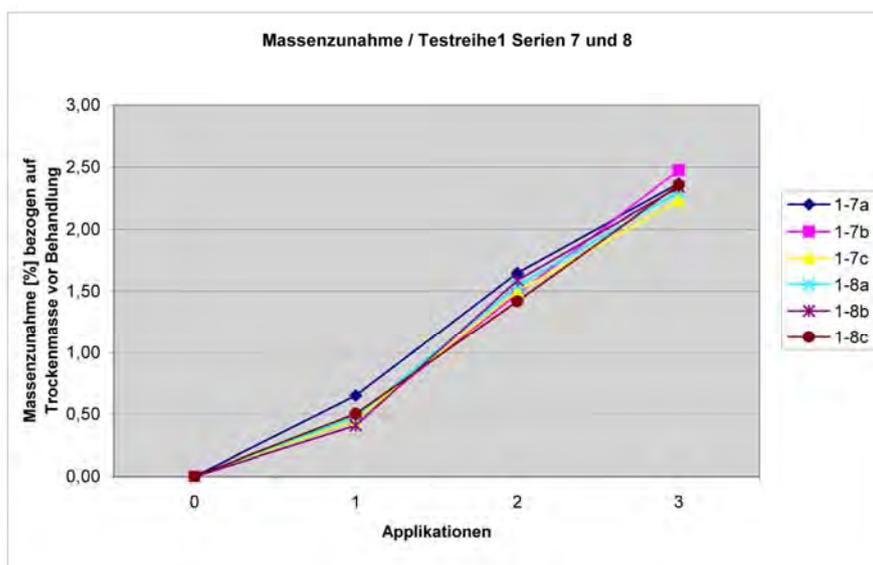


ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-02/ Blatt 2/4

Aufgabe: Ermittlung der Massezunahme durch die Behandlung mit Nanodispersionen

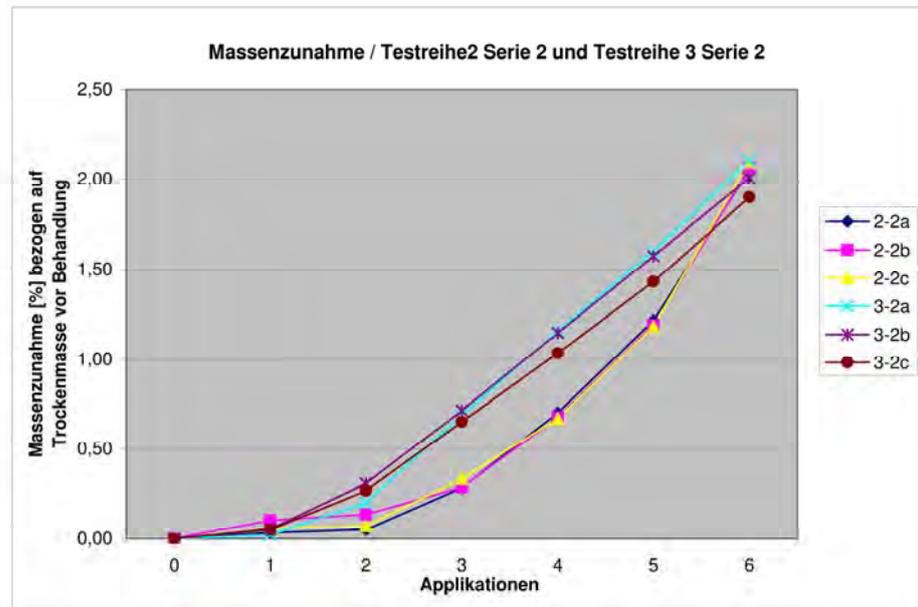
Substrat: laborseits hergestellte Prüfkörper aus Gipsmörtel
Vorbereitung Probe: Trocknen bei 40°C bis zur Massenkonstanz
Bedingungen Applikation: unkontrollierte Laborbedingungen (ca. 18-20°C, ca. 35-40% RF)
Bedingungen Aushärtung: 20°C, 65%RF

Festigungsmittel/ Methode	"aufbauend" Typ E Tauchverfahren			CaLoSiL E12,5AC Tauchverfahren			
	1-7a	1-7b	1-7c	1-8a	1-8b	1-8c	
Probe Nr.							
Trockenmasse [g]	61,22	55,37	59,55	58,22	58,51	53,50	
Behandlung 1							
Masse nach Applikation [g]	69,03	65,09	70,01	68,74	67,81	63,52	
Masse nach Aushärtung [g]	61,62	55,62	59,82	58,50	58,75	53,77	
Massezunahme [g]	0,40	0,25	0,27	0,28	0,24	0,27	
	Ma%	0,65	0,45	0,45	0,48	0,41	
Behandlung 2							
Masse nach Applikation [g]	72,73	66,05	70,72	69,98	69,65	64,65	
Masse nach Aushärtung [g]	62,23	56,19	60,44	59,12	59,44	54,26	
Massezunahme [g]	1,01	0,82	0,89	0,90	0,93	0,76	
	Ma%	1,65	1,48	1,50	1,55	1,42	
Behandlung 3							
Masse nach Applikation [g]	73,29	66,31	71,53	71,16	70,41	66,59	
Masse nach Aushärtung [g]	62,67	56,74	60,88	59,56	59,88	54,76	
Massezunahme [g]	1,45	1,37	1,33	1,34	1,37	1,26	
prozentuale Massezunahme	Ma%	2,37	2,47	2,23	2,30	2,34	
Durchschnitt Serie	Ma%	2,36			2,33		



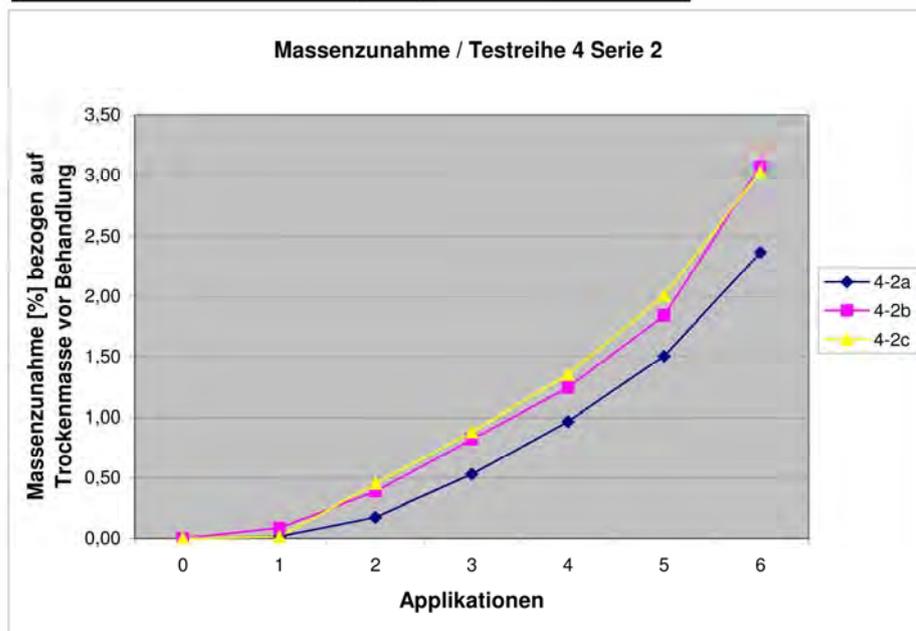
ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-02/ Blatt 3/4

Festigungsmittel/ Methode:		„aufbauend“ Typ E Tauchverfahren			CaLoSiL E12,5AC Tauchverfahren		
Probe Nr.		2-2a	2-2b	2-2c	3-1a	3-1b	3-1c
Trockenmasse	[g]	59,80	58,68	61,32	57,60	60,30	60,67
Behandlung 1							
Masse nach Applikation	[g]	71,83	70,66	73,62	69,96	72,69	72,36
Masse nach Aushärtung	[g]	59,82	58,74	61,35	57,61	60,34	60,70
Massezunahme	[g]	0,02	0,06	0,03	0,01	0,03	0,03
	Ma%	0,03	0,10	0,06	0,02	0,05	0,05
Behandlung 2							
Masse nach Applikation	[g]	71,74	70,49	73,24	69,81	72,31	72,26
Masse nach Aushärtung	[g]	59,83	58,76	61,36	57,71	60,49	60,83
Massezunahme	[g]	0,03	0,08	0,04	0,12	0,19	0,16
	Ma%	0,05	0,14	0,07	0,20	0,31	0,27
Behandlung 3							
Masse nach Applikation	[g]	71,63	70,62	73,37	70,12	72,99	72,76
Masse nach Aushärtung	[g]	59,97	58,85	61,52	57,99	60,73	61,07
Massezunahme	[g]	0,17	0,17	0,20	0,40	0,43	0,40
	Ma%	0,28	0,29	0,33	0,69	0,71	0,65
Behandlung 4							
Masse nach Applikation	[g]	72,03	70,81	73,62	70,16	72,65	72,52
Masse nach Aushärtung	[g]	60,22	59,08	61,73	58,27	60,99	61,30
Massezunahme	[g]	0,42	0,40	0,41	0,67	0,69	0,63
	Ma%	0,70	0,68	0,67	1,16	1,15	1,04
Behandlung 5							
Masse nach Applikation	[g]	72,28	70,97	73,46	70,57	72,92	72,61
Masse nach Aushärtung	[g]	60,53	59,38	62,05	58,52	61,25	61,54
Massezunahme	[g]	0,73	0,70	0,73	0,92	0,95	0,87
	Ma%	1,22	1,19	1,18	1,60	1,58	1,43
Behandlung 6							
Masse nach Applikation	[g]	72,16	71,23	74,27	70,82	72,86	73,33
Masse nach Aushärtung	[g]	61,03	59,89	62,60	58,81	61,51	61,82
Massezunahme	[g]	1,23	1,21	1,29	1,21	1,21	1,15
prozentuale Massenzunahme	Ma%	2,05	2,06	2,10	2,10	2,00	1,90
Durchschnitt Serie	Ma%	2,07			2,00		



ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-02/ Blatt 4/4

Festigungsmittel/ Methode:		"aufbauend" Typ E/AC Tauchverfahren		
		4-2a	4-2b	4-2c
Probe Nr.				
Trockenmasse	[g]	59,97	60,43	57,20
Behandlung 1				
Masse nach Applikation	[g]	72,18	72,93	69,61
Masse nach Aushärtung	[g]	59,98	60,48	57,21
Massezunahme	[g]	0,01	0,05	0,01
	Ma%	0,02	0,09	0,01
Behandlung 2				
Masse nach Applikation	[g]	71,88	72,74	69,42
Masse nach Aushärtung	[g]	60,08	60,66	57,46
Massezunahme	[g]	0,11	0,23	0,26
	Ma%	0,18	0,39	0,45
Behandlung 3				
Masse nach Applikation	[g]	72,20	72,99	69,75
Masse nach Aushärtung	[g]	60,29	60,93	57,70
Massezunahme	[g]	0,32	0,50	0,50
	Ma%	0,53	0,82	0,88
Behandlung 4				
Masse nach Applikation	[g]	72,24	72,72	69,42
Masse nach Aushärtung	[g]	60,55	61,18	57,97
Massezunahme	[g]	0,58	0,75	0,77
	Ma%	0,97	1,24	1,35
Behandlung 5				
Masse nach Applikation	[g]	72,61	73,55	69,87
Masse nach Aushärtung	[g]	60,87	61,55	58,35
Massezunahme	[g]	0,90	1,12	1,15
	Ma%	1,51	1,85	2,01
Behandlung 6				
Masse nach Applikation	[g]	72,39	73,36	70,23
Masse nach Aushärtung	[g]	61,39	62,29	58,93
Massezunahme	[g]	1,42	1,86	1,73
prozentuale Massenzunahme	Ma%	2,37	3,08	3,03
Durchschnitt Serie	Ma%	2,83		



Anhang A

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-03/ Blatt 1/2

Aufgabe: Bestimmung der Biegezugfestigkeit (BZF)
Proben: Flachproben / Prismen 2 x 2 x 10 cm
aus laborseits hergestelltem dolomitischem
Kalkmörtel oder Gipsmörtel
Methode: Dreipunktverfahren
Messgerät: Universalprüfmaschine ZWICK/ ROELL
Software: TestXpert
Kraftaufnehmer: Typ: KAP - Z (1 KN), A.S.T. GmbH Dresden
Traversenabstand: 6 cm
Prüfgeschwindigkeit: 0,15 mm/min
äußere Bedingungen: 20°C, 65%RF

Test-reihe	Probe Nr.	Probe			Aufl.-Weite l [mm]	Bruch-kraft F [N]	Biege-moment $M_B=(F \times l)/4$	Widerstands-moment $W_y=(b \times h^3)/6$	BZF [N/mm ²] $\beta = M_B / W$	Durchschnitt Serie $\bar{\beta}$ [N/mm ²]
		Höhe h [mm]	Breite b [mm]	Fläche A [mm ²]						
0	0-1a	20,42	20	408,400	60	14,35	215,259	1389,921	0,155	0,143
	0-1b	20,57	20,29	417,365	60	13,98	209,672	1430,867	0,147	
	0-1c	20,78	20,19	419,548	60	12,28	184,239	1453,035	0,127	
	0-2a	20,06	20,45	410,227	60	15,04	225,600	1371,526	0,164	0,148
	0-2b	20,15	19,97	402,396	60	13,44	201,600	1351,378	0,149	
	0-2c	20,08	20,11	403,809	60	11,63	174,450	1351,413	0,129	
	0-3a	20,16	19,96	402,394	60	12,88	193,200	1352,042	0,143	0,139
	0-3b	20,17	20,09	405,215	60	14,26	213,900	1362,199	0,157	
	0-3c	20,09	20,12	404,211	60	10,48	157,200	1353,432	0,116	
	0-4a	20,74	19,93	413,348	60	12,44	186,600	1428,807	0,131	0,114
	0-4b	20,19	20,04	404,608	60	10,93	163,950	1361,505	0,120	
	0-4c	20,18	20,12	406,022	60	8,36	125,400	1365,586	0,092	
1	1-1a	20,43	20,03	409,213	60	57,05	855,815	1393,370	0,614	0,519
	1-1b	20,49	20	409,800	60	41,79	626,888	1399,467	0,448	
	1-1c	20,63	20,25	417,758	60	47,45	711,750	1436,390	0,496	
	1-2a	20,49	20,09	411,644	60	52,34	785,100	1405,765	0,558	0,539
	1-2b	19,94	20,12	401,193	60	45,78	686,700	1333,297	0,515	
	1-2c	20,67	20,38	421,255	60	52,62	789,300	1451,222	0,544	
	1-3a	20,21	20,18	407,838	60	45,92	688,800	1373,734	0,501	0,492
	1-3b	20,37	20,36	414,733	60	46,39	695,850	1408,019	0,494	
	1-3c	20,21	19,79	399,956	60	43,03	645,450	1347,185	0,479	
	1-4a	19,72	19,86	391,639	60	26,63	399,450	1287,188	0,310	0,337
	1-4b	20,12	19,9	400,388	60	38,79	581,850	1342,634	0,433	
	1-4c	20,48	19,68	403,046	60	24,61	369,150	1375,732	0,268	
	1-5a	19,38	20,1	389,538	60	35,94	539,100	1258,208	0,428	0,429
	1-5b	19,2	20,11	386,112	60	31,08	466,200	1235,558	0,377	
	1-5c	20,1	20,33	408,633	60	43,91	658,650	1368,921	0,481	
	1-6a	20,67	20,14	416,294	60	46,80	702,000	1434,132	0,489	0,496
	1-6b	20,26	20,1	407,226	60	41,59	623,850	1375,066	0,454	
	1-6c	20,28	20,14	408,439	60	50,01	750,150	1380,524	0,543	
	1-7a	20,15	20,4	411,060	60	42,37	635,550	1380,477	0,460	0,375
	1-7b	20,11	20,55	413,261	60	35,52	532,800	1385,111	0,385	
	1-7c	20,53	20,15	413,680	60	26,29	394,350	1415,473	0,279	
	1-8a	19,98	20,12	401,998	60	28,41	426,150	1338,652	0,318	0,319
	1-8b	20,12	20,06	403,607	60	25,09	376,350	1353,429	0,278	
	1-8c	19,77	20,04	396,191	60	31,42	471,300	1305,449	0,361	
2	2-1a	20,32	20,04	407,213	60	85,33	1279,950	1379,094	0,928	0,889
	2-1b	20,58	20,2	415,716	60	75,57	1133,550	1425,906	0,795	
	2-1c	20,22	19,99	404,198	60	85,74	1286,100	1362,147	0,944	
	2-2a	20,47	20,05	410,424	60	62,39	935,850	1400,228	0,668	0,585
	2-2b	20,13	20,13	405,217	60	56,06	840,900	1359,503	0,619	
	2-2c	21,07	20,18	425,193	60	46,47	697,050	1493,135	0,467	
3	3-1a	20,42	20,24	413,301	60	88,68	1330,200	1406,600	0,946	0,901
	3-1b	20,85	20,36	424,506	60	78,73	1180,950	1475,158	0,801	
	3-1c	20,66	20,13	415,886	60	91,22	1368,300	1432,033	0,955	
	3-2a	20,02	20,41	408,608	60	67,92	1018,800	1363,389	0,747	0,741
	3-2b	20,16	20,32	409,651	60	56,12	841,800	1376,428	0,612	
	3-2c	20,08	20,36	408,829	60	78,85	1182,750	1368,214	0,864	

Anhang A

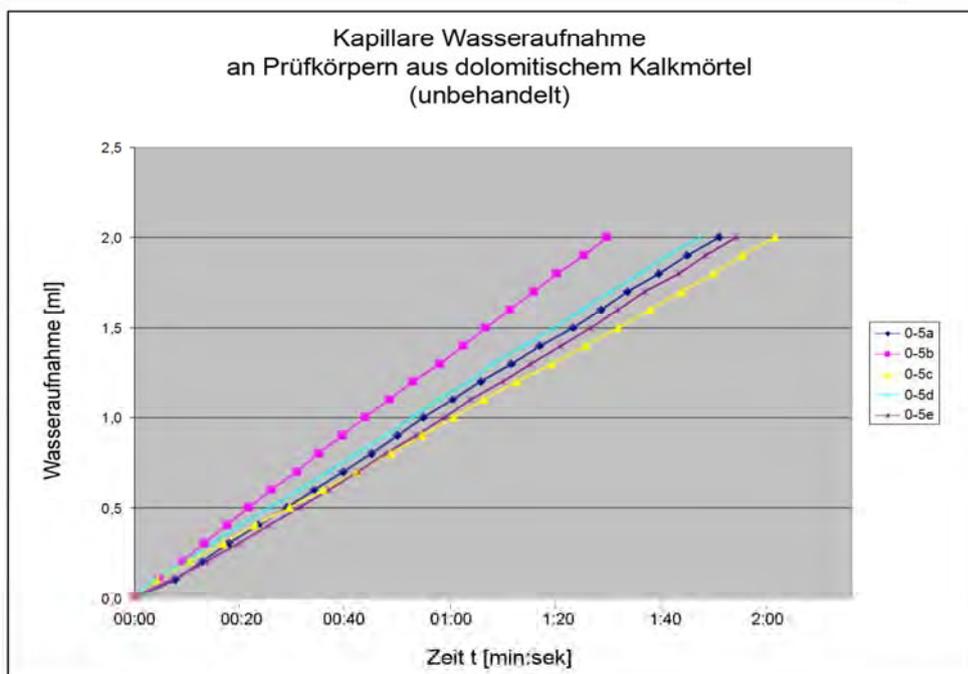
ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 3-03/ Blatt 2/2

Test-reihe	Probe Nr.	Probe			Aufl.-Weite l [mm]	Bruch-kraft F [N]	Biege-moment $M_B=(F \times l)/4$	Widerstands-moment $W_y=(b \times h^3)/6$	BZF $\beta = M_B / W$	Durchschnitt Serie $\bar{\beta}$ [N/mm ²]
		Höhe h [mm]	Breite b [mm]	Fläche A [mm ²]						
4	4-1a	20,63	20,27	418,170	60	100,19	1502,850	1437,808	1,045	1,012
	4-1b	20,56	20,11	413,462	60	109,94	1649,100	1416,795	1,164	
	4-1c	20,87	20,37	425,122	60	81,47	1222,050	1478,716	0,826	
	4-2a	20,86	20,34	424,292	60	93,91	1408,650	1475,123	0,955	0,894
	4-2b	20,44	20,11	411,048	60	75,91	1138,650	1400,305	0,813	
	4-2c	19,98	20,01	399,800	60	81,16	1217,400	1331,333	0,914	
5	5-1a	20,24	20,51	415,122	60	131,85	1977,750	1400,346	1,412	1,179
	5-1b	20,72	19,96	413,571	60	109,12	1636,800	1428,199	1,146	
	5-1c	20,25	20,61	417,353	60	91,76	1376,400	1408,565	0,977	
	5-2a	20,02	20,68	414,014	60	59,08	886,200	1381,425	0,642	0,783
	5-2b	21,19	20,1	425,919	60	78,42	1176,300	1504,204	0,782	
	5-2c	20,34	20,24	411,682	60	86,10	1291,500	1395,601	0,925	
6	6-1a	20,35	20,05	408,018	60	73,52	1102,800	1383,859	0,797	0,937
	6-1b	20,89	20,04	418,636	60	95,04	1425,600	1457,550	0,978	
	6-1c	20,94	20,12	421,313	60	101,65	1524,750	1470,382	1,037	
7	7-1a	20,32	20,18	410,058	60	81,26	1218,900	1388,728	0,878	0,870
	7-1b	20,18	20,02	404,004	60	77,95	1169,250	1358,799	0,861	
	7-1c	20,15	19,96	402,194	60	78,39	1175,850	1350,702	0,871	
	7-2a	20,41	20,23	412,894	60	67,85	1017,750	1404,529	0,725	0,754
	7-2b	20,13	20,26	407,834	60	70,40	1056,000	1368,282	0,772	
	7-2c	21,26	19,99	424,987	60	76,74	1151,100	1505,872	0,764	
	7-3a	19,99	20,16	402,998	60	41,85	627,750	1342,656	0,468	0,444
	7-3b	19,84	20,08	398,387	60	38,66	579,900	1317,334	0,440	
	7-3c	20,22	20,04	405,209	60	38,52	577,800	1365,554	0,423	

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 4 / Blatt 1/4

Aufgabe: Ermittlung der Wasseraufnahme / Zeit an unbehandelten und behandelten Prüfkörpern
Proben: laborseits hergestellte Prismen 2 x 2 x 10 cm aus dolomit. Kalkmörtel
Vorbehandlung Probi: Trocknen bei 105 °C bis zur Massenkonstanz
Methode: Kapillartränkung mittels Prüfröhrchen über Kontaktschwamm
Bedingungen: unkontionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, ca. 35-40% RF)

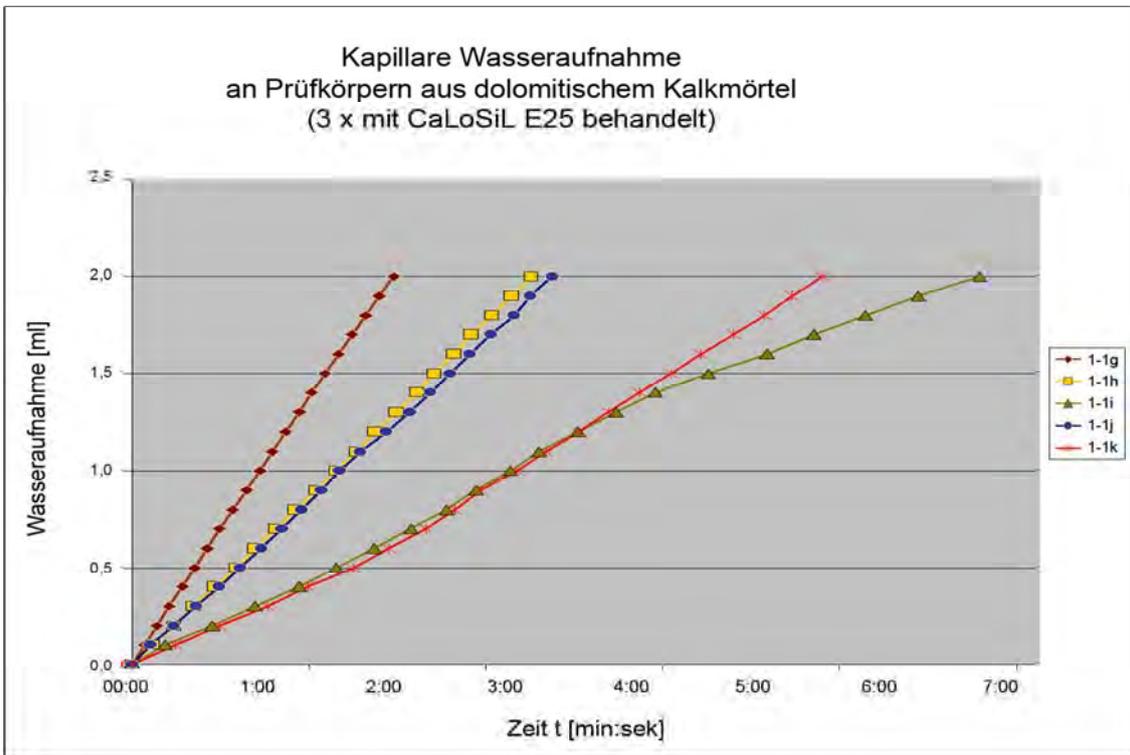
Wasser-auf-nahme [ml]	Probe Nr. 0-5a	0-5b	0-5c	0-5d	0-5e
	Zeit [min:sek]				
0,0	00:00,0	00:00,0	00:00,0	00:00,0	00:00,0
0,1	00:07,8	00:04,7	00:04,4	00:03,8	00:07,2
0,2	00:13,2	00:09,2	00:10,5	00:09,7	00:14,1
0,3	00:18,3	00:13,5	00:17,2	00:15,2	00:20,3
0,4	00:23,9	00:17,8	00:23,3	00:20,6	00:26,0
0,5	00:29,4	00:22,1	00:29,8	00:26,1	00:31,7
0,6	00:34,6	00:26,5	00:36,4	00:31,7	00:37,6
0,7	00:40,3	00:31,4	00:43,0	00:37,4	00:43,2
0,8	00:45,7	00:35,6	00:49,4	00:42,8	00:48,4
0,9	00:50,7	00:40,1	00:55,4	00:48,5	00:54,2
1,0	00:55,7	00:44,5	01:01,6	00:53,5	00:59,7
1,1	01:01,3	00:49,2	01:07,4	00:58,4	01:04,8
1,2	01:06,8	00:53,7	01:13,7	01:04,7	01:11,1
1,3	01:12,7	00:58,8	01:20,5	01:08,9	01:16,3
1,4	01:18,2	01:03,3	01:26,9	01:15,0	01:22,1
1,5	01:24,6	01:07,7	01:33,2	01:20,9	01:28,0
1,6	01:30,0	01:12,4	01:39,5	01:26,3	01:33,2
1,7	01:35,0	01:17,1	01:45,5	01:31,8	01:38,4
1,8	01:41,1	01:21,5	01:51,6	01:37,5	01:44,9
1,9	01:46,6	01:26,7	01:57,2	01:42,8	01:50,1
2,0	01:52,7	01:31,1	02:03,4	01:49,0	01:56,0



ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 4 / Blatt 2/4

Behandlung: CaLoSiL E25, dreimalige Tauchbehandlung

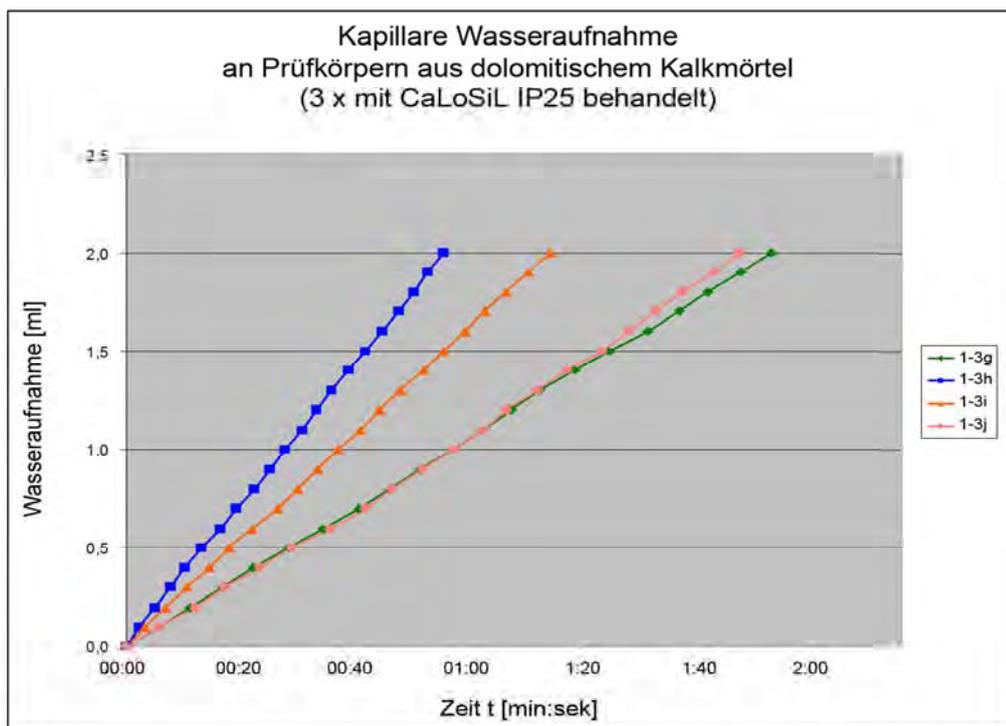
Wasser-auf-nahme [ml]	Probe Nr. 1-1g	1-1h	1-1i	1-1j	1-1k
	Zeit [min:sek]				
0,0	00:00,0	00:00,0	00:00,0	00:00,0	00:00,0
0,1	00:05,9	00:10,1	00:16,4	00:08,7	00:20,9
0,2	00:12,2	00:20,4	00:39,2	00:20,1	00:42,5
0,3	00:18,3	00:30,1	00:59,8	00:31,4	01:05,8
0,4	00:24,6	00:40,0	01:21,6	00:42,9	01:25,6
0,5	00:30,7	00:50,7	01:39,7	00:52,5	01:48,0
0,6	00:36,4	01:00,0	01:58,2	01:03,3	02:05,4
0,7	00:42,7	01:09,9	02:16,4	01:13,1	02:23,4
0,8	00:49,3	01:19,7	02:33,5	01:22,6	02:38,0
0,9	00:55,5	01:30,1	02:48,2	01:32,6	02:50,4
1,0	01:02,1	01:39,3	03:04,8	01:41,3	03:07,6
1,1	01:08,1	01:49,6	03:18,5	01:51,9	03:22,5
1,2	01:15,1	01:59,0	03:37,6	02:04,1	03:38,1
1,3	01:21,3	02:08,7	03:56,2	02:15,7	03:52,6
1,4	01:27,7	02:18,9	04:15,7	02:25,9	04:07,9
1,5	01:34,3	02:27,6	04:41,7	02:35,2	04:23,3
1,6	01:40,7	02:37,2	05:10,2	02:45,0	04:37,7
1,7	01:47,6	02:45,5	05:33,2	02:55,3	04:54,0
1,8	01:53,9	02:55,5	05:58,2	03:06,6	05:08,7
1,9	02:00,5	03:05,2	06:24,3	03:14,4	05:22,4
2,0	02:07,8	03:15,1	06:54,0	03:25,0	05:37,1



ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 4 / Blatt 3/4

Behandlung: CaLoSiL IP25, dreimalige Tauchbehandlung

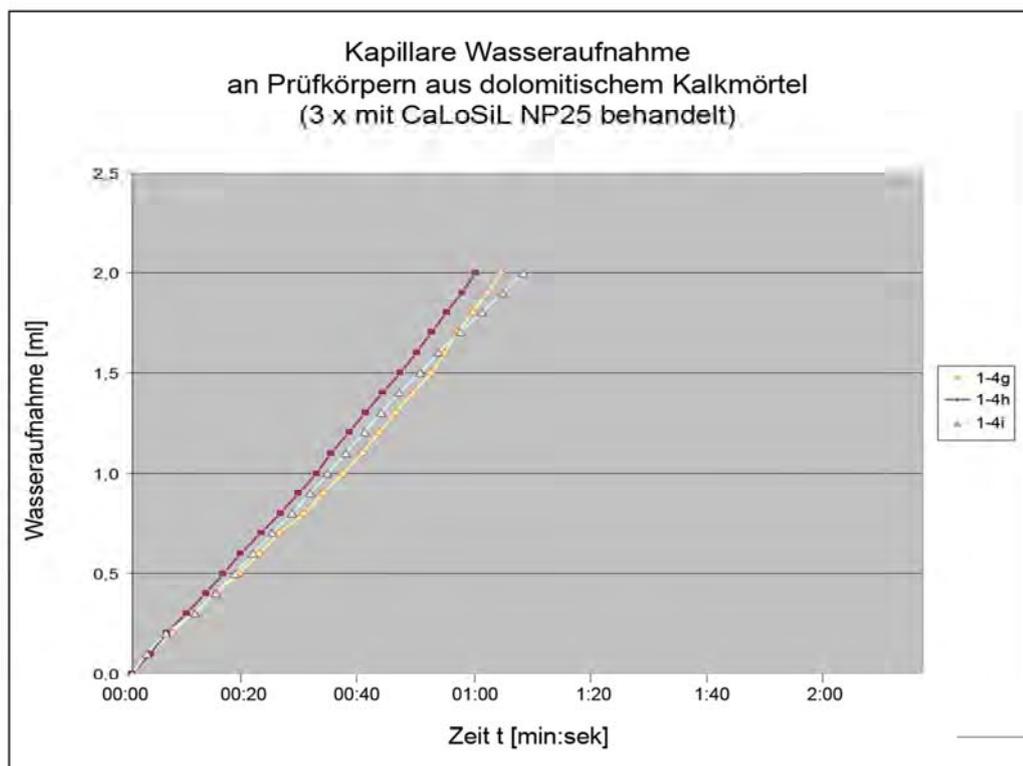
Wasser-auf-nahme [ml]	Probe Nr. 1-3g	1-3h	1-3i	1-3j
	Zeit [min:sek]	Zeit [min:sek]	Zeit [min:sek]	Zeit [min:sek]
0,0	00:00,0	00:00,0	00:00,0	00:00,0
0,1	00:05,8	00:02,3	00:03,1	00:05,5
0,2	00:11,1	00:05,0	00:06,9	00:12,1
0,3	00:16,8	00:07,8	00:10,6	00:17,1
0,4	00:22,2	00:10,1	00:14,4	00:23,2
0,5	00:28,3	00:13,1	00:18,0	00:28,9
0,6	00:34,4	00:16,4	00:22,0	00:35,7
0,7	00:40,7	00:19,2	00:26,4	00:41,7
0,8	00:46,1	00:22,3	00:29,9	00:46,3
0,9	00:51,3	00:25,1	00:33,4	00:51,7
1,0	00:57,1	00:27,7	00:36,9	00:57,2
1,1	01:02,3	00:30,6	00:40,8	01:02,3
1,2	01:07,3	00:33,3	00:44,1	01:06,6
1,3	01:12,2	00:35,9	00:47,9	01:11,8
1,4	01:18,3	00:38,9	00:51,9	01:17,0
1,5	01:24,5	00:41,8	00:55,4	01:23,1
1,6	01:31,2	00:44,7	00:59,1	01:27,8
1,7	01:36,6	00:47,7	01:02,7	01:32,6
1,8	01:41,6	00:50,2	01:06,3	01:37,2
1,9	01:47,4	00:52,7	01:10,2	01:42,7
2,0	01:52,8	00:55,4	01:14,2	01:47,2



ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 4 / Blatt 4/4

Behandlung: CaLoSiL NP25, dreimalige Tauchbehandlung

Wasser-auf-nahme [ml]	Probe Nr. 1-4g	1-4h	1-4i
	Zeit [min:sek]	Zeit [min:sek]	Zeit [min:sek]
0,0	00:00,0	00:00,0	00:00,0
0,1	00:03,1	00:03,1	00:02,6
0,2	00:07,0	00:06,1	00:05,9
0,3	00:10,6	00:09,6	00:10,9
0,4	00:14,7	00:12,8	00:14,6
0,5	00:18,6	00:15,9	00:17,9
0,6	00:22,1	00:18,9	00:21,1
0,7	00:25,7	00:22,5	00:24,5
0,8	00:30,0	00:25,9	00:27,9
0,9	00:33,4	00:29,0	00:31,2
1,0	00:36,8	00:32,2	00:34,2
1,1	00:40,2	00:34,8	00:37,4
1,2	00:43,2	00:38,0	00:40,6
1,3	00:46,1	00:40,8	00:43,5
1,4	00:49,1	00:43,9	00:46,7
1,5	00:52,2	00:46,9	00:50,4
1,6	00:54,6	00:49,8	00:53,6
1,7	00:57,1	00:52,4	00:57,4
1,8	00:59,6	00:55,0	01:01,1
1,9	01:02,1	00:57,6	01:04,9
2,0	01:04,5	01:00,0	01:08,4



ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 5-01/ Blatt 1/4

Aufgabe: Bestimmung der Wasseraufnahme
Proben: Flachproben / Prismen 2 x 2 x 10 cm
 aus laborseits hergestelltem dolomitischem
 Kalkmörtel
Methode: gravimetrisch / nach DIN EN 14617-1
Bedingungen: Atmosphärendruck / unkonditioniertes Klima ca. 20°C ca. 40%RF

1. Messwerte

Testreihe	Nr.	Trockenmasse (m ₀) [g]	Masse getränkt (m _i) [g]	Auftriebswägung (m _a) [g]
0-1	0-1d	60,35	74,95	36,21
	0-1e	60,29	75,20	35,93
	0-1f	61,20	76,00	36,33
0-2	0-2d	60,63	75,66	36,25
	0-2e	59,26	74,34	35,48
	0-2f	56,79	71,46	32,99
0-3	0-3d	61,90	76,33	37,04
	0-3e	61,70	76,24	37,04
	0-3f	64,16	78,59	38,46
1-1	1-1d	59,90	72,89	33,32
	1-1e	60,10	72,49	33,12
	1-1f	54,15	66,53	29,82
1-2	1-2d	62,18	75,44	36,01
	1-2e	59,52	72,85	34,35
	1-2f	60,99	74,32	35,15
1-3	1-3d	67,19	81,07	38,39
	1-3e	68,67	81,70	39,39
	1-3f	67,51	80,74	38,48
1-4	1-4d	57,12	69,94	32,33
	1-4e	65,96	79,48	36,69
	1-4f	66,27	80,61	37,31
2-1	2-1d	62,55	75,99	36,36
	2-1e	61,16	74,99	35,50
	2-1f	61,98	75,28	35,91
3-1	3-1d	62,21	75,26	36,03
	3-1e	61,56	75,57	35,48
	3-1f	62,01	75,81	36,02
4-1	4-1d	64,11	76,68	37,14
	4-1e	63,16	76,19	36,76
	4-1f	63,48	76,41	36,65
5-1	5-1d	66,03	77,94	37,80
	5-1e	65,10	77,13	37,18
	5-1f	63,55	75,49	36,21
5-2	5-2d	62,16	75,29	35,61
	5-2e	63,12	76,05	36,13
	5-2f	64,61	76,50	36,71

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 5-01/ Blatt 2/4

Testreihe	Nr.	Trockenmasse (m ₀) [g]	Masse getränkt (m _i) [g]	Auftriebswägung (m _a) [g]
6-1	6-1d	64,43	77,54	37,72
	6-1e	61,84	74,62	35,63
	6-1f	63,79	76,39	36,78
7-1	7-1d	60,66	74,40	35,12
	7-1e	62,34	75,51	35,62
	7-1f	57,88	69,56	32,70
7-2	7-2d	64,09	77,79	37,02
	7-2e	62,67	75,75	35,99
	7-2f	67,66	81,62	39,22
7-3	7-3d	59,11	71,72	34,16
	7-3e	57,88	68,60	32,95
	7-3f	60,35	73,08	34,72

2. Berechnungswerte I

Testreihe	Nr.	Wasser- aufnahme (m _w) [g]	massebezogene Wasseraufnahme (W _m) [Ma%]	Roh-volumen (V _i) [cm ³]	Rohdichte (ρ _d) [g/cm ³]	volumenbezogene Wasseraufnahme (W _v) [Vol%]	
		= (m _i) - (m ₀)	= m _w /m ₀ x 100%	= (m _i) - (m _a)	= (m ₀)/(V _i)	= m _w xρ _d /(m ₀)xρ _w x 100%	
0-1	0-1d	14,60	24,2	38,74	1,56	37,7	
	0-1e	14,91	24,7	39,27	1,54	38,0	
	0-1f	14,80	24,2	39,67	1,54	37,3	
0-2	0-2d	15,03	24,8	39,41	1,54	38,1	
	0-2e	15,08	25,5	38,86	1,52	38,8	
	0-2f	14,66	25,8	38,47	1,48	38,1	
0-3	0-3d	14,44	23,3	39,30	1,58	36,7	Ø 37,5
	0-3e	14,54	23,6	39,19	1,57	37,1	
	0-3f	14,43	22,5	40,13	1,60	36,0	
1-1	1-1d	12,99	21,7	39,57	1,51	32,8	Ø 32,7
	1-1e	12,39	20,6	39,37	1,53	31,5	
	1-1f	12,38	22,9	36,71	1,48	33,7	
1-2	1-2d	13,26	21,3	39,43	1,58	33,6	Ø 34,6
	1-2e	13,33	22,4	38,50	1,55	34,6	
	1-2f	13,93	22,8	39,17	1,56	35,6	
1-3	1-3d	13,88	20,7	42,68	1,57	32,5	Ø 31,5
	1-3e	13,03	19,0	42,31	1,62	30,8	
	1-3f	13,23	19,6	42,26	1,60	31,3	
1-4	1-4d	12,82	22,4	37,61	1,52	34,1	Ø 32,9
	1-4e	13,52	20,5	42,80	1,54	31,6	
	1-4f	14,34	21,6	43,30	1,53	33,1	
2-1	2-1d	13,44	21,5	39,63	1,58	33,9	Ø 34,2
	2-1e	13,83	22,6	39,49	1,55	35,0	
	2-1f	13,30	21,5	39,37	1,57	33,8	
3-1	3-1d	13,05	21,0	39,23	1,59	33,3	Ø 34,3
	3-1e	14,01	22,8	40,09	1,54	35,0	
	3-1f	13,80	22,3	39,79	1,56	34,7	
4-1	4-1d	12,57	19,6	39,54	1,62	31,8	Ø 32,5
	4-1e	13,03	20,6	39,44	1,60	33,0	
	4-1f	12,93	20,4	39,76	1,60	32,5	
5-1	5-1d	11,91	18,0	40,15	1,64	29,7	Ø 30,1
	5-1e	12,04	18,5	39,95	1,63	30,1	
	5-1f	11,95	18,8	39,29	1,62	30,4	
5-2	5-2d	13,13	21,1	39,69	1,57	33,1	Ø 31,8
	5-2e	12,94	20,5	39,93	1,58	32,4	
	5-2f	11,88	18,4	39,78	1,62	29,9	

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 5-01/ Blatt 3/4

Test-reihe	Nr.	Wasser-aufnahme (m _w) [g]	massebezogene Wasseraufnahme (W _m) [Ma%]	Roh-volumen (V ₁) [cm ³]	Rohdichte (ρ _d) [g/cm ³]	volumenbezogene Wasseraufnahme (W _v) [Vol%]	
		= (m _i) - (m ₀)	= m _w /m ₀ x 100%	= (m _i) - (m _a)	= (m ₀)/(V ₁)	= m _w xρ _d /(m ₀)xρ _w x 100%	
6-1	6-1d	13,11	20,3	39,82	1,62	32,9	Ø 32,5
	6-1e	12,78	20,7	38,99	1,59	32,8	
	6-1f	12,61	19,8	39,61	1,61	31,8	
7-1	7-1d	13,74	22,7	39,28	1,54	35,0	Ø 33,2
	7-1e	13,17	21,1	39,89	1,56	33,0	
	7-1f	11,68	20,2	36,86	1,57	31,7	
7-2	7-2d	13,70	21,4	40,76	1,57	33,6	Ø 33,1
	7-2e	13,08	20,9	39,77	1,58	32,9	
	7-2f	13,96	20,6	42,40	1,60	32,9	
7-3	7-3d	12,62	21,3	37,57	1,57	33,6	Ø 32,3
	7-3e	10,72	18,5	35,65	1,62	30,1	
	7-3f	12,73	21,1	38,36	1,57	33,2	

3. Berechnungswerte II

Test-reihe	Nr.	Wasser-aufnahme (m _w) [g]	Volumen aufgenommenen Wassers (V _w) [cm ³]	Roh-volumen (V ₁) [cm ³]	Feststoff-zufuhr (Ca(OH) ₂) m _{Ca(OH)2} [g]	Volumen eingelagertes CaCO ₃ (V _{CaCO3})[cm ³]	Anteil H ₂ O- und CaCO ₃ -haltiger Poren [Vol%]	
		= (m _i) - (m ₀)	= (m _w) x ρ _w	= (m _i) - (m _a)		= m _{Ca(OH)2} x 1,351 / ρ _{CaCO3}	= [V _{CaCO3} +V _w]x100% / (V ₁)	
0-1	0-1d	14,60	14,58	38,74	0,00	0,00	37,63	Ø 37,47
	0-1e	14,91	14,88	39,27	0,00	0,00	37,90	
	0-1f	14,80	14,78	39,67	0,00	0,00	37,24	
0-2	0-2d	15,03	15,00	39,41	0,00	0,00	38,07	Ø 36,38
	0-2e	15,08	15,06	38,86	0,00	0,00	38,74	
	0-2f	14,66	14,64	38,47	0,00	0,00	38,05	
0-3	0-3d	14,44	14,41	39,30	0,00	0,00	36,67	Ø 33,48
	0-3e	14,54	14,51	39,19	0,00	0,00	37,02	
	0-3f	14,43	14,41	40,13	0,00	0,00	35,90	
1-1	1-1d	12,99	12,97	39,57	1,46	0,72	34,60	Ø 34,45
	1-1e	12,39	12,37	39,37	1,59	0,79	33,42	
	1-1f	12,38	12,36	36,71	1,23	0,61	35,33	
1-2	1-2d	13,26	13,23	39,43	1,50	0,74	35,44	Ø 36,38
	1-2e	13,33	13,31	38,50	1,41	0,70	36,37	
	1-2f	13,93	13,90	39,17	1,45	0,72	37,33	
1-3	1-3d	13,88	13,85	42,68	1,74	0,86	34,47	Ø 33,48
	1-3e	13,03	13,01	42,31	1,72	0,85	32,77	
	1-3f	13,23	13,20	42,26	1,67	0,83	33,20	
1-4	1-4d	12,82	12,79	37,61	1,43	0,71	35,91	Ø 34,72
	1-4e	13,52	13,50	42,80	1,60	0,79	33,40	
	1-4f	14,34	14,31	43,30	1,59	0,79	34,87	

ρ_{H2O}=0,9982 g/cm³

ρ_{CaCO3}=2,73 g/cm³

M_{CaCO3} = 100,09 g/Mol

M_{Ca(OH)2} =74,10 g/Mol

M_{CaCO3} / M_{Ca(OH)2} = 1,351

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 5-01/ Blatt 4/4

Testreihe	Nr.	Wasser- aufnahme 1	Wasser- aufnahme	Roh- volumen	Feststoff- zufuhr (Ca(OH) ₂)	Volumen eingelagertes CaCO ₃	Anteil H ₂ O- und CaCO ₃ - haltiger Poren	
		(m _w) [g]	(V _w) [cm ³]	(V _i) [cm ³]	m _{Ca(OH)2} [g]	(V _{CaCO3})[cm ³]	[Vol%]	
		= (m _i) - (m ₀)	= (m _w) x ρ _{H2O}	= (m _i) - (m ₀)		= m _{Ca(OH)2} x 1,351 ρ _{CaCO3}	=[V _{CaCO3} +V _{wp}]/V _i x 100%	
2-1	2-1d	13,44	13,42	39,63	1,53	0,76	35,78	Ø 36,15
	2-1e	13,83	13,81	39,49	1,61	0,80	36,98	
	2-1f	13,30	13,27	39,37	1,57	0,78	35,69	
3-1	3-1d	13,05	13,02	39,23	1,37	0,68	34,93	Ø 36,08
	3-1e	14,01	13,99	40,09	1,46	0,72	36,69	
	3-1f	13,80	13,78	39,79	1,61	0,79	36,62	
4-1	4-1d	12,57	12,55	39,54	1,45	0,72	33,55	Ø 34,36
	4-1e	13,03	13,01	39,44	1,65	0,82	35,05	
	4-1f	12,93	12,91	39,76	1,62	0,80	34,48	
5-1	5-1d	11,91	11,89	40,15	1,58	0,78	31,57	Ø 31,93
	5-1e	12,04	12,01	39,95	1,48	0,73	31,91	
	5-1f	11,95	11,92	39,29	1,55	0,77	32,30	
5-2	5-2d	13,13	13,11	39,69	1,65	0,82	35,08	Ø 33,87
	5-2e	12,94	12,91	39,93	1,68	0,83	34,42	
	5-2f	11,88	11,86	39,78	1,85	0,91	32,11	
6-1	6-1d	13,11	13,08	39,82	1,60	0,79	34,84	Ø 34,35
	6-1e	12,78	12,75	38,99	1,47	0,73	34,58	
	6-1f	12,61	12,58	39,61	1,48	0,73	33,62	
7-1	7-1d	13,74	13,72	39,28	1,44	0,71	36,74	Ø 34,87
	7-1e	13,17	13,15	39,89	1,37	0,68	34,66	
	7-1f	11,68	11,66	36,86	1,17	0,58	33,20	
7-2	7-2d	13,70	13,67	40,76	1,86	0,92	35,79	Ø 35,35
	7-2e	13,08	13,06	39,77	1,81	0,90	35,09	
	7-2f	13,96	13,94	42,40	1,96	0,97	35,16	
7-3	7-3d	12,62	12,59	37,57	1,61	0,80	35,65	Ø 34,42
	7-3e	10,72	10,70	35,65	1,73	0,86	32,40	
	7-3f	12,73	12,71	38,36	1,61	0,80	35,21	

$$\rho_{H_2O} = 0,9982 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{CaCO_3} = 2,73 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{CaCO_3} = 100,09 \text{ g/Mol}$$

$$M_{Ca(OH)_2} = 74,10 \text{ g/Mol}$$

$$M_{CaCO_3} / M_{Ca(OH)_2} = 1,351$$

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 5-02/ Blatt 1/2

Aufgabe: Bestimmung der Wasseraufnahme
Proben: Flachproben / Prismen 2 x 2 x 10 cm
aus laborseits hergestelltem Gipsmörtel

Methode: gravimetrisch / nach DIN EN 14617-1
Bedingungen: Atmosphärendruck / unkonditioniertes Klima ca. 20°C ca. 40%RF

1. Messwerte:

Nr.	Trocken- masse (m ₀) [g]	Masse getränkt (m ₁) [g]	Auftriebs- wägung (m _a) [g]
0-4d	keine Messung möglich		
0-4e			
0-4f			
1-5d	30,61	37,32	17,36
1-5e	24,72	30,35	14,14
1-5f	29,60	36,35	16,91
1-6d	59,05	74,41	34,78
1-6e	58,19	72,99	34,04
1-6f	62,07	77,56	36,68
1-7d	30,62	37,66	17,98
1-7e	29,50	36,66	17,31
1-7f	27,73	34,34	16,14
1-8d	30,15	37,00	17,41
1-8e	27,30	33,71	15,64
1-8f	35,38	42,98	20,57
2-2d	61,03	74,91	35,68
2-2e	59,89	73,65	35,11
2-2f	62,71	76,85	37,04
3-2d	58,81	73,49	34,73
3-2e	61,51	75,16	36,16
3-2f	61,78	75,59	36,64
4-2d	61,93	76,35	37,06
4-2e	61,23	75,46	35,55
4-2f	58,89	72,98	35,11

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 5-02/ Blatt 2/2

2. Berechnungen:

Nr.	Wasser- aufnahme (m_w) [g]	massebezogene Wasseraufnahme (W_m) [Ma%]	Rohvolumen (V_1) [cm ³]	Rohdichte (ρ_d) [g/cm ³]	volumenbezogene Wasseraufnahme (W_v) [Vol%]	
	= (m_i) - (m_0)	= $m_w/m_0 \times 100\%$	= (m_i) - (m_a)	= (m_0)/(V_1)	= $m_w \times \rho_d / (m_0) \times \rho_w \times 100\%$	
0-4d	keine Messung möglich					
0-4e						
0-4f						
1-5d	6,72	21,95	19,96	1,53	33,7	Ø 34,36
1-5e	5,63	22,76	16,21	1,53	34,7	
1-5f	6,75	22,79	19,44	1,52	34,7	
1-6d	15,36	26,02	39,63	1,49	38,8	Ø 38,21
1-6e	14,79	25,42	38,95	1,49	38,0	
1-6f	15,49	24,96	40,88	1,52	37,9	
1-7d	7,03	22,97	19,68	1,56	35,7	Ø 36,36
1-7e	7,16	24,26	19,34	1,52	37,0	
1-7f	6,62	23,87	18,21	1,52	36,4	
1-8d	6,85	22,71	19,59	1,54	35,0	Ø 34,78
1-8e	6,41	23,47	18,07	1,51	35,5	
1-8f	7,60	21,47	22,41	1,58	33,9	
2-2d	13,88	22,75	39,23	1,56	35,4	Ø 35,71
2-2e	13,76	22,98	38,54	1,55	35,7	
2-2f	14,14	22,55	39,81	1,57	34,7	
3-2d	14,68	24,97	38,76	1,52	37,9	Ø 36,11
3-2e	13,65	22,19	39,00	1,58	35,0	
3-2f	13,81	22,36	38,95	1,59	35,5	
4-2d	14,42	23,29	39,29	1,58	36,7	Ø 36,52
4-2e	14,23	23,23	39,91	1,53	35,6	
4-2f	14,09	23,92	37,87	1,55	37,2	

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 6 / Blatt 1/2

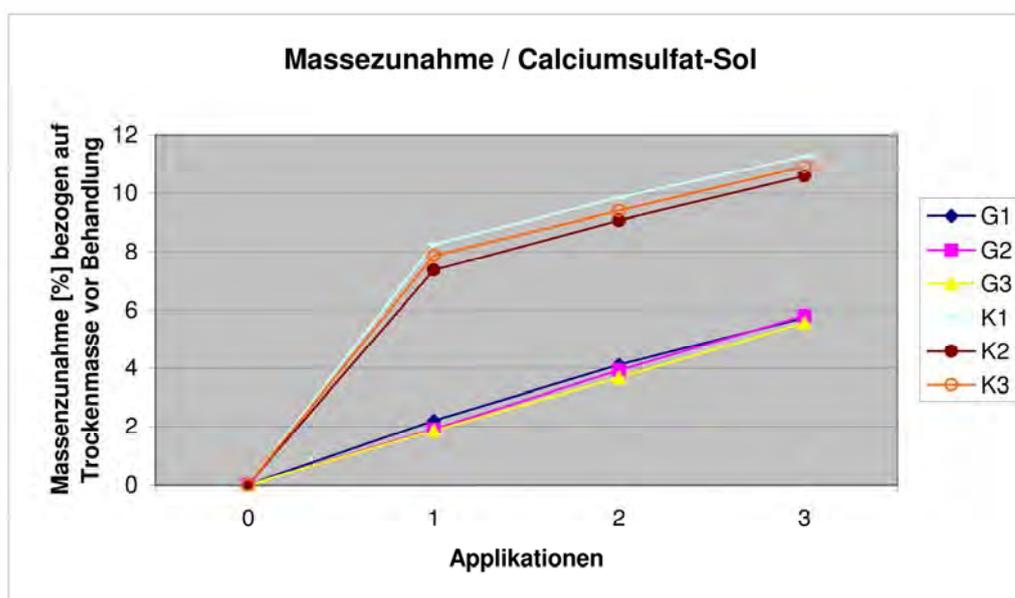
Aufgabe: **Behandlung von Mörtelprüfkörpern mit Calciumsulfat-Nanodispersion**
1. Ermittlung der Massezunahme durch die Behandlung
2. Ermittlung der Biegezugfestigkeit gefestigter Prüfkörper
3. Ermittlung der Wasseraufnahme

Substrat: laborseits hergestellte Prismen 2 x 2 x 10 cm aus Gipsmörtel und dolomitischem Kalkmörtel

1. Massezunahme während/ nach der Behandlung

Vorbehandlung Probe: Trocknen bei 40 °C bis zur Massenkonstanz
Bedingungen Applikation: unkonditionierte Laborbedingungen (ca. 18-20 °C, 35-40% RF)
Bedingungen Aushärtung: 20 °C, 65%RF

Nr.	Trocken- masse Vorzu- stand	Masse nach 1. Applikation, Aushärtung und Trocknung	Masse nach 2. Applikation, Aushärtung und Trocknung	Masse nach 3. Applikation, Aushärtung und Trocknung	Massezunahme	
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[Ma%]
G1	60,92	62,26	63,43	64,42	3,50	5,75
G2	59,02	60,14	61,34	62,45	3,43	5,81
G3	58,58	59,67	60,73	61,84	3,26	5,57
K1	56,35	61,00	61,89	62,68	6,34	11,25
K2	59,61	64,01	65,02	65,92	6,31	10,59
K3	58,80	63,43	64,33	65,21	6,41	10,90



ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 6 / Blatt 2/2

2. Biegezugfestigkeit

Proben: Flachproben / Prismen 2 x 2 x 10 cm
Methode: Dreipunktverfahren
Messgerät: Universalprüfmaschine ZWICK/ ROELL
Software: TestXpert
Kraftaufnehmer: Typ: KAP - Z (1 KN), A.S.T. GmbH Dresden
Traversenabstand: 6 cm
Prüfgeschwindigkeit: 0,15 mm/min
äußere Bedingungen: 20°C, 65%RF

Nr.	Probe			Aufl.- Weite l [mm]	Bruch- kraft F [N]	Biege- moment $M_B=(F \times l)/4$	Widerstands- moment $W=(b \times h^2)/6$	Biegezug- festigkeit $\beta= M_B / W$ [N/mm ²]	Ø Serie B [N/mm ²]
	Höhe	Breite	Fläche						
	h [mm]	b [mm]	A [mm ²]						
G4	20,86	20,15	420,33	60,00	29,82	447,30	1461,34	0,31	
G5	20,18	20,06	404,81	60,00	32,04	480,60	1361,51	0,35	
G6	19,72	20,22	398,74	60,00	25,57	383,55	1310,52	0,29	0,32
K4	20,01	20,30	406,20	60,00	39,93	598,95	1354,69	0,44	
K5	20,56	20,47	420,86	60,00	48,23	723,45	1442,16	0,50	
K6	20,06	19,63	393,78	60,00	36,33	544,95	1316,53	0,41	0,45

3. Wasseraufnahme

Methode: gravimetrisch / nach DIN EN 14617-1
Bedingungen: Atmosphärendruck / unkonditioniertes Klima ca. 20°C/ 40%RF

Nr.	Trocken- masse (m ₀) [g]	Masse getränkt (m _i) [g]	Auftriebs- wägung (m _a) [g]	Wasser- aufnahme (m _w) [g]	Roh- volumen (V _i) [cm ³]	Wasserkapazität (Φ _K) [cm ³ /cm ³]
				= (m _i) - (m ₀)	= (m _i) - (m _a)	= (m _w) x ρ _{H2O} / (V _i)
G1	61,20	74,31	34,06	13,11	40,25	0,33
G2	59,33	70,66	33,15	11,33	37,51	0,30
G3	58,75	71,26	32,83	12,51	38,42	0,32
K1	59,70	71,06	32,41	11,36	38,66	0,29
K2	62,96	75,00	33,69	12,04	41,31	0,29
K3	62,14	73,89	33,66	11,75	40,23	0,29

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 7 / Blatt 1/3

Aufgabe: **Behandlung von Lockersubstraten mit modifizierten Nanodispersion**
Substrat: Proben a) Quarzsand (0,71...1,0mm)
 Proben b) Marmorgries (0,7...1,2mm)
Bedingungen Applikation: unkonditionierte Laborbedingungen (ca. 18-20°C, 35-40% F
Bedingungen Aushärtung: 20°C, 65%RF
Mischungen: siehe Abschnitt 9.3 / S. 96ff.

1. Mengen

Test Nr.	1. Appl. Menge [ml]	2. Appl. Menge [ml]	3. Appl. Menge [ml]	Gesamtmenge [ml]	Bindemittel im Substrat	
					Kluccel [g]	CaCO3 [g]
1	2,7	1,8	2,7	7,2	-	0,24
2	2,7	0,8	1	4,5	-	0,30
3	2	0	0	2	-	0,13
4	2,9	1,5	2,5	6,9	-	0,21
5	2	0	0	2	0,0007	0,12
6	2,7	1,9	2,6	7,2	0,0047	0,20
7	2,8	2,4	2,2	7,4	0,0010	0,21
8	2,8	2,3	2	7,1	0,0005	0,22
9	2,7	2,3	2,2	7,2	0,0025	0,20
10	2,8	2,3	2,2	7,3	0,0014	0,22
11	2,8	2,3	2,1	7,2	0,0015	0,22
12	2,6	1,6	2,5	6,7	0,0047	0,19
13	2,8	2,3	2,2	7,3	0,0028	0,22
14	2,7	1,8	2,5	7	0,0052	0,20
15	2,5	1,9	2,5	6,9	0,0099	0,19
16	2,6	1,6	2,5	6,7	0,0288	0,11
17	2,8	1,5	2	6,3	-	0,37
18	2,8	1,7	2	6,5	-	0,23
19	2,8	1,5	1,5	5,8	0,0043	0,29
20	2,8	1,4	1,5	5,7	0,0043	0,17
21	2,8	1,6	2,1	6,5	0,0025	0,35
22	3	1,9	2	6,9	0,0026	0,23
23	2,8	1,5	1,8	6,1	0,0012	0,33
24	2,9	1,9	2	6,8	0,0013	0,22
25-1	1	-	-	1	0,0039	-
25-2	3	-	-	3	0,0118	-
26-1	1	-	-	1	0,0042	-
26-2	3	-	-	3	0,0125	-
27-1	1	-	-	1	0,0045	-
27-2	3	-	-	3	0,0134	-
28	3	-	-	3	0,0237	-
29	3	-	-	3	0,0258	-

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 7 / Blatt 2/3

2. Beobachtungen

Quarzsand 0,71...1,0mm

	Eindringverhalten	Oberfläche	Festigkeit
1a	gutes Eindringen	geringe Weißschleierbildung	ungefestigt, lose
2a	verzögertes Eindringen bei dritter Applikation	dünne weiße Auflagerung	sehr geringe Verfestigung, oberflächlich zunehmend
3a	kein Eindringen bei erster Applikation	weiße Auflagerung	ungefestigt, lose
4a	gutes Eindringen	weißer Schleier	ungefestigt, lose
5a	kein Eindringen bei erster Applikation	weiße Auflagerung	oberflächlich mäßige Festigkeit, darunter lose
6a	gutes Eindringen	geringe Weißschleierbildung	oberflächlich hart, darunter mäßige Festigkeit
7a	gutes Eindringen	geringe Aufhellung	kaum verfestigt
8a	gutes Eindringen	mäßige Aufhellung	kaum verfestigt
9a	gutes Eindringen	geringe Aufhellung	gering verfestigt, oben etwas härter
10a	gutes Eindringen	geringe Aufhellung	gering verfestigt
11a	gutes Eindringen	geringe Aufhellung	gering verfestigt
12a	gutes Eindringen	kaum Aufhellung	durchgefestigt, oben härter
13a	gutes Eindringen	mäßige Aufhellung	mäßig fest, oben etwas härter
14a	gutes Eindringen	kaum Aufhellung	durchgefestigt, oben härter
15a	gutes Eindringen	geringe Weißschleierbildung	durchgefestigt, oben sehr hart
16a	gutes Eindringen	kaum verändert	durchgefestigt, oben sehr hart
17a	gutes Eindringen	weißer Schleier	kaum verfestigt
18a	gutes Eindringen	weißer Schleier	kaum verfestigt
19a	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich fest, darunter kaum
20a	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich fest, darunter kaum
21a	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich fest, darunter kaum
22a	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich mäßig fest, darunter
23a	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich mäßig fest, darunter
24a	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich gering verfestigt, darunter lose
25-1a	gutes Eindringen	keine Veränderung	oberflächlich fest, darunter kaum
25-2a	gutes Eindringen	keine Veränderung	mäßig durchgefestigt, oberflächlich
26-1a	gutes Eindringen	keine Veränderung	oberflächlich fest, darunter kaum
26-2a	gutes Eindringen	keine Veränderung	durchgefestigt, oberflächlich härter
27-1a	gutes Eindringen	keine Veränderung	oberflächlich fest, darunter kaum
27-2a	gutes Eindringen	keine Veränderung	oberflächlich hart, darunter gering verfestigt
28a	gutes Eindringen	keine Veränderung	mäßig durchgefestigt, oberflächlich
29a	gutes Eindringen	keine Veränderung	mäßig durchgefestigt, oberflächlich

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 7 / Blatt 3/3
Substrat: je 8g Marmorgries 0,7...1,2mm

	Eindringverhalten	Oberfläche	Festigkeit
1b	gutes Eindringen	geringe Weißschleierbildung	ungefestigt, lose
2b	verzögertes Eindringen bei dritter Applikation	Weißschleier	sehr geringe Verfestigung, oberflächlich zunehmend
3b	kein Eindringen bei erster Applikation	weiße Auflagerung	ungefestigt, lose
4b	gutes Eindringen	weißer Schleier	ungefestigt, lose
5b	kein Eindringen bei erster Applikation	Weißschleier	oberflächlich mäßige Festigkeit, darunter lose
6b	gutes Eindringen	geringe Weißschleierbildung	oberflächlich hart, darunter mäßige Festigkeit
7b	gutes Eindringen	geringe Aufhellung	kaum verfestigt
8b	gutes Eindringen	mäßige Aufhellung	kaum verfestigt
9b	gutes Eindringen	geringe Aufhellung	gering verfestigt, oben etwas härter
10b	gutes Eindringen	geringe Aufhellung	kaum verfestigt
11b	gutes Eindringen	geringe Aufhellung	gering verfestigt
12b	gutes Eindringen	kaum Aufhellung	durchgefestigt, oben härter
13b	gutes Eindringen	mäßige Aufhellung	mäßig fest, oben etwas härter
14b	gutes Eindringen	kaum Aufhellung	durchgefestigt, oben härter
15b	gutes Eindringen	geringe Weißschleierbildung	durchgefestigt, oben sehr hart
16b	gutes Eindringen	kaum verändert	durchgefestigt, oben sehr hart
17b	gutes Eindringen	weißer Schleier	kaum verfestigt
18b	gutes Eindringen	weißer Schleier	kaum verfestigt
19b	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich fest, darunter kaum
20b	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich fest, darunter kaum
21b	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich fest, darunter kaum
22b	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich mäßig fest, darunter
23b	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich mäßig fest, darunter
24b	gutes Eindringen	weißer Schleier	oberflächlich gering verfestigt, darunter lose
25-1b	gutes Eindringen	keine Veränderung	oberflächlich fest, darunter kaum
25-2b	gutes Eindringen	keine Veränderung	mäßig durchgefestigt, oberflächlich
26-1b	gutes Eindringen	keine Veränderung	oberflächlich fest, darunter kaum
26-2b	gutes Eindringen	keine Veränderung	durchgefestigt, oberflächlich härter
27-1b	gutes Eindringen	keine Veränderung	oberflächlich fest, darunter kaum
27-2b	gutes Eindringen	keine Veränderung	oberflächlich hart, darunter gering verfestigt
28b	gutes Eindringen	keine Veränderung	mäßig durchgefestigt, oberflächlich
29b	gutes Eindringen	keine Veränderung	mäßig durchgefestigt, oberflächlich

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 8 / Blatt 1/1

Aufgabe: **Behandlung von Kalkstein mit modifizierten Nanodispersionen**

Substrat: Fuping-County-Limestone II
gebrannt bei 700°C, mit Wasser gelöscht

Bedingungen Applikation: unkonditionierte Laborbedingungen (ca. 18-20°C, 35-40% RF)

Bedingungen Aushärtung: 20°C, 65%RF

1. Behandlung im Sandbett

Nr.	Ca Lo SiL	Klucel G	Mischung (Volumenteile)	Anzahl Applikationen	Ergebnis
I.1	E25	-	-	2	keine Verfestigung
I.2	E25	2% KlucelG in Ethanol	100+100	1	außen geringe, innen keine Verfestigung
I.3	E25	2% KlucelG in Ethanol	100+50	1	Verfestigung nicht ausreichend
I.4	E25	2% KlucelG in Ethanol	100+33	1	Verfestigung nicht ausreichend
I.5	E25	2% KlucelG in Ethanol	100+25	1	Verfestigung nicht ausreichend
I.6	E25	0,5% KlucelG in Ethanol	100+20	2	obere Lage verfestigt, innen keine Verfestigung
I.7	E25	0,5 % in 50 Vol% Ethanol + 50 Vol% Wasser	100+20	3	gute Verfestigung
I.8	E25	0,5 % in 50 Vol% Ethanol + 50 Vol% Wasser	100+100	2	Verfestigung nur kleinerer Gefügestörungen

2. Behandlung offen lagernder Proben

Erster Behandlungszyklus

Serie Nr.	Ca Lo SiL	Klucel G	Mischung (Volumenteile)	Anzahl Applikationen	Ergebnis
II.1	E25	0,5 % in 67 Vol% Ethanol + 33 Vol% Wasser	100+20	3	gute Verfestigung bis Gefügeschäden ca. <0,5mm
II.2	E25	0,5 % in 67 Vol% Ethanol + 33 Vol% Wasser	100+10	3	gute Verfestigung bis Gefügeschäden ca. <0,5mm
II.3	E25	0,5 % in 50 Vol% Ethanol + 50 Vol% Wasser	100+20	3	gute Verfestigung bis Gefügeschäden ca. <0,5mm

Zweiter Behandlungszyklus

Serie	Nr.	Festigungsmittel			Ergebnisse			
		CaLoSiL		Mischungsverhältnis CaLoSiL+K*+W**	Bruchfestigung	Rissfestigung	Rissfüllung	Schwundrisse
		E50 (Volumenteile)	mikro					
II.1	-1	3	1	100+20+0	teilweise	ja	teilweise	keine
	-3	1	1	100+20+0	ja	ja	teilweise	keine
II.2	-1	2	1	100+20+0	ja	ja	teilweise	gering
	-2	1	1	100+20+0	ja	ja	teilweise	keine
II.3	-1	1	1	100+0+10	teilweise	ja	teilweise	stark
	-3	1	1	100+0+0	teilweise	ja	teilweise	stark

*K = 0,5 ma% Klucel G in 50Vol% Ethanol+ 50Vol%Wasser

**W = Wasser

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 9 / Blatt 1/2

Aufgabe:	Messung der Zugfestigkeit von Injektionsmassen
Proben:	Verbundproben: Injektionsmassen zwischen zwei Ziegelkuben (jeweils ca. 2x2x1cm)
Methode:	Abzugsversuch
Messgerät:	Universalprüfmaschine ZWICK/ ROELL
Software:	TestXpert
Kraftaufnehmer:	Typ: KAP - Z (1 KN), A.S.T. GmbH Dresden
Traversenabstand:	6 cm
Prüfgeschwindigkeit:	0,15 mm/min
äußere Bedingungen:	20°C, 65%RF

Probe Nr.	Rechteckfläche			Kreisfläche		max. Zugkraft F_{max} [N]	Zugfestigkeit β_z [N/mm ²]	K = Kohäsions A = Adhäsions -bruch
	Höhe	Breite	Fläche	Durchm.	Fläche			
	h [mm]	b [mm]	A [mm ²]	d [mm]	A [mm ²]			
HFM1a	23,2	24,8	575,4	-	-	0,11	0,00	A
HFM1b	-	-	-	24,7	479,2	0,6	0,001	K
HFM1c	-	-	-	22,9	411,9	1,22	0,003	K
HFM2a	-	-	-	24,8	483,1	5	0,010	A
HFM2b	-	-	-	24,2	460,0	0,99	0,002	A
HFM2c	-	-	-	24,5	471,4	2,87	0,006	A
HFM3a	23,4	24,3	568,6	-	-	0,43	0,001	A
HFM3b						kein Messwert		
HFM3c						kein Messwert		
HFM4a	22	23,7	521,4	-	-	1,27	0,002	A
HFM4b						kein Messwert		
HFM4c	23,1	23,1	533,6	-	-	0,19	0,000	K
HFM5a	23,1	24,3	561,3	-	-	1,61	0,003	A
HFM5b	23,3	25	582,5	-	-	1,06	0,002	A
HFM5c	22,9	24,4	558,8	-	-	0,18	0,000	A
HFM6a	23,4	23,7	554,6	-	-	0,37	0,001	A
HFM6b	23,9	24	573,6	-	-	0,31	0,001	A
HFM6c	22,2	23,1	512,8	-	-	0,72	0,001	A
HFM7a	23	24	552,0	-	-	0,9	0,002	A
HFM7b	23,5	24,1	566,4	-	-	0,65	0,001	K
HFM7c	23,4	23,5	549,9	-	-	0,23	0,000	K
HFM 9a	20,45	25,13	513,9	-	-	2,69	0,005	A
HFM 9b	20,56	21,78	447,8	-	-	2,66	0,006	A
HFM 9c	23,34	23,07	538,5	-	-	3,91	0,007	A
HFM 14a	21,92	23,12	506,8	-	-	6,42	0,013	A
HFM 14b	22,59	22,27	503,1	-	-	4,83	0,010	A
HFM 14c	23,59	23,89	563,6	-	-	6,61	0,012	A
HFM 15a	-	-	-	23,5	433,7	0,88	0,002	A
HFM 15b	23,8	23	547,4	-	-	3,24	0,006	A
HFM 15c	23,15	22,3	516,2	-	-	4,17	0,008	A
HFM 20a	25,5	24,1	614,6	-	-	1,75	0,003	A
HFM 20b	23,25	25,5	592,9	-	-	4,1	0,007	A
HFM 20c	22,7	22,6	513,0	-	-	2,02	0,004	A
HFM 23a	22,8	23,5	535,8	-	-	9,29	0,017	A
HFM 23b	22,7	25,9	587,9	-	-	10	0,017	A
HFM 23c	21,9	22,8	499,3	-	-	11,08	0,022	A

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 9 / Blatt 2/2

Probe Nr.	Rechteckfläche			Kreisfläche		max. Zugkraft F_{\max} [N]	Zugfestigkeit β_z [N/mm ²]	K = Kohäsions A = Adhäsions -bruch
	Höhe	Breite	Fläche	Durchm.	Fläche			
	h [mm]	b [mm]	A [mm ²]	d [mm]	A [mm ²]			
HFM 24a	23,2	23,9	554,5	-	-	4,55	0,008	A
HFM 24b	23,1	22,7	524,4	-	-	12,76	0,024	A
HFM 24c	22,8	24,5	558,6	-	-	6,29	0,011	A
HFM 26a	-	-	-	25,4	506,7	4,32	0,009	A
HFM 26b	22,5	23	517,5	-	-	6,53	0,013	A
HFM 26c	23,2	23,4	542,9	-	-	9,17	0,017	A
HFM 28a	23,1	24,6	568,3	-	-	7,53	0,013	A
HFM 28b	22,6	24,1	544,7	-	-	8,24	0,015	A
HFM 28c	22,5	21,8	490,5	-	-	13,39	0,027	A
HFM 29a	22,8	22,7	517,6	-	-	4,06	0,008	A
HFM 29b	-	-	-	-	-	kein Messwert	-	-
HFM 29c	21,8	23,8	518,8	-	-	23,91	0,046	A
HFM 30a	-	-	-	24,6	475,3	33,99	0,072	A
HFM 30b	-	-	-	22	380,1	10,66	0,028	A
HFM 30c	-	-	-	23,2	422,7	16,03	0,038	A
HFM 31a	-	-	-	-	-	kein Messwert	-	-
HFM 31b	23,8	23,2	552,2	-	-	8,56	0,016	K
HFM 31c	24	23,75	570,0	-	-	23,57	0,041	K
HFM 32a	24	24,4	585,6	-	-	25,48	0,044	K
HFM 32b	23	23,5	540,5	-	-	13,13	0,024	K
HFM 32c	24,1	24,2	583,2	-	-	36,75	0,063	K
PLM1a	22,7	23,6	535,7	-	-	44,1	0,082	A
PLM1b	21,6	23,9	516,2	-	-	46,44	0,090	A
PLM1c	22,3	24,4	544,1	-	-	39,99	0,073	A
PLM2a	22,6	24,8	560,5	-	-	34,8	0,062	A
PLM2b	24,3	24,3	590,5	-	-	9,1	0,015	A
PLM2c	22,2	23,3	517,3	-	-	34,9	0,067	A

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 10-01/ Blatt 1/2

Aufgabe: Ermittlung der Massezunahme von historischem Mörtelmaterial durch die Behandlung mit Nanodispersionen

Substrat: Mörtelprobe L_012 (in Einzelproben geteilt)

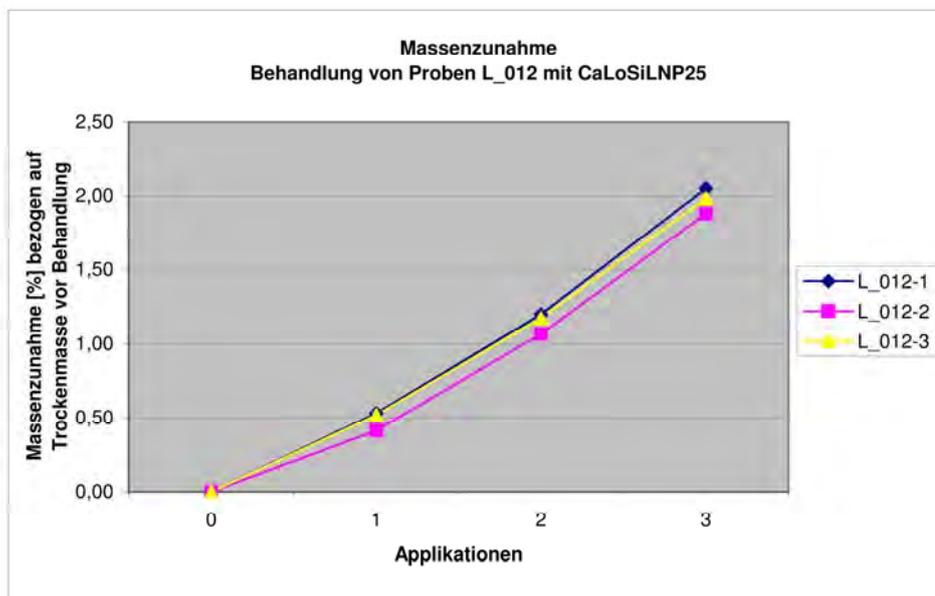
Vorbehandlung Probe: Trocknen bei 40°C bis zur Massenkonstanz

Bedingungen Applikation: unkonditionierte Laborbedingungen (ca. 18-20°C, ca. 35-40% RF)

Bedingungen Aushärtung: 20°C, 65%RF

Fassadenstück von Schloss Leuben, Behandlung mit CaLoSiL NP25

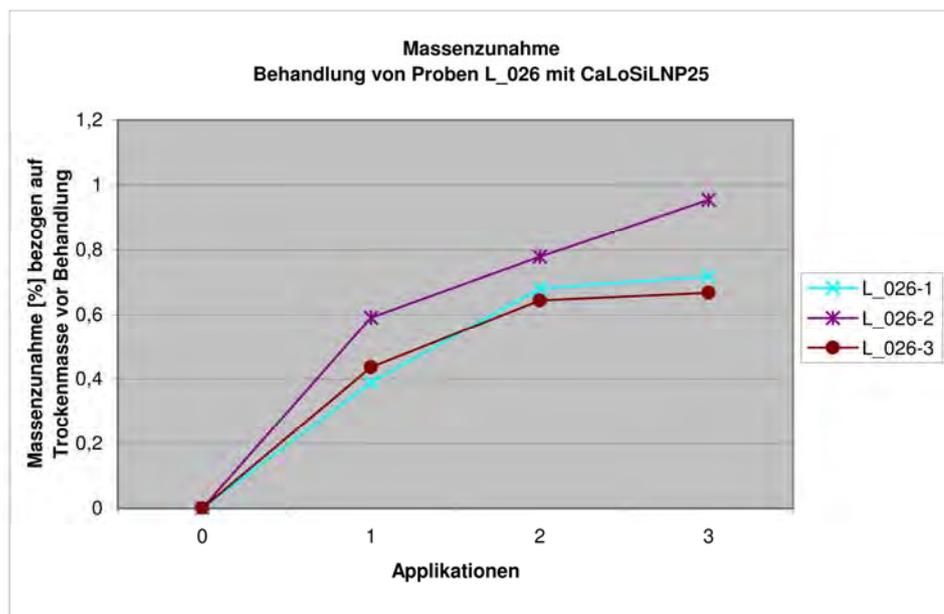
Probe Nr.		L_012-4	L_012-5	L_012-6
Trockenmasse	[g]	42,14	34,23	45,17
Behandlung 1				
Masse nach Aushärtung	[g]	42,67	34,64	45,69
Massezunahme	[g]	0,53	0,41	0,52
	Ma%	1,26	1,21	1,15
Behandlung 2				
Masse nach Aushärtung	[g]	42,81	34,88	45,83
Massezunahme	[g]	0,67	0,65	0,66
	Ma%	1,59	1,90	1,45
Behandlung 3				
Masse nach Aushärtung	[g]	42,99	35,04	45,98
Massezunahme	[g]	0,85	0,81	0,81
prozentuale Massenzunahme	Ma%	2,02	2,38	1,79
Durchschnitt Serie	Ma%	2,06		



ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 10-01/ Blatt 2/2

Innenputz aus Raum 012 / Schloss Leuben, Behandlung mit CaLoSiL NP25

Probe Nr.		L_026-1	L_026-2	L_026-3
Trockenmasse	[g]	82,19	79,64	82,36
Behandlung 1				
Masse nach Aushärtung	[g]	82,51	80,11	82,72
Massezunahme	[g]	0,32	0,47	0,36
	Ma%	0,39	0,59	0,44
Behandlung 2				
Masse nach Aushärtung	[g]	82,75	80,26	82,89
Massezunahme	[g]	0,56	0,62	0,53
	Ma%	0,68	0,78	0,64
Behandlung 3				
Masse nach Aushärtung	[g]	82,78	80,40	82,91
Massezunahme	[g]	0,59	0,76	0,55
prozentuale Massezunahme	Ma%	0,72	0,95	0,67
Durchschnitt Serie	Ma%	0,78		



ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 10-02/ Blatt 1/2

Aufgabe: Bestimmung der Wasseraufnahme von historischem Mörtelmaterial

Proben: Mörtelproben: geteilte Probekörper aus
 Probe L_012 (Schloss Leuben, Tympanon Ostfassade)
 Probe L_026 (Schloss Leuben, Raum 012)
 unregelmäßige Form

Methode: gravimetrisch / nach DIN EN 14617-1

Bedingungen: Atmosphärendruck / unkonditioniertes Klima ca. 20 °C ca. 40%RF

1. Messwerte

PROBEN LEUBEN (dolomitischer Kalkmörtel)

Probe Nr.	Trockenmasse (m ₀) [g]	Masse getränkt (m _t) [g]	Auftriebswägung (m _a) [g]
unbehandelt			
L_012-1	39,90	45,15	21,90
L_012-2	36,94	41,85	20,36
L_012-3	29,84	33,70	16,66
L_026-4	57,98	64,62	32,52
L_026-5	45,66	50,93	25,46
L_026-6	41,76	46,44	23,53
3 x mit CaLoSiL NP25 behandelt			
L_012-4	43,14	48,79	23,78
L_012-5	35,04	39,73	19,52
L_012-6	45,98	51,63	24,86
L_026-7	72,52	80,30	40,95
L_026-8	53,37	59,06	29,94
L_026-9	82,73	91,58	46,30

Probe Nr.	Trockenmasse (m ₀) [g]	Masse getränkt (m _t) [g]	Auftriebswägung (m _a) [g]
unbehandelt			
D_003-1	13,47	15,47	6,10
D_003-2	14,69	16,89	6,69
D_003-5	13,56	15,54	6,20
D_029-5	13,02	15,38	5,51
D_029-6	12,65	14,47	5,28
D_029-7	9,64	11,30	3,97
D_033-6	43,73	48,47	22,39
D_033-7	86,32	95,32	43,64
D_033-8	76,41	84,03	38,51
3 x mit CaSO4-Sol behandelt			
D_003-6	40,43	44,58	17,76
D_003-7	21,61	24,20	9,69
D_003-8	37,39	41,30	16,53
D_029-8	52,74	60,70	20,89
D_029-9	60,27	68,78	22,40
D_029-10	46,04	51,55	19,25
D_033-9	187,29	204,44	95,88
D_033-10	215,09	234,81	108,74
D_033-11	256,12	281,42	128,31

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 10-02/ Blatt 1/2

2. Berechnungswerte

Nr.	Wasser-aufnahme (m_w) [g]	massenbezogene Wasseraufnahme ($W_{m,a}$) [Ma%]	Rohvolumen (V_1) [cm ³]	Rohdichte (m_V) [g/cm ³]
	= (m_1) - (m_0)	= $m_w/m_0 \times 100\%$	= (m_1) - (m_a)	= (m_0)/(V_1)
unbehandelt				
L_012-1	5,25	13,2	23,25	1,72
L_012-2	4,91	13,3	21,49	1,72
L_012-3	3,86	12,9	17,04	1,75
L_026-4	6,64	11,5	32,10	1,81
L_026-5	5,27	11,5	25,47	1,79
L_026-6	4,68	11,2	22,91	1,82
3 x mit CaLoSiL NP25 behandelt				
L_012-4	5,65	13,1	25,01	1,72
L_012-5	4,69	13,4	20,21	1,73
L_012-6	5,65	12,3	26,77	1,72
L_026-7	7,78	10,7	39,35	1,84
L_026-8	5,69	10,7	29,12	1,83
L_026-9	8,85	10,7	45,28	1,83
unbehandelt				
D_029-5	2,36	18,1	9,87	1,32
D_029-6	1,82	14,4	9,19	1,38
D_029-7	1,66	17,2	7,33	1,32
D_033-6	4,74	10,8	26,08	1,68
D_033-7	9,00	10,4	51,68	1,67
D_033-8	7,62	10,0	45,52	1,68
3 x mit CaSO4-Sol behandelt				
D_029-8	7,96	15,1	39,81	1,32
D_029-9	8,51	14,1	46,38	1,30
D_029-10	5,51	12,0	32,30	1,43
D_033-9	17,15	9,2	108,56	1,73
D_033-10	19,72	9,2	126,07	1,71
D_033-11	25,30	9,9	153,11	1,67

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 10-03/ Blatt 1/1

Aufgabe: Bestimmung der Biegezugfestigkeit (BZF) von historischem Stuck (Schloss Leuben)

2. Biegezugfestigkeit

Proben: Mörtelproben mit Prothesenverlängerung nach DRDÁCKÝ
Methode: Dreipunktverfahren
Messgerät: Universalprüfmaschine ZWICK/ ROELL
Software: TestXpert
Kraftaufnehmer: Typ: KAP - Z (1 KN), A.S.T. GmbH Dresden
Traversenabstand: 6 cm
Prüfgeschwindigkeit: 0,15 mm/min
äußere Bedingungen: 20°C, 65%RF

Nr.	Probe			Aufl.-Weite l [mm]	Bruchkraft F [N]	Biegemoment $M_B=(F \times l)/4$	Widerst.-moment $W_y=(b \times h^2)/6$	BZF $\beta = M_B / W$ [N/mm ²]	Ø Serie β [N/mm ²]
	Höhe h [mm]	Breite b [mm]	Fläche A [mm ²]						
Proben aus Leuben (dolomitische Kalkmörtel)									
unbehandelt									
L_012-1	11,88	27,3	324,32	60,00	165,27	2479,05	642,16	3,86	
L_012-2	11,49	25,75	295,87	60,00	124,55	1868,25	566,59	3,30	
L_012-3	11,86	28,37	336,47	60,00	154,50	2317,43	665,09	3,48	3,55
L_026-4	11,03	30,82	339,94	60,00	6,50	97,45	624,93	0,16	
L_026-5	11,47	32,86	376,9	60,00	89,16	1337,39	720,52	1,86	
L_026-6	10,14	30,47	308,97	60,00	60,57	908,57	522,15	1,74	1,80*
3 x mit CaLoSiL NP25 behandelt									
L_012-4	11,89	24,69	293,56	60,00	136,11	2041,65	581,75	3,51	
L_012-5	11,65	24,57	286,24	60,00	128,68	1930,13	555,78	3,47	
L_012-6	11,46	27,83	318,93	60,00	129,00	1934,93	609,16	3,18	3,39
L_026-7	9,14	26,91	245,96	60,00	45,09	676,28	374,68	1,80	
L_026-8	10,04	24,54	246,38	60,00	43,36	650,34	412,28	1,58	
L_026-9	10,75	28,73	308,85	60,00	35,12	526,77	553,35	0,95	1,69*
Proben aus Dahlen (Gipsmörtel, Gipsstuck)									
unbehandelt									
D_029-1	7,57	31,51	238,53	60,00	65,10	976,49	300,95	3,24	
D_029-2	8,18	30,75	251,54	60,00	96,99	1454,78	342,93	4,24	
D_029-3	8,02	32,01	256,72	60,00	77,34	1160,10	343,15	3,38	3,62
D_033-1	13,52	25,5	344,76	60,00	149,99	2249,89	776,86	2,90	
D_033-2	13,63	22,15	301,9	60,00	163,17	2447,62	685,83	3,57	
D_033-3	13,62	26,41	359,7	60,00	218,07	3270,98	816,53	4,01	3,49
3 x mit CaSO ₄ -Sol behandelt									
D_029-8	6,1	26,92	164,21	60,00	44,38	665,66	166,95	3,99	
D_029-9	7,45	30,66	228,42	60,00	84,39	1265,87	283,62	4,46	
D_029-10	6,47	27,65	178,9	60,00	48,47	726,98	192,91	3,77	4,07
D_033-9	14,7	24,73	363,53	60,00	134,88	2023,21	890,65	2,27	
D_033-10	14,06	24,05	338,14	60,00	76,78	1151,63	792,38	1,45	
D_033-11	13,18	25,75	339,39	60,00	98,77	1481,60	745,52	1,99	1,90

grau unterlegte Werte: Fehlmessungen wegen Abriss der Proben von der Prothese

* bei der Berechnung der Durchschnittswerte sind die Fehlmessungen nicht berücksichtigt

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 11-01/ Blatt 1/1

Aufgabe: Vorproben zum Gehalt löslicher Anionen
im historischen Mörtelmaterial

Proben: Mörtelproben aus Schloss Leuben und Schloss Dahlen

Methode: Eluatherstellung

- 1 Titrimetrische Bestimmung mit Aquamerck® Chlorid-Test 1.11106.0001 (Merck KGaA, Darmstadt/ Deutschland)
- 2 mit Spectrophotometer ThermoSpectronic™ Genesys™ 20 (Thermo Fisher Scientific Co. Waltham/ USA) photometrisch gegen Standard gemessen und in [mg/l]
- 3 visicolor® Sulfat Schnelltest (Macherey - Nagel GmbH & Co. KG, Düren/ Deutschland): Konzentrationsbestimmung anhand Trübung der Flüssigkeit durch Bariumsulfat-Niederschlag.

Durchführung: Thomas Köberle, HfBK Dresden / Dezember 2009

Proben:

Probe Nr.	Material	Entnahmeort
L_P05	Putz mit Fassung	Schloss Leuben, Raum 012, Ostwand
L_P10	Putz mit Fassung	Schloss Leuben, Raum 006, Nordwand
D_P02a	Weißstuck (Unterstück)	Schloss Dahlen, Weißer Saal. Südwand
D_P02b	Weißstuck (Feinstuck)	Schloss Dahlen, Weißer Saal. Südwand
D_P04	Stuckmarmor	Schloss Dahlen, Weißer Saal. Südwand
D_P05a	Unterputz	Schloss Dahlen, Weißer Saal. Südwand

Ergebnisse:

Probe Nr.	Chlorid ¹ [mg/l]	Chlorid* [ma %]	Nitrat ² [mg/l]	Nitrat* [ma %]	Sulfat ³ [mg/l]	Sulfat* [ma %]
L_P05	8	0,020	8	0,020	35	0,088
L_P10	28	0,070	22	0,055	32	0,080
D_P02a	8	0,020	8	0,020	1600	4,000
D_P02b	12	0,025	5	0,017	1800	4,500
D_P04	8	0,020	0	0,000	1400	3,500
D_P05a	8	0,020	2	0,005	1600	4,000

* Berechnungswerte

Anhang A

ERGEBNISPROTOKOLL Nr. 12-01/ Blatt 1/2

Werte für Bohrwiderstandsmessungen am Tympanon Schloss Leuben / Messung: Geotron Elektronik 2011

MP = Messpunkt (Bezeichnung Geotron): BW = Bohrwiderstand: MK = Messpunkt Musterkonservierung

MP 1		MP 2		MP 3		MP 4		MP 5		MP 6		MP 7		MP 8		MP 9	
Referenz 1		2-24		2.11		2.14		2-22a		2-22b		2.10 a		2.10 b		MK - a	
Weg [cm]	BW [s/mm]	Weg cm	BW s/mm														
0,04	0,33	0,05	0,75	0,09	0,28	0,03	0,83	0,04	0,42	0,06	0,28	0,05	0,39	0,04	0,83	0,04	1,53
0,10	0,36	0,09	0,72	0,19	0,36	0,07	0,75	0,08	0,39	0,14	0,31	0,08	0,39	0,07	0,75	0,08	1,61
0,14	0,44	0,13	0,67	0,25	0,33	0,11	0,72	0,11	0,42	0,19	0,33	0,12	0,36	0,11	0,72	0,11	1,80
0,18	0,47	0,17	0,64	0,33	0,33	0,16	0,69	0,15	0,42	0,24	0,33	0,16	0,33	0,15	0,78	0,14	1,86
0,23	0,55	0,20	0,64	0,37	0,44	0,22	0,67	0,19	0,44	0,29	0,39	0,22	0,31	0,20	0,75	0,19	1,94
0,26	0,64	0,23	0,58	0,41	0,53	0,27	0,58	0,23	0,47	0,32	0,44	0,27	0,28	0,24	0,78	0,22	1,89
0,30	0,64	0,28	0,50	0,50	0,55	0,31	0,53	0,27	0,50	0,37	0,44	0,36	0,25	0,28	0,69	0,25	1,80
0,34	0,64	0,33	0,50	0,54	0,53	0,35	0,47	0,31	0,50	0,41	0,53	0,45	0,25	0,31	0,64	0,28	1,61
0,38	0,61	0,36	0,50	0,57	0,55	0,38	0,44	0,35	0,55	0,47	0,53	0,67	0,31	0,35	0,61	0,31	1,41
0,41	0,61	0,39	0,47	0,62	0,61	0,44	0,50	0,41	1,03	0,50	0,53	0,77	0,31	0,38	0,58	0,34	1,33
0,47	0,64	0,43	0,47	0,68	0,55	0,47	0,53	0,44	3,85	0,56	0,53	0,86	0,39	0,43	0,61	0,37	1,19
0,51	0,55	0,47	0,44	0,75	0,58	0,51	0,61	0,49	6,99	0,59	0,53	0,91	0,44	0,47	0,58	0,44	0,92
0,57	0,55	0,52	0,47	0,80	0,61	0,56	0,69	0,52	7,27	0,65	0,55	0,94	0,50	0,51	0,53	0,49	0,72
0,63	0,47	0,58	0,44	0,83	0,58	0,61	0,67	0,56	7,27	0,68	0,58	1,00	0,58	0,54	0,53	0,52	0,67
0,67	0,39	0,62	0,44	0,89	0,61	0,66	0,78	0,59	7,29	0,72	0,53	1,04	0,67	0,57	0,47	0,55	0,64
0,73	0,39	0,67	0,44	0,93	0,58	0,71	1,05	0,62	7,27	0,76	0,55	1,08	0,78	0,61	0,50	0,59	0,58
0,77	0,39	0,70	0,39	0,97	0,61	0,74	1,25	0,65	7,32	0,79	0,50	1,12	0,83	0,64	0,55	0,63	0,55
0,84	0,39	0,75	0,39	1,02	0,61	0,79	1,25	0,69	7,29	0,84	0,53	1,17	0,83	0,68	0,55	0,67	0,58
0,91	0,42	0,78	0,42	1,07	0,55	0,82	1,22	0,74	6,96	0,90	0,58	1,20	0,83	0,71	0,55	0,70	0,64
0,97	0,42	0,83	0,42	1,11	0,55	0,86	1,19	0,78	4,33	0,95	0,61	1,24	0,86	0,75	0,61	0,76	0,67
1,01	0,44	0,87	0,42	1,15	0,53	0,89	1,14	0,82	1,19	1,00	0,67	1,27	0,83	0,78	0,67	0,81	0,69
1,06	0,42	0,92	0,39	1,19	0,47	0,94	1,11	0,87	0,97	1,03	0,69	1,31	0,78	0,83	0,75	0,85	0,72
1,11	0,47	0,96	0,39	1,24	0,42	0,98	1,22	0,91	1,00	1,06	0,69	1,35	0,78	0,86	0,86	0,88	0,78
1,14	0,53	1,00	0,42	1,29	0,31	1,02	1,28	0,95	1,05	1,11	0,72	1,38	0,72	0,89	0,89	0,91	0,80
1,18	0,58	1,04	0,47	1,36	0,28	1,05	1,00	1,00	1,16	1,15	0,80	1,44	0,80	0,93	0,86	0,95	0,86
1,22	0,58	1,09	0,47	1,43	0,28	1,09	0,83	1,04	1,25	1,20	0,83	1,51	0,78	0,97	0,86	0,99	0,86
1,26	0,61	1,13	0,55	1,49	0,22	1,14	0,92	1,08	1,28	1,24	0,94	1,56	0,78	1,00	0,92	1,03	0,94
1,31	0,67	1,17	0,58	1,59	0,19	1,18	0,97	1,13	1,28	1,28	0,92	1,61	0,83	1,04	0,92	1,08	0,94
1,35	0,69	1,21	0,61	1,69	0,17	1,22	1,08	1,17	1,44	1,32	0,94	1,64	0,80	1,09	0,89	1,13	0,89
1,39	0,75	1,25	0,64	1,76	0,42	1,25	1,11	1,20	1,58	1,37	1,03	1,68	0,83	1,12	0,86	1,16	0,83
1,42	0,83	1,29	0,67	1,90	2,30	1,29	1,05	1,23	2,19	1,41	1,19	1,71	0,97	1,16	0,80	1,19	0,80
1,46	0,80	1,35	0,72	2,09	2,55	1,33	0,92	1,27	3,91	1,44	1,33	1,75	1,00	1,20	0,75	1,24	0,83
1,51	0,86	1,39	0,80	2,33	2,91	1,37	0,75	1,32	5,21	1,49	1,41	1,80	1,03	1,24	0,78	1,29	0,83
1,54	0,80	1,44	0,80	2,42	3,36	1,41	0,75	1,36	5,66	1,52	1,36	1,83	0,94	1,29	0,94	1,33	0,83
1,57	0,86	1,49	0,80	2,45	3,99	1,46	0,69	1,39	6,24	1,55	1,41	1,87	0,94	1,34	0,97	1,37	0,86
1,60	0,89	1,53	0,83			1,50	0,67	1,42	7,10	1,59	1,36	1,91	0,94	1,38	1,03	1,40	0,78
1,63	0,86	1,56	0,89			1,54	0,61	1,45	8,15	1,62	1,36	1,95	0,94	1,43	1,11	1,43	0,80
1,67	0,80	1,60	0,89			1,57	0,55			1,66	1,80	1,99	0,97	1,47	1,16	1,46	1,19
1,70	0,72	1,64	0,92			1,61	0,61			1,70	2,00	2,02	0,97	1,51	1,19	1,51	2,33
1,76	0,72	1,67	1,03			1,66	0,64			1,73	2,00	2,06	0,92	1,55	1,22	1,55	8,35
1,81	0,69	1,70	1,08			1,71	0,67			1,77	1,91	2,09	0,92	1,58	1,25	1,58	9,26
1,86	0,64	1,74	1,05			1,74	0,69			1,80	1,80	2,13	0,92	1,63	1,22	1,62	10,43
1,90	0,64	1,78	1,05			1,78	0,69			1,83	1,80	2,16	0,94	1,66	1,14	1,65	12,01
1,93	0,55	1,81	1,08			1,84	0,69			1,86	1,77	2,20	0,94	1,70	1,08	1,68	14,25
1,98	0,61	1,85	1,08			1,90	0,69			1,90	1,80	2,24	0,92	1,73	1,03		
2,01	0,61	1,88	1,05			1,95	0,75			1,95	1,80	2,27	0,94	1,76	0,97		
2,05	0,58	1,92	1,05			2,01	0,67			2,00	1,61	2,30	0,86	1,79	0,89		
2,09	0,67	1,95	1,08			2,06	0,64			2,03	1,50	2,35	0,89	1,83	0,97		
2,12	0,58	1,99	1,05			2,13	0,69			2,06	1,28	2,39	0,89	1,88	0,94		
2,18	0,67	2,02	1,00			2,17	0,75			2,09	1,14	2,44	0,86	1,92	0,92		
2,22	0,67	2,06	1,00			2,20	0,78			2,12	1,08	2,49	0,89	1,96	0,92		
2,25	0,69	2,10	1,08			2,24	0,80			2,15	1,08	2,53	0,80	1,99	0,92		
2,31	0,75	2,13	1,08			2,27	0,80			2,24	1,03	2,57	0,83	2,03	0,97		
2,34	0,80	2,17	1,11			2,32	0,86			2,35	1,00	2,61	0,89	2,07	1,03		
2,39	0,86	2,21	1,16			2,36	0,83			2,50	0,94	2,64	0,80	2,11	1,16		
2,44	0,89	2,24	1,25			2,40	0,86			2,55	0,80	2,67	0,89	2,14	1,28		
2,48	0,86	2,28	1,39			2,44	0,83			2,61	0,75	2,70	0,80	2,17	1,25		
2,52	0,89	2,33	1,39			2,48	0,83			2,65	0,83	2,74	0,83	2,21	1,28		
2,56	0,89	2,36	1,47			2,53	0,80			2,70	0,92	2,79	0,89	2,24	1,25		
2,60	0,92	2,39	1,61			2,58	0,78			2,73	1,03	2,82	0,86	2,27	1,28		
2,64	0,86	2,42	1,61			2,62	0,75			2,77	1,05	2,87	0,92	2,30	1,30		
2,69	0,86	2,46	1,72			2,65	0,72			2,80	1,14	2,90	0,89	2,34	1,22		
2,72	0,78	2,50	1,83			2,70	0,69			2,84	1,22	2,94	0,86	2,39	1,33		
2,77	0,75	2,53	1,83			2,75	0,72							2,43	1,22		
2,86	0,75	2,56	1,86			2,78	0,69							2,47	1,16		
2,90	0,75	2,59	1,86			2,81	0,69							2,51	1,19		
2,93	0,80	2,62	1,91											2,56	1,36		
2,98	0,75	2,66	2,08											2,59	1,53		
		2,69	2,27											2,63	1,66		
		2,72	2,33											2,66	1,69		
		2,75	2,25											2,69	1,72		
		2,79	2,14											2,74	1,69		
		2,82	2,08											2,77	1,69		
		2,85	1,97											2,81	1,89		
		2,89	1,94											2,84	1,86		