

Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



Doctoral Thesis

COATINGS AS PROTECTIVE LAYERS FOR NATURAL STONE SURFACES

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Science in Civil Engineering
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

Dissertation

ANSTRICHE ALS SCHUTZSCHICHTEN AUF NATURSTEINOBERFLÄCHEN

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaft
eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen
von

Dipl.-Ing. Daniela Trauninger
Matrikelnummer 0026430

Gutachter: Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Andreas Rohatsch
Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Ingenieurgeologie
Technische Universität Wien

Gutachter: o. Univ.-Prof. Mag. art. Dr. phil. Gabriela Krist
Institut für Konservierung und Restaurierung
Universität für angewandte Kunst Wien

Wien, Juni 2012

Ich versichere, dass ich die eingereichte Dissertation selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich versichere ferner, dass ich diese Dissertation bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als wissenschaftliche Arbeit vorgelegt habe.

Datum

Unterschrift

Teile dieser Arbeit wurden auszugsweise veröffentlicht:

Trauninger, D. (2011): Coatings on Natural Stone Surfaces In: 2nd WTA-International PhD Symposium - Building Materials and Building Technology to preserve the Built Heritage. Brno.

„ womit der Betrachter durch das Sichtbarlassen von Vergänglichkeit erst für Vergänglichkeit empfindbar gemacht wird der Anstrich an der Fassade vergeht wie die Menschen. Die Zeitlichkeit als ständiges Sichtbild wird eingebracht.“

(Pescoller, 1995)

DANKSAGUNG

an meinen Doktorvater Andreas Rohatsch

... für die wertvollen fachlichen Gespräche, Deine kritische Hinterfragung und Ehrlichkeit und nicht zuletzt für Deine Begeisterung und Ermutigung das Thema weiterzuverfolgen, wodurch diese Arbeit überhaupt erst zu Stande gekommen ist

an meine Zweitbetreuerin Gabriela Krist

... für das detaillierte Lesen und Kommentieren meiner Arbeit, für den wertvollen Blickwinkel von einer anderen Seite

an die Perle des Instituts für Ingenieurgeologie Christine Cerny

... für Deine Hilfsbereitschaft, Deinen Optimismus und Deine Lebensfreude von der das ganze Institut zehrt und darunter leidet wenn du nicht da bist

an die Mitarbeiter des Instituts für Ingenieurgeologie Christoph Hauser und Victor Navas

... für Eure bereitwillige und sorgsame Hilfeleistung bei den Versuchsdurchführungen

an Tatjana Bayerova (naturwissenschaftliches Labor, Institut für Konservierung und Restaurierung)

... für die Hilfestellung zur Berücksichtigung denkmalpflegerischer Gesichtspunkte bei der Begriffsdefinition

an Susanne Beseler, Johann Nimmrichter, Johannes Weber

... für die wertvollen Gespräche im Zuge der Arbeitsgruppe „Schlämmen“

an meinen Vater Leopold Trauninger

... für das Lektorieren dieser Arbeit, für Deine Vorbildwirkung als authentischer Mensch, dafür, dass Du mir die Hand gibst und mich auf meinem Weg begleitest

an meine Mutter Monika Trauninger

... für Deine Ermutigungen, Deinen unbändigen Stolz auf Deine Tochter, für Deine Art das Leben immer von der schönsten Seite zu sehen und, dass du mir zumindest ein Stück davon mitgegeben hast

an meinen Mann Johann Walter

... für Deine mentale Unterstützung, Deine Geduld in turbulenten Zeiten und Dein Mitleiden, Mitfiebern und Mitfreuen, einfach dafür, dass Du da bist

an unser (zu diesem Zeitpunkt) ungeborenes Baby

... dafür, dass du mich gezwungen hast kürzer zu treten, womit ich erst den nötigen Abstand und die erforderliche Ruhe zum Fertigstellen dieser Arbeit bekommen habe

an meine Freunde Martina, Susi, Doris und Lucas

... für's Zuhören und Ablenken, den vielen gemeinsamen und zweisamen Gesprächen, durch welche ich immer wieder neue Kraft schöpfen konnte

KURZFASSUNG

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Beschichtung von Natursteinoberflächen und zeigt die Konkurrenzfähigkeit von Kalkanstrichen zu modernen Anstrichsystemen auf.

Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich vorrangig mit der Geschichte von (Kalk)beschichtungen, welche auf eine bis in die Antike zurückreichende Tradition zurückgeführt werden kann. Es wird die Relevanz des Themas für heutige denkmalpflegerische Aufgaben erläutert und die Problematik der Vernachlässigung historischer Kalkanstrichrezepturen dargelegt.

Des Weiteren wird die Aufgabe des Anstriches als Opferschicht diskutiert, indem der Anstrich nicht ästhetische sondern schützende Aufgaben übernehmen soll. Die Eigenschaften einer solchen Beschichtung werden definiert. Als wichtigste Parameter wurden dabei die hygrischen Eigenschaften wie Austrocknung, Wasserdampfdiffusion und Wasseraufnahme festgelegt, wobei eine neue Betrachtung dieser Zusammenhänge entwickelt wurde. Im Unterschied zu der derzeit üblichen Künzel-Zahl, wird dabei nicht das Wasseraufnahmeverhalten mit der Wasserdampfdiffusion, sondern mit den Trocknungseigenschaften verglichen. Dies begründet sich damit, dass nur damit der Einfluss der kapillaren Weiterleitung von porösen Beschichtungen, wie zum Beispiel dem Kalkanstrich, abgebildet werden kann.

Der zweite Teil fasst sowohl die derzeitigen Erkenntnisse auf dem Gebiet des Einflusses unterschiedlicher Additive zum Kalkanstrich, als auch den Vergleich verschiedener Anstrichsysteme zusammen.

Dazu wurden, neben einer allgemeinen Betrachtung der nationalen und internationalen Literatur, Forschungsarbeiten im deutschsprachigen Raum miteinander verglichen und die Ergebnisse dieser Untersuchungen gegenübergestellt. Darauf basierend konnte ein Überblick über den derzeitigen „State of the Art“ sowie eine Darlegung der offenen Fragestellungen und Annahmen geschaffen werden.

Im dritten und letzten Teil wurden, basierend auf dieser Literaturrecherche, Laboruntersuchungen durchgeführt, welche die offenen Fragestellungen sowie Annahmen aus der Literaturrecherche beantworten.

Es hat sich gezeigt, dass durch Kalkanstriche die Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Gesteinssubstrates, auch und vor allem im Vergleich mit anderen Anstrichsystemen verbessert werden kann.

Insbesondere ein mit Leinöl und Marmormehl modifizierter Kalkanstrich führte dabei zu den besten Ergebnissen. Nur dieses System schafft eine einzigartige hygrische Verbesserung des Gesamtsystems, indem die Wasseraufnahme signifikant reduziert wird und gleichzeitig aber die Trocknungseigenschaften maßgeblich verbessert werden. Diese charakteristische Eigenschaft konnte mit keinem anderen der untersuchten Anstrichsysteme im gleichen Maße erzielt werden.

Gleichzeitig hat sich aber auch gezeigt, dass eine Modifikation von Kalkanstrichen mit Kunstharzen, entgegen den Erwartungen, zu keinen signifikanten Verbesserungen führt. Ganz im Gegenteil zeigen sich hier, speziell in Verbindung mit Salzen, sogar schlechtere Ergebnisse als bei unmodifizierten Kalkbeschichtungen.

Eine weitere wichtige Aussage konnte die Untersuchung der Auswirkungen von feinen Rissen und Fehlstellen liefern. Auch hier wurde bei Kalkanstrichen die geringste Beeinflussung festgestellt, was maßgeblich auf die vorteilhaften Austrocknungseigenschaften dieser Systeme zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu müssen solche Fehlstellen, bei sehr wasserdichten Anstrichsystemen, als äußerst kritisch und weit unterschätzt angesehen werden. Hier zeigte sich vor allem bei ansonsten ebenfalls durchaus positiv zu bewertenden Silikonharzbeschichtungen ein beträchtliches Risiko der Wasserakkumulation im Gesteinssubstrat.

Zusätzlich konnte im Zuge der Untersuchungen festgestellt werden, dass Kunstharze (als Bindemittel oder Additive) in Verbindung mit Salzen zu einer Verkrustung der Oberfläche, und damit zu einer weiteren Verschlechterung der Austrocknungseigenschaften führen können.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass Kalkanstriche der Wirkung als Schutzschicht entsprechen und bei denkmalpflegerischen Aufgabenstellungen auch immer in Betracht gezogen werden sollten. Eine entsprechend richtige Wahl der Rezeptur und Verarbeitung ist jedoch Grundvoraussetzung für eine optimale Funktionsweise dieser Systeme und muss auf die jeweils vorhandenen Rahmenbedingungen abgestimmt werden.

ABSTRACT

This paper deals with the coating of natural stone surfaces and demonstrates the competitive features of limewash compared to modern coating systems.

The first part of the paper primarily considers the history of (lime) coatings; the tradition of which can be traced back through the ages until ancient times. The topic's relevance concerning the contemporary challenges of heritage preservation is illustrated as well as the problems arising out of neglecting historical lime coating formulas.

In addition, the coating's function as a sacrificial layer being applied not for aesthetical reasons but serving as a preservative, is also discussed and its qualities are specified. Hygric qualities such as desiccation, water vapour diffusion, and water absorption are defined as the major parameters, at which point a new approach of analyzing these factors' relationships has been established. In contrast to the usually applied 'Künzel' rate this approach does not compare the characteristics of water absorption with water vapour diffusion but instead with desiccation qualities. This action is justified because the effect of capillary transmission of porous coatings can only be illustrated in this way.

The second part outlines present knowledge on the influence of various additives to limewash, combining it with the comparison of different coating systems.

For this purpose, apart from a general focus on national and international literature, research works from German speaking regions have been compared and the results assessed. Thus, an overview of the current state of the art is given as well as a presentation of any questions and assumptions arising.

The third and final part deals with the laboratory experiments carried out based upon the research, to successfully find answers to above questions and assumptions.

It was shown that limewash has the ability to improve both quality and durability of the stone substrate, even compared to other coating systems especially.

In particular, limewash modified by the addition of linseed oil and marble dust presented the best results. It was with the application of this method only, that a unique hygric improvement could be created throughout the entire system, significantly reducing water absorption while at the same time substantially improving desiccation quality. This distinguishing feature was not achieved in the same degree during implementation of any other of the examined coating systems.

At the same time it became apparent, though, that limewash modified by adding synthetic resins did not show any significant improvements – against expectations. On the contrary, limewash combined with salts in particular provided worse results than unmodified limewash coating itself. Examination of the effects of inconspicuous fissures and other surface defects yielded further important evidence. Even such defects had least impact when using limewash, which is particularly due to the excellent desiccation qualities of this coating method. When using highly waterproof coating systems, such surface defects must be, in contrast, regarded as extremely critical and are greatly underestimated. In this case, using otherwise also positively evaluated silicone resin coatings posed a considerable risk of water accumulating in the stone substrate.

In addition, the experiments have also shown that using synthetic resins (as binding agents or additives) in combination with salts leads to incrustation of the surface, which can in turn lead to further degradation of the surface's desiccation qualities.

Taken as a whole, it has been demonstrated that limewash suits the requirements of a protective layer and should always be considered when confronted with problems of heritage preservation. A careful selection of both the appropriate formula and treatment is, however, an essential requirement for the ideal operation of the system and must be independently adjusted to the existing circumstances.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	8
1.1	Überblick zur Geschichte von schichtbildenden Oberflächenbehandlungen	8
1.2	Problemstellung und Forschungsansatz	14
1.3	Methodischer Ansatz	16
1.4	Zitierte und weiterführende Literatur.....	17
2	Grundlagen	18
2.1	Begriffsbestimmungen	18
2.2	Chemische und Physikalische Verwitterungsmechanismen	25
2.2.1	Wasser als verwitterungsrelevante Einwirkung auf das Bauwerk	26
2.2.2	Feuchtetechnische Eigenschaften poröser mineralischer Baustoffe.....	26
2.2.3	Zusammenfassung: chemische und physikalische Verwitterungsmechanismen	31
2.3	Anstriche – Grundlagen und Anforderungen.....	32
2.3.1	Bestandteile und Aufbau von Anstrichsystemen	32
2.3.2	Gliederung der Anstriche nach Bindemittel.....	35
2.3.3	Parameter zur Beschreibung der Wirksamkeit eines Anstriches	39
2.3.4	Zusammenfassung: Anstriche – Grundlagen und Anforderungen.....	47
2.4	Zitierte und weiterführende Literatur.....	47
3	Literaturrecherche.....	48
3.1	Zusammenfassung vorhandener Forschungsergebnisse	49
3.1.1	Grundlagen.....	50
3.1.2	Parameter zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Untergrundes.....	52
3.1.3	Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung	58
3.1.4	Zusammenfassung: vorhandene Forschungsarbeiten	60
3.2	Teil 3 – Auswirkungen der Kalkmodifikationen lt. empirischen Lehrmeinungen	61
3.2.1	Grundlagen.....	61
3.2.2	Zusammenfassung der wesentlichsten Aussagen.....	61
3.2.3	Auswertung und Interpretation der empirischen Lehrmeinung.....	64
3.2.4	Zusammenfassung: empirische Lehrmeinungen.....	65
3.3	Zusammenfassung der Literaturlauswertung	66
3.4	Zitierte und weiterführende Literatur.....	68

4	Ermittlung optimaler Verarbeitungs- und Applikationsbestimmungen	69
4.1	Allgemeines	69
4.2	Applikationsempfehlungen lt. Literatur	70
4.2.1	Zusammenfassung der Literaturangaben	70
4.2.2	Offene Fragestellungen nach der Literaturrecherche	71
4.3	Analytische Vorüberlegungen	71
4.3.1	Definition der klimatischen Randbedingungen	71
4.3.2	Definition der Applikationsbedingungen	72
4.3.3	Offene Fragestellungen nach den analytischen Vorüberlegungen	73
4.4	Vorversuchsreihe – Definition der Applikationsbedingungen für Kalkanstriche	74
4.4.1	Grundlagen	74
4.4.2	Vorversuchsreihe 1 – Ermittlung einer optimalen Verdünnung und Lösungsmittelart	76
4.4.3	Vorversuchsreihe 2 - Zeitdauer zwischen dem Auftrag der einzelnen Schichten	80
4.5	Zusammenfassung – Verarbeitung und Applikation von Sumpfkalkbeschichtungen	84
4.6	Zitierte und weiterführende Literatur	84
5	Vergleich von Anstrichsystemen durch Versuche im Labor	85
5.1	Allgemeines	85
5.1.1	Prüfanordnung	85
5.1.2	Prüfmethoden	86
5.1.3	Zusammenfassung der Prüfanordnungen und Prüfmethoden	97
5.2	Versuchsreihe A – Vergleich unterschiedlicher Additive zum Kalkanstrich	98
5.2.1	Grundlagen	98
5.2.2	Versuchsergebnisse	103
5.2.3	Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse	112
5.3	Versuchsreihe B – Vergleich von Kalkanstrichen mit modernen Anstrichsystemen	115
5.3.1	Grundlagen	115
5.3.2	Versuchsergebnisse	122
5.3.3	Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse	145
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	150
5.5	Zitierte und weiterführende Literatur	151
6	Zusammenfassung und Ausblick	152
6.1	Vergleich der Literaturrecherche mit den Untersuchungsergebnissen dieser Arbeit	152
6.2	Schlussfolgerungen und Ausblick	155
7	Literaturverzeichnis	157

8	Anhang.....	165
8.1	Anhang A – Literaturrecherche	165
8.2	Anhang B – In der Literatur genannte Verarbeitungsempfehlungen für Kalkanstriche	170
8.3	Anhang C – Vergleich von Anstrichen durch Versuche im Labor	174
8.4	Anhang D – Produktdatenblätter	178

1 EINLEITUNG

1.1 ÜBERBLICK ZUR GESCHICHTE VON SCHICHTBILDENDEN OBERFLÄCHENBEHANDLUNGEN

Bis zum 19. Jahrhundert waren Anstriche und Putze auf Natursteinoberflächen an Fassaden oder Steinskulpturen eine durchaus gängige Praxis.¹ Erste Datierungen von Kalkanstrichen gehen bis ins 4. vorchristliche Jahrtausend zurück (z.B. Befundungen der Wandmalereien von Teleilat-Ghassul, Jordanien).² Auch bei den Ägyptern und in der Antike war es üblich, Steinbauwerke und Skulpturen farbig zu fassen oder auch zu verputzen. Der Werkstoff Kalk und/oder Gips nahm dabei eine entscheidende Rolle ein. Die Anwendung reicht von den ägyptischen Pyramiden über griechische Tempel bis hin zu römischen Wohnhäusern, welche vorzugsweise mit Kalk verputzt, geschlämmt und/oder bemalt wurden.³ Im Palast von Knossos / Kreta gibt es beispielsweise nach wie vor erhaltene Wandmalereien aus dem Jahr 1500 v.Chr. und auch in Pompeji sind uns viele der damals angewandten Techniken erhalten geblieben.



Abbildung 1-1: Überreste einer mit Kalkmörtel verputzten und mit Kalk gefassten Zisterne, Ägypten⁴



Abbildung 1-2: Rekonstruktion eines Abschnitts der Giebelschräge des Aphaia-Tempels von Ägina⁵ (li) und Wandmalereien in Pompeji / Casa di Grifi, 100 v.Chr. (re)⁶

¹ vgl. Koller (2003)

² vgl. Torraca (1996)

³ Zur Maltechnik des Altertums vgl. auch Berger (1904), S.3–28 sowie Cowper (1998), S.3f

⁴ Abbildung von Rohatsch, A.: Ägypten 2005

⁵ Rekonstruktion in Originalgröße (Holz, Styrodur, Metall, Gips, Naturpigment nach Methode Price in Temperatechnik). Ausführung der Farbfassung: Sylvia Kellner. Modellbau: Erwin Kloker. Stiftung Archäologie.

⁶ aus Vorlesungsunterlagen Kunstgeschichte: Stalla, R.: Architektur- und Kunstgeschichte, Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege, TU Wien, 2009.

Vor allem im europäischen Mittelalter, das uns heute als düster, finster und trostlos suggeriert wird, wurden Bauwerke äußerst farbenfreudig gefasst und Fassaden verputzt und getüncht, wobei der absolute Höhepunkt der Architekturfarbigkeit in der Spätgotik und Frührenaissance erreicht wurde. Insbesondere Kirchenportale wurden sehr reich verziert und wiesen eine farbliche Steigerung zur restlichen Oberflächengestaltung des Bauwerkes auf. Diese Farbgebung wurde entweder durch die Verwendung unterschiedlicher farbiger Werksteine (z.B. Kathedrale Santa Maria del Fiore in Florenz) oder durch farbige Anstriche erreicht.⁷ Ein berühmtes Beispiel dafür stellt beispielsweise das Riesentor von St. Stephan dar. Bei der Restaurierung des Tores wurden Farbbefunde mit Pigmenten wie Zinnober, Azurit, Lapislazuli u.v.m durch das österreichische Bundesdenkmalamt identifiziert.⁸



Abbildung 1-3: Riesentor zu St. Stephan in Wien, Rekonstruktion der Erstfassung aus dem 13. Jh. nach Nimmrichter⁹

Ein weiteres sehr imposantes Beispiel stellt die französische Kathedrale Notre Dame d'Amiens dar. Anhand von Farbbefunden aus dem 13. Jahrhundert konnte man die ehemals polychrome Fassung der gotischen Kathedrale belegen. Um dieses mittelalterliche Erscheinungsbild wiederzugeben, aber trotzdem der Gefahr einer möglichen Kontroverse durch eine Rekonstruktion der Farbfassungen zu entgehen, wurden die entsprechenden Farben mittels Lichtprojektion auf die Steinelemente projiziert. Dieses prunkvolle Aussehen der tagsüber monotonen steinsichtigen Architekturteile und Skulpturen kann man allerdings nur nachts durch die farbenprächtige Beleuchtung bestaunen.¹⁰



Abbildung 1-4: Kathedrale Notre Dame d'Amiens. Portalfiguren am Tag und beleuchtet in der Nacht¹¹

⁷ vgl. Nimmrichter (2007)

⁸ vgl. Koller (2004)

⁹ aus Nimmrichter (2007)

¹⁰ vgl. Thorel et al. (2004)

¹¹ aus Wikimedia Commons. URL: <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Amiens> [09.12.2008]

Als Anstrich kamen vorwiegend öl- und/oder kalkbasierte Beschichtungsstoffe zum Einsatz. Zur Erhöhung der Verwitterungsbeständigkeit oder Erleichterung der Verarbeitbarkeit wurden dem Kalkanstrich unterschiedliche Zusätze, wie zum Beispiel Milchcaseine (z.B. Topfen, Milch, Molke, ...), Öle, Harze etc. beigemischt.

In der Literatur findet man alle möglichen und unmöglichen Beimengungen wie beispielsweise Fruchtsäfte, Baumrinden, Ochsenblut, Kuhmist, Bier, etc.,¹² von denen man eine Erhöhung der Qualität des Kalkanstriches erwartet hatte.

Diese Beimengungen wurden bereits seit der Antike eingesetzt, Leon Battista Alberti (1404-1472) schrieb dazu beispielsweise in seinen „Zehn Bücher über die Baukunst“: „*In Elis beim Tempel der Minerva zog der Bruder des Phidias einen Wandbezug auf, bestehend aus einer Mischung von Kalk, Safran und Milch*“. (Theuer (1912), S.380)

Die Anwendung der Kalktechnik setzte also ein über Jahrhunderte überliefertes Wissen über Art und Weise verschiedener Zusätze sowie der handwerklichen Technik voraus. Diese Fachkenntnisse wurden über Generationen von Handwerkern immer wieder weiterüberliefert. Die Techniken wurden gelehrt, die Rezepturen übernommen und weiterentwickelt.

Inwieweit diese Anstriche neben einer architektonischen Gestaltung auch dem Schutz der darunterliegenden Steinsubstanz dienten ist weitestgehend unklar. Gewisse Beimengungen zum Bindemittel Kalk wie Öle und Wachse, welche zu einer leichten Hydrophobierung führen, lassen jedoch auf eine wissentliche Anwendung des Anstriches als Schutzschicht vor Verwitterung schließen. Auch die teilweise mit dem Anstrich durchgeführte Imitation der darunterliegenden Steinarchitektur in Farbe und Form (es wurden beispielsweise Natursandsteine mit den entsprechenden Fugen „nachgemalt“)¹³, könnte jedenfalls ein spärlicher Hinweis für den damals bereits bewussten Schutz der Steinoberfläche sein. Diese Vermutung kann insofern bekräftigt werden, da auch sehr wertvolle Materialien wie Marmor mit imitierten Marmoranstrichen aus Öl/Bleiweißfarben gefasst wurden. So schreibt Heraclius (575-641 n.Chr.): „*Wenn du die Säule oder den Streifen (Pilaster) von Stein bemalen willst, so lasse sie vor Allem an der Sonne oder am Feuer trocknen. Dann nimm Weiss (Bleiweiss) und reibe es mit Oel nett auf dem Marmor. ... Falls du es aber marmoriren wolltest ... so kannst du es nach dem Trocknen marmoriren*“ (Ilg (1873), S.72)

Es war auch üblich, sehr kostbare Materialien durch Fassungen auf kostengünstigerem Mauerwerk zu imitieren, wobei solcherart imitiertes Mauerwerk auch auf eine dadurch geschaffene, höhere Behaglichkeit im Innenraum bzw. der Vermeidung von Kondensationserscheinungen zurückzuführen sein könnte. Alberti schreibt dazu: „*Eine Mauer aus Felsgestein oder Marmor ist sowohl kalt als auch feucht, denn sie zieht die heftige Kälte an sich und verwandelt sich in Schweiß. Aus Tuff oder Ziegel hergestellt ist sie vorteilhafter, sobald sie vollkommen trocken ist. Wer zwischen neuen und nassen Mauern, besonders wenn sie überwölbt sind, übernachtet, der wird sich schwere Erkrankungen an Schmerzen, Fiebern und Schnupfen zuziehen*“. (Theuer (1912), S.590)

Ungeachtet davon ob nun damals, bewusst oder unbewusst, der farbgebende Anstrich auch als Schutzschicht verwendet wurde, steht außer Zweifel, dass uns viele altertümlichen Steinbauwerke nur durch das Vorhandensein dieser Anstrichschichten bis heute so gut erhalten geblieben sind.

Im Klassizismus wurde dann der sogenannte „Polychromiestreit“ entfacht, wo sich Vertreter der „weißen“ und „farbigen“ Antike gegenüberstanden. Vielfach wurde diskutiert, ob die klassische Antike in einer weißen Einfarbigkeit, oder eben in einer farbenprächtigen Mehrfarbigkeit (die, wie man heute aus Ausgrabungen und unzähligen Forschungsarbeiten weiß, durchaus gegeben war) zum Ausdruck gebracht werden sollte. Für eine starke Farbigkeit setzten sich die Architekten Hittorf (Frankreich), Ruskin (England) sowie Klenze und Semper (Deutschland) ein, während vor allem der Archäologe Winkelmann Verfechter der reinen weißen Antikvorstellung war.¹⁴ Und obwohl die Farbigkeit antiker Tempel auch anhand von Forschungsergebnissen bestätigt werden konnte (beispielsweise reiste

¹² z.B. Cowper (1998), S.7

¹³ vgl. Koller (2003)

¹⁴ vgl. Meerwein et al. (2007), S.50 / Darmstadt (1990)

Semper nach Griechenland um die Farbgebung des Parthenon in Athen zu studieren), wurde dem Ansatz Winckelmanns vielerorts entsprochen und setzte sich auch bei der Neufassung älterer Gebäude durch. Auch Theophil Hansen war von der Polychromie griechischer Tempel überzeugt und wollte das Wiener Parlament ursprünglich mehrfarbig gestalten, wie alte Pläne zur Außengestaltung zeigen.¹⁵



Abbildung 1-5: Abbildung links: Parthenon-Rekonstruktion von Gottfried Semper¹⁶; Abbildung rechts: Parlament Wien (Historismus, klassizierend)¹⁷, das Baukomitee wandte sich gegen den Vorschlag Hansens zur Polychromie und gestattete ihm nur die Anfertigung kleiner Proben an zwei Ecken des Parlamentsgebäudes

Die Abneigung gegen farbliche Gestaltung spitzte sich Mitte des 19. Jahrhunderts rigoros zu, indem viele Steinbauwerke sogar gänzlich ohne Anstriche steinsichtig ausgeführt wurden. Auch viele historische Bauten wurden desgleichen „freigelegt“. Diese Freilegungen wurden in ganz Europa vorangetrieben und erfolgten nicht selten mit sehr aggressiven Substanzen bzw. groben mechanischen Abtragsverfahren und führten neben dem Verlust der polychromen Fassung teilweise auch zu massiven Zerstörungen der Steinsubstanz.

Als ob dadurch nicht schon genug Schaden zugefügt wurde, verzichtete man gänzlich auf Fassungen und setzte das Gestein somit schutzlos den Umwelteinflüssen aus. Natürlich gab es auch Ausnahmen, wie beispielsweise in Griechenland, wo Kalkbeschichtungen nach wie vor an Hausfassaden und Kirchen angewendet wurden. Ebenso wurden in Italien bedeutende Kalkfassaden beibehalten, und auch in Dänemark war man bestrebt traditionelle Handwerkstechniken und –materialien weiterhin anzuwenden.¹⁸ In Österreich setzte sich der Kunsthistoriker Rudolf von Eitelberger, Kunstgeschichteprofessor an der Universität Wien sowie Reorganisator der Akademie der bildenden Künste¹⁹ vehement für die Steinsichtigkeit ein. Seinem Nachdruck ist es zu „verdanken“, dass man die jahrhundertelange Tradition der periodisch erneuerten Steinfarben(schutz)anstriche am Dom zu St. Stephan vollständig aufgegeben hat und uns das Gebäude seither in einem monotonen grauen bis schwarzen Erscheinungsbild hinterlassen wurde.²⁰

Das Bauwerk wurde sozusagen im „Rohbauzustand“ belassen, um dem damaligen architektonischen Trend zu entsprechen. Da die tragende Substanz somit den Umwelteinflüssen wie Regen, Sonne, Wind und Schadstoffen aus der Luft (zu dieser Zeit vorwiegend SO₂, welches im 19. bis Mitte 20. Jahrhunderts vorwiegend dem Hausbrand und der Schwerindustrie entstammte) direkt ausgesetzt war, wurde die Verwitterung dadurch sehr rasch vorangetrieben und die ersten Schäden zeigten sich bereits nach kurzer Zeit.

¹⁵ vgl. Republik Österreich (Hg.) (2011)

¹⁶ aus Wikipedia:

URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Parthenon-Rekonstruktion_von_Gottfried_Semper.jpg [29.05.2011]

¹⁷ Abbildung: © Parlamentsdirektion, Michael Bucher

¹⁸ vgl. Schmidt (1996)

¹⁹ vgl. Österreichisches Biographisches Lexikon 1815-1950 Online-Edition. Online verfügbar unter:

<http://www.biographien.ac.at/oebl?frames=yes> [06.11.2011]

²⁰ vgl. Koller (2004)

Mit dem Verlust der originalen Oberfläche gehen jedoch der Alterswert und die Lesbarkeit eines historischen Denkmals und damit seine Bedeutung und sein Wert als historisches Dokument unwiederbringlich verloren. Diese Probleme betreffen vor allem Steinbauwerke im Großstadtbereich, wo viele aggressive Substanzen aus der Luft den Stein in einer relativ kurzen Zeit von nur 100 bis 150 Jahren in einem erheblichen Ausmaß geschädigt haben und dadurch mitunter auch die statische Tragfähigkeit gefährdet wurde.

Obwohl sich die SO_2 – Belastung der Luft in den letzten Jahrzehnten durch den Einsatz neuer Technologien (Katalysatoren, Filter, Rauchgasentschwefelung, etc.) stark reduziert hat, ist der Schutz von historischen Steinoberflächen ein primäres Desideratum der Denkmalpflege, da die vorhandenen Verwitterungseinflüsse immer noch mannigfaltig sind.

Nach kurzer aber einschneidender Zeit der Steinsichtigkeit, wurde man sich der Gefahr von Zerstörungen durch Verwitterungseinflüssen an unbeschichteten Steinfassaden und -skulpturen sehr rasch bewusst. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts werden deshalb wieder verstärkt Anstriche an Natursteinoberflächen angewendet. Die schutzgebende Wirkung der Anstriche war somit unumstritten, dennoch war die Steinsichtigkeit in den Köpfen fix verankert. Man musste also neue „durchsichtige“ Anstrichsysteme entwickeln, um sozusagen die „Schönheit des Natursteins“ nicht zu übertünchen. Dieser Gedanke der „vorgespielten Steinsichtigkeit“ ist auch heute noch weit verbreitet. Deshalb wurden neben den bewährten farbigen Kalk- bzw. Ölanstriche auch „moderne“ transparente Beschichtungssysteme eingesetzt, die allerdings nur wenig erprobt waren.

Diese größtenteils industriell hergestellten Systeme hatten allerdings meist nur sehr wenig mit den ursprünglichen Anwendungen gemein. Viele dieser Anstriche zerstörten den Stein demzufolge noch mehr, als dies ohne Beschichtung der Fall gewesen wäre. Bis heute werden unterschiedlichste Systeme ausprobiert und es wird eine breite Palette verschiedener Anstriche angeboten, teils mit guten Ergebnissen, teils aber auch mit folgenschweren Misserfolgen, die immer wieder nicht wiederherstellbare Verluste an kulturellem Erbe zur Folge haben.

Beispiele dafür stellen wasserglasbasierte Systeme und Dispersionsprodukte dar.

Bereits im 19. Jahrhundert wurde das Wasserglas durch den Chemiker und Mineralogen Johann Nepomuk von Fuchs (1774-1856) erfunden und durch Wilhelm Keim (1851-1914) für Farbanstriche weiterentwickelt.²¹ Neben dem Einsatz als Farbbindemittel, wurde Wasserglas auch lange Zeit zur Konsolidierung von Sandsteinen verwendet, allerdings mit meist desaströsen Folgen, da als Nebenprodukt, in Verbindung mit Erdalkalien, bauschädliche Salze gebildet werden, die zu starken Zerstörungen des Gesteinsgefüges führen können.



Abbildung 1-6: Außenkanel am Dom von Prato (Donatello), Toskana. Vor (li.) und nach (re.) der Behandlung mit Fluorsilikaten in den 1940er Jahren.²²

²¹ vgl. Christ (1994)

²² aus Vortragsunterlagen Marisa Laurenzi-Tabasso: Stone Conservation in Italy. From Pisa Tower to Trevi Fountain, Wien, Universität für angewandte Kunst, Institut für Konservierung und Restaurierung. (2008)

Trotz der mittlerweile ablehnenden Haltung in Fachkreisen angesichts der Kenntnisse über die möglichen Auswirkungen dieser Produkte, werden wasserglasbasierende Systeme bis heute im großen Ausmaß angepriesen und z.B. als Injektionsmittel zur Mauerwerksverfestigung nach wie vor auch an historischer Bausubstanz eingesetzt. Neuerdings erleben manche dieser Fluate eine Renaissance unter der Sammelbezeichnung Nanotechnologie.

Auch mittels Dispersionsfarben (auch unter dem Begriff Latexfarben bekannt) wurden über einen relativ langen Zeitraum mehr schlecht als recht Steinfassaden behandelt. Vor allem zu Beginn deren Entwicklung handelte es sich dabei, wie die Bezeichnung Latexfarbe bereits vermuten lässt, um sehr dichte und wasserdampfundurchlässige Schichten, was man anfangs aufgrund der Regenundurchlässigkeit jedoch eher positiv beurteilte. Nicht berücksichtigt wurde dabei, dass durch die abdichtende Wirkung ein Austrocknen von Feuchtigkeit sowie Auskristallisation von Salzen an der Oberfläche quasi unmöglich gemacht wurde. Dadurch wurden diese Prozesse nach innen in die Bausubstanz verdrängt und führten somit zu einer massiven Zerstörung von Gesteinen und Putzen.

Im modernen Hochbau werden heute vorwiegend sowohl Silikonharzfarben als auch Silikatfarben eingesetzt. Auch in der Denkmalpflege finden Silikonharzfarben breite Anwendung, ebenso werden nach wie vor silikatische Systeme angewendet. In diesem Zusammenhang muss festgehalten werden, dass Systeme, welche im modernen Hochbau „funktionieren“, aufgrund nur schwer fassbarer bauphysikalischer Rahmenbedingungen, auf die historische Bausubstanz nicht 1:1 übertragbar sind. Bei Neubauten kann auf das Beschichtungssystem, zumindest eingeschränkt, Rücksicht genommen werden, indem die darunter liegenden Schichten entsprechend angepasst werden.²³

In der Denkmalpflege sind jedenfalls die Schichten als „Bestand“ bereits vorhanden und nicht veränderbar. Zusätzlich muss bei historischen Bauten immer der Faktor Feuchtigkeits- und Salzbelastung mitberücksichtigt werden, was teilweise zu völlig anderen Verwitterungsmechanismen und somit Schutzprioritäten als bei Neubauten führt.

Aufgrund der vielen schlechten Erfahrungen mit synthetisch hergestellten Anstrichsystemen nehmen historische Beschichtungstechniken in der modernen Denkmalpflege wieder drastisch an Bedeutung zu, wobei reine Kalkanstrichsysteme auch heute nur sehr selten Anwendung finden. Vielmehr wird ein mit Kunstharzdispersionen modifizierter Kalkanstrich verwendet, wobei die Beimengungen dieses Kunstharzes teils so weit reichen, dass das Kalkhydrat im Prinzip nicht mehr als Bindemittel, sondern nur mehr als Zusatzstoff angesehen werden muss. Immer wieder finden auch abdichtende Hydrophobierungen auf Kalkanstrichen Anwendung, womit jedoch der große Vorteil der Diffusionsoffenheit des Kalkanstriches mit einem Schlag verloren geht und somit sehr an der Sinnhaftigkeit solcher Systeme gezweifelt werden muss. Eine neue Entwicklung stellt das sogenannte dispergierte Weißkalkhydrat dar. Dabei soll durch eine sehr feine Zerkleinerung und Zerteilung der Kalkhydratteilchen eine Steigerung der Reaktivität und Bindekraft erreicht werden. Diese Produkte müssen, aufgrund der für den Dispergierprozess notwendigen Hilfsstoffe, ebenfalls kritisch betrachtet werden.

Dieser kurze Abriss soll einen Einblick in die historische Entwicklung von Anstrichen geben. Eine umfangreiche Beschreibung zur Geschichte der deutsch-österreichischen Architekturfarbigkeit findet sich z.B. im Reallexikon zur deutschen Kunstgeschichte (Schmitt (1937ff)). Auch Berger (1904) gibt, auf Basis von Funden und Versuchen, sehr umfangreiche Erläuterungen zur Maltechnik des Altertums. Eine sehr detaillierte geschichtliche Darstellung gibt auch Koller²⁴, der sich im Zuge seiner beruflichen Laufbahn sehr intensiv mit dem Thema Polychromie beschäftigt hat. Ihm und seinen Kollegen des österreichischen Bundesdenkmalamtes ist es hauptsächlich zu verdanken, dass in Österreich ein Umdenken stattgefunden hat und die Bedeutung von Anstrichen an historischen Fassaden sowie auch Skulpturen (wieder)erkannt wurde.

²³ z.B. Abstimmung der Anstriche und Putze mit dem darunter liegendem Vollwärmeschutzsystem. Wobei auch im modernen Hochbau dichte Putz- bzw. Anstrichsysteme oftmals nicht mit den darunter liegenden Schichten kompatibel sind und zu bauphysikalischen Problemen führen können.

²⁴ vgl. Koller (2003)

1.2 PROBLEMSTELLUNG UND FORSCHUNGSANSATZ

Seit Ende des 20. Jahrhunderts wird wieder zunehmend Sumpfkalk in zahlreichen Modifikationen (z.B. mit Zusätzen wie organische Kunstharze, mineralische und synthetische Pigmente, Methylzellulose, Kaseine, Steinmehle, etc.) als Anstrichmaterial eingesetzt, jedoch auch mit vielen Misserfolgen. Hauptsächlich aufgrund der Tatsache, dass das ehemals über Generationen überlieferte Wissen über die Verarbeitung und Konditionierung von Kalkanstrichen innerhalb von nicht einmal 150 Jahren nahezu völlig vergessen wurde.

Nichtsdestotrotz konnte aufgrund zahlreicher Voruntersuchungen im Rahmen einer vorangehenden Forschungsarbeit²⁵ aufgezeigt werden, dass die Kalkbeschichtung im Vergleich mit anderen geprüften Beschichtungen (Silikonharzbeschichtung und einer Beschichtung basierend auf so genannter „Nanotechnologie“) den darunter liegenden Stein am besten schützt, allerdings der Anstrich selbst im Vergleich mit den anderen Beschichtungssystemen am schnellsten verwittert. Da uns jedoch viele Kalkbeschichtungen über Jahrhunderte hinweg erhalten geblieben sind, stellt sich die Frage wie diese Anstriche modifiziert und aufgetragen wurden, um diese lange Haltbarkeit zu gewährleisten.

Es ist durchaus bekannt, dass viele historische Kalkbeschichtungen mit unterschiedlichsten Beimengungen, wie in Kap. 1.1 genannt, modifiziert wurden. Auch heute werden dem Kalkanstrich oft Zusätze, wie beispielsweise Acrylharzdispersionen beigemischt, mit dem Ziel, die Eigenschaften des Kalkes positiv zu beeinflussen. Bei den Laborversuchen, die im Zuge der Forschungsarbeit²⁵ durchgeführt wurden, gelangte allerdings nur Sumpfkalk ohne Zusätze und auch ohne Füllstoffe zur Anwendung.

Es wurde zwar eine generelle Konditionierung der Proben anhand von Vorversuchen durchgeführt (Karbonatisierung, Luftfeuchtigkeit, Konsistenz, ...), dennoch erfolgte der Auftrag der Kalkschlämme eher nach „Gefühl“ als nach strikt vorgegebenen Richtlinien.

Auch international beschäftigt man sich intensiv mit der Anwendung historischer Kalktechnologien. Im Jahr 1986 wurde das Forschungsprojekt EUROCARE ins Leben gerufen, welches im März 2002 abgeschlossen wurde und sich mit der Forschung für die Erhaltung von kulturellem Erbe beschäftigt hat, indem neue Produkte, Materialien und Verfahren für die Konservierung und Restaurierung entwickelt wurden. Dabei wurden auch die beiden Unterprojekte Muralpaint und Eurolime gegründet, deren Forschungsergebnisse in dieser Arbeit zum Teil zitiert werden. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten, welche teilweise auch durch das österreichische Bundesdenkmalamt koordiniert wurden, hat zu einem immensen Innovationschub geführt, der eine Vielzahl wissenschaftlicher Beiträge, vor allem im Bezug auf die Analyse von historischen Mörteln und Herstellungstechniken hervorgebracht hat.

Was nach wie vor fehlt, sind jedoch Abhandlungen über die richtige Verarbeitung, Aufbereitung und Nachbehandlung von Kalkmörtel als auch Kalkanstrichen. Zudem werden historische Kalkrezepturen in einem Großteil von Europa nach wie vor nur selten bis kaum angewendet.²⁶

Nur in einigen wenigen europäischen Ländern wurde in den letzten Jahrzehnten der (Wieder)einsatz von historischen Kalkbeschichtungsrezepturen thematisiert und angewendet, wie zum Beispiel in Großbritannien, wo sowohl Kalkputze als auch Kalkanstriche nach historischem Vorbild eine breite Anwendung finden, und sich hier vor allem in Schottland eigene Foren und Ausbildungsstätten gebildet haben.²⁷

Auch in Stockholm werden seit den 1970er Jahren vorwiegend Kalkbeschichtungen und Kalkmörtel, sowohl an historischen, als auch an vielen modernen Außenfassaden eingesetzt.

²⁵ vgl. Trauninger (2007): Diplomarbeit, Insitut für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien

²⁶ vgl. International Institute for Conservation of Historic Artistic Works (Hg.) (1995)

²⁷ vgl. z.B. The Buildings Limes Forum (<http://www.buildinglimesforum.org.uk/>), The Scottish Lime Centre Trust (<http://www.scotlime.org/>)

Auf synthetische Anstrichstoffe und Zementmörtel wird gänzlich verzichtet, auch Kunststoffoffzusätze zum Kalk sind nicht erlaubt.²⁸ Dies ist insofern nennenswert, da Gebäude in Stockholm einer immensen Belastung durch sauren Regen ausgesetzt sind. Doch gerade deshalb scheint das Material Kalk gut zu funktionieren, da der Kalk die Salze sozusagen als Pufferschicht aufnimmt. So schreibt Holmström (1996): „*The acidity is at the same time buffered by the lime. This means that as long as there is lime left in the coating, the water passing will be neutralized, and thus harmless to the substrate. A lime based surface coat acts as an efficient and harmless chemical filter, ...*“. Aus diesem Grund wird in Schweden auch der Instandhaltung dieser Kalkbeschichtungen größte Bedeutung beigemessen. Doch auch Holmström gibt zu bedenken, dass die hohe Qualität historischer Beschichtungen mit heutigen Rezepturen und Techniken kaum erreicht werden kann, was seiner Ansicht nach auch auf den Verlust der historischen Handwerkstechniken zurückzuführen ist.

Einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag über Kalkbeschichtungen, in der deutsch/österreichischen Forschungsliteratur stellen die Dissertationsarbeiten von Herm (1997), Brandes (1995) und Blöchl-Wirts (2001) dar, wo viele chemische und physikalische Einflüsse von möglichen Kalkmodifikationen untersucht wurden. Herm (1997) hat im Zuge seiner Arbeit auch den Kenntnisstand der Erfahrungen und Anwendungen von Kalkbeschichtungen sehr gründlich zusammengefasst. Auch Bermoser (2008), Ghaffari (2005) und Zech (1998) haben sich anhand von Diplomarbeiten intensiv mit Kalk und anderen Beschichtungssystemen im Bereich der Denkmalpflege auseinandergesetzt.²⁹

Es ist somit ein breites Spektrum vielzähliger Aussagen zum Thema Kalkbeschichtungen gegeben, welche jedoch bei genauer Betrachtung teilweise stark divergieren und zu völlig unterschiedlichen Schlüssen gelangen. Aus diesem Grund ist es wichtig, eine gemeinsame Betrachtung der relevanten Arbeiten und Aussagen auf diesem Gebiet zusammenzufassen und gegenüberzustellen, um schlussendlich gesichertes Wissen und offene Fragen bzw. Widersprüche definieren zu können.

Eine konkrete Problemstellung ist in vielen Fällen die vorrangig ästhetische Bewertung von Oberflächen und weniger der Erhaltung des darunter liegenden Gesteinssubstrates bzw. das Zusammenspiel physikalischer Eigenschaften der einzelnen Komponenten.

Auch in den meisten der oben genannten Arbeiten wird der Dauerhaftigkeit des Anstriches primäre Bedeutung beigemessen.

Um die Wirksamkeit eines Anstriches als Schutzschicht beurteilen zu können, muss jedoch die Dauerhaftigkeit des Trägersubstrates im Vordergrund stehen.

Diese Arbeit nähert sich deshalb vorwiegend den Beschichtungen als Schutzschicht an und setzt sich nur am Rande mit dem Thema Anstrich als ästhetische Ausdrucksform auseinander.

Folgende offene Fragestellungen sollen somit in dieser Arbeit behandelt werden (jedenfalls immer nach vorhergehender Analyse vorhandener Forschungsarbeiten):

1. Durch welche Applikations- und Verarbeitungsbedingungen kann die Dauerhaftigkeit von Kalkanstrichen erhöht werden?
2. Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Additivzugaben zum Kalkanstrich und inwieweit können die Eigenschaften des Anstriches durch geeignete Modifikationen verbessert werden?
3. Wie verhalten sich Kalkbeschichtungen im Vergleich mit anderen Beschichtungssystemen, vor allem im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der darunterliegenden Gesteinssubstanz?

²⁸ vgl. Holmström (1996)

²⁹ Eine detaillierte Literaturzusammenfassung sowie eine Vergleichsstudie vorhandener Forschungsarbeiten wird in Kap. 3 gegeben.

1.3 METHODISCHER ANSATZ

Anhand von Laboruntersuchungen sollen die Rahmenbedingungen für eine sowohl schützende³⁰ als auch dauerhafte – das heißt eine, im sinnvollen Ausmaß, wartungs- und pflegeminimierte – Beschichtung, mit besonderer Berücksichtigung von porösen Gesteinsoberflächen, definiert werden. Vorrangig sollen die Anstriche dabei als Schutzschichten für das darunter liegende Gestein und nicht als ästhetisches Mittel wirken. Ziel ist daher eine möglichst lange Erhaltung des Gesteinssubstrates und somit der Skulptur bzw. der Fassade, respektive des Gebäudes. Anstriche, welche dem Stein mehr Schaden zufügen als es ohne Beschichtung der Fall gewesen wäre, werden auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit aufgezeigt, und kategorisch als Schutzschicht ausgeschlossen.

Hauptaugenmerk wird dabei der Kalkbeschichtung gewidmet. Es werden dem Kalkanstrich sowohl historische Zusatzstoffe wie Kaseine (Molke, Topfen, ...), Füllstoffe (z.B. Marmormehl) und Öle (z.B. Leinöl), als auch „moderne“ Zusatzmittel wie Acrylharzdispersionen (z.B. Primal) beigemischt. Im Labor werden die einzelnen Modifikationen auf ihre physikalischen Auswirkungen, mit besonderem Hinblick auf ihre hygrischen Eigenschaften, wie Wasseraufnahme und –abgabe sowie deren Zusammenhang, als auch auf Dauerhaftigkeitskriterien, wie Abriebfestigkeiten und Verwitterungsbeständigkeit, sowohl der Beschichtung, als auch, und das nimmt in dieser Arbeit oberste Priorität ein, des Untergrundes, untersucht.

Zusätzlich werden auch Silikon- und Silikatanstrichsysteme auf ihre Anwendbarkeit an historischer Steinsubstanz geprüft um damit unterschiedliche historische und moderne Kalkrezepturen mit anderen zurzeit in der Praxis angewendeten Beschichtungssystemen vergleichbar zu machen.

Die Definition klimatischer, bauphysikalischer und chemischer Rahmenbedingungen für den erfolgreichen Einsatz der jeweils in Frage kommenden Produkte ist ein wesentliches Ziel dieser Arbeit. Die Entwicklung eines, in unserer derzeitigen, vom Unsterblichkeits- und Jugendwahn geprägten Kultur, möglichst dauerhaften, makellosen und unverwitterbaren Anstriches, soll jedoch nicht Inhalt dieser Arbeit sein. Vielmehr soll der Erhalt der Trägersubstanz und somit unseres Kulturerbes an vorderster Stelle stehen.

Obwohl sich diese Arbeit gänzlich der Thematik beschichteter Natursteinfassaden und -skulpturen widmet, darf darüber hinaus keinesfalls vergessen werden, dass in vielen denkmalpflegerischen Aufgaben sehr wohl auch historisch gewollte Natursteinsichtigkeit vorzufinden ist, zum Beispiel Wiener Rathaus, Votivkirche, etc..

Keinesfalls soll der Eindruck erweckt werden, nun wieder in ein weiteres Extrem zu verfallen und allen natursteinsichtigen Fassaden und Skulpturen einen farbigen Anstrich aufzubürden. Dies wäre keinesfalls im Sinne der Denkmalerhaltung, sondern würde zu einer fälschlichen, nicht hinterfragten Darstellung unseres Kulturerbes führen.

Jeder denkmalpflegerische Eingriff bedarf einer exakten vorangehenden Bestandsanalyse sowie eines im interdisziplinären Diskurs definierten Restaurierziels. Nur so können die für das jeweilige Objekt optimalen Maßnahmen gefunden werden, um dadurch die Authentizität desselben so gut als möglich zu bewahren.

³⁰ Die Beschichtung soll das darunter liegende historische Gesteinssubstrat vor Verwitterung „schützen“ indem Sie selbst als Opferschicht wirkt.

1.4 ZITIERT UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR

Berger (1904), Bermoser (2008), Blöchl-Wirts (2001), Brandes (1995), Chandra (2008), Christ (1994), Cowper (1998), Darmstadt (1990), Eitelberger (1871f), Ghaffari (2005), Herm (1997), Holmström (1996), Ilg (1873), Koller (2003/2004), Meerwein/Mahnke/Rodeck (2007), Nimmrichter (2007), Pernety (1757), Philippot (1972), Schiessl (1989/1999), Schmidt (1996), Schmitt (1937ff.), Sickels (1981), Theuer (1912), Thorel/Marcos/Bailly/et.al (2004), Torraca (1996) Trauninger (2007), Vandamme (1982), Zech (1998)

2 GRUNDLAGEN

2.1 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN

Anstriche, Beschichtungen, Schlämmen, Tünchen,

Es gibt eine Vielzahl an Begriffen zum Thema Anstriche, wobei keine einheitlichen Definitionen in der Nomenklatur, der einschlägigen Fachliteratur und der Praxis vorzufinden sind.

Aus diesem Grund werden nachfolgend sowohl Begriffsbestimmungen aus internationalen Normen und Richtlinien als auch gebräuchliche Bezeichnungen im denkmalpflegerischen Diskurs betrachtet.

Anstrich, Beschichtung – Definition lt. Norm

Lt. EN ISO 4618 (2006) wird als Anstrich bzw. Beschichtung eine „*durchgehende Schicht*“ bezeichnet „*die durch ein- oder mehrmaliges Auftragen von Beschichtungsstoff auf ein Substrat entsteht*“. (S.13)

Unter dem Begriff Beschichtungsstoff wird lt. Norm ein „*flüssiges oder pastenförmiges oder pulverförmiges Produkt, das, auf ein Substrat aufgetragen, eine Beschichtung mit schützenden dekorativen und/oder anderen spezifischen Eigenschaften ergibt*“ (S.14) verstanden. Alternativ zum Begriff Beschichtungsstoff kann auch Anstrichstoff verwendet werden bei welchem es sich um einen historisch gewachsenen Begriff handelt der sich vom Wort „streichen“ ableitet.³¹

Als Beschichtungssystem bzw. -aufbau wird hingegen die Gesamtheit der Schichten aus Beschichtungsstoffen verstanden, welches auf ein Substrat aufgetragen wird.³²

Anstrich, Beschichtung – denkmalpflegerischer Diskurs

Prinzipiell besteht eine Beschichtung neben dem Bindemittel aus Farbmittel und Füllstoffen, Löse- und Verdünnmittel sowie verschiedenen Additiven.³³ (Detaillierte Erläuterungen zu den einzelnen Bestandteilen vgl. Kap. 2.3.1 – Bestandteil und Aufbau von Anstrichsystemen).

In der Denkmalpflege wird nicht nur von Anstrichen sondern vielmehr von Fassungen, Farbschichten, Schlämmen, Tünchen, Lasuren, etc. gesprochen. Eine eindeutige Deklaration dieser Begriffe gibt es zurzeit nicht, vielmehr werden diese Definitionen aufgrund Ihrer Benutzung, Verdünnung, Konsistenz oder der Anstrichzusammensetzung getroffen. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Begriffe charakterisiert und soweit als möglich definiert.

Fassung, polychrome und monochrome Fassungen

Unter dem Begriff Fassung werden unterschiedliche Techniken der Malereien verstanden, welche auf Skulpturen angewendet werden und somit eine farbliche Gestaltung derselben ergeben (vgl. z.B. Brachert (2001)). Eine ähnliche Begriffsdefinition findet sich bei Schmitt (Hg.) (1937 ff.), wo die Fassung als „*die Bemalung und Vergoldung von Bildwerken aus Stein, Stuck, Ton, und anderen Materialien (nicht jedoch aus Metall)*.“ bezeichnet wird. Auch bei farblich gestalteten Fassaden (oder sonstigen architektonischen Oberflächen) kann von Fassungen gesprochen werden.

Eine Fassung setzt immer mehrere Arbeitsgänge und damit einen technischen Schichtaufbau, wie z.B. Grundierung, Deckschichten, etc. voraus.³⁴ In der historischen Terminologie werden für Fassungen oftmals auch Alternativbezeichnungen wie malen, anstreichen, etc. verwendet. Wörter die damit aber nur einen Teil der Arbeitsgänge beim Fassen bezeichnen.³⁵

Unter Polychromie versteht man mehrfarbige Fassungen, während unter dem Begriff Monochromie einfarbige Gestaltungen behandelt werden.³⁶

³¹ vgl. EN ISO 4618 (2006), S.3

³² vgl. EN ISO 4618 (2006), S.14. Vgl. dazu auch Begriffsdefinition Fassung!

³³ vgl. z.B. Rusam (2004), S.14.

³⁴ Lt. Nomenklatur handelt es sich dabei somit um ein Beschichtungssystem.

³⁵ vgl. Schmitt (Hg.) (1937ff): Der technische Aufbau von Fassungen

³⁶ zwar beziehen sich viele Lexika beim Begriff Fassung auf Polychromie, da eine Fassung jedoch nicht die Farbgebung selbst, sondern die Gestaltung einer Skulptur oder Fassade mit einem entsprechenden Schichtaufbau bezeichnet, kann auch bei (vorwiegend) monochromen Anstrichen von Fassungen gesprochen werden.

Tünche

Lt. Schmitt (Hg.) (1937ff) wurde der Begriff Tünche, zumindest seit dem späten 14. Jahrhundert,³⁷ für Kalkanstriche angewendet.³⁸ Die Berufsbezeichnung „Tüncher“ wurde dabei auch mit Anstreicher, Kälker, Weißler, etc. gleichgesetzt. Der Tüncher durfte dabei nur Anstriche mit einfachsten Zierarten durchführen, währenddessen der Maler mit komplexeren Aufgaben wie z.B. Vergoldungen oder Fassadenmalereien³⁹ betraut wurde.⁴⁰

Da der Begriff „Tünchen“ auch heute umgangssprachlich oft mit „Weißen“ und „Weißmalen“ gleichgesetzt wird, geht man weitläufig davon aus, dass es sich bei Tünchen vorwiegend um monochrome weiße Kalkanstriche handelt.⁴¹ Auf Basis der oben genannten Zitate liegt jedoch die Vermutung nahe, dass sich die Bezeichnung „Weißen“ nicht auf die tatsächliche Farbgebung sondern nur auf die Verwendung von Kalk als Bindemittel bezieht. So schrieb auch Prange (1782): *„Man nimmt eine gute Menge besten Kalks ... gießt klares Brunnenwasser darauf ... und mischt etwas Berlinerblau oder Indigo darunter, um das Weiß desto dauerhafter zu machen; darauf rührt man es mit Handschuleim und ein wenig Alaun ab und übertüncht die Wand 5 oder 6 mal“* (aus Brachert (2001)). In vorliegender Arbeit wird der Begriff Tünche somit sowohl für monochrome als auch polychrome Kalkanstriche verwendet.

Schlämme, Schlämmanstrich

Der Begriff Schlämme wird in Normen und Regelwerken nicht genannt und auch in diverseren Lexika ist diese Bezeichnung nicht deklariert. Zwar werden Schlämme in mancher Literatur beschrieben, doch auch hier gibt es teilweise unterschiedliche Auffassungen des Begriffs.

So schreibt Schönburg (2006) beispielsweise: *„Unter den vom Substantiv Schlamm abgeleiteten Wörtern schlämmen und Schlämmanstrich ist das Aufstreichen eines mit Wasser bis zur Streichfähigkeit verdünnten, hoch konsistenten oder hochviskosen, schlammartigen Materials zu verstehen. Beim Kalkschlämmanstrich handelt es sich um den streichfähig, wasserverdünnten Kalkhydratteil mit Lehm und Feinsand als Füllstoff ... Ziegel-, Quarz- u.a. Gesteinsmehle ... Portland- bzw. Weißzement ... Entrahmte Milch, Molke, Magerquark und Caseinbindemittel ... „* (S.165)

Meyer (1993) hingegen schreibt: *„Schlämme sind Dünnpütze, die in Dicken von 3 bis 10 mm i.d.R. mehrlagig aufgetragen werden. Im Unterschied zu Putzen bleibt dadurch die Struktur der Fassade erkennbar, Genau wie Putze sollen Schlämme während der vorgesehenen Nutzungsdauer die Wasseraufnahme einer Fassade vermindern, ohne gleichzeitig die Wasserdampfdurchlässigkeit wesentlich zu beeinträchtigen.“* (S.1027)

In beiden Fällen wird also dem Anstrich noch ein wesentlicher Anteil von Füllstoffen beigemischt, Schönburg (2006) setzt zudem noch die Streichfähigkeit der Schlämme voraus.

In vorliegender Arbeit wird deshalb unter dem Begriff Schlämme, immer ein Kalkanstrich mit Zuschlägen $\geq 0,063\text{mm}$ wie Feinsande oder Gesteinsmehle (als auch Pigmente)⁴², also somit ein Kalkputz verstanden, welcher so weit verflüssigt wird, dass er wie ein Anstrich aufgetragen werden kann.

³⁷ nachweisbare Quellen ab diesem Zeitpunkt

³⁸ Weiters wurde der Begriff Tünche auch für Putze und oberste Putzschichten als auch für den Malgrund von Fresken verwendet (vgl. Schmitt (Hg.) (1937ff)).

³⁹ *„Jede über simplen Anstrich oder Fassung von plastischen Baugliedern hinausgehende Malerei oder Sgraffitodekoration an freiliegenden Außenwänden. Wird diese Malerei zu einem dekorativen System verdichtet, so ist der engere Sinn des Begriffs Fassadenmalerei erfüllt.“* (vgl. Schmitt (Hg.) (1937ff))

⁴⁰ vgl. Schmitt (Hg.) (1937ff)

⁴¹ vgl. z.B. Bermoser (2008), S.65

⁴² Vorläufige Deklaration lt. Arbeitspapier Gruppe „Schlämme 2“ (Beseler, Nimmrichter, Rohatsch, Trauninger, Weber), nicht veröffentlichter Vorabzug! eine Unterscheidung zwischen Anstrich und Schlämme erfolgt anhand der Zuschlagsgröße. Während bei Zuschlägen $\leq 0,063\text{mm}$ von Anstrichen gesprochen wird, handelt es sich bei Zuschlägen $\geq 0,063\text{mm}$ um einen Schlämmanstrich

Lasuren

Bei Lasuren auf mineralischen Untergründen handelt es sich um sehr dünne, transparente bzw. halbtransparente Beschichtungen (vgl. z.B. DIN 18363 (2010), S.6 / EN ISO 4816 (2006), S.31). Auch Brachert (2001) beschreibt den Begriff Lasur als „transparente Farblage die meist mit transparenten Pigmenten oder Farbstoffen ausgeführt wurde“.

Lt. Schmitt (Hg.) (1937ff) handelt es sich bei Lasuren um „transparente Malfarben welche über deckende Malfarben gelegt werden um diese „tiefer“ und dunkler erscheinen zu lassen“

Ebenso ist der Begriff Lasur lt. Alscher (Hg.) (1981ff) eine „Bezeichnung für eine durchsichtige bis transparente Farbschicht, die so dünn aufgetragen oder so pigmentarm ist, daß das auftreffende Licht durch sie hindurch geht wie durch farbiges Glas oder wie durch eine keram. Glasur und erst von darunterliegenden Schichten reflektiert wird. D.h. praktisch, daß tieferliegende Malgrund- und Farbschichten durch Lasuren hindurchwirken ... und etwas dunkler werden und wie aus der Tiefe heraus leuchtend erscheinen.“

Auch Schönburg (2006) bringt Kalklasuren auf frischem Kalkmörtelputz oder einem Kalkvoranstrich auf. Dazu verwendet er lediglich reines Kalkwasser⁴³ welches er mit Pigmenten bindet. Die Verwendung einer stark verdünnten Kalkmilch lehnt er für Kalklasuren ab, da so die Farben weißlich verschleiert werden.⁴⁴

Lasuren werden also auf bereits vorhandene Anstrich- bzw. Putzschichten aufgebracht.

Farbe, Malfarbe, Kalkfarbe, ...

Als Farbe wird prinzipiell nur der Sinneseindruck, welcher durch visuelle Wahrnehmung von Strahlung einer gegebenen spektralen Zusammensetzung entsteht, verstanden.⁴⁵

Für die Farbe als Werkstoff werden hingegen Wortzusammensetzungen wie z.B. Malfarbe, Aquarellfarbe, etc. verwendet.⁴⁶ Sehr oft findet man dabei Bezeichnungen im Zusammenhang mit den jeweiligen Bindemitteldefinitionen (z.B. Kalkfarbe, Silikonharzfarbe, Dispersionsfarbe, Ölfarbe, etc.).

Oftmals kommt für Anstriche auch der Terminus Malfarbe zur Anwendung. Lt. Schramm/Hering (1988)⁴⁷ setzt sich eine Malfarbe immer aus einem Farbmittel (Pigmente oder Farbstoffe)⁴⁸ und einem Malmittel (Bindemittel, Löse- und Verdünnungsmittel) zusammen. Auch lt. DIN 55945 (2007) handelt es sich bei einer Kalkfarbe um eine „wässrige Aufschlämmung von gelöschtem Kalk ... dem gegebenenfalls Pigmente und/oder geringe Mengen anderer Bindemittel zugefügt sind ... Der gelöschte Kalk ist sowohl Bindemittel als auch Pigment.“⁴⁹

Lt. diesen Definitionen würde es sich also bei Malfarben um einen rein farbgebende Anstrich ohne jegliche Füllstoffe handeln.

Schönburg (2006) schreibt dazu allerdings „Kalkgebundene Anstriche, die vorrangig der Farbgebung oder Farbgestaltung dienen, werden als Kalkfarbenanstriche bezeichnet. Auch unpigmentierte Anstriche, die ihrem Untergrund weiß erscheinen lassen sollen, gehören dazu. Die Kalkfarben sind Mischungen ... aus Kalkhydrat, kalkechten Pigmenten ... und Wasser. Sie können zwecks Qualitätsregulierung der Anstriche, z.B. im Füllvermögen und in der Festigkeit die gleichen Zusätze erhalten wie Kalkschlämmanstriche“ (S.167)

Damit schließt Schönburg die Zugabe von Füllstoffen nicht aus.

Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die Begriffe Anstrich, Malfarbe und Farbanstrich bzw. Kalkanstrich, Kalkfarbe, Kalkfarbenanstriche, etc. gleichgestellt.

⁴³ Dazu lässt er eine Kalkhydratschlämme längere Zeit abgestellt. Damit setzt sich das Kalkhydrat am Boden ab und darüber steht das klare Wasser, indem sich das aus dem Kalkhydrat herausgelöste Calciumhydroxid (=Kalkwasser) befindet (Schönburg (2006), S. 168)

⁴⁴ vgl. Schönburg (2006), S.168

⁴⁵ vgl. EN ISO 4618 (2006), S.15

⁴⁶ vgl. Schmitt (Hg.) (1937ff)

⁴⁷ vgl. Schramm/Hering (1988), S.11f

⁴⁸ Pigmente sind bindemittelunlöslich während Farbstoffe bindemittellöslich sind (vgl. z.B. Schramm/Hering (1988), S.20 / Schmitt (Hg.) (1937ff) / EN ISO 4818 (2006), S.15)

⁴⁹ DIN 55945 (2007), S.6

Steinfarbe, Ziegelfarbe

Unter Stein- bzw. Ziegelfarbe versteht man einen Anstrich im Farbton der jeweils vorliegenden Steinart (z.B. blaugrau-Granit, weiß-Marmor, beige-Sandstein) oder des Ziegels.⁵⁰

Damit wurden Stein- oder Ziegelfassaden bildlich mittels Anstrichen imitiert wobei auch Fugen, Patina und/oder Fehlstellen nachgeahmt wurden. Teilweise entsprachen die Gliederungen und Farbgebungen dieser Anstriche sogar den gebauten Außenansichten der Gebäude (vgl. z.B. Arenakapelle in Padua).⁵¹

Gestein, Substrat

Substrat

Als Substrat bezeichnet man die Oberfläche auf welche der Beschichtungsstoff bzw. die Beschichtung aufgetragen wird. Anstelle des Begriffes Substrat kann auch Untergrund verwendet werden.⁵²

Gestein

Lt. Schumann (2007) handelt es sich bei einem Gestein um ein „*Natürliches Gemenge von mehreren Mineralarten, gelegentlich auch aus einer einzigen Mineralart bestehend ... Bildet selbstständige geologische Körper von größerer Ausdehnung. In den geologischen Wissenschaften wird nur von Gestein gesprochen, nicht von Stein und Steinen.*“ (S.188)

Die Bezeichnung eines Gesteins kann sich auf Basis unterschiedlicher Grundlagen ergeben. Manche Gesteine werden nach Ihrem Ursprung wie Orte und Landschaften bezeichnet andere erhalten Ihren Namen auf Basis Ihres Mineralbestands und/oder Ihrer Korngrößenverteilung bzw. der vorwiegend vorherrschenden Bindemittelzusammensetzung.

Fritten

Fritten sind künstlich hergestellte poröse Materialien aus Keramik oder Glas und finden in der Labortechnik oftmals als Filter Anwendung. Fritten werden auch als Träger für Beschichtungen und somit als Substrat verwendet. Der Vorteil besteht darin, dass Fritten aufgrund Ihrer industriellen Herstellung ein definiertes Porengefüge aufweisen. Dadurch können nicht quantifizierbare Randbedingungen aufgrund des komplizierten und oft inhomogenen Gefüges eines Gesteinssubstrats ausgeschlossen werden.

Inwieweit Untersuchungsergebnisse von Beschichtungen auf Fritten, auf die Anstrichanwendung an Gesteinen rückgeführt werden können, ist allerdings fraglich, da gerade diese komplexen Randbedingungen im Labor nur schwer nachgestellt und beurteilt werden können.

Sandstein, Kalksandstein

Unter Sandsteinen versteht man Sedimentgesteine, wo Sande durch die Bindemittel Kalk oder Kieselsäure im Zuge der Sedimententstehung verfestigt wurden (Gesteinsreste werden durch Wasser, Wind, Eis etc. transportiert und mit den in Lösung gehaltenen Bestandteilen vermischt). Bei Kalksandsteinen handelt es sich demnach um Sandsteine mit hohen Kalkanteilen wo als Bindemittel vorwiegend Kalk fungiert.⁵³

⁵⁰ vgl. Koller (2003)

⁵¹ vgl. Koller (2003)

⁵² vgl. EN ISO 4618 (2006), S.45

⁵³ vgl. Schumann (2007), S.260–274

Begriffe zum Thema Kalk

Kalk, Kalkstein

Chemisch gesehen ist Kalk eine Verbindung der Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff und Kalzium mit der dazugehörigen chemischen Formel CaCO_3 . Durch die Verbindung von Kalzium und Sauerstoff entsteht vorab Kalziumoxyd (CaO) welches anschließend unter Einwirkung von Kohlensäure zur stabilen Modifikation Kalzit ($\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$) umgewandelt wird. Man spricht deshalb auch oft vom kohlen-sauren Kalk.⁵⁴

In der Geologie versteht man unter Kalk zumeist Kalksteine. Umgangssprachlich verwendet man den Begriff Kalk jedoch auch für Branntkalk und Kalkhydrate, also auch für die Produkte, welche durch Brennen von Kalkstein (Branntkalk) und Löschen des Branntkalkes (gelöschter Kalk - Kalkhydrat) hergestellt werden.

Kalkstein besteht im Wesentlichen aus dem Mineral Kalzit, welches einen Anteil bis zu 95% einnehmen kann.⁵⁵ Durch unterschiedliche Beimengungen von carbonatischen und/oder silikatischen Verbindungen, wie Magnesium, Eisen, Aluminium und Kieselsäure (MgO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2), variiert Kalkstein einerseits stark in der Farbe und andererseits auch in seinen Eigenschaften. Bereits Agricola (1546) schrieb:

„Denn mancher ist weiß, und zwar ganz schneeweiß ... Ein anderer ist weiß-ashgrau ... Ein anderer braun ... In den Bergen an der Saale findet man an einer Stelle weißen, an einer anderen rötlich-gelben, an einer weiteren rötlichen Mehrfarbiger, das ist teils weißer, teils aschgrauer, ... Für die Verarbeitung muß er aber außerordentlich rein und unvermischt sein.“⁵⁶

Agricola hat also eindeutig erkannt dass die unterschiedlichen Beimengungen, die sich in den Farben widerspiegeln, die Eigenschaften des Kalksteines stark beeinflussen.

Wenn der Kalkstein unter dem Einfluss hoher Temperaturen und hoher Drücke umkristallisiert so entsteht der sogenannte Calcit-Marmor.

Kalkentstehung – natürlicher Kalkkreislauf

Die Entstehung von Kalkstein ist in der Natur äußerst komplex und wird nachfolgend nur schematisch dargelegt. Im Prinzip kann Kalk auf drei verschiedene Arten entstehen.⁵⁷

- durch Ablagerung kalkiger Schalen bzw. Skelettbildungen tierischer und pflanzlicher Hartteile
- durch das Ausscheiden von Kalk aufgrund des Stoffwechsels von Organismen
- durch Ausfällung aus erwärmten Wasser infolge der Verringerung der Kalklöslichkeit bzw. Herabsetzung der Löslichkeit der Kohlensäure (Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht)

Wobei diese Prozesse im Zusammenhang miteinander gesehen werden müssen. In kohlen-säurehaltigem Wasser geht Kalk in Lösung und es bildet sich Calciumhydrogencarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). Dieses geht einerseits wiederum in den pflanzlichen bzw. tierischen Organismus über. Meerestiere wie Korallen, Schnecken, Muscheln, Krebse etc. bauen mit Hilfe von diesem Calciumhydrogencarbonat ihr Gehäuse aus Kalk auf und geben dabei wieder Kohlensäure und Wasser ab. Wenn die Meerestiere absterben steht wiederum Kalk als Verwitterungsprodukt zur Verfügung. Bei vielen Kalksteinen kann man deshalb die Hartteile einstiger Organismen erkennen.

Wenn calciumhydrogenkarbonathaltiges Wasser verdunstet, also der gegenteilige Effekt der Kalklösung auftritt, wandelt sich das Calciumhydrogencarbonat wieder zu Kalk und Kohlensäure um. Diesen Prozess findet man in der Natur vor allem bei Tropfsteinhöhlen vor, wo das herunterfließende Wasser langsam verdunstet und sich dadurch Kalkstein bildet.

⁵⁴ vgl. Tarnawski (1887), S.87

⁵⁵ vgl. Schumann (2007), S.280

⁵⁶ Fraustadt, Krafft (2006), S.260

⁵⁷ vgl. Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V. (2006) / Schumann (2007), S.282

Kalkherstellung – technischer Kalkkreislauf

Im Prinzip wird bei der Herstellung von Kalkbaustoffen der natürlich Kalkkreislauf nachgebildet. Man spricht dann vom sogenannten technischen Kalkkreislauf. Er beschreibt die technische Umwandlung des Kalksteines in drei wesentlichen Schritten: dem Brennen des Kalksteins bei Temperaturen von 1000-1200°C (unterhalb der Sintergrenze), gefolgt vom Löschen des gebrannten Kalkes mit Wasser und dem anschließenden Erhärten (Karbonatisieren) des gelöschten Kalkes zum Ausgangsprodukt Kalkstein. Der Kalk ist somit theoretisch wieder das geworden, was er ursprünglich war. Praktisch kann natürlich nicht ganz die ehemalige Härte und Festigkeit des Ursprungsgesteins erreicht werden.⁵⁸

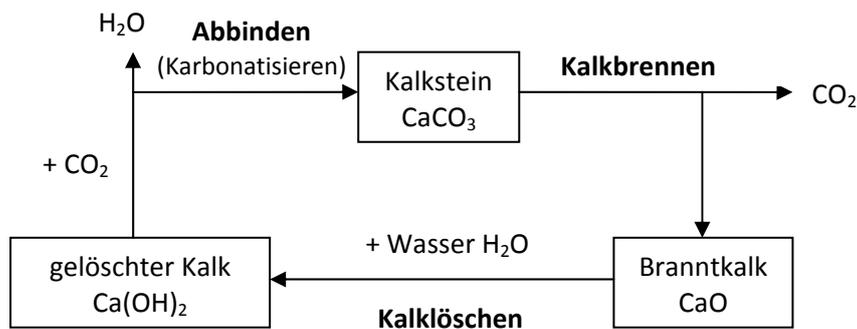


Abbildung 2-1: technischer Kalkkreislauf

Im Prinzip wurde bereits in der Antike dieses Verfahren zur Kalkherstellung angewandt. Vitruv schrieb dazu, (in Anbetracht der 4-Elemente Lehre)⁵⁹ beispielsweise: „Nachdem also die Feuchtigkeit, welche im Innern eines solchen Steines ist, und die Luft herausgebrannt und hinweggenommen ist und derselbe nunmehr gebundene (latente) Wärme zurückgeblieben in sich hat, wird er, in Wasser getaucht, ehe er nach gelöschtem Feuer seine Kraft wieder erlangt, durch die losen Öffnungen eindringende Feuchtigkeit heiß, und sodann abgekühlt läßt er, nun zum Kalk geworden, die Hitze aus sich entweichen.“⁶⁰

Dieses Prinzip wird noch heute angewandt, wobei sich die Herstellungstechnik natürlich weitgehend verändert hat. Früher wurde Kalk mittels der Brennstoffe Holz, Kohle oder Torf in Gruben, Schächten oder einfach gemauerten Öfen gebrannt, welche von Hand beschickt wurden. Heute geschieht der Brennvorgang in Schacht- oder Drehöfen, schwefelhaltige Brennstoffe kommen aufgrund der chemischen Reaktion von Kalk und Schwefel zum schädlichen Bausalz Gips nicht mehr zur Anwendung.

Das Löschen des Kalkes kann entweder mit Wasserüberschuss (=Nasslöschen) oder mit der, für die chemische Reaktion exakt benötigte Menge an Wasser (=Trockenlöschen), erfolgen.

Beim Nasslöschen wird der Branntkalk in einem hölzernen, flachen Kasten nass gelöscht, mit Wasser verdünnt und anschließend durch ein Sieb in eine sogenannte Kalkgrube gefüllt. Das Sieben soll Quarz- und ungelöschte Teile vor der Lagerung entfernen. Je länger der Kalk gelagert wird, desto besser werden die Kalkpartikel abgelöscht, da die Kristallisationsvorgänge sehr langsam stattfinden.

Durch diese lange Lagerung, entsteht ein sehr feines Kalkhydrat, welches man als Sumpfkalk bezeichnet und das für die Herstellung von Kalkanstrichen verwendet wird.

⁵⁸ vgl. Wehlte (1981), S.277

⁵⁹ In der Antike entwickelte Lehre in der alles „Sein“ aus den vier Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde besteht. Der griechische Philosoph Aristoteles (384–322 v. Chr.) ordnete diesen Elementen zusätzlich die Eigenschaften kalt, trocken, warm und feucht zu. (z.B. Feuer = warm und trocken).

⁶⁰ Reber (2004), S.62

Beim vermutlich gebräuchlichsten historischen Trockenlöschverfahren⁶¹ wird im Wechsel Sand und Branntkalk übereinander geschichtet. Durch Feuchthalten bzw. Begießen des Sand-Kalk-Hügels kann der Branntkalk innerhalb kurzer Zeit in Kalkhydrat umgewandelt werden. Dieses Trockenlöschverfahren wurde hauptsächlich für die Herstellung von Mauermörtel verwendet, da bei diesem Verfahren auch sogenannte Kalkspatzen entstehen (Kalzit-Einschlüsse), welche einen positiven Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Mörtels ausüben (vgl. Winnefeld et al. (2001)).

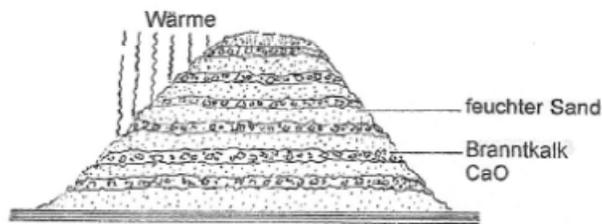


Abbildung 2-2: historische Art der Herstellung von Weißkalkmörtel durch Trockenlösch (aus Schönburg (2006), S.158).

Weitere historische Trockenlöschverfahren sind das einfache Lagern des Branntkalkes an der Luft oder das Eintauchen von Körben mit Branntkalk in Wasser.⁶² Bei letztgenannter Methode trocknet der Kalk, nach Herausnehmen des Korbes, infolge der beim Löschen entstehenden Hitze.

Der trockengelöschte Kalk kommt als Sackkalk bzw. Staubkalk in den Handel.

Karbonatisierung

Unter Karbonatisierung versteht man den Abbindevorgang des gelöschten Kalkes an der Luft, nach Auftragen als Beschichtung bzw. als Mörtel (vgl. technischer Kalkkreislauf).

Je nach Art der Abbindung unterscheidet man zwischen Luftkalke, natürlich hydraulischen Kalke und hydraulischen Kalke.

Luftkalke sind Kalke die unter Einwirkung von Kohlendioxid an der Luft erhärten während hydraulische Kalke zusätzlich auch unter Wasser erhärten.

Natürlich hydraulische Kalke werden durch Brennen von tonhaltigen oder kieselsäurehaltigen Kalksteinen gewonnen. Die hydraulischen Eigenschaften resultieren damit ausschließlich aus der besonderen chemischen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials.⁶³

Werden hingegen im Zuge der Herstellung puzzolanische bzw. hydraulische Stoffe wie beispielsweise Zement, Hochofenschlacke, Flugasche, Tonziegel, Trass, etc. beigemischt, so handelt es sich um hydraulische Kalke, wobei es lt. Norm auch die Zwischenstufe des sogenannten formulierten Kalkes gibt wo natürliche hydraulische Kalke zusätzlich mit hydraulischen Zusatzstoffen vermengt werden.⁶⁴

Da für Kalkanstriche vorwiegend Sumpfkalk verwendet wird, ist die Verwendung von reinem Kalkstein ohne hydraulische Zusätze unabdingbar. Bereits geringe hydraulische Anteile führen dazu, dass der Sumpfkalk mit der Zeit fest wird.⁶⁵

Der Karbonatisierungsprozess selbst (vgl. technischer Kalkkreislauf) läuft relativ langsam ab und kann durch viele äußere Faktoren wie Temperatur und Feuchtigkeit beeinflusst werden. Frost und Trockenheit können den empfindlichen Karbonatisierungsprozess stören oder sogar gänzlich abbrechen, was zu einer unzureichenden Erhärtung und somit schlechten Qualität des Kalkanstriches führt. Temperaturen von ca. 20°C, eine geringe (direkte) Sonneneinstrahlung sowie eine hohe Luftfeuchtigkeit stellen optimale Klimabedingungen für eine gute Karbonatisierung dar (detaillierte Erläuterungen dazu vgl. Kap. 4).

⁶¹ vgl. Kraus et al. (1989), S.217

⁶² vgl. Kraus (2004), S.3

⁶³ Keine Beimengung sonstiger hydraulischer Zusätze.

⁶⁴ vgl. EN 459-1 (2010), S.18

⁶⁵ vgl. Kraus et al. (1989), S.219

2.2 CHEMISCHE UND PHYSIKALISCHE VERWITTERUNGSMECHANISMEN

Ein Bauwerk ist verschiedenen Witterungseinflüssen wie Niederschlag, Hitze, Frost, etc. ausgesetzt die zu einer Verwitterung des Gesteins führen. Das Ausmaß dieser Verwitterung hängt sehr stark von den klimatischen Randbedingungen ab. Österreich befindet sich in der gemäßigten feuchten Klimazone. Aus diesem Grund ist hierzulande vor allem Feuchtigkeit ein großer Schadensfaktor. Ein Stein an einer exponierten Lage am Bauwerk kann jedoch auch völlig anderen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sein als ein anderer Stein desselben Bauwerks.

Man spricht dabei vom sogenannten Mikroklima. Diese weitgeschichteten „Klimazonen“ entstehen aufgrund der unterschiedlichen Einbausituationen der Steine am Objekt, wie Himmelsrichtung, Neigung, Lage etc., wodurch unterschiedliche Verwitterungsformen ausgelöst werden.

Im Allgemeinen wird zwischen folgenden zwei Verwitterungsformen unterschieden:⁶⁶

1. physikalische Verwitterungsprozesse
2. chemische Verwitterungsprozesse

Zusätzlich wird als dritter Prozess manchmal auch die biologische Verwitterung genannt, welche aber im Prinzip wiederum vorwiegend chemisch und/oder physikalisch erfolgt.

Die genannten Verwitterungsformen kommen meist nicht einzeln sondern in Kombination miteinander vor. Man kann also nur, wenn überhaupt, von einer vorwiegenden Zerstörung durch einen dieser Verwitterungsprozesse sprechen.

Bei der physikalische Verwitterung handelt es sich um sprengende Belastungen, die durch Ausdehnungen und Verformungen der Bauteile entstehen. Diese Prozesse werden vor allem durch Feuchtigkeitseinwirkungen angekurbelt, die einerseits zu Quell- und Schwinderscheinungen, als auch zu Sprengungen infolge Frost führen können.

Auch durch die Auskristallisation von Salzen kann es zu solchen Sprengwirkungen kommen (Kristallisationsdrücke). Auch hier spielt die Feuchtigkeit eine wichtige Rolle, da Salze nur mit Hilfe von Wasser transportiert werden können. Zudem können die meisten Salze Wasser in ihre Kristallstruktur einlagern, was ebenfalls zu einer erheblichen Volumszunahme und somit zu einer Sprengwirkung führen kann (Hydratationsdrücke).

Im Hinblick auf physikalische Verwitterungsmechanismen spielen auch thermisch induzierte Dehnungen durch Hitzeeinwirkung sowie Rostsprengungen aufgrund eingebauter Metallteile oder erzhaltiger Gesteine eine wichtige Rolle.

Bei der chemischen Verwitterung handelt es sich um einen lösenden Angriff auf das Gestein. Vorhandene Schadstoffe werden abermals durch Feuchtigkeit im Baustoff gelöst und dadurch chemische Prozesse in Gang gesetzt (z.B. Kalklösung oder Gipskrustenbildung durch säurehaltigen Regen)⁶⁷. Da auch hier Wasser als Hauptverursacher genannt werden kann, ist dieser Schadensprozess meist eng mit einer physikalischen Verwitterung verbunden.

Bei der biologischen Verwitterung handelt es sich um Verwitterung durch schädigende Einwirkungen von Mikroorganismen wie Flechten, Pilze, Algen und Bakterien. Diese können einerseits zu einem Schadstoffeintrag durch pflanzliche und tierische Ausscheidungen, als auch zu einer Stoffzersetzung bzw. –umwandlung führen. Mikrobieller Bewuchs kann allerdings nur bei bestimmten Bedingungen entstehen. Algen brauchen sowohl Wasser, als auch Sonne und Luft zur Photosynthese. Pilze und gewisse Bakterien benötigen zusätzlich organische Substanzen, dafür aber kein Licht. Es gibt auch spezielle Bakterien, die unter anaeroben Bedingungen leben können, diese findet man dann aber nur in tieferen Schichten vor. Algen sind meistens als erstes anzutreffen, da sie ja noch keine organischen Substanzen zum Überleben benötigen. Erst später siedeln sich auch Pilze und andere Bakterien an, die sich dann von den Ausscheidungen der Erstbesiedler ernähren können.⁶⁸

⁶⁶ vgl. Rohatsch (2004)

⁶⁷ vgl. Kieslinger (1932), S.51-82

⁶⁸ vgl. Wittmann (Hg.) (1993), S.228–230

2.2.1 Wasser als verwitterungsrelevante Einwirkung auf das Bauwerk

Aus obiger Darstellung wird klar, dass Wasser einen übergeordneten Stellenwert bei allen Verwitterungsmechanismen einnimmt. Auch andere mögliche Einwirkungen wie Salze, Temperaturschwankungen und Mikroorganismen sind meist nur bei Vorhandensein von Wasser (flüssig oder gasförmig) für das Bauwerk schädlich.

So entstehen bei der hygroskopischen Wassereinlagerung von Salzen große Hydratationsdrücke die zu Sprengwirkungen führen können und auch die Auskristallisation von Salzen ist an die Wechselwirkung feucht (Transport von Salzen in Lösung) und trocken (Auskristallisation) gekoppelt. Auch im Zusammenhang mit thermischen Einwirkungen spielt Wasser eine wichtige Rolle, da bei Temperaturen unter Null Wasser bekanntlich gefriert, und es somit zu Frostschäden kommen kann. Vor allem in unseren Breitengraden spielt dieser Schadensmechanismus eine entscheidende Rolle, da der Wechsel von Frost- und Tauphasen mehrmals im Jahr stattfindet.

Wasser spielt somit die entscheidende Rolle bei allen Verwitterungsmechanismen und ist vor allem in historischer Bausubstanz immer vorhanden. Sei es durch kapillare Wasseraufnahme aus dem Erdreich, durch Sicker-, Hang, oder Regenwasser oder einfach nur aufgrund der Luftfeuchtigkeit, welche zu Kondensationserscheinungen im Bauteil oder an der Bauteiloberfläche führen kann.⁶⁹

Aus diesem Grund wird in vorliegender Arbeit hauptsächlich auf die Feuchtetransportvorgänge im Gestein im Zusammenhang mit der Beschichtung eingegangen. Ein ausgeglichener Feuchtehaushalt wird als Grundlage zur optimalen Funktionsfähigkeit eines Bauteils angesehen, weshalb im nachfolgendem Kapitel detailliert auf die Feuchtetransport- und -speichereigenschaften poröser Materialien wie Natursteinen und anderen mineralische Baustoffen eingegangen wird.

2.2.2 Feuchtetechnische Eigenschaften poröser mineralischer Baustoffe

Der Feuchtetransport und -haushalt in porösen Baustoffen ist ein relativ komplexer Vorgang, bei dem üblicherweise Sorptions-, Diffusions- und Kapillaritätseffekte überlagert vorkommen. Ob und in welcher Intensität diese Mechanismen auftreten hängt sehr stark von der Porenstruktur und den hygroskopischen Eigenschaften des Baustoffs ab.

Auch werden die Transportvorgänge durch die thermischen und hygrischen Klimaeinwirkungen wie Luftfeuchte, Beregnung, UV-Strahlung, Temperatur etc. beeinflusst.⁷⁰

Prinzipiell wird der Feuchtehaushalt poröser mineralischer Baustoffe einerseits durch die Feuchtespeichereigenschaften und andererseits durch die im Baustoff stattfindenden Feuchtetransportvorgänge bestimmt. Bei mineralischen Baustoffen finden diese beiden Mechanismen immer im Porengefüge statt.⁷¹

Feuchtespeicherung

Die Feuchtigkeit welche in einem Baustoff gespeichert wird, kann entweder fest, flüssig oder dampfförmig sein (in sehr kleinen Mikroporen bilden sich auch nicht exakt definierbare Aggregatzustände aus). Im Normalfall wird immer die Summe dieser Aggregatzustände als Wassergehalt w angegeben, da die getrennte Ermittlung der unterschiedlichen Zustandsformen schwierig ist. Der maximale Wassergehalt w_{\max} ergibt sich dann, wenn alle Poren mit Wasser gefüllt sind, was jedoch nichts über das Feuchtespeichervermögen des Baustoffes aussagt. Für dieses muss erst ein Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Baustoffes und den jeweiligen Umgebungsbedingungen hergestellt werden.⁷²

⁶⁹ eine detaillierte Darstellung der Feuchtetransportmechanismen im Gebäude gibt beispielsweise Kieslinger (1932), S.11-50

⁷⁰ vgl. Kießl (1985)

⁷¹ vgl. Krus (1995), S.9

⁷² vgl. Künzel (1994), S.7

Bei porösen mineralischen Baustoffen wird die Feuchtespeicherung in Abhängigkeit des Wassergehaltes in 3 Bereiche unterteilt:⁷³

1. Sorptionsfeuchtbereich
2. Kapillarwasserbereich
3. Übersättigungsbereich

Sorptionsfeuchtbereich

Sobald ein poröser Baustoff mit feuchter Luft in Kontakt kommt, binden hygroskopische Stoffe Wassermoleküle an die Oberflächen ihres Porensystems bis ein entsprechender Ausgleichswassergehalt (in Abhängigkeit von der umgebenden Luftfeuchtigkeit) erreicht wird.⁷⁴

Der Zusammenhang zwischen der Menge des eingelagerten Wassers und der relativen Luftfeuchte wird durch die Sorptionsisotherme charakterisiert.

Dieser Bereich erstreckt sich bis zu Ausgleichsfeuchten von ca. 95% rel.LF wobei ab einer relativen Luftfeuchte von ca. 60-80% in den feinen Kapillaren zusätzlich Kondensationserscheinungen⁷⁵ auftreten was zu einem Anstieg der Ausgleichsfeuchte führt.⁷⁶

Sorptionsisothermen hygroskopischer, poröser Baustoffe zeigen typischerweise einen S-förmigen Verlauf sowie einen sogenannten Hystereseeffekt zwischen Adsorption (Wasseraufnahme) und Desorption (Wasserabgabe).

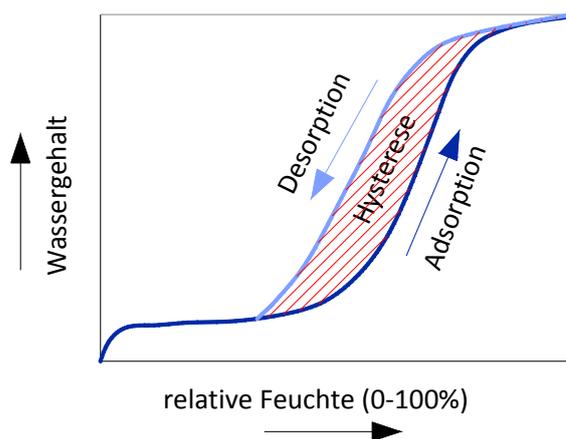


Abbildung 2-3: Li: Prinzipskizze einer Sorptionsisotherme mit Hystereseeffekt.

Die Hystereseeffekte sind bei den meisten Kalksandsteinen gering, weshalb die Charakterisierung der Feuchtespeichereigenschaften mit Hilfe einer Adsorptionsisotherme ausreicht.⁷⁷

⁷³ vgl. Krus (1995), S.10

⁷⁴ vgl. Künzel (1994), S.7

⁷⁵ in sehr kleinen Poren bildet sich ein konkaver Meniskus, aufgrund der Überlagerung der Adsorbatschichten an den gegenüberliegenden Porenwänden aus. Dies führt (im Vergleich mit ebenen Adsorbatschichten) zu einer Reduktion des Dampfdruckes weshalb in diesen Poren Kondensation schon vor Erreichen des Sättigungsdampfdruckes auftritt (vgl. Krus (1995), S.11–12)

⁷⁶ Detaillierte Darlegung vgl. Kießl (1983), S.20–23

⁷⁷ lt. Künzel (1994) sind die Hystereseeffekte bei den meisten Baustoffen vernachlässigbar gering. Bei stärker ausgeprägten Hysteresen, wie beispielsweise Blähton, kann eine Mittelung zwischen Adsorptions- und Desorptionsisotherme zur Beschreibung der Feuchtespeichereigenschaften angenommen werden.

Kapillarwasserbereich

Ab einer Luftfeuchtigkeit von ca. 95% steigt die Sorptionsisotherme sehr stark an. Dies begründet sich damit, dass die Wasseraufnahme nun nicht mehr über Sorption alleine, sondern auch über Kapillaraktivität stattfindet.

Kapillarporöse, hygroskopische Baustoffe können so lange Wasser aufsaugen bis die sogenannte freie Wassersättigung bei 100% relativer Luftfeuchte erreicht ist.

Zur detaillierten Beschreibung der Kapillarleitungsmechanismen s. untenstehendes Kapitel Feuchtetransport.

Übersättigungsbereich

Die freie Wassersättigung welche sich als Ausgleichsfeuchte bei 100% relativer Luftfeuchte einstellt, entspricht nicht dem durch den offenen Porenraum möglichen maximalen Wassergehalt, da im Normalfall immer Luftblasen im Porengefüge eingeschlossen sind. Diese können nur durch Anwendung eines äußeren Druckes bzw. durch Kondensation aufgrund einer Taupunktunterschreitung oder entsprechend langer Wasserlagerung ebenfalls mit Wasser gefüllt werden. Solch eine Übersättigung findet unter natürlichen bauphysikalischen Bedingungen nur in Ausnahmefällen statt.⁷⁸

Zusammenfassung

Nachfolgend eine schematische Abbildung einer typischen Sorptionsisotherme mit den, bei hygroskopischen kapillaraktiven Bauteilen, typischen Feuchtebereichen.

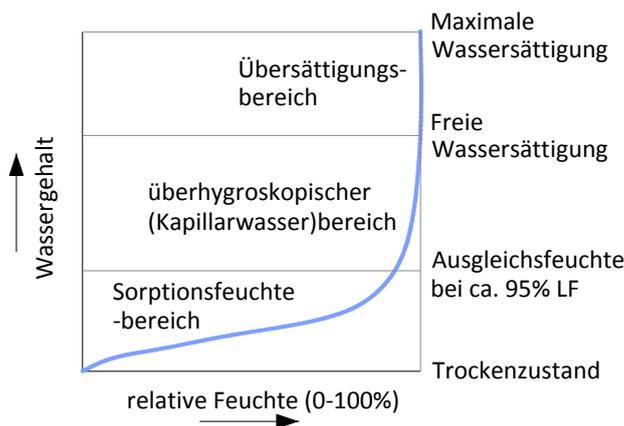


Abbildung 2-4: typische Sorptionsisotherme eines porösen mineralischen Baustoffes⁷⁹

Feuchtetransport

Der Feuchtetransport kann prinzipiell entweder in der flüssigen oder gasförmigen Phase erfolgen⁸⁰, wobei für übliche bauphysikalische Bedingungen folgende Transporteffekte wichtig sind:⁸¹

- Kapillarleitung
 - Oberflächendiffusion
 - Dampfdiffusion
 - (Effusion)⁸²
- } flüssiger
} Aggregatzustand
} gasförmiger
} Aggregatzustand

⁷⁸ vgl. Krus (1995), S.12–15

⁷⁹ nach Künzel (1994), S.8

⁸⁰ vgl. Künzel (1994), S.6

⁸¹ vgl. Krus (1995), S.15

⁸² Von Wasserdampfdiffusion spricht man, wenn sich die Moleküle frei in der Luft bewegen können während Effusion in sehr kleinen Mikroporen stattfindet, wo ein Zusammenstoß zwischen den einzelnen Molekülen nicht mehr ausgeschlossen werden kann (vgl. Krus (1995), S.16-18 / Künzel (1994), S.16)

Kapillarleitung

Der kapillare Flüssigtransport ist in kapillarporösen Materialien ein maßgeblicher Feuchttransportmechanismus und wird für eine einzelne Kapillare folgendermaßen begründet: In einer teilweise mit Wasser gefüllten Kapillare bildet sich durch die Oberflächenspannung von Wasser und der Grenzflächenspannung zwischen dem Wasser und der Kapillaroberfläche eine Krümmung der Wasseroberfläche aus, welche einen, zum Krümmungszentrum gerichteten Normaldruck ausübt und somit (im Fall des Wassers als Flüssigkeit) zu einer Zugspannung führt.

$$p_k = \frac{2\sigma \cos \Theta}{r}$$

p_k	Kapillardruck [Pa]
σ	Oberflächenspannung des Wassers [N/m]
Θ	Randwinkel [grad]
r	Krümmungsradius [m]

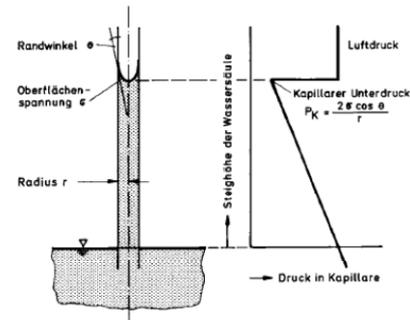


Abbildung 2-5: Kapillaraktivität einer Zylinderkapillare. Li: Berechnung der Saugspannung (Kapillardruck), Re: schematische Darstellung der Wassersäule und der Druckverhältnisse⁸³

Ist die mathematische Beschreibung dieses Mechanismus einer einzelnen Kapillare noch relativ einfach, so ist sie für die Gesamtstruktur aufgrund des komplexen Porengefüges äußerst schwierig.

Während eine Einzelkapillare einzig durch ihre Länge und ihren Radius geometrisch beschrieben werden kann, so ist ein poröser Körper durch eine hohe Anzahl von Poren unterschiedlicher Weite, Länge und Form gekennzeichnet, welche größtenteils miteinander in Verbindung stehen.⁸⁴

Dies führt dazu, dass in einem komplexen Porengefüge in jeder Pore andere Kräfte wirksam werden, die über Verbindungen miteinander in Wechselwirkung stehen und somit zu Wassergehaltsunterschieden innerhalb des Porensystems führen.⁸⁵

Zusätzlich wird bei Unterbindung der Wasserzufuhr zwar keine neue Flüssigkeit mehr aufgesaugt, dennoch findet immer noch ein Flüssigtransport innerhalb des Gefüges statt, welche auf die Weiterverteilung innerhalb der Porenstruktur zurückzuführen ist. Kleine, noch nicht gefüllte Poren saugen, aufgrund ihrer höheren Zugkraft, die größeren bereits gefüllten Poren leer.

Obwohl die sich dabei einstellenden kapillaren Zugkräfte kaum messbar sind, ist es dennoch möglich die Auswirkungen dieser Zugkräfte in Form des Wassergehaltsgefälles anstelle des Druckgefälles zu bestimmen (vgl. Krischer (1992), S.209).

Dazu werden die genannten Transportmechanismen mathematisch mit sogenannten Flüssigtransportkoeffizienten in Abhängigkeit des Wassergehaltes ausgedrückt. Da der Transport durch Weiterleitung jedoch wesentlich langsamer abläuft als der Transport beim Saugen müssen unterschiedliche Flüssigtransportkoeffizienten für Saugen und Weiterleiten definiert werden.⁸⁶

Eine detaillierte Bestimmung dieser Koeffizienten ist jedoch nur bei feuchtetechnischen Simulationen erforderlich, für die in dieser Arbeit durchgeführten Laboruntersuchungen reicht es, die Kapillartransportmechanismen prinzipiell zu verstehen um entsprechende Schlüsse ziehen zu können.

⁸³ aus Künzel (1994), S.10

⁸⁴ vgl. Krischer, Kast (1992), S.215

⁸⁵ vgl. Krus (1995), S.24

⁸⁶ vgl. Krus (1995), S.26

Oberflächendiffusion

Bei hygroskopisch porösen Materialien bildet sich aufgrund der Anlagerung von Wassermolekülen an den inneren Oberflächen ein Flüssigkeitsfilm welcher mit steigender Luftfeuchtigkeit zunimmt. Mit Zunahme dieses Adsorbatfilmes steigt auch die Mobilität der Wassermoleküle, weshalb ab einer bestimmten Luftfeuchtigkeit (ab ca. 50% rel.LF.) dem Flüssigtransport aufgrund Oberflächendiffusion einer erheblichen Bedeutung beigemessen werden muss. Oftmals kann dabei die Oberflächendiffusion die Dampfdiffusion um ein Vielfaches übersteigen.⁸⁷

Wasserdampfdiffusion

Bewegungsvorgänge bei denen Moleküle aufgrund unterschiedlicher Drücke oder Konzentrationen wandern nennt man Diffusion.

Diese Bewegungen stellen sich durch unterschiedliche Wasserdampf-Partialdrücke aufgrund verschiedener Temperaturen und Luftfechtigkeiten zwischen Innen- und Außenraum ein, wodurch die Moleküle von höheren zu niedrigeren Partialdrücken wandern um einen Ausgleich zu schaffen.

Dieser Austausch wird durch einen Wandbaustoff, je nach Materialität, mehr oder minder erschwert, indem er einen Widerstand gegen diesen Diffusionsausgleich schafft.

Der Diffusionswiderstand ist bei hygroskopisch porösen Materialien zusätzlich auch von der relativen Luftfeuchte abhängig.⁸⁸ Dies begründet sich dadurch, dass sich die Wasserdampfdiffusion mit der Flüssigkeitsbewegung adsorbierter Schichten überlagert. Einerseits findet aufgrund des Partialdruckgefälles ein Diffusionstransport statt und andererseits führen unterschiedliche relative Luftfechtigkeiten ebenfalls zu einem Flüssigtransport der adsorbierten Wasserschichten (Oberflächendiffusion).

Bei winterlichen Bedingungen findet das Dampfdruckgefälle in die entgegengesetzte Richtung des Feuchtigkeitsgefälles statt wodurch sich die beiden oben genannten Transportmechanismen in umgekehrte Richtungen bewegen.

Je höher die Bauteilfeuchte, desto größer wird der Flüssigtransport aufgrund Adsorption gegenüber der Dampfdiffusion, solange bis sich sogar eine Umkehr der Transportrichtung einstellt.

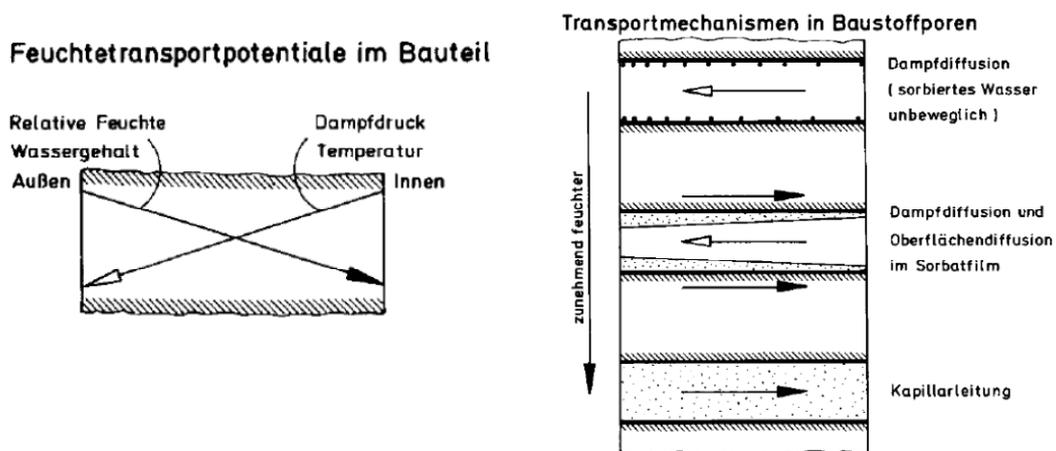


Abbildung 2-6: schematische Darstellung von Feuchtetransportpotentialen und Transportmechanismen in hygroskopisch kapillaren Baustoffen (aus Künzel (1994), S.15)

⁸⁷ vgl. Krus (1995), S.22

⁸⁸ vgl. Künzel (1994), S.15

Zusammenfassung

Der Feuchtetransport in einem porösen Gefüge ist, wie aus obigen Zusammenfassungen sichtbar wird, als äußerst komplex anzusehen. Im Normalfall sind nicht nur einzelne sondern mehrere Transportmechanismen vorzufinden, welche in Abhängigkeit der Materialfeuchtigkeit überlagert auftreten.

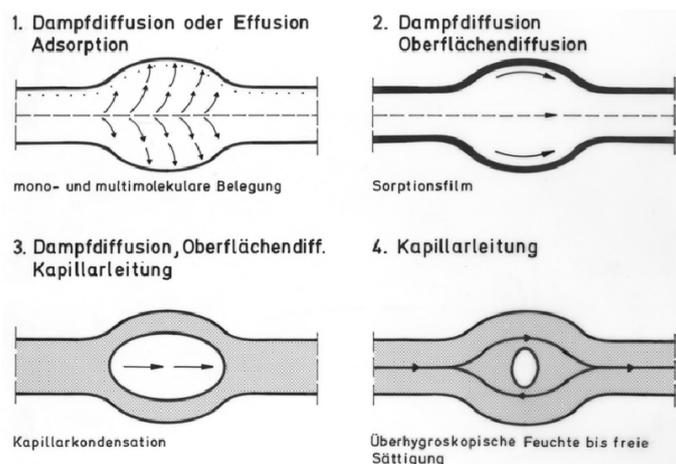


Abbildung 2-7: Transporteffekte der verschiedenen Feuchtegehaltsstadien am Modell einer zylindrischen Kapillare mit variierendem Durchmesser⁸⁹

2.2.3 Zusammenfassung: chemische und physikalische Verwitterungsmechanismen

Die Verwitterung poröser Baustoffe erfolgt entweder durch physikalische oder chemische Umwandlungsprozesse wobei Wasser dabei, vor allem in unseren Breitengraden, fast immer eine entscheidende Rolle spielt.

Sowohl die Anwesenheit von Salzen als auch Frost-Tauwechselzyklen führen in der Regel nur in Verbindung mit Wasser im Baustoff zu Schädigungen, weshalb die genaue Kenntnis der Feuchtetransport- und Feuchtespeichereigenschaften des Baustoffes bekannt sein müssen.

Mechanismen wie Adsorption, Diffusion und Kapillarleitung geben, im Zusammenhang mit dem vorhandenen Porengefüge des Baustoffes, Parameter für die Wasseraufnahme als auch die Weiterverteilung und die Wasserabgabe vor.

Durch die Kenntnis der einzelnen Zusammenhänge dieser Wasserspeicher- und Transportmechanismen, (z.B. Verhältnis der Wasseraufnahme zur Wasserabgabe) kann damit auch eine Abschätzung der jeweiligen Verwitterungsmechanismen am Gebäude bzw. an der Skulptur getroffen werden.

⁸⁹ aus Krus (1995), s. Bild 8 nach Rose

2.3 ANSTRICHE – GRUNDLAGEN UND ANFORDERUNGEN

2.3.1 Bestandteile und Aufbau von Anstrichsystemen

Prinzipiell besteht ein Anstrichsystem aus mehreren Hauptbestandteilen⁹⁰

1. Bindemittel
2. Pigmente, Farb- und Füllstoffe (Feststoffkomponenten)
3. Löse- und Verdünnungsmittel (Flüchtige Komponente)
4. Additive

Bindemittel

Bindemittel sind Mischungen in Form von klebenden Lösungen, Emulsionen oder Dispersionen die beim Erhärten oder Verdunsten des Lösungsmittels dazu dienen die Pigmentteilchen miteinander zu verkitten und auf dem Untergrund festzukleben.⁹¹

Laut Norm ist das Bindemittel der „*nichtflüchtige Anteil eines Beschichtungstoffes ohne Pigmente und Füllstoffe*“.⁹² Diese Definition muss im Falle der Kalkbeschichtung etwas revidiert werden, da der Kalk in diesem Fall gleichzeitig das Bindemittel und Pigment (weiß) darstellt.

Die Zusammensetzung, Menge und Qualität des Bindemittels bestimmen sowohl die optische Erscheinung als auch die physikalischen Eigenschaften des Anstriches.

Die Einteilung der Bindemittel erfolgt zumeist in anorganische und organische⁹³ und diese wiederum in natürliche und synthetische Produkte.

Weiters kann nach der Art der Trocknung unterteilt werden (physikalisch – durch Verdunstung des Löse- bzw. Verdünnungsmittels ohne chemische Veränderung z.B. Pflanzengummi; chemisch – durch chemische irreversible Reaktionen wie z.B. Oxydation, Polymerisation;⁹⁴ thermoplastisch – durch Abkühlungsprozesse des im schmelzflüssigen Zustand aufgebrachten Bindemittels z.B. Wachse), der Herkunft (pflanzlich, tierisch, mineralisch, synthetisch, halbsynthetisch), der Reaktivität (nicht reaktiv – reaktiv), der Molekulargröße (niedrig-molekular, höher- oder hochmolekular) oder der Funktion etc. unterteilt werden.⁹⁵

Zur detaillierten Gliederung der Anstriche nach organischen/anorganischen Bindemittel vgl. Kap. 2.3.2.

Füllstoffe

Lt. EN ISO 4618 (2006) handelt es sich bei Füllstoffen um ein „*Material in körniger oder in Pulverform, das in der flüssigen Phase eines Beschichtungstoffes unlöslich ist und verwendet wird, um bestimmte physikalische Eigenschaften zu erreichen oder zu beeinflussen*“ (S.23)

Füllstoffe sind meist mineralische Verbindungen, die vorrangig die Eigenschaften der Beschichtung verbessern sollen, wie z.B. die Vermeidung von Trocknungsrissen. Dies begründet sich damit, dass Füllstoffe inerte Materialien sind, welche beim Austrocknen nicht schwinden und somit das Schwindmaß des gesamten Anstriches reduzieren.⁹⁶

Als Füllstoffe werden Gesteins- und Ziegelmehle verwendet, weshalb auch mineralische Pigmente als Füllstoffe dienen können.

⁹⁰ vgl. z.B. Rusam (2004), S.14 / Kittel (1998), S.134 / Schramm/Hering (1988), S.12

⁹¹ vgl. Schmitt (Hg.) (1937ff) / Schramm/Hering (1988), S.80

⁹² EN ISO 4618 (2006), S.9

⁹³ teilweise auch Mischformen organisch/anorganisch

⁹⁴ Der größte Teil der Trocknungsprozesse erfolgt sowohl physikalisch (erste Trocknungsphase) und chemisch (zweite Trocknungsphase nach Verdampfen des Lösungsmittels) z.B. Eidotter (vgl. Schramm/Hering (1988), S.81)

⁹⁵ vgl. Rusam (2004), S.16f / Schramm/Hering (1988), S.81 / Kittel (1998), S.137

⁹⁶ vgl. Torraca (1996)

Farbmittel (Pigmente, Farbstoffe)

Durch Farbmittel kann die Farbe einer Beschichtung verändert werden.

Farbstoffe sind im Malmittel lösliche Farbmittel, wie z.B. Extrakte aus Rot- und Gelbhölzern oder Krapwurzeln, während es sich bei Pigmenten um körperhafte, (im Anwendungsmedium unlösliche), Farbmittel handelt.⁹⁷

Man unterscheidet, wie bei den Bindemitteln, zwischen organischen und anorganischen Pigmenten und hier ebenfalls jeweils zwischen natürlichen und synthetischen.⁹⁸

Natürliche anorganische Pigmente, wie Oxidschwarz, Ocker, Grüne Erde, Lapislazuli etc., werden aus Mineralien, Steinen oder Erde gewonnen. Natürliche organische Pigmente, wie z.B. Indischgelb oder Indigo, sind pflanzlichen oder tierischen Ursprungs. Viele dieser Pigmente werden heute jedoch auch synthetisch hergestellt. So findet man heute künstlich hergestelltes Ultramarin ebenso wie synthetisches Indigo.

Für Kalkbeschichtungen können nur kalkechte Pigmente verwendet werden, d.h. vorwiegend anorganischen Pigmente⁹⁹ sowie organische alkalibeständige Pigmente.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Lichtechtheit von Pigmenten. Viele Pigmente, wie z.B. organische Pigmente aus Erdöl, haben zwar eine höhere Farbstärke, jedoch ist die UV-Beständigkeit geringer als bei vielen anorganischen Pigmenten. Aus diesem Grund können solche Pigmente nur dann verwendet werden, wenn diese durch das umgebende Anstrichmedium (z.B. Dispersionsfarben, Lacke, ...) vor Licht geschützt werden.¹⁰⁰

Lösungs- und Verdünnungsmittel

Bei einem Verdünnungsmittel handelt es sich um eine „*Flüssigkeit aus einer oder mehreren Komponenten, die sich unter Verarbeitungsbedingungen verflüchtigt und einem Beschichtungsstoff zugegeben wird, um die Viskosität zu verringern oder andere Eigenschaften zu beeinflussen.*“ (EN ISO 4618 (2006), S.47). Das Lösungsmittel¹⁰¹ hingegen ist eine „*Flüssigkeit aus einer oder mehreren Komponenten, die das Bindemittel im jeweiligen Beschichtungsstoff löst und sich unter Trocknungs-/Härtungsbedingungen verflüchtigt*“ (EN ISO (2006), S.44). Während also das Lösungsmittel dazu dient das Bindemittel zu lösen und sich im Zuge der Trocknung wieder zu verflüchtigen, wird mit Hilfe des Verdünnungsmittels vorwiegend die Konsistenz des Anstriches verändert. Lösungs- und Verdünnungsmittel können dabei natürlich die gleiche chemische Zusammensetzung aufweisen, wobei hauptsächlich entweder Wasser oder Benzine, Alkohole, Nitroverdünnungen, o.ä. zur Anwendung kommen.

Für Kalkanstriche wird prinzipiell nur Wasser als Lösungs- und Verdünnungsmittel verwendet. Alle anderen in dieser Arbeit untersuchten Beschichtungssysteme wie Kunststoffdispersions- und Silikatfarben sind ebenfalls wasserverdünnbar.

Additive

Bei Additiven handelt es sich um eine „*Substanz, die einem Beschichtungsstoff in kleinen Mengen zugesetzt wird, um eine oder mehrere Eigenschaft(en) zu verbessern oder anders zu modifizieren*“ (EN ISO 4618 (2006), S.5). „*Sie sind im Allgemeinen am Aufbau des Filmes beziehungsweise der Schicht nicht entscheidend beteiligt.*“ (Kittel (1998), S.142)

Es gibt eine Vielzahl an Additiven, die den Beschichtungen mit der Absicht zur Verbesserung der Eigenschaften beigemischt werden können. Eine Unterscheidung in organisch und anorganisch sowie synthetisch und natürlich ist nur schwer möglich, da es sich oftmals um Mischformen handelt.

⁹⁷ vgl. Schramm/Hering (1988), S.13f / EN ISO 4816 (2006), S.15

⁹⁸ Farbstoffe sind immer anorganisch (vgl. Kittel (1998), S.144)

⁹⁹ Wobei nicht alle anorganischen Pigmente alkalibeständig sind!

¹⁰⁰ vgl. Kittel (1974), S.23

¹⁰¹ lt. Norm EN ISO 4618: Lösemittel. Der Begriff Lösungsmittel ist aber ebenso gebräuchlich und wird in dieser Arbeit dem Begriff Lösemittel vorgezogen.

Besser scheint die Unterteilung in der Wirkungsweise der jeweiligen Additive:¹⁰²

1. Bindemittel in reduzierter Zugabemenge, vorwiegend zur Erhöhung der Bindekraft
2. Bindemittel-reaktive Stoffe (können auch in höheren Mengen zugegeben werden)
 - puzzolanische Feststoffe (Ziegelmehle, Trassmehle, Asche, Lava, ...)
 - Kieselsole, Kalksole, Gipssole¹⁰³
3. Sonstige Zusatzmittel und Hilfsstoffe unterteilt nach Ihrer Wirkungsweise:
 - Verarbeitungshilfsstoffe (z.B. Verlaufmittel, Dispergiermittel, Konservierungsmittel,)
 - Hilfsstoffe zur Veränderung der Eigenschaften des Endprodukts (Hydrophobierungsmittel, Erhöhung des Abriebwiderstandes, Porenbildner, ...)

Die moderne Farben- und Lackindustrie bietet eine breite Palette an Additiven, wie Trockenstoffe, Verlaufmittel, Antischaummittel, Netzmittel, Konservierungsmittel etc. an, die in den meisten Anstrichprodukten als Modifikationen bereits enthalten sind und nicht erst nachträglich zugemischt werden müssen. Eine genaue Kenntnis und Auswirkung dieser Zusätze, auch im Hinblick auf gegenseitige Beeinflussungen der einzelnen Additive, ist damit aber oftmals nicht mehr möglich.

Additive für Kalkanstriche

Historische Kalkanstriche wurden mit einer Vielzahl von vorwiegend natürlichen Additiven aufbereitet um die Eigenschaften entsprechend zu verändern. Eine wichtige Rolle nahmen dabei, zumindest soweit dies aus historischen Rezepturen zu entnehmen ist, Proteine wie beispielsweise Milch, Topfen, Blut, etc., als auch unterschiedliche Harze und Öle ein. Aber auch anorganische Zusätze wie beispielsweise Steinmehle und –sande sowie hydraulische Stoffe, wie Ziegelmehl und Portlandzement, wurden dem Kalk zur Verbesserung seiner Eigenschaften als Anstrichmittel beigemischt.

Vor diesem Hintergrund, werden auch heutigen Sumpfkalkprodukten Additive beigefügt. Allerdings handelt es sich dabei häufig um moderne, anorganische Zusatzstoffe wie beispielsweise Kunstharzdispersionen. Es befindet sich derzeit eine Vielzahl modifizierter Kalkfarben am Markt, welche bereits fertig gemischt zum Kunden auf die Baustelle geliefert werden. Eine genaue Kenntnis der Zusammensetzung ist damit oftmals nicht mehr möglich, da lt. EN 459-1 (2010) Zusatzmittel unter einem Anteil von 0,1% nicht deklariert werden müssen. Diese Deklaration ist bei Kalkanstrichen kritisch zu hinterfragen, da bereits geringe Anteile an Additiven die Eigenschaften des Anstriches signifikant verändern können (vgl. dazu auch vorhandene Forschungsergebnisse Kap. 3 sowie Laborergebnisse Kap. 5).

¹⁰² Vorläufige Deklaration lt. Arbeitspapier Gruppe „Schlämmen 2“ (Beseler, Nimmrichter, Rohatsch, Trauninger, Weber), nicht veröffentlichter Vorabzug!

¹⁰³ Sole (=Kolloid) = fein verteiltes Teilchen in einem Dispersionsmedium. Größe zwischen 1nm und 1µm (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kolloid> [23.11.2011])

2.3.2 Gliederung der Anstriche nach Bindemittel

Anstriche werden meist nach ihren Bindemitteln unterteilt, wobei hier entweder eine Einteilung in die unterschiedlichen Bindemitteltypen (z.B. gelöschter Kalk, Öl, Zement, Wasserglas, Silikonharz, etc.) oder oftmals auch auf Basis des Lösungs- oder Dispergierungszustandes des Bindemittels erfolgt (wasser- oder lösemittelverdünnt).¹⁰⁴ Weiters können Anstriche nach ihrer Verarbeitung, Lage im Beschichtungssystem (z.B. Grundbeschichtung, Deckbeschichtung, ...), ihrem Anwendungsbereich oder besonderen Eigenschaften (z.B. Imprägniermittel, Brandschutzbeschichtungsstoff, etc.) unterteilt werden.¹⁰⁵

In vorliegender Arbeit erfolgt eine Unterteilung nach dem Bindemitteltyp in anorganische und organische Bindemittel.

Anstriche auf Basis anorganischer Bindemittel

Prinzipiell beschäftigt sich die Anorganik in der Chemie mit allen Elementen und Verbindungen, die keine Kohlestoffverbindungen (mit Ausnahme der einfachen Kohlenstoffverbindungen – s. Anstriche auf Basis organischer Bindemittel) enthalten.

Anorganische Bindemittel kommen vorwiegend aus der Natur. Sie erhärten entweder durch die Kohlendioxidaufnahme aus der Luft oder durch die Verbindung mit Wasser.

Die wichtigsten anorganischen Bindemittel für Anstriche sind:

- Kalk
- Gips
- hydraulische Bindemittel (z.B. Zement, Romanzement, natürlicher hydraulischer Kalk)
- Bindemittel auf Kieselsäure-Basis (z.B. Wasserglas)¹⁰⁶

Anstriche auf Basis organischer Bindemittel

Im Gegensatz zur Anorganik beschäftigt sich die organische Chemie mit Verbindungen, die Kohlenstoffverbindungen enthalten.¹⁰⁷

Früher waren die meisten organischen Bindemittel natürlichen Ursprungs und wurden aus pflanzlichen und tierischen Produkten gewonnen. In modernen Anstrichsystemen werden jedoch zunehmend synthetische Materialien, wie z.B. Kunstharze¹⁰⁸, als Ersatz für die früher eingesetzten Naturstoffe verwendet.

Die wichtigsten organischen Bindemittel für Anstriche sind:¹⁰⁹

- Öle (z.B. Leinöl, Mohnöl, Leinölfirnis, ...)
- Harze (Naturharze wie z.B. Mastix, Dammar, Bernstein, Terpentinbalsam, Schellack, synthetisch hergestellte Kunst- und Silikonharze)
- Wachse (z.B. Bienenwachs, Carnaubawachs, ...)
- Proteine (z.B. tierische Leime, Kaseine, Ei, ...)
- Kohlenhydrate – pflanzliche Leime (z.B. Gummi arabicum, Kautschuk, Latex, Stärken, Dextrine,...)

¹⁰⁴ vgl. EN 1062-1 (2004), S.5

¹⁰⁵ vgl. EN ISO 4618 (2006), S.5

¹⁰⁶ vgl. Kittel (1998), S.293-299

¹⁰⁷ „Die Chemie des Kohlenstoffes und seiner einfach gebauten Verbindungen wie CO, CO₂, ... werden zur anorganischen Chemie gerechnet.“ (Kittel (1998), S.82)

¹⁰⁸ dabei kommen vorwiegend Acrylharzdispersionen zum Einsatz

¹⁰⁹ vgl. Kühn (1984), S.46–50 / Schramm/Hering (1988), S.82 / Schmitt (Hg.) (1937ff)

Ausgewählte Anstrichsysteme

Von der Industrie wird eine äußerst breite Palette an Anstrichsystemen angeboten. Angefangen von rein organischen Dispersions- und Silikonharzfarben, über Dispersions-Silikatfarben mit unterschiedlichen Dispersionsgehalten, bis hin zu rein mineralischen Silikatfarben sowie neuentwickelten Anstrichsystemen, wie z.B. Beschichtungen auf Basis der Nanotechnologie, gibt es eine Vielzahl an Produkten die am Markt angeboten werden.

Nachfolgend werden, die für Fassadenanstriche am häufigsten verwendeten, Produkte kurz beschrieben und ihre Wirkungsweise erläutert. Folgende Systeme werden dabei betrachtet:

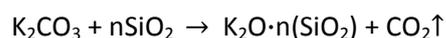
- Silikatanstriche
- Dispersions-Silikatanstriche
- Dispersionsanstriche
- Silikonharzanstriche
- Ölanstriche
- Kalkanstriche

Silikatanstriche

Bei Silikatanstrichen handelt es sich um Beschichtungen auf Basis des Bindemittels Wasserglas, eine sirupartige Lösung von Natron- oder Kalisilikaten in Wasser.¹¹⁰

Wasserglas wurde durch den Chemiker und Mineralogen Johann Nepumuk von Fuchs (177-1856) erfunden. Eine erste Verwendung als Bindemittel in der Malerei gab es bereits durch den Maler Joseph Schlotthauer (1789-1869)¹¹¹. Im Zuge eines Forschungsauftrages von König Ludwig I. wurden Wasserglasfarben dann durch A.W. Keim optimiert und schließlich 1878 patentiert (Keimsche Mineralfarben).¹¹²

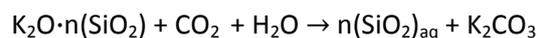
Die Herstellung von Kaliwasserglas erfolgt durch Schmelzen von Quarzsand und Pottasche (Kaliumcarbonat) bei ca. 1400°C.¹¹³



Das Prinzip der Aushärtung von Wasserglasfarben beruht auf drei Mechanismen¹¹⁴:

1. Der Trocknung durch Verdunstung von Wasser.
2. Der Aufnahme von CO₂ aus der Luft
3. Einer chemischen Reaktion des Anstriches mit dem Untergrund.¹¹⁵

Durch die Aufnahme von CO₂ aus der Luft und Verdunstung von Wasser entsteht ein wasserbeständiges Kieselsäuregerüst und als Nebenprodukt Kaliumkarbonat (Pottasche).



¹¹⁰ vgl. Schmitt (Hg.) (1937ff)

¹¹¹ vgl. Mein Bayern. URL: <http://mein-bayern.lexikus.de/mb/land-und-leute/40-joseph-schlotthauer> [01.05.212]

¹¹² vgl. KEIMFARBEN GmbH & CO.KG (Hg.) (2010)

¹¹³ vgl. Rusam (2004), S.18 / Schmitt (Hg.) (1937ff)

¹¹⁴ Kittel (1998), S.293

¹¹⁵ Wasserglasbasierende Systeme können sowohl mit kalkhaltigen als auch silikatischen Untergründen in Reaktion gehen, z.B. $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{K}_2\text{O} \cdot n(\text{SiO}_2) \rightarrow \text{CaSiO}_2 + (n-1)\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{CO}_3$. (vgl. Kittel (1998), S.294)

Pottasche selbst kann kein Kristallwasser binden und zählt deshalb nicht zu den besonders gefährlichen bauschädlichen Salzen.¹¹⁶ In Verbindung mit Erdalkalien kann Kaliumkarbonat jedoch zu Kaliumnitraten, -chloriden und -sulfaten umgewandelt werden, welche eine große Mengen an Kristallwasser binden, und somit als bauschädliche Salze eingestuft werden müssen.

Neben der möglichen Entstehung von bauschädlichen Salzen sind Silikatanstriche, aufgrund der Verbindung dem mineralischem Untergrund, kaum bis gar nicht abtragbar. Zwar wird diese immense Dauerhaftigkeit von den Herstellern als äußerst hochwertige Eigenschaft angepriesen, doch muss in diesem Zusammenhang auch die geforderte Reversibilität in der Denkmalpflege gesehen werden.

Dispersions-Silikatanstriche

Dispersions-Silikatanstriche enthalten zusätzliche geringe Anteile an organischen Bindemitteln wie Kuntstoffdispersionen, wobei der Anteil dieser Zusätze in der Regel 5 M-% nicht überschreiten darf (vgl. beispielsweise DIN 18363 (2010)). Durch die Beimengung solcher organischen Anteile soll vorrangig der Feuchtigkeitsschutz von Silikatanstrichen verbessert werden.

Dispersionsanstriche

Eine Dispersion ist ein Gemisch aus 2 Stoffen wo ein Stoff in der dispergierten Phase fein verteilt in einem anderen Stoff (dem Dispersionsmittel bzw. der kontinuierlichen Phase) vorliegt. Bei Dispersionsanstrichen liegt also das Bindemittel fein verteilt im Lösungsmittel (Wasser) vor.

Die Trocknung erfolgt einerseits durch Verdunstung von Wasser und andererseits durch Zusammenfließen bzw. Verkleben der Bindemittelteilchen (Harz, Gummi, ...).¹¹⁷

Früher wurden Dispersionsanstriche auch als Latexfarbe bezeichnet, da die Dispersion in diesem Fall mit Hilfe des Bindemittels Latex hergestellt wurde.

Heutige Dispersionsanstriche werden meist auf Basis von Kunststoffen hergestellt, weshalb Sie auch als Kunststoffdispersionsanstriche bezeichnet werden.

Da die Bindemittel thermoplastisch sind und deshalb bei Sonneneinwirkung weich werden, kann es passieren, dass die Beschichtung mit der Zeit Ihr optisches Erscheinungsbild verändert (z.B. Farbgebung).

Dispersionsanstriche haften nicht aufgrund einer chemischen Verbindung am Untergrund sondern lediglich durch Adhäsion¹¹⁸ und können entweder mit mechanischen Verfahren wie z.B. Sandstrahlen oder mit Lösungsmittel oder heißem Dampf wieder vom Untergrund abgetragen werden.

Silikonharzanstriche

Bei Silikonharzanstrichen, oftmals auch Silikonharzemulsionsfarben genannt, ist das Bindemittel Silikonharz, ein synthetisches Harz, bei dem die Grundstruktur aus Siloxan (Silicium-Sauerstoff-Silicium-Bindungen) besteht.¹¹⁹

Oft wird durch die Zugabe von einigen Prozenten Dispersionsharz die Bindung und Abriebfestigkeit etwas verbessert. Das Verhältnis der Kunststoffdispersion zur Silikonharzemulsion bestimmt jedoch auch die hygrischen Eigenschaften der Beschichtung. Je höher die Silikonharzanteile werden, desto höher wird der Wasseraufnahmekoeffizient bei gleichzeitiger Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit. Ebenso übt die Pigment-Volumen-Konzentration¹²⁰ einen wichtigen Einfluss auf die hygrischen Eigenschaften der Silikonharzbeschichtung aus. Je höher der Bindemittelanteil im Verhältnis zu den Feststoffkomponenten wird, desto kleiner ist die Wasserdampfdurchlässigkeit bei gleichzeitiger Reduktion des Wasseraufnahmeverhaltens.¹²¹

Silikonharzbeschichtungen werden sowohl im modernen Hochbau (z.B. als Dünnschichtputze sowie Anstrichschichten bei Wärmedämmverbundsystemen), als auch in der Denkmalpflege eingesetzt.

¹¹⁶ vgl. Paschinger (1980)

¹¹⁷ vgl. Rusam (2004), S.19

¹¹⁸ vgl. Rusam (2004), S.48

¹¹⁹ vgl. EN ISO 4618 (2006)

¹²⁰ das Pigment-Volumen-Verhältnis (PVK) gibt das Verhältnis Pigmentvolumen + Füllstoffvolumen zum Pigmentvolumen + Füllstoffvolumen + Bindemittelvolumen an.

¹²¹ vgl. Goretzki

Ölanstriche

Bei den nachfolgend beschriebenen Ölanstrichen handelt es sich vorwiegend um historische Rezepturen, da heute kaum mehr reine Ölanstriche zur Anwendung kommen.

Zur Herstellung von Ölanstrichen wurde hauptsächlich Leinöl verwendet, da es im Vergleich mit anderen Ölen relativ rasch trocknet.¹²² Leinöl neigt jedoch zum Vergilben und Verbräunen, weshalb andere Öle wie beispielsweise Mohnöl, Sonnenblumenöl, Walnusskernöl und Sojaöle ebenfalls angewendet wurden.¹²³

Um die langsame Trockengeschwindigkeit reiner Öle zu beschleunigen,¹²⁴ wurden dem Öl Schwermetalloxide wie beispielsweise Kobalt als Trocknungsbeschleuniger (Sikkative) beigelegt. Pigmente mit Schwermetallen, wie beispielsweise Bleiweiß, haben ebenfalls eine sikkative Wirkung.

Ölanstriche haben zwar den Vorteil dass sie wasserabweisende Eigenschaften aufweisen, jedoch auch nahezu keine Austrocknung und Wasserdampfdiffusion zulassen. Dieses Problem wird extrem kritisch, wenn sich Risse in der Ölbeschichtung bilden. Durch diese Fehlstellen kann das Wasser konzentriert eindringen, aber durch die dichte Beschichtung kaum mehr austrocknen, wodurch sich zwangsläufig eine Wasserakkumulation im Baustoff ergibt.

Kalkanstriche

Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts war Kalk eines der wichtigsten Anstrichsysteme für Außenanstriche.¹²⁵ Für Kalkanstriche bzw. Kalkschlämme wurde vorwiegend Sumpfkalk verwendet. Bei alten Freskomalereien war es üblich, nur solche Sumpfkalke zu verwenden welche ca. 10 Jahre eingelagert waren.¹²⁶ Lt. Cowper (1998) empfahl Plinius der Jüngere (ca. 61-112 n.Chr.) allen Handwerkern die Verwendung eines zumindest 3 Jahre eingelagerten Sumpfkalkes.¹²⁷

Heute werden reine¹²⁸ Kalkanstriche nur mehr selten für Restaurierungsarbeiten im Außenbereich verwendet und zunehmend von Silikon- und Silikatanstrichen verdrängt.

Im Vergleich mit modernen Beschichtungssystemen ist der Kalkanstrich jedoch relativ einfach restaurierbar bzw. bis zu einem bestimmten Grad auch reversibel und schon alleine aus diesem Grund sollte man Kalkanstriche bei jeder Restaurierungsmaßnahme zumindest in Betracht ziehen.

¹²² vgl. Brandes (1995), S.9

¹²³ vgl. Wehlte (1981), S.233 / Rusam (2004), S.21

¹²⁴ Öle trocknen durch Oxidation an der Luft

¹²⁵ vgl. Paschinger (1980)

¹²⁶ vgl. Wehlte (1981), S.279

¹²⁷ vgl. Cowper (1998)

¹²⁸ d.h. ohne synthetische Zusätze oder Hydrophobierungen

2.3.3 Parameter zur Beschreibung der Wirksamkeit eines Anstriches

Prinzipiell stellt die Gesteinsverwitterung einen natürlichen Prozess dar, der zwar unaufhaltbar ist, jedoch durch geeignete Schutzmaßnahmen verzögert werden kann.

An dieser Stelle soll Artikel 3 der Charta von Venedig zitiert werden: *„Ziel der Konservierung und Restaurierung von Denkmälern ist ebenso die Erhaltung des Kunstwerkes wie die Bewahrung des geschichtlichen Zeugnisses“*.¹²⁹

Bei jeglichen denkmalpflegerischen Maßnahmen muss somit primär der Schutz des Denkmals im Vordergrund stehen, um somit das Kulturerbe auch für die nachfolgenden Generationen so gut als möglich zu erhalten.

Eine gute Beschichtung soll also den Untergrund und somit auch das Denkmal vor Verwitterungseinwirkungen schützen. In diesem Zusammenhang wird in der Denkmalpflege oftmals von Opferschichten gesprochen. Dabei handelt es sich um Anstriche, die jegliche Zerstörungsursachen wie Salze, Feuchtigkeit etc. puffern bzw. die Verdunstungszone nach außen verlegen, um dadurch die Verwitterungseinwirkungen vom eigentlichen Denkmal abzuhalten.¹³⁰ Handelt es sich beispielsweise um ein salzbelastetes Mauerwerk, so muss sichergestellt werden, dass die Salze in oder außerhalb der Beschichtung auskristallisieren können.¹³¹

In Folge dessen werden Opferschichten nach einigen Jahren zerstört, sie „opfern“ sich somit dem darunter liegendem Substrat.

Weitläufig wird jedoch davon ausgegangen, dass ein verwitterungsresistenter Anstrich automatisch zu einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Fassade bzw. der Skulptur führt. Der Ästhetik und Dauerhaftigkeit der Beschichtung wird oberste Bedeutung beigemessen, ohne die Aus- und Wechselwirkungen mit dem Beschichtungsträger (Putz, Stein, etc.) zu berücksichtigen. Häufig auch ohne entsprechende naturwissenschaftliche und/oder technologische Untersuchungen und Bewertungen der dabei erhaltenen Ergebnisse.

Vierorts hat sich jedoch gezeigt, dass die (meist sehr dichten) Anstriche oftmals keine Verwitterungsspuren zeigen, während die darunterliegende Steinsubstanz bereits starke Zerstörungen aufweist. Solcherlei Anstriche wirken gleichermaßen zerstörend wie eine dichte Gipskruste an der Gesteinsoberfläche.

Auch in vielen Forschungsansätzen wird davon ausgegangen, dass die Schutzfunktion von Anstrichen auf Basis ihrer feuchtetechnischen Kennwerte¹³² und vor allem auf Basis ihrer Dauerhaftigkeit charakterisiert werden können (vgl. beispielsweise Herm (1997), Brandes (1995), Ghaffari (2005), ...) ¹³³. In vielen dieser Forschungsarbeiten wird die Kalkbeschichtung aufgrund des hohen Zerstörungsgrades der Beschichtung selbst damit aber oftmals ausgeschlossen. Was in den meisten Arbeiten fehlt, ist die Beurteilung des Zustandes des Untergrundes.¹³⁴

¹²⁹ International Council on Monuments and Sites (1989)

¹³⁰ Lt. Koller et al. (2000) handelt es sich bei Opferschichten um „...reversible und periodisch wiederholbare Überzüge, die im Laufe ihrer eigenen Abwitterung die darunter liegende Stein- oder Mörtelsubstanz schützen.“

¹³¹ Eine dichte Beschichtung, welche ein Auskristallisieren der Salze nicht zulässt, würde dazu führen, dass die Salze unterhalb der Beschichtung also im Gesteinssubstrat auskristallisieren.

¹³² oftmals ohne Berücksichtigung der Wechselwirkung Substrat - Anstrich

¹³³ weitere Forschungsarbeiten vgl. Kap. 3

¹³⁴ ansatzweise nur durch Brandes (1995) und Blöchl-Wirts (2001), wo die Salzbelastung im Substrat nach Bewitterung untersucht wurde.

Die Ergebnisse einer vorangehenden Forschungsarbeit¹³⁵ zeigen nach Verwitterungssimulationen ebenfalls eine starke Zerstörung der Kalkbeschichtung, sie zeigen jedoch auch, dass die Gesteinssubstanz, welche mit dem Kalkanstrich beschichtet wurde, im Gegensatz zu Substraten mit anderen Anstrichsystemen, keine Zerstörung aufweist.



Abbildung 2-8: visuelle Zustandsbeurteilung des Gesteinsgefüges nach Verwitterungssimulationen. Li: Sumpfkalkbeschichtung – keine Zerstörung der Gesteinssubstanz nach Verwitterungssimulationen, Mitte: Silikonharzbeschichtung – große Zerstörung vor allem der oberen Gesteinsschichte nach Salzkristallisationsuntersuchungen, Re: Beschichtung auf Basis Nanotechnologie – Sprengung des Gesteinsgefüges nach Frost-Tauwechselfersuchen¹³⁵

Auf Basis dieser Ergebnisse zeigt sich, dass die Kalkbeschichtung das Substrat respektive das Gesteinsgefüge sehr gut vor Verwitterungseinflüssen schützt, indem diese selbst als Opferschicht wirkt. Die Kalkbeschichtung genügt somit vollkommen den Ansprüchen des Steinschutzes, allerdings konnte anhand der Versuche auch die äußerst kurze Dauerhaftigkeit dieses Beschichtungssystems aufgezeigt werden.

Durch das rasche Ablösen der Beschichtung war die Gesteinssubstanz bereits nach kurzer Zeit den Verwitterungseinflüssen ungeschützt ausgesetzt.¹³⁶

Auch eine regelmäßige Pflege und Wartung würde den wirtschaftlichen Aufwand aufgrund der schnellen Verwitterung der Beschichtung sprengen.¹³⁷

Da uns jedoch sehr viele Kalkbeschichtungen über Jahrhunderte hinweg erhalten geblieben sind, stellt sich die Frage wie diese Anstriche aufgetragen, konditioniert und mit Additiven modifiziert wurden um entsprechend lange Zeitperioden überdauern zu können.

So schrieb bereits Eibner (1995): „Zieht man erhaltene Reste von Wandmalerei in Kalktechnik aus dem Altertum zum Vergleich heran so wird man auch heute noch über diese Technik als Fassadenverfahren nicht deshalb allein den Stab brechen wollen, weil sie sich in Fabrikstätten und besonders in der Nähe von Bahnhöfen am schlechtesten bewährte. Doch wird man sie für verbesserungsfähig halten und danach trachten, entsprechend auszugestalten. Hierzu ist das Studium der antiken Verfahren unerlässlich.“

Zur Beschreibung der Wirksamkeit einer Beschichtung bzw. einer Opferschicht müssen somit sowohl die Dauerhaftigkeit des Gesteinssubstrates als auch die Dauerhaftigkeit der Beschichtung beurteilt werden.

¹³⁵ Trauninger (2007)

¹³⁶ Die unbeschichteten Vergleichsproben zeigten zwar eine wesentlich höhere Zerstörung als die kalkbeschichteten Proben, jedoch waren sogar bei der unbeschichteten Probe geringere Zerstörungsmuster als bei Substraten mit anderen Anstrichsystemen erkennbar.

¹³⁷ eine regelmäßige Instandhaltung ist zwar realisierbar und auch erwünscht, die Restaurierungsintervalle sollten jedoch in einem „angemessenen“ Zeitabstand durchführbar sein.

Die Parameter welche für diesen Zweck untersucht werden müssen sind vielfältig. Das Verhalten bei Wassereinwirkung, Salzbelastung und thermischer Beanspruchung, Festigkeitsparameter, Elastizitätskennwerte und Kristallstruktur sind nur einige wenige Beispiele, die den immensen Umfang möglicher Beurteilungsparameter verdeutlichen sollen.

Im Hinblick auf die Verwitterungsbeständigkeit der Gesteinssubstanz und somit auf die Dauerhaftigkeit des Untergrundes, ist den hygrischen Eigenschaften und Einwirkungen eine größere Bedeutung als den thermischen Aspekten beizumessen. Wie in den vorangegangenen Kapiteln eingehend erläutert, gehen sowohl die physikalischen und chemischen, als auch die biologischen Mechanismen der Gesteinsverwitterung zumeist auf das Vorhandensein von Wasser zurück.

Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit einer Beschichtung spielen neben der Verwitterungsbeständigkeit des Anstriches selbst, sicher auch die Haftfestigkeit und der Abriebwiderstand eine große Rolle. In diesem Zusammenhang muss bei Kalkbeschichtungen auch die Karbonatisierung betrachtet werden, da die Kalkbeschichtung nur bei entsprechend guter Abbindung eine optimale Funktionsfähigkeit aufweisen kann.

Auf Basis dieser Überlegungen wurden in dieser Arbeit folgende Parameter zur Beurteilung der Wirksamkeit einer Beschichtung definiert:

1. Parameter zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit (bzw. Verwitterungsbeständigkeit) des Untergrundes
 - Hygrische Parameter des Anstriches wie Wasseraufnahme, Wasserabgabe, Wasserdampfdiffusion sowie die Zusammenhänge dieser feuchtetechnischen Parameter zur Abschätzung der möglichen Wasserakkumulation in der Gesteinssubstanz
 - Parameter zur Beurteilung der Gesteinssubstanz nach Verwitterungseinwirkungen
2. Parameter zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Beschichtung wie
 - Abriebwiderstand bzw. Haftfestigkeit
 - Schädigung der Beschichtung nach Bewitterung (Beurteilung von Rissbildungen, Abplatzungen, etc.)

Den Beurteilungsparametern aus Punkt 1 ist dabei oberste Priorität beizumessen. Die Dauerhaftigkeit des Untergrundes und damit die Überlieferung des Denkmals in seiner vollen Authentizität müssen immer im Vordergrund stehen.

Erst an zweiter Stelle dürfen die Dauerhaftigkeit und die ästhetischen Komponenten des Anstriches betrachtet werden, wobei der Begriff Ästhetik an sich schon relativ ist.

Anstriche welche nur dem Punkt 2 genügen müssen als Anstrichsysteme in der seriösen Denkmalpflege jedenfalls ausgeschlossen werden.

Parameter zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Untergrundes

Hygrische Parameter des Anstriches zur Abschätzung möglicher Wasserakkumulation im Substrat

Wie bereits in Kap. 2.2.2 beschrieben, ist das feuchtetechnische Verhalten eines Baustoffes durch ein äußerst komplexes Zusammenwirken unterschiedlicher Feuchtespeicher- und transportmechanismen gekennzeichnet.

Zur Definition und Beschreibung dieser hygrischen Mechanismen können folgende Parameter betrachtet bzw. anhand von Laboruntersuchungen gemessen werden:

- Wasseraufnahme
- Austrocknungsgeschwindigkeit
- Wasserdampfdiffusionswiderstand
- Zusammenhang der 3 oben genannten Parameter

1. Wasseraufnahme, Wasserdurchlässigkeit

Die Wasseraufnahme bzw. Wasserdurchlässigkeit wird durch den sogenannten w-Wert (Wasseraufnahmekoeffizient) beschrieben. Anhand dieses Kennwertes wird der flächenbezogene zeitliche Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme beschrieben.

Lt. EN 1062-1 (2004) wird die Wasserdurchlässigkeitsrate w in folgende Klassen unterteilt:

Klasse		Anforderung
W ₀		keine Anforderung
W ₁	hohe Durchlässigkeit	$w > 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$
W ₂	mittlere Durchlässigkeit	$w > 0,1 \text{ und } \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$
W ₃	niedrige Durchlässigkeit	$w \leq 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$

Tabelle 2-1: Klassenzuordnung der Wasserdurchlässigkeitsrate

Diesem Wert wird in der Praxis immense Bedeutung beigemessen. Als Beispiel kann hier eine exakte Anforderung an die Klassenzuordnung im Zuge von Hochbauausschreibungen genannt werden. Eine derartige Einteilung ist jedoch vor allem im Bezug auf sehr poröse Anstriche wie der Kalkbeschichtungen problematisch, da im Prinzip die meisten Kalkanstriche einen w-Wert $> 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$ aufweisen. Damit verfügen sie gemäß dieser Einteilung über eine sehr hohe Wasserdurchlässigkeit und gelten infolge dessen im Sinne der meisten Produkthersteller bzw. ausschreibenden Stellen als ungeeignet.¹³⁸

Zudem wird der w-wert gemäß Norm nach einer 24 stündigen Wasserlagerung bestimmt, womit die Durchlässigkeitsrate bei einer kurzzeitigen Wassereinwirkung (wie es z.B. bei einer kurzen, intensiven Regenbelastung der Fall ist) gänzlich unberücksichtigt bleibt. Im Zuge von Untersuchungen¹³⁹ konnte jedoch festgestellt werden, dass mit Kalk beschichtete Probekörper bei kurzzeitigen Wassereinwirkungen über eine wesentlich geringere Wasseraufnahme als unbeschichtete Vergleichsproben verfügen.¹⁴⁰

Aus diesen Gründen erfolgen die nachfolgenden Laboruntersuchungen zwar in Anlehnung an die EN 1062-3 (2008), jedoch werden vor allem im Bezug auf die Aus- und Bewertung abweichende Ansätze getroffen.

¹³⁸ auch Dreyer geht beispielsweise davon aus, dass eine Beschichtung mit einem w-Wert $> 0,5 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$ nicht fassadentauglich ist (Dreyer (2004), S.36)

¹³⁹ vgl. Trauninger (2007): Laboruntersuchungen des Wassereindringverhaltens mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen

¹⁴⁰ vgl. Trauninger (2007), S.91f

2. Wasserdampfdiffusionswiderstand

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand gibt an wie stark ein Baustoff die Diffusion von Wasserdampf verhindert. Je niedriger der Wasserdampfdiffusionswiderstand ist, desto leichter kann Wasser in der dampfförmigen Phase durch den Baustoff durchdringen.

Mathematisch wird dieser Wert durch die sogenannte Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ -Wert) bzw. der Wasserdampfdiffusionsstromdichte (V) ausgedrückt. Letztere beschreibt die Wasserdampfmasse, die innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne durch einen Probekörper mit einer vorgegebenen Oberfläche unter festgelegten konstanten Bedingungen diffundiert.¹⁴¹

Der μ -Wert gibt an, wievielfach größer der Widerstand des Stoffes ist, verglichen mit einer Schicht gleicher Dicke von ruhender Luft (bei gleicher Temperatur). Wird der μ -Wert mit der Dicke des Bauteils multipliziert so erhält man den sogenannten s_d -Wert (diffusionsäquivalente Luftschichtdicke). Dieser Wert gibt an, wie dick eine ruhende Luftschicht sein müsste, um unter den gleichen Bedingungen die gleichen Wasserdampfdiffusionsströme wie der geprüfte Baustoff (bzw. die geprüfte Beschichtung) aufzuweisen.

Lt. EN 1062-1 (2004) wird die Diffusionsstromdichte V in folgende Klassen unterteilt:

Klasse		Anforderungen	
V_0		keine Anforderung	
V_1	hohe Diffusionsstromdichte	$V > 150 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$	$s_d < 0,14 \text{ m}$
V_2	mittlere Diffusionsstromdichte	$V > 15 \text{ und } \leq 150 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$	$s_d < 1,4 \text{ und } \geq 0,14 \text{ m}$
V_3	niedrige Diffusionsstromdichte	$V \leq 15 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$	$s_d \geq 1,4 \text{ m}$

Tabelle 2-2: Klassenzuordnung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte lt. Norm

Für die Bestimmung des s_d -Wertes muss die Dicke der Beschichtung bekannt sein. Die Bestimmung dieses Wertes ist vor allem bei sehr dünn aufgetragenen Anstrichen kaum möglich.

Lt. Norm kann die Beschichtungstärke auch über den Verbrauch bzw. der Masse des aufgetragenen Anstrichstoffes ermittelt werden, doch auch diese Vorgehensweise muss mit Vorsicht angewendet werden. Dieser Berechnungsansatz würde eine einheitliche Schichtstärke voraussetzen, was, besonders im Fall von Anstrichen mit hohen Füllstoffanteilen, meist nicht zutreffend ist.

Aus diesem Grund wird in den nachfolgenden Versuchsreihen auf die Bestimmung des s_d -Wertes verzichtet und die Ermittlung der Wasserdampfdiffusionsstromdichte für vergleichende Betrachtungen als ausreichend angesehen.

3. Austrocknungsgeschwindigkeit

Der Trocknungsvorgang eines wassergesättigten porösen Baustoffes erfolgt in mehreren Phasen.¹⁴² Zu Beginn ist die Trocknungsgeschwindigkeit nur von den äußeren Klimabedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit abhängig. In dieser Phase ist der Kapillartransport groß genug um die an der Oberfläche verdunstete Wassermenge konstant nachzufördern, es ändert sich nur die Verteilung des Flüssigkeitsgehaltes im Inneren des Baustoffes. Mit sinkendem Wassergehalt kann jedoch nicht mehr genügend Flüssigkeit an die Oberfläche transportiert werden, die Trocknungsgeschwindigkeit sinkt ab diesem Zeitpunkt stetig und ist jetzt neben den Klimarandbedingungen maßgeblich von den Kapillareigenschaften des Baustoffes abhängig.

¹⁴¹ vgl. z.B. EN ISO 7783 (2008, Normentwurf), S.4

¹⁴² vgl. Krischer, Kast (1992), S.287–291

Am Ende der Trocknung erfolgt der Feuchtetransport dann nur mehr durch Dampfdiffusion, solange bis sich im Baustoff ein Gleichgewichtsfeuchtegehalt mit der umgebenden Luftfeuchtigkeit einstellt.

Als maßgebliche Baustoffparameter zur Beschreibung der Trocknung können somit die Diffusionswiderstandszahl und der Flüssigtransportkoeffizient genannt werden.

Die Austrocknung wird aufgrund ihrer Komplexität somit nicht als eigener Materialparameter, sondern nur als Zusammenfassung der oben genannten Trocknungsmechanismen in Form einer Trocknungskurve dargestellt.

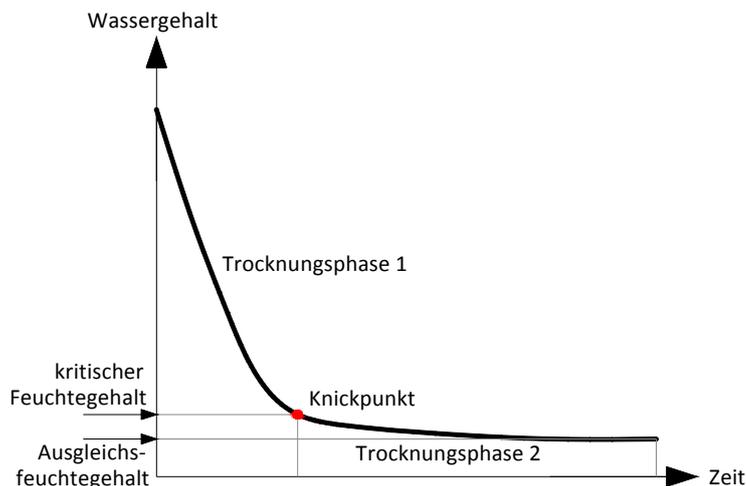


Abbildung 2-9: Schemazeichnung eines charakteristischen Trocknungsverlaufes eines kapillarporösen, hygroskopischen Baustoffes¹⁴³

In obiger Abbildung erkennt man einen charakteristischen Knickpunkt in der Trocknungskurve. Dieser kennzeichnet den kritischen Feuchtegehalt ab dem der Wassergehalt so gering geworden ist, dass die Verdunstungsebene ins Baustoffinnere wandert und die Trocknung zunehmend nur mehr über Diffusion stattfindet.

4. feuchtetechnisches Verhalten – Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und –abgabe

Gebäude sind wie bereits eingangs erwähnt einer Vielzahl von Verwitterungsbelastungen ausgesetzt, wobei vor allem in unseren Breitengraden der großen Anzahl an Frost-Tauwechselphasen eine übergeordnete Rolle beizumessen ist.

Um Frostschäden zu vermeiden, muss eine Ansammlung von Wasser in der Bausubstanz unbedingt verhindert werden. Im Wechsel zwischen Wasseraufnahme und -abgabe darf sich somit keine Feuchtigkeitsakkumulation einstellen. Die aufgenommene Wassermenge muss kleiner oder höchstens gleich sein wie die Wassermenge, welche in der anschließenden Trocknungsperiode wieder abgegeben werden kann.¹⁴⁴ Somit müssen die Wasserdurchlässigkeit und die Austrocknung in jedem Fall im Zusammenhang gesehen werden. Weitläufig wird dafür die sogenannte Künzel-Zahl¹⁴⁴ herangezogen, welche Rückschlüsse auf das feuchtetechnische Verhalten der Beschichtung im Zusammenhang mit dem Untergrund geben soll.

Künzel (1976) geht davon aus, dass sich im Wechsel zwischen Beregnungs- und Trocknungsperioden nur dann keine Feuchtigkeitsanreicherung im Baustoff ergibt, wenn die aufgenommene Wassermenge in der anschließenden Trocknungsperiode auch wieder vollständig ausdiffundieren kann. Dabei setzt Künzel den w -Wert mit dem sd -Wert in Zusammenhang, was in der sogenannten Künzel-Zahl zum Ausdruck kommt.

¹⁴³ in Anlehnung an Krischer, Kast (1992)

¹⁴⁴ vgl. Künzel (1976)

Diese Zahl ($sd \cdot w$) sollte laut Künzel einen Wert von $0,1 \text{ kg/mh}^{0,5}$ nicht überschreiten. Zusätzlich werden auch Grenzwerte sowohl für den w -wert ($\leq 0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$) als auch für den sd -Wert ($\leq 2\text{m}$) von Künzel empfohlen, um somit ein insgesamt wasserabweisendes System zu erhalten.

Dieser Ansatz ist aus zweierlei Hinsicht kritisch zu hinterfragen.

Erstens wird mit Hilfe der Künzel-Zahl nur die Wasseraufnahme mit der Dampfdiffusion, sprich lediglich mit der Trocknung über die dampfförmige Phase, in Zusammenhang gebracht. Der Flüssigtransportkoeffizient der Beschichtung und somit auch die Weiterverteilung von Wasser in der flüssigen Phase werden dabei völlig ausgeklammert.

Künzel (1976) geht davon aus, dass der kapillare Wasserrücktransport entsprechend den klimatischen Verhältnissen bereits nach kurzer Zeit abgeschlossen ist und die Wasserabgabe dann nur mehr durch Dampfdiffusion erfolgt. Dieser Ansatz mag für Bauteile zutreffen, wo Feuchtigkeit hauptsächlich aufgrund von Regenbelastungen und somit nur über die Beschichtung in den Baustoff eindringen kann. Während man bei Neubauten meist davon ausgeht, dass die Feuchtebelastungen von innen keinen oder nur einen geringen Anteil der Feuchtebeanspruchung eines Bauteils darstellen, ist dies bei historischen Bauwerken jedoch völlig anders einzuschätzen. Sowohl fehlende bzw. unzureichende Abdichtungsmaßnahmen, Rissbildungen und Fehlstellen in der Beschichtung, als auch hygroscopische Wassereinlagerungen durch z.B. Salze, tragen maßgeblich zu einer erhöhten Wasseraufnahme bei.

Zudem ist die alleinige Betrachtung des sd -Wertes, wie auch die nachfolgenden Versuchsergebnisse bestätigen, unzureichend, da insbesondere bei kapillarporösen Beschichtungsmaterialien wie der Kalkbeschichtung die kapillaren Feuchtetransportmechanismen des Anstrichs zu einer beschleunigten Austrocknung des Substrats führen. Die Trocknung aufgrund der Weiterverteilung innerhalb des Baustoffes und über die Beschichtung nach außen nimmt somit einen höheren Stellenwert ein als die Dampfdiffusion, was vor allem bei höheren Feuchtigkeitsbelastungen des Substrats tragend wird. Auch Bagda (1981) stellte fest, dass *„die Austrocknungsgeschwindigkeit der mit Feuchtigkeit belasteten Untergründe in erster Linie von der aufgenommenen Wassermenge und nicht nur vom sd -Wert der Beschichtung abhängig ist“* (Blöchl-Wirts (2001), S.150 zitiert nach Bagda (1981)).

Zweitens bleibt mit der Künzel-Zahl das Zusammenspiel der Beschichtung mit dem Untergrund unberücksichtigt. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass unterschiedliche Substrate unterschiedliche Anstrichsysteme für eine optimale Funktionsfähigkeit benötigen. So kann ein Kalkanstrich für bestimmte poröse Gesteinsmaterialien bestens geeignet sein, während andere Untergründe auf die Kombination mit einem dichten Beschichtungssystem wie z.B. einem Ölanstrich angewiesen sind. Eine pauschale Beurteilung eines festgelegten Zahlenwertes des Anstriches ohne Berücksichtigung des Untergrundes würde viele Beschichtungen als ungeeignet klassifizieren, obwohl uns am Beispiel der Kalkbeschichtung Unmengen an historischen Bauwerken das Gegenteil beweisen.

Die Beurteilung kapillarporöser Beschichtungen an historischen Fassaden oder Skulpturen nach der Künzel-Zahl führt somit zu keinen bedeutungsvollen Aussagen, und auch bei anderen Beschichtungssystemen muss eine solche Betrachtung in Frage gestellt werden.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der Künzel-Zahl und dessen empfohlenem Grenzwert nur eine sehr geringe Bedeutung beigemessen.

Vielmehr wird das Verhältnis der Wasseraufnahme und das Austrocknungsverhalten der Beschichtung (und damit die zusammenhängende Wirkung zwischen Trocknung durch kapillare Weiterverteilung und Trocknung durch Dampfdiffusion) im Zusammenhang mit den jeweils vorhandenen hygrischen Eigenschaften des Gesteinssubstrates beurteilt.

Parameter zur Beurteilung der Gesteinssubstanz nach Verwitterungseinwirkungen

Um die Wirksamkeit des Anstriches als Schutzschicht beurteilen zu können, muss der Zustand der Gesteinssubstanz nach Verwitterungseinflüssen, wie beispielsweise Frost-Tauwechsel- oder Salzkristallisationseinwirkungen, untersucht werden.

Dies kann einerseits visuell, für mit dem freien Auge sichtbare Schäden, als auch mit Hilfe dünnschliffmikroskopischer Aufnahmen sowie Ultraschalluntersuchungen zur Beurteilung kleiner, nicht sichtbarer, Risse und Zerstörungen der Gesteinsstruktur erfolgen.

Parameter zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Anstriches

Zur Bewertung der Dauerhaftigkeit von Anstrichen werden in vorliegender Arbeit die Haftzugfestigkeit bzw. Abrieb der Beschichtung sowie die Schädigung des Anstriches nach Bewitterung als Beurteilungsparameter herangezogen (vgl. Kap. 2.3.3).

Haftzugfestigkeit und Abrieb

Die Haftfestigkeit beschreibt die Gesamtheit der Bindekräfte zwischen einem Anstrich und dem Untergrund und wird auch als Adhäsionsfestigkeit bezeichnet.¹⁴⁵

Der Abrieb eines Anstriches wird durch mechanische Beanspruchung verursacht. Die Abriebfestigkeit bezeichnet den Widerstand der Oberfläche gegen diese Beanspruchung (deshalb auch Abriebwiderstand).

Prinzipiell wird diese Größe von den Oberflächeneigenschaften des Anstriches wie Rauigkeit und Härte bestimmt. Bei der Kalkbeschichtung müssen jedoch auch Kreidungserscheinungen beim Abriebverhalten mitberücksichtigt werden.

Als Kreiden wird das Auftreten von lose anhaftendem Pulver an der Oberfläche einer Beschichtung infolge des Abbaus eines oder mehrerer Bestandteile der Beschichtung verstanden.¹⁴⁶ Je höher die losen Teile an der Oberfläche, desto höher ist demzufolge auch der Abrieb.

Durch eine hohe Haftzugfestigkeit gemeinsam mit einem geringen Abrieb wird die Dauerhaftigkeit des Anstriches erhöht.

Schädigung der Beschichtung nach Bewitterung

Anstriche sind vielen unterschiedlichen äußeren Belastungen, wie thermischen und hygri-schen Wechselbeanspruchungen, Frost-Tauwechselbeanspruchungen, Salzbelastungen etc. ausgesetzt. Um diesen Einflüssen Stand halten zu können, sollte der Anstrich eine möglichst hohe Verformbarkeit aufweisen, um Risse zu vermeiden.

Unter der Verformbarkeit versteht man die Flexibilität, also die Eigenschaft einer Beschichtung Formveränderungen des Substrates, auf das sie aufgetragen wurden, ohne Beschädigung zu folgen.¹⁴⁷

Es gibt die elastische (reversible) wie auch die plastische (irreversible) Verformung eines Materials. Ein sehr zähes Material verformt sich plastisch, spröde Materialien lassen sich kaum plastisch verformen, wodurch sich schneller Risse bilden. Die Verformbarkeit hängt somit davon ab, ob der Anstrich elastisch, plastisch, spröde oder zäh ist. Es ist sehr schwierig diese Kenngrößen an einer Beschichtung einzeln zu bestimmen. Es können jedoch Rückschlüsse dieser Eigenschaften in Zusammenhang mit einer visuellen Beurteilung von Rissbildungen nach thermischen bzw. feuchtetechnischen Wechselbeanspruchungen getroffen werden.

¹⁴⁵ Adhäsion = „Phänomen des Haftens zwischen Grenzflächen, hervorgerufen durch Kräfte zwischen Molekülen“ (EN ISO 4618 (2006), S.3)

¹⁴⁶ vgl. EN ISO 4618 (2006), S.9

¹⁴⁷ vgl. EN ISO 4618 (2006), S.26

Neben den Eigenschaften des Anstrichsystems selbst hängt die Dauerhaftigkeit der Beschichtung auch von anderen äußeren Faktoren ab wie

- Klimabedingungen (auch Mikroklimabedingungen)
- Pflege- Wartungs- und Reinigungsmaßnahmen
- Vorhandensein von Schutzmaßnahmen wie Dachüberstände, Abdeckbleche, etc.
- Ausbildung der Regenwasserableitungen (Dachrinnen, Ablaufrinnen, Fallrohre, etc.)
- ev. statische Belastungen

Die Dauerhaftigkeit von Anstrichen kann somit oftmals durch sehr einfache bauliche Maßnahmen, wie Dachüberstände, der richtigen Anordnung von Regenwasserableitungssystemen und vor allem durch regelmäßig Instandhaltungsmaßnahmen dieser Schutzeinrichtungen und der Beschichtung selbst erhöht werden.

2.3.4 Zusammenfassung: Anstriche – Grundlagen und Anforderungen

Von der Industrie wird eine Vielzahl von Anstrichen und Beschichtungen angeboten. Die wichtigsten Systeme, vor allem im Hinblick auf die Anwendung an historischen Gesteinsfassaden und –skulpturen, bilden dabei Anstriche auf Basis organischer Silikon- und Kunstharzbindemittel sowie anorganischer Silikat- und Kalkbindemittel.

Die Aufgabe dieser Beschichtungen besteht darin, das darunterliegende Gesteinssubstrat vor unterschiedlichsten Verwitterungseinflüssen zu schützen.

Ästhetische Ansprüche und die Dauerhaftigkeit der Beschichtungen selbst, werden dieser Schutzwirkung oftmals vorangestellt. Gerade bei historischen denkmalgeschützten Objekten muss jedoch der Erhaltung des Gesteinssubstrates oberste Priorität beigemessen werden.

Dafür müssen die hygrischen Eigenschaften der Beschichtung (Verhältnis der Wasseraufnahme und Wasserabgabe zur Beurteilung einer möglichen Wasserakkumulation im Substrat) genauso betrachtet werden, wie der Zustand der Gesteinssubstanz nach Verwitterungseinwirkungen.

Zwar muss auch die Dauerhaftigkeit der Beschichtung untersucht und beurteilt werden, jedoch vorwiegend mit dem Ziel, eine möglichst haltbare Opferschicht anzustreben. Dadurch kann das Substrat so lange wie möglich geschützt und Instandhaltungsmaßnahmen hinausgezögert werden.

Die Haltbarkeit des Anstriches endet jedoch dort, wo dies zu Lasten der Dauerhaftigkeit der historischen Bausubstanz geht. Aus diesem Grund werden ästhetische Ansprüche in dieser Arbeit hintangehalten. Zuerst muss eine geeignete Schutzschicht für das Denkmal gefunden werden, erst danach sind Überlegungen zur ästhetischen Verbesserung sinnvoll und nicht umgekehrt.

2.4 ZITIERT E UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR

Alscher (1981ff), Bermoser (2008), Blöchl-Wirts (2001), Brachert (2001), Brandes (1995), Cowper (1998), DIN 18363 (2010), DIN 55945 (2007), Eibner (1995), EN 459-1 (2010), EN 1062-1 (2004), EN ISO 4618 (2006), EN ISO 7783 (2008), Fraustadt/Krafft (2006), Ghaffari (2005), Herm (1997), International Council on Monuments and Sites (1989), Keim/Hoppe (1995), Kieslinger (1932), Kießl (1983/1985), Kittel (1974), Kittel (1998), Knoepfli (2002), Koller et al. (2000), Koller (2003), Kraus et al. (1989), Kraus (2004), Krischer/Kast (1978/1992), Krus (1995), Kühn (1984/2002), Künzel (1976/1990), Künzel (1994), Maschelein-Kleiner (1995), Meyer (1993), Österreichisches Bundesdenkmalamt (2000), Paschinger (1980), Reber (2004), Reinsch (1991), Rohatsch (2004), Torraca/Weber (1986), Rusam (2004), Schmitt (Hg.) (1937 ff.), Schönburg (2006), Schumann (2007), Tarnawski (1887), Torraca (1996), Trauninger (2007), Wehlte (1981), Winnefeld et al. (2001), Wittmann (Hg.) (1993)

3 LITERATURRECHERCHE

Dieses Kapitel widmet sich dem derzeitigen Wissensstand der Auswirkungen unterschiedlicher Additive für Kalkanstriche sowie dem Vergleich dieser Anstriche mit modernen Beschichtungssystemen, jeweils im Hinblick auf die in Kap. 2 genannten Kriterien, zur Beurteilung der Wirksamkeit eines Anstriches (Betrachtung der Dauerhaftigkeit des Anstriches und des Gesteinssubstrates).

Die umfangreiche Literatur, die sich mit dieser Thematik auseinandersetzt, weist in vielen Bereichen oft widersprüchliche Zusammenhänge und Ergebnisse auf. Hier zeigen sich vor allem beim Vergleich gängiger Lehrmeinungen mit Ergebnissen aus vorhandenen Forschungsarbeiten große Diskrepanzen. Die Mannigfaltigkeit der bibliographischen Aussagen zu diesem Thema wird im vorliegenden Kapitel dargestellt.

Folgende Vorgehensweise wurde dabei angewandt:

1. Gegenüberstellung von Kalkbeschichtungen mit anderen, zumeist modernen, aber auch historischen Anstrichsystemen – auf Basis vorhandener Forschungsergebnisse
2. Darstellung der Auswirkungen unterschiedlicher Additive für Kalkanstriche – auf Basis vorhandener Forschungsarbeiten und Literaturangaben
3. Zusammenfassung des wissenschaftlichen „State of the Art“ – auf Basis der Filterung eindeutiger Aussagen aus Punkt 1 und 2
4. Verdeutlichung offener Fragestellungen – auf Basis der nicht eindeutig definierten und widersprüchlichen Darstellungen aus Punkt 1 und 2

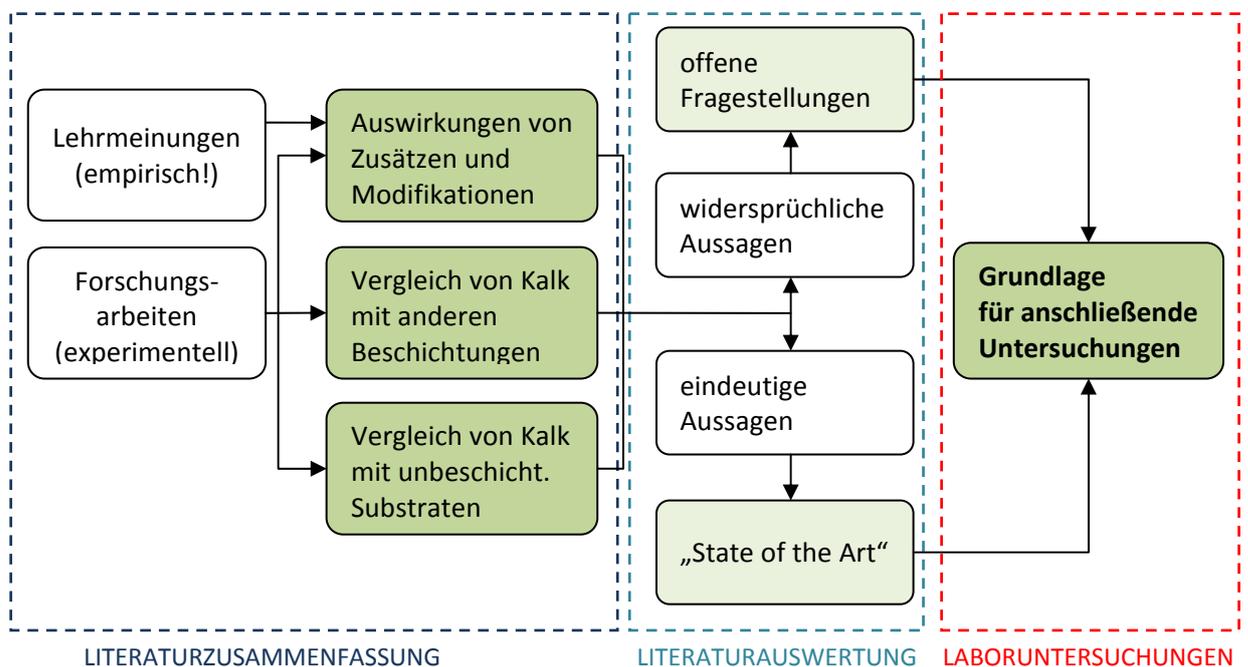


Abbildung 3-1: Vorgehensweise der Literaturrecherche zur Festlegung der Forschungsgrundlage

Durch diese Vorgehensweise war es möglich, eine seriöse Forschungsgrundlage für die in Kap. 4 und 5 durchgeführten Laboruntersuchungen zu schaffen.

Nur so kann verhindert werden, den derzeitigen Wissensstand nicht mit neuerlichen unzusammenhängenden Forschungsergebnissen zu belasten, sondern beizutragen, die derzeitigen Erkenntnisse zu ordnen und zu erweitern.

3.1 ZUSAMMENFASSUNG VORHANDENER FORSCHUNGSERGEBNISSE

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse unterschiedlicher Forschungsarbeiten zusammen.

In diesen Forschungsarbeiten wurden die Eigenschaften unterschiedlicher Anstrichsysteme gegenübergestellt und anhand von Laboruntersuchungen verglichen und beurteilt. Ebenso wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Zusätze und Modifikationen von Kalkanstrichen untersucht. Dabei wurden sowohl historische Zusätze wie Leinöl und Kaseine, als auch moderne Modifikationen wie beispielsweise Kunstharzdispersionen analysiert.

In diesem Abschnitt wurden nur deutschsprachige Forschungsarbeiten ausgewertet, um als Vergleichsgrundlage die Forschungsansätze und Ergebnisse ähnlicher klimatischer Randbedingungen, kultureller Identitäten und Ideologien sowie denkmalpflegerischer Aspekte zu erhalten.

Es erfolgte zwar auch eine Berücksichtigung der internationalen Literatur (vgl. Kap. 3.2 sowie Kap. 4), jedoch nur anhand empirischer Lehrmeinungen und nicht im gleichen Detaillierungsgrad.

Folgende ausgewählte deutschsprachige Forschungsarbeiten wurden verglichen und analysiert:

Name des Autors	Titel der Arbeit	Art der Arbeit	Kurzb [*]
Boenkendorf, U. Degenkolb, M. Knöfel, D.	Proteine als Zusatzmittel in Kalkmörteln In: Snethlage (Hg.) 1993 – Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall. S.129-137 (1993)	Forschungsbericht	BDK
Bermoser, I.	Kalkschlämme als Schutz- und Opferschicht auf Kalksandstein. Die Wiener Spinnerin am Kreuz. Restauriergeschichte und Evaluierung. (2008)	Diplomarbeit	BER
Blöchl-Wirts, B.	Kalkbeschichtungen in der Denkmalpflege(2001)	Dissertation	BLW
Brandes, C.	Natursteinkonservierung durch Beschichtung. Untersuchungen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von Anstrichsystemen auf Natursteinen (1995)	Dissertation	BRA
Dreuse, H.; Nehring, Ch.	Untersuchungen von reinen und modifizierten Kalkfarben für historische Bauwerke. In: Institut für Steinkonservierung Mainz (Hrg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und morgen? IFS-Tagung, Bericht Nr. 19 (2004)	Forschungsbericht	DRN
Ghaffari, E.	Die historischen Farbfassungen der barocken Brunnenanlagen im Schlosspark Schönbrunn und die Möglichkeit ihrer Rekonstruktion (2005)	Diplomarbeit	GHA
Herm, C.	Anstriche auf Naturstein. Untersuchungen zur Zusammensetzung historischer Fassungen, Kolloidchemie von Kalkfarbe und Bauphysik (1997)	Dissertation	HER
Paschinger, H.	Kalkmörtel und Kalkfarbe in Österreich. In: Institut für Steinkonservierung Mainz (Hrg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und morgen? IFS-Tagung, Bericht Nr. 19 (2004)	Forschungsbericht	PAS
Trauninger, D.	Beschichtungssysteme auf Natursteinoberflächen, gestern-heute-morgen, im Hinblick auf ihre physikalischen Eigenschaften und Auswirkungen (2007)	Diplomarbeit	TRA
Zech, K.	Charakterisierung der Witterungsbeständigkeit von Beschichtungen auf Kalk-Gips-Putzen (1998)	Diplomarbeit	ZEC

* Kurzbezeichnung für nachfolgende Zusammenfassungen

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der gegenübergestellten und analysierten Forschungsarbeiten

3.1.1 Grundlagen

Zusammenfassung der gegenübergestellten Parameter

Zur Gegenüberstellung der Beschichtungen und Modifikationen werden sowohl bauphysikalische Parameter (Wasserdurchlässigkeit, Wasserdampfdiffusionswiderstand, Austrocknungsverhalten) der einzelnen Anstrichsysteme, als auch Zerstörungseffekte aufgrund von Verwitterungssimulationen bzw. Freibewitterungen miteinander verglichen.

An dieser Stelle soll nochmals angemerkt werden, dass nur die, für diese hier vorliegende Arbeit, relevanten Parameter dargestellt und zusammengefasst werden (vgl. Kap. 2).

Andere Parameter, die in den Arbeiten ebenfalls untersucht wurden, wie beispielsweise Viskosität, Sedimentationsgeschwindigkeit, etc. bleiben zur Wahrung einer gewissen Verständlichkeit und Schärfe, in dieser Literaturzusammenfassung völlig ausgeklammert und unberücksichtigt.

Dadurch soll ein stark vereinfachter Überblick und Vergleich der Aussagen, bezüglich Auswirkungen von unterschiedlichen Kalkmodifikationen und Anstrichsystemen der einzelnen Autoren gegeben werden.

Die in den jeweiligen Arbeiten durchgeführten und in dieser Literaturlauswertung betrachteten Untersuchungen werden nachfolgend zusammengefasst aufgedgliedert:

	BDK	BER	BLW	BRA	DRN	GHA	HER	PAS	TRA	ZEC
VERGLEICHSUNTERSUCHUNGEN										
Kalk ↔ andere Anstrichsysteme/unbeschichtet ¹⁴⁸	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
reiner Kalk ↔ Kalk + Modifikationen	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
ERMITTELTE PARAMETER										
PARAMETER ZUR BEURTEILUNG DER DAUERHAFTIGKEIT DES UNTERGRUNDES										
hygrische Parameter der Beschichtung:										
- Wasserdurchlässigkeit, w-Werte	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
- Wasserdampfdurchlässigkeit, Feuchtedurchgang	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓
- Austrocknungsverhalten	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	✓	✓
Zustand des Substrats nach Bewitterung	- ¹⁴⁹	-	✓	✓	-	-	-	-	✓	-
PARAMETER ZUR BEURTEILUNG DER DAUERHAFTIGKEIT DER BESCHICHTUNG										
Schädigung der Beschichtung nach Bewitterung	✓ ¹⁵⁰	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	-
Kreidung / Abrieb nach Bewitterung	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	✓	✓
Haftzugfestigkeit am Untergrund	-	-	✓	✓	-	✓	-	-	-	-
Karbonatisierung ¹⁵¹	-	✓	-	-	-	-	✓	✓	-	-

Tabelle 3-2: gegenübergestellte Parameter (Auszug aus den einzelnen Forschungsarbeiten)

Die Gegenüberstellung stellt eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der genannten Autoren dar, wobei die Ergebnisse unabhängig vom jeweiligen Versuchsaufbau zusammengefasst werden. Aus diesem Grund werden die Prüfanordnungen im Anhang erläutert (vgl. Anhang A), um basierend darauf auch Rückschlüsse für die Interpretation der Aussagen treffen zu können.

¹⁴⁸ Vergleich mit einer unbeschichteten Vergleichsprobe.

¹⁴⁹ Es wurde der Einfluss von Modifikationen im Bezug auf die Frost-Tauwechselbeständigkeit von Mörtelproben untersucht. Da in vorliegender Arbeit jedoch die Auswirkung einer Beschichtung auf die Dauerhaftigkeit des Substrats selbst im Vordergrund steht, sind die Ergebnisse von Mörtelproben ohne Substrat für diesen Vergleich nicht geeignet, und werden aus diesem Grund hier auch ausgeklammert.

¹⁵⁰ Beurteilung des Schädigungsgrades von Mörtelproben nach Verwitterungssimulationen.

¹⁵¹ Kann nur für Kalkbeschichtungen beurteilt werden. Die Aussage ist wichtig um Zusammenhänge zwischen der Karbonatisierungsqualität (Vollständigkeit, Geschwindigkeit, ...) und den anderen beurteilten Parametern feststellen zu können.

Zusammenfassung der in den Forschungsarbeiten verwendeten Materialien und Anstrichsysteme sowie Rezepturen und Modifikationen

	BDK ¹⁵²	BER ¹⁵³	BLW	BRA ¹⁵⁴	DRN	GHA ¹⁵⁵	HER	PAS	TRA	ZEC ¹⁵⁶
SUBSTRATE										
Steinsubstrat	-	Margarethener & Aflenzer Kalksandstein	historischer Ziegel ¹⁵⁷	Elmkalk ¹⁵⁸	Schlesischer Sandstein	Margarethener Kalksandstein	Gotland-sandstein	unbekannt	Vicenza, & Savonniere Kalksandstein	-
Glasfritten	-	-	-	-	-	-	✓		-	-
Mörtelproben	Sandkalk (Weißkalkhydrat)	-	Luftkalkputzmörtel ¹⁵⁹	-	Luftkalkputz-mörtel ¹⁶⁰	-	-		-	Kalkgipsputz ¹⁶¹
KALKANSTRICHE - MODIFIKATIONEN										
Zugabemenge	[M _B %]	[V%]	[..%]	[M _B %]	[?%]	[M%]	[M%]	[?%]		[?%]
Kasein	0,5; 1; 1,5	-	1,4 M-% ¹⁶²	-	-	-	5	3; 10	/	20
Leinöl	-	-	15 V _B -% ¹⁶³ , ca. 15 M _B -% ¹⁶⁴	30	1; 2,5	5	5	3; 10		3 ¹⁶⁵
Kunststoffdisp.	1; 3; 5	5	-	-	2,5	5	5	3; 10		5
Marmormehl	-	50	-	-	-	10	-	-		-
KALKANSTRICHE - GRUNDREZEPTUR										
Verdünnung ¹⁶⁶	Mörtelproben	50%	30-60% ¹⁶⁷	20-40% ¹⁶⁸	n.d.	keine	Keine	n.d.	60%	0-50% ¹⁶⁹
fresco/secco ¹⁷⁰		secco	n.d.	secco	secco	n.d.	n.d.	n.d.	fresco/secco ¹⁷¹	secco
Schichtenanzahl		3	2-5 (Mörtel); 3 (Ziegel)	2-3/5-6 ¹⁷²	3	3	4	n.d.	7	2

M_B% ... Massenprozent (M_B = im Verhältnis zum Bindemittel)

V % ... Volumsprozent

? % ... aus den Angaben geht nicht hervor ob es sich um Volums- oder Massenverhältnisse handelt.

n.d. ... Diese Angaben wurden im vorliegenden Forschungsbericht nicht ausreichend dokumentiert bzw. konnten nicht eindeutig verifiziert werden.

Tabelle 3-3: In den Forschungsarbeiten verwendete Materialien und Rezepturen welche in dieser Arbeit gegenübergestellt werden (Auszug aus den einzelnen Forschungsberichten)

¹⁵² In dieser Arbeit wurden nicht Kalkanstriche sondern zwei unterschiedliche Kalkmörtel untersucht: Sandkalk (historischer Mörtel mit Kalkspatzen durch Löschen von stückigem Branntkalk mit nassem Sand) und Wasserkalkhydrat mit Hüttensand (Mörtel auf Kalkbasis mit hohem hydraulischem Anteil). In vorliegender Arbeit wurden jeweils nur die Untersuchungsergebnisse der Rezepturen mit dem nicht hydraulischen Sandkalk miteinander verglichen. Dies begründet sich damit, dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die hydraulischen Zusätze signifikant auf die Eigenschaften eines Kalkmörtels- bzw. Kalkanstriches auswirken und somit eigentlich als eigenes Additiv betrachtet werden müssten.

¹⁵³ Die Kalkrezeptur (in nachfolgenden Vergleichen bezeichnet als reiner Kalk) enthält immer Marmormehl als Füllstoff. In der Arbeit kamen keine Kalkrezepturen ohne Füllstoffe zur Anwendung, weshalb die Auswirkungen dieser Füllstoffe auch nicht benannt werden können. Es kann jedoch der Vergleich Kalk+Marmormehl mit Kalk+Marmormehl+Modifikationen dargestellt werden.

¹⁵⁴ Die Kalkrezeptur (in nachfolgenden Vergleichen bezeichnet als reiner Kalk) enthält immer Kasein. Die Deckbeschichtungen enthalten immer 10 M-% Pigmentanteile.

¹⁵⁵ Alle untersuchten Kalkrezepturen enthalten 10 M% Marmormehl.

¹⁵⁶ Als unmodifizierte Kalkfarbe kam ein Fertigprodukt der Firma SAX-Farben GmbH, Dresden zur Anwendung.

¹⁵⁷ Ziegelfassade der Kirche in Eilsam (DE) mit inhomogener Struktur (rückgewitterte historische Ziegelflächen, neue und alte Klinkerziegel, verschiedene Fugenmörtel).

¹⁵⁸ Brandes untersuchte die Wirksamkeit von Anstrichsystemen an unterschiedlichen Sandsteinen. Elmkalk ist jedoch das einzige Substrat welches als kalzitisch gebundener Kalksandstein bezeichnet werden kann, bei allen anderen Substraten handelt es sich entweder um quarzreiche oder tonig-mergelige Sandsteine.

¹⁵⁹ Bindemittel Weißkalkhydrat und Sumpfkalk, Bindemittel/Zuschlagverhältnis 1:2-1:5, Zuschlag Quarzsand mit unterschiedlichen Körnungen.

¹⁶⁰ 1 Raumteil Altmannsteiner Sumpfkalk (3 Jahre) und 4 Raumteile Erfurter Sand, zum Zeitpunkt des Anstrichauftrages nicht durchkarbonatisiert (fresco).

¹⁶¹ Untersucht wurden ein Gipsputz, ein Gips-Kalk-Putz sowie ein Kalk-Gips-Putz. Um die Vergleichbarkeit mit Kalksandsteinen einigermaßen gewährleisten zu können, wurde das Substrat mit dem geringsten Gipsanteil (Kalk-Gips-Putz) für die vorliegenden Vergleichsdarstellungen gewählt.

¹⁶² Für Anstriche auf Kalkmörtel wurde eine Rezeptur mit hohen und geringen Kaseinanteilen untersucht. In dieser Arbeit wird nur die Rezeptur mit geringem Modifikationsanteil dargestellt, da bei höheren Anteilen das Kasein im Prinzip schon zum Bindemittel gezählt werden muss. Die Ergebnisse auf Ziegelfläche werden hier nicht dargestellt, da die mit Kasein modifizierten Anstriche keine einheitliche Rahmenbedingungen im Vergleich mit den unmodifizierten Anstrichen aufweisen (z.B. unterschiedliche Schichtenanzahl)

¹⁶³ Anstriche auf historischer Ziegelfläche.

¹⁶⁴ Anstriche auf Luftkalkputzmörtel (alle Anstriche enthalten zusätzlich 1,4 M-% Kasein und werden deshalb immer mit den kaseinmodifizierten Proben verglichen).

¹⁶⁵ Zusatz von 3% Leinölfirnis zur Kalkkaseinfarbe + Pigmentierung (Kalk + Kasein + Leinöl + Pigmente).

¹⁶⁶ Wasseranteil in % zur Gesamtmasse.

¹⁶⁷ Kalk-Kaseinanstrich 50- 60% Wasser (je nach Anstrichschicht); Kalkanstrich mit Leinölzusatz: 30-60% je nach Modifikationsanteil und Anstrichschicht.

¹⁶⁸ Kalkkaseinfarbe: Grundierung 40 M-% und Deckbeschichtung 20 M-%; Kalkkaseinfarbe + Leinöl: Grundierung 20 M-%, Deckbeschichtung 15 M-%.

¹⁶⁹ Ohne Zusatz sowie Kalkfarbe + Dispersion: 1. Anstrich 50%, 2. Anstrich 10%. Kalk + Kasein sowie Kalk + Leinölfirnis: 1. Anstrich 10%, 2. Anstrich 0%.

¹⁷⁰ Zwischen den einzelnen Anstrichschichten. Bei sehr langen Trocknungszeiten (ab 1 Stunde) wird als Technik secco angegeben.

¹⁷¹ Die ersten 3 Schichten fresco, danach secco.

¹⁷² Es wurden 2 unterschiedliche Schichtstärken untersucht: 1. 60-80µm, 2. 130-160µm.

Zusätzlich wurden folgende Anstrichsysteme mit den Kalkanstrichsystemen verglichen:

- Silikatanstriche
- Dispersions-Silikatanstriche
- Kunststoffdispersionsanstriche
- Silikonharzanstriche
- Ölanstriche
- Anstriche auf Basis der Nanotechnologie

In den nachfolgenden Gegenüberstellungen, der in Tabelle 3-2 genannten Parameter wurde versucht, Eigeninterpretationen soweit als möglich zu minimieren. Zur Wahrung einer gewissen Übersichtlichkeit ist eine direkte wörtliche Zitierung jedoch kaum möglich, da die Vergleichsdarstellung einer Zuordnung in Kategorien im Hinblick auf die jeweils genannten Anstrichsysteme, Rezepturen und Modifikationen bedarf.

3.1.2 Parameter zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Untergrundes

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Untergrundes werden gemäß Kap. 2 die hygrischen Eigenschaften der Beschichtung sowie das Gesteinssubstrat nach Verwitterungseinwirkungen beurteilt.

Die hygrischen Eigenschaften einer Beschichtung werden durch folgende 3 Parameter definiert (vgl. auch Kap. 2):

- Wasserdurchlässigkeit
- Wasserdampfdiffusionswiderstand
- Austrocknungsgeschwindigkeit

Andere in den genannten Forschungsarbeiten untersuchte hygrische Parameter, wie beispielsweise das Sorptionsverhalten etc., werden in der hier vorliegenden Gegenüberstellung ausgeklammert, um einerseits die Übersichtlichkeit zu wahren und andererseits nur die, für diese Arbeit, relevanten Parameter zu charakterisieren und darzustellen.

Eine Gegenüberstellung zur Beurteilung des Gesteinssubstrates nach Verwitterungseinwirkungen war nur bedingt möglich, da die meisten in Tabelle 3-1 genannten Forschungsarbeiten lediglich den Zustand der Beschichtung nach der Verwitterung beurteilten, nicht jedoch den Zustand des Gesteinsgefüges darunter.

Nur bei den Arbeiten von Brandes (1995), Trauninger (2007) und Blöchl-Wirts (2001) wurden derartige Beurteilungen durchgeführt. Von Brandes (1995) und Blöchl-Wirts (2001) wurde dabei die Salzbelastung im Gesteinssubstrat untersucht, während bei Trauninger (2007) vorwiegend der Zerstörungsgrad des Substrats mittels Ultraschalluntersuchungen und visueller Beurteilung betrachtet wurde. Ein Vergleich dieser drei Forschungsarbeiten ist somit ebenfalls nur vereinfacht möglich.

Eine detaillierte Auflistung der zu Grunde gelegten Versuchsanordnungen der einzelnen Forschungsergebnisse befindet sich im Anhang A.

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Zusammenfassung - Hygrische Parameter

	Wasserdurchlässigkeit w-Wert									Wasserdampf- diffusionswiderstand							Austrocknungs- geschwindigkeit				
	BDK	BER	BLW	BRA	DRN	GHA	HER ¹⁷³	TRA	ZEC	BDK	BLW	BRA ¹⁷⁴	DRN	GHA	HER ¹⁷⁵	ZEC	BER	BLW	BRA	ZEC	TRA
Vergleich kalkbeschichtetes Substrat – Substrat mit unterschiedlichen Anstrichen																					
unbeschichtet	-	↑	-	↑	↓	↑	-	↑	↑	-	-	↓↑ ¹⁷⁶	↔	↔	-	↔	↑	-	↑	↑	↓↔ ¹⁷⁷
Silikatanstrich	-	-	-	↔	-	-	-	-	-	-	-	↔ ¹⁷⁸	-	-	↔ ¹⁷⁹	-	-	-	↔	-	-
Dispersions-Silikatanstrich	-	-	↓	↓	-	↓ ¹⁸⁰	↓	-	-	-	↔	↓	-	↑ ¹⁸⁰	↓	-	-	↓	↓	-	-
Kunststoffdispersionsanstrich	-	-	-	↓	-	-	↓	-	-	-	-	↑	-	-	↑	-	-	-	↓	-	-
Silikonharzanstrich	-	-	↓	↓	-	↓	↓	↓	↓ ¹⁸¹	-	↑	↓	-	↑	↓	↑ ¹⁸¹	-	↓	↓	↓ ¹⁸¹	↓
Ölanstrich ¹⁸²	-	-	-	↓	-	↓	↓	-	-	-	-	↑	-	↑	↑	-	-	-	↓	-	-
"Nanobeschichtung"	-	-	-	-	-	-	-	↓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	↓
Vergleich modifizierte Kalkanstriche mit Kalkanstrich ohne Zusätze																					
Kaseinpulver	↓↑ ¹⁸³	-	↔	-	-	-	↑	-	↔	↓	↑	-	-	-	↓↑ ¹⁸⁴	↔ ¹⁸⁵	-	↔	-	↑	-
Leinöl	-	-	↓	↓	↓	↓	-	-	↑	-	↑↔ ¹⁸⁶	↑	↔	↑	↓↑ ¹⁸⁷	↔	-	↓↑ ¹⁸⁸	↓	↓↑ ¹⁸⁸	-
Kunststoffdispersion	↑↓ ¹⁸⁹	↑↓ ¹⁹⁰	-	-	↔	↔	↑	-	↑	↓	-	-	↔	↑	↑	↔	↓	-	-	↔	-

- ↓ Reduktion des jeweiligen bauphysikalischen Parameters
- ↑ Erhöhung des jeweiligen bauphysikalischen Parameters
- ↔ keine wesentliche bzw. nur sehr geringe Veränderung des jeweiligen bauphysikalischen Parameters
- ↕ keine eindeutigen Tendenzen ablesbar
- keine Übereinstimmung der Ergebnisse
- Übereinstimmung der Ergebnisse
- nur ein Ergebnis verfügbar, somit ist kein Vergleich möglich

Tabelle 3-4: Gegenüberstellung der bauphysikalischen Parameter unterschiedlicher Beschichtungen im Vergleich zur Kalkbeschichtung

¹⁷³ Kapillare Wasseraufnahme auf Gotlandsandstein.
¹⁷⁴ Vergleich von sd-Werten auf Naturstein in Abhängigkeit zu den Farbschichtdicken (Vergleich bei gleichen Schichtdicken bei allen Beschichtungen), Bild 14.
¹⁷⁵ Vergleich auf Glasfritten, Ergebnisse der μ-Werte Abb.94 und 95 bzw. aus Tabelle 32.
¹⁷⁶ Reduktion bei geringen Schichtdicken (60-80μm) und Erhöhung bei hohen Schichtdicken (130-160μm).
¹⁷⁷ Verringerung nur in Verbindung mit Savonniere als Substrat, bei Vicenza ca. gleiche Austrocknungsgeschwindigkeit.
¹⁷⁸ Beim Vergleich geringer Schichtdicken (60-80μm) geringfügige Reduktion.
¹⁷⁹ Je nach Messmethode geringfügige Reduktion bzw. Erhöhung.
¹⁸⁰ Es handelt sich um eine Silikonfarbe, welche mit Wasserglas modifiziert wurde.
¹⁸¹ Vergleich unmodifizierte Kalkfarbe mit Silikonharzbeschichtung auf Grundierung (stark verdünnte Acrylharzlösung).
¹⁸² Hauptbindemittel Öl (z.B. Leinölfarben, Öl/Bleiweißfarben, ...).
¹⁸³ Die Zugabe von Kaseinpulver führt zu einer Erhöhung des w-Wertes, die Zugabe von Molkeeiweiß, Kollagen sowie die Kombination aus Molkeeiweiß und Kollagen führt jedoch zu einer Reduktion des w-Wertes.
¹⁸⁴ Reduktion bei der ersten Schicht, Erhöhung durch den zweiten Schichtauftrag.
¹⁸⁵ Lt. Zech: keine wesentliche Erhöhung. Die Versuchsergebnisse (Abb. 28) zeigen nur eine sehr geringfügige Erhöhung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (weniger als 5% der reinen Kalkbeschichtung).
¹⁸⁶ Höhere μ-Werte auf Kalkmörtel, gleichbleibende sd-Werte bei unbewitterten Anstrichen auf Ziegelplättchen.
¹⁸⁷ Bei geringen Schichtstärken war keine wesentliche Differenz zu erkennen (bis ca. 380g/m²), bei höheren Schichtstärken konnte jedoch eine wesentliche Erhöhung des sd-Wertes beobachtet werden.
¹⁸⁸ Am Beginn eine höhere Geschwindigkeit, mit abnehmenden Wassergehalt jedoch Reduktion der Trocknungsgeschwindigkeit.
¹⁸⁹ Bei geringen Zugabemengen (1,0 M_B%) kommt es zu einer Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit, bei einer Zugabemenge von 3 und 5 M_B% kommt es zu einer signifikanten Reduktion der Wasserdurchlässigkeit.
¹⁹⁰ Abhängig vom Substrat: Beim Aflezer Kalksandstein zeigt sich eine geringfügige Reduktion, beim St. Margarethener Kalksandstein wird die Wasseraufnahme teilweise erhöht.

Zusammenfassung – Gesteinssubstrat nach Verwitterungseinwirkungen

	Zustand des Substrat nach Bewitterung		
	BLW	BRA	TRA
Vergleich kalkbeschichtetes Substrat – Substrat mit unterschiedlichen Anstrichen			
unbeschichtet	-	↑	↑
Silikatanstrich	-	↑	-
Dispersions-Silikatanstrich	↑	↔	-
Kunststoffdispersionsanstrich	-	-	-
Silikonharzanstrich	↑	↔	↑
Ölanstrich	-	-	-
"Nanobeschichtung"	-	-	↑
Vergleich modifizierte Kalkanstriche mit Kalkanstrich ohne Zusätze			
Leinöl	↓	-	-

↓ Reduktion des jeweiligen bauphysikalischen Parameter im Vergleich zur Kalkbeschichtung

↑ Erhöhung des jeweiligen bauphysikalischen Parameter im Vergleich zur Kalkbeschichtung

↔ keine wesentliche Veränderung des jeweiligen bauphysikalischen Parameters

Übereinstimmung der Ergebnisse (wobei in diesem Fall auch Tendenzen gleich beurteilt wurden)

nur ein Ergebnis verfügbar, somit ist kein Vergleich möglich

Tabelle 3-5: Gegenüberstellung der Dauerhaftigkeit beschichteter Substrate im Vergleich mit kalkbeschichteten Substraten

Auswertung und Interpretation der Zusammenfassung

hygrische Parameter

Aus der Gegenüberstellung in Tabelle 3-4 zeigt sich, dass die Ergebnisse in vielen Punkte korrelieren, teils aber auch sehr widersprüchliche Aussagen enthalten. Dies kann einerseits mit den teilweise variierenden Versuchsanordnungen, als auch mit den Diskrepanzen der Rezepturen zusammenhängen.

Die meisten Übereinstimmungen sind beim Vergleich des Kalkanstriches mit anderen Beschichtungssystemen zu finden während die Auswirkungen der Kalkmodifikationen kaum übereinstimmende Ergebnisse zeigen. Ebenso zeigen sich beim Vergleich unbeschichtetes Substrat – kalkbeschichtetes Substrat sehr unterschiedliche Aussagen.

Nachfolgend werden die Ergebnisgegenüberstellungen der einzelnen feuchtetechnischen Parameter detailliert ausgewertet:

Wasserdurchlässigkeit, w-Wert

Bei der Wasserdurchlässigkeit zeigen sich beim Vergleich der Kalkbeschichtung mit anderen Beschichtungssystemen sehr einheitliche Ergebnisse. Fast alle oben angeführten Anstriche haben eine geringere Wasserdurchlässigkeit als die Kalkbeschichtung. Lediglich der Silikatanstrich zeigt ähnliche w-Werte wie die Kalkbeschichtung.

Beim Vergleich des Kalkanstriches mit einer unbeschichteten Vergleichsprobe sind die Versuchsergebnisse nicht eindeutig. Bei einem Großteil der Untersuchungen zeigt sich jedoch, dass die Kalkbeschichtung die Wasserdurchlässigkeit reduziert.

Nur bei den Untersuchungen von Dreuse/Nehring (2004) konnte Gegenteiliges festgestellt werden, wobei hier nur bei Verwendung eines reinen Sumpfkalkes die Wasseraufnahme erhöht wird. Sobald Zusätze beigemischt wurden, zeigt sich eine Reduktion der Wasseraufnahme.

Auch bei den Silikatfarben zeigt sich ein eher unregelmäßiges Bild. Während die Dispersions-Silikatanstriche die Wasseraufnahme reduzieren, erkennt man bei den reinen Silikatanstrichen keine Änderung des w-Wertes im Vergleich mit Kalkbeschichtungen. Daraus kann geschlossen werden, dass der Dispersionszusatz maßgeblich für die wasserabweisende Wirkung verantwortlich ist.

Die Untersuchungsergebnisse zu den Auswirkungen unterschiedlicher Modifikationen zeigen bei allen hier angeführten Additiven unterschiedliche Ergebnisse. Teilweise können jedoch Tendenzen festgestellt werden. Leinöl scheint die Wasserdurchlässigkeit erwartungsgemäß zu reduzieren, hier konnte nur bei Zech (1998) eine Erhöhung des w-Wertes festgestellt werden, wobei hier anzumerken ist, dass es sich um eine Kalkrezeptur handelt wo nicht nur Leinöl sondern hauptsächlich Kasein, in einem Verhältnis 1:7 (Leinöl:Kasein), zugegeben wurde. Somit kann davon ausgegangen werden, dass Kasein bei dieser Rezeptur die Eigenschaften maßgeblich beeinflusst.

Im Bezug auf unterschiedliche Proteinzugaben konnte bei Boenkendorf/Degenkolb/Knöfel (1993) festgestellt werden, dass nur Kaseinpulver die Wasserdurchlässigkeit erhöht, die Zugabe von Kollagen und Molkeeiweiß jedoch zu einer Reduktion des w-Wertes führt.

Die Zugabe von Kunststoffdispersionen zeigt wider Erwarten nur geringe Veränderungen des w-Wertes. Hier zeigt sich sogar eher die Tendenz der Erhöhung der Wasseraufnahme. Die Ergebnisse von Boenkendorf/Degenkolb/Knöfel (1993) deuten darauf hin, dass Kunststoffdispersionen nur in hohen Mengen zu einer Reduktion des w-Wertes führen, während geringe Zugabemengen den w-Wert negativ beeinflussen. Erst ab Zugabemengen von 3 M-% im Verhältnis zum Bindemittel, konnte der w-Wert positiv beeinflusst werden, wobei hier anzumerken ist, dass es sich um Untersuchungen von Kalkmörteln und nicht von Anstrichen handelt.

Wasserdampfdiffusionswiderstand

Die Gegenüberstellung der Untersuchungen zum Wasserdampfdiffusionswiderstand zeigen ebenfalls sehr unterschiedliche Ergebnisse.

Beim Vergleich von kalkbeschichteten und unbeschichteten Substraten zeigt sich, dass Kalkbeschichtungen die Wasserdampfdiffusion geringfügig bis gar nicht verändern. Bei sehr geringen Schichtdicken konnte Brandes (1995) sogar eine Reduktion des Wasserdampfdiffusionswiderstandes feststellen, erst bei hohen Schichtdicken konnte eine Erhöhung des sd-Wertes ermittelt werden.

Beim Vergleich mit anderen Beschichtungssystemen können teils sehr einheitliche, teils aber auch sehr widersprüchliche Aussagen festgestellt werden. Während Kunststoffdispersionsanstriche und Ölanstriche erwartungsgemäß einen höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand aufweisen als Kalkbeschichtungen und bei den Silikatanstrichen kaum bis geringe Unterschiede zur Kalkbeschichtung festgestellt wurden, so können bei den Dispersions-Silikatanstrichen und bei den Silikonharzanstrichen keine einheitlichen Ergebnisse ermittelt werden. Dies kann einerseits auf unterschiedliche Rezepturen und Auftragsarten (z.B. unterschiedliche Kunstharz und Füllstoffanteile) als auch auf divergierende Prüfmethode zurückgeführt werden. Während Brandes (1995), Herm (1997) und Blöchl-Wirts (2001) normgemäße Untersuchungen im wet-cup-Verfahren durchgeführt haben, wurde bei Ghaffari nicht nur die Diffusion sondern ein so bezeichneter „Feuchtedurchgang“ geprüft, welcher Feuchttransportmechanismen in flüssiger Form miteinschließt.

Zech (1998) prüfte zwar ebenfalls in Anlehnung an das wet-cup-Verfahren, verwendete jedoch Wasser anstatt der Salzlösung, was in jedem Fall zu niedrigeren Luftfeuchtigkeiten im Behälter führt. Außerdem waren die bei Zech (1998) verwendeten Silikonharzbeschichtungen mit einer auf Acrylharz basierten Grundierung versehen, was erwartungsgemäß zu einer Erhöhung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes führt.

Auch bei den Additiven können keine übereinstimmenden Ergebnisse zum Einfluss auf die Wasserdampfdiffusionseigenschaften festgestellt werden.

Durch Kaseinpulver konnte bei Boenkendorf/Degenkolb/Knöfel (1993) eine Reduktion des Wasserdampfdiffusionswiderstandes festgestellt werden. Die Ergebnisse von Zech (1998) zeigen eine unwesentlich geringe Erhöhung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes durch die Beigabe von Kaseinen und auch bei Blöchl-Wirts (2001) konnte nur eine geringe Erhöhung festgestellt werden. Bei Herm (1997) konnte bei sehr hohen Schichtdicken eine Erhöhung der μ -Werte beobachtet werden, wobei im Zusammenhang mit geringen Schichtdicken, die Zugabe von Kaseinen eine Reduktion des Wasserdampfdiffusionswiderstandes bewirkte. Daraus und unter Anbetracht der verwendeten Zugabemengen (BDK: 0,5-1,5%, HER: 5%, ZEC: 20%, BLW: 1,5%) kann geschlossen werden, dass Kasein nur in geringen Mengen zu einer Reduktion des Wasserdampfdiffusionswiderstandes und damit zu einer positiven Beeinflussung der Anstricheigenschaften führt, und ein zu hoher Anteil an Kaseinen diesen Parameter eher negativ beeinflusst.

Die gleichen Rückschlüsse können bei Leinöl als Modifikation getroffen werden. Die Vergleichsdarstellung zeigt, dass hohe Leinölzugaben eher zu einer Erhöhung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes führen, während sich geringere Zugabemengen sogar positiv auswirken, indem der Wasserdampfdiffusionswiderstand unverändert bleibt bzw. teilweise auch reduziert wird.

Durch die unterschiedlichen Ergebnisse von Blöchl-Wirts (2001) bei Ziegel- und Mörtelproben kann auch eine Abhängigkeit des Substrats auf die Wasserdampfdiffusion nicht ausgeschlossen werden. Wobei hier anzumerken ist, dass die mit Leinöl modifizierten Anstriche auf Mörtelproben auch Kaseinzusätze enthalten. Eine gegenseitige Beeinflussung beider Modifikationen muss ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Die Zugabe von Kunststoffdispersionen führte bei Boenkendorf/Degenkolb/Knöfel (1993) zu einer Reduktion des Wasserdampfdiffusionswiderstandes, während bei Ghaffari (2005) und Herm (1997) eine Erhöhung und bei Dreuse/Nehring (2004) sowie Zech (1998) keine Veränderung festgestellt werden konnte. Ein Rückschluss auf die Zugabemenge kann hier nicht getroffen werden, vielmehr scheint abermals der Versuchsaufbau und die Zusammensetzung der Kunststoffdispersion ausschlaggebend für divergierende Ergebnisse zu sein. Ebenso muss abermals berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse von Boenkendorf/Degenkolb/Knöfel (1993) auf Untersuchungen von Mörtelproben und nicht auf Anstrichen beruhen.

Austrocknung

Beim Vergleich der Untersuchungen zur Austrocknungsgeschwindigkeit können die meisten übereinstimmenden Ergebnisse festgestellt werden.

Der Vergleich von Kalkbeschichtungen mit anderen Anstrichsystemen zeigt, dass Kalkanstriche die höchsten Austrocknungsgeschwindigkeiten aufweisen und nur der Silikatanstrich ein vergleichbar gutes Trocknungsverhalten aufweist.

Im Vergleich mit unbeschichteten Vergleichsproben kann bei fast allen Autoren eine Reduktion der Trocknungsgeschwindigkeit durch die Kalkbeschichtung festgestellt werden. Einzig die Untersuchungen von Trauningger (2007) zeigen eine Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit durch die Kalkbeschichtung. Auffallend dabei ist, dass nur bei Trauningger (2007) von einem freskalen Anstrichauftrag zwischen den einzelnen Anstrichschichten ausgegangen werden kann.¹⁹¹ Daraus kann geschlossen werden, dass die Wahl der Auftragsart (fresco/secco) die hygrischen Eigenschaften, zum Beispiel durch die Bildung von dichten Sinterhäutchen beim Abbinden, beeinflusst.

¹⁹¹ Unter der Annahme dass gerade im Zusammenhang mit sehr dünnen Anstrichschichten unter Laborbedingungen bei Trocknungszeiten von mehr als 1 Stunde nicht mehr von einem freskalen Anstrich gesprochen werden kann.

Beim Vergleich der Untersuchungen verschiedener Modifikationen zeigen sich abermals unterschiedliche Ergebnisse.

Die Auswirkung durch die Beigabe von Kaseinpulver zeigt bei Blöchl-Wirts (2001) keine bzw. nur eine geringfügige Reduktion der Austrocknungsgeschwindigkeit, während bei Zech (1998) eine geringfügige Erhöhung festgestellt werden konnte. Grund dafür könnten abermals unterschiedliche Zugabemengen oder die Beeinflussung durch unterschiedliche Substrate sein.

Die Zugabe von Kunststoffdispersionen zeigte bei Bermoser (2008) eine Reduktion der Austrocknungsgeschwindigkeit, während bei Zech (1998) keine Veränderung festgestellt werden konnte. Die Zugabemengen der Modifikation sind in beiden Fällen gleich, jedoch hat Bermoser (2008) zusätzlich Marmormehl beigemischt. Daraus kann angenommen werden, dass der Zusatz von Marmormehl das Austrocknungsverhalten reduziert.

Die Auswirkung durch die Zugabe von Leinöl ist ebenso nicht eindeutig. Während bei Brandes (1995) in allen Trocknungsabschnitten eine Reduktion der Austrocknungsgeschwindigkeit ermittelt werden konnte, zeigte sich sowohl bei Zech (1998) als auch bei Blöchl-Wirts (2001) am Beginn eine wesentlich höhere Geschwindigkeit und erst mit abnehmendem Wassergehalt eine Reduktion der Trocknungsgeschwindigkeit durch die Modifikation mit Leinöl. Die unterschiedlichen Ergebnisse gehen auch mit unterschiedlichen Zugabemengen einher. Bei Brandes (1995) wurden wesentlich höhere Zugabemengen verwendet als bei Zech (1998) und Blöchl-Wirts (2001). Daraus kann abermals geschlossen werden, dass eine zu hohe Beigabe von Leinöl die Austrocknungsgeschwindigkeit reduziert, während geringere Mengen durchaus zu einer verbesserten Trocknung führen können, wobei hier anzumerken ist, dass sowohl Zech als auch Blöchl-Wirts auf Basis derer Ergebnisse dem Zusatz von Leinöl eine austrocknungshemmende Eigenschaft zuweisen (vgl. Blöchl-Wirts (2001)) bzw. die kontinuierlich abnehmende Trocknungsgeschwindigkeit betonen (vgl. Zech (1998)). Beide Autoren gehen davon aus, dass vor allem der Trocknungsabschnitt im Bereich der Probenfeuchte zwischen 50 und 75% des maximalen Wassergehaltes maßgeblich ist, da dieser Trocknungsabschnitt hauptsächlich durch die kapillaren Poreneigenschaften des Trocknungsgutes bestimmt ist und der erste Trocknungsabschnitt vorwiegend von den äußeren Klimabedingungen wie Temperatur, Luftbewegung etc. abhängt (vgl. Blöchl-Wirts (2001), S.12,13, Zech (1998), S.74f).

Diese Meinung kann hier nicht geteilt werden, da eine erhöhte Austrocknungsgeschwindigkeit bei hohen Probefeuchtigkeitsgehalten vor allem bei porösen Anstrichstoffen großer Bedeutung beigemessen werden muss. Durch kurzzeitige Schlagregenbelastungen kann es in diesen Fällen im Substrat zu kurzfristig hohen Wasseransammlungen kommen, deren rasche Austrocknung gewährleistet werden muss, um somit Feuchteschäden vermeiden zu können (z.B. an relativ milden Wintertagen, wo die Gefahr von Frostschäden durch den Wechsel von lang anhaltenden Regengüssen mit darauffolgenden kurzen Forstperioden besonders hoch ist)¹⁹². Außerdem scheint es wichtig, nicht nur die Trocknungsgeschwindigkeiten, sondern auch den absoluten Gehalt des ausgetrockneten Wassers in einer bestimmten Zeitspanne zu betrachten. Nur so kann beurteilt werden, ob das aufgenommene Wasser auch wieder vollständig austrocknen kann. Eine erhöhte Austrocknungsgeschwindigkeit bei hohen Wassergehalten kann somit auch bei Vorhandensein reduzierter Austrocknungsgeschwindigkeiten, bei entsprechend geringeren Probenfeuchten durchaus zu einer insgesamt besseren Austrocknung des Substrats führen als umgekehrt.

¹⁹² vgl. Stadlbauer/Künzel (1999)

Gesteinssubstrat nach Verwitterungseinwirkungen

Brandes (1995) konnte feststellen, dass die Salzbelastung in einer Tiefe von 0-1cm bei den mit Kalkkasein beschichteten Prüfkörpern geringer war, als die von unbeschichteten und den mit Silikatanstrichen modifizierten Proben. Im Vergleich mit den anderen Beschichtungssystemen war die Salzbelastung in etwa gleich, während Blöchl-Wirts (2001) auch bei den Dispersions-Silikatanstrichen sowie den Silikonharzanstrichen höhere Sulfatbelastungen im Gesteinssubstrat feststellen konnte. Diese Ergebnisse decken sich auch mit den Salzuntersuchungen der Beschichtungen, wo bei allen untersuchten Forschungsarbeiten die höchsten Salzgehalte in den Kalkschlämmen verzeichnet werden konnten, was auf eine Opferschichtfunktion dieser Anstrichsysteme schließen lässt.

Vor allem durch die Ergebnisse von Trauninger (2007) konnte aufgezeigt werden, dass viele moderne Anstrichsysteme den Erwartungen als schutzgebende Schicht nicht gerecht werden und auch bei Brandes (1995) und Blöchl-Wirts (2001) konnte keine Verbesserung der Schutzwirkung durch organische Anstrichsysteme festgestellt werden.

Die Ergebnisse von Trauninger (2007) zeigten sowohl bei einer simulierten Salzkristallisation, als auch bei den Frost-Tauwechselversuchen, dass nur durch die Beschichtung mit einem Kalkanstrich eine Beschädigung des Gesteinsgefüges verhindert werden konnte.

Weiters konnte durch Blöchl-Wirts (2001) im Vergleich mit reinen Kalkbeschichtungen eine Reduzierung des Sulfatgehaltes im Substrat durch die Modifikation mit Leinöl festgestellt werden.

3.1.3 Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung

In den genannten Arbeiten wurden die Auswirkungen von unterschiedlichen Verwitterungen (Frost-Tauwechsel, Einwirkung von Salzen, UV-Strahlung, etc.) sowohl anhand von Freifeldversuchen, als auch durch Verwitterungssimulationen im Labor untersucht:

Brandes (1995) führte sowohl eine 2-jährige Freibewitterung als auch Verwitterungssimulationen im Labor durch und konnte somit einen direkten Vergleich ziehen. Es zeigte sich, dass die Zerstörungsmechanismen der natürlichen Verwitterung sehr gut im Labor simuliert werden konnten und zu ähnlichen Ergebnissen führten (mit Ausnahme von Salzbelastung und mikrobieller Besiedelung), die Prüfkörper jedoch einen insgesamt stärker ausgebildeten Verwitterungszustand aufzeigten als bei der Freibewitterung.¹⁹³ Somit kann davon ausgegangen werden, dass mittels Verwitterungssimulationen im Labor, die natürliche Verwitterung zumindest tendenziell widerspiegelt wird und die Ergebnisse der genannten Forschungsarbeiten miteinander vergleichbar sind, wobei folgende Parameter nach den jeweiligen Verwitterungssimulationen gegenübergestellt wurden:

- Schäden durch Salzeinwirkung wie: Salzbelastung in der Beschichtung, Salzschädigung durch Kristallisation sowie Beurteilung von Salzausblühungen
- Anstrichschäden nach Bewitterung wie Blasenbildung, Kreidung, Abrieb, Rissbildung, Haftzugfestigkeit etc.
- Abrieb und Haftzugfestigkeit der Beschichtung
- Vollständigkeit der Karbonatisierung, Karbonatisierungsgrad und –geschwindigkeit

Andere in den genannten Forschungsarbeiten untersuchte Parameter zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung werden in der nachfolgenden Gegenüberstellung ausgeklammert, um einerseits die Übersichtlichkeit zu wahren und andererseits nur die, für diese Arbeit, relevanten Parameter zu charakterisieren und darzustellen.

Eine detaillierte Auflistung der zu Grunde gelegten Versuchsanordnungen der einzelnen Forschungsergebnisse befindet sich im Anhang A.

¹⁹³ vgl. Brandes (1995), S.95

Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

	Schädigung der Beschichtung nach Verwitterung (Abplatzungen, Risse, Blasen, Salzbelastung)							Kreidung, Abrieb nach bzw. durch Verwitterung					Haftzugfestigkeit			Karbonatisierungsgeschwindigkeit		
	BDK	BER	BLW	BRA	GHA	HER ¹⁹⁶	TRA	BLW	BRA	GHA	ZEC ¹⁹⁷	TRA	BLW	GHA	BRA ¹⁹⁸	BER	HER	PAS
Vergleich kalkbeschichtetes Substrat – Substrat mit unterschiedlichen Anstrichen																		
Silikatanstrich	-	-	-	↓	-	↓	-		↑	-	-	-		-	↓	-	-	-
Dispersions-Silikatanstrich	-	-	↓	↓	↓	↓	-	↓	↓	↓	-	-		↑	↑	-	-	-
Kunststoffdispersionsanstr	-	-	-	↓	-	↓	-		↓	-	-	-		-	↑	-	-	-
Silikonharzanstrich	-	-	↓	↓	↓	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓		↑	↑	-	-	-
Ölanstrich ²⁰⁰	-	-	-	↓	↓	↓	-		↓	↓	-	-		↑	↑	-	-	-
"Nanobeschichtung"	nicht beurteilbar (Beschichtung ist mit freiem Auge nicht erkennbar)																	
Vergleich modifizierte Kalkanstriche mit Kalkanstrich ohne Zusätze																		
Kasein	↓	-	↓ ²⁰¹	-		-	-	↓	-	-	↓	-		-	-	-	↓	↓
Leinöl	-	-	-	↓	↓	-	-	↓	↓	↔ ²⁰²	↓	-	↑	↑	↑	-	↓	↓
Kunststoffdispersion	↓	↓	-	-	↓	-	-		-	↓ ²⁰³	↓	-	-	↑	-	↓	↓	↔

↓ Reduktion des jeweiligen Parameters
 ↑ Erhöhung des jeweiligen Parameters
 ↔ keine wesentliche Veränderung des jeweiligen Parameter
 keine Übereinstimmung der Ergebnisse
 Übereinstimmung der Ergebnisse
 nur ein Ergebnis verfügbar, somit ist kein Vergleich möglich

Tabelle 3-6: Gegenüberstellung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Beschichtungen im Vergleich zur Kalkbeschichtung

¹⁹⁴ Untersuchung von Kalkmörteln. Beurteilung des Schädigungsgrades von Mörtelprismen.
¹⁹⁵ Vergleich des Schädigungsgrades auf Elmkalk (Mittelwert aus Rissbildung und Ablösung) Verschmutzung und Besiedelung durch Mikroorganismen bleiben unberücksichtigt.
¹⁹⁶ Untersuchungen auf Gotlandsandstein an der Fassade des Lübecker Rathauses.
¹⁹⁷ Beurteilung anhand des Gitterschnittkennwertes an Gips-Kalk-Putzen mit Beschichtungen (Tabelle 15).
¹⁹⁸ Eigeninterpretierte Ergebnisdarstellung auf Basis der Mittelwerte der Haftzugfestigkeiten auf Elmkalk, Obernkirchner und Baumberger Sandstein. Gerundet auf eine Genauigkeit von 0,1.
¹⁹⁹ Im Vergleich mit Kalkkaseinfarbe + Leinöl ist jedoch ein höherer Abrieb feststellbar.
²⁰⁰ Hauptbindemittel Öl (z.B. Leinölfarben, Öl/Bleiweißfarben, ...).
²⁰¹ Bei höheren Zugabemengen von Kasein konnte jedoch eine Zunahme der Rissbildung beobachtet werden!
²⁰² Hohe Streubreiten innerhalb der einzelnen Chargen, tendenziell aber eher keine wesentliche Verbesserung, eher Verschlechterung des Abriebs.
²⁰³ Hohe Streubreiten innerhalb der einzelnen Chargen, tendenziell aber eher geringere Abriebe feststellbar.

Auswertung und Interpretation der Zusammenfassung

Die in Tabelle 3-6 dargestellte Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse zeigt größtenteils übereinstimmende Ergebnisse.

Beim Vergleich der einzelnen Anstrichsysteme zeigt sich sehr deutlich, dass die Kalkbeschichtung die geringste Dauerhaftigkeit in Bezug auf Risse, Abplatzungen sowie Abrieb und Haftzugfestigkeiten aufweist. Nur der Silikatanstrich weist bei den Versuchen von Brandes (1995) noch höhere Abriebe und geringere Haftzugfestigkeiten auf.

Alle Modifikationen scheinen die Dauerhaftigkeit zu erhöhen, nur bei Ghaffari (2005) kann durch die Modifikation mit Leinöl keine wesentliche Reduzierung des Abriebverhaltens festgestellt werden. Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Kalkanstriche immer Marmormehl enthalten. Eine maßgebliche Beeinflussung der Eigenschaften durch die Zugabe von Marmormehl ist damit anzunehmen. Weiters konnte durch Blöchl-Wirts (2001) festgestellt werden, dass höhere Kaseinzugaben nach einer bestimmten Anzahl von Beschichtungsfolgen zu Spannungen des Anstriches führen, wohingegen geringere Kaseingehalte keine sichtbare Risse bewirken.

Die prinzipielle Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch die Modifikationen kann dazu führen, dass die Kalkbeschichtungen im Vergleich mit anderen Anstrichsystemen nun positiver zu bewerten sind. Das zeigt sich z.B. bei Brandes (1995), wo Dispersionssilikatanstriche im Vergleich mit Leinöl und Kasein modifizierten Kalkanstrichen höhere Abrieb- und Kreidungserscheinungen aufweisen, und auch bei Blöchl-Wirts (2001) konnten, durch die Modifikation mit Kaseinen, ähnliche Ergebnisse beobachtet werden.

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit wird durch alle Modifikationen reduziert. Nur bei Paschinger (2004) konnte durch die Zugabe von Kunststoffdispersionen zum Kalkanstrich keine Veränderung des Karbonatisierungsgrades festgestellt werden.

3.1.4 Zusammenfassung: vorhandene Forschungsarbeiten

Der Vergleich der einzelnen Untersuchungsergebnisse zu den hygrischen Parametern führt teilweise zu sehr widersprüchlichen Aussagen. Vor allem der Einfluss unterschiedlicher Additive zum Kalkanstrich bleibt unklar. Es zeigt sich jedoch die Tendenz, dass die hygrischen Eigenschaften durch die Zugabe von geringen Mengen Leinöl verbessert werden, während die Zugabe von Kunstharzdispersionen zu keiner signifikanten Veränderung führt.

Der Vergleich unterschiedlicher Anstrichsysteme zeigt, dass sich die hygrischen Eigenschaften anorganischer Anstrichsysteme maßgeblich von Beschichtungen auf Basis organischer Bindemittel unterscheiden. Organisch basierte Systeme weisen zwar ein höheres Wasserrückhaltevermögen auf, zeigen aber auf der anderen Seite auch eine reduzierte Austrocknungsgeschwindigkeit. Offen bleibt dabei die Frage des Zusammenhanges zwischen der Wasseraufnahme und -abgabe, da nur durch eine entsprechende Verknüpfung dieser beiden Parameter eine Aussage zu einer möglichen Wasserakkumulation im Baustoff getroffen werden kann.

Auf Basis der Untersuchungen zum Zustand des Gesteinssubstrates kann festgestellt werden, dass Kalkbeschichtungen als Opferschichten wirken und insgesamt eine höhere Schutzwirkung aufweisen als moderne Beschichtungssysteme. Offen bleibt dennoch die Frage, wie unterschiedliche Modifikationen diese Schutzwirkung verändern oder, wie erste Ergebnisse von Blöchl-Wirts (2001) zeigen, verbessern können.

Dennoch konnte in allen hier dargestellten Forschungsarbeiten festgestellt werden, dass Kalkbeschichtungen die geringste Dauerhaftigkeit im Vergleich mit anderen Anstrichsystemen aufweisen, wobei eine entsprechende Modifikation des Kalkanstriches mit organischen Zusätzen wie Leinöl oder Proteinen durchaus zu einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit führt.

3.2 TEIL 3 – AUSWIRKUNGEN DER KALKMODIFIKATIONEN LT. EMPIRISCHEN LEHRMEINUNGEN

3.2.1 Grundlagen

Folgende Lehrbücher bzw. Fachartikel dienten als Grundlage für die Literaturrecherche:

Name des Autors	Titel der Arbeit	Art des Beitrages	Kurzb.*
Boué, A.	Geschichte der Anstrichstoffe. In: Boué, Lindner (Hg.) – Farbe in der Steinrestaurierung, S.5-10 (2000)	Workshopbericht	BOU
Schönburg, K.	Historische Beschichtungstechniken. Erhalten und Bewahren. (2006)	Fach-/Lehrbuch	SCH
Whelte, K.	Werkstoffe und Techniken der Malerei. (1981)	Fach-/Lehrbuch	WHE
Schramm, H.-P., Hering, B.	Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung (1988)	Fach-/Lehrbuch	SHE
Brasholz, A.	Der Fassadenanstrich. Untergründe, Werkstoffe, Ausführungen (1984)	Fach-/Lehrbuch	BRS
Brandes, Ch.	Anstriche und Beschichtungen für Bauwerke aus Naturstein. Eigenschaften, Anforderungen und praxisbezogene Anwendungen. (1999)	Praxishandbuch	BRA
österreichisches Bundesdenkmalamt	Mitteilungen zur Konservierung und Restaurierung. Stein - Blatt 7. Restaurierwerkstätten und Zentrallabor. (2000)	Mitteilungsblatt**	BDA1
österreichisches Bundesdenkmalamt	Mitteilungen zur Konservierung und Restaurierung. Fassaden - Blatt 4. Restaurierwerkstätten und Zentrallabor. (2001)	Mitteilungsblatt**	BDA2
Sneathlage, R.	Leitfaden Steinkonservierung. Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. (2008)	Leitfaden	SNE
SPAB (Society for the Protection of Ancient Buildings)	Technical Q&A 14: Lime; 18: Limewash (2009)	Richtlinie	SPA
Essex County Council planning Dept.	Conservation in Practice: Plastering & Limewash. Advice on the maintenance on traditional houses and service buildings. (1999)	Leitfaden (Broschüre)	ECC
Bob Bennett	Awash with Colour. The Use of Limewash as a Decorative and Protective Coating (1997)	Artikel	BB
Sally Strachey	Isle Abbots. Lime technology in the 21st century (2006)	Artikel	SS

* Kurzbezeichnung für nachfolgende Zusammenfassungen

** aufgrund der Vermeidung von Gewährleistungsansprüchen zurückgezogen

Tabelle 3-7: Zusammenfassung der gegenübergestellten und analysierten Lehrmeinungen

3.2.2 Zusammenfassung der wesentlichsten Aussagen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Literaturrecherche tabellarisch veranschaulicht. Diese schematische Darstellung soll lediglich den Stand der oben genannten Literaturlage konkretisieren und wurde soweit als möglich ohne jegliche Eigeninterpretation zusammengefasst.

Erst die letzten beiden Spalten (Hauptzuordnung sowie Interpretation) geben Aufschluss über die Eigeninterpretation der in der Literatur genannten Auswirkungen. Diese Zuordnungen und Interpretationen erfolgten in einer stark vereinfachten Form, um anschließend eine bessere Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus den Forschungsarbeiten gewährleisten zu können.

LITERATURDARSTELLUNG					EIGENINTERPRETATION	
Autor	in Form von	positive Auswirkungen	ev. negative Auswirkungen	Begründung des Autors	Hauptzuordnung zu:	Auswirkung
BOU	Kochsalz	Erhöhung der Bindekraft (S.6)			Salze	?
BOU	Alaun	Erhöhung der Bindekraft (S.6)			Salze	?
SCH	Alaun-Voranstrich für Kaseinfarben	Ergibt wasserfesten Anstrich (S.24)		Das Kaseineiweiß erhärtet durch Alaun (auch durch Formalin) zu wasserfestem Bindemittel.	Salze	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
SCH	10Vol% Salzheringslake	Erhöhung der Festigkeit (S.24)		das hygroskopische Kochsalz hält die Feuchtigkeit zurück → verbesserte Karbonatisierung, durch das Fett in der Lake bildet Kalk eine wasserunlösliche Kalkseife	Mischform: Salz, Fett, Proteine, etc.	Erhöhung der Festigkeit
BB	sea water (during the slaking process) and common salt	reduce dusting	Salze führen zu Zerstörungen		Salze	Erhöhung der Verschmutzungsbeständigkeit
WEH	Blut	ist ein uraltes Bindemittel, dauerhafte Bindung (S.227)		Aufgrund des Albumingehaltes dauerhafte Bindung	Mischform: Proteine, Salze, Zucker	?
SCH	Blutserum	Bindemittel für Farbstoffe und Farbpigmente und als bindender Zusatz auf Kalk- und Lehmörtel (S.68)			hauptsächl. Proteine	Erhöhung des Pigmentbindevermögens
BOU	Blutwasser (Serum)	Erhöhung der Bindekraft (S.6)			hauptsächl. Proteine	?
SHE	Kasein aus Kuhmilch (Quark, Pulver)	binden wasserunlöslich ab (S.116) Filme trocknen hart (S.116) großes Haftvermögen (S.116)	Mikroorganismen können sich ansiedeln (S.116) Erhärten unter Spannungen (S.116)		Kaseine	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Zunahme von Rissen Erhöhung der Haftzugfestigkeit Zunahme an biogener Besiedelung
SPAB	casein		support mould growth		Kaseine	Zunahme an biogener Besiedelung
BB	casein	increases the vapour permeability, resists dusting being a weak form of adhesive			Kaseine	Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit Erhöhung der Verschmutzungsbeständigkeit Erhöhung der Haftzugfestigkeit
SS	10% casein	imparts waterproofing qualities			Kaseine	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
ECC	casein, which can be obtained as skimmed milk	help the limewash shed water			Kaseine	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
BRS	pulverförmiges Casein mit Borax aufgeschlossen, Quark mit Lauge	Wetterbeständigkeit wird erhöht (S.44) Erhöhung des Pigmentanteils (S.44)	bei zu großer Beimengung von Kasein (ab50%) kann der Anstrich spröde werden und die Haftfestigkeit der einzelnen Schichten nimmt ab. (S.44)		Mischform: Kasein, Salz (bzw. Seife)	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Zunahme der Verwitterungsbeständigkeit Zunahme des Pigmentbindevermögens Zunahme der Risse bei zu großer Beimengung Abnahme der Haftzugfestigkeit bei zu großer Beimengung
BRA	Kasein (rein oder als Alkalicasein)	höheres Pigmentbindevermögen (S.13) erhöhte Wetterbeständigkeit (S.13) verbesserte Scheuerbeständigkeit (S.13)	Anfälligkeit gegenüber dem Befall von Schimmelpilzen und anderen Mikroorganismen (S.13) bei zu hohem Caseinanteil (ab 80%) zu hohe Spannungen (S.37)		Kaseine	Zunahme des Pigmentbindevermögens Zunahme der Verwitterungsbeständigkeit Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Zunahme des Abriebwiderstandes Zunahme an biogener Besiedelung Zunahme der Risse bei zu großer Beimengung
WEH	Kasein von Magermilch (Quark, Pulverkasein). Altes Rezept: Kalk aus der Grube statt Wasser mit Magermilch vermengen	relativ schwache aber dauerhafte Bindung (S.227)			Kaseine	?
SCH	5-10Vol% Kuh-od. Ziegenmilch Topfen etc., oder 2-5% Kalkkaseinbindemittel (S.168)	Erhöhung der Festigkeit (S.24, 168) Erhöhung der Wischfestigkeit (S.165) Erhöhung der Haftfestigkeit (S.165) Bindemittel für Farbstoffe und Farbpigmente (S.68) Erhöhung der Feuchtigkeitsbeständigkeit (S.24) Erhöhung der Wetterbeständigkeit (S.24)			Kaseine	Zunahme der Festigkeit Zunahme des Abriebwiderstandes Erhöhung der Haftzugfestigkeit Zunahme des Pigmentbindevermögens Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Zunahme der Verwitterungsbeständigkeit
HES	in Eigelb gebundene Farben in Verbindung mit Kaseinen oder Ölen	Durch Formalin, Alaun od. Lichteinwirkung werden sie wasserfest (S.117) Lecithin im Ei dient als Emulgator für Kaseine, Öle und Harze (S.117)	Eiaufstriche trocknen sehr spröde und hart auf. (S.117)	Das im Ei enthaltene Lecithin ist die Ursache, dass wässrige Anteile, wie Kaseine und Grummen oder Öle und Harze als nichtwässrige Bestandteile emulgiert werden können.	Mischform: Protein + Fett	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Erhöhung der Risse

LITERATURDARSTELLUNG					EIGENINTERPRETATION	
Autor	in Form von	positive Auswirkungen	ev. negative Auswirkungen	Begründung des Autors	Hauptzuordnung zu:	Auswirkung
BRS	Weißzement (10-20%)	Erhöhung der Wetterbeständigkeit (S.45) Anfälligkeit gegen sauren Regen wird vermindert (S.45) Pigmentbindung und Deckvermögen wird verbessert (S.45)			Zement	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Zunahme der Verwitterungsbeständigkeit Zunahme des Pigmentbindevermögens
BRA	Weißzement	Erhöhung der Wetterbeständigkeit (S.37)	Erhöhung der Sprödigkeit ab ca. 20% Weißzement (S.37)		Zement	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Zunahme der Verwitterungsbeständigkeit Zunahme der Risse
SCH	Portland- bzw. Weißzement	Erhöhung der Wasserbeständigkeit (S.161) Erhöhung der Festigkeit (S.165)			Zement	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Zunahme der Festigkeit
WEH	Bimssand	Erhöhung der Festigkeit (S.281)			Ziegel- und Gesteinsmehle	Zunahme der Festigkeit
SPAB	Ziegelmehl	hydraulic lime or pozzolanic additive such as tile dust: harder set, extra durability in wet conditions, improved adhesion on less absorbent surfaces			Ziegel- und Gesteinsmehle	Zunahme der Festigkeit Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Erhöhung der Haftzugfestigkeit
SCH	Ziegel- Quarz- u. Gesteinsmehle ca. 5Vol%	Füllstoff zum Ausfüllen von groben Poren und Schwindrissen (S.165)			Ziegel- und Gesteinsmehle	Reduktion der Risse
BDA, Blatt 4 (Fassaden)	Kreide, Marmormehl etc. zum Voranstrich	Verbesserung der Haftung zum Untergrund (S.1)			Ziegel- und Gesteinsmehle	Erhöhung der Haftzugfestigkeit
WEH	Lava, Tonziegelmehl, Tonziegelsplitt, Schamotte	Erhöhung der Festigkeit (S.281)			Ziegel- und Gesteinsmehle	Zunahme der Festigkeit
SNE	Quarzsand	Erhöhung des E-Moduls und der Festigkeit (S.142)		aufgrund der scharfkantigen und splittrigen Körnung	Ziegel- und Gesteinsmehle	Zunahme der Festigkeit
	Kalksteinsand Marmorsand	Erniedrigung des E-Moduls (S.142)				Erhöhung der Elastizität
SCH	venezianische Seife (Olivenöl wird mit Kernöl verkocht)	Erhöhung der Festigkeit (S.172) Erhöhung der Nasswischfestigkeit (S.176)			Öle + Fette	Zunahme der Festigkeit Zunahme des Abriebwiderstandes
BRA	Leinöl	Wasserabweisend → Erhöhung der Wetterbeständigkeit (S.13)			Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
SCH	Pflanzenöl u Harzlösung	Erhöhung der Elastizität (S.180)			Mischform: Öl + Harz	Erhöhung der Elastizität
BRS	Leinöl, Firnisse	Wetterbeständigkeit wird erhöht (S.44)		Ester wird zu wasserunlöslicher Seife umgesetzt	Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Zunahme der Verwitterungsbeständigkeit
SCH	Leinöl (bis 2Vol%)	Erhöhung der Festigkeit (S.172)			Öle + Fette	Zunahme der Festigkeit
BDA2	0,5% Leinöl in Schlußanstrich	Hydrophobierung		aufgrund des "Kalkseifens"	Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
BDA1	1-2% Leinöl in Schlußanstrich	Hydrophobierung			Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
SPAB	raw linseed oil	improve water shedding or adhesion	reduce breathability, mould growth		Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Erhöhung der Haftzugfestigkeit Reduktion der Wasserdampfdiffusionsfähigkeit
BB	raw linseed oil	to make limewash water droplet resistant while retaining most of ist quality of vapour permeability			Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit keine Veränderung des Dampfdiffusionswiderstandes
ECC	linseed oil	help the limewash shed water			Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
ECC	tallow	help the limewash shed water			Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
SPAB	tallow	improve water shedding or adhesion	reduce breathability, mould growth		Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit Erhöhung der Haftzugfestigkeit Reduktion der Wasserdampfdiffusionsfähigkeit Zunahme an biogener Besiedelung
BB	tallow	to make limewash water droplet resistant while retaining most of ist quality of vapour permeability			Öle + Fette	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit keine Veränderung des Dampfdiffusionswiderstandes
BRA	Kunststoffdispersion	Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften (S.37) Verbesserung der Scheuerbeständigkeit (S.37) Verbesserung der Wetterbeständigkeit (S.37)			Kunststoffdispers.	Zunahme des Abriebwiderstandes Zunahme der Verwitterungsbeständigkeit Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
BDA2	Siloxane (z.B. Wacker 290S)	Erhöhung der Feuchtigkeitsbeständigkeit (S.2)			Kunststoffdispers.	Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
BDA2	Primal (2-3Vol%)	Verbesserung der Haftung zum Untergrund (S.1)			Kunststoffdispers.	Erhöhung der Haftzugfestigkeit

Tabelle 3-8: Zusammenfassung der Literaussagen inkl. Eigeninterpretation zur Kategorisierung (grau hinterlegt sind Aussagen welche auf Basis der Überlegungen in Kap. 3.2.3 nachfolgende unberücksichtigt bleiben)

3.2.3 Auswertung und Interpretation der empirischen Lehrmeinung

Allgemeines

Da sich diese Arbeit hauptsächlich auf die hygrischen Eigenschaften, die Dauerhaftigkeit sowie die Schutzwirkung des Anstriches konzentriert und das äußere Erscheinungsbild der Beschichtung dabei hintangestellt wird, bleiben bei der nachfolgenden Zusammenfassung und Interpretation folgende Parameter unberücksichtigt:

- Zunahme des Pigmentbindevermögens²⁰⁴
- Zunahme an biogener Besiedelung
- Erhöhung der Verschmutzungsbeständigkeit
- Auswirkungen auf die Festigkeit des Anstriches (da der Begriff „Festigkeit“ nur schwer interpretierbar ist)²⁰⁵

Zusätzlich werden folgende Zusätze für nachfolgende Interpretationen ausgeklammert:

- Salze: müssen als Grundlage für maßgeblich bauschädliche Mechanismen angesehen werden
- Blut und Blutserum: einerseits unter modernen Fertigungsmethoden als auch aus ethischen Gründen kaum vernünftig herstellbar, andererseits handelt es sich dabei um keine klar definierte Modifikationsform (Mischung aus Salz, Zucker, Proteinen,)
- jegliche Mischformen an Zusätzen, da eine Interpretation der Auswirkung einzelner Modifikationen somit kaum mehr möglich ist.
- Zement, da durch die Zugabe von Zement Alkalien in den Baustoff gelangen und so zu Salzschäden führen können (vgl. Pkt. 1)

Außerdem werden nachstehende Eigenschaften folgendermaßen interpretiert und zugeordnet:

- Zunahme der Verwitterungsbeständigkeit → Zunahme der Dauerhaftigkeit der Beschichtung
- Erhöhung der Elastizität → Reduktion der Rissbildung

²⁰⁴ „Das Pigmentbindevermögen (PBV) ist die Fähigkeit eines Bindemittels, die Pigmente und Füllstoffe einer Farbe zu einem Film mit den gewünschten Gebrauchseigenschaften gewissermaßen „zusammenzukleben.“ (Baumstark/Schwartz (2001), S.229). Kalk selbst kann nur sehr wenige Pigmente binden. Deshalb können reine Kalkfarben auch nur mit Pastelltönen eingefärbt werden. Durch einige Zusätze kann eine Erhöhung der Pigmentbindekraft und somit eine dunklere Farbgebung erzielt werden.

²⁰⁵ Die Festigkeit ist ein Maß für die ertragbaren Belastungen eines Werkstoffes. Es gibt verschiedene Festigkeitskennwerte wie Druck-, Zug-, Biege-, Knick- und Scherfestigkeit. Es kann aber auch sein dass es sich bei der, in der Literatur beschriebenen, Festigkeit eigentlich um die Härte handelt, wobei mechanisch gesehen die Härte eines Werkstoffes keinesfalls dasselbe ist wie die Festigkeit des jeweiligen Materials, da die Härte den Widerstand eines Werkstoffes gegen plastische Formänderungen durch Eindringen oder Durchdringen eines anderen Körpers beschreibt (vgl. z.B. Bargel (2008), S.114). Es könnte sich bei der genannten Festigkeit aber auch um die Steifigkeit des Materials handeln, welche den Widerstand gegen elastische Verformung eines Werkstoffes beschreibt. Durch eine Erhöhung der Steifigkeit kann zwar die Festigkeit gesteigert werden, trotzdem ist die Festigkeit nicht mit der Steifigkeit gleichzusetzen (vgl. Ilschner (2005), S.164/204).

Zusammenfassende Interpretation aus den empirisch ermittelten Erwartungshaltungen

Die nachfolgende tabellarische Zusammenfassung und Gegenüberstellung basiert auf den Aussagen der in Tabelle 3-8 genannten Literaturangaben. Es wird versucht, die Auswertungsinterpretationen der Autoren soweit als möglich wiederzugeben, eine gewisse Eigeninterpretation der Ergebnisse kann jedoch, aufgrund der Vereinfachung dieser Darstellung, nicht ausgeschlossen werden.

physikalische Eigenschaften	Modifikation und Auswirkung			
	Kaseine	Ziegel- u. Gesteinsmehle	Öle + Fette	Kunststoff-dispers.
Wasserdurchlässigkeit	↓	↓	↓	↓
Wasserdampfdurchlässigkeit	↑	-	↓ ↔	-
Haftzugfestigkeit	↑	↑	↑	↑
Abriebwiderstand	↑	-	↑	↑
Dauerhaftigkeit	↑	-	↑	↑
Rissbildung	↑	↓	-	-

↓ Reduktion des jeweiligen Parameters

↑ Erhöhung des jeweiligen Parameters

↔ keine wesentliche Veränderung des jeweiligen Parameter

orange widersprüchliche Aussagen

grün übereinstimmende Aussagen

hellgrün nur eine Literaturaussage verfügbar, somit ist kein Vergleich möglich

Tabelle 3-9: Zusammenfassung der Eigeninterpretationen aus den Aussagen der in Tabelle 3-8 dargestellten Literaturlauswertung.

Wie aus obiger Zusammenfassung ersichtlich wird, gibt es in der Literatur eine Vielzahl an Aussagen die eine äußerst übereinstimmende Interpretation zulassen. Beachtenswert dabei ist, dass bei allen Modifikationen ähnliche Auswirkungen, wie verminderte Wasserdurchlässigkeit, erhöhte Dauerhaftigkeit sowie verbesserte Haftzugfestigkeiten bzw. Abriebwiderstände beschrieben werden. Nur in Bezug auf die Rissbildung werden durch unterschiedliche Modifikationen auch verschiedene Auswirkungen erläutert. Während der Zusatz von Ziegel- und Gesteinsmehlen die Rissbildung vermindern soll, führt eine Modifikation mit Kaseinen und Zementen, lt. ausgewerteter Literatur, zu erhöhten Spannungsrissen.

Im Prinzip sind das Eigenschaften und Auswirkungen, die man sich von diesen Modifikationen erwarten würde. Im Vergleich mit den Ergebnissen der Forschungsarbeiten zeigt sich jedoch, dass diese erwarteten Eigenschaften mit der Realität oftmals nicht übereinstimmen. Vor allem die wasserhemmenden Eigenschaften können durch die Ergebnisse der Forschungsarbeiten nicht bestätigt werden. Gegenteilig zeigte sich sogar, dass die Wasseraufnahme durch einige Additive erhöht wird. Analog zu den Forschungsergebnissen konnte jedoch bestätigt werden, dass durch den Zusatz der meisten Additive die Dauerhaftigkeit des Kalkanstriches erhöht werden kann.

3.2.4 Zusammenfassung: empirische Lehrmeinungen

Die Literaturangaben sind zwar größtenteils eindeutig und übereinstimmend, sie widersprechen sich jedoch zu einem großen Teil mit den Ergebnissen der in Kap. 3.1 genannten Forschungsarbeiten.

Es scheint, dass viele Aussagen auf Basis „logischer Ansätze“ getroffen werden (z.B. die Zugabe von Kunstharz zum Kalkanstrich führt zu einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit und einer Verbesserung des hygrischen Verhaltens), was jedoch anhand der Forschungsergebnisse oftmals (wider Erwarten) nicht bestätigt werden konnte.

Aus diesem Grund werden für diese Arbeit im Wesentlichen nur die Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten, als Grundlage für die Zusammenfassung des Wissensstandes zu diesem Thema, herangezogen.

3.3 ZUSAMMENFASSUNG DER LITERATURAUSWERTUNG

Nachfolgend werden die, aus den Forschungsarbeiten²⁰⁶ ermittelten, klar definierten Aussagen, offene Fragestellungen und Annahmen daraus zusammengefasst und tabellarisch gegenübergestellt, um damit eine Grundlage für die nachfolgenden Laboruntersuchungen zu schaffen.

Klar definiert ist eine Aussage dann, wenn die Ergebnisse der Forschungsarbeiten korrelieren und entweder zumindest 2 Forschungsarbeiten miteinander verglichen wurden oder das Ergebnis einer einzelnen Forschungsarbeit eindeutig und nicht widersprüchlich mit anderen Ergebnissen ist.

Die Annahmen werden auf Basis der in den Interpretationen genannten Rückschlüssen getroffen und beantworten vorwiegend offene Fragestellungen. Zudem können Sie auch klar definierte Aussagen bestätigen oder erweitern. Sie dienen jedenfalls als Hypothese für die nachfolgenden Laboruntersuchungen.

Aussagen u. offene Fragestellungen bezüglich der Dauerhaftigkeit des Anstriches

klar definierte Aussagen = State of the Art	offene Fragen	Annahmen
Anstriche allgemein		
die Dauerhaftigkeit von anorganischen Anstrichsystemen wie Kalkbeschichtungen oder Silikatbeschichtungen ohne organische Zusätze ist geringer als die Dauerhaftigkeit von organischen Anstrichsystemen	Einfluss von Additiven auf die Dauerhaftigkeit von Anstrichen	durch die Zugabe von Additiven kann die Dauerhaftigkeit von Kalkbeschichtungen maßgeblich erhöht werden
	Einfluss der Konsistenz, Auftragungsart und Schichtenanzahl des Kalkanstriches auf dessen Eigenschaften	die Dauerhaftigkeit des Kalkanstriches hängt auch maßgeblich von der gewählten Konsistenz, Auftragungsart sowie der Schichtenanzahl des Anstriches ab
Einfluss von Additiven auf Kalkanstriche		
die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Kalkanstrichen wird durch die Zugabe von Leinöl und Kaseinen reduziert	Einfluss von Kunstharzdispersionen auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Kalkanstrichen	

Tabelle 3-10: Zusammenfassung der Aussagen bezüglich der Dauerhaftigkeit des Anstriches aus der Literaturlauswertung, als Grundlage für nachfolgende Laboruntersuchungen

²⁰⁶ die empirischen Lehrmeinungen bleiben, wie in Kap. 3.2.4 erläutert, in dieser Gegenüberstellung unberücksichtigt.

Aussagen u. offene Fragestellungen bezüglich der Dauerhaftigkeit des Gesteinssubstrates

klar definierte Aussagen = State of the Art	offene Fragen	Annahmen
Anstriche allgemein		
Anstriche basierend auf organischen Bindemitteln weisen im Vergleich mit anorganischen Anstrichsystemen ein höheres Wasserrückhaltevermögen bei einem gleichzeitig reduzierten Trocknungsverhalten auf	Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und Austrocknung (hygrisches Verhalten) zur Beurteilung einer möglichen Wasserakkumulation im Substrat	organische Zusätze führen (v.a. bei anorganischen Anstrichsystemen) zu einer Reduktion der Wasserdurchlässigkeit
	Einfluss unterschiedlicher Rezepturen kunstharzbasierender Anstriche (z.B. Veränderung des Füllstoffanteils) auf deren hygrischen Eigenschaften	die jeweiligen Rezepturen kunstharzbasierender Anstriche beeinflussen die hygrischen Eigenschaften maßgeblich
Kalkanstriche wirken als Opferschichten, wodurch die Dauerhaftigkeit des Gesteinssubstrates erhöht wird		viele moderne Anstrichsysteme weisen keine höhere Schutzwirkung auf als Kalkbeschichtungen
Kalkbeschichtungen beeinflussen den Wasserdampf-diffusionswiderstand des Substrates kaum	Diffusionswiderstand des Dispersionssilikatanstriches und des Silikonharzanstriches im Vergleich zum Kalkanstrich	
	Hygrische Eigenschaften des Kalkanstriches im Vergleich zum unbeschichteten Substrat	
Einfluss von Additiven auf Kalkanstriche		
	Einfluss unterschiedlicher Additive wie Leinöl, Kunstharzdispersionen und Marmormehl auf das hygrische Verhalten der Kalkbeschichtung	Kunstharzdispersionen führen zu keiner maßgeblichen Verbesserung der hygrischen Eigenschaften
		Marmormehl reduziert die Austrocknungsgeschwindigkeit
		Leinöl verbessert die hygrischen Eigenschaften
	Einfluss unterschiedlicher Proteinzusammensetzungen auf das hygrische Verhalten der Kalkbeschichtung	die Art des zugegebenen Proteins beeinflusst die Wasserdurchlässigkeit unterschiedlich, wobei Kaseinpulver schlechtere Eigenschaften aufweist als Proteinzusammensetzungen in natürlicher Form (z.B. Topfen)
	Einfluss der Zugabemenge von Additiven auf die hygrischen Eigenschaften des Kalkanstriches	geringere Zugabemengen von Additiven sind zielführender als hohe Zugabemengen

Tabelle 3-11: Zusammenfassung der Aussagen bezüglich der Dauerhaftigkeit des Gesteinssubstrates (inkludiert die hygrischen Eigenschaften des Anstriches) aus der Literaturlauswertung, als Grundlage für nachfolgende Laboruntersuchungen

3.4 ZITIERTE UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR

Bargel/Hilbrans (2008), Baumstark/Schwartz (2001), Bennett (1997), Bermoser (2008), Blöchl-Wirts (2001), Boenkendorf et al. (1993), Boué (2000), Brandes (1995/1999), Brasholz (1984), DIN 53159 (1999), Dreuse/Nehring (2004), EN ISO 4618 (2006), EN ISO 7783 (2008), Essex County Council Planning Department (1999), Föll (o. J.), Ghaffari (2005), Herm (1997), Ilschner/Singer (2005), Künzel (1976), Mang/Hofstetter (2000), Österreichisches Bundesdenkmalamt (2000, zurückgezogen), Österreichisches Bundesdenkmalamt (2001, zurückgezogen), Paschinger (2004), Schönburg (2006), Schramm/Hering (1988), Snethlage (2008), SPAB - Society for the Protection of Ancient Buildings (2009), Stadlbauer/Künzel (1999), Strachey (2006), Trauninger (2007), Wehlte (1981), Zech (1998)

4 ERMITTLUNG OPTIMALER VERARBEITUNGS- UND APPLIKATIONSBESTIMMUNGEN

4.1 ALLGEMEINES

Die für den jeweiligen Verwendungszweck geeignete Zusammensetzung des Anstriches ist zwar prinzipiell für die entsprechende bauphysikalische Wirksamkeit des Steinschutzes wesentlich verantwortlich, weitere vorherrschende Faktoren wie beispielsweise die Verarbeitung und Applikation des Anstriches, Untergrundvor- und -nachbehandlungen, die Qualität der Ausgangsprodukte als auch klimatische Rahmenbedingungen dürfen jedoch keinesfalls unberücksichtigt bleiben.

Diese Parameter üben einen großen Einfluss auf das Gesamtsystem aus und spielen für die Funktionstüchtigkeit eine äußerst bedeutende Rolle.

Eine detaillierte Betrachtung dieser Faktoren hätte den Aufwand dieser Arbeit unverhältnismäßig erhöht, weshalb lediglich die wesentlichen Rahmenbedingungen definiert wurden.

Aus diesem Grund wurde nachfolgend vorab nochmals vertiefend Fachliteratur studiert und anhand ausgewählter Artikel die grundlegenden Empfehlungen zusammengefasst und gegenübergestellt. Dadurch konnten sowohl divergierende als auch übereinstimmende Literaturaussagen herausgefiltert werden. Anschließend wurden nur die nicht eindeutig definierten Angaben in Form von analytischen Vorüberlegungen und, wenn dies auch zu keinem Ansatz führte, anhand vereinfachter Vorversuche definiert.

Durch diese vereinfachte Vorgehensweise konnte eine fundierte Grundlage für die Verarbeitung und Applikation von Kalkbeschichtungen als Basis für die nachfolgenden Hauptversuche festgelegt werden.

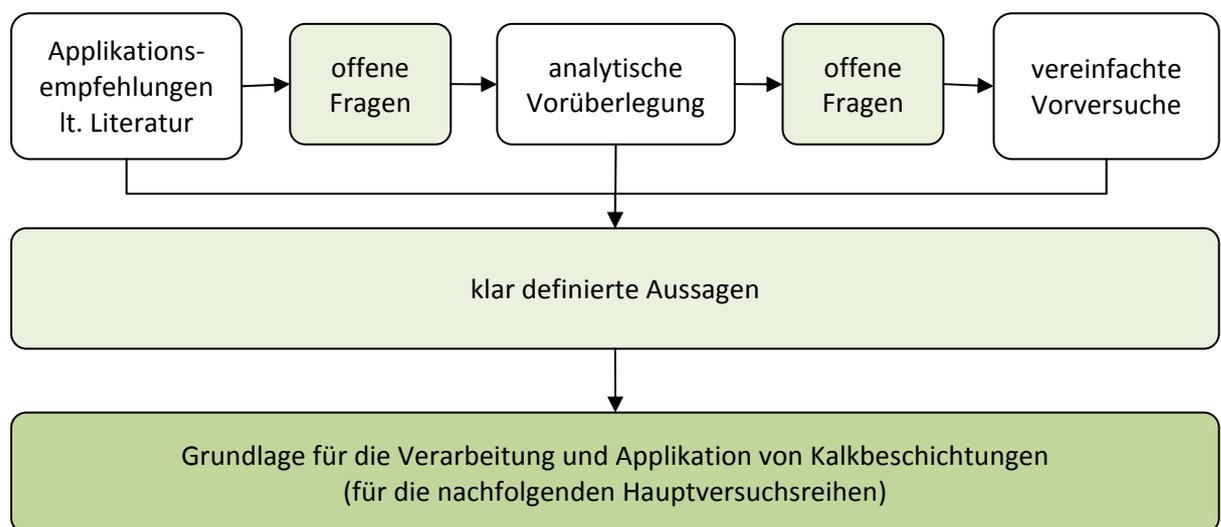


Abbildung 4-1: schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Definition fundierter Applikations- und Verarbeitungsbestimmungen von Kalkbeschichtungen

4.2 APPLIKATIONSEMPFEHLUNGEN LT. LITERATUR

4.2.1 Zusammenfassung der Literaturangaben

Nachfolgend werden die wesentlichen Aussagen tabellarisch zusammengefasst. Eine detaillierte Abhandlung der Literaturzusammenfassung befindet sich im Anhang B.

	Zusammenfassung der wesentlichen Aussagen	Aussagen			Ansatz für Prüfmethoden
		nicht eind. ¹	relativ klar ²	eind. ³	
Sumpfdauer des Kalkes	reicht von frisch gelöscht bis mind. 2 Jahre. In den meisten Bezugsquellen wird jedoch festgehalten, dass das vollständige Ablöschen des Kalkes von großer Bedeutung ist. Aus diesem Grund: je länger desto besser		X		mind. 2 Jahre
Untergrundvorbehandlung	Abbürsten, von Staub befreien			X	Abbürsten, mit Pressluft von Staub befreien
Vornässen des Untergrundes	gute Befeuchtung (Wasser darf nicht ablaufen). Lt. österreichischem Bundesdenkmalamt sollte bei alten Mauerwerk nur bedingt vorgehästet werden, da die Gefahr der Salzverschleppung besteht.		X		mit Sprühnebel befeuchten (da im Zuge der Labortests keine Gefahr der Salzverschleppung - vgl. Anhang B, besteht)
Voranstrich	mit Kalkmilch, bzw. Kalkkaseinwasser, bzw. Kalkmilch mit Leinöl.		X		stark verdünnte Kalkmilch mit den jeweiligen Modifikationen.
Verdünnung, Konsistenz	sehr dünnflüssig; reicht von 1:3 bis 1:5 und noch dünnflüssiger; in den meisten Fällen wird von einer Konsistenz wie Magermilch gesprochen.	X			sollte anhand von Vorprüfungen untersucht werden
Verdünnung mit ...	Wasser oder Kalkwasser	X			sollte anhand von Vorprüfungen untersucht werden
Anzahl der Schichten	in den meisten Fällen werden zumindest 3 Schichten empfohlen			X	5 Schichten (exkl. Voranstrich)
Zeit zwischen dem Auftrag der einzelnen Schichten	in Österreich und Deutschland geht man eher von einem freskalen Anstrich aus (vorherige Schicht darf noch nicht vollkommen ausgetrocknet sein) in der englischen Literatur wird weitestgehend eine vollkommenen Austrocknung der vorangehenden Anstriche und einer nochmaligen Befeuchtung vor Auftragen des nächsten Anstriches empfohlen.	X			sollte anhand von Vorprüfungen untersucht werden
Art des Auftrags der Beschichtung	Einmassieren, gut in Fugen, Risse etc. einarbeiten			X	mit Pinsel gut einarbeiten
optimale Klimabedingungen	hohe Luftfeuchtigkeit, Vermeidung von direkter zu warmer Sonneneinstrahlung, niedrige Temperaturen (ca. 10-20°C), kein Frost		X		ein zahlenmäßiger Ansatz sollte für den Klimaschrank getroffen werden
Nachbehandlung	Luftfeuchtigkeit muss hoch gehalten werden, keine direkte Sonnenbestrahlung (Aufhängung von feuchten Tüchern etc.)			X	hohe Luftfeuchtigkeit halten (im Klimaschrank)

¹ nicht eindeutig definiert (wesentliche Diskrepanz der Literaturangaben)

² relativ klar definiert (weitestgehende Übereinstimmung der Literaturangaben)

³ eindeutig klar definiert (vollkommene Übereinstimmung der Literaturangaben)

keine detaillierte Abhandlung mehr nötig

weitere Untersuchungen nötig

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der, in Anhang B genannten, Literaturangaben

4.2.2 Offene Fragestellungen nach der Literaturrecherche

Alle in obiger Zusammenfassung grau hinterlegten Aussagen sind in der, in Anhang B angegebenen Literatur, nicht eindeutig definiert, da sie entweder nur sehr vage beschrieben werden, oder aber eine Diskrepanz zwischen den einzelnen Autoren herrscht.

Folgende Punkte zur Konditionierung und Verarbeitung der Kalkbeschichtung müssen aus diesem Grund anhand von Vorversuchen bzw. konkreten Vorüberlegungen und Definitionen für die jeweiligen Versuchsansätze abgeklärt werden:

- optimale Klimabedingungen (Verarbeitungstemperatur und –feuchtigkeit)
- Verdünnung bzw. Konsistenz der Beschichtung
- Art des Verdünnungs- bzw. Lösungsmittels (Leitungs-, Kalksinter- oder destilliertes Wasser)
- Zeitdauer zwischen dem Auftrag einzelner Schichten (al fresco oder al secco)

aus diesen offenen Punkten ergeben sich somit folgende 2 Fragestellungen:

→ Definition der klimatischen Randbedingungen

→ Definition der Applikationsbedingungen

4.3 ANALYTISCHE VORÜBERLEGUNGEN

4.3.1 Definition der klimatischen Randbedingungen

Die in der Literatur angegebenen klimatischen Randbedingungen sind einigermaßen klar dargelegt und können somit anhand analytischer Vorüberlegungen gut definiert werden.

Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit, Vermeidung von direkter und warmer Sonneneinstrahlung und auch Frost werden sowohl in der deutsch-österreichischen als auch in der englischsprachigen Literatur einheitlich angeführt. Zur Schaffung einheitlicher klimatischer Rahmenbedingungen im Zuge der Laboruntersuchungen wurde für den Klimaschrank eine konstante **Temperatur von 20°C und 70% relativer Luftfeuchtigkeit** gewählt.

Dieser zahlenmäßige Ansatz wurde aufgrund folgender nachstehender Überlegungen definiert:

Zusammenhang von Karbonatisierung und Luftfeuchtigkeit

Für eine vollständige Karbonatisierung des Kalkanstriches ist eine hohe Luftfeuchtigkeit zwingend notwendig. Dies begründet sich damit, dass die Bindung des, für die Aushärtung notwendigen, Kohlendioxids CO₂ nur auf dem Weg über Ionen in der wässrigen Phase erfolgen kann und somit der Kalkanstrich zum vollständigen Abbinden permanent feucht gehalten werden muss. Eine hohe Temperatur bewirkt im Normalfall eine höhere Molekularbewegung und somit eine Zunahme der chemischen Reaktionsfähigkeit. Eine zu hohe Temperatur führt jedoch, im Gegensatz dazu, zu einer Verdunstung der notwendigen Feuchtigkeit und somit zu einer Verzögerung bis hin zum Stillstand der chemischen Reaktion.²⁰⁷ Lt. Balen/Gemert (1993) findet die optimale Karbonatisierung bei demjenigen Wassergehalt statt, welcher sich durch maximale Adsorption an der Oberfläche einstellt, also knapp bevor Kapillarkondensation eintritt. Dies ist natürlich stark von dem Porengefüge abhängig, doch für typische mineralische Baustoffe findet Kapillarkondensation ab ca. 60-80% Luftfeuchtigkeit statt (vgl. Kap. 2 – Sorptionsfeuchtebereich).

Österreichische Klimaverhältnisse

In den Sommermonaten (Juni-August) kann in Österreich bei einer mittleren Temperatur von 20°C von einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50-80%, je nach Tageszeit und entsprechendem Temperaturverlauf ausgegangen werden. In den Frühjahrs- und Herbstmonaten ist mit Temperaturen zwischen 10 und 15°C sowie einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50-75% im Frühjahr und 60-85% im Herbst zu rechnen.²⁰⁸

²⁰⁷ Schneider/Knoblauch (2006), S.49–52

²⁰⁸ Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2002)

Forschungsergebnisse

Lt. Untersuchungen von Grandet (1975) mit Kalkmörteln konnte die optimale Karbonatisierungsgeschwindigkeit bei 20°C erreicht werden.

Auch Blöchl-Wirts (2001) konnte durch Ihre Untersuchungen bestätigen, dass Putzproben, welche mit CO₂ gespült und durchgehend befeuchtet wurden, eine wesentlich größere Verdichtung des Putzgefüges aufweisen als Putzproben welche nicht nachbehandelt wurden.²⁰⁹ Weiters konnte in den Untersuchungen festgestellt werden, dass nicht vollständig karbonatisierte Proben durch simulierte Wassertransportmechanismen (Trocknung, Diffusion, kapillare Wasseraufnahme) an der Verdunstungsoberfläche restlich gelöstes Ca(OH)₂ anreichern.²¹⁰ Durch diese Versinterung an der Oberfläche konnten reduzierte Trocknungsgeschwindigkeiten sowie geringfügig reduzierte w-Werte beobachtet werden.

Auf Basis dieser Ergebnisse kann rückgeschlossen werden, dass eine zu schnelle Austrocknung beim Abbinden verhindert werden muss, was mit einer entsprechend hohen Luftfeuchtigkeit gewährleistet werden kann.

Klimaschrank

Da die Probekörper häufig für Massenbestimmungen, Nachbehandlungen etc. aus dem Klimaschrank entnommen werden müssen, sollten unkontrollierte Störmechanismen aufgrund Klimaanpassungen soweit als möglich vermieden werden. Aus diesem Grund, wurden die raumklimatischen Bedingungen des Klimaschranks so gut wie möglich an die des Raumklimas angenähert. Das Klima der Laborräumlichkeiten kann, je nach klimatischen Außenbedingungen sowie in Abhängigkeit einer allfälligen Wärmezufuhr durch Heizungsanlagen, mit relativ konstanten Temperaturen zwischen 18 und 22°C und einer relativen Raumluftfeuchtigkeit von 40-60% angegeben werden. Um die hygri-schen Dehneinflüsse soweit als möglich zu reduzieren sollte die Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank einen Wert von 70% nicht überschreiten.

4.3.2 Definition der Applikationsbedingungen

Verdünnung bzw. Konsistenz der Beschichtung

Bezüglich der Verdünnung der Kalkmilch gibt es die übereinstimmende Aussage, eine möglichst dünnflüssige Konsistenz anzustreben. Dadurch sollen folgende Eigenschaften erreicht werden:

- gute Verarbeitbarkeit
- gute bzw. vollständige Karbonatisierung
- Rissvermeidung

Über den genauen zahlenmäßigen Ansatz dieses dünnflüssigen Anstriches gibt es jedoch stark divergierende Empfehlungen. Auf der einen Seite gibt es eher schematische Aussagen zur Verdünnung wie Konsistenzempfehlungen von Sahne²¹¹ oder Magermilch²¹², auf der anderen Seite gibt es klar definierte Angaben zur Verdünnung (z.B. 1:5 oder 40:60), die jedoch zwischen den einzelnen Autoren stark variieren.

Zur genauen Definition der Konsistenzen wurden Verdünnungen von 1:3 bis 1:15 auf die oben genannten Eigenschaften, wie Haftzugfestigkeit und Karbonatisierung, anhand vereinfachter Labortests untersucht.

²⁰⁹ vgl. Blöchl-Wirts (2001), S.139

²¹⁰ vgl. Blöchl-Wirts (2001), S.139

²¹¹ vgl. z.B. Strachey (2006)

²¹² vgl. z.B. Essex County Council Planning Department (1999), S.6

Art des Wassers als Lösungs- bzw. Verdünnungsmittel

Ebenso gibt es über die Lösungsmittelart divergierende Aussagen. Teils wird die Verdünnung des eingesumpften Kalkes mit Kalkwasser empfohlen, zum Großteil wird auf diese Thematik jedoch gar nicht eingegangen.

Ob und inwieweit die Verwendung unterschiedlicher Verdünnungsmittel die physikalischen Eigenschaften des Kalkanstriches beeinflussen²¹³ sollte ebenfalls anhand vereinfachter Voruntersuchungen ermittelt werden.

Zeit zwischen dem Auftrag einzelner Schichten (al fresco oder al secco)

Im Bezug auf die Zeitdauer zwischen dem Auftrag der einzelnen Anstrichschichten besteht in der deutschen und englischsprachigen Literatur und auch in der praktischen Anwendung ein grundlegend differenzierter Denkansatz. Während die deutsche und österreichische Denkmalpflege eine nass in nass (al fresco) – Technik anwendet, wird in England eine Art al secco-Technik angewendet (vgl. Anhang B). Dabei muss die jeweilige Anstrichschicht vollkommen ausgetrocknet sein, bevor die nächste Schicht, nach Nässen der vorhergehenden Schicht, aufgetragen wird.

Konkret gibt es sogar 3 unterschiedliche Ansätze, welche nachfolgend aufgelistet und beschrieben werden:

Technik	Ansatz lt.	Beschreibung
al fresco 1 (buon fresco)	deutsche und österreichische Literatur	die Anstriche erfolgen nass in nass, die nächste Schicht wird direkt auf die noch nasse vorhergehende Schicht aufgetragen
al fresco 2 (buon fresco)	österreichisches Bundesdenkmalamt ²¹⁴ , Kurt Schönburg ²¹⁵	die vorhergehende Schicht wird etwas angetrocknet, so dass sie zwar noch feucht aber nicht mehr nass ist (der Anstrich darf sich nicht mehr aufreiben lassen, er ist „ledrig“)
al secco (fresco secco)	englischsprachige Literatur	die vorhergehende Schicht muss vollkommen ausgetrocknet sein bevor die nächste Schicht aufgetragen wird. Ein Nässen der vorhergehenden Schicht ist dabei jedoch unbedingt notwendig

Tabelle 4-2: Techniken und Ansätze der Anstrichschichtenfolge

Aufgrund dieser widersprüchlichen Aussagen sollte im Zuge von Voruntersuchungen der, für diese Untersuchungen, günstigere Ansatz ermittelt werden.

4.3.3 Offene Fragestellungen nach den analytischen Vorüberlegungen

Die genauen Applikationsbedingungen sind auf Basis der Literaturrecherche bzw. analytischer Vorüberlegungen nicht möglich. Aus diesem Grund sollten folgende Eigenschaften anhand vereinfachter Voruntersuchungen ermittelt werden:

- Konsistenz der Beschichtung (Voruntersuchungen von Verdünnungen 1:3 - 1:15)
- Art des Wassers als Verdünnungsmittel (Vergleich zwischen Kalksinterwasser, Wasser und destilliertem Wasser)
- Zeit zwischen dem Auftrag der einzelnen Schichten (Vergleich zwischen nass in nass, nass auf feucht und nass auf trocken)

²¹³ Diesbezüglich werden die Eigenschaften der Karbonatisierung und Haftfestigkeit/Abrieb als maßgebliche Beurteilungsparameter angesehen.

²¹⁴ Mündliche Information Mag. Johann Nimmrichter, Restaurierwerkstätten österreichisches Bundesdenkmalamt.

²¹⁵ vgl. Schönburg (2006), S.161

4.4 VORVERSUCHSREIHE – DEFINITION DER APPLIKATIONSBEDINGUNGEN FÜR KALKANSTRICHE

4.4.1 Grundlagen

Verwendetes Gesteinsmaterial – Pietra di Vicenza

Allgemeine Eigenschaften

Beim italienischen Pietra di Vicenza handelt es sich laut Börner/Hill²¹⁶ um einen weißen, grauen, gelblichen oder bräunlichen Kalksandstein des Oligozän aus Karbonatsand mit Fossilresten. Die durchschnittliche Rohdichte beträgt $1,92\text{kg/dm}^3$ ²¹⁷, die Druckfestigkeit liegt zwischen 22,7 und 26,9 N/mm². Im Handel findet man vier verschiedene Sorten: Bianco Avorio, Giallo Dorato, Giallo Dorato Scioso sowie Grigio Argento.

In unserem Fall handelt es sich vermutlich um einen Bianco Avorio, was übersetzt elfenbeinweiß bedeutet. Abgebaut wird dieser Stein in Italien in der Provinz Vicenza/Veneto. Aus diesem Grund wurde der Pietra di Vicenza vorwiegend als Baustein in Padua, Venedig und Vicenza verwendet.



Abbildung 4-2: Vicenza Kalksandstein (Länge des Bildausschnittes ca. 5cm)

Dünnschliff

Am Dünnschliff sind die Fossilreste im Stein deutlich erkennbar. Durch die abgestufte Korngrößenverteilung der Komponenten entsteht allerdings eine eher unregelmäßige Porenverteilung. An der gesteinskundlichen Zusammensetzung sind vorwiegend die Kalkskelette von Kalkrotalgen und Foraminiferen beteiligt.

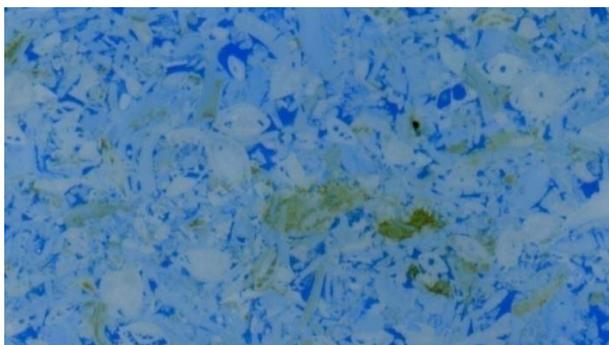


Abbildung 4-3: Dünnschliff Vicenza Kalksandstein (Länge des Bildausschnittes ca. 10mm)

²¹⁶ vgl. Börner, Hill (2007)

²¹⁷ Im Zuge von Untersuchungen wurde eine durchschnittliche Rohdichte des verwendeten Materials von $1,99\text{kg/dm}^3$ ermittelt (vgl. Trauning (2007), S.58).

Verwendetes Beschichtungsmaterial

Für die Voruntersuchungen wurde ein Sumpfkalk der Firma Baumit²¹⁸ verwendet. Dabei handelt es sich lt. Produktdatenblatt um einen mindestens 3 Jahre Sumpfkalk, der nur aus Kalkhydrat und Wasser besteht und dem keine sonstigen Zusatzstoffe beigemischt wurden. Der Festkörpergehalt beträgt ca. 40%. (Details s. Produktdatenblatt im Anhang).

Probenpräparation

Prüfkörperformate

Mittels eines Kernbohrers wurden Zylinder mit einem Durchmesser von ca. 68 mm aus den Steinbruchstücken entnommen und danach auf eine Höhe von 16,4 mm mittels einer Steinsäge zugeschnitten.

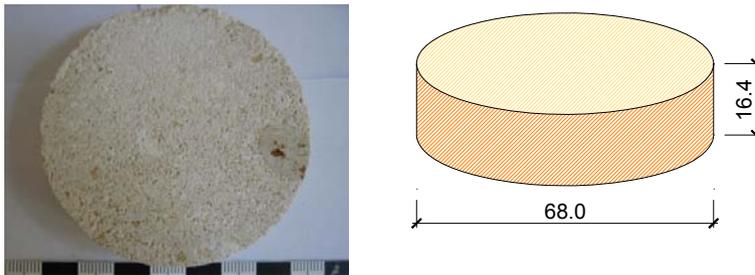


Abbildung 4-4: Abmessungen der Probekörper

Versuchsordnung

Wie bereits in Kap. 3 erläutert, kann angenommen werden, dass die Dauerhaftigkeit des Anstriches auch maßgeblich von den Applikationsbedingungen bestimmt wird.

Zwei sehr wesentliche Parameter zur Beschreibung der Dauerhaftigkeit eines Anstriches sind die Haftfestigkeit und der Abrieb der Beschichtung und, im Fall des Kalkanstriches, auch der Zusammenhang dieser beiden Parameter mit der Qualität der Karbonatisierung.

Aus diesem Grund werden für die nachfolgenden Voruntersuchungen folgende Versuchsdurchführungen gewählt:

- vereinfachte Bestimmung der Vollständigkeit sowie Geschwindigkeit der Karbonatisierung mittels Phenolphthalein (pH-Indikatorlösung)
- Ermittlung des Abriebs der Beschichtung und des Haftverbundes zwischen den einzelnen Anstrichschichten sowie zwischen dem Steinuntergrund und dem Kalkanstrich mit Hilfe einer vereinfachten Schälwiderstandsuntersuchung

Sowohl die Bestimmung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit als auch die Ermittlung der Haftfestigkeit bzw. des Abriebwiderstandes werden denkbar einfach, ohne Ahnlehnung an Normen durchgeführt. Diese Voruntersuchungen sollen keine detaillierten Ergebnisse sondern nur einen Anhaltspunkt für die Probenpräparation der Hauptversuche liefern.

Prüfung des Karbonatisierungsgrades

Der Grad der Karbonatisierung im Hinblick auf deren Dauer und Intensität wurde mit Hilfe einer Phenolphthaleinlösung untersucht. Phenolphthalein ist ein pH-Indikator, welcher sich ab einem pH-Wert von 8,2, also im alkalischen Bereich, rötlich-pink verfärbt. Bei niedrigeren pH-Werten bleibt die Lösung farblos. Je stärker sich die Indikatorlösung färbt desto basischer ist das Milieu und umgekehrt. Kalziumhydroxid ist eine Base²¹⁹, während sich im Zuge der Karbonatisierung der pH-Wert in den sauren Bereich verschiebt.

²¹⁸ Baumit Baustoffe GmbH, A-4820 Bad Ischl; URL: www.baumit.com

²¹⁹ Bildung einer basischen Lösung durch Dissoziation von Kalziumhydroxid in Wasser: $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$ (die Alkalität wird durch die OH^- Ionenkonzentration bestimmt).

Prüfung der Haftfestigkeit bzw. des Abriebwiderstandes

Der Abrieb bzw. die Haftfestigkeit wurde anhand eines einfachen Peeling-Tests (Prüfung des Schälwiderstands) ermittelt. Dabei wird ein Klebestreifen²²⁰ auf die Beschichtungsfläche aufgebracht und anschließend gleichmäßig abgezogen. Lose bzw. unzureichend verzahnte Anstrichteile bzw. -schichten blieben dabei am Klebestreifen haften.

Zur besseren Sichtbarmachung wurden die Klebestreifen mit den anhaftenden weißen Kalkteilen auf ein schwarzes Papier befestigt. Dadurch konnte ein Vergleich der einzelnen Modifikationen, in Form einer quantitativen Zustandsbeurteilung des prozentuellen Abriebs auf dem Prüfstreifen geschaffen werden. Zusätzlich konnte damit auch festgestellt werden, ob der Abrieb nur an der obersten Schicht erfolgte, oder aber der gesamte Anstrich bis zum Substrat am Klebestreifen haften blieb.

4.4.2 Vorversuchsreihe 1 – Ermittlung einer optimalen Verdünnung und Lösungsmittelart

Grundlagen

Zur Bestimmung einer für die nachfolgenden Hauptversuche geeigneten Konsistenz und Verdünnung, bzw. zur Auswahl des Lösungsmittels wurden folgende Optionen untersucht:

Mengenverhältnis von Sumpfkalk²²¹ zu Wasser (in Volumeneinheiten)

- 1:3 (M3)
- 1:5 (M5)
- 1:7 (M7)
- 1:10 (M10)
- 1:15 (M15)

Art des Wassers (des Verdünnungs- bzw. des Lösungsmittels)

- Leitungswasser (LW), ph-Wert ca. 7
- destilliertes Wasser (DW), ph-Wert zwischen 4 und 5
- Kalk-Sinterwasser (SW), ph-Wert zwischen 13 und 14

Versuchsdurchführung

Die getrockneten sowie von Staub und Schmutz befreiten Probekörper wurden abgewogen und anschließend mit dem jeweiligen Verdünnungs- bzw. Lösungsmittel (Wasser, Kalk-Sinterwasser oder Leitungswasser) gut vorgeätzt. Direkt danach erfolgten 3 Anstriche im Abstand von ca. 1-1,5 Stunden, welche mit einem Schweinsborstenpinsel aufgetragen wurden. Vor dem jeweils nächsten Anstrich wurden die Proben abermals mit dem jeweiligen Verdünnungsmittel besprüht. Bis zur vollständigen Karbonatisierung wurden die Proben regelmäßig, je nach Modifikation, mit destilliertem Wasser, Kalk-Sinterwasser oder Leitungswasser besprüht und mit Hilfe eines vorgehängten nassen Tuches feucht gehalten.

Anschließend wurden die Beschichtungen auf Karbonatisierungsgrad und Schälwiderstand untersucht.

²²⁰ tesafilm® Klebeband kristall klar, tesa GmbH

²²¹ Festkörpergehalt 40%

Versuchsergebnisse

Karbonatisierungsgrad

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Ergebnis des Karbonatisierungstests, in Form der Färbung der Phenolphthalienlösung nach 1, 7 und 12 Tagen Reaktionszeit:

Tage	Verdünnungsmedium		
	Kalk-		destilliertes
	Sinterwasser	Leitungs-wasser	Wasser
1			
7			
12			

Abbildung 4-5: schematische Darstellung des Färbungsgrades der Phenolphthalienlösung bei unterschiedlichen Verdünnungsmittel in Abhängigkeit der Zeitdauer

Während des Abbindevorgangs zeigte sich mit Kalk-Sinterwasser, wie erwartet, eine wesentlich stärkere Rotfärbung der Phenolphthaleinlösung und somit eine höhere Alkalität als mit destilliertem bzw. Leitungswasser. Diese starke Rotfärbung ist nicht weiter verwunderlich, da Kalk-Sinterwasser nichts anderes ist als eine wässrige alkalische Calciumhydroxid-Lösung.

Trotzdem zeigte sich bei den mit Kalk-Sinterwasser als auch mit Leitungswasser behandelten Proben bereits nach 7 Tagen keine Rotfärbung mehr, während sich die Indikatorlösung bei den Proben mit destilliertem Wasser immer noch färbte.

Erst nach 12 Tagen konnte auch hier keine Färbung mehr festgestellt werden.

Prinzipiell konnte bei allen Lösungsmittelarten beobachtet werden, dass sich die Phenolphthalienlösung bei hohen Kalkkonzentrationen (1:3 und 1:5) wesentlich länger und stärker färbte als bei geringen Kalkkonzentrationen.

Schälwiderstand

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Ergebnisse des Abriebs am Klebestreifen anhand des vereinfachten Peeling-Tests:

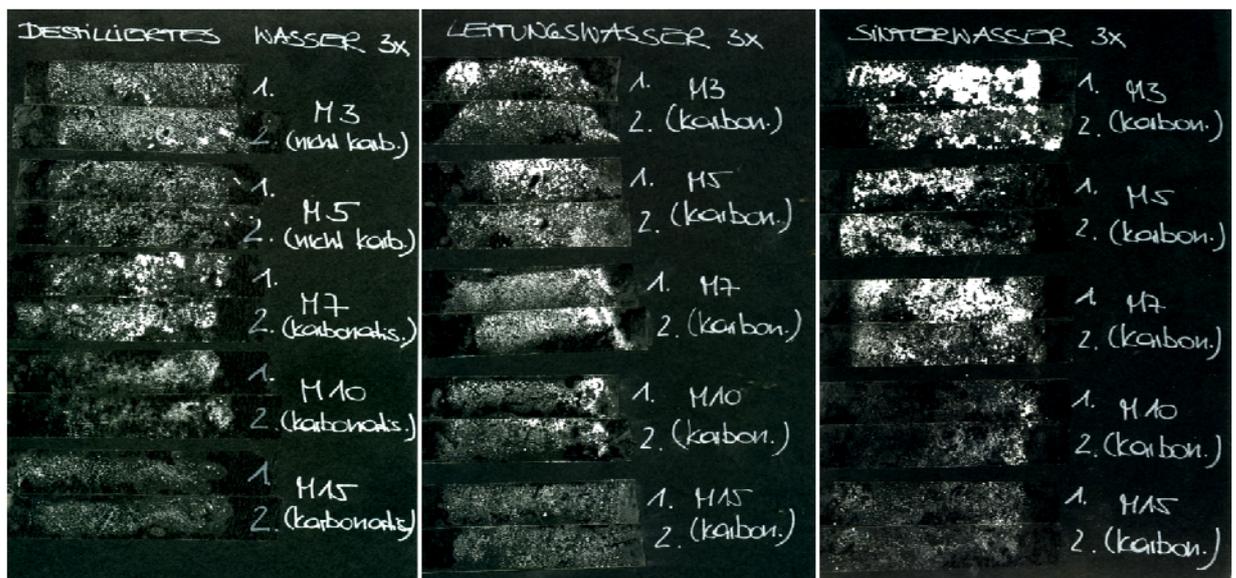


Abbildung 4-6: Klebestreifen mit Abrieb der Kalkbeschichtung nach Peeling-Test (Links: destilliertes Wasser, Mitte: Leitungswasser, Rechts: Kalk-Sinterwasser).

Aus Abbildung 4-6 geht deutlich hervor, dass die mit Kalk-Sinterwasser modifizierten Beschichtungen, vor allem bei sehr hohen Kalkkonzentrationen, den höchsten Abrieb aufweisen.

Auch die Haftfestigkeiten zum Untergrund scheinen bei hohen Kalkkonzentrationen in Verbindung mit Kalk-Sinterwasser abzunehmen, da teilweise die gesamte Beschichtung bis zum Substrat am Klebestreifen haften blieb.

Diese Beobachtung konnte teilweise auch im Zusammenhang mit Leitungswasser gemacht werden. Bei sehr hohen Verdünnungsgraden (1:10 und 1:15) weisen alle Modifikationen, den geringsten Abrieb auf.

Destilliertes Wasser zeigt in allen Konzentrationen die geringsten Abriebe und die höchsten Haftfestigkeiten zum Untergrund auf.

Interpretation

Verdünnung, Konsistenz

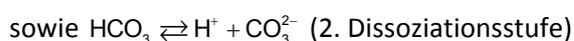
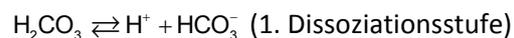
Aus den Schälwiderstandstests wird klar ersichtlich, dass eine zu hohe Schichtdicke die Haftfestigkeit reduziert und den Abrieb erhöht. Erst ab Konzentrationen von 1:10 wird der Abrieb deutlich reduziert. Der geringe Abrieb bei höheren Kalkkonzentrationen kann auch auf die geringere Beschichtungstärke und –menge zurückzuführen sein, doch zeigt sich in den Versuchen sehr deutlich, dass bei geringen Verdünnungsgraden die Beschichtung oftmals bis zum Substrat am Klebestreifen haften bleibt und somit eine geringere Haftfestigkeit zum Untergrund angenommen werden muss.

Da bei einer sehr hohen Verdünnung von 1:15, auch bei einer sehr hohen Schichtenanzahl, nur mehr sehr schwach lasierende Anstriche erreicht werden können sollte, um noch einigermaßen von einem Anstrich sprechen zu können, eine Konsistenz von max. 1:10 gewählt werden.²²²

Art des Verdünnungs- bzw. Lösungsmittels

Die untersuchten Lösungsmittel unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrem pH-Wert. Das hier verwendete Leitungswasser befindet sich mit einem pH-Wert von 7 im neutralen Bereich, das destillierte Wasser mit einem pH-Wert zwischen 4 und 5 im sauren Bereich²²³, und das Kalk-Sinterwasser mit einem pH-Wert zwischen 14 und 15 klar im stark basischen Bereich.

Der pH-Wert wird maßgeblich durch die H^+ und OH^- Konzentrationen einer wässrigen Lösung²²⁴ und somit maßgeblich vom Kohlensäuregehalt bestimmt. Je höher die H^+ -Ionenkonzentration und je geringer die OH^- -Ionenkonzentration desto geringer ist der pH-Wert und umgekehrt. Da diese beiden Größen voneinander abhängig sind, kann der pH-Wert alleine durch die H^+ -Ionenkonzentration ausgedrückt werden.²²⁵ Kohlensäure dissoziiert in Wasser nach folgender Gleichung:



Formel 4-1: Dissoziation von Kohlensäure in Wasser²²⁶

Befindet sich somit überschüssige Kohlensäure (in Form von gelöstem CO_2) im Wasser, so erhöht sich die Wasserstoffionenkonzentration, der pH-Wert wird reduziert.

Da das hier verwendete destillierte Wasser einen relativ niedrigen pH-Wert aufweist, muss davon ausgegangen werden, dass sich gelöstes CO_2 im Wasser befindet, welches durch die Luft aufgenommen wurde.

²²² Bei einer Konzentration von 1:10 wird mit 5 Anstrichschichten ein leicht deckender (jedoch immer noch durchscheinender) Kalkanstrich erreicht.

²²³ Das destillierte Wasser wurde nicht verschlossen aufbewahrt und war nicht frisch. Aus diesem Grund konnte Kohlensäure aus der Luft aufgenommen werden (damit handelt es sich zwar nicht mehr um reines destilliertes Wasser, dennoch kann das aufgenommene CO_2 keine Reaktion mit sonstigen Mineralstoffen und Spurenelementen eingehen und bleibt deshalb als Kohlensäure gelöst im destillierten Wasser bestehen).

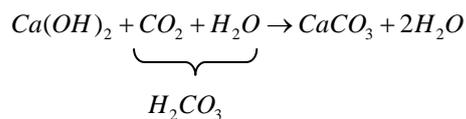
²²⁴ pH-Wert = negative Logarithmus der H_3O^+ -Ionen (vgl. Schneider/Knoblauch (2006), S.60)

²²⁵ vgl. Schneider/Knoblauch (2006), S.60

²²⁶ vgl. Schneider/Knoblauch (2006), S.62

Wenn sich nun beispielsweise Kalk im Wasser befindet, so wird dieser durch die freie, überschüssige Kohlensäure aufgelöst. Erst wenn sich wieder ein Gleichgewicht zwischen dem Kalk und der Kohlensäure einstellt (Kalk-Kohlensäuregleichgewicht), befindet sich das Wasser im neutralen Bereich (pH-Wert=7). Den höchsten Gehalt an freier Kohlensäure wird somit immer destilliertes Wasser enthalten (wenn die Kohlensäure vorab aus der Luft aufgenommen werden konnte), da dieses keinerlei Mineralstoffe, Spurenelemente, etc. enthält, mit dem die Kohlensäure in Reaktion gehen könnte.

Betrachtet man die Reaktionsgleichung der Kalkerhärtung wird deutlich, dass eine Karbonatisierung nur mit Kohlendioxid in Form von Kohlensäure stattfinden kann:



Formel 4-2: chemische Reaktion der Kalkerhärtung (Karbonatisierung)²²⁷

CO₂ kann im Zuge der Karbonatisierung nur in der wässrigen Phase (als Kohlensäure = H₂CO₃) gebunden werden²²⁸. Daraus kann geschlossen werden, dass sich ein hoher Kohlensäureanteil im Wasser und somit ein niedriger pH-Wert positiv auf die Karbonatisierung und Verfestigung des Kalkanstriches auswirkt.

Dies kann anhand der Vorversuche in jedem Fall bestätigt werden. Die Beschichtungen zeigen in allen Konzentrationen mit destilliertem Wasser den geringsten Abrieb, im Vergleich dazu kann bei der Verwendung von Kalk-Sinterwasser als Verdünnungs- bzw. Lösungsmittel der höchste Abrieb und die geringste Haftfestigkeit verglichen mit Leitungs- und destilliertem Wasser festgestellt werden.

Aus diesem Grund wird Kalk-Sinterwasser als Verdünnungsmittel für die nachfolgenden Versuche ausgeschlossen. Die bei destilliertem Wasser beobachtete stärkere und längere Färbung der Indikatorlösung kann darauf zurückzuführen sein, dass die Karbonatisierung aufgrund des höheren CO₂-Gehaltes länger andauert als bei den anderen Lösungsmitteln, wo aufgrund des höheren pH-Wertes weniger CO₂ in wässriger Lösung vorliegt.

Die bei höheren Konzentrationen länger andauernde Karbonatisierung ist auf die größere Schichtdicke dieser Anstriche zurückzuführen.

Auf Basis dieser Versuchsergebnisse wird für die nachfolgenden Versuche destilliertes Wasser als Verdünnungsmittel gewählt.²²⁹ Es ist durchaus klar, dass die Verdünnung mit destilliertem Wasser aus ökonomischen wie auch technischen Gründen in der Praxis nur schwer anwendbar sein wird, jedoch scheint der pH-Wert resp. der Kohlensäuregehalt des verwendeten Wassers einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Karbonatisierung auszuüben und sollte deshalb auch in der Praxis mitberücksichtigt werden.

Im Zuge von Laboruntersuchungen müssen zusätzlich auch die mannigfaltigen Zusammensetzungen und Qualitätsunterschiede von Leitungswasser beachtet werden, wodurch eine Verwendung von Leitungswasser nicht kontrollierte und vielfältige Rahmenfaktoren schafft. Alleine aus diesen Überlegungen heraus sollte zur Schaffung von möglichst einheitlichen und validierbaren Laborbedingungen ohnedies destilliertes Wasser, bzw. chemisch eindeutig charakterisiertes Leitungswasser, für die Laboruntersuchungen verwendet werden.

²²⁷ vgl. Schneider/Knoblauch (2006), S.49

²²⁸ vgl. Schneider/Knoblauch (2006), S.49

²²⁹ Um einen geringen pH-Wert und somit einen hohen Kohlensäuregehalt gewährleisten zu können, musste jedenfalls sichergestellt werden, dass bereits ein entsprechender Luftkontakt mit dem destillierten Wasser vorhanden war. Die Überprüfung desselben erfolgte mit pH-Messstreifen (pH-Wert < 5).

In dieser Hinsicht sind sicherlich auch einige Untersuchungsergebnisse zu hinterfragen, wo Gipskrustenbildungen weitläufig immer noch auf den hohen Schwefelgehalt der Luft zurückgeführt werden. Heute weiß man jedoch dass die Schwefelkonzentration in der Luft aufgrund der Verwendung von Katalysatoren und Filteranlagen verschwindend gering geworden ist.

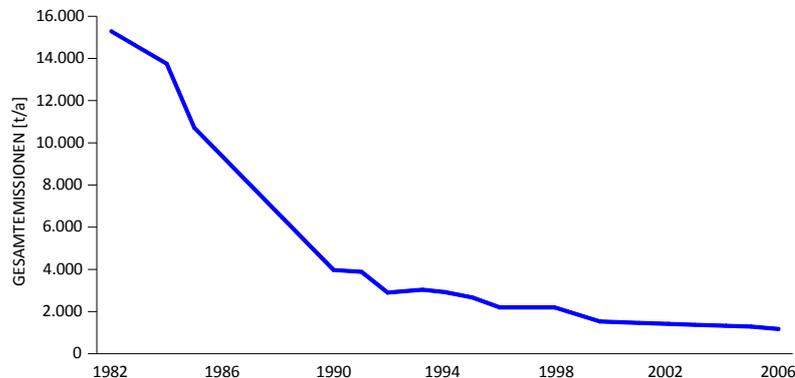


Abbildung 4-7: Entwicklung der SO₂-Emissionen in t/Jahr seit 1982 am Beispiel des Landes Salzburg.²³⁰

Vielmehr liegt die Vermutung nahe, dass Gipskrustenerscheinungen in den letzten Jahren, teilweise auch auf die Verwendung sulfathaltiger Gewässer (als Verdünnungsmittel) zurückzuführen sind.

4.4.3 Vorversuchsreihe 2 - Zeitdauer zwischen dem Auftrag der einzelnen Schichten

Grundlagen

Für die nachfolgenden Versuche wurde auf Basis der vorhergehenden Versuchsreihe (V1) eine Verdünnung von 1:10 gewählt (vgl. Kap. 4.4.2).

Zur Beurteilung der optimalen Zeitdauer zwischen dem Auftrag der einzelnen Schichten wurden folgende Vorgehensweisen untersucht:

- al fresco 1: nass in nass
das Auftragen der nächsten Schicht erfolgt unmittelbar nach dem Auftragen der vorhergehenden Schicht
- al fresco 2: nass auf feucht
die vorhergehende Schicht wird so lange getrocknet bis man sie nicht mehr aufreiben kann (Zeitintervall ca. 15-30min)
- al secco: nass auf trocken
die vorhergehende Schicht muss vollständig ausgetrocknet sein bevor die nächste Schicht aufgetragen wird (Zeitintervall ca. 1,5 Stunden)

Versuchsdurchführung

Die getrockneten sowie von Staub und Schmutz befreiten Probekörper wurden abgewogen und anschließend mit destilliertem Wasser gut vorgehängt. Direkt danach erfolgte ein Voranstrich mit einer Verdünnung von 1:10 (1 Teil Sumpfkalk, 10 Teile destilliertes Wasser) und im Anschluss daran je nach Technik, 5 weitere Anstrichschichten, ebenfalls im Verhältnis 1:10. Jede Anstrichschicht wurde mit einem Schweinsborstenpinsel einmassiert.

Anschließend wurden die Beschichtungen auf Karbonatisierungsgrad und Schälwiderstand untersucht.

²³⁰ Abbildung gemäß Land Salzburg (Hg.) (2010)

Versuchsergebnisse

Karbonatisierungsgrad

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Ergebnis des Karbonatisierungstests nach 3, 7 und 14 Tagen Reaktionszeit:

Tage	Technik			
	al fresco 1 (nass in nass)	al fresco 2 (nass auf "ledrig")	al secco (nass auf trocken)	
3				
7				
14				♣ Besprühen mit Wasser
				♣ Besprühen mit Wasser

Abbildung 4-8: schematische Darstellung des Färbungsgrades der Phenolphthalienlösung bei unterschiedlichen Auftragstechniken in Abhängigkeit der Zeitdauer

Die Phenolphthalienlösung färbte sich nach einer Reaktionszeit von 3 Tagen bei den al fresco-Techniken wesentlich stärker als bei der al secco-Technik, wobei zwischen den beiden Fresco-Techniken kein Unterschied in der Färbung festgestellt werden konnte.

Nach 7 Tagen konnte, nach Auftragen der Phenolphthaleinlösung auf die trockenen Anstrichschichten, keine Färbung mehr festgestellt werden. Erst nachdem die Proben neuerlich mit destilliertem Wasser besprüht wurden, färbten sich die Anstriche der al fresco-Techniken neuerlich rot, bei der al secco-Technik konnte keine Färbung mehr festgestellt werden. Nach neuerlichem Auftrocknen der Beschichtungen war auch bei den al fresco-Techniken keine Färbung mehr feststellbar. Diese Beobachtung des Nicht-Färbens der Indikatorlösung im trockenen Zustand und Färbung nach Besprühen mit destilliertem Wasser konnte nach 14 Tagen nur mehr bei der al fresco Technik 1 (nass in nass) festgestellt werden, bei der al fresco-Technik 2 (nass in feucht) konnte nach 14 Tagen ebenfalls keine Färbung nach neuerlichem Besprühen mehr festgestellt werden.

Schälwiderstand

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Untersuchungsergebnisse des Abriebs auf dem Klebestreifen anhand des vereinfachten Peeling-Tests:



Abbildung 4-9: Klebestreifen mit Abrieb der Kalkbeschichtung nach Peeling-Test (Links: als secco (nass auf trocken), Mitte: al fresco 2 (nass in feucht), Rechts: al fresco 1 (nass in nass)).

Aus obiger Abbildung geht deutlich hervor, dass die Beschichtungen der al secco-Technik den höchsten Abrieb und die al fresco-Technik welche nass in nass gearbeitet wurde den geringsten Abrieb aufweist. Die al fresco-Technik 2 (nass in feucht) zeigt zwar ebenfalls einen geringeren Abrieb als die al secco-Technik auf, partiell kann jedoch ein sehr hoher Abrieb festgestellt werden, wo teilweise mehrere Beschichtungsschichten bis zum Substrat am Klebestreifen erkennbar sind.

Interpretation

Zur Interpretation der Ergebnisse aus der Versuchsreihe 2 soll vorab nochmals die Erhärtung von Kalk erläutert und überlegt werden:

Eine möglichst vollständige Erhärtung wird nur dann erreicht, wenn während der Reaktion genügend CO_2 vorhanden ist und das gebildete Wasser auch Zeit hat zu verdunsten. Zusätzlich muss jedoch genügend Feuchtigkeit vorhanden sein, damit die Bindung des CO_2 stattfinden kann.

Wenn kein Wasser mehr zur Verfügung steht, so wird die Reaktion abgebrochen, der Abbindevorgang ist beendet. Wenn nun erneut Kohlensäure (aus der Luft oder in Form von in Wasser gelöstem CO_2) mit dem bereits abgebundenen Kalk (CaCO_3) reagiert, so wandelt sich dieser in Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ um, wandert dabei an die Oberfläche und lagert sich dort unter Abgabe von CO_2 wieder als Calciumkarbonat ab.²³¹ Diese sich dadurch bildende relativ dichte Schichte bezeichnet man als Kalksinterhaut.

Das für den Abbindevorgang nötige CO_2 kann diese Sinterhaut nur mehr schwer durchdringen, die Karbonatisierung der darunterliegenden Schichten ist somit praktisch unmöglich geworden.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass sich nachfolgend aufgetragene Schichten praktisch nur mehr über Adhäsion und mechanischen Verbund mit der darunterliegenden Sinterschichte verbinden können. Wird der nachfolgende Anstrich hingegen auf eine noch feuchte, in Reaktion befindliche Schichte aufgetragen, so können sich diese chemisch miteinander verbinden.²³²

Auf Basis dieser Überlegung sind die oben angeführten Versuchsergebnisse plausibel zu interpretieren:

Die al secco-Technik zeigt eine geringere Färbung des Phenolphthaleins als die al fresco-Techniken, was vorerst zu dem Schluss führen könnte, dass diese Technik am schnellsten karbonatisiert. Die Vollständigkeit der Karbonatisierung lässt sich damit jedoch keinesfalls ableiten.

Da das neuerliche Aufsprühen von destilliertem Wasser bei den al fresco-Techniken offenbar einen neuerlichen Karbonatisierungsvorgang auslösen kann, bei der al secco-Technik allerdings zu keiner Reaktion führt, weist darauf hin, dass der Abbindeprozess bei der al secco-Technik frühzeitig abgebrochen wurde.

Die Erklärung dafür liegt in der Bildung von diesen relativ dichten Kalksinterhäutchen (bzw. -schüppchen), wodurch einerseits das, für den Abbindevorgang notwendige, CO_2 aufgrund der relativ dichten Sinterhaut nicht mehr in tiefere Schichten vordringen kann und andererseits diese Kalksinterschüppchen keine chemische Verbindung untereinander mehr eingehen können. Diese Interpretation wird durch die Ergebnisse des Schälwiderstandtests bestätigt, bei dem die Anstrichschichten der al secco-Technik schüppchenweise am Klebestreifen haften bleiben.

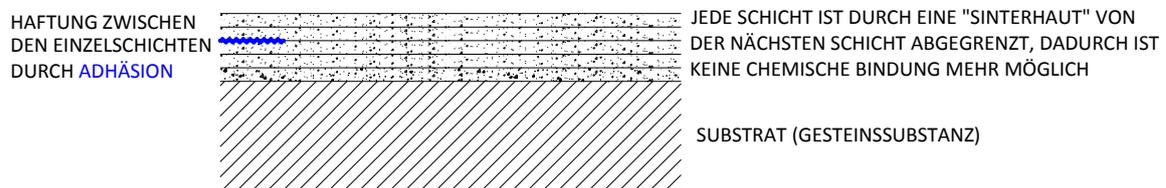


Abbildung 4-10: Interpretation der Versuchsergebnisse, al secco-Technik

²³¹ vgl. Böhme/Woelker (1994)

²³² vgl. Schönburg (2006), S.162

Ebenso zeigt die nass in feucht – Technik (al fresco 2) partiell eine hohe Haftung von Anstrichpaketen auf dem Klebestreifen, womit auf eine zu starke Trocknung dieser Bereiche und somit ebenfalls der Bildung von Kalksinterschichten bzw. -schüppchen geschlossen werden kann.

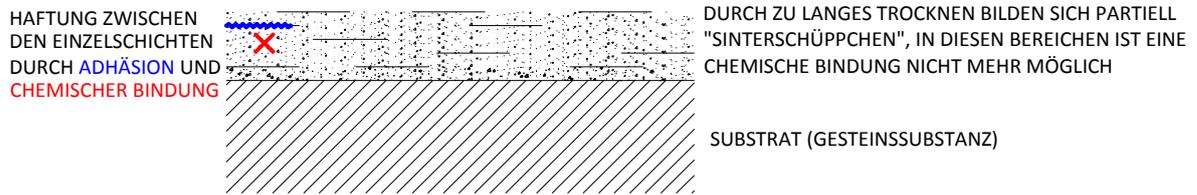


Abbildung 4-11: Interpretation der Versuchsergebnisse, al fresco-Technik 2

Der geringe Abrieb der al fresco-Technik 1 (nass in nass) ist durch eine intensive chemische Bindung der Anstrichschichten begründet, wodurch alle Einzelschichten miteinander ein homogenes, verzahntes Gefüge ergeben.²³³

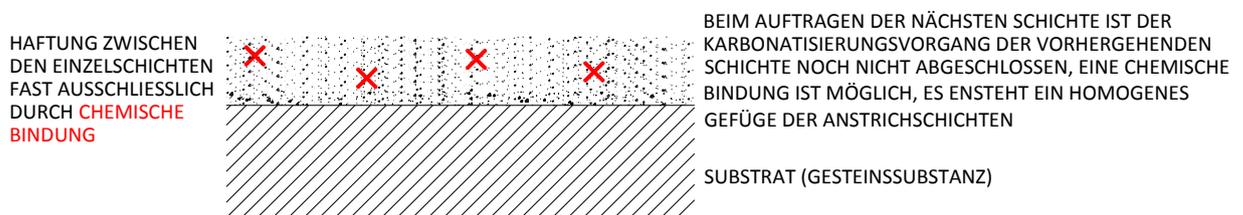


Abbildung 4-12: Interpretation der Versuchsergebnisse, al fresco-Technik 1

Aus den Ergebnissen dieser Versuchsreihe muss jedenfalls dem frescalen Anstrich (al fresco-Technik 1) der Vorzug gegeben werden, wobei an dieser Stelle angemerkt werden muss, dass der Übergang zwischen der al fresco-Technik 1 (nass in nass) und der al fresco-Technik 2 (nass in feucht) relativ schwer definierbar ist und auch sicherlich von vielen klimatischen Parametern, wie Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung, Temperatur etc. abhängig ist.

Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch relativ eindeutig, dass der richtige Zeitpunkt zum Auftragen der nächsten Anstrichschicht wesentlich zur Funktionstüchtigkeit des Beschichtungssystems beiträgt und oftmals besser früher als später die nächste Schicht aufgetragen werden sollte.

²³³ vgl. Schönburg (2006), S.162

4.5 ZUSAMMENFASSUNG – VERARBEITUNG UND APPLIKATION VON SUMPFKALKBESCHICHTUNGEN

Die nachfolgende Zusammenfassung zeigt die, für die nachfolgenden Hauptversuchsarrangements, gemäß Kap. 4.2 - 4.4 ermittelten Verarbeitungs- und Applikationsempfehlungen:

Sumpfdauer des Kalkes	3 Jahre (Baumit SanovaSumpfkalk 3)
Untergrundvorbehandlung	Abbürsten, mit Pressluft von Staub befreien
Vornässen	mit Sprühnebel befeuchten
Voranstrich	stark verdünnte Kalkmilch 1:10 (ohne Zusätze)
Verdünnung, Konsistenz	1:10
Verdünnung mit ...	destilliertem Wasser
Anzahl der Schichten	5 Schichten (exkl. Voranstrich), ergibt einen lasierenden Anstrich
Zeitdauer zwischen dem Auftrag der Anstrichschichten	nass in nass (al fresco)
Art des Auftragens der Beschichtung	mit Pinsel gut einmassieren
optimale Klimabedingungen	20°C, 70% rel.LF
Nachbehandlung	hohe Luftfeuchtigkeit halten

Tabelle 4-3: Zusammenfassung der Verarbeitungs- und Applikationsempfehlungen aus der Literatur (weiß) sowie anhand der durchgeführten analytischen Vorüberlegungen u. Vorversuche (grau)

4.6 ZITIERT UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR

Balen/Gemert (1993), Bennett (1997), Blöchl-Wirts (2001), Böhme/Woelker (1994), Börner/Hill (2007), Brandes (1999), Brasholz (1984), Essex County Council (1999), Farrow & Ball (2009), Grandet (1975), Holmström (1996), ÖNORM B 2230-2 (2002), Österreichisches Bundesdenkmalamt (2000/2001), Paschinger (2004), Rusam (2004), Schneider/Knoblauch (2006), Schönburg (2006), SPAB (2009), Strachey (2006), Trauninger (2007), Wehlte (1981), ZAMG (2002)

5 VERGLEICH VON ANSTRICHSYSTEMEN DURCH VERSUCHE IM LABOR

5.1 ALLGEMEINES

5.1.1 Prüfanordnung

Anhand der Literaturrecherche und Voruntersuchungen wurden die Laboruntersuchungen in 2 Schritte unterteilt:

Im ersten Schritt wurden die physikalischen Auswirkungen unterschiedlicher Additive im Hinblick auf die hygrischen Parameter sowie die Dauerhaftigkeit der Kalkbeschichtung untersucht.

In dieser ersten Versuchsreihe stand hauptsächlich die Optimierung der Kalkbeschichtung selbst im Vordergrund.

Ziel war es durch geeignete Zusätze die Dauerhaftigkeit des Kalkanstriches zu erhöhen und trotzdem die positiven Eigenschaften dieses Beschichtungssystems wie Austrocknungsfähigkeit, Diffusionsoffenheit und Reversibilität bestmöglich zu erhalten.

Auf Basis der Versuchsergebnisse erfolgte anschließend die Auswahl und Konzipierung einer geeigneten Rezeptur.

Aufbauend darauf wurde im zweiten Schritt die konzipierte Kalkrezeptur mit derzeit in der Praxis angewendeten Natursteinbeschichtungen verglichen. Für diese Gegenüberstellungen wurden drei unterschiedliche Systeme herangezogen: Ein Kalkanstrich mit modernen Zusätzen, ein weiteres mineralisch basierendes Anstrichsystem (Dispersions-Silikatanstrich) in unterschiedlichen Rezepturen und mehrere Beschichtungen auf Basis eines organischen Bindemittels (Silikonharzanstrich).

Der Dauerhaftigkeit der Gesteinssubstanz wurde, neben der Zustandsbeurteilung der Anstriche, in dieser zweiten Versuchsreihe oberste Priorität beigemessen.

Die Beurteilung erfolgte einerseits anhand von Untersuchungen zum hygrischen Verhalten, wo die Wasseraufnahme mit der Wasserabgabe ins Verhältnis gebracht wurde und somit Rückschlüsse auf die Feuchtesituation im Gesteinssubstrat gezogen werden konnten.

Auf der anderen Seite wurden Verwitterungssimulationen durchgeführt, um Zerstörungen, sowohl in der Beschichtung als auch im Gesteinssubstrat quantifizieren und vergleichen zu können.

Als oberstes Ziel dieser Arbeit wurde nicht die Erhöhung der Dauerhaftigkeit des Anstriches sondern die Erhaltung des darunter liegenden Gesteinssubstrates definiert. Ob dies durch eine Verbesserung der Anstrichbeständigkeit erzielt werden kann sollen nachfolgende Versuche aufzeigen.

Basierend auf diesen Überlegungen wurden folgende 2 Hauptversuchsreihen durchgeführt:

Versuchsreihe A – Vergleich unterschiedlicher Additive zum Kalkanstrich

- Untersuchungen hygriischer Parameter der Beschichtung in Verbindung mit dem Substrat
 - Trocknungsverhalten
 - Wasserdampfdiffusionswiderstand
 - Wasseraufnahmeverhalten
- Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung und des Gesteinssubstrates
 - Karbonatisierungsverhalten der Beschichtung
 - Abriebwiderstand bzw. Haftzugfestigkeit
 - Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen

Auf Basis der Versuchsergebnisse wurde ein modifizierter Kalkanstrich konzipiert welcher, in den nachfolgenden Versuchsreihen B, mit modernen Beschichtungssystemen verglichen wurde.

Versuchsreihe B – Vergleich der modifizierten Kalkrezeptur mit modernen Beschichtungssystemen

- Untersuchungen hygrischer Parameter der Beschichtung in Verbindung mit dem Substrat
 - Trocknungsverhalten
 - Wasserdampfdiffusionswiderstand
 - Wasseraufnahmeverhalten
- Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung und des Gesteinssubstrates
 - Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen vor und nach Verwitterungssimulationen
 - visuelle Beurteilung der Beschichtung nach Verwitterungssimulationen
 - Veränderung des hygrischen Verhaltens nach Verwitterungssimulationen
 - Beurteilung des Gesteinsgefüges vor und nach Verwitterungssimulationen

5.1.2 Prüfmethoden

Untersuchung hygrischer Parameter

Wasseraufnahme (w-Wert)

Die Probekörper wurden in Anlehnung an EN 1062-3 (2008), mit der beschichteten Seite nach unten, auf Punktlagern in Wasser gelagert.

Die seitlichen Flächen wurden mit einer wasser- und dampfdichten Acryllackbeschichtung abgedichtet ($\mu_{\text{Acryllack}} \gg \mu_{\text{Beschichtung}}$), womit die Wasseraufnahme ausschließlich über die beschichtete Oberfläche stattfinden konnte.

Die Proben wurden bei konstanten Klimabedingungen (Prüfbedingungen im Labor) mit einer Temperatur von $23 \pm 2^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $60 \pm 2\%$ (Versuchsreihe A) bzw. $47 \pm 2\%$ (Versuchsreihe B) bis zur Massenkonstanz gelagert und anschließend abgewogen. Die dadurch ermittelte Probenmasse wurde als Referenztrockenmasse bezeichnet.

Danach wurden die Proben in einem Wasserbehälter (Wassertemperatur = Raumtemperatur) aufgeständert und die Massenzunahme, mit einer Genauigkeit von 0,001g, in klar definierten zeitlichen Abständen, bestimmt.

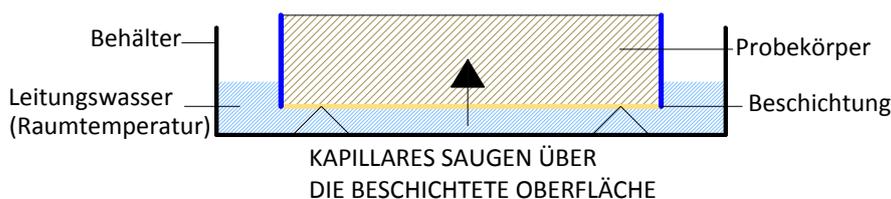


Abbildung 5-1: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus zum Wasseraufnahmeverhalten

Die ermittelte Massenzunahme wurde, bezogen auf die Referenztrockenmasse, in einem Diagramm gegen \sqrt{t} aufgetragen. Dadurch konnte der Wasseraufnahmeverlauf unterschiedlicher Beschichtungen gut dargestellt und verglichen werden.

Die durch diesen Versuch ermittelte Wasserdurchlässigkeit ist nicht geeignet einen absoluten w -Wert der Beschichtung zu ermitteln. Dies hat folgende Gründe:

1. Das Gesteinssubstrat übt einen wesentlichen Einfluss auf das hygrische Verhalten der Beschichtung aus. Diese Annahme konnte mitunter auch durch die Untersuchungen von Blöchl-Wirts (2001) bestätigt werden.
Die bei diesem Versuch ermittelten Werte sind somit immer im Zusammenhang mit dem jeweils verwendeten Gesteinssubstrat zu sehen.
2. Bei den hier untersuchten Anstrichsystemen handelt es sich zum größten Teil um Beschichtungen mit einer, lt. EN 1062-1 (2004) deklarierten, hohen Durchlässigkeit für Wasser. Dadurch sind die meisten Probekörper bereits bei einer 10 - 15 minütigen Wasserlagerung vollständig kapillar gesättigt. Eine, wie lt. EN 1062-3 (2008) empfohlene, Lagerung von 24 Stunden zur Beurteilung des w -Wertes führt somit zu keinem aussagekräftigen Ergebnis.
3. Durch die seitliche Abdichtung wird zwar der Einfluss des Gesteinssubstrats soweit als möglich minimiert, eine gewisse Beeinflussung durch nicht sichtbare Risse, geringfügige Wassereintritte im Randbereich etc. ist jedoch nicht zu 100% auszuschließen.

Durch diese Untersuchungen wurden somit minimale Einflüsse von Undichtigkeiten und Rissen der Abdichtung sowie der Einfluss des Gesteinssubstrates mitberücksichtigt, was aber auch dazu führt, dass die Messungen wesentlich realitätsgetreuer nachgebildet wurden.

Eine zu 100% rissfreie Beschichtung wird in der Praxis vor allem bei historischen Bauwerken, aufgrund von thermischen, hygrischen und statischen Bewegungen des Substrats, nie auftreten. Auch Ecken, Ränder, Kanten etc. sind vorgegebene Randbedingungen, die, auch wenn sie eine Schwachstelle darstellen, in der Praxis wohl nicht mit einer Dichtmasse versiegelt werden.

Für eine Vergleichsanalyse von unterschiedlichen Beschichtungssystemen stellt diese Vorgehensweise somit einen gangbaren Weg dar, mehr noch ist eine praxisrelevante Aussage erst dadurch gegeben.



Abbildung 5-2: Versuchsaufbau Wasseraufnahme. Li: Versuchsreihe A, Re: Versuchsreihe B

Trocknungsverhalten

Das Trocknungsverhalten wurde anhand des Massenverlustes einer kapillar gesättigten Probe bestimmt.

Um sicherzustellen dass die Austrocknung ausschließlich über die beschichtete Oberfläche stattfindet, wurden die Proben seitlich mit Acryllack versiegelt ($\mu_{\text{Acryllack}} \gg \mu_{\text{Beschichtung}}$) und auf einen Kunststoffbehälter gesetzt, welcher seitlich zusätzlich mittels Kittmasse abgedichtet wurde.

Vorab wurden die Proben bei den Versuchsklimarandbedingungen mit einer Temperatur von $23 \pm 2^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $55 \pm 5\%$ bis zur Massenkonstanz gelagert und die Referenztrochennasse der Proben inkl. Kunststoffbehälter und Kittmasse ermittelt.

Zur kapillaren Sättigung wurden die Probekörper in einem Behälter aufgeständert und dieser knapp bis unter die Probenoberfläche mit Wasser aufgefüllt. Eine kapillare Sättigung war erreicht, nachdem die Oberfläche vollständig mit Wasser benetzt war.

Danach wurden die Proben wieder auf den Kunststoffbehälter gesetzt und seitlich gut mittels der Kittmasse abgedichtet.

Anschließend wurde der Massenverlust des Versuchsaufbaus in geeigneten Zeitabständen auf 0,001g genau gewogen.

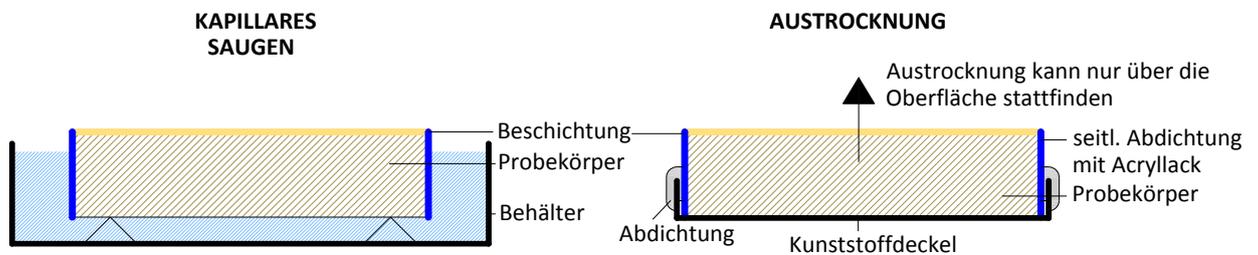


Abbildung 5-3: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus zum Trocknungsverhalten



Abbildung 5-4: Versuchsaufbau Wasserabgabe Li: Versuchsreihe A, Re: Versuchsreihe B

Der Massenverlust wurde prozentuell, bezogen auf die Referenztrochennasse, in einem Diagramm gegen die Zeit aufgetragen.

Zusätzlich erfolgte eine Differenzierung in ein Kurz- und Langzeitaustrocknungsverhalten (4 und 24 Stunden).

Wasserdampfdiffusionswiderstand

Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionsstromdichte erfolgte in Anlehnung an EN ISO 7783 (2008) nach dem Feuchtschalenverfahren (wet cup). Dabei wurden die Probekörper mit der beschichteten Seite nach oben in ein Prüfgefäß gesetzt und seitlich gut abgedichtet. Mit Hilfe einer Ammoniumdihydrogenphosphatlösung konnte eine konstante relative Luftfeuchte von 93% in diesem Gefäß erzeugt werden.

Anschließend wurden die so präparierten Prüfkörper in einem Prüfraum mit definierten Raumklimabedingungen gestellt, wodurch sich unterschiedliche Partialdrücke des Wasserdampfes zwischen Prüfgefäß und Prüfraum und somit Wasserdampfdiffusionsstromdichten durch die Probenstücke einstellten. Diese Wasserdampfdiffusionsstromdichte konnte durch regelmäßiges Wiegen der Prüfanordnungen in geeigneten Zeitintervallen ermittelt werden.

Lt. Norm sollten die Klimabedingungen im Prüfraum mit einer Luftfeuchte von $50\pm 5\%$ und einer Temperatur von $23\pm 2^\circ\text{C}$ genau geregelt werden. Nur so kann ein genau definiertes Dampfdruckgefälle geschaffen und dadurch die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d exakt berechnet werden.

In vorliegender Arbeit war die Bestimmung von s_d nicht notwendig da für die Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Beschichtungen ein Vergleich der einzelnen Wasserdampf-Diffusionsstromdichten bereits entsprechend gute Aussagen liefert.

Aus diesem Grund wurde als Prüfraum der Laborraum mit den dort vorherrschenden Klimabedingungen, einer Temperatur von $23\pm 2^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $55\pm 5\%$ definiert. Diese Vorgehensweise wird auch insofern begründet, da die Klimabedingungen im Klimaschrank, durch das Einblasen von Wasserdampf an der obersten Klimaschrankzone sowie dem Ein- und Ausschalten des Ventilators an der Rückseite des Klimaschranks, nicht als konstant über die gesamte Höhe und Tiefe des Prüfraumes angesehen werden konnten. Vor allem in Bezug auf die hier durchgeführten vergleichenden Beurteilungen sind jedoch gleichbleibende Klimarandbedingungen für alle Probekörper von essentieller Bedeutung.

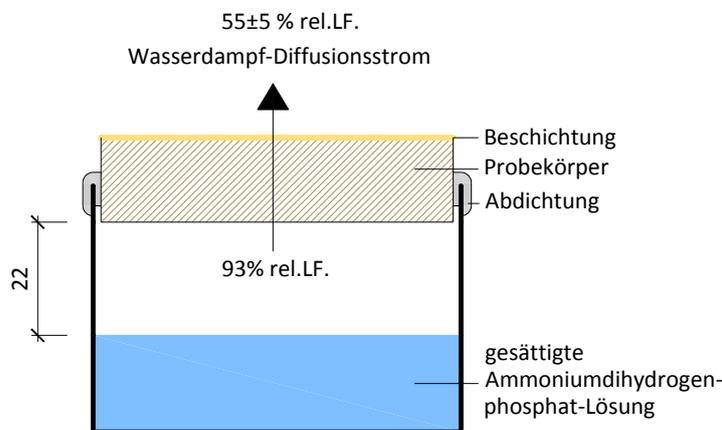


Abbildung 5-5: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Wasserdampf-Diffusionsstromes



Abbildung 5-6: Versuchsaufbau Wasserdampfdiffusion Li: Versuchsreihe A, Re: Versuchsreihe B

Zur Auswertung der Ergebnisse wurde die Massenänderung pro Zeiteinheit bestimmt und in einem Diagramm grafisch dargestellt.

Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung und des Gesteinssubstrates

Untersuchungen von Kalkbeschichtungen zur Karbonatisierung

Die Untersuchung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit und –vollständigkeit erfolgte mittels eines pH-Indikators. Die Probekörper wurden bis zur Massenkonstanz im Klimaschrank bei 70% rel. Luftfeuchtigkeit und 20°C gelagert und anschließend abgewogen. Nachfolgend wurden die Proben mit den jeweiligen Rezepturen beschichtet und abermals bei 70% rel. Luftfeuchte und 20°C gelagert.

In regelmäßigen Abständen erfolgte ein Beträufeln mit der Indikatorlösung Phenolphthalein, welche sich ab einem pH-Wert von 8,2, also im alkalischen Bereich, rötlich-pink verfärbt. Bei niedrigeren pH-Werten bleibt die Lösung farblos. Je stärker sich die Indikatorlösung färbt, desto basischer ist das Milieu und umgekehrt. Die Intensität dieser Farbgebung wurde für jedes Probenstück farblich dargestellt und dokumentiert, wobei folgende Farbskala definiert wurde:

	starke Färbung des Phenolphthaleins → sehr hohe Alkalität
	mittlere Färbung des Phenolphthaleins → mittleres basisches Milieu
	schwache Färbung des Phenolphthaleins → leichte Alkalität, knapp über $\text{pH} = 8,2$
	keine Färbung des Phenolphthaleins → pH-Wert im neutralen oder sauren Bereich

Wenn keine Veränderung der Färbung mehr feststellbar war, wurden die Proben mit destilliertem Wasser nachbesprüht und nach neuerlicher Lagerung im Klimaschrank abermals die Farbgebung an der Oberfläche beobachtet.

Diese Vorgehensweise erfolgte so lange, bis bei allen Probestücken keine Farbgebung mehr festgestellt werden konnte, und somit alle Proben vollständig auskarbonatisiert waren.

Die Ermittlung der Karbonatisierungsrate ist deshalb wichtig, um einen eventuellen Zusammenhang mit den ermittelten physikalischen Eigenschaften wie Haftzugfestigkeiten, Rissbildungen etc. feststellen zu können. Wie bereits im vorhergehenden Kapitel erwähnt lässt eine beschleunigte Karbonatisierung nicht auf eine vollständige Karbonatisierung rückschließen. Ebenso kann keinesfalls davon ausgegangen werden, dass die Qualität der Beschichtung mit der Geschwindigkeit der Karbonatisierung zunimmt.

Haftzugfestigkeit / Abriebwiderstand

Die beiden Kenngrößen Abrieb und Haftfestigkeit wurden gemeinsam mit Hilfe des Schälwiderstandstests beurteilt. Zur Bestimmung dieses Schälwiderstandes wurde eine Apparatur entwickelt mit der es möglich war, die Prüfbedingungen für alle Probekörper konstant zu halten. Die Apparatur erlaubt es, einen Klebestreifen mit definierter Länge an dem Probekörper aufzulegen und ihn anschließend mit einer definierter Kraft (durch ein Gewicht) an der Oberfläche zu befestigen. Mittels Federwaage wird der Klebestreifen mit einer immer gleich bleibenden Zugkraft abgezogen.

Dadurch wird sowohl das lose anhaftende Pulver an der Beschichtungs Oberfläche (Abrieb) als auch unzureichend verzahnte Anstrichschichten (Haftfestigkeiten) abgelöst.

Dieser Versuchsaufbau kann zwar nicht zur Bestimmung absoluter Zahlenwerte herangezogen werden (z.B. Haftzugfestigkeit in N/mm^2), er kann aber sehr gute Vergleichsdarstellungen liefern.



Abbildung 5-7: Versuchsablauf Schälwiderstandsprüfung von links nach rechts: 1. Aufbringen des Klebestreifens am Probekörper und Befestigung mittels Gewicht 2. „Anziehen“ der Federwaage und Befestigung am Klebestreifen, Fixierung der Federwaage mit Hilfe eines Nagels 3. Abziehen des Klebestreifens (durch Entfernen des Nagels)²³⁴

Die abgezogenen Klebestreifen wurden auf ein schwarzes Papier aufgeklebt. Damit war es möglich, die auf dem Klebestreifen anhaftenden Kalkbestandteile visuell aufzuzeigen und den Abrieb der einzelnen Beschichtungen direkt miteinander zu vergleichen.

²³⁴ An dieser Stelle möchte ich meinem Vater, Leopold Trauninger, für die Hilfeleistung bei der Konstruktion dieser Apparatur danken!

Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen

Zur Beurteilung der Schichtgrenze Anstrich-Substrat sowie zur Beurteilung der Gefügezerstörung nach Verwitterungssimulationen wurden Dünnschliffe²³⁵ von den unverwitterten und verwitterten Proben angefertigt.

Im Mikroskop wurde vor allem das Gefüge im Bereich der Schichtgrenze detailliert beurteilt.

Einerseits konnte somit festgestellt werden, ob die Beschichtung gut am Korngefüge haftet, ob Risse und Fehlstellen im Anstrichgefüge vorhanden sind und ob auch kleine und feingliedrige Stellen von der Beschichtung ummantelt werden.

Andererseits konnten mit Hilfe dieser Methode bereits kleine, mit dem freien Auge nicht sichtbare, Gefügezerstörungen des Gesteinssubstrates aufgezeigt werden. Dazu wurde das Gefüge des unbewitterten Gesteins mit den verwitterten Substraten verglichen.



Abbildung 5-8: Versuchsaufbau dünnschliffmikroskopische Untersuchungen im Auflichtmikroskop

Verwitterungssimulationen

Um die Zerstörung der Beschichtung und auch des Substrats nach Verwitterungsbeanspruchungen beurteilen zu können, wurden entsprechende Simulationen im Labor durchgeführt. Es wurden die Auswirkungen von Frost- und Salzkristallisationsschäden betrachtet, welche vor allem bei historischen Bauwerken, als Hauptzerstörungsmechanismen in unserem Klimabereich angesehen werden müssen. Im Labor können jedoch immer nur Extremsituationen dargestellt werden, die in der Natur so zumeist nicht auftreten werden. Auch der Zusammenhang einzelner Schadensmechanismen, wie Mikroorganismen, UV-Licht, Wasser, Salze und tatsächlich auftretende Temperaturschwankungen kann in Versuchen nur schwer nachgestellt werden. Ebenso schwer abbildbar sind die jeweilige Einbausituation und die Lage des Gesteins an der Fassade bzw. an der Skulptur sowie die damit verbundenen Randbedingungen.

Mit den nachfolgend dargestellten Prüfanordnungen wurde versucht, unterschiedliche Verwitterungssituationen dennoch möglichst realistisch abzubilden.

²³⁵ Für die Anfertigung von Dünnschliffen wird eine kleine Probe des Gesteins mit einem speziellen Kunstharz auf einem Glaträger aufgeklebt und auf eine Dicke von ca. 20-30µm heruntergeschliffen. Dadurch entsteht eine sehr dünne und durchsichtige Probe des Gesteinsmaterials, sodass eine vergrößerte Betrachtung der Gefügestruktur im Durchlichtmikroskop möglich ist.

zyklische Klimawechselbeanspruchung

Die zyklische Klimawechselbeanspruchung erfolgte durch einen mehrmaligen Wechsel der Temperaturparameter im Klimaschrank. Folgender Klimazyklus wurde dabei definiert:

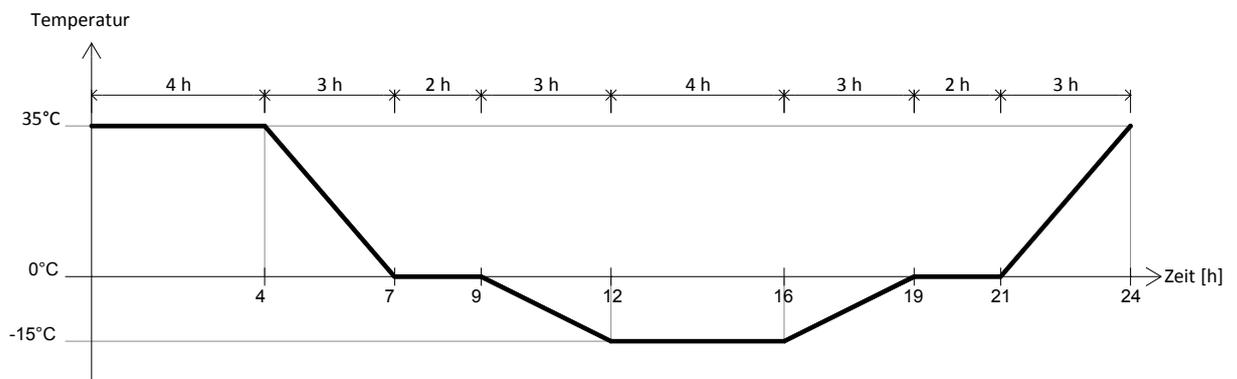


Abbildung 5-9: Temperaturverlauf eines Klimazyklus

Es erfolgte jeweils ein 10-maliger Wechsel des oben abgebildeten Temperaturwechsels.

Vor dieser Klimawechselbeanspruchung wurden die Proben bis zur Hälfte in Wasser (Proben mit nachfolgenden Frost-Tauwechselbeanspruchungen) bzw. in einer 14%igen Magnesiumsulfatlösung (Proben für nachfolgende Salzkristallisationsversuche) gelagert und kapillar gesättigt. Anschließend wurden die Proben sofort auf einen seitlich abgedichteten Kunststoffdeckel im Klimaschrank gelagert. Dadurch wurde ein feuchtes Gesteinssubstrat simuliert, welches nur über die Anstrichoberfläche Wasser auf- und abgeben konnte.



Abbildung 5-10: kapillare Sättigung der Proben mit Wasser bzw. Salzlösung (li), Lagerung der Proben im Klimaschrank (re)

Während der Klimawechselbeanspruchung wurde eine konstante relative Luftfeuchtigkeit zwischen 80 und 90% rel.LF eingestellt. Dadurch wurde sichergestellt, dass eine entsprechend hohe Sorptionsfeuchtigkeit zur Verfügung gestellt wird und die Proben somit nicht austrocknen können. Zusätzlich erfolgte ein mehrmaliges Besprühen der Proben mit Wasser während der Klimawechselbeanspruchung.

Nach 6 Klimazyklen wurden die, mit Salzlösung getränkten, Proben 18 Stunden im Trockenschrank bei 40°C gelagert, um eine Auskristallisation der Salze zu erreichen. Danach wurden die Proben abermals mit Wasser besprüht und wieder zu den anderen Proben in den Klimaschrank platziert und dort bis zum Ende des 10. Klimawechsels belassen.

Nach der 10-maligen Klimawechselbeanspruchung wurde der Zustand der Proben visuell begutachtet und fotografisch dokumentiert.

Frost-Tauwechsel-Beanspruchung

Nach der Klimawechselbeanspruchung wurden die mit Wasser gesättigten Proben einer verstärkten Frost-Tauwechselbeanspruchung unterzogen. Diese Beanspruchung erfolgte in Anlehnung an EN 12371 (2010).

Abweichend davon wurden die Proben nicht vollständig in Wasser gelagert, sondern von unten kapillar mit Wasser gesättigt. Danach erfolgte eine mindestens 6-stündige Gefrierperiode über Nacht (meist 18 Stunden) bei -12°C , gefolgt von einer abermaligen 6 stündigen Tauperiode durch kapillare Wassersättigung. Während der Gefrierperiode wurden die Proben auf einen Kunststoffdeckel gesetzt.



Abbildung 5-11: Tauperiode - kapillare Sättigung der Proben mit Wasser

Diese Frost-Tau-Zyklen wurden insgesamt 5 Mal wiederholt und anschließend der Zustand der Proben visuell begutachtet und fotografisch dokumentiert.

Nach der letzten Gefrierperiode wurden die Proben sofort in eine Folie vakuumdicht eingeschweißt. Anschließend wurde in Anlehnung an das Prüfverfahren zum Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel von Tünchen, lt. Institut für Bauforschung der RWTH Aachen,²³⁶ nochmals ein 10 maliger Temperaturwechsel im Klimaschrank durchgeführt (analog Abbildung 5-9). Danach wurden die Proben abermals in Wasser kapillar gesättigt, erneut vakuumdicht verschweißt und weiteren 10 Klimazyklen im Klimaschrank unterzogen.



Abbildung 5-12: Lagerung der vakuumverschweißten Proben im Klimaschrank

Nach diesen Frost-Tauwechselbeanspruchungen wurden die Proben visuell begutachtet und fotografisch dokumentiert und anschließend zur Beurteilung des Gesteinssubstrates eine Ultraschallprüfung durchgeführt.

²³⁶ vgl. Meyer (1993)

Salzkristallisationsbeanspruchung

Nach der Klimawechselbeanspruchung, der mit einer Magnesiumsulfatlösung getränkten Proben wurden Salzkristallisationsuntersuchungen in Anlehnung an die EN 12370 (1999) durchgeführt. Dabei erfolgte ein ständiger Wechsel zwischen der Lagerung der Prüfkörper in einer Salzlösung und der anschließenden Trocknung und Auskristallisation der Salze im Klimaschrank.²³⁷

Die Proben wurden 2 Stunden mit der Salzlösung kapillar gesättigt und anschließend im Trockenschrank bei 40°C über Nacht (meist 22 Stunden) gelagert, um dadurch die Auskristallisation der Salze zu ermöglichen. Bei der Lagerung im Trockenschrank wurden die Proben auf einen Kunststoffdeckel gesetzt, der seitlich mit einer Kittmasse abgedichtet wurde. Damit konnte gewährleistet werden, dass die Austrocknung und somit die Auskristallisation der Salze vorwiegend über die Anstrichoberfläche erfolgte. Insgesamt wurden die Probekörper 6 solcher Zyklen unterzogen. Anschließend erfolgte eine visuelle Begutachtung sowie fotografische Dokumentation der Proben.

Danach wurden die Ausblühungen und Salzkrusten soweit als möglich von der Beschichtung abgenommen und sowohl der Zustand des Anstriches als auch die Beschaffenheit des Untergrundes beurteilt.

Nach einer umfassenden Reinigung der Probekörper im Ultraschallreinigungsgerät, durch die ein weitestgehendes Auswaschen der Salze aus dem Gesteinsgefüge erfolgen sollte, wurde eine Gefügestandsprüfung mittels Ultraschallmessungen durchgeführt.

Wasseraufnahme und –abgabe nach Verwitterungssimulation

Nach den oben genannten Verwitterungssimulationen wurden die Anstriche nochmals auf Ihre hygrischen Eigenschaften untersucht. Die Prüfanordnung erfolgte dabei analog zu den unverwitterten Probekörpern, um feststellen zu können inwieweit der Anstrich seine Austrocknungs- bzw. Wasseraufnahmefähigkeit aufgrund von Verwitterungseinwirkungen verändert hat.

Da einige Probekörper für die Dünnschliffaufnahmen zur Seite gelegt werden mussten, wurden nur mehr ein bis zwei Probenstücke pro Serie für diese Untersuchungen herangezogen. Da diese Versuchsreihe lediglich dazu dient, Unterschiede vor und nach der Verwitterung aufzuzeigen, waren die Ergebnisse dennoch aussagekräftig.

Die Diffusionseigenschaften wurden in dieser Versuchsreihe nicht mehr explizit betrachtet, da das untersuchte Austrocknungsverhalten bereits Diffusionsvorgänge beinhaltet.

In dieser Versuchsreihe wurden lediglich die Frost-Tauwechsel beanspruchten Proben direkt nach dem letzten Frost-Tauzyklus untersucht.

Es erfolgte hingegen keine Untersuchung der salzbelasteten Proben, da der Einfluss der Restsalze nicht bzw. nur schwer quantifizierbar gewesen wäre.

²³⁷ Abweichend von der Norm wurde die Salzlösung nicht mit Natriumsulfat sondern mit Magnesiumsulfat hergestellt.

Beurteilung des Gesteinsgefüges mittels Ultraschallmessungen

Der Zustand des Gesteinssubstrats wurde vor und nach den oben genannten Verwitterungssimulationen mittels Messung der Ultraschallgeschwindigkeit in Anlehnung an EN 14579 (2005) untersucht.

Als Ultraschall bezeichnet man Schall mit Frequenzen zwischen 20kHz und 1 GHz. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Schallwellen einen Körper durchfluten, gibt Auskunft über die Werkstoffstruktur.

Es gibt verschiedene Versuchsanordnungen für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit, im vorliegenden Fall wurde das Laufzeitverfahren in Durchschallung gewählt. Dabei werden ein Sende- sowie ein Empfängerkopf gegenüberliegend auf dem Probekörper aufgebracht. Vom Sender werden Schallwellen durch den Werkstoff zum Empfänger geleitet, die dafür benötigte Zeit wird in μs gemessen. Kennt man nun den Abstand zwischen Sender und Empfänger, kann dadurch die Geschwindigkeit ermittelt werden. Je höher die Geschwindigkeit, desto dichter ist das Gefüge und umgekehrt.

Aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Porenstruktur bzw. der Korngrößenverteilung kann es zu Ungenauigkeiten kommen, weshalb das Gefüge an mehreren Stellen untersucht werden muss um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten.

Es wurden jeweils 8 Messpunkte auf den Probekörpern aufgezeichnet (pro Messdistanz zwei sich gegenüberliegende Messpunkte), womit sich 4 Messstrecken ergeben, welche mit einem Messschieber auf 0,05 mm genau abgemessen wurden.

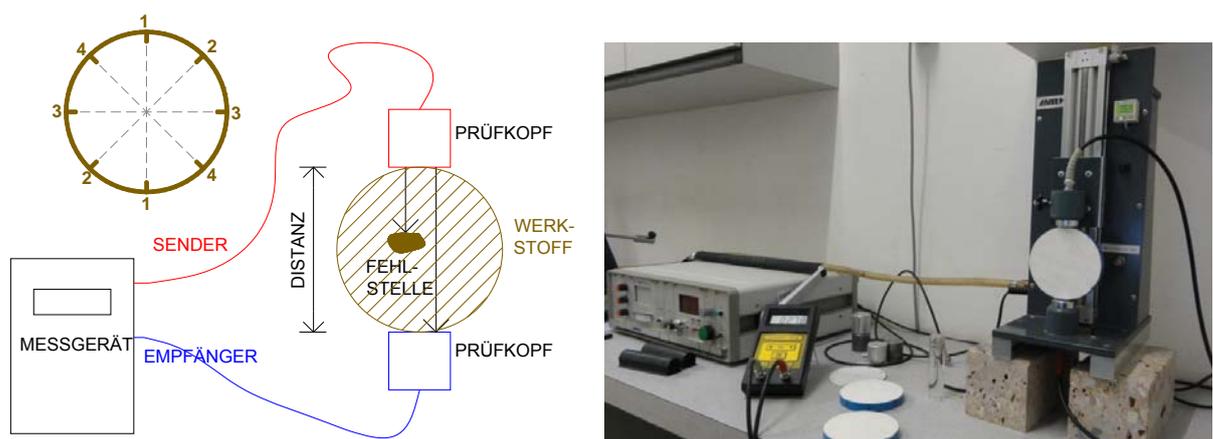


Abbildung 5-13: Prinzipskizze des Laufzeitverfahrens mit Durchschallung sowie Messpunktanordnung

Laut Fleischer (2002) besteht zudem die Gefahr, dass wichtige Einflussfaktoren wie Temperatur, Feuchtigkeit, etc. bei der Messung außer Acht gelassen werden, und dadurch die Vergleichbarkeit einzelner Proben zueinander nicht mehr gegeben ist.²³⁸ Um auch diese Fehlerquelle ausschalten zu können, wurde bei den Versuchen auf einheitliche Rahmenbedingungen geachtet. Aus diesem Grund wurden die Proben vor den Messungen bei 40°C im Klimaschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet (eine höhere Temperatur wurde aufgrund der Gefahr von Mikrorissbildungen in den Beschichtungen vermieden).

Unmittelbar danach wurden die Probekörper in ein Stativ mit konstantem Anpressdruck von 7 bar eingespannt und mit Hilfe eines Ultraschallmessgerätes der Firma ATH²³⁹ die Durchgangszeit für alle 4 Messdistanzen abgelesen.

²³⁸ vgl. Fleischer (2002), S.55

²³⁹ AUSTRO TEST HRDINA GmbH, Georg Högn Gasse 17, A-2381 Laab im Walde

5.1.3 Zusammenfassung der Prüfanordnungen und Prüfmethode

Nachfolgend werden die einzelnen Prüfanordnungen und Prüfmethode zusammengefasst und den nachfolgend dargestellten Versuchsreihen folgendermaßen zugeordnet (vgl. auch Kap. 5.1.1):

Versuchsreihe A – Vergleich unterschiedlicher Additive zum Kalkanstrich

Versuchsreihe B – Vergleich der modifizierten Kalkrezeptur mit modernen Beschichtungssystemen

Versuchsaufbau			Versuchsreihe	
Zu prüfende Eigenschaft		Prüfmethode	A	B
Untersuchung hygrischer Parameter	Trocknungsverhalten	Austrocknungsgeschwindigkeit einer kapillar gesättigten Probe	A1	B1
	Wasserdampfdiffusionswiderstand	Feuchtschalenverfahren	A2	B2
	Wasseraufnahme	Wasseraufnahme über die beschichtete Oberfläche bei vollständiger Wasserbenetzung	A3	B3
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Beschichtung und des Gesteinssubstrates	Geschwindigkeit bzw. Vollständigkeit der Karbonatisierung	Phenolphthalein (Genauigkeit in Tagen)	A4	-
	Abriebfestigkeit, Haftung der Beschichtung am Untergrund	Schälwiderstandstest	A5	-
		Dünnschliffmikroskopie	A6	B4
	Schadensbeurteilung der Beschichtung nach Verwitterung	visuelle Begutachtung nach Salzkristallisationssimulationen	-	B5
		hygrisches Verhalten nach Frost-Tauwechselbeanspruchung	-	B6
		dünnschliffmikroskopische Aufnahmen nach Verwitterungssimulationen (Frost-Tauwechselbeanspruchung und Salzkristallisationssimulationen)	-	B7
		Beurteilung des Gesteinsgefüges nach Verwitterungssimulationen (Bestimmung des Massenverlustes u. der Ultraschallgeschwindigkeit)	-	B8

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Prüfanordnungen und Prüfmethode

5.2 VERSUCHSREIHE A – VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER ADDITIVE ZUM KALKANSTRICH

5.2.1 Grundlagen

verwendetes Gesteinsmaterial – Pietra die Vicenza

Als Gesteinssubstrat wurde übereinstimmend mit den Vorversuchen ein italienischer Kalksandstein aus der Provinz Vicenza verwendet. Zur detaillierten Beschreibung des verwendeten Gesteinsmaterials vgl. Kap. 4.

verwendetes Beschichtungsmaterial, Modifikationen und Rezepturen

Analog zu den Voruntersuchungen wurde ein mindestens 3 Jahre eingelagerter Sumpfkalk der Firma Baumit²⁴⁰ verwendet (s. Produktdatenblatt).

Dieser Sumpfkalk diente als „Anstrichbasis“ und wurde mit folgenden Zusätzen modifiziert (einzeln und nicht in Kombination)²⁴¹:

- Proteine in unterschiedlichen Zusammensetzungen (Kaseinpulver und Magertopfen)
- Leinöl
- Marmormehl
- Kunstharzdispersion

Proteine

Proteine sind organische Verbindungen die durch Aminosäuren entstehen und werden umgangssprachlich auch als Eiweiße bzw. Eiweißstoffe bezeichnet.²⁴² Sie sind wichtige Bausteine der Zellen aller Lebewesen.²⁴³

Proteine spielen als historisches Kalkadditiv eine große Rolle. Es wird immer wieder von Rezepturen mit unterschiedlichen Proteinzusätzen, vor allem von tierischem Eiweiß, wie Blut und Blutplasma, Milcheiweißstoffe, Kollagenen,²⁴⁴ etc. gesprochen. Hauptsächlich wird in der Literatur zu historischen Kalkrezepturen die Verwendung von unterschiedlichen Milchprodukten wie Topfen, Molke oder Magermilch angegeben, weshalb in dieser Arbeit vor allem der Einfluss unterschiedlicher Milchproteine, untersucht wurde.

Eines der in diesem Zusammenhang am meisten verwendete Milchproteine ist das Kasein, das beim Aufschließen mit Alkalien, wie beispielsweise Kalk, (man spricht bei diesem Vorgang auch vom „verseifen“), in Kaseinleim umgewandelt wird.²⁴⁵

Da die Untersuchungsergebnisse von Boenkendorf et al. (1993), bei unterschiedlichen Proteinarten differenzierte feuchtetechnische Auswirkungen aufzeigen, kann davon ausgegangen werden, dass die Zusammensetzung des Proteins einen Einfluss auf die bauphysikalischen Auswirkungen hat.

Aus diesem Grund wurde der Kalkanstrich sowohl mit reinem Kaseinpulver als auch mit Magertopfen modifiziert.

Während es sich beim industriell hergestellten Kaseinpulver um ein reines Kasein (Milchprotein) handelt, enthält der Topfen neben Molke- und Milchproteinen auch andere Bestandteile wie z.B. Fette, Wasser, Kohlenhydrate, Ballaststoffe und organische Säuren.

²⁴⁰ Baumit Baustoffe GmbH, A-4820 Bad Ischl; URL: www.baumit.com

²⁴¹ Zur Quantifizierung der Auswirkung jedes einzelnen Additivs, erfolgte vorab keine Kombination mehrerer Zusätze.

²⁴² vgl. Schneider, Knoblauch (2006), S.141 / Bannwarth et al. (2007), S.290

²⁴³ vgl. Kittel (1998), s.170

²⁴⁴ Ein Faserprotein welches die Zugfestigkeit von Haut, Sehnen und Knochen gewährleistet (vgl. Bannwarth et al. (2007), S.299).

²⁴⁵ vgl. Kenter (o.J.c)

Die Wahl der Rezepturen erfolgte anhand der Proteingehalte, sodass bei beiden Rezepturen der gleiche Proteingehalt bezogen auf die Gesamtmasse erreicht wurde. Ansonsten hätte der Einfluss unterschiedlicher Proteingehalte auf die Eigenschaften mitberücksichtigt werden müssen, ein direkter Vergleich der Ergebnisse wäre damit jedoch nicht mehr möglich gewesen.²⁴⁶

Der Proteingehalt wurde gemäß den Herstellerrezeptangaben für Kaseinpulver ermittelt, ausgehend davon konnte die entsprechende Rezeptur für Magertopfen definiert werden um gleiche absolute Proteingehalte in der Gesamt Rezeptur zu erhalten. Diverse Rezepturempfehlungen aus der Literatur blieben dadurch größtenteils unberücksichtigt.

Protein 1 - Kaseinpulver

Bezugsquelle: Kaseinpulver, Kalk-Laden²⁴⁷

Die Rezeptur wurde lt. Herstellerangaben folgendermaßen gewählt:

Das Kaseinpulver (10g) wurde mind. 6 Stunden in 150ml Wasser aufgelöst. Dieses aufgelöste Kaseinpulver wurde anschließend mit der gleichen Menge Sumpfkalk vermengt, um auf diesem Weg ein sogenanntes „aufgeschlossenes“ Kaseinpulver herzustellen.

Dieser Kaseinleim wurde der bereits verdünnten Sumpfkalklösung (1:10)²⁴⁸ in einem Verhältnis von 5 M-% beigemischt.

10,00 g Kaseinpulver					
+ 150,00 g Wasser					
<hr/>					
= 160,00 g Masse insgesamt	ergibt	6,25 % Proteingehalt			
+ 160,00 g Sumpfkalk		zum aufschließen der Proteine			
<hr/>					
= 320,00 g Masse insgesamt	ergibt	3,13 % Proteingehalt	}	aufgeschlossenes Kasein	
		46,88 % Wassergehalt			
		50,00 % Sumpfkalk			
	ergibt	6,25 % Proteingehalt im Sumpfkalk			

5% auf die verdünnte Sumpfkalkmenge zugeben:

10,93 g Sumpfkalk					
+ 84,07 g Wasser					
+ 0,16 g Kaseinpulver					
+ 2,34 g Wasser					
+ 2,50 g Sumpfkalk					
<hr/>					
= 100,00 g Masse insgesamt	ergibt	0,16 % Proteingehalt in der Gesamtmasse			
		1,16 % Additiv bezogen auf Sumpfkalk			

²⁴⁶ Bei Boenkendorf et al. (1993) wurden unterschiedliche Eiweißprodukte in gleichen Anteilen als Massenprozent vom Bindemittel beigegeben. Damit ergeben sich jedoch unterschiedliche absolute Proteingehalte in der Rezeptur.

²⁴⁷ Kalk-Laden, D-74363 Frauenzimmern; URL: www.kalk-laden.de

²⁴⁸ Sumpfkalk zu Wasser 1:10 in Volumenanteilen: bei einer Kalkmasse von 1300kg/m³ (lt. Produktdatenblatt) und einer Masse des Wassers von 1000kg/m³ ergibt das ein Mischverhältnis pro 100g von 11,05g Kalk und 88,5g Wasser.

Protein 2 - Magertopfen

Produktbezeichnung und Bezugsquelle: NÖM Speisetopfen 10%F.i.T., 11,2% Eiweißgehalt

Das Eiweiß im Topfen setzt sich üblicherweise zu ca. 80% Kasein und 20% Molkeeiweiß zusammen. Um denselben Proteingehalt wie bei reinem Kaseinpulver zu erreichen, wurde folgende Rezeptur gewählt:

100g Magertopfen besteht aus:

11,20 g Eiweiß			
+ 88,80 g sonst. Bestandteile			
= 100,00 g Masse insgesamt	ergibt	11,20 % Proteingehalt	} aufgeschlossener Topfen
+ 200,00 g Sumpfkalk	zum aufschließen der Proteine		
= 300,00 g Masse insgesamt	ergibt	3,73 % Proteingehalt	
	ergibt	5,60 % Proteingehalt im Sumpfkalk	

zum Erreichen von 0,16% in der Gesamtmasse mit verdünntem Sumpfkalk:

0,19 g Eiweiß	}	entspricht	5,00 g aufgeschlossenen Topfen
+ 1,48 g sonst. Bestandteile			
+ 3,33 g Sumpfkalk	}	entspricht	111,67 g verdünntem Sumpfkalk (1:10)
+ 12,85 g Sumpfkalk			
+ 98,82 g Wasser			
= 116,67 g Masse insgesamt	ergibt	0,16 % Proteingehalt in der Gesamtmasse	
		1,15 % Additiv bezogen auf Sumpfkalk	

Leinöl

Lein (wissenschaftl. Bezeichnung: Linum) wird auch Flachs genannt und gehört zur Familie der Leingewächse (Linaceae) mit rund 200 Arten.²⁴⁹ Leinöl wird aus den Samen des Ölleins gewonnen.

Die Zugabe von Leinöl zum Kalk führt wie bei der Kaseinzugabe zu einem Verseifungsprozess indem das Leinöl durch den alkalischen Kalk chemisch in Fettsäuren und Glycerin aufgespalten und somit wasserlöslich gemacht wird.²⁵⁰

Zur historischen Anwendung sowie der Wirkungsweise von Öl und Fett in Kalkmörteln, gibt Cechová (2009) eine sehr umfassende Zusammenfassung.²⁵¹

Produktbezeichnung und Bezugsquelle des in dieser Arbeit verwendeten Leinöls: Leinöl, Kalk-Laden²⁵². Die Verdünnung erfolgte gemäß Herstellerangaben: 5ml Leinöl mit 1kg Sumpfkalk intensiv verrühren und somit verseifen. Erst nach dem Verseifen wurde der Sumpfkalk mit Wasser verdünnt.

0,50 g Leinöl (entspricht ca. 0,5ml Leinöl)			
+ 100,00 g Sumpfkalk	}	entspricht	869,23 g verdünnten Sumpfkalk (1:10)
+ 769,23 g Wasser			
= 869,73 g Masse insgesamt	ergibt	0,06 % Leinölgehalt in der Gesamtmasse	
		0,50 % Additiv bezogen auf Sumpfkalk	

²⁴⁹ vgl. Wikipedia (Hg.) zitiert nach Westscott, Muir (2003)

²⁵⁰ vgl. Wehlte (1981), S.236

²⁵¹ vgl. Cechova (2009), S.30-40

²⁵² Kalk-Laden, D-74363 Frauenzimmern; URL: www.kalk-laden.de

Marmormehl

Marmormehl beeinflusst nur die physikalischen Eigenschaften des Anstriches, reagiert aber nicht mit oder als Bindemittel, weshalb es sich bei Marmormehl lt. Nomenklatur nicht um ein Additiv sondern um einen Füllstoff bzw. Zuschlag, je nach Korngrößenverteilung, handelt (vgl. Kap. 2).

Produktbezeichnung und Bezugsquelle: Sterzinger Marmormehl (0/1,3), Restaurierwerkstätten des österreichischen Bundesdenkmalamtes.²⁵³

Die Rezeptur erfolgte gemäß den Empfehlungen des Bundesdenkmalamtes.²⁵⁴
 2 Teile Sumpfkalk, 1 Teil Marmormehl (Volumenanteile²⁵⁵)

	5,00 g Marmormehl			
+	10,00 g Sumpfkalk	}	entspricht	86,92 g verdünnten Sumpfkalk (1:10)
+	76,92 g Wasser			
=	91,92 g Masse insgesamt		ergibt	5,44 % Marmormehl in der Gesamtmasse 50,00 % Additiv bezogen auf Sumpfkalk

Kunstharzdispersion

Heutigen Kalkanstrichen werden oft Kunstharzdispersionen zugesetzt, mit dem vorrangigen Ziel die Dauerhaftigkeit sowie die hygrischen Eigenschaften des Anstriches zu verbessern. Inwieweit die Kunstharze als Additiv diesen Ansprüchen gerecht werden, soll diese Arbeit prüfen.

Produktbezeichnung und Bezugsquelle: Primal® CM 330, Firma Erbsloeh²⁵⁶ (Datenblatt s. Anhang D)

Die Rezeptur erfolgte in Anlehnung an eine gebräuchliche Praxisanwendung:²⁵⁷

	1,00 l Primal ca. 47%ig	}	entspricht	verarbeitbares Primal
+	20,00 l Wasser			
	21,00 l verdünntes Primal ($\rho_{\text{verd. Primal}} \approx \rho_{\text{Wasser}}$)			
+	0,48 g Primal	}	= 1 Volumenteil	}
+	9,52 g Wasser			
+	13,00 g = 1 Volumenanteil Kalk	}	entspricht verdünntem Sumpfkalk 1:10	
+	10,00 g = 1 Volumenanteil Wasser = 10ml			
+	80,48 g Wasser			
=	113,48 g Masse insgesamt		ergibt	0,42 % Primal CM330 in der Gesamtmasse 3,66 % Additiv bezogen auf Sumpfkalk

²⁵³ Naturwissenschaftliches Labor, Arsenal, Objekt 15, Tor 4, 1030 Wien
²⁵⁴ Mündliche Information Mag. Johann Nimmrichter, Restaurierwerkstätten Österreichisches Bundesdenkmalamt
²⁵⁵ ρ Marmormehl = 1285g/dm³, ρ Sumpfkalk = 1300g/dm³ \rightarrow ρ Marmormehl \approx ρ Sumpfkalk
²⁵⁶ C.H. Erbsloeh GmbH, Am Ausfergenufer 4, A-5400 Hallein
²⁵⁷ Mündliche Mitteilung Mag. Christian Gurtner, Atelier Gurtner Wien, Zirkusgasse 39, A-1020 Wien: 1l Primal wird mit 20l Wasser verdünnt. Danach wird wie folgt mit Sumpfkalk vermischt: 1 Volumenanteil verdünntes Primal, 1 Volumenanteil Sumpfkalk, 1 Volumenanteil Wasser sowie Zusatz von Steinmehl. (Als Rezeptbeispiel kann der Innenanstrich des Wiener Belvederes genannt werden: 5 Teile verdünntes Primal, 5 Teile Wasser, 5 Teile Kalk, 3 Teile Steinmehl)

Zusammenfassung der Rezepturen aller Modifikationen

Auf Basis der oben genannten Berechnungen wurden folgende Rezepturen pro 100g Gesamtmasse für die unterschiedlichen Modifikationen verwendet:

Zusatz (Modifikation)			Wasser	Kalk		
Rezeptur der Additivzugabe			Menge			
ohne Zusatz			-	88,50 g	11,50 g	
Proteine	Kaseinpulver	a) Kaseinpulver + Wasser (10g Kaseinpulver in 150g Wasser mind. 6h auflösen) b) 1:1 mit Sumpfkalk aufschließen	5,00 g	84,07 g	10,93 g	
	Magertopfen	Topfen 1:2 mit Sumpfkalk aufgeschlossen	4,29 g	84,70 g	11,01 g	
Leinöl			0,5g in 100g Sumpfkalk zum "Verseifen"	11,56 g	88,44 g	-
Marmormehl			reines Marmormehl	5,44 g	83,68 g	10,88 g
Kunstharzdispersion			verdünnte Kunstharzdispersion (1l Primal CM 330 auf 20l Wasser)	8,81 g	79,73 g	11,46 g

Tabelle 5-2: Zusammenfassung der ausgeführten Rezepturen pro 100g Gesamtmasse

Probenpräparation

Mittels eines Kernbohrers wurden, analog zu den Vorversuchen, Zylinder mit einem Durchmesser von ca. 68mm aus den Steinblöcken entnommen und danach auf eine Höhe von ungefähr 16,4mm mittels einer Steinsäge zugeschnitten.

Danach wurden die Probekörper mittels eines Ultraschallreinigungsgerätes von Staub und Schmutz befreit und anschließend bei einer Temperatur von 70°C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Die Beschriftung der Proben erfolgte entsprechend Ihrer Rezeptur und Modifikation folgendermaßen: „Kürzel der Versuchsreihe – Kürzel der Rezeptur – Probennummer“, wobei pro Modifikation jeweils 3 Prüfkörper untersucht werden (für die Probennummer ergibt sich somit 1 bis 3)

Beschriftung	Kürzel des Versuches	Probekürzel (Mehrfachverw.) ²⁵⁸
Versuchsreihe		
Trocknungsverhalten	A1	A1
Wasserdampfdiffusionswiderstand	A2	A2
Wasseraufnahme	A3	A3
Karbonatisierungsgeschwindigkeit	A4	A1, A2
Haftfestigkeit, Abrieb (Schälwiderstand)	A5	A5
Haftfestigkeit, Abrieb (Dünnschliffe)	A6	A1
Rezeptur		
Unbeschichtet		UB
Kalk ohne Zusatz		OZ
Kalk + Kaseinpulver (Protein 1)		P1
Kalk + Topfen (Protein 2)		P2
Kalk + Leinöl		LÖ
Kalk + Kunstharzdispersion		KD

Tabelle 5-3: Methodik zur Beschriftung der Probekörper

²⁵⁸ Es wurde nicht für jede Versuchsreihe eine eigene Charge an Probenstücken angefertigt, sondern eine sinnvolle Mehrfachverwendung der Probenstücke angestrebt.

5.2.2 Versuchsergebnisse

Versuchsreihe A1 – Beurteilung der Karbonatisierung mittels Phenolphthalein

Ergebnisdarstellung

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse grafisch dargestellt. Alle Probekörper einer Charge zeigen die gleichen Ergebnisse, weshalb nachfolgend die Ergebnisse pro Modifikation aufgelistet werden können:

Besprühen
(alle Proben)



Zeit in Tagen	0	1	2	3	4	5	9	13	17	23	30
A1-OZ	Red	Light Red									
A1-P1	Red	Light Red									
A1-P2	Red	Light Red									
A1-LÖ	Red	Light Red									
A1-MM	Red	Light Red									
A1-KD	Red	Light Red									

Tabelle 5-4: grafische Auswertung der Ergebnisse aus der Versuchsreihe A1

Die meisten Zusätze scheinen das Karbonatisierungsverhalten zu beeinflussen, bei allen modifizierten Beschichtungen zeigen sich geringere Karbonatisierungsgeschwindigkeiten als bei der unmodifizierten Vergleichsprobe. Beschichtungen, welche mit Leinöl modifiziert wurden, weisen die geringste Karbonatisierungsgeschwindigkeit auf, während Marmormehl die Karbonatisierungsrate nur geringfügig beeinflusst. Die mit Proteinen modifizierten Anstriche karbonatisieren ebenfalls eher langsam, wobei die Alkalität der Beschichtung, im Gegensatz zum Leinöl, relativ rasch herabgesetzt wird. Ebenso karbonatisieren die mit Kunstharzdispersion modifizierten Anstriche eher langsam, wobei sich die Alkalität nicht wie bei den protein- und leinölmodifizierten Proben abrupt, sondern relativ konstant vom hohen, über mittleren, bis zum geringen basischen Milieu bewegt. Ein Besprühen der Proben mit Wasser bewirkt eine Erhöhung und im Falle der leinölmodifizierten Proben offensichtlich auch ein neuerliches Aufkeimen des Karbonatisierungsvorganges.

Nach 23 Tagen waren jedenfalls alle Beschichtungen vollständig auskarbonatisiert.

Kurzinterpretation

Auf Basis der Ergebnisse kann im Prinzip keine Aussage über die positiven bzw. negativen Auswirkungen der unterschiedlichen Modifikationen gegeben werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen müssen nachfolgend in jedem Fall mit den hygrischen Eigenschaften bzw. dem Abriebverhalten in Verbindung gebracht werden.

Nur so kann beantwortet werden, ob eine erhöhte Karbonatisierungsgeschwindigkeit auch zu einer besseren Dauerhaftigkeit der Beschichtung führt, oder ob ein langsamer, dafür aber länger andauernder, Reaktionsprozess von Vorteil ist.

Versuchsreihe A2 – Trocknungsverhalten

Ergebnisdarstellung

Nachfolgend werden die Messergebnisse grafisch dargestellt:

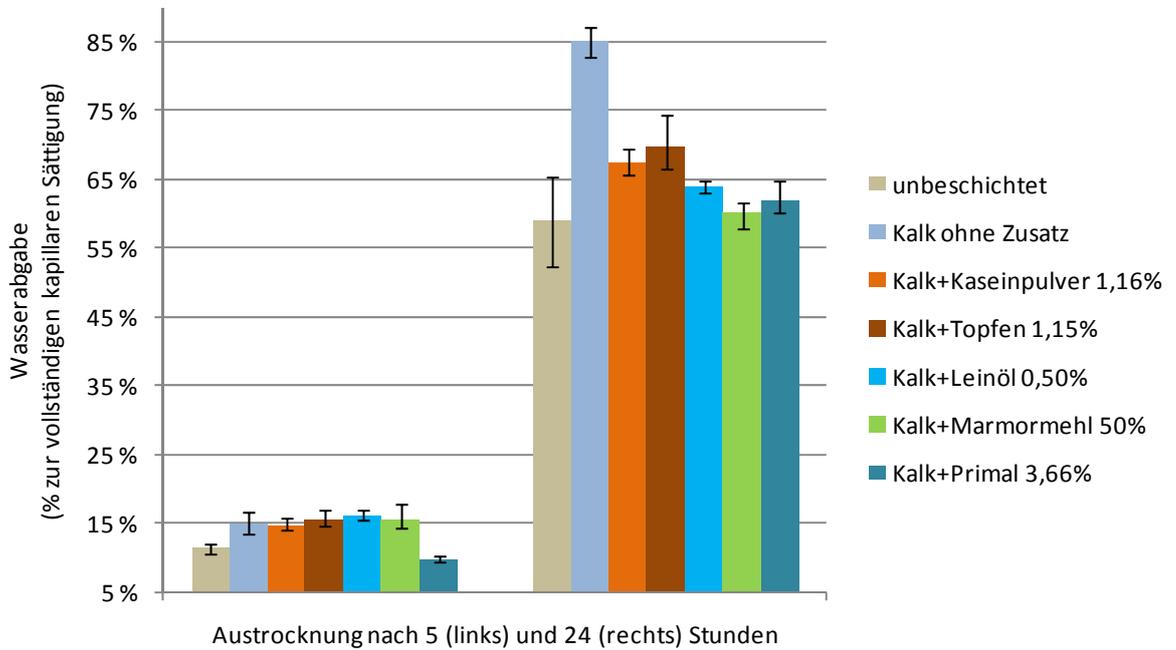


Abbildung 5-14: Versuchsreihe A2 - Darstellung der Wasserabgabe nach 5 und 24 Stunden²⁵⁹

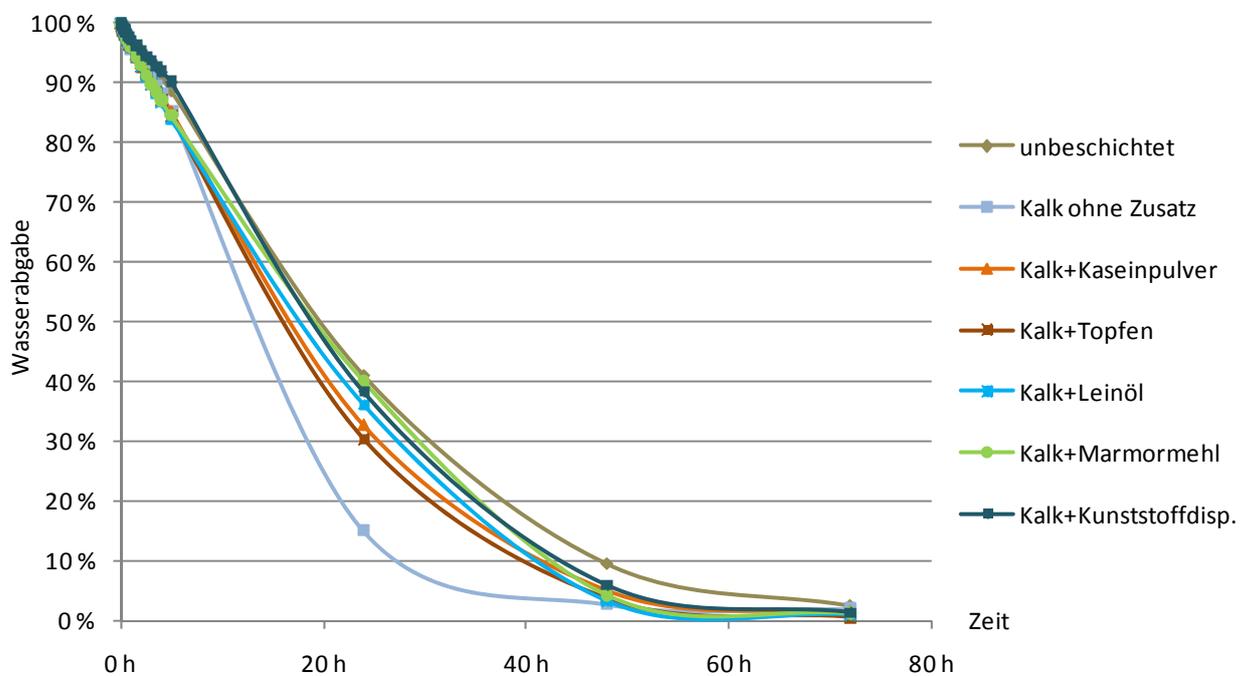


Abbildung 5-15: Versuchsreihe A2 - Darstellung der Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion der Feuchtigkeitsabnahme pro Zeiteinheit (Mittelwerte)²⁵⁹

²⁵⁹ 100% = vollständige kapillare Sättigung der Probe

Beim Betrachten der Einzelproben erkennt man teilweise erhöhte Streubreiten innerhalb einer Charge, dennoch lassen sich eindeutige Trends aus den Versuchsergebnissen ablesen:

Alle beschichteten Probekörper verhalten sich zwar größenordnungsmäßig sehr ähnlich zur unbeschichteten Vergleichsprobe. Sehr klar zeigt sich jedoch, dass alle beschichteten Proben eine höhere Austrocknungsgeschwindigkeit aufweisen als die unbeschichtete Vergleichsprobe.

Weiters wird aus Abbildung 5-14 ersichtlich, dass am Beginn der Austrocknungsperiode abweichende Tendenzen auftreten, als nach längeren Trocknungszeiten.

Am Beginn der Trocknungsphase zeigen die mit Leinöl modifizierten Kalkbeschichtungen geringfügig höhere Austrocknungsgeschwindigkeiten als alle anderen untersuchten Kalkbeschichtungen. Auch die mit Marmormehl und Topfen modifizierten Kalkbeschichtungen zeigen eine geringfügig höhere Austrocknung am Beginn des Austrocknungsverhaltens. Erst nach längeren Trocknungszeiten weisen die mit dem unmodifizierten Kalkanstrich beschichteten Proben höhere Austrocknungsgeschwindigkeiten im Vergleich mit den modifizierten Kalkbeschichtungen auf.

Bei der Betrachtung längerer Trocknungsperioden zeigt sich auch, dass die mit Kunstharzdispersion sowie mit Marmormehl modifizierten Kalkanstriche etwas langsamer austrocknen, als die anderen untersuchten Kalkbeschichtungen. Während jedoch die Modifikation mit Marmormehl am Beginn der Trocknungsperiode eine beschleunigte Austrocknung bewirkt, führt die Modifikation mit Kunstharzdispersionen auch bei Betrachtung kürzeren Trocknungsperioden zu einer signifikanten Verzögerung des Austrocknungsverhaltens. In diesem Fall trocknen die Proben, im Gegensatz zu allen anderen beschichteten Probekörpern, sogar noch langsamer aus als die unbeschichtete Vergleichsprobe.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Die beschleunigten Trocknungsgeschwindigkeiten von Substraten mit Kalkanstrichen kann auf die poröse Struktur des Kalkes zurückgeführt werden, wodurch es möglich wird, dass die Feuchtigkeit aus dem Untergrund kapillar aufgesaugt und so rasch nach außen transportiert wird.

An dieser Stelle sei auch Holmström (1996) genannt, der die Funktion der Kalkschicht mit einem Löschpapier vergleicht. Eine Behauptung die durch die Ergebnisse dieser Untersuchungen bestätigt werden kann.

Durch die Zugabe von Additiven wird diese, als positiv anzusehende, Eigenschaft mehr oder minder verschlechtert. Während die meisten Zusätze vor allem am Beginn der Trocknungsperiode zu einer Erhöhung der Austrocknung und nach längeren Trocknungsphasen zu einer Reduktion der Austrocknung, zeigt sich bei einer Modifikation mit Kunstharz durchgehend eine negative Beeinflussung des Austrocknungsverhaltens. Dabei muss jedenfalls angemerkt werden, dass die Kunstharzdispersionen in wesentlich höheren Mengen beigemischt wurden als die, am Beginn der Austrocknungsperiode, positiv zu verzeichnenden Beimengung von Leinöl (Primal-3,66%, Leinöl-0,50%).

Die Modifikationen scheinen also eine Veränderung des Porengefüges zu bewirken. Diese Schlüsse konnte auch Cechová (2009) in Ihrer Arbeit mit leinölmodifizierten Kalkmörteln ziehen, wo nur eine geringe Zugabemenge²⁶⁰ auch zu entsprechend positiven Veränderungen des Kalkmörtels führte. Höhere Zugabemengen²⁶¹ veränderten das Porengefüge signifikant und führten mitunter zu einer Reduktion der Festigkeit.²⁶²

Aus diesem Grund sollten geringe Zugabemengen angestrebt werden, um somit dem positivem Porengefüge des Kalkanstriches und der damit verbundenen „Löschpapierwirkung“ nicht entgegen zu wirken.

²⁶⁰ 1 M.-% bezogen auf den Bindemittelanteil

²⁶¹ 3 M.-% bezogen auf den Bindemittelanteil

²⁶² vgl. Cechová (2009), S.80f

Versuchsreihe A3 – Wasserdampfdiffusionswiderstand

Ergebnisdarstellung

Nachfolgend werden die Messergebnisse grafisch dargestellt:

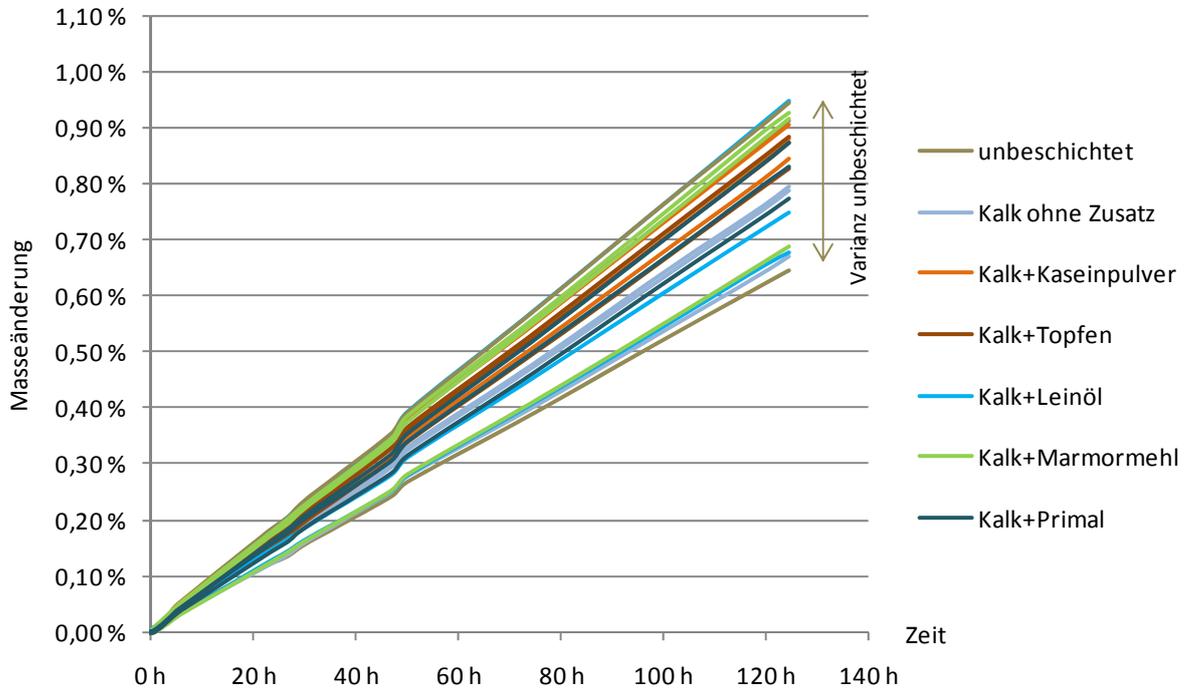


Abbildung 5-16: Versuchsreihe A3 - Darstellung der Diffusionseigenschaften als Funktion der Masseänderung pro Zeiteinheit (alle Ergebniswerte) gemäß wet-cup Methode

Die Streubreite der unbeschichteten Vergleichsproben ist relativ hoch. Alle Messwerte der beschichteten Prüfkörper befinden sich innerhalb dieser Streuung. Aus diesem Grund können keine Trends im Bezug auf die Veränderung des Diffusionsstromes durch die kalkbeschichteten Probekörper im Vergleich mit den unbeschichteten Proben festgestellt werden. Es kann lediglich festgestellt werden, dass die Diffusionseigenschaften des Gesteinssubstrates durch alle hier untersuchten Kalkbeschichtungen nicht wesentlich verändert werden.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Anhand der Versuche konnte festgestellt werden, dass durch das Auftragen eines Kalkanstriches (modifiziert und umodifiziert) die Diffusionseigenschaften des Gesteinssubstrats nicht beeinträchtigt werden. Die relativ hohen Streubreiten der Ergebnisse deuten darauf hin, dass diese Feuchtetransporteigenschaft vom Porengefüge des Substrats bestimmt wird.

Versuchsreihe A4 – Wasseraufnahme

Ergebnisdarstellung

Nachfolgend werden die Messergebnisse grafisch dargestellt:

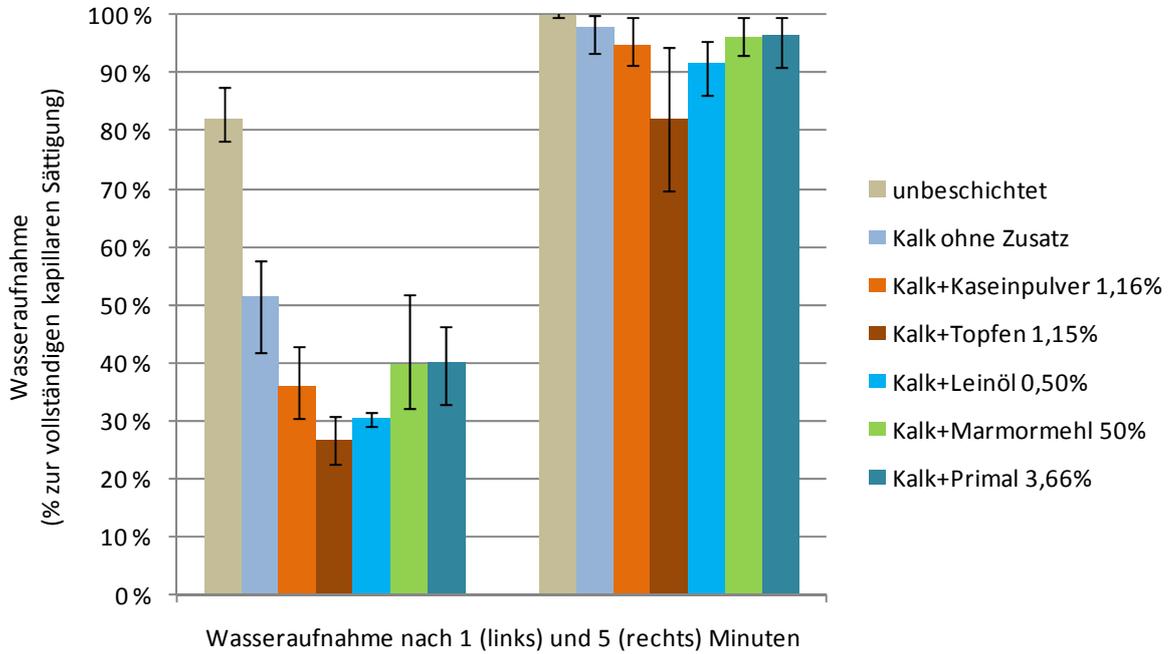


Abbildung 5-17: Versuchsreihe A4 - Darstellung der Wasseraufnahme als Funktion der Massenzunahme pro Zeiteinheit (alle Ergebniswerte)²⁶³

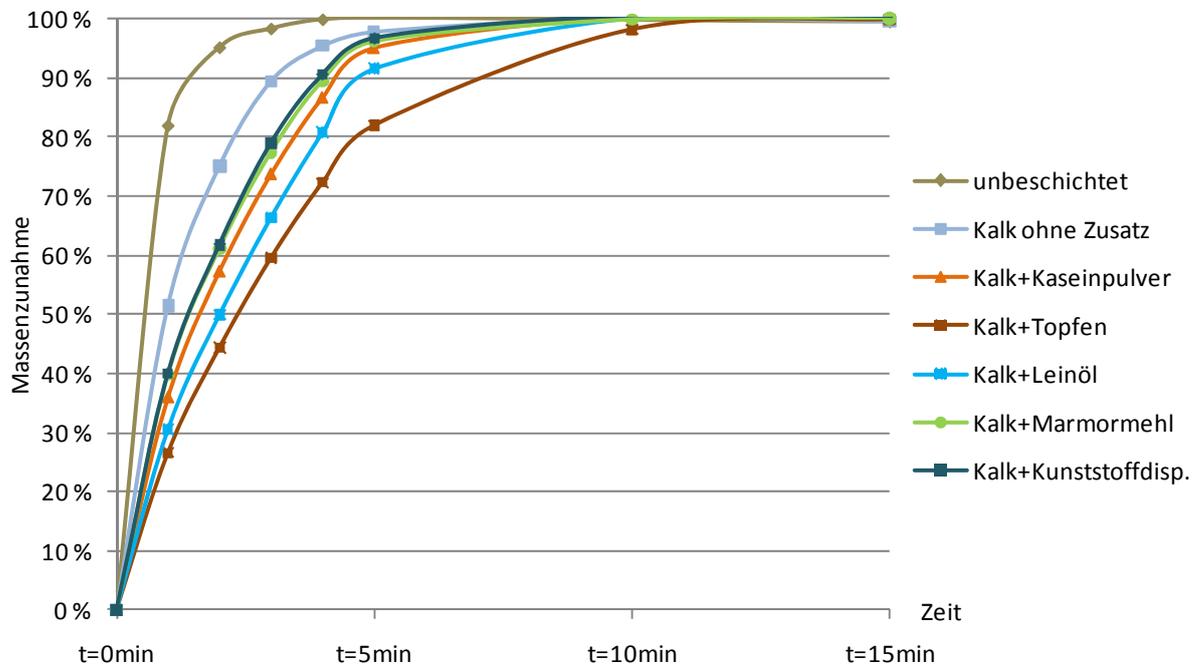


Abbildung 5-18: Versuchsreihe A4 - Darstellung der Wasseraufnahme als Funktion der Massenzunahme pro Zeiteinheit (Mittelwerte)²⁶³

²⁶³ 100% = vollständige kapillare Sättigung der Probe

Die Kurven zeigen im Wesentlichen eine gerade Linie mit plötzlichem Abfall in der Steigung was darauf hindeutet dass die Proben zu diesem Zeitpunkt kapillar gesättigt sind, was auch mit den Beobachtungen während der Messungen korreliert.

Die Streubreiten der einzelnen Messreihen sind zwar teilweise relativ hoch, dennoch lassen sich eindeutige Trends aus den Ergebnissen ablesen.

Auffallend ist, dass die Massenzunahme und somit die Wassersättigung bei den unbeschichteten Probekörpern relativ rasch erfolgt, während die beschichteten Proben doppelt so lange brauchen bis sie wassergesättigt sind. Dabei zeigt sich, dass alle modifizierten Anstriche eine geringere Wasseraufnahme als die unmodifizierte Kalkbeschichtung aufweisen.

Die geringste Massenzunahme kann bei den mit Topfen modifizierten Proben beobachtet werden, wobei hier auch die größten Streubreiten zu verzeichnen sind. Eine stark wasserabweisende Wirkung, mit weit geringeren Varianzen, ist auch bei den leinölmodifizierten Proben ersichtlich.

Die Beimengungen von Marmormehl und von Kunststoffdispersionen üben den geringsten Einfluss auf die Wasseraufnahme aus.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Obwohl die Kalkanstriche sehr dünn aufgetragen wurden, haben sie eine deutlich wasserhemmende Wirkung. Durch die Zugabe von Additiven kann diese Eigenschaft noch verstärkt werden. Vor allem durch die Modifikationen mit Topfen, Leinöl und auch Kaseinpulver kann die wasserhemmende Wirkung des Kalkanstriches bedeutend erhöht werden. Topfen zeigt dabei eine wesentlich bessere wasserhemmende Wirkung als Kaseinpulver, weist aber relativ hohe Streubreiten innerhalb der Charge auf.

Interessanterweise wird durch ein Zusetzen von Leinöl eine höhere Wirkung erzielt als eine Modifikation des Kalkanstriches mit Acrylharz und das obwohl Leinöl in wesentlich geringeren Mengen zugegeben wurde (Leinöl 0,50%, Primal 3,66%).

Prinzipiell zeigt sich auch im Bezug auf die Wasseraufnahme die Tendenz, dass die Zugabe von Zusätzen zwar zu einer Verringerung der Wasseraufnahme führt, je höher die Zugabemengen werden, desto geringer wird allerdings diese wasserabweisende Wirkung. Marmormehl weist mit 50% Zugabemenge die geringste Wirkung aller Modifikationen auf, während Leinöl mit 0,50% die Wasseraufnahme signifikant reduziert. Dies könnte abermals ein Hinweis darauf sein, dass die Zugabe von Additiven nur in geringen Mengen zielführend ist.

Versuchsreihe A5 + A6 – Prüfung der Abriebfestigkeit und Haftung am Untergrund

Ergebnisdarstellung

Schälwiderstandstest

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Schälwiderstandstests in Form der abgezogenen Klebestreifen bildhaft dargestellt:

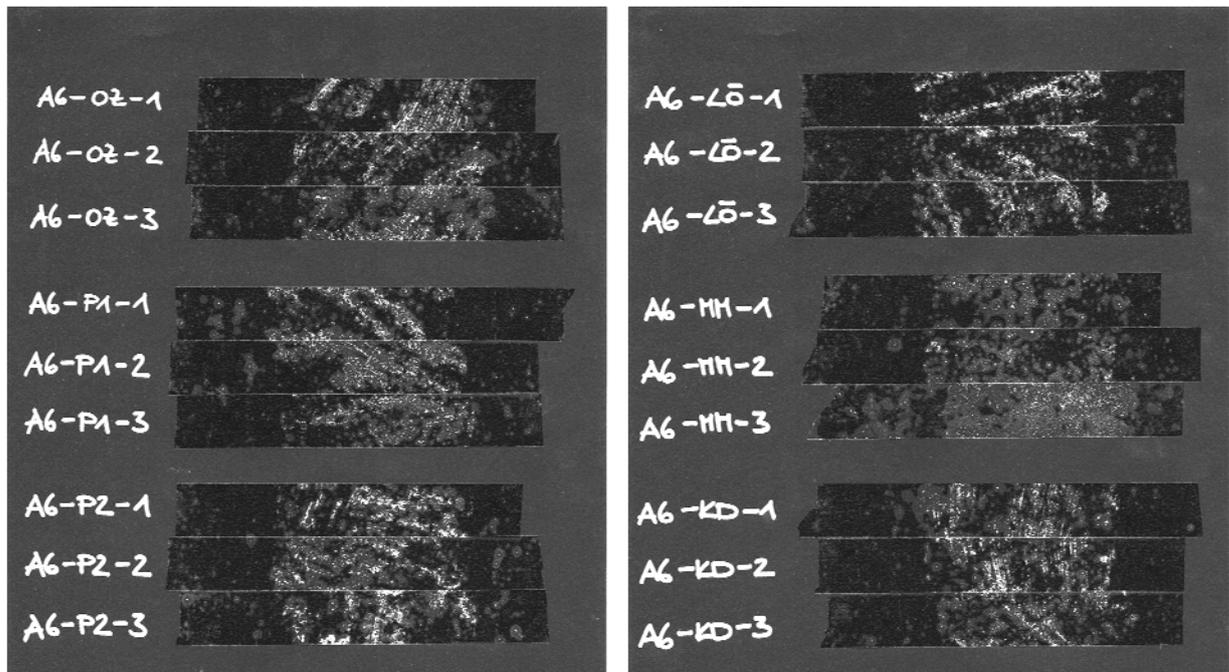


Abbildung 5-19: Versuchsreihe A5 - Ergebnisse des Schälwiderstandstests (anhaftender Teil der Beschichtung am Klebestreifen)

Prinzipiell zeigt sich ein sehr einheitliches Bild innerhalb der einzelnen Chargen. Der Vergleich der einzelnen Modifikationen zeigt jedoch sehr unterschiedliche Abriebbilder. Dadurch lassen sich sehr klare Tendenzen ablesen:

Die Proben mit reiner, unmodifizierter Kalkbeschichtung (OZ) und die Probekörper, welche mit Kaseinpulver (P1) modifiziert wurden, weisen ungefähr den gleichen Abrieb auf.

Die mit Kunstharzdispersion modifizierten Anstriche (KD) weisen einen geringfügig höheren Abrieb auf, der vor allem partiell feststellbar ist.

Die größten Abriebe können bei Modifikationen mit Topfen (P2) und Leinöl (LÖ) beobachtet werden, wo nicht nur einzelne Partikel sondern auch ein Ablösen ganzer Schichten zu bemerken ist.

Die geringsten Abriebe können bei den mit Marmormehl (MM) modifizierten Kalkbeschichtungen beobachtet werden.

Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen

Nachfolgend werden die dünnschliffmikroskopischen Aufnahmen der unbeschichteten Vergleichsprobe den beschichteten Probekörper gegenübergestellt:

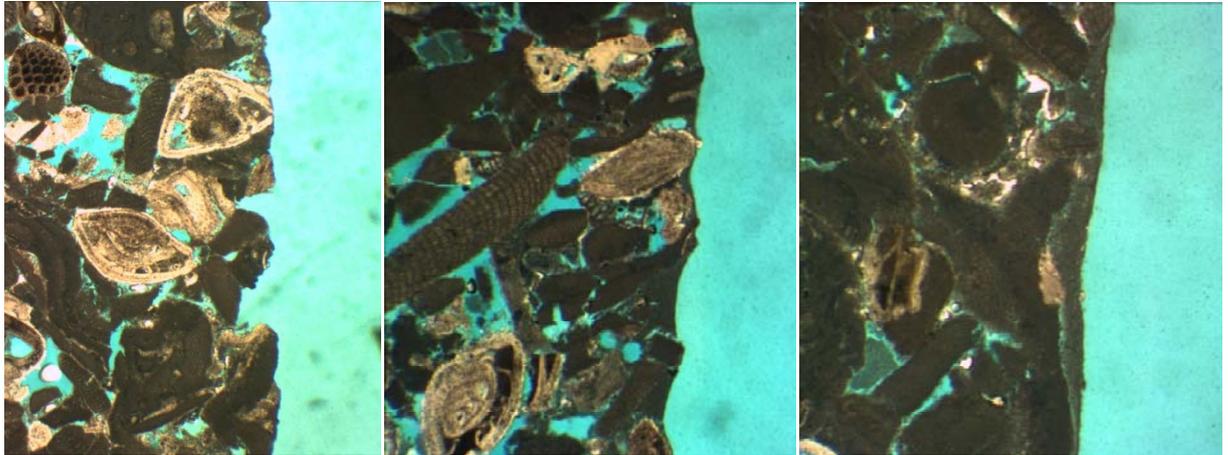


Abbildung 5-20: Versuchsreihe A6 - Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen (Ausschnitt ca. 2mm) Li: unbeschichtet, Mitte: Kalkbeschichtung ohne Zusatz, Re: Kalkbeschichtung mit Marmorermehl

Die unbeschichtete Vergleichsprobe zeigt eine deutlich offene Porenstruktur an der Oberfläche, während durch die Kalkbeschichtung eine geschlossene Oberflächen erzeugt wird. Bei der unmodifizierten Beschichtung erfolgt das Schließen der Poren nur an der Schichtgrenze, während die mit Marmorermehl modifizierte Kalkbeschichtung tiefer in das Porengefüge eindringt.

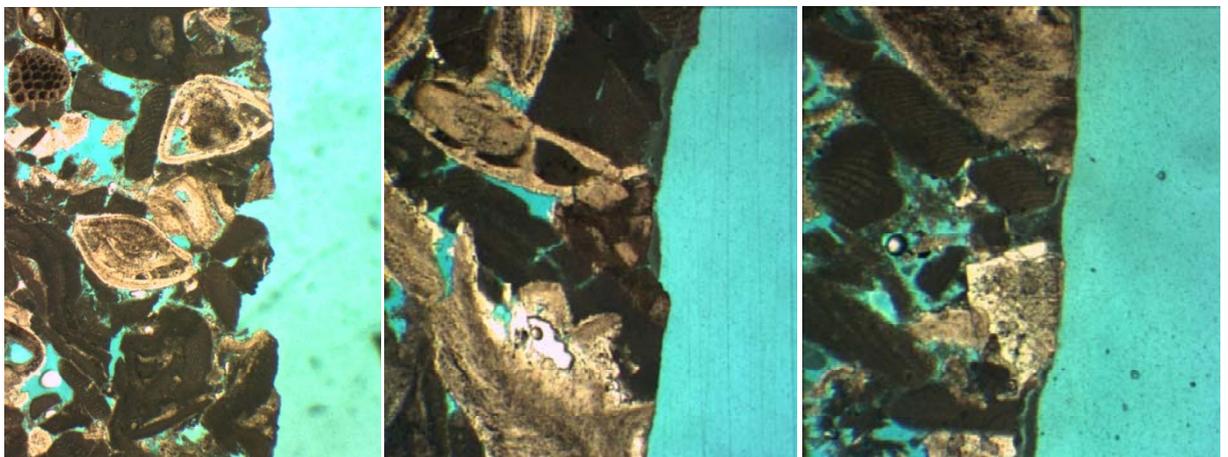


Abbildung 5-21: Versuchsreihe A6 - Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen (Ausschnitt ca. 2mm) Li: unbeschichtet, Mitte: Kalkbeschichtung mit Kaseinpulver, Re: Kalkbeschichtung mit Topfen

Der mit Kaseinpulver modifizierte Anstrich liegt satt auf der Gesteinsoberfläche auf und verschließt das Porengefüge im oberflächennahen Bereich. Der mit Topfen modifizierte Anstrich füllt das offene Porengefüge an der Oberfläche zwar gut aus, dennoch befinden sich zwischen dem Gesteinssubstrat und der Beschichtung klar sichtbare Risse, die darauf hindeuten, dass der Anstrich nicht satt auf der Gesteinsoberfläche aufliegt und sich vom Untergrund löst.

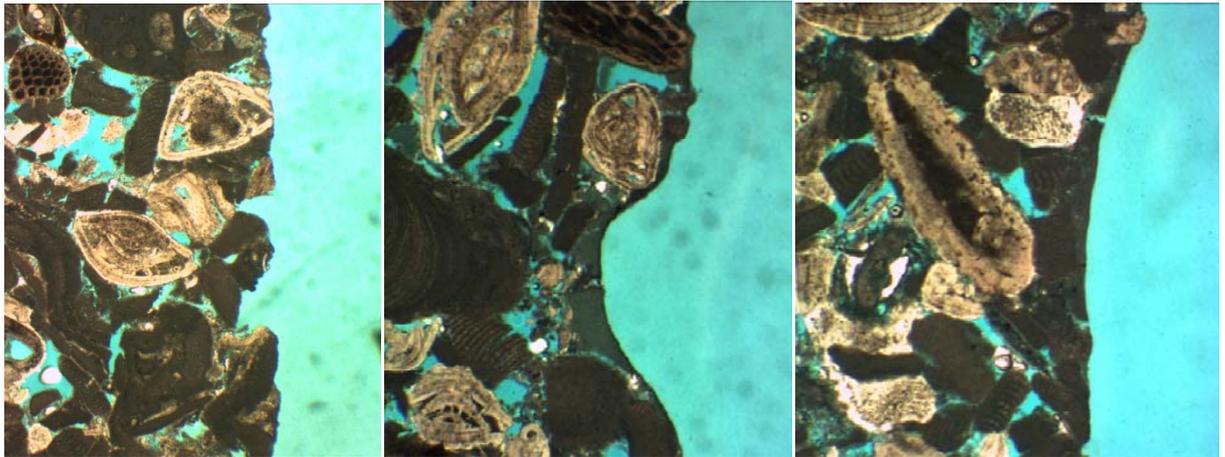


Abbildung 5-22: Versuchsreihe A6 - Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen (Ausschnitt ca. 2mm) Li: unbeschichtet, Mitte: Kalkbeschichtung mit Leinöl, Re: Kalkbeschichtung mit Kunstharzdispersion

Die mit Leinöl modifizierte Kalkbeschichtung schmiegt sich ebenfalls gut an das vorhandene Oberflächengefüge an, wobei hier abermals in Teilbereichen Risse zwischen dem Gesteinssubstrat und der Beschichtung sichtbar sind. Die mit Kunstharz modifizierten Anstriche liegen zwar satt am Oberflächengefüge auf, es zeigen sich jedoch immer wieder signifikante Risse in der Beschichtung quer zu Oberfläche.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Aus den Ergebnissen der Schälwiderstandsuntersuchungen wird ersichtlich, dass alle Proben einer Charge ähnliche Abriebbilder aufweisen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Versuchsergebnisse durchaus aussagekräftig sind.

Mit dem Zusatz von Marmormehl kann der Abrieb wesentlich reduziert werden, was darauf zurückzuführen ist, dass es sich bei Marmormehl im Wesentlichen um einen Füllstoff handelt. Dessen Aufgabe ist es, die Plastizität des Anstriches zu erhöhen und somit Rissbildungen zu vermeiden.

Die Zugabe von Leinöl und Topfen reduziert die Haftzugfestigkeit des Kalkanstriches, was im Zusammenhang mit den dünnschliffmikroskopischen Aufnahmen darauf zurückzuführen ist, dass die Beschichtungen nicht satt am Porengefüge aufliegen, sondern sich leicht vom Untergrund abheben. Abermals interessant zu beobachten ist dabei, dass offenbar bereits sehr geringe Zusatzkonzentrationen eine große Wirkung auf die physikalischen Eigenschaften ausüben können. Kaseinpulver scheint keinen Einfluss auf das Abriebverhalten bzw. die Haftzugfestigkeit auszuüben, und auch die dünnschliffmikroskopischen Aufnahmen unterscheiden sich nicht wesentlich von der unmodifizierten Vergleichsprobe. Die Dünnschliffe zeigen, dass der Zusatz von Kunstharzdispersionen Risse im Beschichtungsgefüge quer zu Oberfläche verursacht, wodurch auch die partiell auftretenden höheren Abriebe beim Schälwiderstandstest erklärbar sind.

5.2.3 Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse

Interpretation der Versuchsergebnisse auf die Dauerhaftigkeit des Kalkanstriches

Nachfolgend werden auf Basis der Untersuchungsergebnisse, Rückschlüsse auf die Dauerhaftigkeit des Substrates und der Beschichtung gezogen.

Dazu werden die unterschiedlich gemessenen Parameter entweder der Dauerhaftigkeit des Substrats oder der Dauerhaftigkeit der Beschichtung zugeordnet.

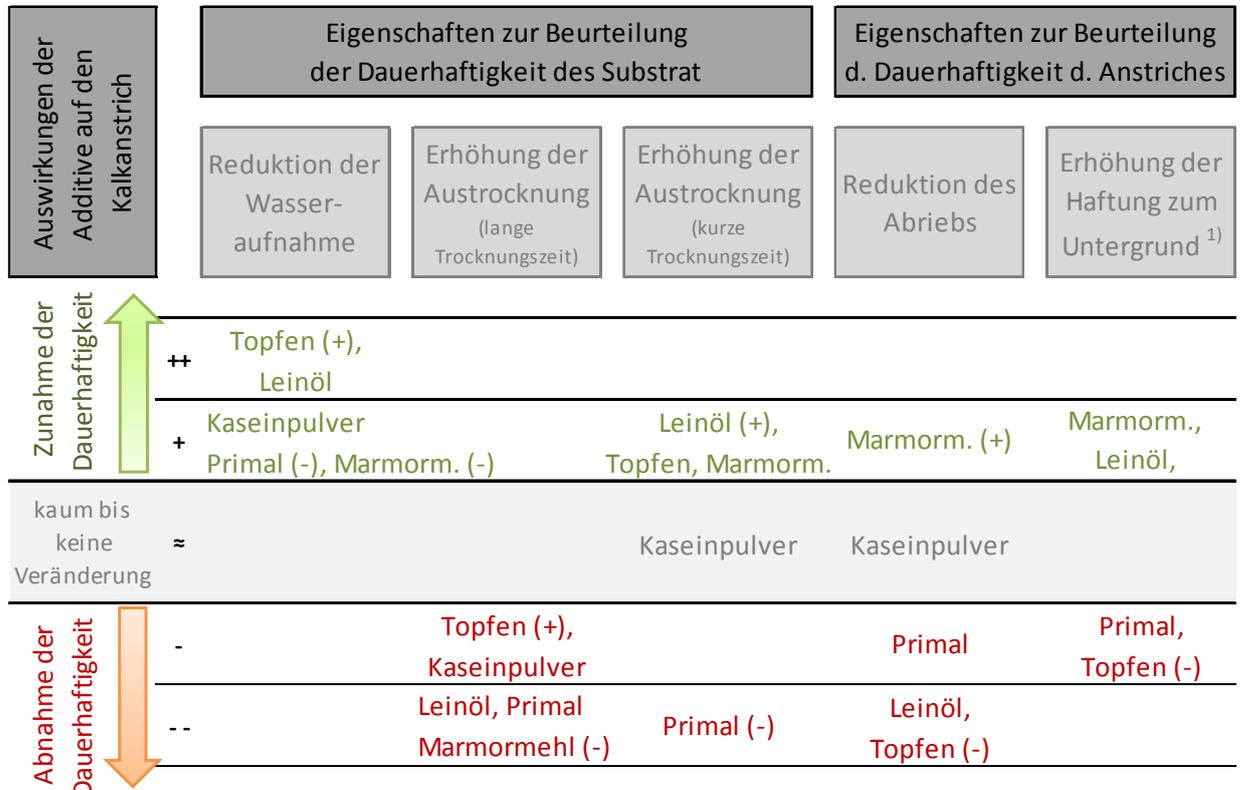
Es wird davon ausgegangen, dass sich eine Reduktion der Wasseraufnahme sowie eine Erhöhung der Austrocknung vorwiegend positiv auf die Dauerhaftigkeit des Substrats auswirken und, dass eine Reduktion des Abriebs sowie eine Erhöhung der Haftung zum Untergrund einen positiven Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Kalkbeschichtung ausüben.

Dementsprechend werden die bauphysikalischen Auswirkungen der einzelnen Additive nach folgendem Bewertungsschema positiv oder negativ beurteilt:

- ++ signifikante Verbesserung des Parameters im Vergleich zum unmodifizierten Kalkanstrich
- + geringfügige Verbesserung des Parameters im Vergleich zum unmodifizierten Kalkanstrich
- ≈ keine wesentliche Veränderung des Parameters durch die Modifikation
- geringfügige Verschlechterung des Parameters im Vergleich zum unmodifizierten Kalkanstrich
- signifikante Verschlechterung des Parameters im Vergleich zum unmodifizierten Kalkanstrich

Für Additive welche die positivsten bzw. negativsten Auswirkungen auf die Kalkbeschichtung, im Vergleich mit den anderen Zusätzen ausüben werden Zusatzpunkte „+“ bzw. „-“ vergeben.

Damit ergibt sich folgende Zuordnung der einzelnen Zusätze:



¹⁾ Beurteilung anhand von: Rissbildung d. Beschichtung, Verbindung zum Untergrund, Verschließen d. Porengefüges

Abbildung 5-23: Auswirkungen unterschiedlicher Modifikationen auf die Dauerhaftigkeit des Substrats und die Kalkbeschichtung, interpretiert aus den Ergebnissen der Laboruntersuchungen

Um eine Gesamtaussage über die Wirkungsweise der Additive treffen zu können werden die Bewertungen summiert und gemittelt. Dabei wird jedes + als positiver Zahlenwert (+1) und jedes – als negativer Zahlenwert (-1) gerechnet. Analog der Bewertung aus Abbildung 5-23 erfolgt die Vergabe von Zusatzpunkten für die positivste (+1) und negativste (-1) Auswirkung.

Wie eingangs erwähnt muss die Dauerhaftigkeit des Substrats in der Denkmalpflege einen höheren Stellenwert einnehmen als die Dauerhaftigkeit der Beschichtung. Aus diesem Grund nehmen die Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Substrats eine zweifache Wertigkeit ein.

Damit ergibt sich folgende Gesamtbeurteilung der einzelnen Modifikationen:

Beurteilung:	Substrat	Beschichtung	Zusatzpunkte	Insgesamt
Wertigkeit:	2	1	1	
+10,0 ⋮ +2,0 +1,0 0,0 -1,0 -2,0 -3,0 ⋮ -10,0	Topfen Leinöl	Marmormehl Kaseinpulver	Leinöl, Marmormehl	Marmormehl Leinöl Topfen, Kaseinpulver
	Kaseinp., Marmorm.		Topfen, Kaseinp.	
	Primal	Leinöl Primal Topfen	Primal	Primal

Abbildung 5-24: Auswirkung unterschiedlicher Modifikationen auf die Dauerhaftigkeit des Gesamtsystems Substrat und Beschichtung

Aus obiger Abbildung wird deutlich, dass Leinöl und Marmormehl die positivsten Auswirkungen aufweisen, wobei Leinöl die hygrischen Eigenschaften des Kalkanstriches verbessert und die Dauerhaftigkeit der Beschichtung im Gegensatz dazu eher negativ beeinflusst. Marmormehl verhält sich genau umgekehrt.

Kaseinpulver und Topfen beeinflussen die Eigenschaften ebenfalls positiv, wobei die Wirksamkeit insgesamt geringer ist als bei Leinöl und Marmormehl.

Primal beeinflusst sowohl die hygrischen Eigenschaften als auch die hier beurteilte Dauerhaftigkeit der Kalkbeschichtung, im Vergleich mit allen anderen untersuchten Modifikationen, mit Abstand am negativsten.

Zusammenfassung

Anhand dieser Ergebnisse und Interpretationen können folgende Aussagen getroffen werden:

- Kalkbeschichtungen verbessern die hygrischen Eigenschaften des Gesteinsgefüges indem sie die Austrocknungsgeschwindigkeit erhöhen, die Wasseraufnahme reduzieren und den Wasserdampfdiffusionswiderstand kaum beeinflussen.
- Durch den Zusatz von Leinöl werden die hygrischen Eigenschaften verbessert.
- Durch den Zusatz von Marmormehl wird die Dauerhaftigkeit der Beschichtung erhöht.
- Unterschiedliche Proteinzusammensetzungen führen zu unterschiedlichen Auswirkungen der hygrischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit. Während auf der einen Seite Kaseinpulver als Additiv die hygrischen Eigenschaften weniger positiv beeinflusst als die Zugabe von Topfen, führt auf der anderen Seite die Zugabe von Topfen zu einer Reduktion der Dauerhaftigkeit der Beschichtung, was bei einer Modifikation mit Kaseinpulver nicht der Fall ist.
- Proteine beeinflussen die Eigenschaften der Kalkbeschichtung zwar prinzipiell positiv, dennoch zeigt Leinöl insgesamt eine bessere Effizienz. Deshalb und auch aus Gründen der erhöhten Gefahr eines mikrobiellen Bewuchses im Außenbereich, muss die Modifikation mit Leinöl positiver bewertet werden als die mit Proteinen.
- Die Zugabe von Kunstharzdispersionen führt zu keiner Verbesserung der hier genannten Eigenschaften einer Kalkbeschichtung. Es zeigt sich eher die gegenteilige Tendenz.
- Bereits geringe Mengen an Additiven zeigen eine große Wirkung, während bei zu hohen Zugabemengen die Gefahr einer Entkräftung der positiven Eigenschaften des Kalkanstriches besteht.

Durch die Ergebnisse dieser Versuchsreihe wird rückgeschlossen, dass ein optimales Ergebnis mit der Modifikationskombination aus Leinöl und Marmormehl erreicht werden kann, wobei die Zugabe von Leinöl in geringen Mengen erfolgen muss.

Zur Prüfung der Wirksamkeit wird dieser so konzipierte Kalkanstrich nachfolgend (vgl. Kap. 5.3) mit anderen, modernen Anstrichsystemen verglichen.

5.3 VERSUCHSREIHE B – VERGLEICH VON KALKANSTRICHEN MIT MODERNEN ANSTRICHSYSTEMEN

5.3.1 Grundlagen

Verwendetes Gesteinsmaterial – St. Margarethener Kalksandstein²⁶⁴

Allgemeine Eigenschaften

Der St. Margarethener Kalksandstein wird im Römersteinbruch bei Sankt Margarethen im Burgenland gewonnen. Es handelt sich um einen gelbbraunen bis hellgrauen, sehr porösen Kalksandstein.

Der St. Margarethener Kalksandstein ist prinzipiell ein sehr inhomogenes Gestein mit einer Vielzahl von Varietäten, wobei bei einem typischen St. Margarethener oftmals deutliche Rotalgenkolonien und Muscheleinschlüsse sichtbar sind.

Die Rohdichte beträgt 1,97 bis 2,26 kg/dm³, die Druckfestigkeit liegt zwischen 30 und 50 N/mm².

Der St. Margarethener Kalksandstein wurde bei einer Vielzahl historischer Bauwerke in Ostösterreich und hier vor allem in Wien eingesetzt. Als berühmtestes Beispiel kann der Wiener Stephansdom genannt werden.²⁶⁵

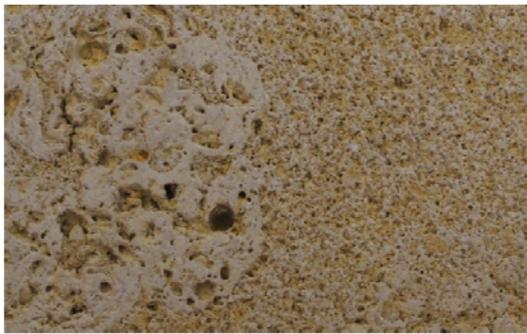


Abbildung 5-25: St. Margarethener Kalksandstein mit typischen Rotalgeneinschlüssen (Länge des Bildausschnittes ca. 5cm)

Dünnschliff

Im Dünnschliff wird deutlich, dass das Gesteinsgefüge aus einer Vielzahl fossiler Kalkreste aufgebaut ist. Auch hier sind, wie auch beim Kalksandstein aus Vicenza, vorwiegend Kalkrotalgenbruchstücken und Foraminiferen erkennbar.

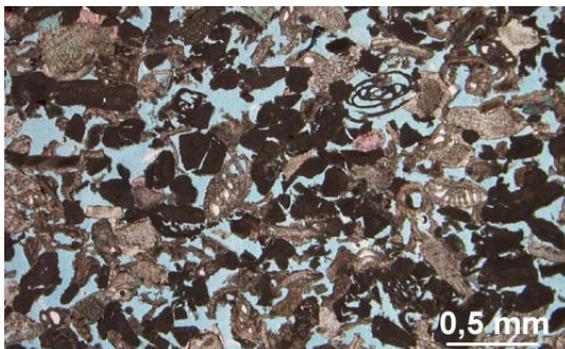


Abbildung 5-26: Dünnschliff St. Margarethener Kalksandstein²⁶⁶ (Länge des Bildausschnittes ca. 10mm)

²⁶⁴ Begründung für den Gesteinswechsel: 1. es sollten auch die Auswirkungen unterschiedlicher Gesteinssubstrate untersucht werden (Wechselwirkung Beschichtung/Substrat). 2. die verwendete Varietät des St. Margarethener Kalksandsteins hatte ein wesentlich homogeneres Gefüge als der zuvor verwendete Pietra di Vicenza, womit geringfügigere Streubreiten der Versuchsergebnisse erwartet wurden.

²⁶⁵ vgl. Rohatsch (2010)

²⁶⁶ Quelle: Rohatsch, Hauser: de.wikipedia (Originaltext Rohatsch, A.)

Verwendetes Beschichtungsmaterial

Im Zuge der Hauptversuchsreihe B wurden unterschiedliche (historische und moderne) Kalkanstrichrezepturen mit modernen Anstrichsystemen, in diesem Fall unterschiedliche Dispersions-Silikatanstriche und Silikonharzbeschichtungen, verglichen:

1. Kalkbeschichtung
 - reiner unmodifizierter Sumpfkalkanstrich
 - Sumpfkalkanstrich mit Leinöl und Marmormehl (konzipierte Rezeptur aus Kap. 5.2)
 - Sumpfkalkanstrich mit Kunstharzdispersion und Marmormehl (derzeit in der Praxis übliche Kalkrezeptur)

2. Dispersions-Silikatbeschichtungen
 - Dispersions-Silikatbeschichtung (Fertigprodukt)
 - Dispersions-Silikatbeschichtung mit sehr hohem Füllstoffanteil (Eigenprodukt Fa. Baurex®)

3. Silikonharzbeschichtungen
 - lasierend mit geringem Füllstoffanteil (Fertigprodukt)
 - Silikonharzbeschichtung mit hohem Füllstoffanteil (Rezeptur 1) (Fertigprodukt + Marmormehl)
 - Silikonharzbeschichtung mit hohem Füllstoffanteil und Kalkzugabe (Rezeptur 2) (Fertigprodukt + Marmormehl + Sumpfkalk)

Anmerkung: Zur Vereinfachung der Beschriftung sowie der besseren Lesbarkeit werden alle Dispersions-Silikatbeschichtungen nachfolgend vorwiegend unter dem Begriff Silikatbeschichtungen geführt.

Kalkbeschichtungen

Analog zu den Versuchsreihen A wurde ein mindestens 3 Jahre eingelagerter Sumpfkalk der Firma Baumit²⁶⁷ verwendet (s. Produktdatenblatt, Anhang B).

Für die modifizierten Kalkbeschichtungen wurden Leinöl, Marmormehl und Kunstharzdispersion analog den Produkten der Versuchsreihe A verwendet (vgl. Kap. 5.2.1).

Die Rezeptur erfolgte dabei in Anlehnung an praxisübliche Mischverhältnisse²⁶⁸:

5 Volumenteile Sumpfkalk
 5 Volumenteile Wasser
 5 Volumenteile verdünntes Primal (1l Primal auf 20l Wasser)
 3 Volumenteile Marmormehl

Um den Einfluss unterschiedlicher Zugabemengen auf das Ergebnis ausschließen zu können, wurde dem Kalkanstrich jeweils die gleiche Menge Additiv (Leinöl und Kunstharz) als auch Füllstoff beigemischt. Es ergeben sich damit folgende Rezepturen für eine anzustrebende Verdünnung des Kalkanstriches 1:10 mit Wasser:

Rezeptur kunstharzmodifizierter Kalkanstrich:

0,39 g Primal	} = 5 Volumenteile verdünntes Primal ≈ 50ml	
7,85 g Wasser		
10,72 g	= 5 Volumenanteile Sumpfkalk (ρ Sumpfkalk = 1300g/dm ³)	
8,25 g	= 5 Volumenanteile Wasser = 50ml	
6,43 g	= 3 Volumenanteile Marmormehl (ρ Marmormehl = 1285 g/dm ³)	
<u>66,36 g zusätzliches Wasser zur Verdünnung 1:10</u>		
100,00 g Masse insgesamt		0,39 % Primal CM330 in der Gesamtmasse
		3,66 % Primal bezogen auf Sumpfkalk
		6,43 % Marmormehl in der Gesamtmasse
		60,00 % Marmormehl bezogen auf Sumpfkalk

Rezeptur leinölmodifizierter Kalkanstrich:

0,39 g Leinöl	
82,46 g Wasser	
10,72 g Sumpfkalk	
6,43 g Marmormehl	
<hr/>	
100,00 g Masse gesamt	
	0,39 % Leinöl in der Gesamtmasse
	3,66 % Leinöl bezogen auf Sumpfkalk
	6,43 % Marmormehl in der Gesamtmasse
	60,00 % Marmormehl bezogen auf Sumpfkalk

Der unmodifizierte Kalkanstrich wurde im Verhältnis 1:10 ohne Additive und Füllstoffe angerührt.

²⁶⁷ Baumit Baustoffe GmbH, A-4820 Bad Ischl; URL: www.baumit.com

²⁶⁸ Mündliche Mitteilung Mag. Christian Gurtner, Atelier Gurtner Wien, Zirkusgasse 39, A-1020 Wien: Rezeptbeispiel Innenanstrich des oberen Belvederes.

Dispersions-Silikatbeschichtungen

Silikatbeschichtung – Fertigprodukt

Zur Anwendung kam eine einkomponentige Dispersions-Silikatfarbe (Silikatfarbe D) der Firma Remmers²⁶⁹. Dabei handelt es sich lt. Herstellerangaben um einen deckenden Schlämmanstrich, geeignet für unbeschichtetes Kalksandsteinmauerwerk²⁷⁰. Der Anstrich setzt sich aus Kaliumsilikaten mit organischen Stabilisatoren als Bindemittel sowie lichtechten Pigmenten zusammen (detaillierte Zusammensetzung s. Produktdatenblatt, Anhang D).

Silikatbeschichtung - Eigenprodukt Fa. Baurex[®]

Zusätzlich zum Fertigprodukt der Firma Remmers, wurde auch ein Eigenprodukt der Firma Baurex²⁷¹ angewendet, welches einen erhöhten Füllstoff- bzw. Zuschlaganteil aufweist. Eine genaue Zusammensetzung des Produkts ist nicht bekannt.

Silikonharzbeschichtungen

Silikonharzbeschichtung – Fertigprodukt

Zur Anwendung kam das Produkt „Historic Schlämmlasur“ der Firma Remmers²⁷². Dabei handelt es sich lt. Herstellerangaben um eine feinsandige, halblasierende Schlämme, welche primär für denkmalgeschützte Natursteinobjekte konzipiert wurde. Das Produkt setzt sich aus siliciumorganisch vergüteten Co-polymeren als Bindemittel sowie lichtechten Pigmenten und anorganischen, mineralischen Füllstoffen zusammen (detaillierte Zusammensetzung s. Produktdatenblatt, Anhang D).

Silikonharzbeschichtung, Rezeptur 1 – mit hohem Füllstoffanteil

Zur Untersuchung der, aus der Literaturrecherche offenen Fragestellung zum Einfluss von Füllstoffen kunstharzbasierender Anstriche, wurde zur Erhöhung des Füllstoffanteils folgende Rezeptur angewendet (in Volumsteilen):

- 1 Teil Silikonharzbeschichtung – Fertigprodukt Fa. Remmers (s.obenstehend)
- 1 Teil Marmormehl

Silikonharzbeschichtung, Rezeptur 2 – mit hohem Füllstoffanteil und Kalkzugabe

Zusätzlich wurde eine weitere Rezeptur entwickelt, um die Auswirkungen der Zugabe von Sumpfkalk, unter Anbetracht dessen positiver hygrischer Eigenschaften, zu untersuchen und festzustellen, ob die Silikonharzbeschichtung dadurch entsprechend aufgewertet werden kann. Folgende Rezeptur wurde angewendet (in Volumsteilen):

- 1 Teil Silikonharzbeschichtung – Fertigprodukt Fa. Remmers (s. obenstehend)
- 1 Teil Sumpfkalk (Firma Baumit, s. obenstehend)
- 1 Teil Marmormehl
- 1 Teil destilliertes Wasser

²⁶⁹ Remmers Baustofftechnik GmbH, D- 49624 Lönigen; URL: www.remmers.de

²⁷⁰ Anmerkung: In Deutschland werden unter dem Begriff Kalksandstein auch kalzitisch zementierte Quarzsandsteine sowie Kunststeine verstanden.

²⁷¹ Baurex Bautenschutz GmbH, A-1210 Wien; URL: www.baurex.at

²⁷² Remmers Baustofftechnik GmbH, D- 49624 Lönigen; URL: www.remmers.de

Probenpräparation

Mittels eines Kernbohrers wurden Zylinder mit einem Durchmesser von ca. 103 mm aus den Steinblöcken entnommen und danach auf eine Höhe von ca. 15 mm mittels einer Steinsäge zugeschnitten.

Danach wurden die Probekörper mittels eines Ultraschallreinigungsgerätes von Staub und Bohrmehl befreit und anschließend bei einer Temperatur von 70°C bis zur Massenkonstanz getrocknet und abgewogen.

Anschließend wurden die Proben entsprechend den Versuchsanordnungen seitlich mit Acryllack versiegelt und die jeweilige Beschichtung aufgebracht. Der Auftrag der Kalkbeschichtung erfolgte gemäß Kap. 4. Die Silikonharzbeschichtungen sowie die Silikatbeschichtungen wurden gemäß Herstellerangaben auf trockenem Untergrund aufgebracht. Zur Sicherstellung einer Vergleichbarkeit der einzelnen Anstrichsysteme untereinander wurden die Silikat- sowie die Silikonharzbeschichtungen nur einmalig aufgetragen. Ein Auftrag mehrerer Schichten hätte dazu geführt, dass die Anstrichmenge- und somit Anstrichdicke unverhältnismäßig größer gewesen wäre als bei den Kalkbeschichtungen.

Nachfolgend werden die Beschichtungsoberflächen dargestellt:

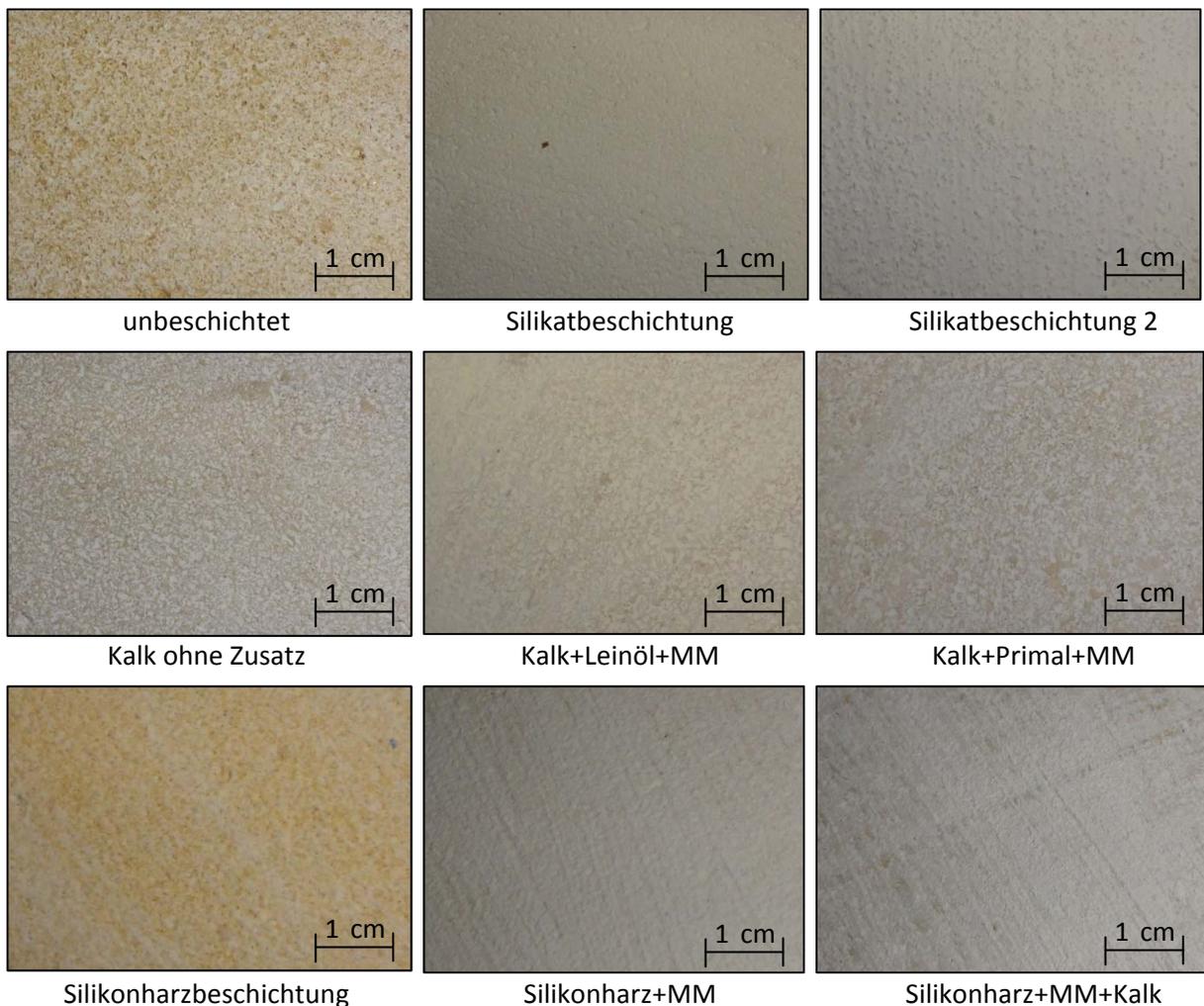


Abbildung 5-27: fotografische Dokumentation der Beschichtungsflächen auf St. Margarethener Kalksandstein

Wie aus obiger Abbildung ersichtlich wird, handelt es sich lediglich bei den Kalk- und Silikonharzbeschichtungen um lasierende Anstrichsysteme²⁷³, wobei bei den Silikonharzbeschichtungen die Pinselstriche im Gegensatz zu den Kalkbeschichtungen sichtbar sind und das Gesamterscheinungsbild inhomogener als bei den anderen Beschichtungen erscheint. Bei der Silikatbeschichtung 2 ist der erhöhte Füllstoffanteil deutlich erkennbar.

Die Beschriftung der Probekörper erfolgte entsprechend Ihrer Beschichtung und der jeweiligen Versuchsreihe wie folgt:

Kürzel der Versuchsreihe – Kürzel der Beschichtung – Probennummer²⁷⁴

Art der Versuchsreihe und Beschichtung	Kurzbezeichnungen und Kürzel	
	Kurbez. Versuch	Probenkürzel ²⁷⁵
Trocknungsverhalten	B1	B1
Wasserdampfdiffusionswiderstand	B2	B1
Wasseraufnahme	B3	B2
Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen	B4	B1,B2
Trocknungsverhalten nach Frost-Tauwechselbeanspruchung	B5	B2
Wasseraufnahme nach Frost-Tauwechselbeanspruchung	B6	B2
Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen nach Verwitterung (Frost-Tauwechsel und Salzkristallisation)	B4	B1, B2
Ultraschalluntersuchungen nach Verwitterung (Frost-Tauwechsel und Salzkristallisation)	B5	B1,B2
Beschichtung	Kurzbezeichnung	Kürzel
unbeschichtete Vergleichsprobe	unbeschichtet	UB
Kalk ohne Zusatz	Kalk ohne Zusatz	OZ
Kalk + Leinöl + Marmormehl	Kalk+Leinöl+MM	K1
Kalk + Kunstharzdispersion + Marmormehl	Kalk+Primal+MM	K2
Silikatfarbe - Fertigprodukt	Silikatbeschichtung	SK
Silikatfarbe - Eigenprodukt	Silikatbeschichtung 2	SK2
Silikonharzbeschichtung - Fertigprodukt	Silikonharzbeschichtung	SH
Silikonharzbeschichtung – Rezeptur 1	Silikonharz+MM	SH-R1
Silikonharzbeschichtung – Rezeptur 2	Silikonharz+MM+Kalk	SH-R2

Tabelle 5-5: Methodik zur Beschriftung der Probekörper sowie der Kurzbezeichnungen in der Auswertung

²⁷³ Vorwiegend Silikonharzbeschichtung sowie Silikonharzbeschichtung+Marmormehl+Kalk, bei der Silikonharzbeschichtung+Marmormehl handelt es sich bereits um einen eher deckenden Anstrich.

²⁷⁴ Für die modifizierten Kalkbeschichtungen, allen Silikonharzbeschichtungen sowie der Silikatfarbe 1 wurden jeweils 3 Probenstücke untersucht. Für die unmodifizierte Kalkbeschichtung, der Silikatfarbe 2 und der unbeschichteten Vergleichsprobe wurde nur jeweils 1 Probenstück untersucht.

²⁷⁵ Es wurde eine sinnvolle Mehrfachverwendung der Probenstücke angestrebt.

Folgende Versuchskombinationen wurden mit den in Tabelle 5-5 genannten Versuchsreihen und Rezepturen durchgeführt:

Beschichtung	Versuche						
	unverwittert				nach Verwitterung		
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
unbeschichtete Vergleichsprobe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kalk ohne Zusatz	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓
Kalk + Leinöl + Marmormehl	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kalk + Kunstharzdispersion + Marmormehl	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Silikatbeschichtung - Fertigprodukt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Silikatbeschichtung - Eigenprodukt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Silikonharzbeschichtung – Fertigprodukt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Silikonharzbeschichtung – Rezeptur 1	✓	-	✓	-	-	-	-
Silikonharzbeschichtung – Rezeptur 2	✓	-	✓	-	-	-	-

Tabelle 5-6: Versuchsdurchführungen (Versuchsreihen mit ausgewählten Beschichtungen)

5.3.2 Versuchsergebnisse

Versuchsreihe B1 – Trocknungsverhalten

Ergebnisdarstellung

Nachfolgend werden die Ergebnisse grafisch dargestellt:

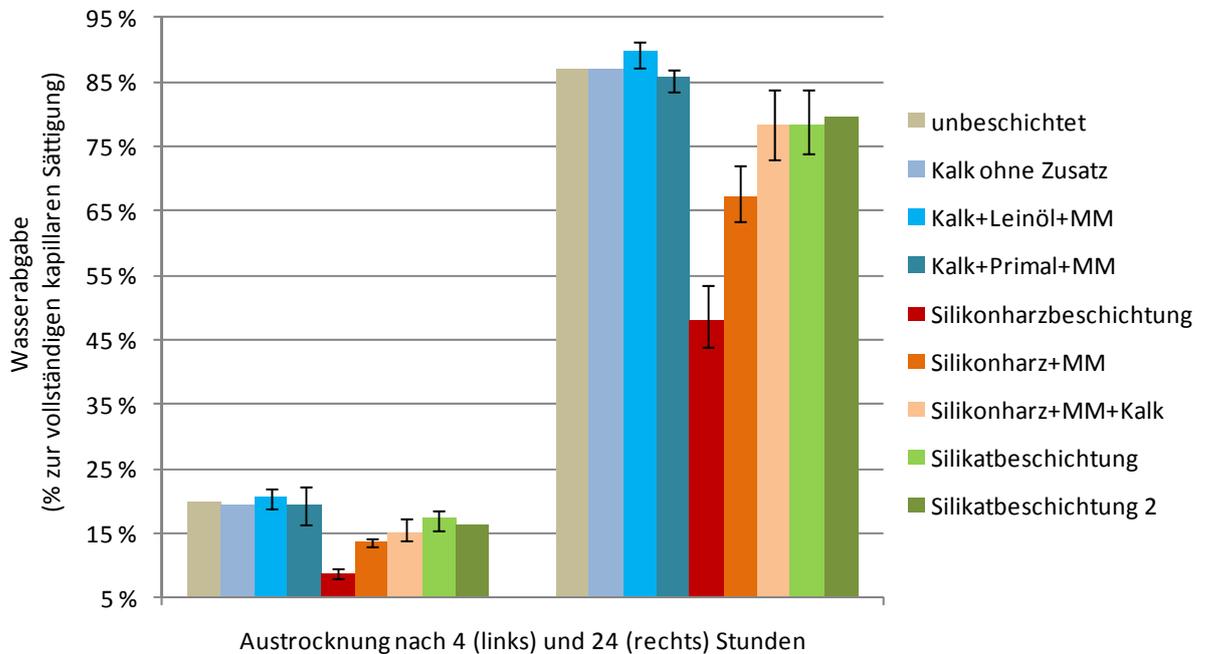


Abbildung 5-28: Darstellung der Wasserabgabe nach 4 und 24 Stunden Trocknungszeit²⁷⁶

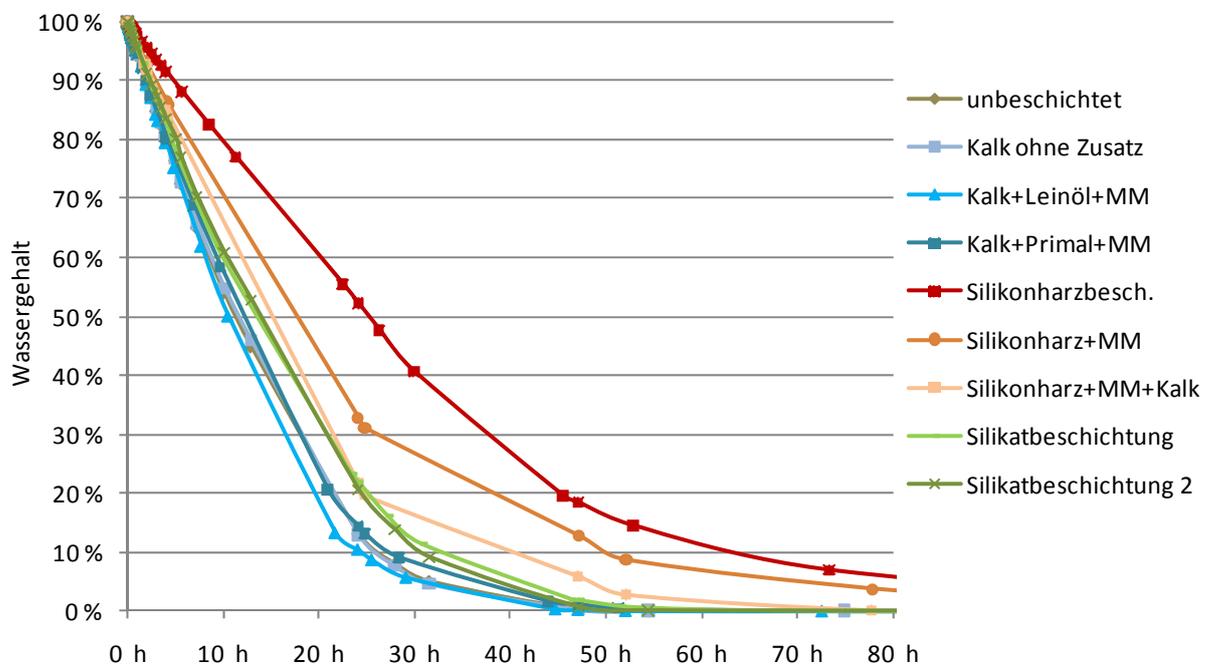


Abbildung 5-29: Darstellung der Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion der Feuchtigkeitsabnahme pro Zeiteinheit (Mittelwerte)²⁷⁶

²⁷⁶ 100% = vollständige kapillare Sättigung der Probe

Aus obigen Abbildungen lassen sich aufgrund der geringen Streubreiten innerhalb einer Charge klare Trends ablesen.

Die Austrocknungsgeschwindigkeiten der Probekörper mit der fertig angemischten Silikonharzbeschichtung sind deutlich geringer als alle anderen Proben. Eine vollständige Austrocknung ist auch nach 80 Stunden noch nicht gegeben, während die anderen Proben bereits nach ca. 50 Stunden entsprechend dem Ausgleichsfeuchtegehalt ausgetrocknet sind. Durch die Zugabe von Füllstoffen kann die Austrocknungsgeschwindigkeit wesentlich erhöht werden und durch die Zugabe von Kalk wird dieser Effekt nochmals verstärkt.

Durch beide Silikatbeschichtungen wird die Austrocknungsgeschwindigkeit im Vergleich mit einem unbeschichteten Substrat geringfügig verzögert.

Analog zur Versuchreihe A wird die Austrocknung durch eine Beschichtung mit Kalk nicht beeinträchtigt und teilweise sogar erhöht. Die größten Austrocknungsgeschwindigkeiten weisen dabei die mit Leinöl und Marmormehl modifizierten Kalkanstriche auf während die Modifikation mit Kunstharzdispersion und Marmormehl keine Verbesserung der Austrocknungseigenschaften zeigt und die gleichen Austrocknungsgeschwindigkeiten aufweisen, wie die unbeschichtete sowie die mit reinem Sumpfkalk beschichteten Vergleichsproben.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Während in den Versuchsreihen A die Austrocknungsgeschwindigkeit durch alle Zusätze verzögert wurde, zeigt sich hier durch die Modifikation mit Leinöl und Marmormehl eine völlig andere Tendenz. Offenbar kann dies einerseits durch die geeignete Kombination mehrere Zusätze, in diesem Fall durch den Füllstoff Marmormehl sowie die eigentlich wasserabweisende Substanz Leinöl, das Porengefüge entsprechend positiv beeinflusst werden und somit eine Optimierung der ohnehin bereits gut ausgeprägten austrocknenden Eigenschaften des Kalkanstriches erzielt werden. Andererseits können die veränderten Tendenzen auch auf die Verwendung unterschiedlicher Gesteinssubstrate zurückzuführen sein, was bestätigen würde, dass das Zusammenspiel zwischen Substrat und Anstrich die feuchtetechnischen Eigenschaften wesentlich bestimmt.

Eine Modifikation mit Kunstharzdispersion und Marmormehl verändert die Austrocknungseigenschaften des Kalkanstriches weder im positiven noch im negativen Sinne.

Durch Silikonharzanstriche wird die Austrocknung wesentlich verzögert, was darauf hindeutet, dass dieser Anstrich als relativ dichte, wasserdampfundurchlässige Schichte an der Oberfläche wirkt. Durch die Zugabe von Füllstoffen kann diese Eigenschaft signifikant positiv beeinflusst werden, wobei hier vor allem die Zugabe von Sumpfkalk zu einer Verbesserung der Austrocknungseigenschaften führt.

Versuchsreihe B2 – Wasserdampfdiffusionswiderstand

Ergebnisdarstellung

Nachfolgend werden die Ergebnisse grafisch dargestellt:

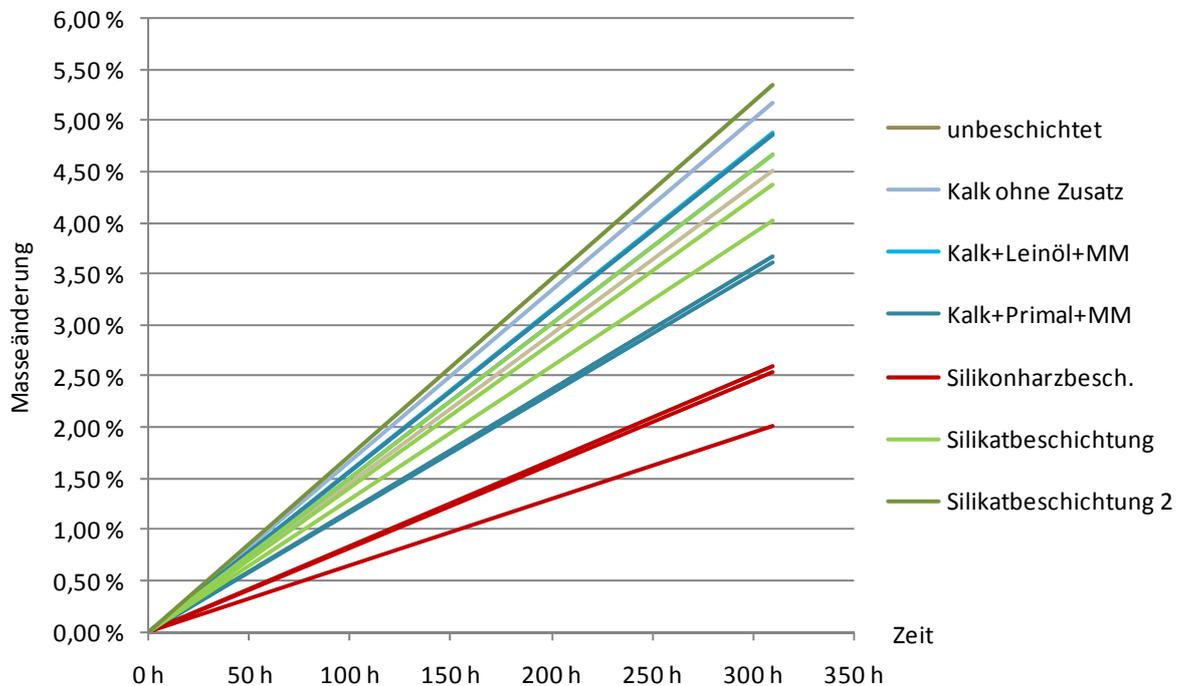


Abbildung 5-30: Darstellung der Diffusionseigenschaften als Funktion der Masseänderung pro Zeiteinheit (alle Ergebniswerte) gemäß wet-cup Methode

Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Versuchsreihe A. Die Streubreiten aller Probekörper sind relativ hoch. Die Diffusionsstromdichten aller kalkbeschichteten sowie der mit Silikatanstrichen beschichteten Proben sind innerhalb der gleichen Streubreite. Lediglich die silikonharzbeschichteten Proben weisen eine klar reduzierte Diffusionsstromdichte auf.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Anhand der Versuche konnte festgestellt werden, dass durch das Auftragen von Kalkanstrichen, sowohl modifiziert als auch unmodifiziert, die Diffusionseigenschaften des Gesteinssubstrats nicht beeinträchtigt werden. Diese Beobachtung geht mit den Ergebnissen der Versuchsreihe A konform.

Auch durch Silikatfarben wird die Diffusion des Gesteins nicht negativ beeinflusst.

Das Auftragen einer Silikonharzbeschichtung bewirkt jedoch, im Vergleich mit den anderen Beschichtungstoffen, eine wesentliche Reduktion der Diffusionseigenschaften, womit eine Austrocknung auch in der dampfförmigen Phase nur mehr langsam stattfinden kann.

Versuchsreihe B3 – Wasseraufnahme

Ergebnisdarstellung

Nachfolgend werden die Ergebnisse grafisch dargestellt:

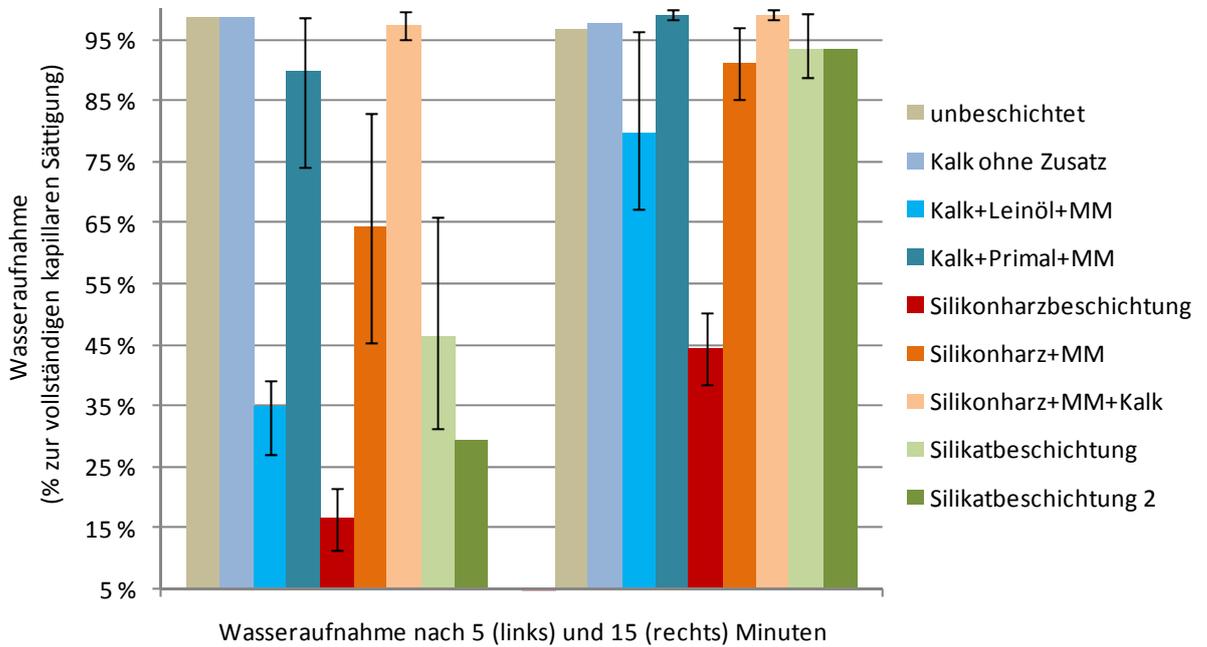


Abbildung 5-31: Darstellung der Wasseraufnahme nach 5 und 15 minütiger Wasserlagerung der beschichteten Oberfläche²⁷⁷

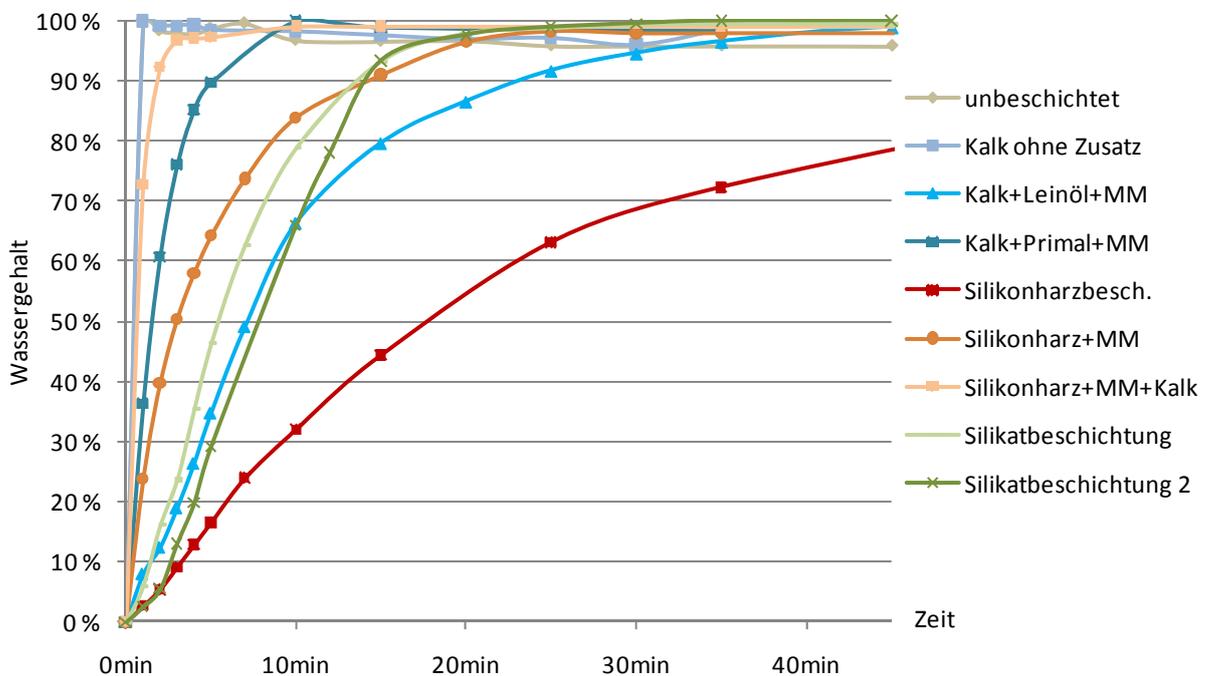


Abbildung 5-32: Darstellung der Wasseraufnahme als Funktion der Massenzunahme pro Zeiteinheit (Mittelwerte)²⁷⁷

²⁷⁷ 100% = vollständige kapillare Sättigung der Probe

Prinzipiell weisen die meisten Probekörper innerhalb einer Charge relativ hohe Streubreiten auf (vgl. detaillierte Ergebnisdarstellung Anhang C), dennoch lassen sich eindeutige Tendenzen zwischen den unterschiedlichen Beschichtungssystemen ablesen.

Es zeigt sich beim unbeschichteten Gestein (St. Margarethener) eine wesentlich raschere Wasseraufnahme, als bei der Versuchsreihe A (Pietra die Vicenza). Bereits nach einer Minute ist die unbeschichtete Vergleichsprobe vollständig mit Wasser gesättigt.

Ebenso verhalten sich die unmodifizierten kalkbeschichteten Proben. Im Gegensatz zur Versuchsreihe A kann, durch die Beschichtung mit einem unmodifizierten Kalkanstrich, keine Reduktion der Wasseraufnahme beobachtet werden.

Erst durch die Zugabe von Additiven wird die Wasseraufnahme signifikant reduziert.

Trotz der großen Streubreiten der mit Leinöl modifizierten Kalkbeschichtungen wird deutlich, dass Leinöl in Kombination mit Marmormehl die Wasseraufnahme wesentlich stärker reduziert als die Modifikation mit Primal und Marmormehl. Hier zeigt sich vor allem nach längerer Wasserlagerung ein wesentlicher Unterschied. Während die mit Primal modifizierten Kalkanstriche bereits nach 10-15 min vollständig kapillar gesättigt sind, zeigt sich bei den mit Leinöl modifizierten Beschichtungen erst nach 30-45 min eine vollständige kapillare Sättigung.

Die wasserhemmende Wirkung der mit Leinöl modifizierten Proben kann auch durch einen einfachen Test bestätigt werden, indem alle kalkbeschichteten Probekörper mit Wasser besprüht werden und anschließend visuell begutachtet werden:



- 1 Kalkbeschichtung mit Leinöl und Marmormehl (Rezeptur K1)
- 2 Kalkbeschichtung mit Acrylharzdispersion und Marmormehl (Rezeptur K2)
- 3 Kalkbeschichtung ohne Zusatz (Rezeptur OZ)

Abbildung 5-33: Kalkanstriche vor (oben) und nach (unten) dem Besprühen mit Wasser

Aus obiger Abbildung wird deutlich, dass die mit Leinöl und Marmormehl modifizierte Kalkbeschichtung die größte wasserhemmende Wirkung aufweist.

Auch die silikatbeschichteten Proben erfahren eine wesentlich schnellere kapillare Sättigung als die mit Leinöl modifizierten Kalkbeschichtungen. Zwischen den einzelnen Silikatbeschichtungssystemen ist kein wesentlicher Unterschied im Wasseraufnahmeverhalten feststellbar.

Die Silikonharzbeschichtung als Fertigprodukt reduziert die Wasseraufnahme maßgeblich und zeigt im Vergleich mit allen anderen untersuchten Beschichtungssystemen die geringste zeitabhängige Wasseraufnahme. Eine vollständige kapillare Sättigung ist auch nach 60 min noch nicht gegeben. Durch die Zugabe von Füllstoffen (Marmormehl und Kalk) wird die Wasseraufnahme jedoch signifikant erhöht. Je höher der Füllstoffanteil wird, desto höher wird auch die Wasseraufnahme.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Da beim Vergleich der beiden Versuchsreihen A und B unterschiedliche wasserhemmende Eigenschaften des unmodifizierten Kalkanstriches festgestellt werden konnten, kann davon ausgegangen werden, dass die Eigenschaften des Substrats (wie z.B. die Porenradialverteilung) einen wesentlichen Einfluss auf die hygrischen Eigenschaften der (Kalk)beschichtung ausübt.

Wie bereits in der Versuchsreihe A ermittelt, werden durch die Modifikation mit Primal, Leinöl und Marmormehl die wasserhemmenden Eigenschaften einer Kalkbeschichtung verbessert, allerdings teilweise in einem völlig anderen Ausmaß (im Verhältnis zum unmodifizierten Kalkanstrich). Vor allem die Kombination von Leinöl und Marmormehl zeigt in der Versuchsreihe B noch höhere wasserhemmende Eigenschaften als die Modifikation mit reinem Leinöl (ohne Marmormehl) in der Versuchsreihe A. Dies ist einerseits mit den unterschiedlich verwendeten Gesteinssubstraten in Verbindung zu bringen, andererseits zeigt sich dadurch auch, dass die Kombination aus unterschiedlichen Modifikationen zu einer völlig anderen Eigenschaftsveränderung des Kalkanstriches führt.

Die signifikant höhere wasserhemmende Wirkung der Silikonharzbeschichtung muss sicherlich auch mit der Beschichtungsdicke in Verbindung gebracht werden. Aufgrund der zähen Konsistenz des Anstriches musste dieser wesentlich dicker aufgetragen werden, als die lasierenden Kalkanstriche.

Die reduzierte wasserhemmende Wirkung des Silikonharzanstriches mit erhöhtem Füllstoffanteil kann auf die, durch die Füllstoffe entstehende Vergrößerung der Oberfläche und Veränderung der Porenstruktur zurückzuführen sein.

Ob und inwieweit die jeweiligen wasserhemmenden Eigenschaften für das Gesteinssubstrat nun vorteilhafter sind, kann jedenfalls nur im Zusammenhang mit den Austrocknungseigenschaften beurteilt werden (vgl. Kap. 5.3.3)

Versuchsreihe B4 – dünnschliffmikroskopische Aufnahmen

Nachfolgend werden die Dünnschliffe der unbeschichteten Vergleichsprobe den einzelnen beschichteten Probekörpern gegenübergestellt:

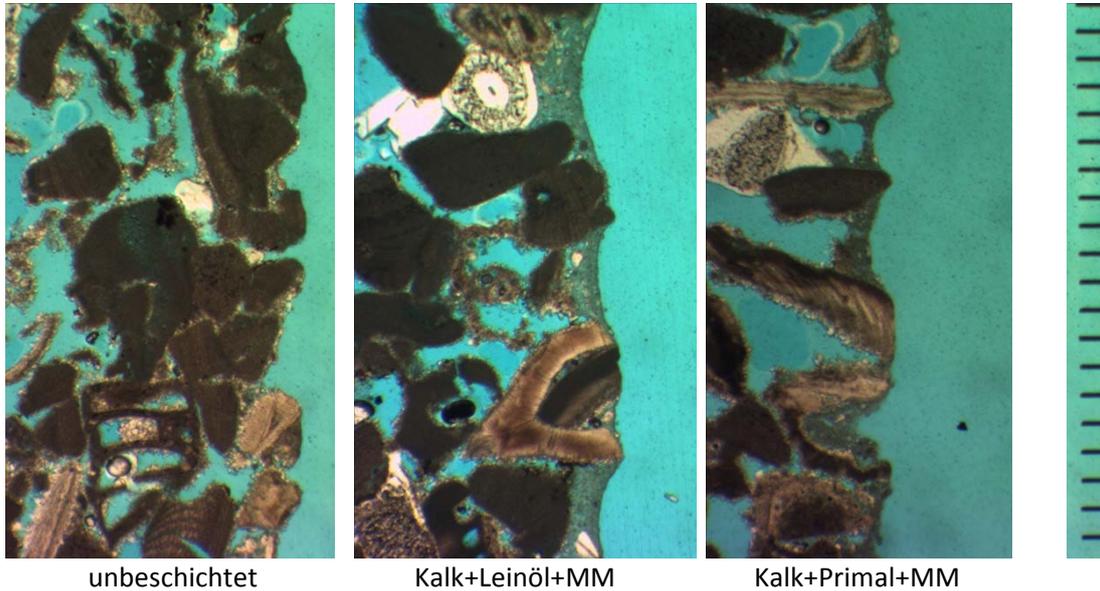


Abbildung 5-34: Versuchsreihe B4 - Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen (Ausschnitt ca. 2mm) der unbeschichteten und der kalkbeschichteten Proben

Die unbeschichtete Vergleichsprobe zeigt eine deutlich offene Porenstruktur an der Oberfläche, während durch die Kalkbeschichtungen eine geschlossene Oberflächenstruktur erzeugt wird. Bei der mit Leinöl und Marmormehl modifizierten Beschichtung erkennt man ein gleichmäßiges Gefüge, welches ca. 0,1-0,2 mm tief in die Porenstruktur eindringt. Das Marmormehl ist als Füllstoff ebenfalls gut ersichtlich. Bei dem mit Acrylharz modifiziertem Kalkanstrich dringt die Beschichtung nur ca. 0,05-0,1 mm tief in die Porenstruktur ein. Es bilden sich lediglich oberflächennahe Beschichtungsstege zwischen dem Gefüge, wo teilweise auch Risse erkennbar sind.

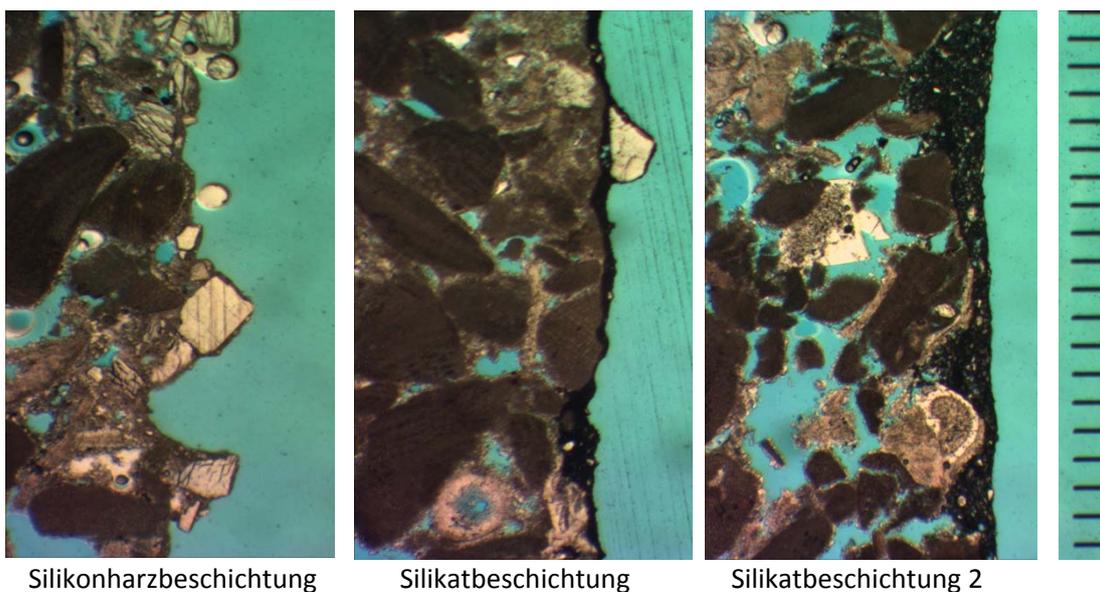


Abbildung 5-35: Versuchsreihe B4 - Dünnschliffmikroskopische Aufnahmen (Ausschnitt ca. 2mm) der Silikatbeschichtungen im Vergleich mit der mit Leinöl modifizierten Kalkbeschichtung

Während die Kalkbeschichtung lediglich die offenen Poren der gerauten Oberfläche verschließt, werden durch die Silikonharz- und Silikatanstriche Schichten über der Gesteinsoberfläche gebildet.

Die Silikonharzbeschichtung bildet an der Gesteinsoberfläche eine komplexe Struktur aus Luftblasen, Füllstoffen, Zuschlägen und dem Silikonharz, wobei das Harz vor allem an der äußeren Oberfläche gut sichtbar ist und dort einen dichten Überzug bildet.

Auch bei den Silikatbeschichtungen erkennt man deutlich, dass die Schichten eine wesentlich dichtere Struktur aufweisen als die Kalkbeschichtung.

Bei der Silikatbeschichtung als Fertigprodukt sind Füllstoffe gut erkennbar, die Schicht fügt sich gut an das Gefüge an. Die Silikatbeschichtung 2 hat eine gröbere Porenstruktur und dringt auch tiefer in die Porenstruktur ein.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Durch die Dünnschliffe wird deutlich erkennbar, dass sowohl die mit Leinöl modifizierte Kalkbeschichtung als auch die Silikatbeschichtungen das Porengefüge am besten verschließen. Während die Silikatanstriche jedoch eine deutliche Schicht an der Oberfläche bilden, handelt es sich bei der Kalkbeschichtung um einen lasierenden Anstrich, der vorwiegend nur die offene Gesteinsstruktur ebnet und dadurch die Oberfläche verkleinert.

Im Gegensatz dazu dringt die mit Primal modifizierte Kalkbeschichtung nur oberflächennah in das Gefüge ein und bildet dort Stege aus, welche teilweise auch gerissen sind. Die Bildung dieser Stege kann auf die Zugabe des erhärteten Acrylharzes zurückgeführt werden. Durch dessen Sprödigkeit kann auch die Bildung von Rissen in diesen Bereichen erklärt werden.

Bei der Silikonharzbeschichtung handelt es sich um ein äußerst komplexes Gefüge aus Bindemittel, Zuschlägen und Füllstoffen mit einer dichten Schichte an der Oberfläche, wodurch die signifikante Veränderung der hygrischen Eigenschaften erklärbar wird.

Versuchsreihe B5 – visuelle Beurteilung der Beschichtung nach Verwitterungssimulationen

Während der einzelnen Zyklen der Verwitterungssimulationen (Frost-Tauwechselversuche und Salzkristallisationsversuche) wurden die Beschichtungen fotografisch dokumentiert und Veränderungen aufgezeichnet.

Nachfolgend werden die visuellen Beurteilungen nach dem jeweils letzten Zyklus fotografisch dargestellt und erläutert.

Visuelle Beurteilung nach Frost-Tauwechselsimulationen

Die nach den insgesamt 25 Frost-Tauwechselzyklen²⁷⁸ durchgeführten fotografischen Dokumentationen der Beschichtungsoberflächen, werden nachfolgend dargestellt und dokumentiert:

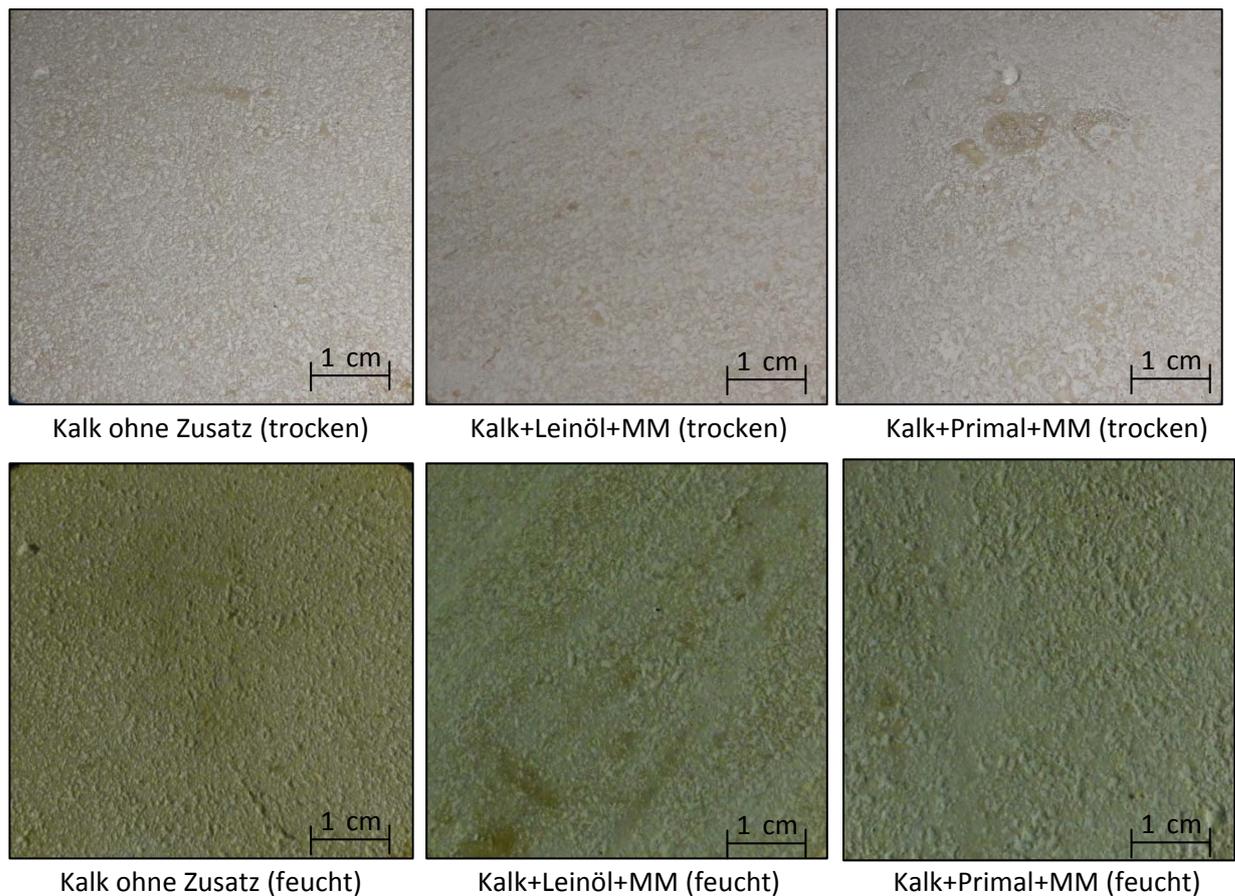


Abbildung 5-36: fotografische Dokumentation der Beschichtungsoberflächen basierend auf Kalktechnologie nach 25 Frost-Tauwechselbeanspruchungen im trockenen (oben) und feuchten (unten) Zustand (Bildausschnitt ca. 5cm)

Wie aus obiger Abbildung ersichtlich wird, kann visuell keine Zerstörung der Kalkbeschichtungen festgestellt werden. Im feuchten Zustand wirken alle Beschichtungen, wie auch vor den Verwitterungssimulationen stark lasierend. Bei den mit Leinöl und Primal modifizierten Anstrichen, sind im feuchten Zustand teilweise auch Vergilbungen sichtbar. Die mit Leinöl modifizierte Kalkbeschichtung zeigt dabei an manchen Stellen auch leicht „ölige“ Flecken.

²⁷⁸ 10malige Klimawechselbeanspruchung im Klimaschrank (nach kapillarer Wassersättigung und Besprühen mit Wasser), 5 Frost-Tauzyklen (abwechselnde Lagerung in Wasser und Gefriertruhe), weitere 10 Klimawechselbeanspruchungen im Klimaschrank vakuumverpackt (nach kapillarer Wassersättigung)

Bei den Silikonharz- und Silikatbeschichtungen zeigt sich folgendes Bild:

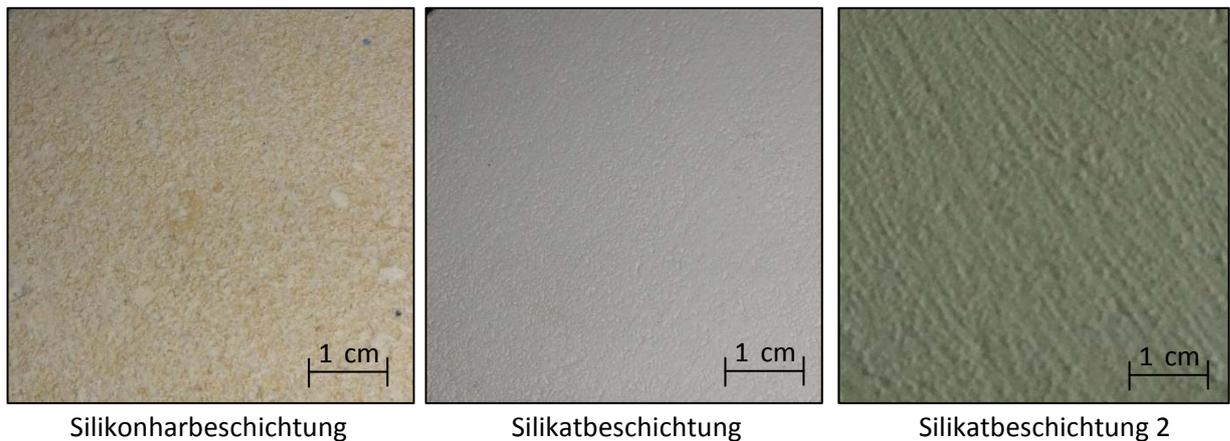


Abbildung 5-37: fotografische Dokumentation der Beschichtungsflächen basierend auf Silikonharz- und Silikattechnologie nach 25 Frost-Tauwechselsbeanspruchungen (Bildausschnitt ca. 5cm)

Auch bei den Silikonharz- und Silikatbeschichtungen kann visuell keine Schädigung der Beschichtungsfläche festgestellt werden. Die Silikatbeschichtung 2 zeigt stellenweise ebenfalls leichte, kaum sichtbare Vergilbungen.

Das Erscheinungsbild ist im trockenen und feuchten Zustand bei allen 3 Beschichtungssystemen ident.

Das Gesteinsgefüge selbst zeigt visuell ebenfalls keine Zerstörungen auf.

Im Randbereich sind leichte Abplatzungen und Risse des Abdichtungsmaterials erkennbar.

Visuelle Beurteilung nach Salzkristallisationssimulationen

Die nach 16 Salzkristallisationszyklen²⁷⁹ durchgeführten fotografischen Dokumentationen werden nachfolgend fotografisch dargestellt und dokumentiert.

Die unbeschichtete Vergleichsprobe zeigt dabei folgendes Bild:

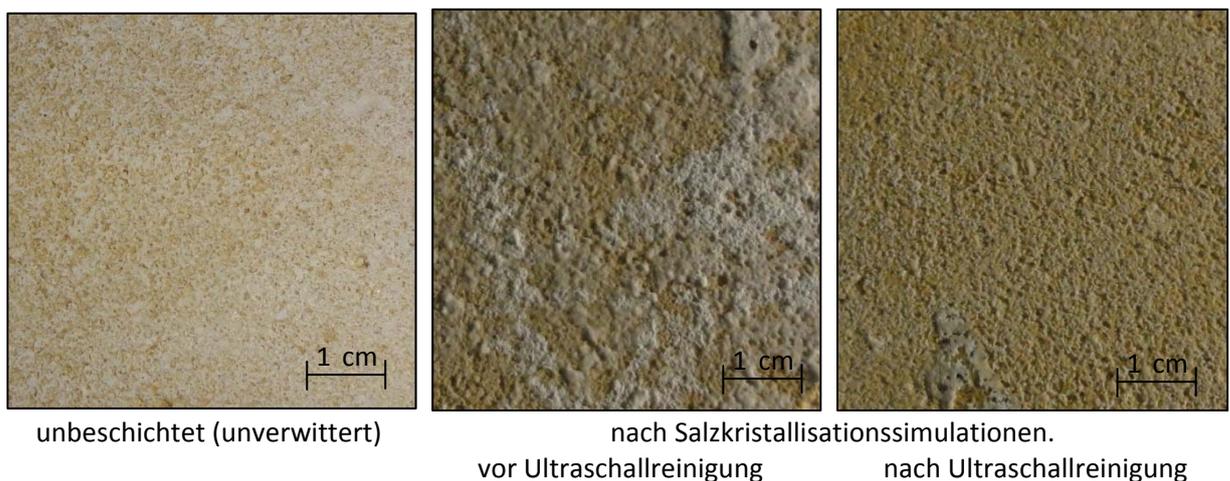


Abbildung 5-38: fotografische Dokumentation der unbeschichteten Vergleichsprobe nach 16 Salzkristallisationszyklen (Bildausschnitt ca. 5cm)

²⁷⁹ 10malige Klimawechselbeanspruchung im Klimaschrank (unter 2 maliger kapillarer Sättigung mit Salzlösung) und 6 Salzkristallisationszyklen im Klimaschrank (6 maliger Wechsel zwischen kapillarer Sättigung mit Salzlösung und anschließender Trocknung)

Das unbeschichtete Gesteinssubstrat zeigt deutliche Salzkrustenbildungen an der Oberfläche. Diese Krusten lassen sich mit einem Pinsel kaum entfernen und können nur durch die Ultraschallreinigung in Wasser zu einem großen Teil von der Oberfläche entfernt werden. Das Oberflächengefüge ist geringfügig rauher als vor der Salzkristallisationsbelastung.

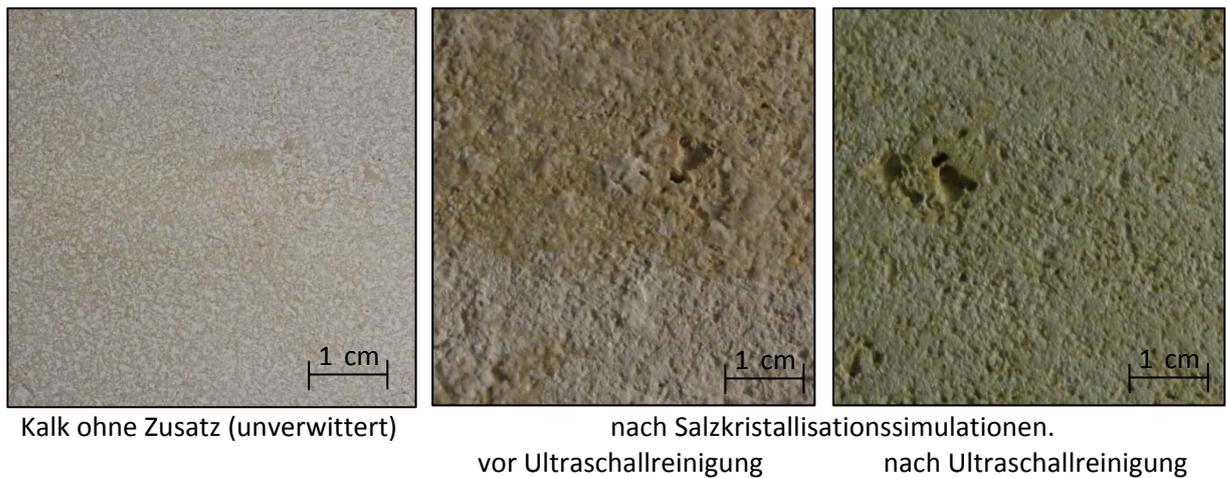


Abbildung 5-39: fotografische Dokumentation der kalkbeschichteten Proben (ohne Zusatz) nach 16 Salzkristallisationszyklen (Bildausschnitt ca. 5cm)

Bei allen unmodifizierten Kalkbeschichtungen werden ebenfalls deutliche Salzkrusten an der Oberfläche gebildet, wobei diese Krustenbildung deutlich stärker ausgeprägt ist, als bei der unbeschichteten Vergleichsprobe. Die Krusten lassen sich mit dem Pinsel nur schwer entfernen, unter den Krusten ist die Kalkbeschichtung noch deutlich sichtbar. Nach der Ultraschallreinigung ist die Beschichtung noch teilweise vorhanden, teilweise aber schon bis zum Untergrund abgewittert. Es ist keine Zerstörung des Gesteinssubstrats mit freiem Auge erkennbar.

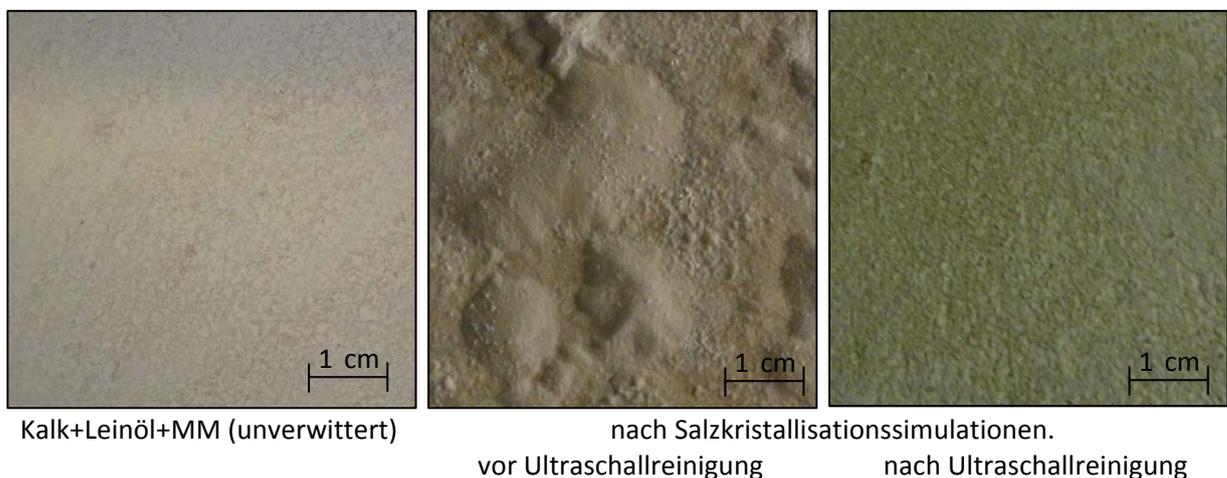


Abbildung 5-40: fotografische Dokumentation der kalkbeschichteten Proben (mit Leinöl und Marmormehl) nach 16 Salzkristallisationszyklen (Bildausschnitt ca. 5cm)

Bei den mit Leinöl modifizierten Kalkanstrichen sind Ausblühungen und massive Blasenbildungen an der Oberfläche sichtbar, welche teilweise verkrustet sind und sich deutlich vom Untergrund abheben. Nach Abbürsten der Blasen mit einem Pinsel und auch nach einer Ultraschallreinigung in Wasser, ist der Anstrich darunter zu einem großen Teil noch vollflächig vorhanden. Die Poren bleiben verschlossen, visuell gewinnt man den Eindruck, als sei die Beschichtung noch vollflächig vorhanden. Es ist keine Zerstörung des Gesteinssubstrats mit freiem Auge erkennbar.

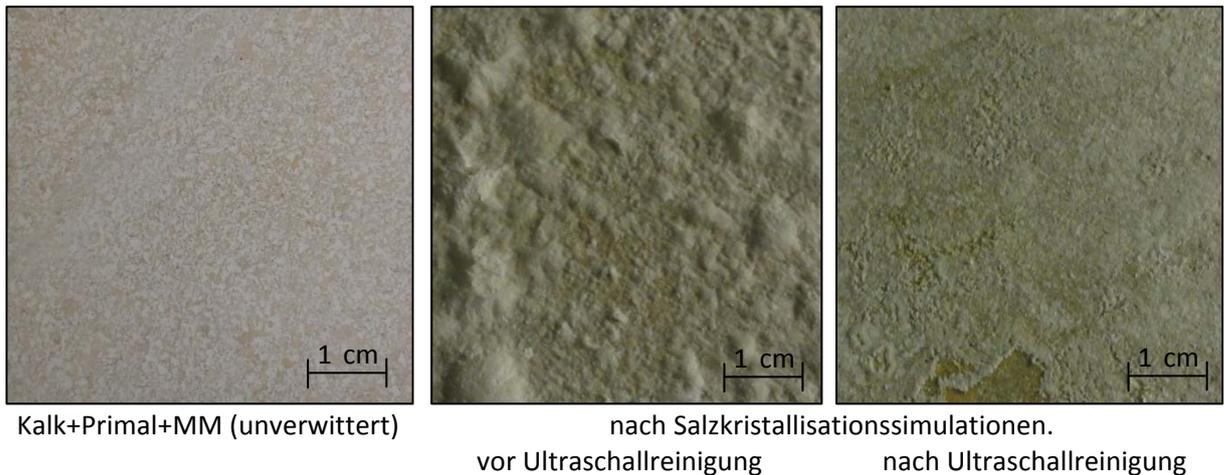


Abbildung 5-41: fotografische Dokumentation der kalkbeschichteten Proben (mit Primal und Marmormehl) nach Salzkristallisationsversuchen (Bildausschnitt ca. 5cm)

Bei den mit Acrylharz modifizierten Kalkanstrichen ist ebenfalls eine starke Blasenbildung ersichtlich, wobei diese Blasenbildung wesentlich geringfügiger ist als bei den mit Leinöl modifizierten Beschichtungen. Es tritt jedoch eine starke Krustenbildung an der Oberfläche auf.

Die Blasen lassen sich mit dem Pinsel abtragen, die Krusten bleiben größtenteils nach wie vor an der Oberfläche bestehen und auch nach der Ultraschallreinigung in Wasser sind die Salzverkrustungen zum größten Teil noch vorhanden. Dort wo die Verkrustungen abgenommen werden können, wird auch die darunter befindliche Beschichtung abgetragen.

Es ist keine Zerstörung des Gesteinssubstrats mit freiem Auge erkennbar.

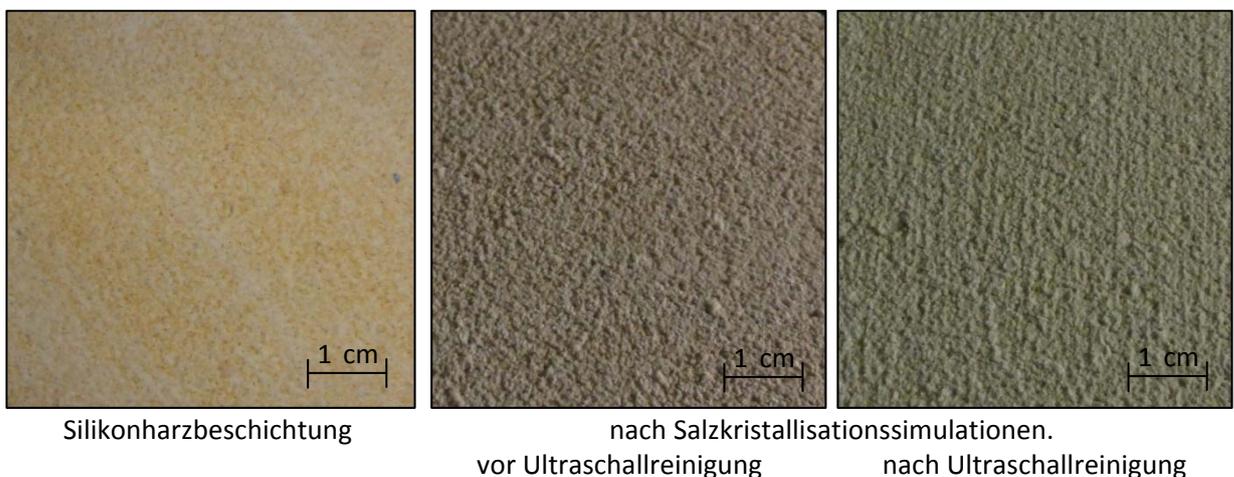


Abbildung 5-42: fotografische Dokumentation der Proben mit Silikonharzbeschichtung nach Salzkristallisationsversuchen (Bildausschnitt ca. 5cm)

Die Silikonharzbeschichtung zeigt nach den Salzkristallisationsversuchen ein sehr ebenmäßiges aber stark verkrustetes Bild. Diese Krusten lassen sich weder mit dem Pinsel noch durch eine umfangreiche Ultraschallreinigung in Wasser entfernen.

Es ist keine Zerstörung des Gesteinssubstrats erkennbar, nach der Entfernung der verkrusteten Beschichtung mit einem Skalpell erkennt man jedoch, dass die direkt unter der Beschichtung befindliche Gesteinsoberfläche leicht aufgeraut und mürbe ist.

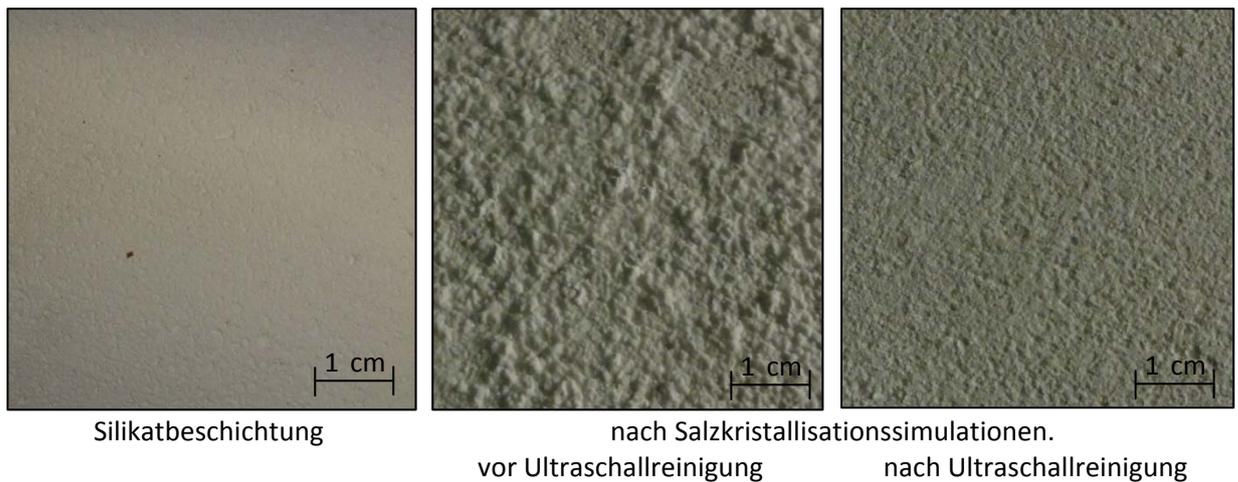


Abbildung 5-43: fotografische Dokumentation der Proben mit Silikatbeschichtung nach Salzkristallisationsversuchen (Bildausschnitt ca. 5cm)

Bei den Proben mit Silikatbeschichtung ist ebenfalls eine gleichmäßige und starke Krustenbildung an der Oberfläche ersichtlich. Die Krusten lassen sich durch einen Pinsel größtenteils abbürsten. Darunter ist die Beschichtung noch vollflächig vorhanden. Nach der Ultraschallreinigung in Wasser wird ersichtlich, dass die Beschichtung noch vollflächig in den Poren vorhanden ist und nur die oberen Lagen abgewittert sind.

Wie bei den Proben mit Silikonharzbeschichtung ist keine Zerstörung des Gesteinssubstrats erkennbar, nach Entfernung der Beschichtung mit einem Skalpell erkennt man jedoch, dass die direkt unter der Beschichtung befindliche Gesteinsoberfläche leicht mürbe ist.

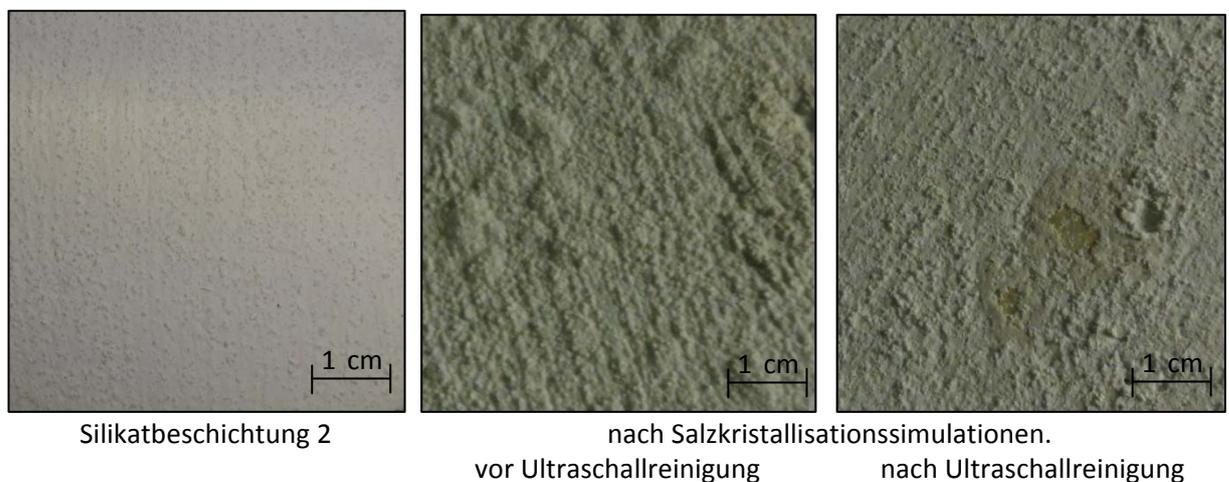


Abbildung 5-44: fotografische Dokumentation der Proben mit Silikatbeschichtung 2 nach Salzkristallisationsversuchen (Bildausschnitt ca. 5cm)

Die Silikatbeschichtung 2 zeigt nach den Salzkristallisationsversuchen ebenfalls eine starke Krustenbildung, wobei sich diese Krusten an manchen Stellen vom Untergrund abheben. Diese Krusten sind teilweise, vor allem dort wo sich die Krusten bereits vom Untergrund abgehoben haben, mit dem Pinsel abnehmbar. Dort wo die Krusten entfernt werden können wird auch die Beschichtung darunter vollflächig mit abgetragen. Nach der Ultraschallreinigung in Wasser ist die Beschichtung größtenteils nur oberflächlich abgewittert, teilweise aber auch bis zur Gesteinsoberfläche.

An diesen Stellen zeigt sich das Gesteinssubstrat leicht aufgeraut und mürbe. An den Stellen wo die Beschichtung noch vorhanden ist, ist keine Zerstörung des darunter liegenden Gesteinssubstrats mit freiem Auge erkennbar.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Das Zerstörungsbild der einzelnen Beschichtungssysteme fällt sehr unterschiedlich aus. Während die unmodifizierte Kalkbeschichtung lediglich Salzkrusten an der Oberfläche bildet, zeigt sich sowohl bei den mit Leinöl als auch bei den mit Primal modifizierten Kalkanstrichen eine deutliche Blasenbildung, welche auf diese Zusätze zurückgeführt werden kann. Bei der mit Primal modifizierten Kalkbeschichtung ist zudem eine starke Verkrustung der Oberfläche erkennbar, die auch nach einer intensiven Ultraschallreinigung nicht ablösbar ist. Das gleiche Bild zeigt sich auch bei der Silikonharzbeschichtung womit deutlich wird, dass die Bildung dieser dichten Verkrustungen mit dem Kunstharz in Zusammenhang steht.

Die Silikatbeschichtungen zeigen ebenso Salzausblühungen und Verkrustungen an der Oberfläche, wobei diese größtenteils durch eine Reinigung abgenommen werden können. Die Silikatbeschichtung 2 löst sich zudem an einigen Stellen deutlich vom Untergrund ab. Mögliche Ursachen dieser Abhebung vom Untergrund sind nicht eindeutig bestimmbar.

Das Gesteinssubstrat ist in allen Fällen, wenn überhaupt, nur oberflächennah geringfügig geschädigt indem sich leichte Aufrauungen in diesem Bereich zeigen.

Aufgrund der geringen Schädigungsgrade ist eine detaillierte Interpretation auf Basis dieser Ergebnisse kaum möglich und wird erst nachfolgend im Zusammenhang mit den Ergebnissen der dünnschliffmikroskopischen Aufnahmen gegeben (vgl. Kap. 5.3.3).

Versuchsreihe B6 – hygri-sches Verhalten nach Frost-Tauwechselbeanspruchung

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Beschichtung sowie die Wirksamkeit der Beschichtung auf die Dauerhaftigkeit des Substrats, wird die Wasseraufnahme und Wasserabgabe der durch Frost-Tauwechsel beanspruchten Proben mit den Messwerten der unverwitterten Proben verglichen.

Nachfolgend werden die Unterschiede der verwitterten und unverwitterten Proben grafisch zusammengefasst dargestellt:

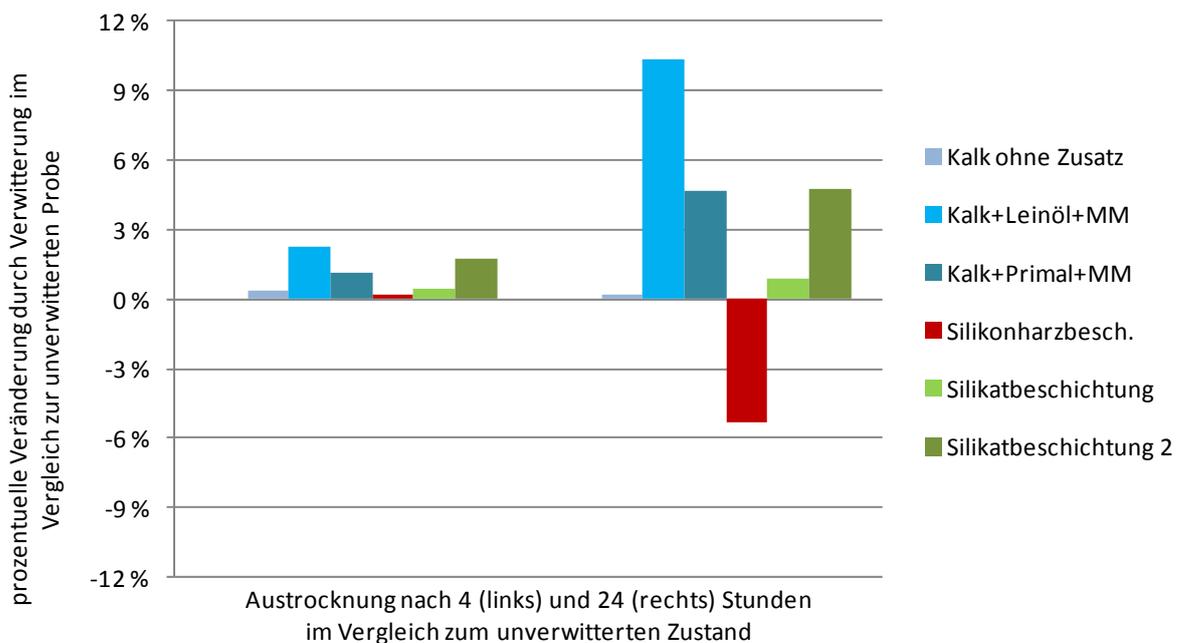


Abbildung 5-45: Darstellung der Wasserabgabe nach 4 und 24 Stunden Trocknungszeit nach Verwitterungssimulationen (Frost-Tauwechselversuche) im Vergleich zur unverwitterten Probe.²⁸⁰

Aus obiger Abbildung wird ersichtlich, dass die Austrocknungsgeschwindigkeiten bei fast allen Beschichtungen nach den Frost-Tauwechselversuchen erhöht wurden. Vor allem der leinölmodifizierte Kalkanstrich weist die vergleichsweise höchsten Zunahmen der Austrocknungsgeschwindigkeiten auf und auch bei der mit Primal modifizierten Kalkbeschichtung sowie der Silikatbeschichtung 2 zeigt sich, jedoch in geringerem Ausmaße, eine Erhöhung der Austrocknungsgeschwindigkeit.

Im Gegensatz dazu können bei den silikonharzbeschichteten Probekörpern nach längeren Trocknungszeiten Reduktionen der Wasserabgabe verzeichnet werden.

Die geringste Beeinflussung, im Vergleich zur unbeschichteten Vergleichsprobe, kann bei der unmodifizierten Kalkbeschichtung sowie der Silikatbeschichtung (Firma Remmers) beobachtet werden.

²⁸⁰ 100% = vollständige kapillare Sättigung der Probe.

Die Bestimmung der Wasseraufnahme nach 25 Frost-Tauwechselzyklen zeigte in einem ersten Versuch folgendes Bild:

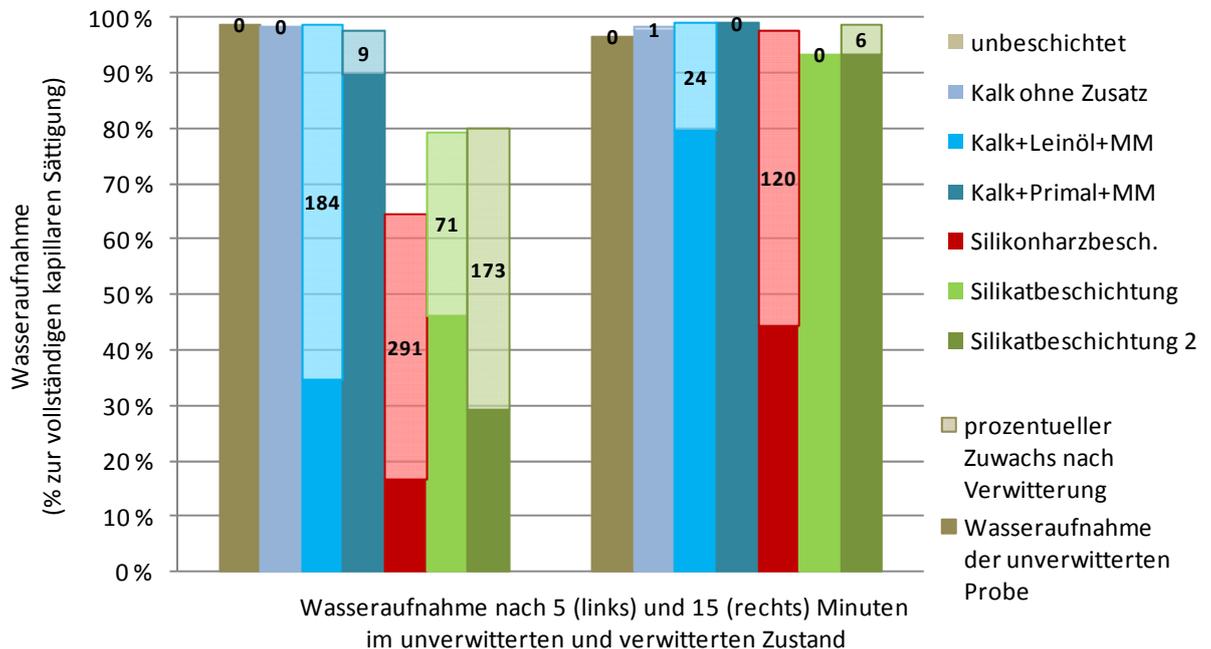


Abbildung 5-46: Darstellung der Wasseraufnahme nach 5 und 15 minütiger Wasserlagerung der beschichteten Oberfläche, nach Verwitterungssimulationen (25 Frost-Tauwechselzyklen).²⁸¹

Alle Proben nahmen nun signifikant mehr Wasser auf als die unverwitterten Probekörper.

Vor allem die mit Leinöl und Marmormehl modifizierten Kalkbeschichtungen verlieren fast vollständig Ihre wasserabweisende Wirkung.

Einzig die Silikonharzbeschichtung und die Silikatbeschichtung sind nach 5 Minuten noch nicht vollständig kapillar mit Wasser gesättigt, wobei auch hier eine rapide Zunahme des Wasseraufnahmeverhaltens erkennbar ist.

Nach 15 Minuten sind alle untersuchten Probekörper vollständig kapillar gesättigt.

Diese Erhöhung des Wasseraufnahmeverhaltens würde man auf den ersten Blick den Zerstörung der Beschichtungen (Mikrorissbildung, Abplatzungen, ...) zuschreiben.

Durch die visuelle Beurteilung der Beschichtungen nach den Frost-Tauwechselsimulationen (vgl. Versuchsreihe B5) zeigten sich bei den Anstrichen mit freiem Auge jedoch keine maßgeblichen Veränderungen, nur im Randbereich konnten kleinere Risse und Abplatzungen, auch von der Abdichtung selbst, festgestellt werden.

Es muss somit vielmehr davon ausgegangen werden, dass diese Risse im Randbereich zu einer Erhöhung der Wasseraufnahme beigetragen haben.

Aus diesem Grund wurden die Probekörper seitlich erneut abgedichtet und nachfolgend nochmals das Wasseraufnahmeverhalten aller Probekörper untersucht.

²⁸¹ 100% = vollständige kapillare Sättigung der Probe

Bei der Messung nach der neuerlichen Abdichtung im Randbereich zeigt sich nun folgendes Bild:

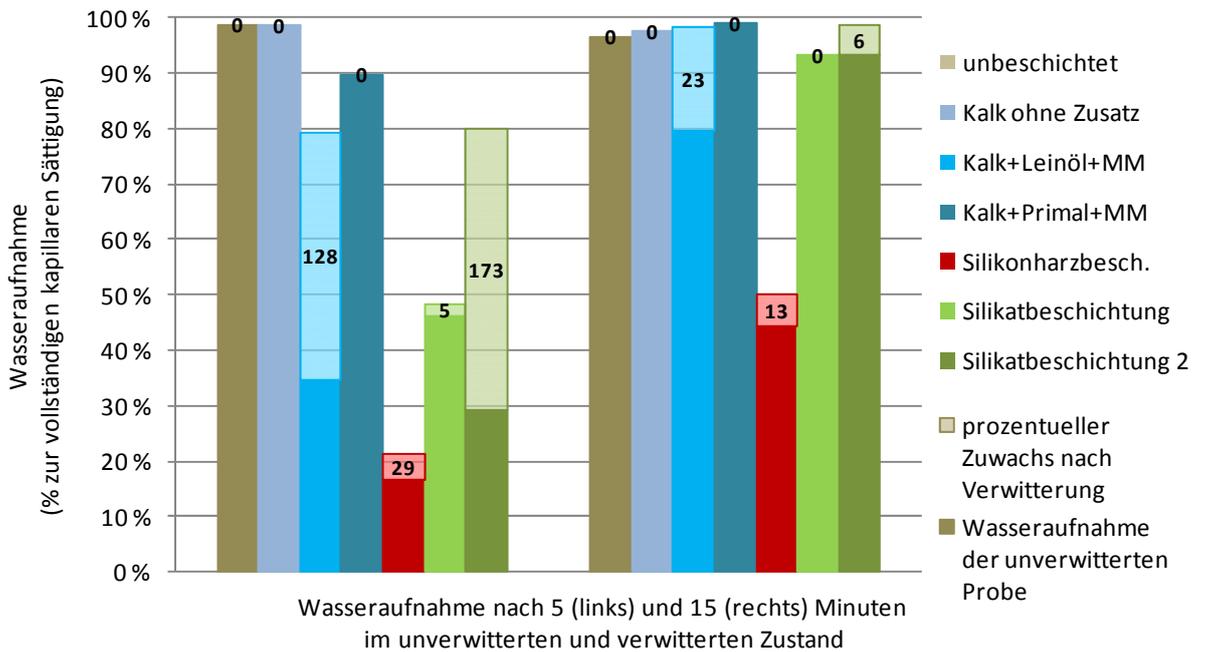


Abbildung 5-47: Darstellung der Wasseraufnahme nach 5 und 15 minütiger Wasserlagerung der beschichteten Oberfläche, nach Verwitterungssimulationen (25 Frost-Tauwechselzyklen) und neuerlicher Abdichtung des Randbereiches.²⁸²

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die in Abbildung 5-46 dargestellten Zunahmen der Wasseraufnahme maßgeblich den Rissen im Randbereich zuzuordnen sind. Durch die neuerliche Abdichtung können wesentlich geringere Wasseraufnahmen verzeichnet werden.

Zur Beurteilung der Beschichtung nach den Frost-Tauwechselsimulationen muss deshalb obige Abbildung 5-47 analysiert werden:

Durch die Verwitterung können nur bei den Proben, welche mit dem Leinöl und Marmormehl modifizierten Kalkanstrich, als auch mit dem Silikatanstrich 2 (Eigenprodukt mit erhöhtem Füllstoffanteil) beschichtet wurden, deutliche Erhöhungen des Wasseraufnahmeverhaltens festgestellt werden.

Die mit dem Silikonharzanstrich beschichteten Proben, ebenso wie die Proben, welche mit der Silikatfarbe (Fertigprodukt) beschichtet wurden, zeigt nur geringfügige Änderungen im Wasseraufnahmeverhalten.

²⁸² 100% = vollständige kapillare Sättigung der Probe

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Durch die Frost-Tauwechselbeanspruchungen wurden sowohl das Trocknungs-, als auch das Wasseraufnahmeverhalten der Beschichtungen verändert.

Die Erhöhung der Wasserabgabe kann auf Zerstörungen der Beschichtungen, wie z.B. Rissbildungen, Abkreiden, etc. in Zusammenhang gebracht werden. Die bei der Silikonharzbeschichtung beobachtete Reduktion der Wasserabgabe kann ev. auf Verkrustungen, Abheben vom Untergrund, etc. zurückgeführt werden.

Eine detaillierte Zuordnung zu einem dieser Schadensmechanismen ist jedoch auf Basis der alleinigen Interpretation zur Veränderung des Austrocknungsverhaltens nur schwer durchführbar und kann erst im Zusammenhang mit den dünnschliffmikroskopischen Aufnahmen getroffen werden (vgl. Kap. 5.3.3).

Eine der wesentlichsten Aussagen dieser Untersuchungsreihe ist jedenfalls die Tatsache, dass bereits kleine, mit freiem Auge kaum sichtbare Risse und Abplatzungen, das Wasserrückhaltevermögen entscheidend beeinflussen, indem die Wasseraufnahme zu einem großen Teil über diese Fehlstellen in das Substrat eingeleitet wird.

Je wasserhemmender ein Anstrich ist, desto maßgeblicher wird dieser Einfluss, da Wasser immer den Weg des geringsten Widerstandes geht. Im vorliegenden Fall sind somit vor allem die Silikonharzbeschichtung sowie die mit Leinöl modifizierte Kalkbeschichtung von diesem Umstand betroffen, was sich in den Messergebnissen in einer massiven Erhöhung der zeitabhängigen Wasseraufnahme widerspiegelt.

Versuchsreihe B7 – dünnschliffmikroskopische Aufnahmen nach Verwitterungssimulationen

Nach den Simulationsversuchen wurden sowohl die Proben der Frost-Tauwechselbeanspruchungen als auch der Salzkristallisationssimulationen im Durchlichtmikroskop untersucht.

Durch beide Verwitterungssimulationen kann bei den unbeschichteten Vergleichsproben eine Aufrauung der Oberfläche festgestellt werden. Wie zu erwarten ist diese oberflächennahe Gefügezerstörung durch die Salzkristallisationsversuche stärker ausgeprägt als bei den Proben, welche durch Frost-Tauwechselbelastungen beansprucht wurden.

Aufgrund der ohnehin relativ inhomogenen Gefügestruktur des St. Margarethener Kalksandsteines können auf Basis der Dünnschliffe jedoch in beiden Fällen keine Rückschlüsse zur Veränderung des Gesteinssubstrats getroffen werden.

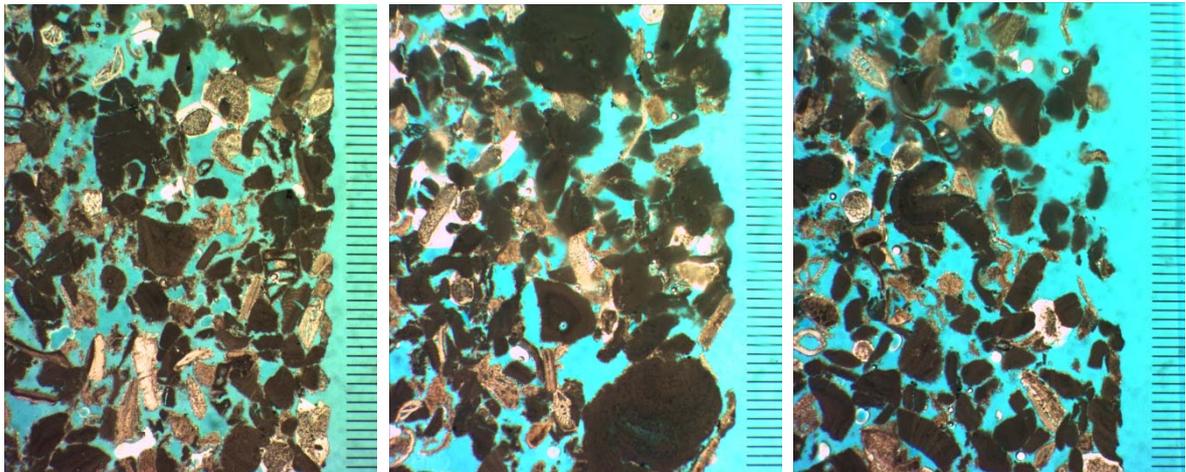
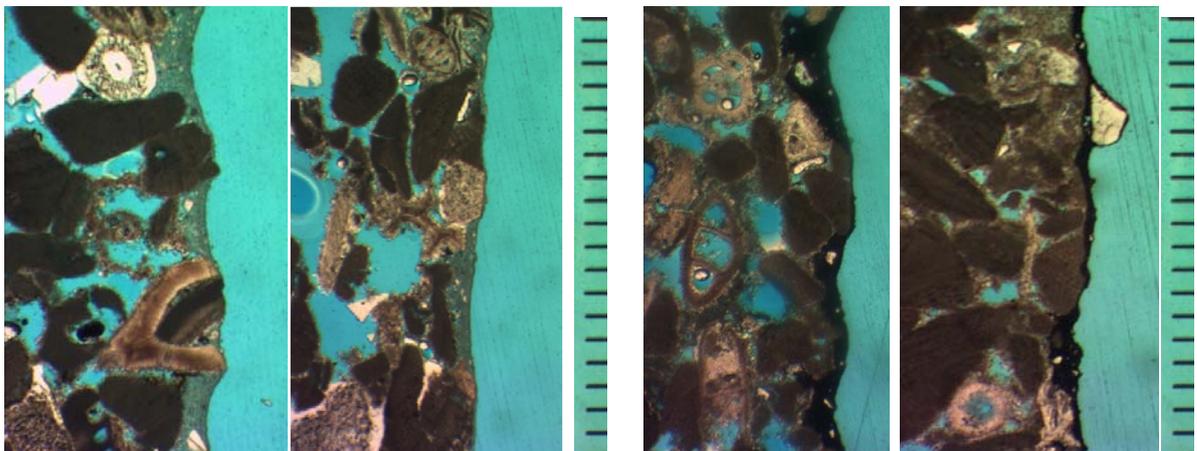


Abbildung 5-48: Dünnschliffmikroskopische Aufnahme des unbeschichteten Gesteinssubstrates vor (links) und nach Verwitterungssimulationen: nach 25 Frost-Tauwechszyklen (Mitte) und nach 16 Salzkristallisationszyklen (rechts), Bildausschnitt ca. 5mm

Durch die Frost-Tauwechselbeanspruchungen konnten bei allen untersuchten Beschichtungssystemen auch im Durchlichtmikroskop keine maßgeblichen bzw. interpretierbaren visuellen Veränderungen der Beschichtung sowie der Verbindung bzw. Haftung zwischen Beschichtung und Substrat festgestellt werden. Es zeigt sich in allen Fällen ein ähnliches Bild wie vor der Frost-Tauwechselbelastung.



Kalk+Leinöl+MM unverwittert (li) u. verwittert (re) Silikatbesch. unverwittert (li) u. verwittert (re)

Abbildung 5-49: Dünnschliffmikroskopische Aufnahme beschichteter Probekörper (leinölmodifizierter Kalkanstrich und Silikatbeschichtung) vor und nach 25 Frost-Tauwechszyklen, Bildausschnitt ca. 1,5mm

Nach den Salzkristallisationsversuchen wurden die Probekörper im Ultraschallreinigungsgerät von Salzresten gesäubert und anschließend Dünnschliffe angefertigt. Nach dieser konzentrierten Verwitterungsbelastung und gründlichen Reinigung zeigt sich folgendes Bild der Oberflächenbeschichtungen:

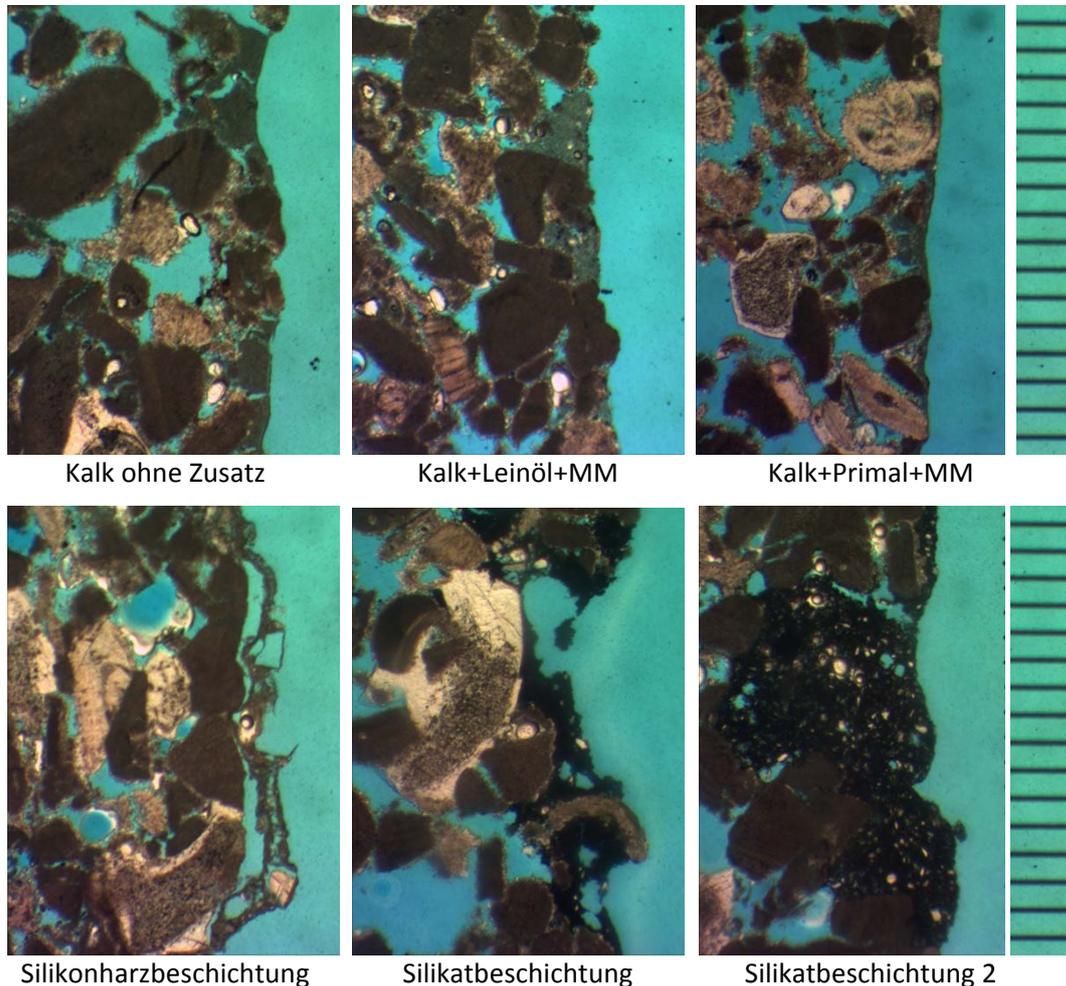


Abbildung 5-50: Dünnschliffmikroskopische Aufnahme beschichteter Probekörper nach 16 Salzkristallisationszyklen und anschließender Ultraschallreinigung, Bildausschnitt ca. 1,5mm

Die Kalkbeschichtungen sind auch nach der intensiven Ultraschallreinigung relativ gut erhalten geblieben. Nur die oberflächlichen Schichten wurden abgetragen. Bestandteile, welche beim Auftragen der Beschichtung gut in das Porengefüge eingedrungen sind, blieben auch weiterhin bestehen. Das zeigt sich vor allem bei der mit Leinöl modifizierten Kalkbeschichtung. Die Kalkbeschichtung ohne Additive weist im Gegensatz zu den modifizierten Kalkbeschichtungen Risse auf. Bei der mit Acrylharz modifizierten Kalkbeschichtung ist eine dichte Kruste an der Oberfläche erkennbar.

Die Silikonharzbeschichtung hebt sich deutlich vom Gefüge ab und ist nur mehr an wenigen Stellen mit der Gesteinsoberfläche verbunden.

Bei den Proben mit der Silikatbeschichtung als Fertigprodukt ist ein Abtragen der Beschichtung auch innerhalb des Porengefüges an der Oberfläche deutlich erkennbar.

Die Silikatbeschichtung 2 ist an einem Großteil der Gesteinsoberflächen noch deutlich erkennbar. Vor allem die im Porengefüge eingedrungene Beschichtung ist zu einem großen Teil erhalten geblieben, wobei sich hier stellenweise Risse zeigen.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Auf Basis der Auswertung der Dünnschliffe nach Verwitterungssimulationen können folgende Aussagen getroffen werden:

Da bei allen Beschichtungen nach den Frost-Tauwechselfersuchen keine Veränderungen sichtbar sind, die unbeschichtete Vergleichsprobe jedoch an der Oberfläche eine Aufrauung zeigt, kann darauf geschlossen werden, dass durch alle Beschichtungen ein Schutz des direkt darunter liegenden Gesteinssubstrates erfolgt.

Nach den Salzkristallisationsversuchen mit anschließender Ultraschallreinigung zeigt sich, dass Beschichtungen, welche tief in das Gesteinsgefüge an der Oberfläche eingedrungen sind, auch später noch zu einem großen Teil im Gefüge erhalten sind.

Prinzipiell kann durch das Beifügen von Additiven (sowohl Leinöl und Marmormehl, als auch Primal und Marmormehl) die Ausbildung von Rissen reduziert bzw. verhindert werden. Ob dafür das Primal/Leinöl oder das Marmormehl bzw. die Kombination aus diesen Additiven verantwortlich ist, kann auf Basis dieser Untersuchungen nicht rückgeschlossen werden. Im Zusammenhang mit der Versuchsreihe A kann aber davon ausgegangen werden, dass Marmormehl maßgeblich zur Verhinderung von Rissen beiträgt.

Die Silikonharzbeschichtung hebt sich deutlich vom Untergrund ab, im Zusammenhang mit der visuellen Beurteilung (vgl. B5) kann davon ausgegangen werden, dass sich dichte und spröde Krusten an der Oberfläche bilden, die mit dem Gesteinsgefüge nicht mehr im Kontakt stehen.

Bei den Silikatbeschichtungen sind Verwitterungsspuren deutlich erkennbar, wobei hier die Silikatbeschichtung 2 mit erhöhtem Füllstoffanteil eine wesentlich geringere Abwitterung aufweist.

Versuchsreihe B8 – Beurteilung des Gesteinsgefüges nach Verwitterungssimulationen

Bei allen Probekörpern wurden, sowohl vor als auch nach den Verwitterungssimulationen, die Masse und die Ultraschallgeschwindigkeit ermittelt.

Sowohl eine Reduktion der Masse, als auch der Ultraschallgeschwindigkeit lässt auf eine Zerstörung des Gesteinssubstrates schließen. Dadurch können auch geringfügige Änderungen im Gefüge festgestellt und auf Basis der Unterschiede zwischen den einzelnen Beschichtungssystemen entsprechende Aussagen getroffen werden.

Die Bestimmung der Masse bzw. der Ultraschallgeschwindigkeit erfolgte nach der Reinigung der Probekörper von Salzresten²⁸³ und der anschließenden Trocknung bei 40°C sowie Abkühlung auf Raumtemperatur im Exsikkator.

Folgende Ergebnisse konnten dabei ermittelt werden:

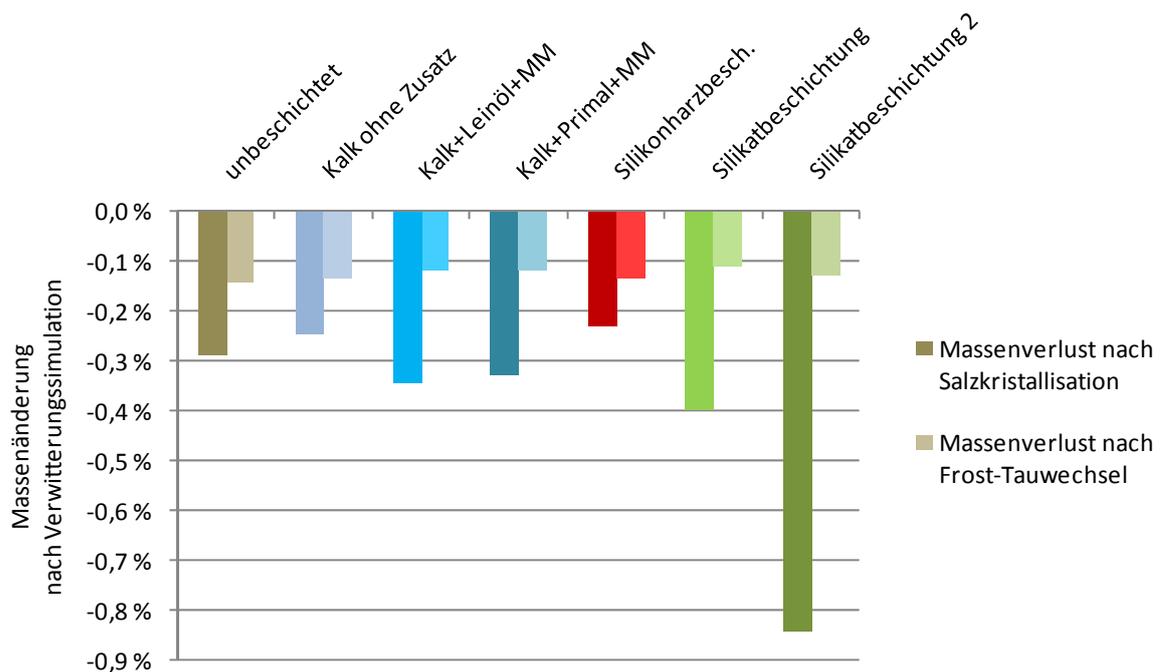


Abbildung 5-51: Massenänderung der Probekörper nach Verwitterungssimulationen

Bei allen Probekörpern zeigte sich lediglich eine geringfügige Massenänderung zwischen 0,1 und 1 M.-%.

Die Massenänderung nach den Salzkrystallisationsversuchen ist bei allen Prüfkörpern höher, als der Massenverlust nach den Frost-Tauwechselversuchen.

Zwischen den einzelnen Beschichtungssystemen zeigt sich sowohl bei den Frost-Tauwechselversuchen als auch bei den Salzkrystallisationsversuchen ein sehr ähnliches Bild. Nur bei den Probekörpern, welche mit dem Silikatanstrich 2 beschichtet wurden, ist ein geringfügig höherer Massenverlust nach den Salzkrystallisationsversuchen erkennbar.

Der geringste Massenverlust nach den Salzkrystallisationsversuchen kann bei den silikonharzbeschichteten Probekörpern festgestellt werden.

²⁸³ Betrifft nur die Probekörper der Salzkrystallisationsuntersuchungen. Um den Einfluss der Salzreste auf die Massenänderung und die Ultraschallgeschwindigkeit zu minimieren, wurden die Probekörper im Ultraschallreinigungsgerät von Salzresten befreit, was jedoch auch zu einer Ablösung von Beschichtungsteilen führte.

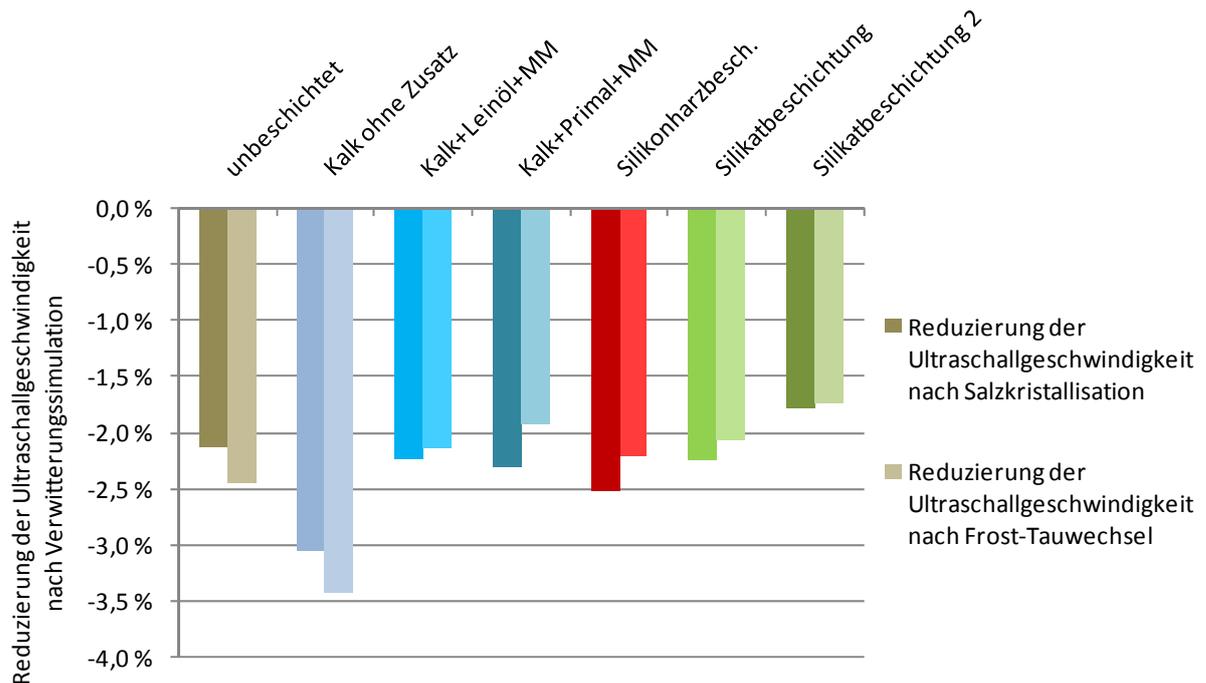


Abbildung 5-52: Reduzierung der Ultraschallgeschwindigkeit in % nach Verwitterungssimulationen

Bei allen Probekörpern ist eine geringfügige Reduzierung der Ultraschallgeschwindigkeit erkennbar. Innerhalb der einzelnen Beschichtungssysteme sind Änderungen von max. 1,5% erkennbar, was innerhalb der Spannweite von Messungenauigkeiten liegt.

Zusammenfassung und Kurzinterpretation

Auf Basis der Ergebnisse der Massenänderung sowie der Reduzierung der Ultraschallgeschwindigkeit sind nur bedingt Rückschlüsse möglich.

Prinzipiell zeigen sich in allen Fällen geringe bis kaum wahrnehmbare Veränderungen, was darauf hindeutet, dass das Gesteinssubstrat sowohl nach der Frost-Tauwechselbelastung als auch nach der Salzkristallisationssimulation weitestgehend intakt ist.

Die geringe Massenänderung der silikonharzbeschichteten Proben sowie im Gegensatz dazu der relativ hohe Massenverlust der mit der Silikonbeschichtung 2 behandelten Probekörper, ist auf die Massenänderung der Beschichtung nach der Ultraschallreinigung zurückzuführen.

Wie die Bilder aus der Versuchsreihe B5 zeigen, bleibt die Silikonharzbeschichtung auch nach einer intensiven Ultraschallreinigung in Wasser größtenteils am Untergrund haften, während ganze Schichtenpakete der Silikatbeschichtung 2 abgelöst werden.

Dennoch zeigt sich prinzipiell die Tendenz einer zumindest geringfügigen Zerstörung durch die Salzkristallisationsuntersuchungen, da auch die unbeschichtete Vergleichsprobe höhere Massenverluste aufweist, als im Fall der Frost-Tauwechselversuche. Im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Ultraschallgeschwindigkeitsmessungen und der dünnstufmikroskopischen Aufnahmen sowie visuellen Beurteilungen nach der Salzkristallisationsuntersuchungen (vgl. Versuchsreihe B5 und B7), kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Zerstörungen nur in Form leichter Absandungen an der Oberfläche stattfinden.

5.3.3 Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Aussagen der Untersuchungsergebnisse zusammengefasst und, im jeweiligen Kontext miteinander, Interpretationen und Schlüsse getroffen.

Die Interpretation wird, getrennt nach den hygrischen Eigenschaften des Anstriches auf der einen Seite und dem Zustand des Anstriches und des Substrates nach Verwitterungseinflüssen auf der anderen Seite, durchgeführt.

Hygrische Beurteilung der Beschichtungen auf Basis der Versuchsergebnisse

Wie bereits eingangs erwähnt ist ein Großteil der Schadensmechanismen auf das Vorhandensein von Feuchtigkeit im Gesteinssubstrat zurückzuführen.

Zur Beurteilung des Regenschutzes von Beschichtungen wird deshalb oftmals die Künzel-Zahl angegeben, die den Zusammenhang zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizient und dem Diffusionswiderstand beurteilt (detaillierte Beschreibung vgl. Kap. 2).

Wie in Kap. 2 erläutert, ist die alleinige Betrachtung dieser beiden Kennzahlen, vor allem bei historischen, vorgeschädigten und ev. bereits feuchtebelasteten Gesteinsfassaden und –skulpturen unzureichend, weshalb in dieser Arbeit eine andere Betrachtungsweise zur Beurteilung der Beschichtung eingeführt wurde.

Es wird davon ausgegangen, dass zur Beurteilung und Darstellung der hygrischen Eigenschaften einer Beschichtung nicht die Wasseraufnahme mit der Dampfdiffusion, sondern die Wasseraufnahme mit der Wasserabgabefähigkeit der Beschichtung in Zusammenhang gebracht werden muss. Nur so kann beurteilt werden ob sich über einen längeren Zeitraum Wasser im Baustoff akkumulieren kann.

Die Wirksamkeit eines Anstriches wird nun insofern bestimmt, indem die Austrocknung nach 24 Stunden der Wasseraufnahme nach 5, 10 und 15 Minuten gegenübergestellt wird (in % der vollständigen kapillaren Sättigung). Einerseits kann damit festgestellt werden, welche Beschichtungen eine größere Wasserabgabe als Wasseraufnahme besitzen und welche Mengen an aufgenommenem Wasser auch schnell wieder austrocknen können. Andererseits müssen die beschichteten Probekörper der unbeschichteten Vergleichsprobe gegenübergestellt werden. Nur wenn das Verhältnis von Austrocknung zu Wasseraufnahme im Vergleich mit dem unbeschichteten Gesteinssubstrat besser geworden ist, wurden auch die hygrischen Eigenschaften der Fassade bzw. der Skulptur als Ganzes durch die Beschichtung verbessert. In Folge dessen kann auch nur dann davon ausgegangen werden, dass durch den Anstrich auch die Dauerhaftigkeit der Gesteinssubstanz verbessert wird.

Diese Betrachtungsweise bildet die am historischen Bauwerk tatsächlich auftretenden hygrischen Vorkommnisse wesentlich besser ab als die Künzel-Zahl da

- sich die Wasseraufnahme nicht nur auf die Beschichtung selbst, sondern auf die Beschichtung in Verbindung mit dem Substrat bezieht
- die Austrocknungseigenschaften kapillarporöser Beschichtungen mitberücksichtigt werden
- von der konservativen Annahme eines nahezu kapillargesättigten Baustoffes (z.B. durch Risse, Undichtigkeiten, aufsteigende Feuchtigkeit, hygroskopische Salzaufnahme, ...) ausgegangen wird

Auf Basis dieser Überlegungen ergibt sich folgende Darstellung für das hygrische Verhalten der einzelnen Beschichtungssysteme:

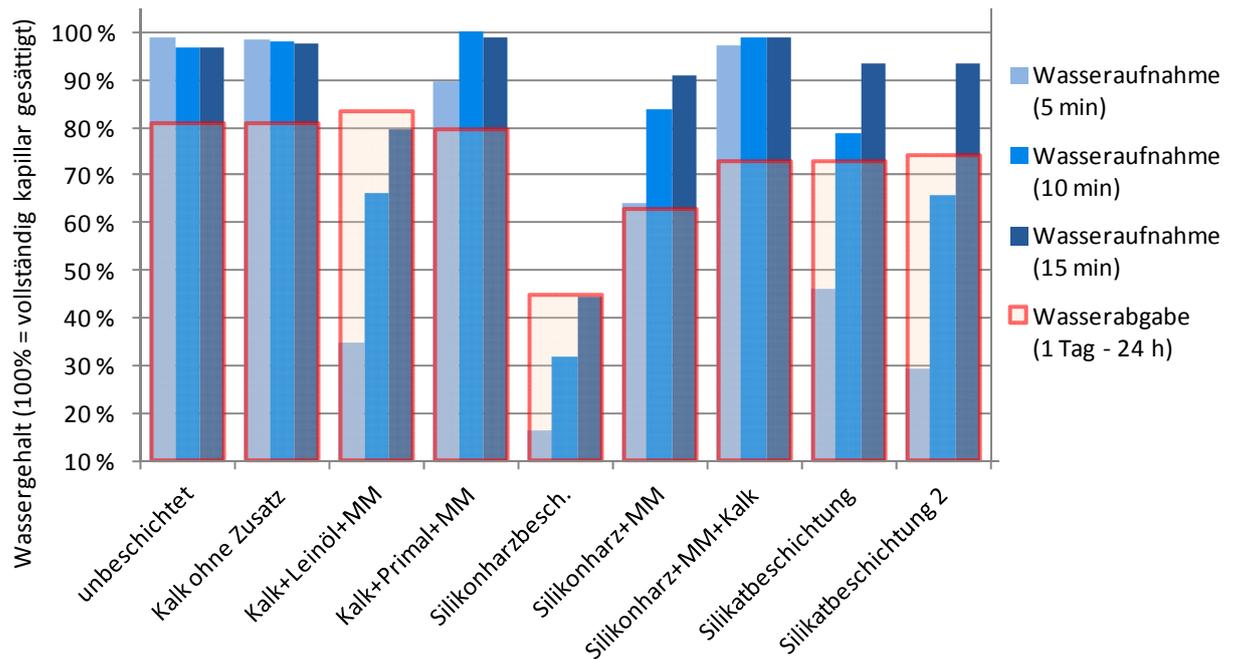


Abbildung 5-53: Gegenüberstellung der Austrocknung nach 24 Stunden mit der Wasseraufnahme nach 5, 10 und 15 Minuten im unverwitterten Zustand

Wie aus obiger Abbildung ersichtlich wird kann, unter Verwendung dieser Auswertungsmethodik, nur durch die mit Leinöl und Marmormehl modifizierte Kalkbeschichtung und die Silikonharzbeschichtung nach einer 15 minütigen Wasseraufnahme noch eine vollständige Austrocknung nach 24 Stunden gewährleistet werden und somit eine Verbesserung der hygrischen Eigenschaften (im Vergleich mit der unbeschichteten Probe) erreicht werden.

Die Silikatbeschichtungen zeigen bereits wesentlich unvoreilhaftere Zusammenhänge zwischen Wasseraufnahme und Wasseraustrocknung, können aber das nach 10 Minuten aufgenommene Wasser in 24 Stunden fast (Silikatbeschichtung) bzw. gänzlich (Silikatbeschichtung 2) wieder abgeben und verbessern somit ebenfalls die hygrischen Eigenschaften des Gesteinssubstrates.

Am ungünstigsten verhalten sich die unmodifizierte Kalkbeschichtung und die Silikonharzbeschichtung, welche mit Marmormehl und Sumpfkalk modifiziert wurden. Die mit Acrylharz und Marmormehl modifizierte Kalkbeschichtung zeigt zwar etwas bessere hygrische Eigenschaften als die unmodifizierte Kalkbeschichtung, dennoch fällt auch hier, aufgrund der unzureichenden wasserhemmenden Wirkung, die hygrische Bilanz insgesamt negativ aus. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Kombination aus Kunstharzen und Kalk zu keiner Verbesserung der hygrischen Eigenschaften einer Beschichtung führt. Weder in Form des Kunstharzes als Additiv in der Kalkbeschichtung noch umgekehrt in Form der Sumpfkalkzugabe zur Silikonharzbeschichtung.

Die Zugabe von Füllstoffen zur Silikonharzbeschichtung führte zwar zu einer Erhöhung der Austrocknungsgeschwindigkeit, zeigte aber auf der anderen Seite auch eine wesentliche Erhöhung des Wasseraufnahmeverhaltens, wodurch sich insgesamt eher ungünstige Verhältnisse ergeben.

Ein völlig anderes Bild dieser Zusammenhänge zeigt sich nach den Verwitterungssimulationen, wobei nachfolgend sowohl die Messungen nach der neuerlichen Randabdichtung, als auch die erhöhte Wasseraufnahme vor der Abdichtung des Randbereiches dargestellt werden:

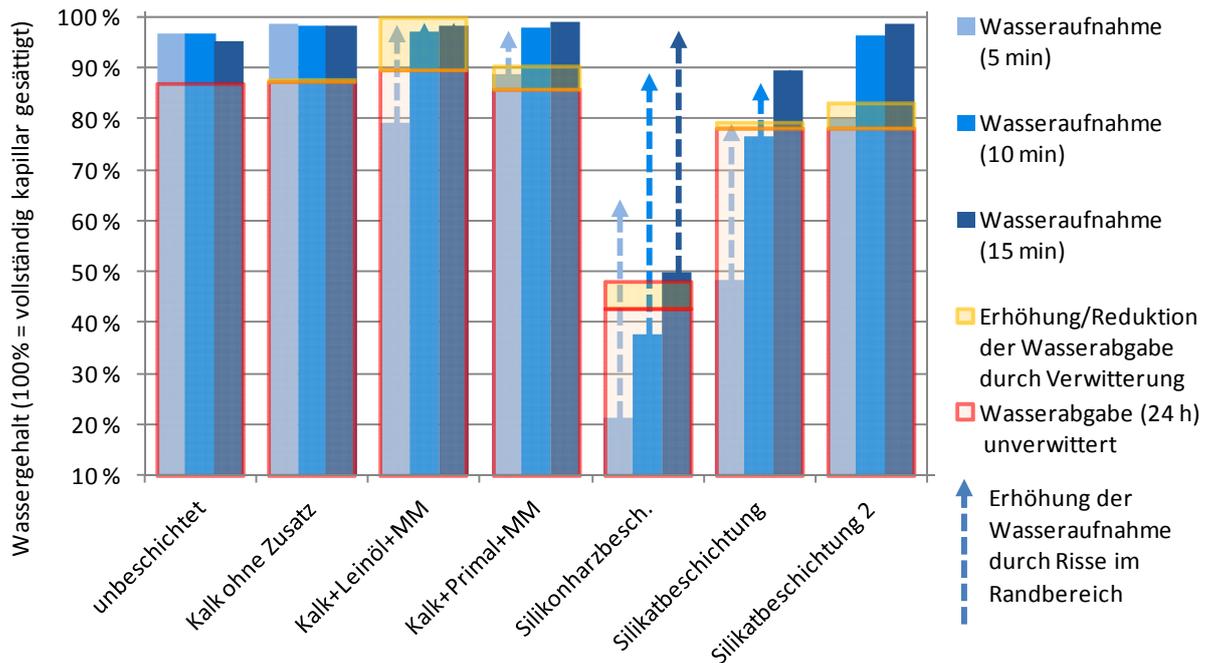


Abbildung 5-54: Gegenüberstellung der Austrocknung nach 24 Stunden mit der Wasseraufnahme nach 5, 10 und 15 Minuten nach Frost-Tauwechselbelastung

Aus dem Vergleich der obigen Abbildung mit Abbildung 5-53 wird deutlich, dass durch die Verwitterungssimulationen bei allen Beschichtungssystemen eine Erhöhung der Wasseraufnahme stattgefunden hat. Vor allem der leinölmodifizierte Kalkanstrich und die Silikatbeschichtung 2 zeigen eine signifikante Reduktion der wasserhemmenden Eigenschaften, allerdings bei gleichzeitiger Erhöhung des Wasserabgabeverhaltens.

Im Gegensatz dazu wird die Wasseraufnahme bei der Silikonharzbeschichtung nur geringfügig erhöht, allerdings ist eine Reduktion der Austrocknungsgeschwindigkeit bei diesem Beschichtungssystem nach der Frost-Tauwechselbeanspruchung zu verzeichnen.

Abgesehen vom unmodifizierten Kalkanstrich zeigen jedoch nach wie vor alle beschichteten Probekörper ein besseres Verhältnis der Wasseraufnahme und -abgabe als die unbeschichtete Vergleichsprobe. Hier zeigen vor allem die leinölmodifizierte Kalkbeschichtung, die Silikonharzbeschichtung und die Silikatbeschichtung die besten hygrischen Eigenschaften, da nur bei diesen Systemen auch nach einer 10 minutigen Wasserlagerung eine vollständige Austrocknung nach 24 Stunden gewährleistet werden kann.

Diese vorteilhaften Eigenschaften werden aber, bei der Silikonharz- und Silikatbeschichtung, beim Vorhandensein von Rissen und Fehlstellen zerstört, indem dann eine maßgebliche Erhöhung der Wasseraufnahme stattfindet. Im Zusammenhang mit einer ohnehin verringerten Austrocknung dieser Beschichtungssysteme, ergeben sich dadurch massive Feuchteansammlungen im Gesteinssubstrat, welche um ein vielfaches höher sind, als bei den unbeschichteten Vergleichsproben.

Nur bei den mit Leinöl und Marmormehl modifizierten Kalkbeschichtungen kann, durch die vorteilhaften Austrocknungseigenschaften, eine Feuchteansammlung auch bei einem erhöhten Wassereintritt vermieden werden.

Den Austrocknungseigenschaften einer Beschichtung muss somit oberste Priorität beigemessen werden, da Rissbildungen und Fehlstellen bei einer verwitterten Skulptur oder Fassade immer auftreten werden.

Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Beschichtung und des Gesteinssubstrates

Zur aussagekräftigen und vergleichenden Interpretation der Untersuchungsergebnisse nach den Verwitterungssimulationen (visuelle Beurteilung, dünnschliffmikroskopischen Aufnahmen und Ultraschallmessungen / vorwiegende Beurteilung des Zerstörungsgrades nach Salzkristallisations-Simulationen), wurden die Intensitäten der Schädigung der Beschichtung als auch des Gesteinssubstrates zusammengefasst beurteilt.

Folgende Schäden wurden dabei bewertet:

1. Beurteilung der Beschichtungsschäden
 - Blasenbildung der Beschichtung
 - Rissbildung der Beschichtung
 - Ablösen der Beschichtung nach Reinigung
 - Haftung der Beschichtung am Untergrund
2. Intensität der Salzausblühungen und Verkrustungen
3. Schädigungsgrad des Gesteinssubstrats

Die einzelnen Schäden wurden dabei auf einer Skala von 0-5 nach Ihrer Menge, Größe und Intensität beurteilt, wobei 0 keiner Schädigung und 5 einer massiven Schädigung gleichgesetzt wird.

Die detaillierte Beurteilung dieser Schäden befindet sich in Anhang C.

Die einzelnen Schädigungsgrade wurden nachfolgend zu einem Gesamtschädigungsgrad aufsummiert, wobei die einzelnen Schädigungsmechanismen (Beurteilung der Beschichtungsschäden, Intensität der Salzausblühungen und Verkrustungen, Schädigungsgrad des Gesteinssubstrates) in der Gesamtbeurteilung separat herausgearbeitet wurden.

Nachfolgend wird dieser so ermittelte Gesamtschädigungsgrad grafisch dargestellt:

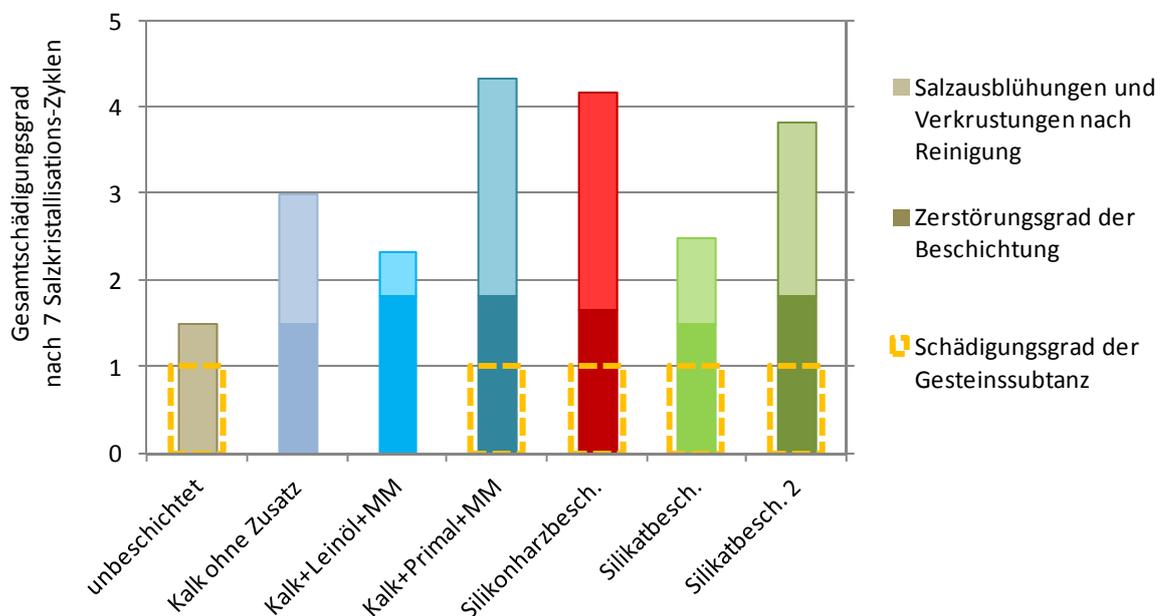


Abbildung 5-55: Gesamtschädigungsgrad der Beschichtung und des Untergrundes nach Interpretation der Ergebnisse aus der visuellen Beurteilung, den dünnschliffmikroskopischen Aufnahmen sowie den Ultraschallmessungen nach Salzkristallisationsbeanspruchung

Aus obiger Abbildung wird ersichtlich, dass Beschichtungen mit einer erhöhten Salzverkrustung auch den höchsten Zerstörungsgrad des darunterliegenden Gesteinssubstrats zur Folge haben. Vor allem kunstharzbasierende Systeme oder Zusätze bilden in Verbindung mit Magnesiumsulfat eine dichte, kaum ablösbare Kruste an der Oberfläche.

Offenbar führt diese Krustenbildung dazu, dass Salze an der Oberfläche nicht mehr auskristallisieren können und unter der dichten Haut zu Zerstörungen des Gesteinssubstrates führen.

Obwohl der unmodifizierte und der mit Leinöl und Marmormehl modifizierte Kalkanstrich ebenso große Beschichtungsschäden aufweisen, konnten die Salzausblühungen an der Oberfläche in beiden Fällen abgenommen werden, es fanden keine oder nur geringe Verkrustungen an der Oberfläche statt. In Verbindung mit dem intakten Gesteinssubstrat zeigt dies abermals, dass eine Salzausblühung oberhalb der Beschichtung gewährleistet werden muss um eine Zerstörung des Gesteinssubstrats zu verhindern.

Da in obiger Abbildung auch die dünnschliffmikroskopischen Aufnahmen mitbeurteilt wurden (z.B. das mit freiem Auge nicht sichtbare „Abheben“ der Silikonharzbeschichtung vom Untergrund), zeigt sich bei allen Beschichtungssystemen ein ähnlicher Schädigungsgrad.

Würde man diesen Parameter unberücksichtigt lassen und nur die visuelle, mit freiem Auge sichtbare Schädigung beurteilen, so würde sich bei der Silikonharzbeschichtung der geringste Gesamtschädigungsgrad der Beschichtung zeigen. Das zeigt auf, dass die mit freiem Auge sichtbare Schädigung einer Beschichtung keinesfalls Rückschlüsse auf den Schädigungsgrad des Gesteinssubstrats zulässt. Ganz im Gegenteil werden Beschichtungen mit sichtbaren Schädigungen oftmals Ihrer Wirkung als Opferschicht gerecht. Eine regelmäßige Erneuerung und Instandhaltung dieser Schichten ist damit aber unabdingbar.

5.4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Kalkbeschichtungen

- Im Vergleich mit allen anderen untersuchten Beschichtungssystemen konnte, im Vergleich mit den unbeschichteten Gesteinsproben, nur durch die unmodifizierte sowie mit Leinöl und Marmormehl modifizierte Kalkbeschichtung eine geringere Gefügezerstörung²⁸⁴ nach Verwitterungssimulationen festgestellt werden.
Die beste Schutzwirkung konnte jedenfalls mit einer Modifikation von Leinöl und Marmormehl erreicht werden. Vor allem die Kombination einer erhöhten Austrocknungsgeschwindigkeit mit einer reduzierten Wasseraufnahme (jeweils im Vergleich zum unbeschichteten Gestein) ist dabei einzigartig.
- Durch Verwitterungssimulationen werden diese positiven hygrischen Eigenschaften des leinölmodifizierten Kalkanstriches zwar signifikant herabgesetzt, dennoch ist das Verhältnis der Wasseraufnahme und –abgabe immer noch am positivsten im Vergleich mit den anderen untersuchten Anstrichsystemen zu bewerten (vor allem bei Vorhandensein von Fehlstellen und Rissen). Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass eine regelmäßige Instandhaltung und Erneuerung für die bestmögliche Funktionsweise dieses Systems unabdingbar ist.
- Kunstharz als Additiv in Kombination mit Marmormehl als Füllstoff übt keinen Einfluss auf die Austrocknungseigenschaften des Kalkanstriches aus, weder im positiven noch im negativen Sinne. Die wasserhemmenden Eigenschaften werden nur geringfügig verbessert, im Vergleich mit Leinöl zeigt sich hier aber eine wesentlich ungünstigere Qualität.
- Die Zugabe von Kunstharzen führt jedenfalls zu einer „Versprödung“ und „Verzähung“ des Anstriches, wodurch die Beschichtung nicht mehr satt in das Porengefüge eindringen kann und außerdem zu Rissbildungen neigt. In Verbindung mit Salzen führt die Zugabe von Kunstharzen zu einer Verkrustung der Oberfläche. Auch der Schädigungsgrad der Beschichtung nach Verwitterung deutet darauf hin, dass kunstharzmodifizierte Kalkanstriche keine Schutzwirkung für das darunterliegende Gesteinssubstrat aufweisen.

Silikatbeschichtungen

- Bei Silikatbeschichtungen kann zwar in einer ersten Interpretation von einer Schutzwirkung des Gesteinssubstrates ausgegangen werden, indem durch diese Anstrichsysteme die Wasseraufnahme reduziert und das Trocknungsverhalten kaum beeinflusst wird. Dennoch war der Gesamtschädigungsgrad der Gesteinssubstanz nach Verwitterungssimulationen gleich hoch wie bei den unbeschichteten Vergleichsproben. Das lässt sich mitunter damit begründen, dass sich die hygrischen Eigenschaften bereits beim Vorhandensein kleiner Risse ähnlich dem unbeschichteten Gesteinssubstrat verhalten. Auch die Beeinflussung von Salzen im Zusammenhang mit dem Bindemittel Kaliwasserglas darf dabei nicht unberücksichtigt bleiben, eine Interpretation dessen ist jedoch auf Basis dieser Versuchsreihen nicht möglich.
- Silikatbeschichtungen mit einem hohen Füllstoffanteil (Fa. Baurex) zeigen im unverwitterten Zustand jedenfalls bessere hygrische Eigenschaften, als das Fertigprodukt mit geringerem Füllstoffanteil (Fa. Remmers).
Nach Verwitterungssimulationen zeigt sich dann jedoch ein gegenteiliges Bild. Als Begründung dafür kann die geringere Dauerhaftigkeit der Silikatbeschichtung 2 gesehen werden (höherer Gesamtschädigungsgrad der Beschichtung nach Salzkristallisationsversuchen erkennbar).

²⁸⁴ Die Schädigungen aller untersuchten Gesteinsprobekörper betreffen lediglich leichte Aufrauhungen an der Oberfläche. Ansonsten weisen alle Gesteinssubstrate keine wesentlichen Schadensmechanismen auf.

Silikonharzbeschichtungen

- Silikonharzanstriche verzögern die Austrocknungseigenschaften signifikant und reduzieren, im Gegensatz zu allen anderen hier untersuchten Beschichtungssystemen, auch den diffusionsförmigen Wassertransport maßgeblich. Auf der anderen Seite zeigen diese Anstriche eine hohe wasserhemmende Wirkung. Insgesamt ergeben sich damit, sowohl im unverwitterten als auch im verwitterten Zustand vorteilhaftere hygrische Eigenschaften, als bei den unbeschichteten Gesteinsproben. Solange die Beschichtung intakt ist, kann dieses Beschichtungssystem somit als Schutzschicht angesehen werden.
- Die Zugabe von Füllstoffen und Sumpfkalk führt zwar zu einer Verbesserung der Austrocknungseigenschaften, verschlechtert aber die wasserhemmenden Eigenschaften der Beschichtung und führt damit zu insgesamt schlechteren hygrischen Zusammenhängen.
- Durch Frost-Tauwechselbeanspruchungen wird der Silikonharzanstrich offenbar dichter bzw. ändert sich die Kapillarstruktur, da das Austrocknungsverhalten reduziert wird und sich das Wasseraufnahmeverhalten im Gegensatz dazu nicht ändert. Im Zusammenhang mit den dünnstufmikroskopischen Aufnahmen nach den Salzkristallisationsversuchen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Beschichtung durch Verwitterungseinflüsse vom Untergrund abhebt, womit ein kapillarbrechender Überzug (Erklärung der reduzierten Austrocknungsgeschwindigkeit) geschaffen wird. Dennoch zeigt der Silikonharzanstrich auch im verwitterten Zustand immer noch vorteilhaftere hygrische Eigenschaften (Vergleich der Wasseraufnahme und -abgabe), als die meisten anderen untersuchten Beschichtungssystemen.
- Diese positiven hygrischen Eigenschaften werden jedoch beim Vorhandensein von Rissen signifikant verschlechtert, sodass der Silikonharzanstrich in diesen Fällen sogar die unvorteilhaftesten hygrischen Eigenschaften aufweist. Damit geht die Schutzwirkung dieses Anstrichsystems vollständig verloren, was auch durch die Verwitterungssimulationen bestätigt werden konnte. Dabei zeigte sich ein ähnlicher Gesamtschadigungsgrad der Gesteinssubstanz wie bei den unbeschichteten Vergleichsproben.

Allgemeine Aussagen

- Bereits kleine Risse führen zu einer signifikanten Zunahme des Wasseraufnahmeverhaltens, was im Verhältnis zum w-Wert der Beschichtung, vor allem bei sehr dichten Beschichtungen tragend wird. Da Rissbildungen und Undichtigkeiten niemals ausgeschlossen werden können, ist den Austrocknungseigenschaften höchste Priorität beizumessen.
- Das Gesteinssubstrat übt einen wesentlichen Einfluss auf die hygrischen Eigenschaften des Wandbaustoffes Gestein + Beschichtung aus.
- Kunstharze (sowohl als Bindemittel als auch in Form eines Additivs) führen in Verbindung mit Salzen zu einer Verkrustung der Oberfläche.

5.5 ZITIERTE UND WEITERFÜHRENDE LITERATUR

Bannwarth/Kremer/Schulz (2007), Cechová (2009), EN 1062-3 (2008), EN ISO 7783 (2008), EN 1062-1 (2004), EN 14579 (2005), EN 12370 (1999), EN 12371 (2010), Fleischer (2002), Holmström (1996), Kittel (1998), Maschelein-Kleiner (1995), Meyer (1993), Rohatsch (2010), Schneider/Knoblauch (2006), Wehlte (1981), Westscott/Muir (2003)

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

6.1 VERGLEICH DER LITERATURRECHERCHE MIT DEN UNTERSUCHUNGSERGEBNISSEN DIESER ARBEIT

Zur Überprüfung der Annahmen und Aussagen sowie der offenen Fragestellungen aus der Literaturrecherche (vgl. Kap. 3), werden diese mit den Ergebnissen der Versuchsergebnisse aus Kap. 4 und 5 verglichen.

Dabei werden die Annahmen, Aussagen und offenen Fragestellungen nach folgender Einteilung überprüft:

- ✓ Die Aussage (State of the Art) bzw. die Annahme der offenen Fragestellung aus Kap. 3 ist richtig und wurde anhand der Versuchsergebnisse beantwortet.
- ✓/ ✗ Die Aussage (State of the Art) und/oder die Annahme der offenen Fragestellung aus Kap. 3 ist nur teilweise richtig oder unvollständig. Anhand der Versuchsergebnisse konnten zum Teil auch andere oder abweichende Aussagen getroffen werden.
- ✗ Die Aussage (State of the Art) und/oder die Annahme der offenen Fragestellung aus Kap. 3 ist nicht richtig. Anhand der Versuchsergebnisse konnten andere Aussagen getroffen werden.

Je nach Einteilung in diese Kategorien werden die abweichenden oder übereinstimmenden Aussagen anhand der Ergebnisinterpretationen dargestellt.

Nachfolgend erfolgt diese Gegenüberstellung in Form einer Tabelle, wobei als Basis die, in Kap. 3 erarbeitete, Tabelle 3-11 als Grundlage herangezogen und entsprechend ergänzt wird.

Ergebnis der Literaturrecherche – State of the Art (Kap. 3)			Vergleich mit Ergebnis der Laboruntersuchungen (Kap. 4 und 5)	
klar definierte Aussagen = State of the Art	offene Fragen	Annahmen	klar definierte Aussagen bzw. Annahmen richtig?	Erläuterungen und Aussagen auf Basis der Versuchsergebnisse
Anstriche allgemein				
die Dauerhaftigkeit von anorganischen Anstrichsystemen wie Kalkbeschichtungen oder Silikatbeschichtungen ohne organische Zusätze, ist geringer als die Dauerhaftigkeit von organischen Anstrichsystemen	Einfluss von Additiven auf die Dauerhaftigkeit von Anstrichen	durch die Zugabe von Additiven kann die Dauerhaftigkeit von Kalkbeschichtungen maßgeblich erhöht werden	✓ / ✗	Wenn nur der Abrieb und die Haftfestigkeit im unbewitterten Zustand berücksichtigt werden, so zeigt sich, dass Marmormehl und Kaseinpulver die Dauerhaftigkeit des Kalkanstriches erhöhen, während eine Modifikation mit Topfen, Leinöl und Primal die Dauerhaftigkeit reduzieren. Nach den Verwitterungssimulationen konnte festgestellt werden, dass eine kombinierte Modifikation von Leinöl und Marmormehl den geringsten Gesamtschadigungsgrad der Beschichtung bewirken ²⁸⁵ und dass mit Kunstharz modifizierte Kalkanstriche ebenso wie kunstharzbasierende Beschichtungssysteme unter diesen Gesichtspunkten einen höheren Schädigungsgrad aufweisen.
	Einfluss der Konsistenz, Auftragsart und Schichtenanzahl des Kalkanstriches auf dessen Eigenschaften	die Dauerhaftigkeit des Kalkanstriches hängt auch maßgeblich von der gewählten Konsistenz, Auftragsart sowie der Schichtenanzahl des Anstriches ab	✓	Zur Optimierung der Dauerhaftigkeit von Kalkanstrichen sollten diese al fresco und mit destilliertem Wasser stark verdünnt in das Gestein mehrlagig einmassiert werden. Detaillierte Ergebnisse vgl. Kap. 4.5
Anstriche basierend auf organischen Bindemitteln weisen im Vergleich mit anorganischen Anstrichsystemen ein höheres Wasserrückhaltevermögen, bei einem gleichzeitig reduziertem Trocknungsverhalten auf	Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und Austrocknung (hygrisches Verhalten) zur Beurteilung einer möglichen Wasserakkumulation im Substrat	organische Zusätze führen (v.a. bei anorganischen Anstrichsystemen) zu einer Reduktion der Wasserdurchlässigkeit	✓	Eine Verbesserung der hygrischen Eigenschaften (im Vergleich mit der unbeschichteten Probe) kann nur durch die mit Leinöl und Marmormehl modifizierte Kalkbeschichtung und durch die Silikonharzbeschichtung gewährleistet werden (unter Annahme einer intakten Beschichtung ohne Rissbildungen und Fehlstellen).
	Einfluss unterschiedlicher Rezepturen kunstharzbasierender Anstriche (z.B. Veränderung des Füllstoffanteils) auf deren hygrischen Eigenschaften	die jeweiligen Rezepturen kunstharzbasierender Anstriche beeinflussen die hygrischen Eigenschaften maßgeblich	✓	Die Zugabe von Füllstoffen zur Silikonharzbeschichtung führt zwar zu einer Erhöhung der Austrocknungsgeschwindigkeit, zeigt aber auf der anderen Seite auch eine wesentliche Erhöhung des Wasseraufnahmeverhaltens, wodurch sich insgesamt eher ungünstigere hygrische Verhältnisse ergeben.
Kalkanstriche wirken als Opferschichten, wodurch die Dauerhaftigkeit des Gesteinssubstrates erhöht wird		moderne Anstrichsysteme weisen keine höhere Schutzwirkung auf als Kalkbeschichtungen	✓	Auf Basis der Ergebnisse nach Salzkristallisationsversuchen konnte festgestellt werden, dass nur die unmodifizierte sowie die mit Leinöl und Marmormehl modifizierte Kalkbeschichtung als Opferschichten wirken.
Kalkbeschichtungen beeinflussen den Wasserdampf-diffusionswiderstand des Substrates kaum	Diffusionswiderstand des Dispersionssilikatanstriches und des Silikonharzanstriches im Vergleich zum Kalkanstrich		✓	Sowohl Kalkanstriche als auch Dispersionssilikatanstriche beeinflussen den Diffusionswiderstand nicht. Nur das Auftragen einer Silikonharzbeschichtung bewirkt eine Reduktion der Diffusionseigenschaften.
	Hygrische Eigenschaften des Kalkanstriches im Vergleich zum unbeschichteten Substrat		✓	Kalkanstriche verbessern die hygrischen Eigenschaften maßgeblich.

Tabelle 6-1: Vergleich der Aussagen und Annahmen aus der Literaturrecherche mit den Untersuchungsergebnissen dieser Arbeit – Anstriche allgemein

²⁸⁵ Wenn auch Salzverkrustungen und dünnschliffmikroskopische Aufnahmen mitberücksichtigt werden und die ästhetischen Veränderungen der Beschichtung (wie z.B. Vergilbung) nicht zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Anstriches herangezogen werden.

Ergebnis der Literaturrecherche – State of the Art (Kap. 3)			Vergleich mit Ergebnis der Laboruntersuchungen (Kap. 4 und 5)	
klar definierte Aussagen = State of the Art	offene Fragen	Annahmen	klar definierte Aussagen bzw. Annahmen richtig?	Erläuterungen und Aussagen auf Basis der Versuchsergebnisse
Einfluss von Additiven auf Kalkanstriche				
die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Kalkanstrichen wird durch die Zugabe von Leinöl und Kaseinen reduziert	Einfluss von Kunststoffdispersionen auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Kalkanstrichen		✓	Die Modifikationen Leinöl, Kasein und Primal (Kunsthazdispersion) reduzieren die Karbonatisierungsgeschwindigkeit, Marmormehl bewirkt keine Veränderung. ²⁸⁶
	Einfluss unterschiedlicher Additive wie Leinöl, Kunstharzdispersionen und Marmormehl auf das hygrische Verhalten der Kalkbeschichtung	Kunststoffdispersionen führen zu keiner maßgeblichen Verbesserung der hygrischen Eigenschaften	✓	Kunsthazze beeinflussen die Austrocknungseigenschaften des Kalkanstriches eher negativ (in Kombination mit Marmormehl wird diese negative Beeinflussung wieder aufgehoben, die Austrocknungseigenschaften sind dann ähnlich der unbeschichteten Vergleichsprobe). Die wasserhemmenden Eigenschaften werden nur geringfügig verbessert.
		Marmormehl reduziert die Austrocknungsgeschwindigkeit	✓/✗	Geringfügige Erhöhung des kurzzeitigen Austrocknungsverhaltens. Bei längeren Austrocknungsperioden findet eine Reduzierung statt. Allerdings zeigt sich in Kombination mit anderen Additiven eine Erhöhung der Trocknungsgeschwindigkeit (kann jedoch auch mit unterschiedlichen Substraten bzw. mit unterschiedlichen Zugabemengen in Zusammenhang gebracht werden).
		Leinöl verbessert die hygrischen Eigenschaften	✓	Sowohl die Austrocknungseigenschaften als auch die wasserhemmenden Eigenschaften werden durch die Zugabe von Leinöl verbessert (vor allem im Zusammenhang mit Marmormehl). Insgesamt verbessern sich die hygrischen Eigenschaften damit signifikant.
	Einfluss unterschiedlicher Proteinzusammensetzungen auf das hygrische Verhalten der Kalkbeschichtung	die Art des zugegebenen Proteins beeinflusst die Wasserdurchlässigkeit unterschiedlich, wobei Kaseinpulver schlechtere Eigenschaften aufweist als Proteinzusammensetzungen in natürlicher Form (z.B. Topfen)	✗	Unterschiedliche Proteinzusammensetzungen führen zwar zu unterschiedlichen Auswirkungen der Eigenschaften, dennoch kann keine prinzipielle stärkere Verbesserung mit Proteinzusammensetzungen in natürlicher Form beobachtet werden. Während auf der einen Seite Kaseinpulver als Additiv die hygrischen Eigenschaften weniger positiv beeinflusst als die Zugabe von Topfen, führt auf der anderen Seite die Zugabe von Topfen zu einer Reduktion der Dauerhaftigkeit der Beschichtung, was bei einer Modifikation mit Kaseinpulver nicht der Fall ist.
	Einfluss der Zugabemenge von Additiven auf die hygrischen Eigenschaften des Kalkanstriches	geringere Zugabemengen von Additiven sind zielführender als hohe Zugabemengen	✓	Bereits geringe Mengen an Additiven zeigen eine große Wirkung, während bei zu hohen Zugabemengen die Gefahr einer Entkräftung der positiven Eigenschaften des Kalkanstriches besteht.

Tabelle 6-2: Vergleich der Aussagen und Annahmen aus der Literaturrecherche mit den Untersuchungsergebnissen dieser Arbeit – Einfluss von Additiven auf Kalkanstriche

²⁸⁶ Durch die Laboruntersuchungen konnten die Ergebnisse der Literaturrecherche mehrheitlich bestätigt werden. Interessant ist hierbei vor allem, dass es sich um drei völlig unterschiedliche Untersuchungsmethoden handelt. In der Literaturzusammenfassung wurde Herm (1997), Paschinger (2004) und Bermoser (2008) zitiert. Während Paschinger (2004) das verbleibende Kalkhydrates im Anstrich ermittelte um damit Rückschlüsse auf den Karbonatisierungsgrad zu ziehen, ermittelte Herm (1997) die Karbonatisierungsgeschwindigkeit mit einem sehr komplexen Laborgerät, durch dessen Hilfe die Änderung der CO₂-Konzentration detailliert bestimmt werden konnte. Dem gegenüber steht die, in dieser Arbeit und bei Bermoser (2008), sehr einfache Versuchsanordnung mit einer Indikatorlösung, wo die Karbonatisierungsgeschwindigkeit über den pH-Wert analysiert wurde. Durch die konvergierenden Laborergebnisse konnte bewiesen werden, dass dieses, auch in der Baustellenpraxis anwendbare Verfahren, durchaus plausible Ergebnisse liefert und zudem eine zusätzliche wichtige Aussage über die Vollständigkeit der Karbonatisierung gibt.

6.2 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, dass Kalkanstriche im Vergleich mit den anderen hier untersuchten Anstrichsystemen das Gesteinssubstrat insgesamt am besten schützen und damit eine optimale Opferschicht für Kalksandsteine darstellen.

Vor allem die hygrischen Eigenschaften des Gesteinsgefüges werden signifikant verbessert, indem geeignete Kalkanstrichrezepturen die Austrocknungsgeschwindigkeit erhöhen, die Wasseraufnahme reduzieren und den Wasserdampfdiffusionswiderstand kaum beeinflussen.

Diese Eigenschaften sind insbesondere beim Vorhandensein von Rissen und Fehlstellen wichtig, wo Kalkanstriche dementsprechend auch die vorteilhaftesten Ergebnisse aufzeigt. Auf der anderen Seite wirken sich solche Risse besonders negativ bei sehr dichten Beschichtungen, wie dem Silikonharzanstrich aus. In diesen Fällen muss mit einer beträchtlichen Wasserakkumulation im Gesteinssubstrat gerechnet werden und das obwohl diese Beschichtungssysteme, ohne Vorhandensein dieser Fehlstellen, eine ähnlich gute oder, je nach Anstrichrezepturen, teilweise sogar eine bessere Performance als die Kalkanstriche aufweisen. Im Bezug auf Silikonharzanstriche hat sich auch gezeigt, dass Kunstharze in Verbindung mit Salzen zu einer Verkrustung der Oberfläche führen (dies konnte auch in Verbindung mit einer Kunstharzzugabe zum Kalkanstrich beobachtet werden).

Auch im Vergleich mit Silikatanstrichen zeigen die Kalkbeschichtungen insgesamt bessere Eigenschaften. Silikatbeschichtungen verbessern zwar die hygrischen Eigenschaften des Gesteinssubstrates, zeigen jedoch unvorteilhaftere Zusammenhänge zwischen Wasseraufnahme und Austrocknung als entsprechend gut ausgewählte Kalkanstrichrezepturen.²⁸⁷

Zur optimalen Funktionsweise des Kalkanstriches ist es somit wichtig, den Anstrich entsprechend zu verarbeiten und geeignete Rezepturen zu wählen. Folgende Empfehlungen sollten dabei berücksichtigt werden:

- Eine entsprechend hohe Verdünnung des Sumpfkalkes (ca. 1:10) erhöht die Dauerhaftigkeit und sollte, aus Gründen der optimalen Karbonatisierung, mit (an der Außenluft stehendem) destilliertem Wasser²⁸⁸ erfolgen (enthält freie Kohlensäure zum Abbinden). Der Kalkanstrich sollte mehrlagig (ca. 5 Schichten) nass in nass aufgetragen werden, dabei ist auf eine entsprechend hohe Luftfeuchtigkeit zu achten.
- Die Zugabe von Marmormehl als Füllstoff führt ebenfalls zu einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit des Anstriches.
- Geeignete Additive sollten nur in geringen Mengen beigegeben werden, da bei zu hohen Zugabemengen die Gefahr der Entkräftung der positiven Eigenschaften des Kalkanstriches besteht.
- Als wirksamstes Additiv hat sich diesbezüglich Leinöl erwiesen (auch Proteine weisen vorteilhafte Eigenschaftsveränderungen auf, wobei diese im Hinblick auf mikrobiellen Bewuchs kritisch betrachtet werden müssen). Im Gegensatz dazu zeigen sich bei der Modifikation mit Kunstharz keine bis negative Beeinflussungen.

Als wichtigstes Ergebnis dieser Untersuchungen scheint jedenfalls die Tatsache, dass die Zugabe von Kunstharzen zu Kalkanstrichen nicht den Erwartungen als Ersatz der historischen Rezeptur mit Leinöl oder Proteinen entspricht. Ganz im Gegenteil zeigen sich hier teilweise (v.a. in Verbindung mit Salzen) sogar schlechtere Ergebnisse als bei unmodifizierten Kalkbeschichtungen. Die historische Rezeptur mit Leinöl zeigt hingegen wesentliche Verbesserungen der hier untersuchten Eigenschaften auf.

Vor allem die hygrischen Eigenschaften des mit Leinöl und Marmormehl modifizierten Kalkanstriches sind einzigartig. Kein anderes der untersuchten Anstrichsysteme schafft es, die Wasseraufnahme zu reduzieren und dabei auch gleichzeitig die Trocknungseigenschaften zu verbessern.

²⁸⁷ Im Vergleich mit unmodifizierten oder nachfolgend beschriebenen, ungeeigneten Kalkanstrichrezepturen zeigen die Silikatanstriche durchaus auch bessere Ergebnisse.

²⁸⁸ Um einen möglichst geringen pH-Wert des Wassers und somit viel gelöstes CO₂ im Wasser zu gewährleisten.

Nur die Zugabe von Proteinen, und hier vor allem Topfen, zeigte ähnlich der Leinözugabe vielversprechende Ergebnisse, wurde aber aufgrund des möglichen mikrobiologischen Befalls nicht näher untersucht. In diesem Zusammenhang muss jedoch erwähnt werden, dass ein mikrobiologischer Befall nicht immer negative Auswirkungen haben muss. Wie erste Forschungsarbeiten zeigen (vgl. z.B. Zeugswetter (2008), Kerner (2005)), können die Ausscheidungsprodukte gewisser Bakterien (z.B. *Bacillus cereus*) zur Konsolidierung von Kalkputzen und –anstrichen eingesetzt werden. Diese Bakterien benötigen jedoch Proteine zur Erstbesiedelung, womit eine gezielte mikrobiologische Besiedelung von mit Proteinen modifizierten Kalkanstrichen vielversprechende Ergebnisse liefern könnte und auf alle Fälle näher untersucht werden sollte.

Ebenso wurden Einflüsse von UV-Strahlung und vor allem der Zusammenhang der Mannigfaltigkeit unterschiedlicher Verwitterungseinwirkungen nicht untersucht. Die in dieser Arbeit genannten Interpretationen und Schlussfolgerungen beziehen sich zudem lediglich auf Untersuchungen im Labor. Detaillierte Freifeldversuche sind, zur Abbildung und Beurteilung realer Situationen und damit vor der Anwendung an konkreten Objekten, zwingend notwendig.

Ebenso sollten umfangreiche Evaluierungen von Beschichtungen an bestehenden Restaurierungsobjekten unterschiedlichen Alters durchgeführt werden. Eine dahingehende Untersuchung wird derzeit vom österreichischen Bundesdenkmalamt durchgeführt (Nimmrichter, J./Ghaffari, E./Farkas, P. u.a.)

Auch der Einfluss unterschiedlicher Substrate auf die Eigenschaften des Gesamtsystems Substrat und Anstrich wurde in dieser Arbeit nur am Rande mitberücksichtigt. So zeigte sich, dass unterschiedliche Zusammensetzungen der Kalksandsteinsubstrate zu teilweise stark divergierenden Ergebnissen führen. Der Einfluss von Substraten mit völlig anderen Porenradienverteilungen oder chemischen Zusammensetzungen, wie beispielsweise Putze oder Quarzsandsteine, sollte deshalb noch detaillierter untersucht werden. Ebenso müssen in diesem Zusammenhang vorgeschädigte, bereits verwitterte Gesteinssubstrate untersucht werden.

Obwohl, wie eingangs erwähnt, die ästhetischen Ansprüche an Anstriche in dieser Arbeit hintangehalten wurden und vorrangig der Schutz des Gesteinssubstrates im Vordergrund stand, darf nicht unerwähnt bleiben, dass die meisten Kalkanstriche auch in diesen Untersuchungen teilweise starke Zerstörungsmuster aufgewiesen haben und vor allem die mit Leinöl modifizierte Kalkbeschichtung Vergilbungserscheinungen zeigte.

Aus diesem Grund sollten auch diesbezüglich noch weitere Untersuchungen zur Optimierung des ästhetischen Erscheinungsbildes und der Dauerhaftigkeit durchgeführt werden, wobei nochmals betont werden muss, dass solche „Verschönerungen“ nie zu Lasten der Schutzwirkung des Anstriches durchgeführt werden dürfen. Denn was versprechen wir uns von einer, am besten ewig haltbaren, makellosen Beschichtung? Wollen wir damit die aktuelle Gegenwart verewigen, das Gebäude von der Geschichte unangreifbar machen und damit einen Stillstand der Zeit heraufbeschwören? Pescoller (1995) schreibt dazu: *„Die historische Fassade als Fortwährend-Gewesene wird zur Aktuellen, Nicht-mehr-Gewesenen, und sie kann den Status einer Gewesenen auch für die folgenden Generationen nicht mehr erhalten. Nicht das Baudenkmal in seiner Geschichte inklusive der Konsequenzen historischer Maltechniken, sondern der Haltbarkeitswille wird zur relevanten Größe.“* (S.61)

Anstriche aus Kalk lassen durch Ihre Opferschutzwirkung jedoch Verwitterung und somit auch Alterung zu, und erst damit, so behaupte ich, erhält das Gebäude seinen Charme und Charakter. So wie die Falten alter Menschen ein bewegtes Leben wiedergeben, so können uns auch Gebäude durch Ihre Altersspuren Geschichten erzählen.

Doch Risse, Mikroorganismen oder Abplatzungen sowie unregelmäßige Farbstrukturen gehen mit dem derzeitigen Gesellschaftstrend der makellosen Schönheit nicht konform. So wie sich auch in der Mode viele Menschen Ihrer Ausstrahlung durch Liftings und Faltenkorrekturen berauben, so nimmt man mit aalglatten Fassadenanstrichen auch dem Gebäude seine Geschichte und Authentizität weg.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- ALSCHER, L.** (Hg.) (1981ff): Lexikon der Kunst. In fünf Bänden – Architektur, Bildende Kunst, Angewandte Kunst, Industrieformgestaltung, Kunsttheorie. Berlin: Verl. Das Europ. Buch.
- BALEN, K. / GEMERT, D.** (1993): Interaction between drying and lime mortar carbonation. In: Wittmann, F. (Hg.): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2. Tagungsbericht des 3. Internationalen Kolloquiums zum Thema Werkstoffwissenschaften und Bausanierung = Materials science and restoration. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verl. (Kontakt & Studium, 420), S. 1440–1452.
- BANNWARTH, H. / KREMER, B. P. / SCHULZ, A.** (2007): Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie. Vom Atom bis zur Atmung für Biologen, Mediziner und Pharmazeuten. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- BARGEL, H.-J. / HILBRANS, H.** (2008): Werkstoffkunde. 10., bearb. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- BAUMSTARK, R. / SCHWARTZ, M.** (2008): Die Technologie des Beschichtens. Dispersionen für Bautenfarben. Acrylsysteme in Theorie und Praxis. Hannover: Vincentz Verlag.
- BENNETT, B.** (1997): Awash with Colour. The Use of Limewash as a Decorative and Protective Coating. Herausgegeben von Cathedral Communications Limited. Reproduced from The Building Conservation Directory. Online verfügbar unter <http://www.buildingconservation.com/articles/awash/awash.html>, zuletzt geprüft am 06.11.2011.
- BERGER, E.** (1904): Die Maltechnik des Altertums. Nach den Quellen, Funden, chemischen Analysen und eigenen Versuchen. Vollst. umgearb. Aufl. München: Callwey (Beiträge zur Entwicklungs-Geschichte der Maltechnik).
- BERMOSER, I.** (2008): Kalkschlämme als Schutz- und Opferschicht auf Kalksandstein. Die Wiener Spinnerin am Kreuz - Restaurierungsgeschichte und Evaluierung. Diplomarbeit. Betreut von G. Krist. Wien. Universität für angewandte Kunst.
- BLÖCHL-WIRTS, B.** (2001): Kalkbeschichtungen in der Denkmalpflege. Untersuchungen zur Substratabhängigkeit feuchtetechnischer Eigenschaften von Anstrichen und Schlämmen in Mehrschichtsystemen. Dissertation. Betreut von W. Johannes. Hannover. Universität Hannover, Fachbereich Geowissenschaften und Geographie.
- BOENKENDORF, U. / DEGENKOLB, M. / KNÖFEL, D.** (1993): Proteine als Zusatzmittel in Kalkmörteln. In: Sneathlage, R. (Hg.): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung. Ein Förderprojekt des Bundesministers für Forschung und Technologie. Berlin: Ernst & Sohn, S. 129–137.
- BÖHME, D. / WOELKER, G.** (1994): Die Entstehung von Kalkschleiern und Sinterschichten. Herausgegeben von Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung. Online verfügbar unter <http://baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1998077109174>, zuletzt geprüft am 05.11.2011.
- BÖRNER, K. / HILL, D.** (2007): Große Enzyklopädie der Steine. Online verfügbar unter <http://www.naturstein-datenbank.de>, zuletzt geprüft am 05.10.2006.
- BOUÉ, A.** (2000): Geschichte der Anstrichstoffe. In: Boué, A. / Lindner, B. (Hg.): Farbe in der Steinrestaurierung. Fassung und Schutz. 2. Workshop des Instituts für Bauchemie Leipzig e.V., Kloster Nimbschen, 11. und 12. Juni 1999. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 5–10.
- BRACHERT, T.** (2001): Lexikon historischer Maltechniken. Quellen - Handwerk - Technologie - Alchemie. München: Callwey (Veröffentlichung des Instituts für Kunsttechnik und Konservierung im Germanischen Nationalmuseum, Band 5).
- BRANDES, C.** (1995): Natursteinkonservierung durch Beschichtung. Untersuchungen zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von Anstrichsystemen auf Natursteinen.

- BRANDES, C.** (1999): Anstriche und Beschichtungen für Bauwerke aus Naturstein. Eigenschaften, Anforderungen und praxisbezogene Anwendung. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag (Baupraxis + Dokumentation, Band 16).
- BRASHOLZ, A.** (1984): Der Fassadenanstrich. Untergründe, Werkstoffe, Ausführungen. München: Callwey.
- BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN KALKINDUSTRIE E.V.** (2006): Kalk Kompendium. Online verfügbar unter <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Kalk>, zuletzt geprüft am 12.11.2009.
- CECHOVÁ, E.** (2009): The Effects of Linseed Oil on the Properties of Lime-based Restoration Mortars. Betreut von R. Mazzeo. Universität di Bologna.
- CHANDRA, S.** (2008): History of Architecture and Ancient Building Materials in India, Part II.: Techniz Books International.
- CHRIST, A.** (1994): Chemie und Eigenschaften von Wasserglas. Quelle: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung. Herausgegeben vom Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB. Online verfügbar unter <http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1997117109303>, zuletzt geprüft am 02.12.2008.
- COWPER, A. D.** (1998): Lime and lime mortars. Shaftesbury: Donhead.
- DARMSTADT, C.** (1990): Der Polychromie-Streit im frühen Historismus. In: Das Maler- und Lackierhandwerk. Herausgegeben von Fraunhofer IRB. Baufachinformation.de. Online verfügbar unter <http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1988017124927>, zuletzt geprüft am 05.11.2011.
- DREUSE, H. / NEHRING, C.** (2004): Untersuchungen von reinen und modifizierten Kalkfarben für historische Bauwerke. In: Institut für Steinkonservierung Mainz (Hg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und morgen? IFS-Tagung 2004. 2. erweiterte Auflage. Mainz, DE (IFS-Bericht, Band 19), S. 101–106.
- DREYER, J.** (2004): Vorlesungsunterlagen - Bauphysikalische Diagnose. 1. und 2. Teil. Herausgegeben von Technische Universität Wien. Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz. Wien.
- EIBNER, A.** (1995): Entwicklung und Werkstoffe der Wandmalerei. vom Altertum bis zur Neuzeit. Unveränd. Neudr. d. Ausg. von 1926. Vaduz: Sändig Repr.-Verl. Wohlwend.
- EITELBERGER, R.** (1871f): Quellenschriften zur Kunstgeschichte. 18 Bände. Wien.
- ESSEX COUNTY COUNCIL PLANNING DEPARTMENT** (1999): Conservation in Practice: plastering & Limewash. Advice on the maintenance, repair and conservation of plastered and limewashed surfaces on traditional houses and service buildings.
- FARROW & BALL** (2009): Product-Advice, Limewash. Online verfügbar unter <http://www.farrow-ball.com/productadvice/advicesheets/Limewash.pdf>, zuletzt geprüft am 04.12.2009.
- FLEISCHER, G.** (2002): Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege. Dissertation. Betreut von A. Rohatsch. Wien. Technische Universität Wien, Institut für Ingenieurgeologie.
- FÖLL, H.** (o. J.): Einführung in die Materialwissenschaft. Christian-Albrechts-Universität Kiel, Technische Fakultät. Online verfügbar unter http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/index.html, zuletzt geprüft am 26.01.2009.
- FRAUSTADT, G. / KRAFFT, F.** (2006): Georgius Agricola: De Natura Fossilium. Handbuch der Mineralogie (1546). übersetzt von Georg Fraustadt, durchgesehen und ergänzt von Fritz Krafft. Wiesbaden: Marix-Verl.

- GHAFFARI, E.** (2005): Die historischen Farbfassungen der barocken Brunnenanlagen im Schlosspark Schönbrunn und die Möglichkeit ihrer Rekonstruktion. Diplomarbeit. Wien. Universität für angewandte Kunst, Institut für Konservierung und Restaurierung-Technologie.
- GORETZKI, L.:** Eigenschaften von Beschichtungen. Naturwiss. - technische Grundlagen Bauwerkserhaltung. Bauhaus-Universität Weimar, Professur Bauchemie. Online verfügbar unter <http://www.uni-weimar.de/cms/uploads/media/V8.pdf>, zuletzt geprüft am 22.12.2011.
- GRANDET, J.** (1975): Contribution l'tude de la prise et de la carbonatation des mortiers au contact des matériaux poreux. Dissertation. Betreut von Univ. Paul Sabatier. Toulouse. CNRS.
- HERM, C.** (1997): Anstriche auf Naturstein. Untersuchungen zur Zusammensetzung historischer Fassungen, Kolloidchemie von Kalkfarbe und Bauphysik. Betreut von H. P. Boehm. München. Ludwig-Maximilians-Universität, Fakultät für Chemie und Pharmazie.
- HOLMSTRÖM, I.** (1996): The Use Of Lime. In: Building Limes Forum and Historic Scotland (Hg.): The Historic Scotland International Lime conference, S. 48–62.
- ILSCHNER, B. / SINGER, R. F.** (2005): Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik. Eigenschaften, Vorgänge, Technologien. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- ILG, A.** (1873): Heraclius: Von den Farben und Künsten der Römer. Originaltext und Übersetzung von Albert Ilg. Neudr. d. Ausg. Wien 1873. Wien: Wilhelm Braumüller. K.K. Hof- und Universitätsbuchhändler (Quellenschriften für Kunstgeschichte und Kunsttechnik des Mittelalters und der Renaissance, Band 4).
- INTERNATIONAL COUNCIL ON MONUMENTS AND SITES** (1989): Charta von Venedig 1964. Internationale Charta über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (Denkmalbereiche). Offizielle dt. Fassung. Wien: Internat. Ges. für Denkmal- u. Ortsbildpflege.
- INTERNATIONAL INSTITUTE FOR CONSERVATION OF HISTORIC AND ARTISTIC WORKS.** (Hg.) (1995): Restauratorenblätter zum Thema Fassadenmalerei. Forschungsprojekt Eurocare 492 Muralpaint. Unter Mitarbeit von Manfred Koller und Rainer Prandstetter. Klosterneuburg, Wien: M & C.
- KARSTEN, R.** (1966): Bauchemie. Für Schule u. Praxis. 4. Neubearb. Auflage. Heidelberg: Strassenbau Chemie u. Technik Verlagsges.
- KEIM, A. W. / HOPPE, T.** (1995): Die Mineral-Malerei. Neues Verfahren zur Herstellung witterungsbeständiger Wandgemälde ; technisch-wissenschaftliche Anleitung. Nachdr. der Ausg. von 1881 / hrsg. und mit einer Einl. und Bibliogr. vers. von Thomas Hoppe. Stuttgart: Enke.
- KEIMFARBEN GMBH & CO.KG** (Hg.) (2010): Die Geschichte einer bahnbrechenden Idee. Online verfügbar unter http://www.keimfarben.de/de/das_unternehmen/keimfarben/geschichte/, zuletzt aktualisiert am 04.11.2010, zuletzt geprüft am 05.11.2010.
- KENTER, W.** (o.J.a): Leinöl. Kalk-Laden. Online verfügbar unter http://www.kalk-laden.de/epages/61629937.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/61629937/Products/L%C3%B6k50, zuletzt geprüft am 07.04.2010.
- KENTER, W.** (o.J.b): Caseinpulver. Kalk-Laden. Online verfügbar unter http://www.kalk-laden.de/epages/61629937.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/61629937/Products/CP100, zuletzt geprüft am 07.03.2010.
- KENTER, W.** (o.J.c): Beschreibung Kalkfarbe. Online verfügbar unter <http://www.kalk-laden.de/WebRoot/Store6/Shops/61629937/47F1/53BF/CCEB/9499/F997/C0A8/28BA/DE75/Beschreibung-Kalkfarbe.pdf>, zuletzt geprüft am 27.01.2010.
- KERNER, C.** (2005): Konsolidierung von historischen Kalkputzen mit Kalkwasser und Bakterien. Betreut von A. Rohatsch. Technische Universität Wien, Institut für Ingenieurgeologie.

- KIESLINGER, A.** (1932): Zerstörungen an Steinbauten. Ihre Ursachen und ihre Abwehr. Wien: Deuticke.
- KIEBL, K.** (1983): Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation.
- KIEBL, K.** (1985): Feuchtetransport in Bauteilen. Berechnung für normierte und reale Bedingungen: Fraunhofer IRB Verl. (IBP Mitteilung, 102).
- KITTEL, H** (Hg.) (1974): Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen. Band 2. Pigmente, Füllstoffe, Farbstoffe. Berlin: Colomb.
- KITTEL, H.** (Begr.) / **LEDWOCH, K.-D.** (Hg.) (1998): Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen. Band 1. Geschichte, Grundlagen, Naturstoffe, anorganische Bindemittel. Zweite, erweiterte und neubearbeitete Auflage. Stuttgart, Leipzig: Hirzel.
- KNOEPFLI, A.** (2002): Wandmalerei, Mosaik. [Nachdr.]. Stuttgart: Reclam (Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken, 2).
- KOLLER, M.** (2003): "Steinfarbe" und "Ziegelfarbe" in der Architektur und Skulptur vom 13.-19. Jahrhundert. Teil 1: Quellen und Befunde für Mittelalter und Neuzeit (1/S.32-38). Teil 2: Quellen und Befunde für Renaissance und Barock (2/S.123-129). Teil 3: Quellen und Befunde für das 19. Jahrhundert (3/S.188-193). In: Restauro, Jg. 2003, Ausgabe 1-3.
- KOLLER, M. / NIMMRICHTER, J. / PASCHINGER, H. / RICHARD, H.** (2000): Sacrificial layers for conservation of calcareous stone in Austria. Theory, practice and evaluation. In: Fassina, V. (Hg.): Proceedings of the 9th international congress on deterioration and conservation of stone, S. 903–913.
- KRAUS, K.** (2004): Kalkarten gestern und heute. In: Institut für Steinkonservierung Mainz (Hg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und morgen? IFS-Tagung 2004. 2. erweiterte Auflage. Mainz, DE (IFS-Bericht, Band 19), S. 1–14.
- KRAUS, K. / WISSER, S. / KNÖFEL, D.:** Über das Löschen von Kalk vor der Mitte des 18. Jahrhunderts - Literaturlauswertung und Laborversuche. In: Arbeitsblätter Heft 1, 1989, Gruppe 6, Stein, S. 206–221.
- KRISCHER, O. / KAST, W.** (1978): Trocknungstechnik, 1.Band. Die wissenschaftliche Grundlagen der Trocknungstechnik. 3., neubearb. Aufl. / v. W. Kast. Berlin [u.a.]: Springer.
- KRISCHER, O. / KAST, W.** (1992): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Korrigierter und erg. Nachdr. der 3., neubearb. Aufl. / von W. Kast. Deutschland: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- KRUS, M.** (1995): Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation. Betreut von K. Gertis. Stuttgart. Universität Stuttgart, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik.
- KÜHN, H.** (1984): Farbmittel, Buchmalerei, Tafel- und Leinwandmalerei. (aktuelle Ausgabe: 2002). Stuttgart: Reclam (Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken, 1).
- KÜHN, H.** (2002): Farbmittel, Buchmalerei, Tafel- und Leinwandmalerei. [Nachdr.]. Stuttgart: Reclam (Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken, 1).
- KÜNZEL, H.** (1982): Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. In: Bauphysik 4, Jg. 1982, Ausgabe 3, S. 101–107.
- KÜNZEL, H.** (1990): Ursachen der Gesteinsverwitterung In: Bautenschutz Bausanierung. Herausgegeben vom Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB. Online verfügbar unter <http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1988017124653>, zuletzt geprüft am 09.09.2010.
- KÜNZEL, H.** (1976): Beurteilung des Regenschutzes von Außenbeschichtungen (Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Band 18).

- KÜNZEL, H. M.** (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Betreut von K. Gertis. Stuttgart. Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- LAND SALZBURG, LANDESPRESSEBÜRO** (Hg.) (2010): Umweltschutz. Luftreinhaltung. Emmissionskataster-Schwefeldioxid. Online verfügbar unter <http://www.salzburg.gv.at/themen/nuw/umwelt/luftreinhaltung/semikat/semikat-schwefeldioxid.htm>, zuletzt aktualisiert am 12.03.2010.
- MANG, H. A. / HOFSTETTER, G.** (2000): Festigkeitslehre. Wien [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch : Technik).
- MASCHELEIN-KLEINER, L.** (1995): Ancient Binding Media, Varnishes and Adhesives. Translated by Bridgland, J./Walston, S./Werner, A.E. Rome: ICCROM.
- MEERWEIN, G. / MAHNKE, H. F. / RODECK, B.** (2007): Farbe - Kommunikation im Raum. 4. Aufl. Basel: Birkhäuser Verlag AG.
- MEYER, U.** (1993): Schlämmen für Natursteinmauerwerk. Anforderungen, Eigenschaften, Prüfverfahren, Applikation. In: Wittmann, F. (Hg.): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2. Tagungsbericht des 3. Internationalen Kolloquiums zum Thema Werkstoffwissenschaften und Bausanierung = Materials science and restoration. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verl. (Kontakt & Studium, 420), S. 1025–1035.
- NIMMRICHTER, J.** (2007): Farbfassungen an mittelalterlichen Kirchenportalen in Niederösterreich. In: Amt der NÖ Landesregierung, A. K. u. W. (Hg.): Denkmalpflege in Niederösterreich. Stein. St. Pölten (Band 38), S. 17f.
- ÖSTERREICHISCHES BUNDESDENKMALAMT** (2000): Mitteilungen zur Konservierung und Restaurierung. Stein - Blatt 7. Österreichisches Bundesdenkmalamt, Restaurierwerkstätten und Zentrallabor. Wien. Derzeit keine Auflage erhältlich (zurückgezogen).
- ÖSTERREICHISCHES BUNDESDENKMALAMT** (2001): Mitteilungen zur Konservierung und Restaurierung. Fassaden - Blatt 4. Österreichisches Bundesdenkmalamt, Restaurierwerkstätten und Zentrallabor. Wien. Derzeit keine Auflage erhältlich (zurückgezogen).
- PASCHINGER, H.** (1980): Fassadenanstriche. In: International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. (Hg.): Restauratorenblätter zum Thema Probleme und Konservierungstechniken in der Baudenkmalpflege. Klosterneuburg, Wien: M & C (Restauratorenblätter, 4), S. 99–108.
- PASCHINGER, H.** (2004): Kalkmörtel und Kalkfarbe in Österreich. In: Institut für Steinkonservierung Mainz (Hg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und morgen? IFS-Tagung 2004. 2. erweiterte Auflage. Mainz, DE (IFS-Bericht, Band 19), S. 27–30.
- PERNETY, A. J.** (1757): Dictionnaire Portatif De Peinture, Sculpture Et Gravure. Avec Un Traité Pratique Des Differentes Manieres De Peindre, Dont la Théorie est développée dans les Articles qui en sont susceptibles ... Paris: Bauche.
- PESCOLLER, M.** (1995): Anstrichsysteme und Ihre Ideologie. In: International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. (Hg.): Restauratorenblätter zum Thema Fassadenmalerei. Forschungsprojekt Eurocare 492 Muralpaint. Klosterneuburg, Wien: M & C (Restauratorenblätter, 16), S. 57–66.
- PHILIPPOT, P.** (1972): Die Wandmalerei. Entwicklung, Technik, Eigenart. Wien: Verlag Anton Schroll&Co
- REBER, F.** (2004): Vitruv: De architectura libri decem. Zehn Bücher über Architektur. Übersetzt und durch Anmerkungen und Zeichnungen erläutert von Dr. Franz Reber. Wiesbaden: Matrix Verlag GmbH

- REINSCH, D.** (1991): Natursteinkunde. Eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze ; 16 Tabellen. Stuttgart: Enke.
- REPUBLIK ÖSTERREICH**, Parlamentsdirektion (Hg.) (2011): Architektur und Geschichte des Parlamentsgebäudes. Das Äußere des Parlaments. Ein buntes Parlament? Online verfügbar unter <http://www.parlament.gv.at/GEBF/ARGE/PARLAUSZEN/BuntesParlament/>, zuletzt aktualisiert am 01.06.2011, zuletzt geprüft am 04.10.2011.
- ROHATSCH, A.** (2004): Verwitterung von Naturstein. In: Österreichische Bauzeitung, Jg. 2004, Ausgabe 19, S. 33–36.
- ROHATSCH, A.** (2010): St. Margarethener Kalksandstein. Herausgegeben von Wikipedia. Online verfügbar unter http://de.wikipedia.org/wiki/St._Margarethener_Kalksandstein, zuletzt geprüft am 28.10.2011.
- ROSE, D. A.** (1963): Water movement in porous materials. In: Brit. Journal Appl. Phys., Jg. 1963, Ausgabe 14-5, S. 256–262.
- RUSAM, H.** (2004): Anstriche und Beschichtungen im Bauwesen. Eigenschaften, Untergründe, Anwendung. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl.
- SCHIESSL, U.** (1989): Die deutschsprachige Literatur zu Werkstoffen und Techniken der Malerei von 1530 bis ca. 1950. Worms: Werner.
- SCHIEßL, U.** (1999): Polychrome Skulptur in Europa. Technologie, Konservierung, Restaurierung ; Tagungsbeiträge ; 11. - 13. November 1999. Dresden: Hochschule für Bildende Künste Dresden.
- SCHMIDT, H.** (1996): european activities in recreating a traditional material, University Aachen. In: Building Limes Forum and Historic Scotland (Hg.): The Historic Scotland International Lime conference, S. 23–25.
- SCHMITT, O.** (Hg.) (1937ff.): Reallexikon zur deutschen Kunstgeschichte.
- SCHNEIDER, U. / KNOBLAUCH, H.** (2006): Bauchemie. 6., neu bearb. u. erw. Aufl. Neuwied: Werner.
- SCHÖNBURG, K.** (2006): Historische Beschichtungstechniken. Erhalten und Bewahren. 2., überarb. Aufl. Berlin: Huss-Medien.
- SCHRAMM, H.-P. / HERING, B.** (1988): Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung. Lizenzaug. Graz: Akad. Dr.- u. Verl.-Anst.
- SCHUMANN, W.** (2007): Der große BLV Steine- und Mineralienführer. Mineralien, Erze, Edelsteine, Gesteine, Meteorite. 7., überarb. Aufl., Neuausg. München: BLV (Der zuverlässige Naturführer).
- SICKELS, L.-B.** (1981): Organic additives in mortars. In: Edinburgh Architecture Research, Bd. 8, S. 7–20.
- SNETHLAGE, R.** (2008): Leitfaden Steinkonservierung. Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. 3., überarb. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- SPAB (SOCIETY FOR THE PROTECTION OF ANCIENT BUILDINGS)** (2009): Technical Q&A 14 : Lime. Online verfügbar unter <http://www.spab.org.uk/advice/technical-qas/technical-qa-14-lime/>, zuletzt geprüft am 05.11.2011.
- STADLBAUER, K. / KÜNZEL, H. M.** (1999): Frostschäden im Winter - Analyse durch feuchtetechnische Berechnungen am Beispiel einer Kalksandsteinwand. IBP-Mitteilung Nr. 351. Herausgegeben von Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Online verfügbar unter http://www.ibp.fraunhofer.de/Images/351_tcm45-80607.pdf, zuletzt geprüft am 02.10.2011.
- STRACHEY, S.** (2006): Isle Abbots. Lime technology in the 21st century. Herausgegeben von Cathedral Communications Limited. Historic Churches. Online verfügbar unter <http://www.buildingconservation.com/articles/isleabbots/isleabbots.htm>, zuletzt geprüft am 06.11.2011.

- TARNAWSKI, A.** (1887): Kalk, Gyps, Cementkalk und Portland-Cement in Österreich-Ungarn. Wien: Teufen.
- THEUER, M.** (1912): Alberti, Leon Battista: Zehn Bücher über die Baukunst. Ins Deutsche übertragen eingeleitet und mit Anmerkungen und Zeichnungen versehen durch Max Theuer. Wien und Leipzig: Hugo Heller & Co.
- THOREL, F. / MARCOS, J.-P. / BAILLY, X. / ...** (2004): Amiens. La cathédrale en couleurs. Licht als Medium reversibler Rekonstruktion. Herausgegeben von Medienkunst und Forschung netzspannung.org. Online verfügbar unter <http://netzspannung.org/database/123787/de>, zuletzt geprüft am 09.12.2008.
- TORRACA, G.** (1996): lime technology in architectural conservation. In: Building Limes Forum and Historic Scotland (Hg.): The Historic Scotland International Lime conference, S. 34–41.
- TORRACA, G. / WEBER, J.** (1986): Poröse Baustoffe. Eine Materialkunde für die Denkmalpflege. International Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property. Wien: Verl. Der Apfel (Restaurierung, Konservierung, Technologie, Band 2).
- TRAUNINGER, D.** (2007): Beschichtungssysteme auf Natursteinoberflächen, gestern-heute-morgen, im Hinblick auf ihre physikalischen Eigenschaften und Auswirkungen. Diplomarbeit. Betreut von A. Rohatsch. Technische Universität Wien, Institut für Ingenieurgeologie.
- VANDAMME, E.** (1982): De polychromie van gotische houtsculptuur in de zuidelijke Nederlanden. Materialen en technieken. Univ., Diss. 1978--Leuven, 1978. Brussel: AWLSK (Verhandelingen van de Koninklijke Academie voor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België. Klasse der Schone Kunsten, 35).
- WEHLTE, K.** (1981): Werkstoffe und Techniken der Malerei. Mit einem Anhang über Farbenlehre ; ein Fachbuch. 4. Aufl. Ravensburg: Maier.
- WESTSCOTT, N. D. / MUIR, A. D.** (2003): Chemical Studies on the constituents of *Linum* spp. In: Westscott, N. D. / Muir, A. D. (Hg.): Flax; The Genus *Linum*, S. 55.
- WIKIPEDIA** (Hg.): Lein. Online verfügbar unter <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=92657676>.
- WINNEFELD, F. / BÖTTGER, G. K. / KNÖFEL, D.** (2001): Grundlegendes zur Dauerhaftigkeit historischer Kalkmörtel in Bezug auf Kalkspatzen, Proteine und Holzkohle. Quelle: Restauro, 2001. Herausgegeben von Baufachinformation.de. Fraunhofer IRB.
- WITTMANN, Folker** (Hg.) (1993): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil2. Tagungsbericht des 3. Internationalen Kolloquiums zum Thema Werkstoffwissenschaften und Bausanierung = Materials science and restoration. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verl. (Kontakt & Studium, 420).
- ZAMG: ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK, A. f. K.** (2002): Klimadaten von Österreich 1971-2000. Online verfügbar unter http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm, zuletzt geprüft am 14.01.2010.
- ZECH, K.** (1998): Charakterisierung der Witterungsbeständigkeit von Beschichtungen auf Kalk-Gips-Putzen. Diplomarbeit. Betreut von L. Goretzki. Bauhaus-Universität Weimar, Professur Bauchemie.
- ZEUGSWETTER, E.** (2008): Strukturelle Festigung von historischen Putzen. Diplomarbeit. Betreut von A. Rohatsch. Technische Universität Wien, Institut für Ingenieurgeologie.

NORMEN UND RICHTLINIEN

DIN 18363 (2010): VOB Vergabe und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Maler- und Lackierarbeiten - Beschichtungen.

DIN 52615 (1987): Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen (zurückgezogen und ersetzt durch EN ISO 12572).

DIN 52617 (1987): Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen (zurückgezogen und ersetzt durch EN ISO 15148).

DIN 53159 (1999): Bestimmung des Kreidungsgrades von Beschichtungen nach Kempf (aktuelle Version: Beschichtungsstoffe - Bestimmung des Kreidungsgrades von Beschichtungen nach Kempf, 2010).

DIN 55945 (2007): Beschichtungsstoffe und Beschichtungen – Ergänzende Begriffe zu DIN EN ISO 4618.

EN 459-1 (2010): Baukalk. Teil 1: Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien.

EN 1062-1 (2004): Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich. Teil 1: Einteilung (aktuelle Version: Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich. Teil 3: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit, 2008).

EN 1062-3 (2008): Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich. Teil 3: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit.

EN 12370 (1999): Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen.

EN 12371 (2010): Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung des Frostwiderstandes.

EN 14579 (2005): Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung.

EN ISO 4618 (2006): Beschichtungsstoffe - Begriffe.

EN ISO 4628-1 (2004): Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen - Teil 1: Allgemeine Einführung und Bewertungssystem.

EN ISO 4628-2 (2004): Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen - Teil 2: Bewertung des Blasengrades.

EN ISO 7783-2 (1999): Lacke und Anstrichstoffe. Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich. Teil 2: Bestimmung und Einteilung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte (Permeabilität).

EN ISO 7783 (2008, Normentwurf): Beschichtungsstoffe –Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit –Schalenverfahren.

ÖNORM B 2230-2 (2002): Malerarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 2: Beschichtung auf Mauerwerk, Putz, Beton und Leichtbauplatten.

8 ANHANG

8.1 ANHANG A – LITERATURRECHERCHE

8.1.1 Zusammenfassung vorhandener Forschungsarbeiten

Detaillierte Beschreibung der einzelnen Versuchsanordnungen

Wasserdurchlässigkeit, w-Werte

Bermoser(2008)

Ermittlung des w-Wertes gemäß EN 1062-3 (2008). Seitliche Versiegelung der Proben, die Wasseraufnahme erfolgte über die beschichtete Seite.

Prüfung gemäß Norm²⁸⁹: Die Probekörper wurden mit der beschichteten Seite in Wasser getaucht. Danach wurde mittels regelmäßiger Wägung die Massenzunahme bestimmt und daraus der w-Wert abgeleitet.

Dreuse/Nehring(2004)

Beurteilung gemäß EN 1062-3 (1999). Eintauchen der Probekörper in Wasser über die beschichtete Seite. Ermittlung des w-Wertes anhand der Bestimmung der Massenzunahme durch regelmäßige Wägung.

Zusätzliche Beurteilung der kapillaren Wasseraufnahme mittels dem Karstenschen Prüfröhrchen und die Hydrophobie mittels Bestimmung des Randwinkels (fotografische Dokumentation eines Wassertropfens auf der Oberfläche und Bestimmung des Randwinkels).

Boenkendorf/Degenkolb/Knöfel(1993), Blöchl-Wirts(2001), Brandes(1995), Ghaffari(2005), Herm(1997), Zech(1998)

Mittels Messung der kapillaren Wasseraufnahme lt. DIN 52617 (1987)

Die Prüfkörper werden seitlich versiegelt und mit der Grundfläche auf einen wassergetränktem Schaumstoff gesetzt. Es wird die Wassereindringzeit und –menge bestimmt. Daraus lässt sich der Wasseraufnahmekoeffizient ($[w\text{-Wert}] = \text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$) ermitteln.²⁹⁰

Anm. zu Herm(1997): Substrat = Prüfkörper aus Gotland-Sandstein, Original-Quader des 1639 errichteten und 1988 abgebauten Flüchtlingshof-Portals in Lübeck, mit Partikelstrahlverfahren gereinigt.

Anm. zu Blöchl-Wirts(2001): Zusätzlich erfolgte die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mittels Karstenschen Prüfröhrchens bei Beschichtungen an der Ziegelfassade der Kirche von Eilsaum.

Trauninger (2007)

Ermittlung der kapillaren Wasseraufnahme mittels dem Karstenschen Prüfröhrchen.

Dichte Anbringung, einer nach unten offenen Glocke, mit einer Prüffläche von $5,5\text{cm}^2$ und einem darauf aufgesetztem Glasrohr mit Messskala (Karstensches Prüfröhrchen)²⁹¹ an der Beschichtungsseite. Auffüllen des Röhrchens mit Wasser bis zur Nullmarke sowie zeitabhängige Erfassung der Wasseraufnahme des beschichteten Substrats. Anschließendes Ablesen des Absinkens des Wasserspiegels im Röhrchen und somit Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme / Zeiteinheit.

²⁸⁹ es wird im Forschungsbericht nur die Norm und nicht die konkrete Vorgehensweise angegeben.

²⁹⁰ Messablauf lt. DIN 52617 (1987)

²⁹¹ Karsten (1966), S.381

Wasserdampfdurchlässigkeit

Ghaffari (2005)

Bestimmung des Feuchtedurchganges: Kapillare Sättigung der Prüfkörper und anschließende Lagerung der Proben auf einem mit Wasser getränkten Schwamm (in einem abgedichteten Prüfbehälter situiert). Verdunstung konnte somit nur über die beschichtete Oberfläche stattfinden. Ermittlung der Massenabnahme in regelmäßigen Abständen bis zur Einstellung eines Gleichgewichtes. Ermittlung des flächenbezogenen Diffusionsstroms als Funktion der Zeit.

Boenkendorf/Degenkolb/Knöfel(1993), Blöchl-Wirts(2001), Brandes(1995), Dreuse/Nehring(2004), Herm(1997), Zech(1998)

Bestimmung der Wasserdampfdiffusion nach der sogenannten Wet-Cup-Methode

Herm(1997): Wet-Cup II Methode (100% LF im Gefäß/50% LF im Klimaraum) gemäß DIN 52615 (1987). Bei diesem Verfahren werden die beschichteten Prüfkörper in ein offenes Prüfgefäß eingebaut, so dass der Behälter mit der zu messenden Probe verschlossen wird. Das Prüfgefäß enthält entsalztes Wasser wodurch ein entsprechend feuchtes Innenraumklima geschaffen werden kann. Aufgrund der unterschiedlichen Wasserdampfdrücke zwischen den Klimabedingungen im Prüfgefäß und im Prüfraum entsteht ein Dampfdiffusionsstrom durch die Probekörper. Der Massenverlust der Prüfgefäße wird mittels periodischen Wägungen bestimmt, wodurch die Wasserdampfdiffusionsstromdichte im stationären Zustand ermittelt werden kann.

Boenkendorf/Degenkolb/Knöfel(1993): Wet cup gemäß DIN 52615 (1987)

Brandes(1995): Wet cup, jedoch mit Kaliumnitratlösung (93%/50% LF)

Dreuse/Nehring(2004): Wet-cup gemäß EN ISO 7783-2 (1999)

Blöchl-Wirts(2001), Zech(1998): Untersuchungen gemäß DIN 52615 (1987). Als Sorbens wird entionisiertes Wasser verwendet.

Austrocknungsverhalten

Bermoser(2008), Brandes(1995), Trauninger (2007)

Seitliche Versiegelung der Proben und anschließende kapillare Sättigung (Trauninger(2007): Wasserlagerung, Brandes(1995): Lagerung der Proben auf einem mit Wasser gesättigten Schwamm, Bermoser(2008): kapillare Sättigung über die beschichtete Seite). Anschließend Positionierung auf einem Kunststoffdeckel und regelmäßige Massenbestimmung. Ermittlung der Massenabnahme je Zeiteinheit sowie grafische Darstellung mittels einer Trocknungskurve.

Anm. zu Trauninger (2007): Zusätzliche Beurteilung des Kurzzeitaustrocknungsverhaltens (Trocknungsverlauf in den ersten 5 Stunden)

Blöchl-Wirts(2001)

Bestimmung des Trocknungsverlaufs (Feuchtigkeitsgehalt der Probe in Abhängigkeit der Zeit) sowie der Trocknungsgeschwindigkeit.

Versiegelung der, seitlich mit Epoxidharz abgedichteten und auf einem undurchlässigen PU-Untersatz gelagerten Prüfkörper mit einer Dichtmasse. Sättigung der Proben durch 12 stündige Wasserlagerung. Anschließend Lagerung im Klimaschrank bei 23°C und 50% rel.LF (Luftbewegung 1 m/s) und Ermittlung der Massenabgabe bis zu 14 Tage.

Zech(1998)

Bestimmung der Trocknungsgeschwindigkeit (nach Krischer/Kast (1992): Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des volumenbezogenen Wassergehaltes).

Kapillare Wasseraufnahme der Proben (24 Stunden) über einen mit Wasser gesättigten Schwamm. (vgl. Prüfung der Wasserdurchlässigkeit). Anschließend Lagerung im Klimaprüfschrank bei 20°C und 65% rel.LF. auf einer Folie und Ermittlung der Massenabgabe bis zu einer Dauer von 9 Tagen.

Beurteilung des Gesteinssubstrates nach Verwitterungseinwirkungen

Brandes (1995)

Beurteilung nach Verwitterung an einem speziellen Freibewitterungsprüfstand (45° Neigung, Süd-Exposition, angrenzend an Park mit üppiger Vegetation), 2 Jahre in der Innenstadt von Hannover. Anschließende Bewertung der Sulfatbelastung der Beschichtung inkl. des Substrats in 0-1cm Tiefe.

Blöchl-Wirts(2001)

Beurteilung nach Verwitterung an der Ziegelfassade der Kirche von Eilsam. Anschließende Bewertung der Salzverteilung (Na, Cl, K, Mg, NO₃, Ca, SO₄) im oberflächennahen Bereich (bis 1,5 cm unter der Oberfläche) unterhalb und oberhalb einer Horizontalsperre. In vorliegender Arbeit werden zur Vergleichbarkeit mit Brandes nur die Sulfatgehalte oberhalb der Horizontalsperre verglichen.²⁹²

Trauninger (2007)

Visuelle Beurteilung und Ultraschallmessung nach Verwitterungssimulationen im Labor (Salzkristallisation und Frost-Tauwechsel)

Salzbelastung / Salzschädigung der Beschichtung

Blöchl-Wirts(2001)

Beurteilung nach 2,5 jähriger Verwitterung an der Ziegelfassade der Kirche von Eilsam. Anschließende Bewertung der Salzaufnahmefähigkeit der Beschichtung sowie optische Beurteilung von Salzausblühungen.²⁹³ Vergleich von Kalkrezepturen, Dispersions-Silikatanstrichen und Silikonharzanstrich.

Brandes (1995)

Beurteilung nach Verwitterung an einem speziellen Freibewitterungsprüfstand (45° Neigung, Süd-Exposition, angrenzend an Park mit üppiger Vegetation) in der Innenstadt von Hannover. Bestimmung der Sulfatbelastung in der Beschichtung sowie Beurteilung der Salzausblühungen nach 2 jähriger Freibewitterung.

Trauninger (2007)

Durchführung von Verwitterungssimulationen im Labor mittels Salzkristallisationsuntersuchungen. Anschließende visuelle Beurteilung der Beschichtungen.

Anstrichschäden nach Bewitterung

Boenkendorf/Degenkolb/Knöfel(1993)

Beurteilung der Zerstörung nach 45 Frost-Tauwechsel von Mörtelproben (Prismen).

Bermoser(2008)

Untersuchung von Frost-Tauwechselbelastung im Labor. (Kapillare Wassersättigung der Proben von der unbeschichteten Rückseite, anschließende 14 stündige Lagerung der Probekörper bei ca. -20°C und nachfolgendes Auftauen in 10h bei Raumtemperatur. Dieser Frost-Tau-Wechsel wird 45 mal wiederholt.

²⁹² Eigeninterpretation auf Basis der Ergebnisse Blöchl-Wirts (2001), S.170. Vergleich folgender Rezepturen (Kalkbeschichtungen abweichend zu den in Tabelle 3-3 genannten Rezepturen): S1 (Schlämme) – Quarz- u. Schamottmehl, Billerbecker Kalk, Sumpfkalk, Pigmente = nachfolgend genannt als Kalkanstrich unmodifiziert; S4 (Schlämme) – Zusammensetzung wie S1, modifiziert mit Leinöl = nachfolgend genannt als Kalkanstrich + Leinöl; S14 – Dispersions-Silikatfarbe, S15 - Silikonharzanstrich

²⁹³ vgl. Ergebnisse Blöchl-Wirts (2001), Tabelle 2 und 5.

Blöchl-Wirts(2001)

Optische Beurteilung nach 2,5 jähriger Verwitterung an der Ziegelfassade der Kirche von Eilsum. Beurteilt wurde Absanden und Kreiden.²⁹⁴

Ghaffari (2005)

Beurteilung des Abriebs bzw. der Kreidung der Beschichtungen nach folgenden Verwitterungssimulationen im Labor:

- Feuchtebelastung
- UV-Strahlung
- Wärmestrahlung (Infrarotbestrahlung)
- kombinierte Belastungen aus Feuchte, UV-Strahlung und Wärmestrahlung
- Salzkontamination
- Biogene Besiedelung

Untersuchungen zur Salzkontamination bzw. zur biogenen Besiedelung wurden nur für diejenigen Anstrichsysteme durchgeführt, wo nicht schon vorher (durch Feuchte-, UV- und Temperaturbelastung) wesentliche Schäden festgestellt werden konnten.

Brandes (1995)

Beurteilung nach Verwitterung an einem speziellen Freibewitterungsprüfstand (45° Neigung, Süd-Exposition, angrenzend an einen Park mit üppiger Vegetation), 2 Jahre in der Innenstadt von Hannover.

Zusätzliche Durchführung von Bewitterungssimulationen:

- UV-Strahlung in Kombination mit Feuchteeinwirkung
- Wärmestrahlung
- Frost-/Tauwechsel
- Schwefeldioxid-Angriff/saurer Regen

Bei einem Teil der Prüfkörper erfolgte vor dem Beschichtungsauftrag eine Tränkung der Steinsubstrate mit unterschiedlichen Salzen (CaCl_2 , NaCl , Na_2SO_4). Anschließend erfolgte eine Wechselklima-Beanspruchung (10 mal im Wechsel) um eine wiederholte Kristallisation bzw. Hydratation der Salze zu erzeugen:

- 1 Woche Lagerung über Kieselgel (3%LF)
- 93%Luftfeuchte (um wiederholte Kristallisation bzw. Hydratation der Salze zu erzeugen)

Untersuchung folgender Parameter (u.a.) nach der Bewitterung:

- Ausblühungen
- Ablösen der Beschichtung
- Kreidung
- Rissbildung
- Blasenbildung

Separate Beurteilung dieser Parameter lt. EN ISO 4628-1 (2004) auf einer 10-teiligen Bewertungsskala (10 – hohe Schädigung, 0 – keine Schädigung) und anschließender Mittelung zu einem Gesamtschädigungsgrad.

Für nachfolgende Ergebnisauswertung wurde im Zweifelsfall den Kennwerten der Freibewitterungsversuche gegenüber den Werten der Bewitterungssimulationen der Vorzug gegeben.

²⁹⁴ Bei der optischen Beurteilung wurde in nachfolgender Vergleichsdarstellung auch ein mit Kasein modifizierter Kalkanstrich mit einbezogen, welcher nicht in Tabelle 3-3 genannt wurde (Sumpfkalk mit Kasein, Endlasur pigmentiert, 3-lagig).

Herm (1997)

Aufhängung von Gotlandsandsteinquader auf der Südfassade des Lübecker Rathauses. Beurteilung der Wetterbeständigkeit nach 11 Monaten (mittels Bestimmung des w-Wertes und visueller Prüfung).

Trauninger (2007)

Durchführung von folgenden Verwitterungssimulationen im Labor:

- Salzkristallisation
- Frost-Tauwechsel

Anschließende visuelle Beurteilung der Beschichtungen.

Zech (1998)

Durchführung von Frost-Tauwechseluntersuchungen. (Kapillare Sättigung der Proben und nachfolgend 15 Frost-Tau-Zyklen in wasserdichten Folienbeuteln). Aufbau der Zyklen: zweistündige Lagerung bei 20°C, nachfolgenden Abkühlung innerhalb von 3 Stunden auf -20°C, Konstant halten der 20°C in 2 Stunden, neuerlichen Aufwärmung innerhalb von 3h auf 20°.

Anschließende Beurteilung des Verbundes zwischen Beschichtungen und Untergrund mittels Gitterschnittprüfung.

KarbonatisierungBermoser(2008)

Überprüfung der Vollständigkeit der Karbonatisierung nach 28 Tagen mittels der Indikatorlösung Phenolphthalein. 1 Woche später erfolgte eine weitere Überprüfung mittels Phenolphthalein.

Herm (1997)

Quantitative Untersuchung der Kohlendioxidaufnahme aus der Luft. Dazu diente eine Apparatur in welcher die mit Zusätzen modifizierten Probekörper mit Luft umspült wurden und anschließend die verbrauchte Luft auf Änderungen in der CO₂-Konzentration gemessen und mit der unmodifizierten Sumpfkalkprobe verglichen wurde. Untersuchung der Beschichtung sowohl auf Glasschalen als auch auf Glasfritten zur Beurteilung der Substratbeeinflussung.

Paschinger (2004)

Ermittlung des verbleibenden Kalkhydrates im Anstrich. Je geringer die Kalkhydratkonzentration, desto höher ist der Karbonatisierungsgrad.

Abrieb, HaftzugfestigkeitBlöchl-Wirts(2001)

Rückschlüsse auf Basis der optischen Beurteilung durch den Autor (Blöchl-Wirts (2001), S.38) nach 2,5 jähriger Verwitterung an der Ziegelfassade der Kirche von Eilsum .

Brandes (1995)

Prüfung der Haftzugfestigkeit in Anlehnung an EN ISO 4624 durch einen Zugstempel mit Zweikomponenten-Klebstoff welcher auf die Beschichtung gedrückt und mit einer definierten Kraft wieder abgezogen wird.

Ghaffari (2005)

Ermittlung des Schälwiderstandes mittels Befestigung eines Klebestreifens auf die Anstrichoberfläche und anschließendem Abzug mittels Federwaage, wodurch die Haftzugfestigkeit (N/mm) bestimmt werden kann. Zusätzliche Überprüfung des prozentuellen Abriebs auf dem Prüfstreifen und Bestimmung eines Abrieffaktors. Dabei wurde bestimmt ob eine Entfernung des gesamten Anstriches inklusive Grundierung oder nur ein Ablösen der obersten Schicht durch den Klebestreifen erfolgte.

8.2 ANHANG B – IN DER LITERATUR GENANNT VERARBEITUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR KALKANSTRICHE

8.2.1 Literaturangaben

Name des Autors	Titel der Arbeit	Art der Arbeit	Kurzb.*
Wehlte, K.	Werkstoffe und Techniken der Malerei. Mit einem Anhang über Farbenlehre (1981)	Fachbuch	WEH
Bob Bennett	Awash with Colour. The Use of Limewash as a Decorative and Protective Coating (1997)	Artikel	BB
Essex County Council planning Dept.	Conservation in Practice: Plastering & Limewash. Advice on the maintenance on traditional houses and service buildings (1999)	Leitfaden (Broschüre)	ECC
österreichisches Bundesdenkmalamt	Mitteilungen zur Konservierung und Restaurierung. Stein - Blatt 7. Restaurierwerkstätten und Zentrallabor. (2000)	Mitteilungsblatt **	BDA
österreichisches Bundesdenkmalamt	Mitteilungen zur Konservierung und Restaurierung. Fassaden - Blatt 4. Restaurierwerkstätten und Zentrallabor. (2001)	Mitteilungsblatt**	BDA
österreichisches Bundesdenkmalamt	mündliche Übermittlung durch Hr. Mag. Johann Nimmrichter	Empfehlungen	BDA**
Trauninger, D.	Beschichtungssysteme auf Natursteinoberflächen, gestern-heute-morgen, im Hinblick auf ihre physikalischen Eigenschaften und Auswirkungen (2007)	Diplomarbeit	TRA
Brandes, Ch.	Anstriche und Beschichtungen für Bauwerke aus Naturstein. Eigenschaften, Anforderungen und praxisbezogene Anwendungen. (1999)	Praxishandbuch	BRA
Farrow & Ball	Product Advice. Limewash (2009)	Produkt-Ratschläge	F&B
Schönburg, K.	Historische Beschichtungstechniken. Erhalten und Bewahren. (2006)	Fach-/Lehrbuch	SCH
ÖNORM B 2230-2	Malerarbeiten – Beschichtungen auf Mauerwerk, Putz, Beton und Leichtbauplatten (2002)	Werkvertragsnorm	B2230
Brasholz, A.	Der Fassadenanstrich. Untergründe, Werkstoffe, Ausführungen (1984)	Fach-/Lehrbuch	BRS
Sally Strachey	Isle Abbots. Lime technology in the 21st century (2006)	Artikel	SS
SPAB (Society for the Protection of Ancient Buildings)	Technical Q&A 14: Lime; 18: Limewash (2009)	Richtlinie	SPA
Paschinger, H.	Kalkmörtel und Kalkfarbe in Österreich. In: Institut für Steinkonservierung Mainz (Hrg.): Kalkmörtel und Kalkfarbe. Gestern, heute ... und morgen? IFS-Tagung, Bericht Nr. 19 (2004)	Forschungsbericht	PAS
Rusam, H.	Anstriche und Beschichtungen im Bauwesen. Eigenschaften, Untergründe, Anwendungen. (2004)	Fach-/Lehrbuch	RUS
Homström, I.	the use of lime. In: The Building Limes Forum and Historic Scotland: Historic Scotland, International Lime Conference 1995. S.48-55 (1996)	Artikel	HOM

Tabelle 8-1: tabellarische Auflistung der untersuchten Literaturangaben

8.2.2 tabellarische Zusammenfassung

Nachfolgend werden die wesentlichsten Aussagen zu den Verarbeitungsempfehlungen der oben genannten Autoren tabellarisch aufgelistet.

	Autor	Verfahren	Erklärung
Sumpfdauer des Kalkes	WEH	Heißkalk (frisch gelöschter Kalk)	Erhöhung der Festigkeit
	BB	mindestens 3 Monate	
	ECC	mindestens 3 Monate	
	BDA	mind. 2 Jahre eingesumpfter Kalk	der Branntkalk wird von den Firmen bereits aufgemahlen zum Löschen eingesetzt. Dadurch ist der Kalk sehr homogen und enthält keine Kalkbrocken. Ein langsames Nachlöschen erübrigt sich somit, der Kalk erreicht früher seine optimale Qualität.
Vornässen	F&B	unbedingt Befeuchtung (Wasser darf nicht ablaufen)	ansonsten zu schnelle Trocknung, führt zu Zerrieselung
	BRA	gut Vornässen	
	SCH	ja	hohe Luftfeuchtigkeit → bessere Karbonatisierung (nur so kann sich Kohlensäure für Karbonatisierung bilden)
	BRA	ja	
	TRA	ja	
	BB	ja, jedoch sollte die Oberfläche feucht und nicht nass sein	
	F&B	ja	
	PAS	ja, jedoch nicht zu viel	Die Saugkraft des Untergrundes muss das Wasserrückhaltevermögen des Kalkhydrats übersteigen. Bei zu starkem Vornässen bleibt der Anstrich als lockeres Kalkhydratgel stehen und carbonatisiert in diesem Zustand, dadurch ist kein Kontakt mehr mit dem Untergrund gegeben.
	BDA	nein	a) Salzverschleppung bei historischen Oberflächenanstrich ist nicht mehr gegeben b) Saugvermögen des Untergrundes wird eingeschränkt → Kalkmilch kann nicht in Poren eindringen, Verbindung zwischen Oberfläche und Anstrich ist nicht mehr gegeben

	Autor	Verfahren	Erklärung
Untergrund- vorbehandlung	F&B	abbürsten und abwaschen. Schimmel muss vorab entfernt werden (mit Bleiche oder geeigneter Lösung)	
	BB	abbürsten und abwaschen.	
	SCH	a) Reinigung der Oberfläche b) Aufrauen von sehr glatten Oberflächen	Poren sollen freigelegt werden → besserer mechanischer Verbund
Voranstrich	SCH	mit Kalkkaseinwasser (Kaseinbindemittel:Wasser=1:20 oder 1:10) vorstreichen	chemischer Verbund soll aktiviert werden
	BRA	mit unpigmentierter, dünnflüssiger Kalkmilch	
	B2230	Grundanstrich: mit dünner Kalkmilch, ev, mit Leinölfirnis	Leinölfirnis: zur besseren Überstreichbarkeit
	BDA	mit Kalkmilch (1:5 mit reinem Wasser) 1-2fach, kreuzweise einmassieren	chemischer Verbund soll aktiviert werden
optimale Klimabedingungen	SCH	a) hohe Luftfeuchtigkeit b) Vermeidung von zu warmer Sonneneinstrahlung c) kein Frost	gute Karbonatisierung
	BB	niedrige Temperatur oder hohe relative Luftfeuchtigkeit	
	BDA	a) nur von April-September b) ideale Verarbeitungstemperatur von 10-20°C c) hohe Luftfeuchtigkeit	
Zeit zwischen dem Auftragen der einzelnen Schichten	BDA**	wenn der vorangegangene Anstrich speckig ist (nicht trocknen lassen!!)	
	F&B	vorige Schicht völlig trocknen lassen (über Nacht), vor dem Anbringen der nächsten Schicht vorige leicht befeuchten	
	ECC	jede Schicht muss trocknen, dann wird sie wieder befeuchtet (mittels Sprühnebel), bevor die nächste Schicht aufgetragen wird	
	RUS	Trockenzeiten zwischen den einzelnen Anstrichschichten	
	SPA	jede Schicht muss trocknen, dann wird sie wieder befeuchtet (dampened down), bevor die nächste Schicht aufgetragen wird	
	SCH	auf frischem Anstrich der noch alkalisch wirksam ist, zur chemischen Verbindung	zur chemischen Verbindung
		wenn sich der vorangegangene Anstrich nicht mehr aufreiben lässt (feucht auf feucht = frescaler Anstrich)	chemischer Verbund zwischen den Schichten soll aktiviert werden

	Autor	Verfahren	Erklärung
Nachbehandlung	SPA	befeuchten, darf nicht zu schnell trocknen	Erhöhung der Haftfestigkeit
	BDA	Nachnässen	um Luftfeuchtigkeit hoch zu halten → bessere Karbonatisierung (nur so kann sich Kohlensäure für Karbonatisierung bilden)
	PAS	Nachbesprühen	um Luftfeuchtigkeit hoch zu halten
	SCH	Nachnässen bzw. Vorhängen von angefeuchteten Tüchern	keine direkte Sonneneinstrahlung und zusätzliche Befeuchtung → bessere Karbonatisierung
	BRA	Vorhängen von angefeuchteten Tüchern	Anstrich darf nicht Austrocknen, da sonst die Karbonatisierung nicht vollständig stattfinden kann
Auftragen	F&B	gut in Risse und Fugen einarbeiten	
	BDA**	Einmassieren	
	BB	Einmassieren mit einer Bürste	
	ECC	Einmassieren (worked well into the surface)	
	SCH	Streichen mit biegesteifen Schweinsborsten	besserer mechanischer Verbund, Schweinsborsten werden nicht durch Alkalität des Kalkes angegriffen
Verdünnung mit Wasser	SCH	60-70Vol% Wasser, 30-40Vol% Kalkhydrateig	gute Verarbeitbarkeit, gute Karbonatisierung
	BB	so dünn als möglich (Konsistenz von Milch). Verdünnung mit Kalkwasser	Rissvermeidung, vollständige karbonatisierung
	SS	Konsistenz wie dünnflüssige Sahne	
	ECC	Konsistenz wie Magermilch	
	BDA	1:5 (16,6% Kalkhydrateig, 83,4% Wasser)	
Anzahl bzw. Dicke der Schichten	SCH	2-3 Anstriche, ev. Nachnässen (je nach Witterung)	gute Karbonatisierung und gute Verbindung mit dem Untergrund
	SPA	3-4 dünne Anstriche	
	BRS	4-5 dünne Anstriche	
	F&B	mind. 3-4 Schichten	
	ECC	mind. 3 Schichten, sehr dünn. 4-5 an exponierten Stellen, 5 od. 6 bei neuen Arbeiten	
	BB	mindestens 3 Schichten	
	RUS	4-6 Schichten	
	HOM	3 Schichten, bzw. bei reinem Kalk ohne Füllstoffe: 5-7	1. Schicht: adhesion coat, 2. Schicht: coarse coat, 3. Schicht finishing coat
	SS	mindestens 3 Schichten, einmassieren	
	B2230	3 Anstriche (Grundierung: dünne Kalkmilch, Zwischen- und Schlussbeschichtung: mit dünner Kalkfarbe, alkalibeständige Pigmente und Bindemittel können zugesetzt werden)	
	BRA	mehrere möglichst dünne Schichten. Deckender Anstrich: mind. 4-5 Farbaufträge	bessere Karbonatisierung durch dünne Schichten, um trotzdem Deckvermögen zu erhöhen mind. 4-5 Einzelanstriche
BDA	1-2 Voranstriche (Kalkmilch 1:5), 1 Schlußanstr. (Kalkmilch 1:5+0,5% Leinöl+Pigmente)		

Tabelle 8-2: Zusammenfassung der Aussagen ausgewählter Literaturangaben gemäß Tabelle 8-1

8.3 ANHANG C – VERGLEICH VON ANSTRICHEN DURCH VERSUCHE IM LABOR

8.3.1 Versuchsreihe B 3 – Wasseraufnahme (detaillierte Darstellung)

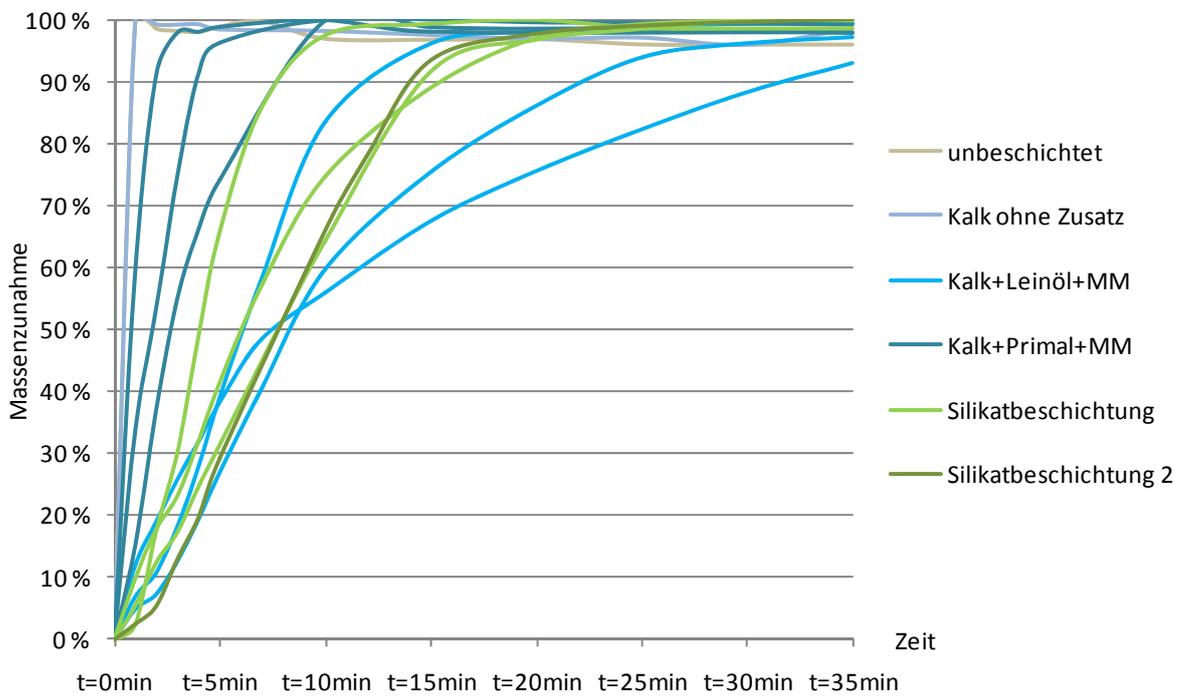


Abbildung 8-1: Darstellung der Wasseraufnahme der Silikat- und Kalkbeschichtungen, sowie der unbeschichteten Vergleichsprobe²⁹⁵

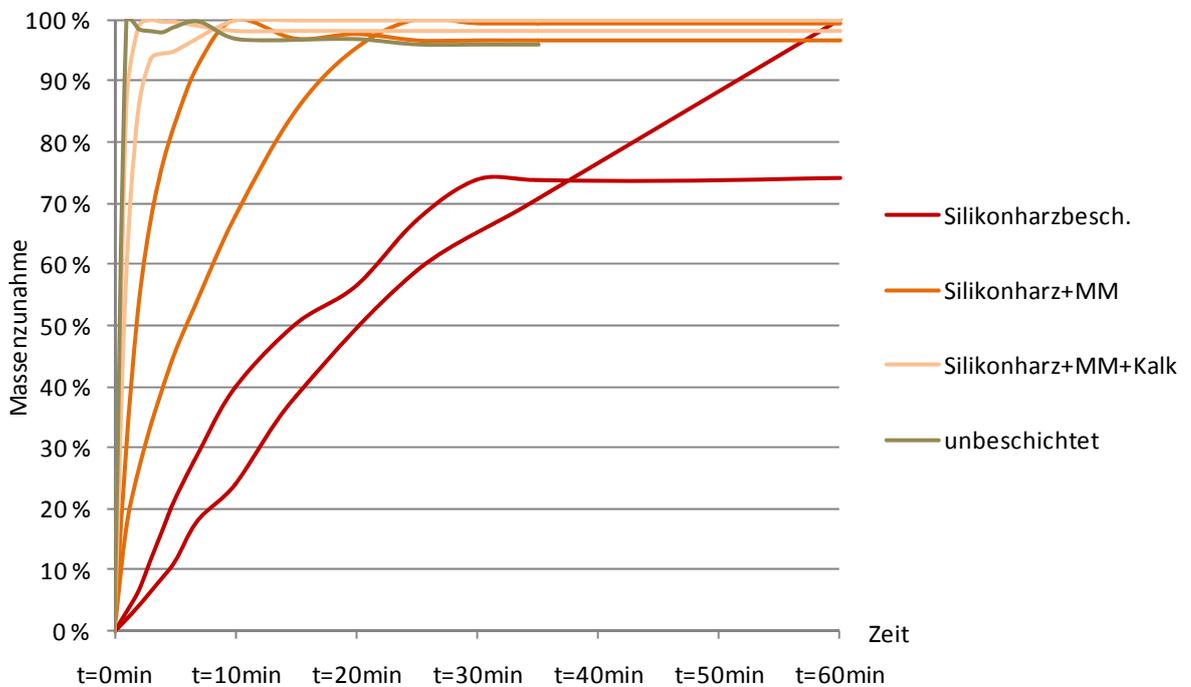


Abbildung 8-2: Darstellung der Wasseraufnahme der Silikonharzbeschichtungen, sowie der unbeschichteten Vergleichsprobe²⁹⁵

²⁹⁵ 100% = vollständige kapillare Sättigung der Probe

8.3.2 Versuchsreihe B6 – Austrocknungsgeschwindigkeit nach Frost-Tauwechselversuchen

Wasseraufnahmeverhalten

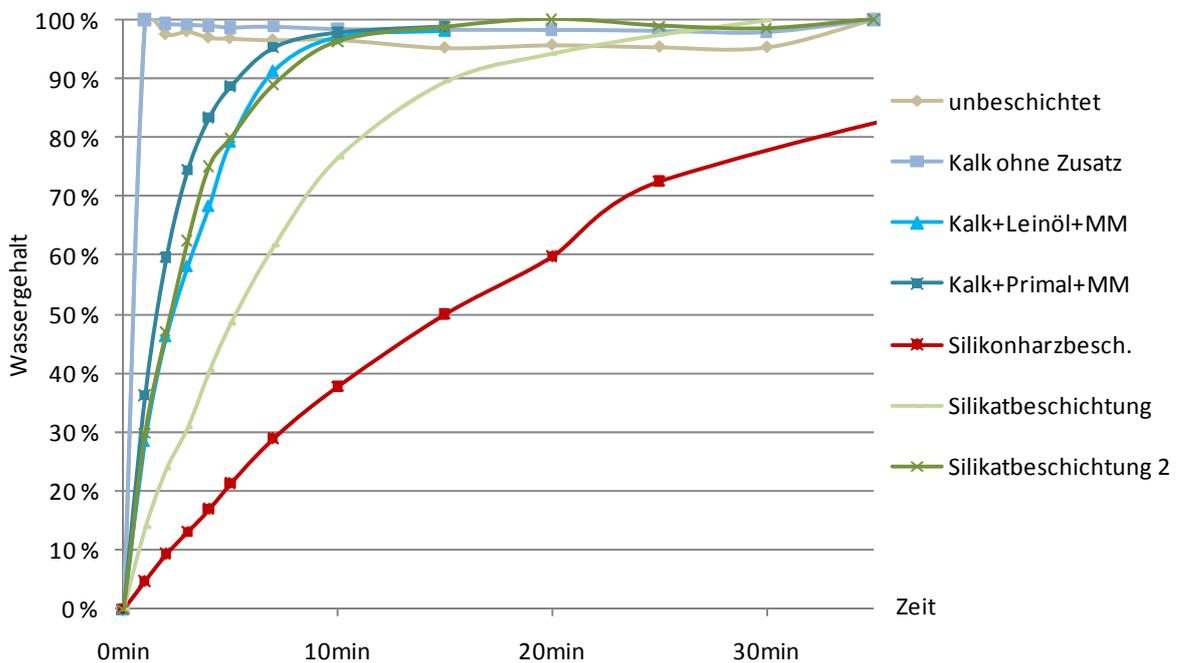


Abbildung 8-3: Darstellung des Wasseraufnahmeverhaltens als Funktion der Feuchtigkeitszunahme pro Zeiteinheit (Mittelwerte) im verwitterten Zustand (nach 25 Frost-Tauwechselzyklen) – nach neuerlicher Abdichtung des Randbereiches²⁹⁶

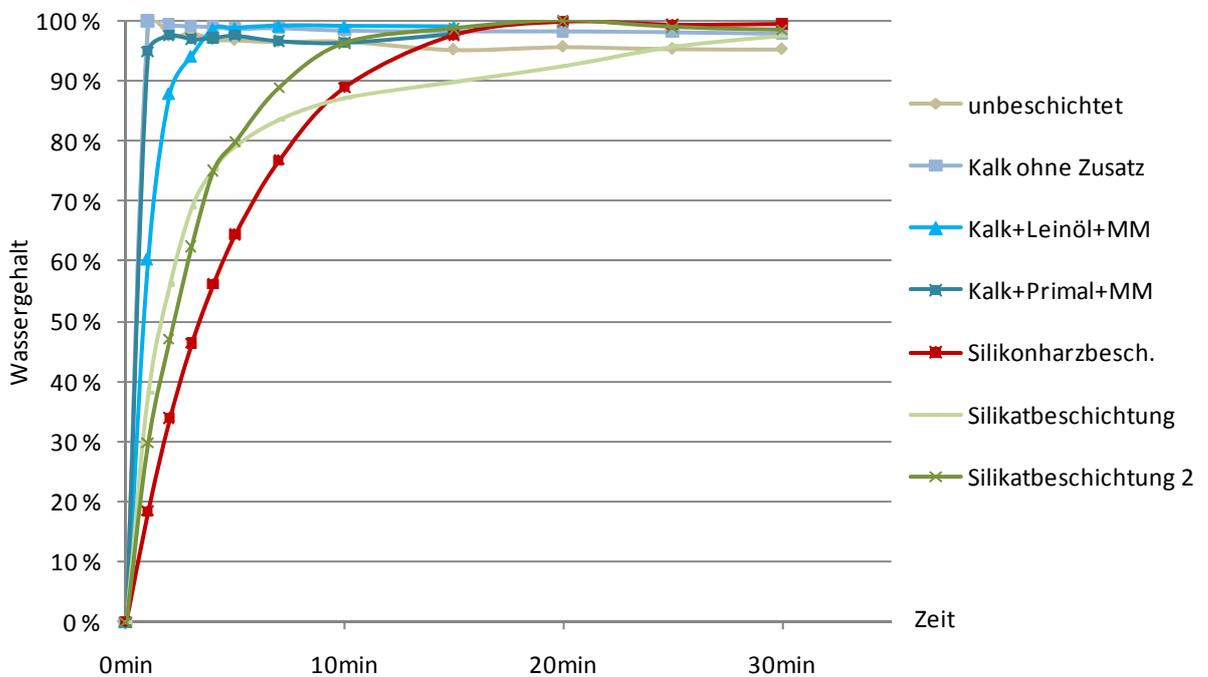


Abbildung 8-4: Darstellung des Wasseraufnahmeverhaltens als Funktion der Feuchtigkeitszunahme pro Zeiteinheit (Mittelwerte) im verwitterten Zustand (nach 25 Frost-Tauwechselzyklen) – Randabdichtung defekt²⁹⁶

²⁹⁶ 100% = vollständige kapillare Sättigung der Probe

8.3.3 Beurteilung des Schädigungsgrades der Beschichtungen und des Gesteinssubstrates

Beurteilungsgrundlagen

Beurteilung der Beschichtungsschäden

Die Blasenbildung wird nach Menge und Größe in Anlehnung an EN ISO 4628-1 (2004) sowie EN ISO 4628-2 (2004) nach einer Bewertungsskala von 1 bis 5 folgendermaßen bewertet:

1. Kennwerte zum Bewerten der Menge von Schäden:

- 0** – keine, d.h. keine erkennbaren Schäden
- 1** – sehr wenige, d.h. kleine, gerade noch signifikante Anzahl von Schäden
- 2** – wenige, d.h. kleine aber signifikante Anzahl von Schäden
- 3** – mäßig viele Schäden
- 4** – Schäden in beträchtlicher Anzahl
- 5** – sehr viele Schäden

2. Kennwerte zum Bewerten der Größe der Schäden

- 0** – nicht sichtbar bei 10facher Vergrößerung
- 1** – nicht sichtbar bei bis zu 10facher Vergrößerung
- 2** – gerade sichtbar mit bloßem Auge (auf Normalsichtigkeit korrigiertes Sehvermögen)
- 3** – deutlich sichtbar mit bloßem Auge (bis zu 0,5 mm)
- 4** – Bereich 0,5 mm bis 5 mm
- 5** – größer als 5 mm

Zur Beurteilung der Haftung, Ablösung und Rissbildung der Beschichtung werden lose Beschichtungsreste und Salzausblühungen mit dem Pinsel entfernt und darauf folgend die beschichteten Probekörper einer intensiven Reinigung mit Wasser in einem Ultraschallreinigungsgerät unterzogen. Danach wird das Ablösen der Beschichtung sowie die Haftung bzw. Verbindung zum Untergrund und die Rissbildung auf einer 5 teiligen Bewertungsskala folgendermaßen beurteilt:

- 0** – Die Haftung aller Beschichtungsschichten ist auch nach einer intensiven Reinigung intakt (äquivalent zur Situation vor Verwitterungssimulation). Auch im Rasterelektronenmikroskop ist eine klare Verbindung des Substrats und der Beschichtung erkennbar. Es sind keine Risse der Beschichtung im REM erkennbar.
- 1** – Durch eine intensive Reinigung lösen sich die obersten Schichten des Anstriches ab. Die Haftung der übrigen Anstrichschichten ist größtenteils intakt (äquivalent zur Situation vor Verwitterungssimulation). Auch im Rasterelektronenmikroskop ist eine klare Verbindung des Substrats und der Beschichtung erkennbar. Es sind keine Risse der Beschichtung im REM erkennbar, an keiner Stelle löst sich die Beschichtung bis zum Untergrund ab.
- 2** – Durch eine intensive Reinigung lösen sich die obersten Schichten vom Untergrund ab. Die Haftung der übrigen Anstrichschichten ist größtenteils intakt (wie bei 1). Es sind Risse im Beschichtungsgefüge erkennbar und /oder findet eine teilweise Ablösung der Beschichtung bis zum Untergrund statt (Größe der abgelösten Fläche bis 20% des Flächenanteils).
- 3** – Im REM wird ersichtlich, dass sich die Beschichtung klar vom Untergrund abhebt und/oder die Beschichtung löst sich nach einer intensiven Reinigung größtenteils bis zum Untergrund ab (Größe der abgelösten bzw. „abgehobenen“ Fläche mehr als 50% des Flächenanteils).
- 4** – Die Beschichtung löst sich bereits durch die mechanische Reinigung mit dem Pinsel zu einem großen Teil vom Untergrund ab.
- 5** – Die Beschichtung löst sich auch ohne Reinigungsmaßnahmen vom Untergrund ab.

Beurteilung der Salzausblühungen und Verkrustungen

Die Salzausblühungen und die mit den Salzen einhergehenden Verkrustungen an der Oberfläche werden auf einer 5 teiligen Bewertungsskala folgendermaßen beurteilt:

- 0** – keine Salzausblühungen und keine Verkrustungen der Oberfläche
- 1** – geringe Salzausblühungen an der Oberfläche die jedoch mit dem Pinsel ablösbar sind, darunter ist die Beschichtung intakt
- 2** – Salzausblühungen an der Oberfläche die teilweise verkrustet sind, größtenteils aber bereits schwerer mit dem Pinsel abnehmbar als bei 1. Darunter ist die Beschichtung intakt.
- 3** – Salzausblühungen an der Oberfläche die teilweise verkrustet sind, nur mehr geringfügig abnehmbar. Darunter ist die Beschichtung intakt.
- 4** – massive Salzverkrustung an der Oberfläche, die mit dem Pinsel nur mehr schwer ablösbar sind. Ein Ablösen der Salzkrusten führt auch zu einem Ablösen der Beschichtung.
- 5** – massive Salzverkrustungen an der Oberfläche, die größtenteils auch nach einer intensiven Reinigung mit Wasser nicht mehr ablösbar sind. Ein Ablösen der Salzkrusten führt auch zu einer Ablösung der Beschichtung.

Schädigungsgrad der Gesteinssubstanz

Die Gefügezerstörung wird auf einer 5 teiligen Bewertungsskala folgendermaßen beurteilt:

- 0** – keine sichtbare Zerstörung
- 1** – leichte, mit freiem Auge sichtbare, Aufrauhung der Oberfläche. Beim Ritzen mit dem Nagel ist eine leichte Mürbung der Substanz direkt unterhalb der Beschichtung (bis ca. 1mm) erkennbar. Keine Schädigung des Substrats im REM erkennbar.
- 2** – Schädigung des Substrats ist im REM deutlich sichtbar und kann mit Ultraschallmessungen bestätigt werden
- 3** – Schädigung des Substrats ist auch mit freiem Auge gut erkennbar (Ablösung kleiner Fragmente, Rissbildung, ...)
- 4** – Probekörper ist mit großen Rissen und/oder Löchern versehen
- 5** – Probekörper zerfällt in Stücke

Auswertung

	Zerstörungsgrad der Beschichtung			Mittelwert: Zerstörungsgrad der Beschichtung	Intensität d. Salzausblühungen & Verkrustungen	Schädigungsgrad der Gesteinssubstanz
	Blasen- bildung, Größe	Blasen- bildung, Menge	Ablösen bzw. Abheben der Beschichtung*			
nach 6 Salz- kristallisations- zyklen						
unbeschichtet	-	-	-	-	3	1
Kalk ohne Zusatz	4	3	2	3,0	3	0
Kalk+Leinöl	5	5	1	3,7	1	0
Kalk+Primal	5	4	2	3,7	5	1
Silikonharzbesch.	2	5	3	3,3	5	1
Silikatbesch.	3	5	1	3,0	2	1
Silikatbesch. 2	5	4	2	3,7	4	1

*nach intensiver Reinigung

Abbildung 8-5: Darstellung des Schädigungsgrade der Beschichtung sowie des Gesteinssubstrates nach Salzkristallisationsversuchen (16 Salzkristallisationszyklen)

8.4 ANHANG D – PRODUKTDATENBLÄTTER

Baunit SanovaSumpfkalk 1, 3, 6



Produkt	Baunit SanovaSumpfkalk 1, 3, 6 wird aus feinstgemahlenem, gasgebranntem, schwefelfreiem Branntkalk, Kalkteig, Stückkalk, etc, der in Großlöschtrommeln mit genau dosierten Warmwassermengen verrührt und zur kontrollierten Ablösung gebracht wird, hergestellt. Die daraus gewonnene Kalkmilch wird in ein frostsicheres Grubensystem abgepumpt und eingedickt. Baunit SanovaSumpfkalk wird gelöscht und mind. 1, 3 oder 6 Jahre abgelagert.	
Zusammensetzung	Weißkalkhydrat (CL90-S), Ca(OH)_2 , Wasser	
Eigenschaften	Durch den fabrikmäßigen, fertig abgelöschten Baunit SanovaSumpfkalk 1, 3, 6 erhält man ein garantiert treibfreies Bindemittel. Sumpfkalkmörtel sind nach kurzer Aushärtungszeit formbeständig, bleiben jedoch elastisch, wodurch sie ihre ausgezeichnete Haftung und Haltbarkeit erhalten. Bei Bedarf kann durch Beimischen von Zement oder hydraulischem Bindemittel Mörtel mit hoher Festigkeit hergestellt werden. Durch Beimischung von Baunit Trass kann ein Mörtel mit erhöhter Plastizität hergestellt und die Ausblühneigung reduziert werden.	
Anwendung	Baunit SanovaSumpfkalk findet Verwendung: <ul style="list-style-type: none">- als Baukalk zur Mörtelherstellung für Innen- und Außenputzherstellung- für hochwertige Farbmischungen (Anstriche)- für Kalkanstriche (Weißigen)	
Technische Daten	Chemische Formel:	Ca(OH)_2 in Wasser
	Festkörpergehalt:	ca. 40 %
	Teigdichte:	ca. 1.300 kg/m ³ abgelagerter gelöschter Weißkalk gem. ÖNORM EN 459-1
	Materialbedarf:	für Anstriche ca. 0,3 kg/m ² (3 mal gestrichen) für Mörtel und Putze: je nach Mischungsverhältnis
Einstufung lt. Chemikaliengesetz	Xi: reizend, enthält Kalkhydrat Ca(OH)_2 Weitere Informationen entnehmen Sie dem Sicherheitsdatenblatt Baunit SanovaSumpfkalk.	
Lagerung	Trocken und frostfrei lagern. Geöffneten Gebinden Wasser zugeben.	
Qualitätssicherung	Eigenüberwachung durch unsere Werkslabors, Fremdüberwachung durch akkreditierte Prüfanstalten gemäß ÖNORM EN 459 – 1 und 2.	
Lieferform	Kübel: 20 kg Fass 250 kg	

Untergrund

Für die Untergrundvorbehandlung gelten die einschlägigen Regeln und Normen. Für die Verarbeitung baustellengemischter Mörtel sind die ÖNORMEN B 2206 (Mauer- und Versetzarbeiten) und B 2210 (Verputzarbeiten) maßgebend. Die Putzgrundprüfung hat nach den Richtlinien der ÖNORM B 3346 zu erfolgen. Der Untergrund muss sauber, trocken, frostfrei, staubfrei, nicht wasserabweisend, frei von Ausblühungen, tragfähig, und frei von losen Teilen sein.

Verarbeitung

Baumit SanovaSumpfkalk wird mit sauberem, gemischtkörnigem Sand und der entsprechenden Wassermenge, allenfalls unter Zugabe von Zement, nach den unten angeführten Mischungsverhältnissen, oder nach ÖNORM B 3344, in der jeweils erforderlichen Konsistenz, angemischt.

Mischungsverhältnisse (Richtwerte):

	Raumteile			ca. kg/m ³ Materialbedarf	
	Kalk	Zement	Sand	Sumpfkalk	Zement
Mauermörtel:					
Kalkmörtel	1	-	3	280	-
Mörtelgruppe lt. ÖNORM EN 998-2					
- M2,5 (Mauermörtel für mittl. Ansprüche)	2	1	8	210	155
- M5 (Mauermörtel für höhere Ansprüche)	1	1	6	150	205
Putzmörtel:					
Kalkmörtel	1	-	3 - 4	280 - 210	-
Kalkzementmörtel	2	1	9 - 11	180 - 150	135 - 110

*) Die Mischungsverhältnisse sind unter der Voraussetzung erstellt, dass insbesondere für Mauermörtel der Mörtelgruppe M5 saubere, gewaschene Sande verwendet werden.

Mauermörtel:

Mit Baumit SanovaSumpfkalk hergestellte Mauermörtel müssen bei allen üblichen Mauersteinen vollflächig aufgebracht werden.

Putzmörtel:

Das zu verputzende Mauerwerk muss vollflächig vorgespritzt (z.B. Baumit VorSpritzer) sein. Die Standzeit ist vom Mauerwerk abhängig. Vor Aufbringen der Putzfatschen ist der Untergrund entsprechend vorzunässen. Die händische Verarbeitung erfolgt durch Anwerfen mit einer Kelle in einer Putzdicke bis 2 cm. Bei größeren Putzdicken in mehreren Arbeitsschritten frisch in frisch arbeiten. Als Grobputz wird Mörtel nur mit einer vorgehängten Latte abgezogen und zugestoßen, nicht jedoch verrieben. Als Feinputz - mit geeignetem Reibbrett verreiben.

Verarbeitung als Anstrich:

Der Untergrund muss sauber und staubfrei sein, etwaige Verunreinigungen abwaschen. Alte, festsitzende Kalkanstriche reinigen und Leimfarben gründlich abwaschen. Auf Ölfarben, Dispersion- und Silikatputzen und -farben sowie Emulsionsgrund kann Kalkanstrich nicht gestrichen werden. 1 Teil Baumit SanovaSumpfkalk und 2 Teile Wasser gründlich aufrühren.

Mit Erdfarben oder alkalifesten Farben abtönen (bis max. 10 % des Kalkgewichtes, Farbstoffe mit Wasser oder Kalkmilch anteigen). Zur Verbesserung der Bindekraft kann bis zu 1,5 % Leinölfirnis eingerührt werden.

Der Untergrund ist je nach Erfordernissen gründlich vorzunässen. Die Kalkmilch mit einer feinen Malerbürste gleichmäßig in 2 – 3 Anstrichen aufstreichen. Der Erstanstrich soll als Grundierung wässrig aufgebracht werden. Die Deckkraft entsteht erst nach dem Austrocknen.

Hinweise und Allgemeines

Die Luft, Material- und Untergrundtemperatur muss während der Verarbeitung und des Abbindevorganges über +5°C liegen.
Frische Putzflächen mind. 2 Tage feucht halten.
Vor jeder weiteren Beschichtung ist eine Standzeit von mind. 10 Tagen je cm Putzdicke einzuhalten.

Endbeschichtungen:

Auf Grobputz aus Putzmörtel aus Baunit SanovaSumpfkalk:
Baunit EdelPutz und ggf. Baunit UniversalGrund

Auf Feinputz aus Putzmörtel aus Baunit SanovaSumpfkalk:
Baunit SilikatPutz und UniversalGrund
Baunit SilikatFarbe und Baunit UniversalGrund
Baunit GranoporPutz und UniversalGrund
Baunit NanoporPutz und UniversalGrund
Baunit GranoporFarbe
Baunit SilikonPutz und UniversalGrund
Baunit SilikonFarbe
Baunit EdelPutz Extra und Baunit UniversalGrund

Vorsicht! Alkalisches reizend. Sicherheitshandschuhe tragen, Haut und Augen schützen. Spritzer sofort abwaschen. Bei Kontakt mit Augen oder Mund mit viel reinem Wasser spülen, sofort Arzt aufsuchen. Sicherheitsdatenblatt anfordern!



Technisches Merkblatt
Artikelnummer 0630 / 0634

Silikatfarbe D

Einkomponentige Dispersions-Silikatfarbe

Anwendungsgebiete

Als deckender Schlammstrich für alle unbeschichteten, lufttrockenen Putzarten, wie Kalk-, Kalkzement- und Zementputz, Beton- und Kalksandsteinsichtmauerwerk, Beton und Faserzement.

Remmers Silikatfarbe D ist für Renovierungsanstriche alter Silikat-, Kalk- und Zementfarbeschichtungen geeignet. Nicht auf eisen- und manganhaltigen Natursteinoberflächen applizieren, kann zu Ausblühungen (Rostfahnen) führen.

Produkteigenschaften

Streichfertige, einkomponentige Silikatfarbe mit hoher Wasserdampf- und CO₂-Durchlässigkeit.

- keine Carbonatisierungsbremse
- gute Dichtigkeit gegen flüssiges Wasser (Schlagregen und Spritzwasser)
- keine Quellerscheinungen
- optimale Haftfestigkeit auf mineralischem Untergrund durch Reaktion mit der Luftkohlendensäure zu einem amorphen, glasartigen Silikatgerüst
- fleckenfreies Aufdrehen
- als Renovierungsanstrich auf alten Mineralfarbeschichtungen

Produktkenndaten

Produktkenndaten im Anlieferungszustand

Bindemittel:	Kaliumsilikate mit organischen Stabilisatoren gemäß DIN 18363, VOB Teil C
Pigmente:	lichtechte, alkalibeständige Oxidpigmente
Dichte:	1,40 g/cm ³
Viskosität:	thixotrop
Verdünnungsmedium:	Silikat Grundierung D
pH-Wert:	12 - 13
Farbtöne:	weiß (Art.-Nr. 0630) und die Aufhellstufen 4, 5 und 6 der Remmers Farbtonkollektion, weitere Farbtöne auf Anfrage (Art.-Nr. 0634)

Produktkenndaten der Beschichtung:

Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN 52615:	sd ≤ 0,04 m
Wasseraufnahmekoeffizient nach DIN 52617 :	w ≤ 0,20 kg/m ² *h ^{0,5}
Wasserdampfdurchlässigkeit in %:	> 95
Glanzgrad:	matt
Oberflächenstruktur:	quarzitisch
Haftung auf mineralischen, unbehandelten Untergründen:	sehr gut
Witterungsbeständigkeit:	sehr gut
UV-Beständigkeit:	sehr gut
Quellung:	keine

Untergrund

Die Untergründe müssen tragfähig, frei von Verschmutzungen, Bewuchs (Algen, Moose), Rissen und trennenden Substanzen sein.

Grundierung:

Es wird mit Silikat Grundierung D von unten nach oben gearbeitet, um die Saugfähigkeit des Untergrundes herabzusetzen und eine gewisse Hydrophobie des Untergrundes zu erreichen.

Alte kreidende Silikatbeschichtungen zweimal (nass in Nass) mit der Silikat Grundierung D grundieren.

Zwischenanstrich:

Remmers Silikatfarbe D auf die trockene, grundierte Fläche gleichmäßig applizieren (kann mit bis zu 5 % Silikat Grundierung D verdünnt werden)

Deckanstrich:

Remmers Silikatfarbe D auf die getrocknete Zwischenbeschichtung gleichmäßig applizieren (kann mit bis zu 5 % Silikat Grundierung D verdünnt werden)

Zwischen jeder Beschichtung ist eine Mindest-Trocken- und Reaktionszeit von 12 Stunden einzuhalten.

Die Verarbeitung erfolgt in allen Fällen nach den Regeln der Anstrichtechnik, VOB Teil C, DIN 18363.

Spachtelmasse:

Für Spachtelarbeiten wird Silikatfarbe D mit Quarzsand (Körnung 0,1 - 0,4 mm) bis zur spachtelfähigen Konsistenz aufgefüllt. Mischungsverhältnis Silikatfarbe D zu Quarzsand ca. 1 : 2.

Hinweise

Zum Nachnuancieren können handelsübliche Silikat, Voll- und Abtönfarben bis maximal 2 % verwendet werden.

Nicht bei direkter Sonneneinstrahlung, Regen und Objekttemperaturen unter + 5 °C und über + 25 °C verarbeiten.

Dunkle und intensive Farbtöne können leicht scheckig aufdrocknen, daher zweckmäßig nur Pastelltöne verwenden. Je dicker die Farbschicht, je heller trocknet der Farbton auf.

Vorstehende Angaben wurden aus unserem Herstellerbereich nach dem neuesten Stand der Entwicklung und Anwendungstechnik zusammengestellt.

Da Anwendung und Verarbeitung außerhalb unseres Einflusses liegen, kann aus dem Inhalt des Merkblattes keine Haftung des Herstellers abgeleitet werden. Über den Inhalt des Merkblattes hinausgehende oder abweichende Angaben bedürfen der schriftlichen Bestätigung durch das Stammwerk.

Es gelten in jedem Fall unsere allgemeinen Geschäftsbedingungen. Mit Herausgabe dieses technischen Merkblattes verlieren vorangegangene ihre Gültigkeit.

Nicht mit anderen Erzeugnissen mischen. Bis zur genügenden Durchhärtung (1 Tag) vor Regenauswaschungen schützen. Augen schützen und angrenzende Flächen abdecken.

Ungeeignete Untergründe:

Natursteine mit Eisen und Manganeinschlüssen, Gips, Gipsputz, Gipskartonplatten, Holz und Holzwerkstoffe, Eisen- und Stahlteile, Dispersions-, Polymerisat-, Öl- und Lackfarbenanstriche sowie feuchte Untergründe.

Für waagerechte Flächen nicht geeignet.

Arbeitsgeräte, Reinigung

Flächenstreicher, Deckenbürsten, Pinsel und Lammfellrolle.

Pinsel und Geräte lassen sich im frischen Zustand mit Wasser reinigen.

Lieferform, Verbrauch, Lagerung

Lieferform:

Kunststoffgebinde 15 l

Verbrauch:

Grundierung:

ca. 0,2 - 0,3 l/m² Silikat Grundierung D je nach Saugfähigkeit des Untergrundes

Zwischenanstrich:

0,2 l/m² Silikatfarbe D /Kalksandstein glatt
0,3 l/m² Silikatfarbe D /Kalksandstein rau

Deckanstrich:

0,2 l/m² Silikatfarbe D /Kalksandstein glatt
0,3 l/m² Silikatfarbe D /Kalksandstein rau

Lagerung:

Im ungeöffneten Originalgebinde und frostfreier Lagerung mind. 6 Monate lagerfähig.

Sicherheit, Ökologie, Entsorgung

Nähere Informationen zur Sicherheit bei Transport, Lagerung und Umgang sowie zur Entsorgung und Ökologie können dem aktuellen Sicherheitsdatenblatt entnommen werden.

Produkt-Code
M-SK01





Technisches Merkblatt Artikelnummer 6471

Historic Schlammiasur

Feinsandige, halblasierende Schlämme auf Basis natürlicher Inhaltsstoffe.

Zur Erstellung von rauhen Lasuranstrichen unter Beibehalt der natürlich-mineralischen, farblichen und plastischen Untergrund-Optik.

Anwendungsgebiete

Remmers Historic Schlammiasur eignet sich aufgrund seiner Produktkenndaten als wasserabweisende, wasserdampfdurchlässige Beschichtung für raue Lasuranstriche auf mineralischen Baustoffen, z. B. auf Natursteinen und Putzen. Auch als füllender, lasierender Zwischenanstrich zur Egalisierung von unterschiedlichen Rauigkeiten und (Mikro-)Rissen geeignet. Zur Überarbeitung von plastischen, thermoplastischen und elastischen Anstrichsystemen nicht geeignet. Diese Systeme sind vorher mit Remmers Graffiti Entferner vollständig zu entfernen.

Produkteigenschaften

Historic Schlammiasur wurde primär für denkmalgeschützte Objekte, vor allem im Bereich "Naturstein" konzipiert.

Das Produkt zeichnet sich durch eine geringe Deckkraft unter Beibehalt eines real beschichtenden Charakters aus, was somit zwei Eigenschaften / Vorteile zur Folge hat:

- a) Da das Farbsystem auf der Oberfläche aufliegt, wird der Aufbau der hydrophoben Wirkung auf der Oberfläche und nicht in der Tiefe des behandelten Untergrundes erzielt. Somit ermöglicht Historic

Produktkenndaten

Bindemittel:	siliciumorganisch vergütete Co-polymere
Pigmente:	anorganische, alkalibeständige, absolut lichtechte Oxidpigmente TiO ₂ -frei
Füllstoffe:	anorganisch, rein mineralisch, teilweise feinsandig
Dichte:	ca. 1,4 g/cm ³ , je nach Farbton
Viskosität:	roll- und streichfähig
pH-Wert:	8 - 9

Produktkenndaten der Beschichtung:

Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN 52615:	s _d -Wert: < 0,25
Materialaufwand von 250 ml/m ² entspricht:	ca. 180 µm Trockenschicht
Wasseraufnahmekoeffizient nach DIN 52617:	w-Wert: < 0,1 kg/m ² * h ^{0,5}
Glanzgrad:	matt, mineralischer Charakter, feinsandige, raue Struktur sehr gut
Witterungsbeständigkeit:	
Farbtöne:	
Art.-Nr.: 6470	unpigmentiert (farblos)
Art.-Nr.: 6471	Sonderfarbtöne (Erscheinungsbild untergrundabhängig!)

Schlammiasur den Aufbau einer Wasserabweisung auch auf solchen mineralischen Untergründen, bei denen die Behandlung mittels einer in die Tiefe eingetragenen, hydrophobierenden Imprägnierung mit negativen Begleiterscheinungen (z. B. Schlieren, Schilfsandstein: Erhöhung des

- b) Quellmaßes) verbunden ist bzw. bei denen der Einsatz einer hydrophobierenden Imprägnierung abgelehnt wird. Gleichzeitig wird mittels Historic Schlammiasur eine nur so gering deckende ("lasierende") Schlämme aufgebracht, dass der Untergrund nach dem Auftrag weiterhin

durchscheint. Das "Totstreichen" strukturierter bzw. gefärbter Untergründe wird somit vermieden.

Historic Schlämmlasur besitzt des weiteren folgende wichtige Eigenschaften:

- hohe Wasserdampfdurchlässigkeit
- hohe Dichtigkeit gegen flüssiges Wasser (Schlagregen und Spritzwasser)
- keine Durchnässung bei extremer Witterungsbelastung
- keine Quellerscheinungen
- Die mit Historic Schlämmlasur geschützten Baustoffe nehmen bei Niederschlägen nur sehr wenig Wasser auf und können diese geringen Wassermengen in den Trockenperioden leicht wieder abgeben. Dadurch bleibt der Baustoff weitgehend trocken und Feuchteschäden unterbleiben.
- spannungsarm
- leichte Verarbeitung
- gering alkalisches Beschichtungssystem
- keine Flecken- und Ansatzbildung
- unbegrenzte Farbtonvariabilität im Bereich historischer Farben
- raues, griffiges, mattes Aussehen, auch in Abhängigkeit vom Untergrund
- mineralähnlicher Charakter
- hohe Witterungsbeständigkeit
- auf bewitterten tragfähigen Altanstrichen applizierbar
- umweltgerecht
- nicht ätzend

Untergrund

- Der Untergrund muss trocken, sauber, tragfähig, frei von losen Teilen, Bewuchs, Staub-, Schalmittel-, Öl- und Fettrückständen sein. Nicht festhaften-

de Anstriche und Beschichtungen sorgfältig entfernen. Abgewitterte Beschichtungen mit einem Hochdruckreiniger reinigen.

Grundierung. Je nach Objektsituation und Aufgabenstellung können folgende Produkte / Produktsysteme zum Einsatz kommen. Der Verbrauch richtet sich jeweils nach der Untergrundbeschaffenheit und der zur Lösung der gegebenen Aufgabenstellung einzusetzenden Applikationstechnik:

- Antihygro (Art.-Nr.: 0616),
- Produkte aus der KSE Familie (z. B. Remmers KSE 300),
- Produkte aus dem KSE-Modul-System (z. B. KSE 300 E),
- "herkömmliche" Grundierungen (z. B. Grundierung SV: verfestigend und hydrophobierend; Tiefengrund: verfestigend),
- Historic Lasur (Art.-Nr.: 6475).

Spachtelung

Im Bedarfsfall können mit Remmers Siliconharz Spachtel (Art.-Nr.: 0565) unebene Flächen ausgeglichen bzw. Risse verschlossen werden (vergl. TM).

Verarbeitung

Die Verbrauchswerte richten sich zum einen nach der zu lösenden Aufgabenstellung und zum anderen nach der Saugfähigkeit und Struktur des Untergrundes. Unter Berücksichtigung dieser Parameter ist Historic Schlämmlasur (evtl. in Kombination mit Historic Lasur; Art.-Nr.: 6475) in der Regel ein bis zweimal aufzutragen.

Da das optische Erscheinungsbild einer Lasur naturgemäß untergrundabhängig ist, muss / kann der gewünschte Farbton (nur) anhand einer geeigneten Probefläche ermittelt werden. Der exakte Ver-

brauch muss durch Probeflächen ermittelt werden. Bei der Anstrichausführung VOB, Teil C, Abs. 2 und 3 beachten. Größere, zusammenhängende Flächen nass in einem Zug beschichten, um Ansätze zu vermeiden. Zwischen den einzelnen Arbeitsgängen ist eine Trocknungszeit von mindestens 6 Stunden je nach äußeren Bedingungen einzuhalten. Vor direkter Sonneneinstrahlung und Regen gemäß der Regeln des Handwerks schützen. Nicht bei Temperaturen unter + 5 °C verarbeiten.

Arbeitsgeräte, Reinigung

Flächenstreicher, Deckenbürsten, Pinsel und Lammfellroller. Pinsel, Geräte und Farbspritzer in frischem Zustand mit Wasser reinigen.

Lieferform, Verbrauch, Lagerung

Lieferform:

Kunststoffgebinde 5 l und 15 l

Verbrauch:

- Erste Beschichtung: ca. 0,25 bis 0,4 l/m²
- Zweite Beschichtung (evtl.): ca. 0,20 l/m²

Lagerung:

Im Originalgebinde bei kühler jedoch frostfreier Lagerung mind. 12 Monate

Sicherheit, Ökologie, Entsorgung

Nähere Informationen zur Sicherheit bei Transport, Lagerung und Umgang sowie zur Entsorgung und Ökologie können dem aktuellen Sicherheitsdatenblatt entnommen werden.

Vorstehende Angaben wurden aus unserem Herstellerbereich nach dem neuesten Stand der Entwicklung und Anwendungstechnik zusammengestellt.

Da Anwendung und Verarbeitung außerhalb unseres Einflusses liegen, kann aus dem Inhalt des Merkblattes keine Haftung des Herstellers abgeleitet werden. Über den Inhalt des Merkblattes hinausgehende oder abweichende Angaben bedürfen der schriftlichen Bestätigung durch das Stammwerk.

Es gelten in jedem Fall unsere allgemeinen Geschäftsbedingungen. Mit Herausgabe dieses technischen Merkblattes verlieren vorangegangene ihre Gültigkeit.

75100 Primal™ AC 35

Primal™ AC 35 ist ein lösemittelfreies Acrylpolymer, die für hochbeständige hochglänzende Innen- und Aussenfarben bestens geeignet ist.

Typische physikalische Eigenschaften:

die nachfolgenden Angaben sind lediglich physikalische Werte und stellen keine Spezifikation dar:

Aussehen	Milchig-weiße Flüssigkeit
Festkörper	44.5 – 45.5 %
Brookfield-Viskosität, 25%	150 – 350 mPas
pH-Wert	8,0 -9,0
Dichte (trockenes Polymer)	1,13 g/cm ³
Dichte (trockenes Polymer)	1,06 g/cm ³
MFT	0°C