Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

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

DIPLOMARBEIT

Master´s Thesis

Strukturelle Festigung von historischen Putzen

Structural Consolidation of Historical Plaster

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer Diplom-Ingenieurin unter der Leitung von

a.o.Univ.-Prof. Mag. Dr. Andreas Rohatsch

am

Institut für Ingenieurgeologie E203

und

Priv. Doz. Dr. Dipl. Biol. Katja Sterflinger

am

Institut für angewandte Mikrobiologie H791

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

durch

Elisabeth Zeugswetter

0025793

Steinbergstraße 3

A – 3110 Neidling

Wien, im Jänner 2008

Ich versichere:

dass ich die Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

……	……..
Datum	Unterschrift

DANKSAGUNG

Danken möchte ich

Meinen Betreuern a.o.Univ.-Prof. Mag. Dr. Andreas Rohatsch (Technische Universität Wien) und Priv. Doz. Dr. Dipl. Biol. Katja Sterflinger (Universität für Bodenkultur Wien) für die Möglichkeit, dieses Thema zu bearbeiten, die gute praktische und theoretische Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima;

Den Mitarbeitern des Institutes für Ingenieurgeologie an der Technischen Universität Wien, im Besonderen Christine Cerny und Dipl.-Ing. Viktor Navas-Basantes für allgemeine Hilfestellungen;

Dem gesamten Team des ACBR an der Universität für Bodenkultur Wien, im Besonderen Christian Voitl für die fachkundige Anleitung zur Durchführung der Arbeiten im Labor und die Beschaffung des Bakterienstammes Bacillus *cereus*;

Den Mitarbeitern des Bundesdenkmalamtes in der Kartause Mauerbach und der Restaurierwerkstatt, allen voran Mag. Astrid Huber und Johannes Götzenauer für die Hilfestellung bei der Durchführung der praktischen Arbeiten an der Kartause Mauerbach und die Bereitstellung der Laborputzproben und der Putzflächen vor Ort;

A.o. Univ.-Prof. Dr. Johannes Weber für die Unterstützung bei der Durchführung und Interpretation der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen;

Susanne Pestl für die Hilfestellung bei den Überstetzungen ins Englische;

Nicht zuletzt bei meiner Familie und bei meinem Freund, die mir dieses Studium ermöglicht haben und mir stets mit Rat und Tat beiseite standen.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG 4

ABSTRACT 6

1. EINLEITUNG 7

1.1 Problemstellung 7

1.2 Herstellung und Verwendung von Branntkalk 10

1.2.1 Historischer Überblick (Putz, Mörtel, Stuck) 10

1.2.2 Mineralogie und technische Grundlagen 11

1.2.3 Luftkalk 16

1.2.4 Hydraulischer Kalk 18

1.2.5 Anwendungen, Rezepturen und Verarbeitungsgrundlagen 19

1.3 Putzschäden, Ursachen und Auswirkungen 23

1.4 Sanierung und Restaurierung/Konservierung 28

1.4.1 Herkömmliche Verfahren 28

1.4.2 Kalkwasserfestigung 30

1.4.3 Festigung durch Biomineralisation 32

2. METHODISCHER ANSATZ 36

2.1 Angewandte Prüfmethoden 36

2.1.1 Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit 36

2.1.2 Absanden 38

2.1.3 Wasseraufnahmefähigkeit 40

2.1.4 Spaltzugfestigkeit 41

2.1.5 Karbonatisierung 42

2.1.6 Feuchtigkeitsmessung 43

2.1.7 Bestimmung der Eindringtiefe der Bakterien (PAS) 44

2.1.8 Reisolierung des *Bacillus cereus* 44

2.1.9 Dünnschliffanalytik 45

2.1.10 Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop 45

2.2 Laborprüfkörper 47

2.3 Prüfflächen Mauerbach 49

2.4 Arbeitsvorbereitungen **53**
2.4.1 Herstellung Carbonatwasser 53
2.4.2 Herstellung der Bakterienkultur 53

2.5 Festigungsmaßnahmen **57**
2.5.1 Allgemein Applikationstechnik 57
2.5.2 Applizierte Medien Laborproben 58
2.5.3 Applizierte Medien Putzflächen Mauerbach 59

3. ERGEBNISSE **61**

3.1 Putzproben Labor **61**
3.1.1 Ultraschallmessung 61
3.1.2 Absanden 65
3.1.3 Wasseraufnahmefähigkeit 66
3.1.4 Spaltzugfestigkeit 70
3.1.5 Karbonatisierung 83
3.1.6 Bestimmung der Eindringtiefe der Bakterien (PAS) 83
3.1.7 Reisolierung *Bacillus cereus* 85
3.1.8 Dünnschliffanalytik 87
3.1.8 Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop 93

3.2 Putzflächen Mauerbach **95**
3.2.1 Absanden 95
3.2.2 Feuchtigkeit und Ultraschallgeschwindigkeit 103
3.2.3 Wasseraufnahmefähigkeit 111
3.2.4 Probenahme 113

4. INTERPRETATION UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE **127**

4.1 Prüfkörper Labor **127**

4.2 Prüfflächen Mauerbach **129**

4.3 Zusammenschau zwischen Labor und Mauerbach **131**

5. AUSBLICK UND OFFENE BZW. NEUE FRAGESTELLUNGEN **133**

LITERATURNACHWEIS **135**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS **140**

TABELLENVERZEICHNIS **143**

ANHANG **144**

KURZFASSUNG

Die Konservierung von Putzen stellt einen sehr wichtigen Punkt dar, da diese nicht nur als gestalterisches Element, sondern auch als Schutzhülle für das Bauwerk und die Tragstruktur dienen. In der vergangenen Zeit wurden zur Restaurierung von Putzen oftmals synthetische Mittel, wie beispielsweise Kunstharze oder Kieselsäureester eingesetzt. Der Einsatz dieser synthetischen Konservierungsmittel ist jedoch problematisch, da oftmals nach Jahren verheerende Spätfolgen, beispielsweise die Zerstörung des Gefüges infolge verhinderten Gasaustausches, auftreten. Weiters ist zu beachten, dass der Einsatz dieser Konservierungsmittel in vielen Fällen irreversibel ist und nicht dem Originalmaterial entspricht. Neben synthetischen Festigungsmitteln wird auch die Methode der Kalkwasserfestigung angewendet. Hierbei wird der Kalkputz durch den Eintrag von Calciumhydroxid gefestigt. Eine relativ neue Festigungsmethode ist die Konsolidierung von Kalkputzen mithilfe von biomineralisierenden Bakterien. Die Biomineralisierung ist ein in der Natur weit verbreiteter Prozess und beschreibt beispielsweise die Calcitneubildung von Muscheln, Algen, Hühnereierschalen oder von Knochen. Eine Gruppe von Forschern in Frankreich (CAÑAVERAS J.C., GONZALEZ, I., et. al.) haben nachgewiesen, dass verschiedene stoffwechselbedingte Aktivitäten von aeroben, heterotrophen Bakterien zur Ausfällung von Calciumcarbonat führen. In Österreich wurde die Konsoliderung von Kalkputzen mittels *Bacillus cereus* (ein aerobes, heterotrophes Bodenbakterium) erstmals in der Diplomarbeit von C. Kerner (2005) erforscht.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die strukturelle Festigung von historischen Putzen mittels Kalkwasser und/oder *Bacillus cereus* untersucht. Hierfür wurde an den Putzflächen an der Kartause Mauerbach die oben genannten Festigungsmittel appliziert und anschließend einigen Untersuchungen unterzogen. Ergänzend zu den Putzflächen vor Ort wurden von den Mitarbeitern der Restaurierwerkstatt Baudenkmale in der Kartause Mauerbach (Bundesdenkmalamt) Laborputzproben hergestellt, an denen ebenfalls die beiden Konsolidierungsmethoden getestet wurden. Die Putzflächen an der Kartause Mauerbach wurden nach der Festigung einigen zerstörungsfreien Untersuchungen unterzogen. So wurde die Stabilisierung des Kornverbandes mit Hilfe von Ultraschallmessungen ermittelt. Ergänzend dazu wurden Leitfähigkeitsmessungen zur Feuchtigkeitsbestimmung, Peelingtests und Wasseraufnahmefähigkeitsversuche durchgeführt. Abschließend wurden anhand entnommener Proben im Labor die Eindringtiefe der Bakterien mittels PAS – Färbung und die Reisolierung der Einzelkulturen vorgenommen. Zusätzlich wurden Dünnschliffe angefertigt, welche zur Charakterisierung des Gefüges herangezogen wurden. An den Laborproben wurde neben diesen Versuchen zusätzlich die fortschreitende Karbonatisierung der frischen Kalkputzproben untersucht. Weiters wurde die

Spaltzugfestigkeit zur Überprüfung der Festigkeitsentwicklung der Proben ermittelt. Man versuchte an den Laborproben den Einfluss verschiedener Luftfeuchtigkeiten während der Aushärtung zu dokumentieren, indem man einen Teil der Proben zur Aushärtung im Keller der Kartause und den anderen Teil der Proben im Labor lagerte.
Die Ergebnisse der Kalkwasserfestigung zeigten bei allen Versuchen eine gute Stabilisierung des Korngefüges. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass noch nicht karbonatisierte Proben ein höheres Festigungspotential im Zuge der Kalkwasserfestigung aufwiesen, als vollständig karbonatisierte Kalkputze. Die Festigung mittels *Bacillus cereus* erwies sich als weit komplexer als erwartet. Dies lag einerseits am problematischen Einsatz der Nährlösung, gemäß der CALCITE – Methode und andererseits daran, dass es infolge der Festigung mittels *Bacillus cereus* zur Bildung eines hydrophobierenden Oberflächenfilms kommt, welcher den Gasaustausch zwischen den Poren und der Umgebung behindern kann. Im Großen und Ganzen stellte sich auch hier eine Stabilisierung des Korngefüges ein.

Stichwörter: historischer Putz, Kalkputz, Kalkwasser, Biomineralisierung, *Bacillus cereus*;

ABSTRACT

The restoration of architectural objects is very important, because these objects are documents of our history. As an integral part of architecture, plaster is not only a creative/ornamental element, but also a structuring element, forming a protective coating for the building, as well as for the supporting structure. In the past, synthetic media have been used frequently for the conservation treatments of plaster. But the use of synthetic media, like synthetic resins or silicic acetates, is problematic, because of their long-term destructive consequences, such as the plugging of pores that - due to the obstruction of exchange of gases - damages the structure. The use of synthetic media is in many cases irreversible and does not correspond to the original material. Another conservation treatment is the strengthening of plaster with limewater. Calcium hydroxide is applied to the plaster; thus the strengthening product identical to the raw material (calcium carbonate). A new conservation treatment is the bacterially induced carbonate Mineralisation. The bio-mineralisation process is very common in nature and accounts for the creation of shells, algae, chicken eggshells or bones for example. A group of French researchers (CAÑAVERAS J.C., GONZALEZ, Ith, et. al.) proved that through a variety of metabolism-dependent activities, aerobe, heterotrophe bacteria, such as bacillus cereus, can precipitate calcium carbonate. This method was investigated on plaster for the first time by Kerner, C. (2005) in austria.

In his thesis, structural strengthening of historical plaster was examined by means of limewater and/or bacillus cereus. The application of limewater and/or bacillus cereus was investigated on in situ plaster samples at the Katause Mauerbach as well as on laboratory samples. The results of the conservation treatments of the in situ plaster were determined by ultrasound measurements. In addition, measurements to determine humidity levels, peeling- and water absorption capacity tests were done. Finally, the penetration depth of the bacteria, and the re-isolating of the single cultures were checked. Furthermore, some thinly sliced sections were taken. Additionally, laboratory samples were examined by means of tensile splitting strength with respect to the progressing carbonization of fresh lime plaster, and with respect to their plasticity and the influence of humidity on the hardening of the samples.

The limewater consolidation showed a good stabilization of the grain structure with all experiments. Strengthening by means of bacillus cereus proved far more complex than expected. This was due, on the one hand because of the problematic employment of the nutritive solution, in accordance with the CALCITE – method, and on the other hand because of the plugging of the pores, resulting in the formation of a superficial film. Generally, the bacterially strengthened samples also showed stabilization of the grain structure.

Key words: historical plaster, lime plaster, limewater, bio-mineralization, bacillus cereus.

1. EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Die Erhaltung historischer Bausubstanz ist von großer Bedeutung, da historische Objekte Zeitdokumente darstellen, welche der Identifikation mit der eigenen Geschichte dienen. Zu diesem Zweck wird die Konservierung von Denkmälern in verschiedenen Gesetzen geregelt. In Österreich wird die Erhaltung von im öffentlichen Interesse gelegenen Kulturgütern, welche von geschichtlicher, künstlerischer oder kultureller Bedeutung sind, im Denkmalschutzgesetz geregelt.[1] International findet man in der Charta von Venedig Grundsätze für die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern.[2]
Putz stellt jedoch nicht nur ein Zeitdokument dar, sondern dient auch als Schutzhülle für die Tragkonstruktion und das gesamte Bauwerk. Da historische Putze oftmals über Jahrhunderte äußeren Faktoren, wie Feuchtigkeit, Temperaturwechsel, Salzbelastungen oder Mikroorganismen ausgesetzt sind, kommt es infolge physikalischer, chemischer und/oder biologischer Verwitterung nach und nach zum Verfall der Bausubstanz. Durch die zunehmende atmosphärische Verschmutzung werden diese Prozesse zusätzlich beschleunigt. So bedürfen diese empfindlichen, oft massiv geschädigten Objekte einer genauen Schadensanalyse und der anschließenden Erstellung eines Sanierungskonzeptes.

Im Bereich der Denkmalpflege werden verschiedenste Methoden zur Restaurierung und Konservierung von historischen Putzen eingesetzt. Man verwendet seit jeher Kalkwasser zur Konsolidierung von Putzen. Diese Methode ist jedoch in den letzten Jahrzehnten durch den Einsatz verschiedenster synthetischer Methoden, wie Kieselsäureester oder Kunstharz, zurückgedrängt worden. Doch der Einsatz von diesen Methoden ist in mehrerer Hinsicht problematisch, da artfremde Materialien Einsatz finden, deren Anwendung teilweise irreversibel ist und es infolge eines verhinderten Gasaustausches nach Jahren zu schwerwiegenden Schäden führen kann. Durch die Forderung der Charta von Venedig (1964) nach Materialtreue, wurde in den letzten Jahren vermehrt an der Methode der Biomineralisation geforscht. In Frankreich entwickelte eine Gruppe von Forschern (CAÑAVERAS J.C., GONZALEZ, I., et. al.) die CALCITE – Methode, bei der eine Reihe von aeroben, heterotrophen Bakterien durch verschiedene stoffwechselbedingte Aktivitäten Kalk ausfällen können.

[1] Denkmalschutzgesetz, Österreich 1999

[2] Internationale Charta von Venedig 1964

Fragestellung

In dieser Diplomarbeit wird die strukturelle Festigung von Kalkputzen untersucht. Als Konsolidierungsmethoden werden die Kalkwasserfestigung und die Biomineralisierung mit dem Bodenbakterium *Bacillus cereus* genaueren Untersuchungen unterzogen, welche auf den Ergebnissen der Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) basieren. Bei der Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) wurde erstmals in Österreich, in Kooperation mit K. Sterflinger und der Restaurierungswerkstatt des BDA, die Festigung mittels biomineralisierenden Bakterien an Kalkputzen getestet. Die Versuche wurden mit zweierlei Bakterien durchgeführt, den Bodenbakterien *Myxococcus xanthus* und *Bacillus cereus*. Da das Bakterium *Myxococcus xanthus* kein Sporenbildner und somit nur für eine begrenzte Zeit überlebensfähig ist, erfolgen weitere Untersuchungen ausschließlich mit dem Bakterium *Bacillus cereus*. Ein weiterer wichtiger Punkt war, unter anderen die negative Auswirkung der Nährlösung zu minimieren bzw. überhaupt zu vermeiden, da durch die Applikation von Nährlösung die Besiedelung durch andere, unerwünschte Organismen begünstigt wurde. Außerdem erwies es sich als notwendig begleitende Laboruntersuchungen durchzuführen, um die Festigkeitsentwicklung besser verfolgen zu können und die Methode der Biomineralisation unter „sterilen“ Laborbedingungen zu testen. Diese ungeklärten Punkte führten zu folgender Fragestellung:

- Führt die Konsolidierung von historischen Kalkputzen mittels Bakterien und/oder Kalkwasser zu den gewünschten Ergebnissen, nämlich einer Stabilisierung des Kornverbandes?
- Wird für die Festigung mit Bakterien eine zusätzliche Nährlösung benötigt, wenn ja wie viel davon? Und wird hierfür eine zusätzliche Calciumquelle in Form von Kalkwasser benötigt?
- Wie wirken sich zu viel Nährmedium und abgestorbene Bakterien auf den Untergrund aus? Stellen diese wiederum Nährboden für schädliche Bakterien bzw. Organismen dar?
- Zu welchen Ergebnissen führen die bakterielle Festigung und die Festigung mittels Kalkwasser zu Laborbedingungen und welche Gründe gibt es für unterschiedliche Ergebnisse?

Gliederung der Arbeit

Diese Diplomarbeit gliedert sich in fünf Teile. Zu Beginn erfolgt eine allgemeine Einführung in die Problematik, danach wird die Herstellung und Verwendung von Branntkalk, Schäden an Kalkputzen und deren Sanierungsmöglichkeiten beschrieben. Im zweiten Teil erfolgen eine Beschreibung der angewendeten Prüfmethoden und eine Beschreibung der Laborprüfkörper bzw. der Prüfflächen an der Kartause Mauerbach. Das dritte Kapitel wendet sich den Arbeitsvorbereitungen, den Festigungsmaßnahmen und den Ergebnissen der angewendeten Untersuchungen zu. Die letzten beiden Teile widmen sich der Interpretation der Ergebnisse und dem Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten.

1.2 Herstellung und Verwendung von Branntkalk

1.2.1 Historischer Überblick (Putz, Mörtel, Stuck)[3]

Baukalk ist eines der ältesten Bindemittel. Seit annähernd 10.000 Jahren findet Kalk als Bindemittel seine Verwendung. Aufgrund des weltweiten Kalkvorkommens wurde dieser von nahezu allen Hochkulturen verarbeitet.

So gibt es archäologische Funde im Donauraum, die ins Jahr 7000 v. Chr. zurückführen, wo unter Verwendung von gebranntem Kalkstein eine Art Estrich für Fußböden hergestellt wurde. Kalk fand aber nicht nur als Estrichmörtel, sondern auch als Mauermörtel, Putz- und Stuckmörtel Anwendung. Dieser diente schon zur Zeit der Antike als Schutz der Tragstruktur und gleichermaßen als Untergrund für verschiedenste Malereien. Bereits 1600 v. Chr. verwendete man in der minoischen Kultur Kalkmörtel als Putz für Decken, Wände und Säulen und sogar für Wandmalereien in Freskotechnik. Durch den Einfluss der Römer breiteten sich verschiedenste Verarbeitungstechniken von Kalk auf den gesamten Mittelmehrraum aus. So übernahmen die Römer beispielsweise das Wissen der Assyrer vom Bau ihrer Paläste, die Stuktechniken der Ägypter und die Verputztechniken der Griechen.

Heute sind historische Putze im europäischen Bereich vor allem an Burgen, Schlössern und Kirchen zu finden, wobei die verwendeten Techniken auf die in der Antike entwickelten Techniken zurückzuführen sind.

---

[3] Müller, W., Vogel, G.; dtv-Atlas Baukunst, Band 1 und 2, Deutscher Taschenbuchverlag 1997

- Stark, J.; Wicht, B.; Zement und Kalk; Birkenhäuser Verlag, 2000

- Dettmering, T., Kollmann, H.; Putze in der Bausanierung und Denkmalpflege, Verlag Bauwesen Berlin 2001

- Sisí, et. al.; Der Kalkputz; Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart München 2002

1.2.2 Mineralogie und technische Grundlagen

Mineralogie

Calciumcarbonate ($CaCO_3$) gehören zu der Mineraliengruppe der Karbonate und sind weltweit vorkommend. Karbonate werden außerdem noch *„Salze der Kohlensäure“*[4] genannt, da stets das Strukturelement CO_3^{2-} vorkommt. Calciumcarbonate zeichnen sich besonders durch gute Spaltbarkeit und geringe Härte aus und können leicht durch verdünnte Säuren gelöst werden.

Die am häufigsten auftretende Kristallform von $CaCO_3$ ist der Calcit (trigoal, weiß durchscheinend). Dieser stellt auch die stabilste Form des Kalkspats dar. Daneben treten auch noch zwei weitere Kristallformen auf, nämlich der Aragonit (rhombisch) und der Vaterit (hexagonal, wolkig), diese zu letzt genannten Kristallformen sind metastabil und wandeln sich bei ca. 400°C in Calcit um[5].

Zwei wichtige physikalische Werte zur Beschreibung von Calciumcarbonat sind die Dichte und die Löslichkeit in Wasser, wobei die Dichte von Calciumcarbonat bei 20°C 2,71g/cm³ und die Löslichkeit im Wasser bei 10°C 0,014g/l beträgt.[6]

Entstehung von Calciumcarbonat:[7]

Die Ausfällung von Calcit kann auf anorganische oder auf organische Weise erfolgen.

- Die anorganische Kalkausfällung kommt eher selten vor und basiert auf der Lösung von Kalkstein durch Kohlendioxid. Kohlendioxid löst sich bei tiefen Temperaturen und/oder unter hohem Druck im Wasser besonders leicht, daher können diese CO_2-reichen Tiefseewässer Calcit lösen. Steigen die Temperaturen oder der Druck, beispielsweise wenn diese Wässer wieder zu Tage treten, so entsteht ein starker Überschuss an CO_2 und es kommt dadurch zur Ausfällung des im Wasser gelösten Calciumcarbonats. Als Beispiel hierfür wäre die Bildung von Tropfsteinen oder Travertin anzuführen.
- Die organische Ausfällung von Calcit beruht im wesentlichen darauf, dass Organismen gelöste Stoffe, durch deren Stoffwechsel, in ungelöste Stoffe umwandeln können. Beispiele hierfür sind die Bildung von Muscheln, Seeigeln, Korallen oder aber auch das Hühnerei. Genauer wird die organische Kalkausfällung im Kapitel 1.4.3 erklärt.

---

[4] Rösler, H. J.; Lehrbuch der Mineralogie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1991

[5] Rösler, H. J.; Lehrbuch der Mineralogie; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1991

[6] ÖNORM EN 1018 2006

[7] Rösler, H. J.; Lehrbuch der Mineralogie; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig 1991

Geologisch betrachtet entsteht Calcit unter fast allen Bedingungen. So entsteht infolge der Diagenese aus Verwitterungs- und Abtragungsprodukten Sedimentgestein (Kalkstein). Unter metamorphen Bedingungen kristallieren kalkige Sedimente zu Marmor und letztlich kann, extrem selten, Karbonatit infolge magmatischer Bedingungen entstehen.

Nutzung von Calciumcarbonat:
Anwendung findet Calcit neben zahlreichen Verwendungsmöglichkeiten in der Bauindustrie auch in der optischen Industrie, wo spezielle durchsichtige Calcite, beispielsweise der „Isländische Doppelspat", genutzt werden.[8]

Allgemeine Definition Kalk und Baukalk gemäß ÖNORM EN 459-1:
Kalk ist ein *„Material, das alle physikalischen und chemischen Formen beinhaltet, in denen Calcium- und Magnesiumoxid (CaO und MgO) und/oder Calcium- und Magnesiumhydroxid ($Ca(OH)_2$ und $Mg(OH)_2$)auftreten können."*[9]
Baukalk ist *„Kalk, der im Bauwesen verwendet wird."*[10]

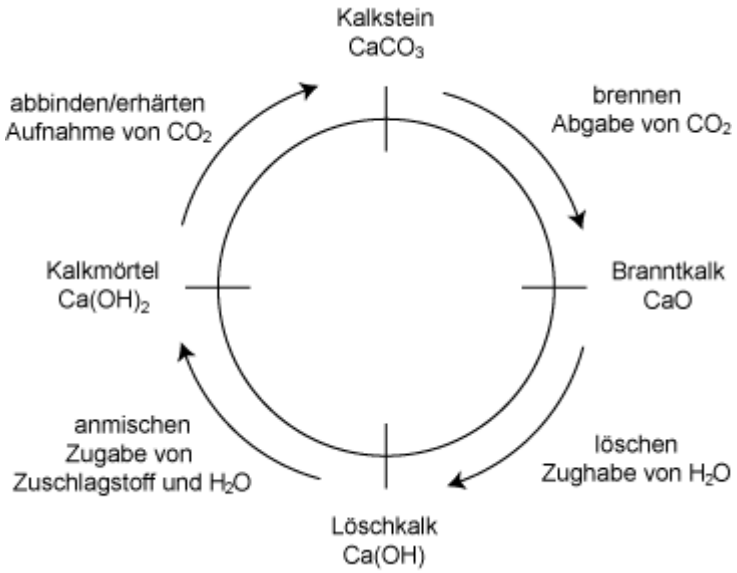

Abbildung 1: Kalkkreislauf

Die oben stehende Abbildung zeigt den Kalkkreislauf und wurde in Anlehnung an die Abbildung aus dem Buch „Der Kalkputz" von SISÌ et.al. (2002) erstellt. Die genauen chemischen Prozesse werden in dem Kapitel 1.2.3 und dem Kapitel 1.2.4 näher erläutert.

[8] Orkusch, M., Matthes, S.; Mineralogie, Springer Verlag 2005

[9] ÖNORM EN 459-1 2001

[10] ÖNORM EN 459-1 2001

Arten von Baukalk[11]

- Luftkalk besteht meist aus „reinem“ Kalkstein. Dieser erhärtet durch Aufnahme von Kohlenstoffdioxid und Abgabe von Wasser und verfestigt nicht unter Wasser. Eine ausführlichere Darstellung des Luftkalks wird unter dem Kapitel 1.2.3 angeführt.
    - Weißkalk: aus möglichst reinem Kalkstein ($CaCO_3$) über 900°C gebrannt, auch Carbidkalk genannt.
    - Dolomitkalk: aus dolomithaltigem Gestein ($CaCO_3$ + $CaMg(CO_3)_2$) ebenfalls über 900°C gebrannt.

- Hydraulischer Kalk wird aus Kalksteinmergel oder mergeligem Kalkstein und Zusatz von latent hydraulischen Bindemitteln oder Puzzolanen hergestellt. Diese werden unter der nachfolgenden Überschrift „Übergang hydraulischer Kalk (NHL) zu Zementen“ noch genauer erklärt. Die Festigung von hydraulischem Kalk erfolgt neben der Carbonaterhärtung zusätzlich durch die hydraulische Erhärtung, und erhärtet auch unter Wasser. Unter dem Kapitel 1.2.4 findet sich eine detaillierte Beschreibung von hydraulischem Kalk.
    - Wasserkalk: wie Weißkalk mit geringem hydraulischem Erhärtungsvermögen;
    - Hydraulischer Kalk: begrenztes hydraulisches Erhärtungsvermögen;
    - Hochhydraulischer Kalk: höherer Gehalt an reaktionsfähigen Bestandteilen, die Verarbeitungseigenschaften liegen zwischen Luftkalken und Zementen;

Übergang hydraulischer Kalk (NHL – Natural Hydraulic Limestone) zu Zementen

Der Übergang von hydraulischem Kalk zu Zementen wird vor allem durch das Mischungsverhältnis von Kalk und Hydraulefaktoren bestimmt. Zement besitzt, im Vergleich zu hydraulischen Kalken, höhere hydraulische Anteile.

Die hier beschriebenen Hydraulefaktoren (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3) können entweder natürlichen Ursprungs oder künstlich hergestellt sein. Diese sind allein mit Wasser vermischt keine Bindemittel, entwickeln aber zusammen mit Kalk oder Zement hydraulische Eigenschaften. Zu den latent hydraulischen Bindemitteln zählen Hüttensand oder Holzasche. Puzzolane können in natürliche Puzzolane, wie Puzzolan-, Santorinerde, oder Trass (vulkanischer Tuff), oder künstliche Puzzolane, wie Hochofenschlacke, Ziegelmehl etc. unterschieden werden.[12]

[11] Schneider, U., Knoblauch, H.; Bauchemie; Werner-Verlag, 4. Auflage 1995

[12] Schneider, U., Knoblauch, H.; Bauchemie; Werner-Verlag, 4. Auflage 1995

Zement[13]

Die Bezeichnung Zement geht auf das von den Römern benannte „Opus Cementitum“ zurück und benennt ein künstlich hergestelltes, hydraulisches Bindemittel. Hydraulische Bindemittel zeichnen sich durch die Fähigkeit unter Wasser zu erhärten aus. Als Rohmaterialien für die Zementherstellung werden Kalkstein und Ton oder Kalkmergel (natürlich vorkommende Mischung aus Kalk und Ton) verwendet. In manchen Fällen ist auch noch die Beigabe von Eisenoxiden, Sanden etc. von Nöten. Die Rohstoffe werden fein gemahlen und bis 1450°C (Sintergrenze) in Drehöfen gebrannt. Beim Brennen entstehen im Klinker verschiedene chemische Verbindungen (CaO mit SiO_2, Al_2O_3 und Fe_2O_3), diese werden als Klinkerphasen bezeichnet.

Vier Hauptklinkerphasen:

$2CaO * SiO_2$	Dicalciumsilicat
$3CaO * SiO_2$	Tricalciumsilicat
$3CaO * Al_2O_3$	Tricalciumaluminat
$3CaO * Al_2O_3 * Fe_2O_3$	Tetracalciumaluminatferrit

Neben den oben angeführten Hauptklinkerphasen gibt es in geringen Mengen auch noch die Nebenbestandteile CaO und MgO. Diese Bestandteile des Zements sind in geringen Mengen unschädlich, bewirken aber in größeren Mengen Kalktreiben.

Nach der Abkühlung werden die gebrannten Klinker, unter Zugabe von Gips, zu Zement zermahlen.

Durch das Anmachen des Zements mit Anmachwasser und Zuschlagsstoff beginnen zwei parallel laufende Erhärtungsprozesse.

Einerseits beginnt sofort mit dem Anmachen die Hydrolyse, welche bewirkt, dass sich der PH-Werte auf ca. 12,5 einstellt und somit ein Rosten der Stahleinlagen verhindert.

$$\underset{\text{gebrannter Kalk}}{CaO} + \underset{\text{Wasser}}{H_2O} \leftrightarrow \underset{\text{Calcium}}{Ca^{2+}} + \underset{\text{Hydroxid-Ion}}{2OH^-} \qquad \text{Gl. 1}$$

Andererseits läuft neben der Hydrolyse noch die Hydratation ab, welche die eigentliche Erhärtungsreaktion beschreibt. Diese beginnt erst ca. eine Stunde nach dem Anmachen des Mörtels und läuft analog der Klinkerphasen beim Brennen ab. Der nach der Wasserzugabe entstandene Zementleim erhärtet zu Zementstein.

Heute wird als Bindemitte vermehrt Zement eingesetzt, da dieser ein verbessertes Aushärteverhalten zeigt, höhere Festigkeiten besitzt und wasserunlöslich ist.

---

[13] Schneider, U., Knoblauch, H.; Bauchemie; Werner-Verlag, 4. Auflage 1995

Gips und Anhydrit

Gips ist ein in der Natur vorkommender Baustoff. Die chemische Formel des Calciumsulfates ist $CaSO_4 * 2H_2O$, ein sogenanntes Calciumsulfat-Dihydrat. Gips kann aber auch künstlich hergestellt werden. So ist Gips beispielsweise Nebenprodukt bei der Rauchgasentschwefelung oder bei der Phosphatherstellung. Neben Gips kann im Zuge dieser Prozesse auch Anhydrit, eine wasserfreie Form des Calciumsulfats ($CaSO_4$) entstehen.

Die Abbildung 2 zeigt den Kreislauf bei der Herstellung von Gips[14].

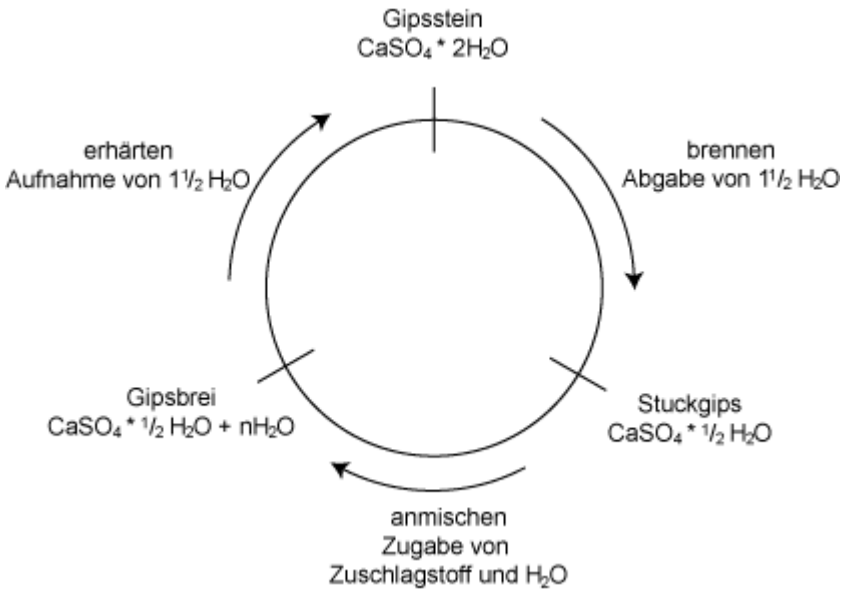

Abbildung 2: Gipskreislauf

Brennen: $CaSO_4 * 2H_2O \leftrightarrow CaSO_4 * ½H_2O + 1½H_2O$ Gl. 2

Calciumsulfat-Dihydrat — Calciumsulfat-Halbhydrat — Wasser

Erhärten: $CaSO_4 * ½H_2O + 1½H_2O \leftrightarrow CaSO_4 * 2H_2O$ Gl. 3

Calciumsulfat-Halbhydrat — Wasser — Calciumsulfat-Dihydrat

Anwendung findet Calciumsulfat vor allem als Stuckgips, Gipssandmörtel oder im Trockenbau. Anhydrit wird hauptsächlich als Anhydritbinder bei Estrichen verwendet. Eine wichtige Eigenschaft ist die Wasserlöslichkeit von Gips, aus diesem Grund sollte Gips auch nur im Innenbereich verwendet werden.

[14] Maier, J.; Putz und Stuck; Fraunhofer IRB Verlag 2007

1.2.3 Luftkalk

Als Rohmaterialien für die Herstellung von Baukalk dienen Kalk- und Dolomitgestein, sowie kalk- und tonhaltige Mergelgesteine. Diese Sedimentgesteine werden in Schacht- oder Drehöfen bei 900° C bis 1200° C gebrannt und anschließend gelöscht. Die Erhärtung von Luftkalk erfolgt überwiegend durch die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft.

Chemische Prozesse[15]

Zur Herstellung von Luftkalk wird Kalkstein ($CaCO_3$) bei Temperaturen über 900° Celsius gebrannt, siehe Gleichung 4. Betrachtet man die Molekulargewichte von CO_2 (44 g) und CaO (56 g), so erkennt man, dass der ursprüngliche Kalkstein beim Brennvorgang 44% seines Gewichtes (Kohlendioxid) verliert und nur 56% als ungelöschter Kalk zurückbleibt.[16]

Brennen: $\underset{\text{Kalkstein}}{CaCO_3} \leftrightarrow \underset{\text{gebrannter Kalk}}{CaO} + \underset{\text{entweichendes Kohlendioxid}}{CO_2 \nearrow}$ Gl. 4

Im Anschluss wird der gebrannte Kalk mit Wasser gelöscht. Dieser Vorgang löst eine stark exotherme Reaktion aus, bei der eine große Menge an Wärme freigesetzt wird. Speziell zu beachten ist, dass es bei dem Löschvorgang zu einer erheblichen Volumenvergrößerung kommt. Aus diesem Grund muss dieser Prozess vor der Verarbeitung als Bindemittel vollständig abgeschlossen sein.

Löschen: $\underset{\text{gebrannter Kalk}}{CaO} + \underset{\text{Wasser}}{H_2O} \leftrightarrow \underset{\text{gelöschter Kalk}}{Ca(OH)_2}$ Gl. 5

Der Löschvorgang kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- trocken gelöscht

Hierbei wird dem gebrannten Kalk nur soviel Wasser beigegeben, dass als Endprodukt ein trockenes Pulver entsteht, welches in der Regel als Weißkalkhydrat bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um ca. 50 Gewichtsprozent Wasser.[17] Dieses entspricht der Standardform der fabriksmäßigen Löschung.

---

[15] Schneider, U., Knoblauch, H.; Bauchemie; Werner-Verlag, 4. Auflage 1995

[16] Sisí, et. al.; Der Kalkputz; Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart München 2002

[17] Sisí, et. al.; Der Kalkputz; Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart München 2002

- nass gelöscht

Beim Nasslöschverfahren wird der gebrannte Kalk in einer Löschgrube mit Wasserüberschuss (Drei- bis vierfaches an Wasser) gelöscht. Als Endprodukt entsteht ein „Kalkteig“, auch Sumpfkalk genannt. Dieser muss immer über einen längeren Zeitraum eingesumpft werden. Die „Einsumpfzeit“ ist von der jeweiligen Art der Verwendung abhängig. Beispielsweise wird der Sumpfkalk der Firma Dullinger[18] und der Firma Wopfinger[19] zur Herstellung von Putzen und Mörteln mindestens 3 Monate eingesumpft. Für hochwertigere Produkte, wie hochwertige Mauerkalke oder Kalkfarben, beträgt die Einsumpfzeit mindestens 1, 3 oder 6 Jahre.

- heiß gelöscht

Dies beschreibt ein Löschverfahren, welches bereits bei den Römern seine Anwendung fand. Es wurde jeweils eine Lage Sand, eine Lage Stückkalk, eine Lage Sand, eine Lage Stückkalk, usw. auf der Baustelle übereinander ausgebreitet, gelöscht und sofort verarbeitet. Bei diesem Verfahren können kleine Mengen an Kalkspatzen (ungelöschte Bestandteile an Bindemittel) enthalten bleiben, welche ein gewisses „Selbstheilungspotential“ für spätere Festigungen beherbergen. Aus diesem Grund wird das Endprodukt bei dieser Löschmethode auch historischer Kalkspatzenmörtel genannt.

Das Erhärten von Luftkalk erfolgt langsam von innen nach außen, durch Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft (reine Carbonathärtung). Darum ist auf eine gute Belüftung zu achten. Man kann den Erhärtungsprozess beschleunigen, indem man Wärme und CO_2 von außen zuführt und gleichmäßig Feuchtigkeit abführt. Da das Endprodukt $CaCO_3$ über eine geringe Wasserlöslichkeit verfügt, kann reiner Luftkalk auch als Außenputz verwendet werden. Erfahrungsgemäß benötigt Kalkmörtel für die Karbonatisierungsreaktion einen gewissen Grad an Feuchtigkeit. Idealerweise trocknet der Mörtel sehr langsam aus und muss bei Bedarf, beispielsweise bei trockenem, heißem Wetter zusätzlich befeuchtet werden. Die unten angeführte Karbonatisierungsreaktion im Mörtel gilt für alle Kalkmörtel und verläuft als exotherme Reaktion. Durch die lange Reaktionszeit ist jedoch keine Wärmeentwicklung spürbar.

Erhärten: $Ca(OH)_2$ + H_2O + CO_2 $\leftrightarrow$ $CaCO_3$ + $2\ H_2O\nearrow$ Gl. 6

$Ca(OH)_2$	H_2O	CO_2	$CaCO_3$	$2\ H_2O\nearrow$
gelöschter Kalk	Wasser	Kohlendioxid	erhärteter Kalk	freiwerdende Feuchtigkeit

[18] http://www.kalk.at

[19] http://www.baumit.com/baumit/at/main4/sub2/02824/index.shtml

1.2.4 Hydraulischer Kalk

Hydraulischer Kalk unterscheidet sich vom Luftkalk im Wesentlichen dadurch, dass dieser unter Wasser erhärtet und das Endprodukt nach der Erhärtung wasserunlöslich ist.
Bei hydraulisch erhärtenden Kalken dienen Kalkmergel und tonige Bestandteile, wie Tonerde oder Eisenoxid, als Rohstoffe für die Herstellung. Als hydraulische Zusätze können natürliche Puzzolane, wie Puzzolanerde, Santorinerde oder Trass dienen. Man kann jedoch auch künstliche Puzzolane, wie Ziegelmehl oder Hochofenschlacke als hydraulische Bestandteile beimengen.
Gebrannt wird bei Temperaturen zwischen 900° C und 1200° C im Schacht- oder Drehofen. Durch die hohe Brenntemperatur entsteht z.B.: Dicalcium – Silikat, wodurch die verbesserte Widerstandsfähigkeit gegen Feuchtigkeit entsteht. Weiters weisen hydraulische Kalke auch eine höhere Festigkeit auf.
Der Löschvorgang von hydraulischen Kalken findet fast ausschließlich in Fabriken statt, da dieser beim Löschen einen nicht kontrollierbaren Wasserzusatz auf der Baustelle erfordert und die Gefahr besteht, dass die hydraulischen Erhärtungsprozesse gleich beim Löschvorgang mit ablaufen.

Chemische Prozesse[20]

Das Brennen und Löschen von hydraulischem Kalk verlaufen analog den chemischen Reaktionen beim Luftkalk, siehe Kapitel 1.2.3.

Bei der Erhärtung des hydraulischen Kalks führen die enthaltenen hydraulischen Bestandteile, neben der Karbonatisierungsreaktion, die der Erhärtung des Luftkalks gleich ist (Kapitel 1.2.3), auch zu einer hydraulischen Erhärtung, einer Reaktion der hydraulischen Verbindungen mit dem Anmachwasser.

$$\underset{\text{Dicalciumsilicat}}{2(2\,CaO * SiO_2)} + \underset{\text{Wasser}}{x\,H_2O} \leftrightarrow \underset{\text{Calciumsilicathydrat und Kristallwasser}}{3\,CaO * 2\,SiO_2 * aq} + \underset{\text{gelöschter Kalk}}{Ca(OH)_2} \quad \text{Gl. 7}$$

[20] Schneider, U., Knoblauch, H.; Bauchemie; Werner-Verlag, 4. Auflage 1995

1.2.5 Anwendungen, Rezepturen und Verarbeitungsgrundlagen

Historische Rezepte[21]

Kalk wurde seit jeher als Bindemittel für Putze verwendet. Gebräuchliche Zusammensetzungen von Kalkmörtel waren Sumpfkalk-Zuschlagsstoff – Verhältnisse zwischen 1:2,5 und 1:4.[22] Die Wahl des Zuschlagsstoffes war in der Regel von den örtlichen Gegebenheiten vorbestimmt. So wurden beispielsweise Grubensande aus Sandgruben oder Kiessande aus Flüssen verwendet. Zur Veränderung der Eigenschaften des Putzes wurden verschiedenste Zusatzstoffe und –mittel beigegeben. Diese hatten die Aufgabe die Widerstandsfähigkeit von Putzen zu erhöhen, Risse zu minimieren oder die Haftung am Untergrund zu verbessern. So wurden im 18. Jahrhundert dem Mörtel beispielsweise Öle, Leime, Milch, Blutwasser (wässrig durchsichtige Teil des Blutes, der sich vom Blutkuchen absondert) oder Heringslake (Salzlösung, in der Heringe eingelegt waren) beigegeben. Heutzutage kommen diese Mittel in der Restaurierung teilweise noch zum Einsatz. Zur Sanierung von Putzen werden heute, genauso wie früher, Zusatzstoffe und -mittel zur Veränderung der Eigenschaften von Putzen eingesetzt.

Handelsformen Baukalk[23]

Luftkalke: ungelöscht: stückförmig oder pulverförmig
gelöscht: teigig (nass gelöscht) oder pulverförmig (trocken gelöscht)

Hydraulisch erhärtende Kalke: ungelöscht: Stückkalk oder pulverförmig
gelöscht: ausschließlich pulverförmig (stets fabrikmäßig gelöscht)

Mörtelgruppen

In der Literatur finden sich zahlreiche Einteilungen in Mörtelgruppen, beispielsweise unterteilt die ÖNORM B 3344 (2006) Mörtel in folgende Gruppen:

- Gipsmörtel (Gemisch aus Sand und Gips)
- Kalkmörtel (Gemisch aus Sand und gebranntem Kalk)
- Kalkzementmörtel (Gemisch aus Sand, gebranntem Kalk und Zement)
- Zementmörtel (Gemisch aus Sand und Zement)

---

[21] http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1988067127030

[22] Weissenbach, H.; Unterlagen zu: Demonstration historischer Kalkmörtel, Kartause Mauerbach 1997

[23] http://www.uni-weimar.de/Bauing/bauchemie/Downloads/Praktikum3S/Versuch5.pdf

Mischungsverhältnisse

Die unten angeführten Mischungsverhältnisse sind der ÖNORM B3344 (2006) entnommen. Die Eigenschaften und die Qualität des Putzmörtels hängen nicht nur von den Mischungsverhältnissen ab, sondern auch von der Qualität des verarbeiten Sandes, von der Beschaffenheit des Putzgrundes und zahlreichen weiteren Einflüssen während der Herstellung, Verarbeitung und der Nachbehandlung.

Tabelle 1: Gebräuchliche Mischungsverhältnisse für Putzmörtel in Raumteilen, lt. ÖN B3344 (2006)

Lufterhärtende Bindemittel			Hydraulisch erhärtende Bindemittel				Zuschlagsstoff	Mörtelarten
Kalkteig	Kalkhydrat	Baugips	Hydr. Kalk	Hochhydr. Kalk	Putz- und Mauer-binder	Portland-zement		
		1					1,0-3,0	Gipshältige Mörtel
1		0,2-2,0					3,0-4,0	
1							3,5-4,5	Kalkmörtel
	1						3,0-4,0	
			1				3,0-4,0	
				1			3,0-4,0	
							3,0-4,0	Kalkzement-mörtel
1,5						1	8,0-11,0	
	2					1	6,0-8,0	
			< 0,5			2	3,0-4,0	
				1		1	3,0-4,0	
			1		1		3,0-4,0	
						1	2,5-3,5	Zementmörtel

Mechanische Kennwerte

In der unten stehenden Tabelle sind wichtige mechanische Kennwerte, wie zum Beispiel die Druckfestigkeit, Zugfestigkeit oder das Schwindmaß angeben.

Tabelle 2: Mechanische Kennwerte Mechanische Kennwerte von Putzen24

Baustoff	Druckfestigkeit σ_D [N/mm²]	Zugfestigkeit σ_Z [N/mm²]	E-Modul E []N/mm²	Temperatur-dehnzahl α_T [1/(K*10^6)]	Schwindmaß ε_S [mm/m] oder [‰]
MG 1 Kalkmörtel	1,50	0,10	5.000	12	-0,80
MG 2 Kalkzementputz	4,00	0,30	6.000	12	-0,80
MG 3 Zementputz	15,00	1,50	15.000	10	-0,70
MG 4 Gipsputz	3,00	0,30	5.000	12	+1,00

Die obigen Kennwerte zeigen, dass Kalkputz und Gipsputz wesentlich geringere Festigkeiten besitzen als Zementmörtel. Weiters zeigt die Tabelle das positive Schwindmaß von Gips, welcher im Gegensatz zu Kalk und Zement, zur Vergrößerung des Volumens neigt.

Zuschlag (Sieblinien, Kornform, Gesteinsart)

Die Qualität von Kalkputzen hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, einer davon ist der Zustand des Zuschlagsstoffes. Aus diesem Grund gibt es zahlreiche Regelungen bezüglich Kornform, Korngröße und Kornzusammensetzung. Die im Folgenden angeführten Daten rund um den Zuschlag sind der ÖNORM B3344 (2006) entnommen.

Optimale Zuschlagsstoffe für Kalkputzmörtel stellen Sande mit einem geringen Hohlraumgehalt dar, deshalb sind gemischtkörnige Sande mit dichtem Gefüge bevorzugt zu verwenden. Die einzelnen Körner sollten eine geringe Porosität und eine möglichst geringe Oberfläche aufweisen, daher sind gedrungene Gesteinskörner bevorzugt zu verwenden. Langsplittrige oder scharfkantige Körner sind aufgrund der schlechten Verarbeitbarkeit und Verdichtungswilligkeit zu vermeiden. Das Größtkorn des Zuschlags ist von der Art der Anwendung abhängig und ist auf die Nennputzdicke abzustimmen.

[24] Ross, H.; Stahl, F.; Praxis-Handbuch Putz, 3. Auflage; Verlag: Rudolf Müller 2003

Schädliche Bestandteile:

Aufgrund der nachteiligen Auswirkungen der schädlichen Bestandteile im Zuschlagsstoff dürfen diese nur zu bestimmten Masseprozenten im Zuschlag vorhanden sein. Nachfolgend werden einige schädigende Bestandteile des Zuschlags und deren Auswirkungen im Mörtel beschrieben.

- Feinanteile oder abschlämmbare Bestandteile, wie z.B. Ton oder Lehm, können den Verbund zwischen Bindemittel und Zuschlagsstoff stören und somit die Festigkeit des Putzes vermindern.
- Organische Verunreinigungen, wie Humus oder Braunkohle, können ebenfalls den Verbund zwischen Bindemittel und Zuschlagsstoff unterbrechen und somit die Festigkeit vermindern.
- Chloride können die Korrosion von im Putz eingearbeiteten Metallteilen fördern.
- Sulfate oder Sulfite können in größeren Mengen, durch Sulfattreiben zur Schädigung des Mörtels führen.

Zusatzmittel

Als Zusatzmittel werden Stoffe bezeichnet, die bereits in geringer Menge die Eigenschaften des Mörtels in chemischer oder physikalischer Weise beeinflussen. Die Wirkungsweise der Zusatzmittel reicht von Luftporenbildnern über Erstarrungsbeschleunigern bis zu Dichtungsmitteln.

Zusatzstoffe

Zusatzstoffe verändern ebenfalls die Mörteleigenschaften, müssen aber in der Mischungsberechnung berücksichtigt werden. Hierzu gehören zum Beispiel hydraulische Zusätze wie Puzzolane, Trass, oder Gesteinsmehl. Puzzolane gehören zu den natürlich hydraulischen Zusatzstoffen, wie Puzzolan-, Santorinerde (Vulkanerde), oder Trass (vulkanischer Tuff), ferner finden auch künstlich hydraulische Puzzolane, wie Hochofenschlacke, Ziegelmehl etc. als Zusatzstoffe Verwendung.[25]

Anmachwasser

Das Anmachwasser muss frei von schädlichen Bestandteilen sein. Hierfür eignet sich am besten Wasser aus dem Versorgungsnetz oder Trinkwasser.

[25] Schneider, U., Knoblauch, H.; Bauchemie; Werner-Verlag, 4. Auflage 1995

1.3 Putzschäden, Ursachen und Auswirkungen

Historische Objekte waren oftmals über Jahrhunderte dem Klima ausgesetzt. Infolge diverser Umwelteinflüsse, wie Feuchtigkeit, Temperaturwechsel, saurer Regen, Salzbelastungen oder Mikroorganismen, wurde die Verwitterung der Gebäude vorangetrieben. Im Zuge der Erhaltung dieser Bauwerke ist es vor Beginn der Restaurierungsarbeiten notwendig, eine genaue Analyse der Schäden und deren mögliche Ursachen durchzuführen. Da Putzschäden verschiedenste Ursachen haben können, ist es hilfreich, diese in drei Hauptbeanspruchungsarten (physikalische, chemische und biologische Beanspruchung) zu unterscheiden. Allerdings muss hier angefügt werden, dass diese Prozesse nicht nur einzeln, sondern sehr häufig in gegenseitiger Wechselwirkung auftreten. Neben diesen Angriffsarten resultieren viele Putzschäden aber auch aus nicht sachgemäßer Herstellung des Putzes, falscher Zusammensetzung des Putzes, fehlerhaftem Putzgrund oder aus konstruktiven Fehlern in der Tragstruktur.

- Physikalische Angriffe

Eine Art des physikalischen Angriffs ist die thermische Beanspruchung. Ursachen für die Zerstörung durch Temperaturunterschiede liegen in der verschiedenartigen mineralischen Zusammensetzung der Putze. Durch die unterschiedlichen Dehnungen kommt es zu Spannungen und zu Sprengungen im Putz. Tritt zusätzlich zu den niedrigen Temperaturen (Frost) Feuchtigkeit im Putz auf, dann entsteht infolge der Volumenvergrößerung des Wassers ein massiver Sprengdruck, welcher zur Auflösung des Gefüges führen kann.
Eine andere Art des physikalischen Angriffs ist die hygrisch induzierte Dehnung[26]. Diese durch Feuchtigkeit hervorgerufenen Spannungen im Kristallgefüge bzw. in den Poren, führen oftmals zu Mikrorissen, welche das Gefüge wesentlich entfestigen.

- Chemische Angriffe

Bei den chemischen Angriffen unterscheidet man einerseits in den lösenden Angriff, welcher zur Auflösung bzw. Umbildung des Bindemittels führt und andererseits in die Zerstörung des Gefüges durch Auskristallation von schädlichen Salzen (physikalische Zerstörung).
Eine weitere wesentliche Angriffsart ist die Zerstörung von Kalk durch schwefeldioxidhaltige Luft und Schwefelsäure. Aus dem Regenwasser und dem Schwefeldioxid der Luft bildet sich schwefelige Säure und Schwefelsäure. Dies wiederum löst den Kalkstein und wandelt diesen in Gips um, siehe Gleichung 8.

[26] Koch, A.; Deformation von Fassadenplatten aus Marmor; Universitätsverlag Göttingen 2006

$CaCO_3$ + SO_2 + $2H_2O$ + $2O_2$ ←→ $CaSO_4*2H_2O$ + CO_2 Gl. 8[27]

Kalkstein Schwefeldioxid Wasser Sauerstoff Gips Kohlensäure

- Biologische Angriffe

Durch die Ansiedlung von Mikroorganismen, wie Bakterien, Pilzen, Algen, Flechten oder Moosen an der Putzoberfläche, kann es zur chemischen und/oder physikalischen Zerstörung des Putzes kommen.

Putze können durch nitrifizierene Bakterien indirekt angegriffen werden, indem diese Bakterien Ammonium über salpetrige Säure in Salpetersäure umwandeln (chemischer Angriff). Kalk wird durch die Salpetersäure in Calciumnitrat umgewandelt, wodurch es zu einer Entfestigung des Putzes kommt. Die drei unten angeführten Gleichungen beschreiben die Entstehung von Salpetersäure und die daraus resultierende Zerstörung des Bindemittels.[28]

$2NH_4^+$ + $3O_2$ ←→ $2NO_2^-$ + $4H^+$ + $2H_2O$ Gl. 9

Ammonium Sauerstoff Nitrit Wasserstoff Wasser

$2NO_2^-$ + O_2 ←→ $2NO_3^-$ Gl. 10

Nitrit Sauerstoff Nitrat (Anion der Salpetersäure)

$2HNO_3$ + CaO ←→ $Ca(NO_3)_2$ + H_2O Gl. 11

Salpetersäure Calciumoxid Calciumnitrat Wasser

Durch das vermehrte Wachsen von Algen, Moosen, diversen Organismen etc., kann es zu einem veränderten Feuchtigkeitstransport und zum physikalischen Angriff kommen.

Häufige Schäden und deren Schadensursachen

Infolge wird eine kurze Zusammenstellung der häufigsten Putzschäden und deren Schadensursachen angeführt. Diese wurde unter zu Hilfenahme unten stehender Literatur erarbeitet.[29] Wie bereits erwähnt, können Schäden im Putz verschiedenste Ursachen haben. So resultieren Schäden, neben „äußeren Faktoren“ wie Verwitterung, sehr oft auch aus nicht sachgemäßer Herstellung des Putzes, falscher Zusammensetzung des Putzes, fehlerhaftem Putzgrund oder aus konstruktiven Fehlern in der Tragstruktur.

---

[27] Ross, H.; Stahl, F.; Praxis-Handbuch Putz; Verlag: Rudolf Müller 2003

[28] Ross, H.; Stahl, F.; Praxis-Handbuch Putz; Verlag: Rudolf Müller 2003

[29] Ross, H.; Stahl, F.; Praxis-Handbuch Putz; Verlag: Rudolf Müller 2003

Maier, J.; Putz und Stuck; Fraunhofer IRB Verlag 2007

- Rissbildung:

Die Bildung von Rissen kann verschiedenste Ursachen haben. Je nach Art des Rissbildes kann man Rückschlüsse auf die Auslöser ziehen. Risse können auf verschiedene Arten unterteilt werden. Eine mögliche Unterteilungsart ist nach der Ursache der Rissentstehung, in putzbedingte, putzgrundbedingte und bauwerksbedingte Risse.[30]

- Sackrisse sind Folge von zu dicken Putzlagen oder schlechter Haftung am Putzgrund. Diese verlaufen vorwiegend in horizontaler Richtung und entstehen bereits wenn sich der Putz noch im plastischen, nicht erhärteten Zustand befindet.
- Schwindrisse können infolge unterschiedlichster Mängel auftreten. Als Ursache können zu hoher Bindemittelgehalt, zu schnelle Austrocknung, unsauberer Putzgrund oder fehlerhafte Putzschichten genannt werden. Das Rissbild ist netzartig und/oder unregelmäßig.

Die beiden oben genannten Rissarten zählen zu putzbedingten Rissen, da diese infolge falscher Mörtelzusammensetzung, schlechter Verarbeitung oder fehlender Nachbehandlung des Putzes auftreten. Die nachfolgenden Abbildungen sind der Website http://www.baumarkt.de entnommen.

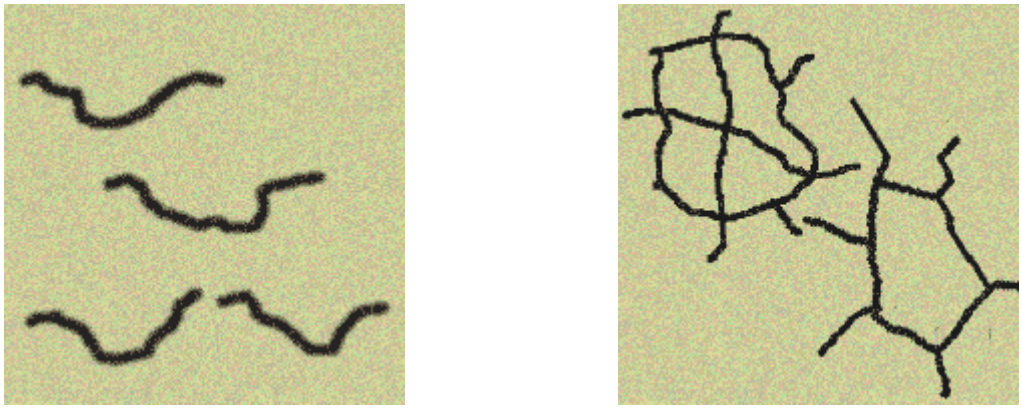

Abbildung 3: links: Sackrisse, rechts: Schwindrisse[31]

[30] Maier, J.; Putz und Stuck; Fraunhofer IRB Verlag 2007

[31] http://www.baumarkt.de

Die nachfolgenden Rissarten zählen zu den putzgrundbedingten Rissen. Diese erscheinen meist aufgrund fehlerhafter Konstruktionen in der Tragstruktur oder infolge unterschiedlicher Materialien. Die im Anschluss daran aufgezeigten Abbildungen stammen ebenfalls aus der Website http://www.baumarkt.de.

- Kerbrisse treten an den Ecken von Tür- oder Fensteröffnungen aufgrund dort vorherrschender Scherspannungen auf. Diese verlaufen meist diagonal und entstehen hauptsächlich bei Putzen mit hohem Schwindmaß.
- Fugenrisse resultieren meist aus unterschiedlichen Putzdicken infolge fehlerhaft ausgebildeter Mauerfugen oder aufgrund nur mangelhafter, übertragbarer Spannungen zwischen Mauerwerk und Putz. Diese Risse verlaufen entlang der Lager- und Stoßfugen des Mauerwerks.
- Wärmebrückenrisse: diese Risse bilden sich im Bereich von Wärmebrücken und verlaufen zumeist in horizontaler Richtung.

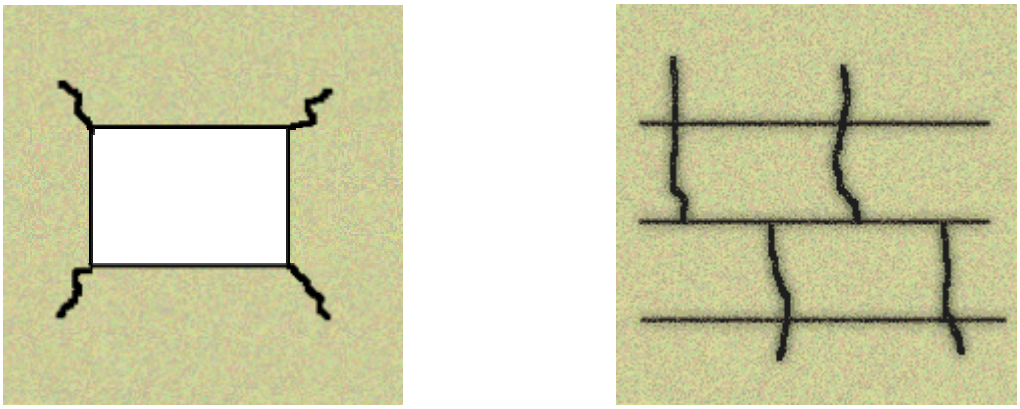

Abbildung 4: links: Kerbrisse, rechts: Fugenrisse[32]

- Setzungsrisse treten auf, wenn sich das Fundament von Gebäuden setzt.
- Schubrisse resultieren aus horizontal wirkenden Schubspannungen die von Decken, Gewölben oder Dachstühlen ausgelöst werden.

Die beiden zuletzt genannten Rissarten kann man zu den bauwerksbedingten Rissen zählen. Diese treten zumeist dann auf, wenn die Tragsicherheit vom Bauwerk nicht oder nur unzureichend gegeben ist. Hier ist es unbedingt notwendig, vor der Sanierung des Putzes die ursprüngliche Schadensquelle zuerst wiederherzustellen. Die nachstehende Abbildung zeigt einen Deckenschubriss und ist der Webseite http://www.baumarkt.de entnommen.

[32] http://www.baumarkt.de

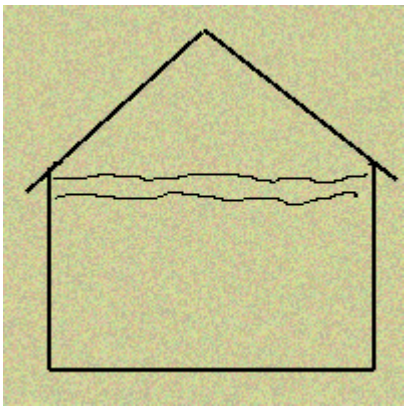

Abbildung 5: Deckenschubrisse[33]

- Unzureichende Mörtelfestigkeit:

Zu geringer Bindemittelgehalt, zu viele abschlämmbare Bestandteile (Schluff, Ton), zu schneller Entzug des Anmachwassers durch den Putzgrund oder zu schnelle Austrocknung der Putzfläche, führen zu geringer Mörtelfestigkeit. Als Folge führt dies zum Absanden des Putzes oder dazu, dass sich der Putz vom Putzuntergrund löst. Im Fall einer unzureichenden Haftung des Putzes am Untergrund kann die Ursache auch im falschen Aufbau des Putzes liegen.

- Feuchtigkeitsschäden:

Feuchtigkeitsschäden im Außenputz gehen heutzutage sehr häufig auf die unsachgemäße Ausbildung von Tragsystemen und damit entstehenden Kältebrücken zurück. Hingegen sorgt im inneren des Putzes meist auftretendes Kondenswasser oder fehlende Ableitung von anfallendem Kondenswasser für Putzschäden.

- Zerstörung/Schädigung des Mörtelgefüges:

Infolge physikalischer, chemischer oder biologischer Beanspruchungen, kann es zur Zerstörung des Mörtelgefüges kommen. Die Wirkungsmechanismen dieser Angriffsarten wurden zu Beginn dieses Kapitels genau beschrieben.

[33] http://www.baumarkt.de

1.4 Sanierung und Restaurierung/Konservierung

Zur Erhaltung der Bausubstanz benötigen Bauwerke von Zeit zu Zeit eine Restaurierung der Bausubstanz, da infolge äußerer Umwelteinflüsse oder Mängel in der Bausubstanz Schädigungen auftreten. Nachdem es für jeden Schadensfall eine Reihe unterschiedlicher Sanierungsverfahren gibt, muss vor Erstellung eines Sanierungskonzeptes eine genaue Schadensanalyse ausgearbeitet werden. Bei der Erarbeitung von Sanierungskonzepten sollten immer das gesamte Bauwerk und die Gesamtheit der Schäden beachtet werden und auch allenfalls nachfolgende Sanierungsarbeiten mit berücksichtigt werden.

1.4.1 Herkömmliche Verfahren

Erneuerung[34]

Als nachdrücklichste Maßnahme bei den Verfahren der Sanierung muss die Erneuerung von Putzen genannt werden. Diese Methode findet dann Anwendung, wenn alle anderen Maßnahmen in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht ausgeschlossen werden müssen. In diesem Fall wird der bestehende Putz abgeschlagen, der Untergrund entsprechend aufbereitet, eventuell die Mauer entfeuchtet und anschließend wird der neue Putz aufgebracht. Anwendung finden hier, neben allen gebräuchlichen Putzen, auch Sanierputze. Der Sanierputz soll im Wesentlichen als Opferschichte zur Mauerwerksentfeuchtung und zur Aufnahme von Salzen aus dem Mauerwerk dienen. Häufig handelt es sich jedoch schlichtweg um Sperrputze, die die Feuchtigkeit noch weiter in die Höhe treiben.

Sanierung mit Kalksystemen

Putzsanierung mittels Kalkschlämmen

Diese Methode dient zum Verfüllen von Rissen bis zu einer Rissbreite von 0,2mm[35]. Als Ausgangsmaterialien werden Weißkalkhydrat, mineralische Füllstoffe und Anmachwasser verwendet.

[34] Maier, J.; Putz und Stuck; Fraunhofer IRB Verlag 2007

[35] http://www.kalk-kontor.de/media/ti_kalkschlaemme.pdf

Putzsanierung mittels Verpressmörtel

Verpressmörtel dienen der Verfüllung von Rissen und Hohlstellen im Putz. Auf der Basis von Luftkalkmörtel weist dieser hohe Duktilität auf und passt sich somit gut an den bestehenden Putz an.

Konservierung mit KSE und/oder Kunstharzen

Konservierung mittels Kieselsäureester

Kieselsäureester wurde, in stark vereinfachter Weise, erstmals zu Beginn des 20. Jahrhunderts eingesetzt. Seitdem gab es eine Reihe von Entwicklungen in dem Gebiet der Festigung mit Kieselsäureester. So wurde früher mit Orthokieselsäuretetramethylester, welches durch das sich abspaltende Mathanol toxisch ist, gearbeitet. Heute verwendet man deshalb ein nicht toxisches Orthokieselsäuretetraetylester.

Die Festigung erfolgt durch die Ausbildung von überbrückender, wasserhaltiger, amorpher SiO_2 – Gele im Porenraum des Putzes, einer Art „Verseifung“, und verläuft in zwei Schritten.

Beim ersten Schritt, der Hydrolyse, spaltet sich Ethanol ab und es bildet sich eine instabile Orthokieselsäure. Die Hydrolyse kann durch Zugabe von Katalysatoren, Säuren oder Basen, beschleunigt werden.

Im zweiten Schritt bildet sich auf der Orthokieselsäure durch die Abspaltung von Ethanol ein amorphes, wasserhaltiges SiO_2 – Gel.

So entsteht im Putz ein neues, rein mineralisches bzw. anorganisches Bindemittel ohne schädliche Nebenprodukte.

$Si(OC_2H_5^-)_4$	+	$4H_2O$	←→	SiO_2 * aq	+	$4(C_2H_5^-)OH$ ↗	Gl. 12[36]
Kieselsäureester		Wasser	Katalysator	Kieselgel		Ethanol, verdampft	

Konservierung mittels Kunstharzen[37]

In der Restaurierung werden auch polymere Kunstharze zur Festigung von Putzen verwendet. Diese polymeren Kunstharze sind synthetische Stoffe, welche aus kettenförmigen Molekülzusammenschlüssen bestehen. Die nachfolgende Abbildung zeigt den chemischen Aufbau des Polyvinylacetatharzes, dieses wird in Österreich zurzeit nicht eingesetzt. Gemäß der Diplomarbeit von T. Bielefeld (2001) sollte die Lagerungszeit von Polymeren mit maximal 6 Monate begrenzt werden, da diese ansonsten infolge thermischer Zersetzung Essigsäure abspalten können. Hierbei ist fraglich, ob es im Putz ebenfalls zur Abspaltung von Essigsäure kommt.

[36] Schneider, U.; Knoblauch, H.; Bauchemie; Werner-Verlag, 4. Auflage 1995

[37] Bielefeld, T.; Diplomarbeit 2001

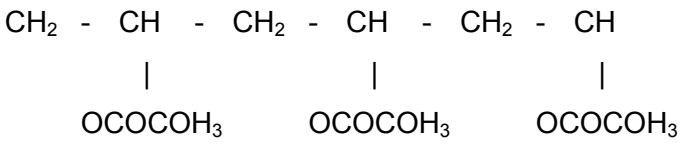

Abbildung 6: Chemischen Aufbau von Polyvinylacetatharz[38]

Anwendung finden diese als Thermoplaste, Elastomere oder Duroplaste in fester Form, als Lösung oder als Dispersion.

1.4.2 Kalkwasserfestigung

Die Festigung mittels Kalkwasser ist eine sanfte Festigungsmethode und kann nur zur Festigung von Putzen mit geringer Putzschädigung, wie minimaler Gefügezerstörung (Überbrückung von Rissen bis 2 – 50µm²) oder Absanden, verwendet werden. Kritiker dieser Konsolidierungsmethode bemängeln, dass die Festigung infolge der Einbringung von Calciumhydroxid in den Putz, nicht immer reproduzierbar ist.

Begriffsbestimmung Kalkwasser

Kalkwasser oder Calciumhydrat ist eine klare, gesättigte Lösung von Caciumhydroxid in Wasser. Dieses entsteht bereits nach wenigen Stunden über eingesumpften Kalkhydrat, durch den Wasserüberschuss beim Nasslöschen. Man kann Kalkwasser auch herstellen, indem man Sumpfkalk zusätzliches Wasser beigibt. Hierbei entsteht erst Kalkmilch, eine milchige, nicht stabile Flüssigkeit mit Überschuss an Calciumhydroxid. Nach wenigen Stunden sinkt das Calciumhydroxid zu Boden und das darüber stehende Wasser löst nach und nach Calciumhydroxid aus der Suspension, bis es gesättigt ist. Der PH-Wert liegt bei frischem Kalkwasser im stark basischem Bereich (PH 13+) und pendelt sich mit der Zeit auf einen PH-Wert von ca. 12,7 ein. Die Löslichkeit von Calciumhydroxid in Wasser beträgt bei einer Raumtemperatur von ca. 20°C ca. 1,7g $Ca(OH)_2$ in einem Liter Wasser[39].

Wirkungsweise

Die Konsolidierung mittels Kalkwasser erfolgt durch Einbringen einer Calciumhydroxid-Lösung, welche in den Poren neues Calciumcarbonat bildet und entspricht im Wesentlichen der Erhärtung von Kalk.

---

[38] Bielefeld, T.; Diplomarbeit 2001

[39] Schneider, U., Knoblauch, H.; Bauchemie; Werner-Verlag, 4. Auflage 1995

Grundlage für die Karbonatisierung ist die Bildung von Kohlensäure, durch die Lösung von Kohlendioxid im Wasser. Die Menge des gelösten Kohlendioxids im Wasser ist von Kalkgehalt und PH-Wert des Wassers abhängig. Die Lösung von Kohlendioxid im Wasser basiert auf folgender Reaktionsgleichung:

$H_2O + CO_2 \leftrightarrow H_2CO_3$- Gl. 13

Wasser — Kohlendioxid — Kohlensäure

Die Dissoziation der Kohlensäure verläuft, in basischer Umgebung, in zwei Schritten, wobei es durch den Zusammenschluss von OH^- und H^+, zur Senkung des PH-Wertes kommt.

$H_2CO_3 + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H^+ + H_2O$ Gl. 14

Kohlensäure — Wasser — Hydrogencarbonat — Wasserstoff-Proton — Wasser

Diese Dissoziationsstufen sind stark vom vorliegenden PH-Wert abhängig. So liegt in einer Lösung mit einem PH-Wert zwischen 6,4 und 10,3 hauptsächlich HCO_3^- vor und in den Bereichen darunter oder darüber überwiegend CO_3^{2-}.

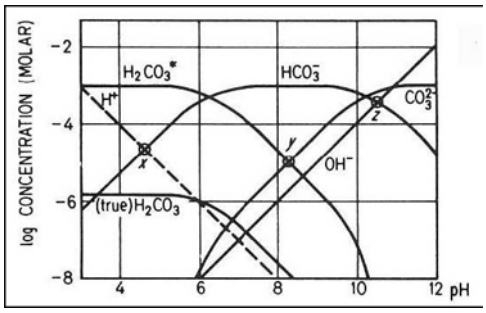

Abbildung 7: Gleichgewicht von HCO_3^- und CO_3^{2-} in Abhängigkeit vom PH-Wert[40]

$HCO_3^- + OH^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + H_2O$ Gl. 15

Hydrogencarbonat — Hydroxid-Ion — Carbonat-Ion — Wasser

$Ca^{2+} + OH^- + HCO_3^- \leftrightarrow CaCO_3 + H_2O \nearrow$ Gl. 16

Calcium-Ion — Hydroxid-Ion — Hydrogencarbonat — Calciumcarbonat — freiwerdende Feuchtigkeit

[40] Stumm, W.; Morgan, J. J.; Aquatic Chemistry 1996

Durch den Zusammenschluss von Ca^{2+} und CO_3^{2-} kommt es zur Bildung von Calciumcarbonat $CaCO_3$. Die Karbonatisierung kann mehrere Monate oder sogar Jahre in Anspruch nehmen. Die geringe Reaktionsgeschwindigkeit resultiert daraus, dass das aus der Luft beigestellte CO_2, im Wasser als Kohlensäure in die Porenräume diffundieren muss.
Die obigen Reaktionsgleichungen zeigen die chemischen Prozesse, welche bei der Kalkwasser – Festigung ablaufen.[41]

1.4.3 Festigung durch Biomineralisation

Grundlagen[42]

Die Biomineralisation ist einer der ältesten Prozesse auf der Erde. Bei diesem Vorgang entstehen aus der Stoffwechseltätigkeit von Organismen mineralische Produkte. Am weitesten verbreitet ist die Ausfällung von Calciumcarbonat (Calcit, Vaterit und Aragonit) und Kieselsäure. Durch diesen Prozess entstehen Muscheln, Algen, Seeigel, Eierschalen oder Knochen.
Die organische Ausfällung von Kalk basiert auf folgendem Prinzip:
Biologisch ausgefällter Kalk besteht stets aus einer organischen Matrix und einem anorganischen Mineral, wobei das Verhältnis zwischen organischem und anorganischem Material stark unterschiedlich sein kann. Mikroorganismen wandeln gelöste Stoffe, durch deren Stoffwechsel, in ungelöste Stoffe um und lagern diese am organischen Material ab. Der Vorgang der direkten und der indirekten Kalkausfällung wird später noch genauer beschrieben. Ergebnis der biomineralischen Tätigkeit sind kissen- oder knollenförmige Kalkablagerungen, die sich als neues kristallines Schutznetz, welches dem Originalmaterial entspricht, im zu konsolidierenden Material bilden.

Methode „CALCITE“

Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen, wie beispielsweise von ATLAS, et. al. (1988), ORIAL, et. al. (1993), TIANO P. (1995), oder RODRIGUEZ-NAVARRO et. al. (2002) haben bestätigt, dass verschiedene stoffwechselbedingte Aktivitäten von Bakterien zur Kalkausfällung führen. Nach RODRIGUEZ-NAVARRO et. al. (2002) ist die bakteriell induzierte Calciumcarbonatausfällung ein sehr komplexer Prozess, bei dem aerobe, heterotrophe Bakterien einen direkten und einen indirekten Beitrag zu Ausfällung von Calciumcarbonat leisten.

---

[41] Kretschmer, A.; Diplomarbeit, Kalkhydratwasser – Festigung 2003
Kerner, C.; Diplomarbeit, Konsolidierung von historischen Putzen 2005

[42] http://www.verceram.univ-rennes1.fr/JLivage/biomineralisation.pdf

Das Bakterium leistet einen direkten Beitrag zur Ausfällung von $CaCO_3$, indem es infolge seines hohen Oberflächenvolumenverhältnisses eine reaktive, geo-chemische Schnittstelle darstellt. Aerobe, heterotrophe Bakterien können Biofilme, sogenannte EPS (extrazelluläre polymere Substanzen) bilden, welche heterogene Keimstellen für mineralische Ablagerungen darstellen. Die Zellenwände lebender Bakterien oder die Bakterienhülle toter Bakterien bestehen aus Carboxyl-, Hydroxyl- oder Phosphatgruppen. In alkalischen Bereichen werden diese Zellenwände statisch negativ geladen und können somit Ca^{2+}-Ionen aus der Lösung örtlich an sich binden. Das für die Ausfällung von Calciumcarbonat notwendige CO_2 entsteht entweder infolge der Atmung der Bakterien im Wasser oder wird direkt aus der Lösung bereitgestellt. Die unten stehende Reaktionsgleichung beschreibt den wesentlichen direkten Beitrag der Bakterien zur Ausfällung von Calciumcarbonat.

$$\underset{\text{Calcium-Ion}}{Ca^{2+}} + \underset{\text{Hydroxid-Ion}}{CO_3^{2-}} \leftrightarrow \underset{\text{Calciumcarbonat}}{CaCO_3} \qquad \text{Gl. 17}$$

Da Ca^{2+} nicht von den Bakterien selbst gebildet werden kann, wird bei den Untersuchungen von RODRIGUEZ-NAVARRO et. al. (2002), Calciumacetat als Calciumquelle in der Nährlösung beigegeben und dissoziiert in Wasser gemäß nachstehender Gleichung. Bei diesem Prozess wird allerdings Essigsäure freigesetzt, welche Kalk lösen kann.

$$\underset{\text{Calciumacetat}}{Ca(CH_3COO)_2} + \underset{\text{Wasser}}{2H_2O} \leftrightarrow \underset{\text{Calcium-Ion}}{Ca^{2+}} + \underset{\text{Essigsäure}}{2CH_3COOH} + \underset{\text{Hydroxid-Ion}}{2(OH)^-} \qquad \text{Gl. 18}$$

Die Lösung von Kohlendioxid aus der Luft und die nachfolgende Dissoziation der Kohlensäure zu CO_3^{2-} laufen analog der chemischen Gleichgewichtsreaktionen ab, welche im Kapitel 1.4.2 (Gleichungen 13 bis 15) bereits genauer beschrieben wurden.

Als indirekten Beitrag zur Calciumcarbonatausfällung werden verschiedene, metabolisch induzierte Vorgänge, wie Stoffwechselaktivitäten von Bakterien, verstanden. Proteine werden von Bakterien als Energiequelle genutzt und bestehen aus Ketten von Aminosäuren. Infolge des Stoffwechsels der Bakterien wird die Aminogruppe (NH_2^+) von der Carboxylgruppe (COO^-) und der restlichen Aminosäure abgespalten. Dieser Vorgang bewirkt physikalisch-chemische Veränderungen im Umfeld der Bakterien. So kommt es infolge der Veränderung der Ionenkonzentration direkt an den Zellwänden, im Vergleich zum restlichen Umfeld, zu einer Übersättigung an Protonen und dadurch wiederum zu einem lokalen Anstieg des PH-Wertes. Beispielsweise erzeugen die Bakterien *Bacillus cereus* und *Myxococcus xanthus* als Stoffwechselnebenprodukt infolge des Proteinabbaus Ammoniak (NH_3).

$NH_3(aq)$ + H_2O ←→ NH_4^+ + OH^- Gl. 19

Ammoniak Wasser Ammonium-Ion Hydroxid-Ion

Die obige Reaktionsgleichung zeigt, dass es infolge des Stoffwechselprozesses zu einer Steigerung der OH^--Ionenkonzentration an der Zellwand des Bakteriums und somit zu einem Anstieg des PH-Wertes kommt. Der restliche Vorgang verläuft analog dem direkten Beitrag zur $CaCO_3$ – Ausfällung. Das durch die Biomineralisierung entstandene Calciumcarbonat bildet ein kristallines, räumliches Schutznetz, welches aus Kristallen in allen Kristallformen (Vaterit, Aragonit oder Calcit) gebildet werden kann[43].

Biomineralisierung im Rahmen dieser Diplomarbeit:

Die bakterielle Festigung ist ähnlich der Konsolidierung mit Kalkwasser eine sanfte Festigungsmethode. Anwendung findet diese strukturelle Festigungsmethode ebenfalls bei Putzen mit geringer Putzschädigung, wie minimaler Gefügezerstörung (Überbrückung von Rissen bis 2 – 50μm^2) oder Absanden.

In der vorausgehenden Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) wurde die bakterielle Festigung anhand zweierlei Bakterien, den Bodenbakterien *Bacillus cereus* und *Myxococcus xanthus,* getestet. Im Zuge der von Claudia Kerner durchgeführten Untersuchungen erwies sich die Arbeit mit dem Bakterium *Myxococcus xanthus* als nicht zielführend, da es keine Sporen bilden kann und somit nur für eine begrenzte Zeit lebensfähig ist. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Diplomarbeit die bakterielle Konsolidierung ausschließlich mit dem Bakterienstamm *Bacillus cereus* erforscht.

Bacillus cereus ist ein grampositives, stäbchenförmiges, Sporen-Bildendes, fakultativ aerobes Bodenbakterium der Gattung *Bacillus* und konnte bereits an historischen Putzen (z.B.: Kartause Mauerbach) nachgewiesen werden. Optimale Lebensbedingungen für den *Bacillus cereus* liegen im Temperaturbereich von ca. 28 bis 35 °C und einem PH-Wertbereich von ca. 5 bis 9. Da *Bacillus cereus* Sporen bildend ist, kann es aber auch unter schlechten Bedingungen, über eine lange Zeit hinweg überlebensfähig bleiben.

[43] Rodriguez-Navarro, C. et. al.; Conservation of Ornamental Stone by Myxococcus xanthus-Induzed Carbonate Biomineralization; 2002

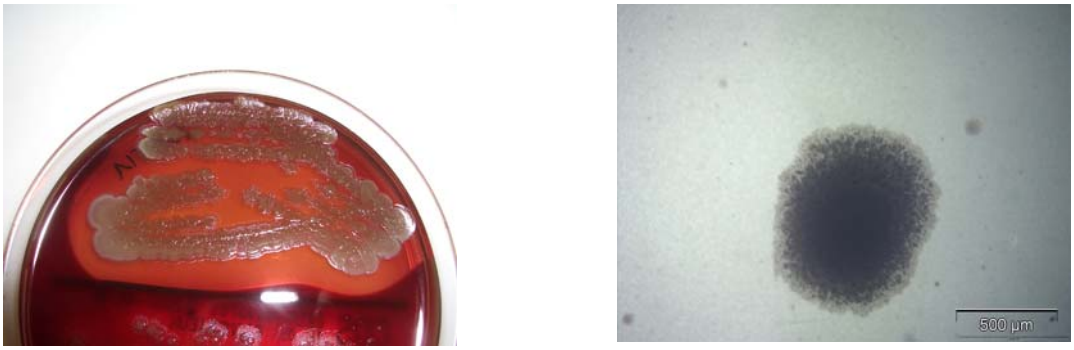

Abbildung 8: links: Bacillus cereus auf Blut-Nährplatte, rechts: Einzelkultur Bacillus cereus

Die obige Abbildung zeit links das Bodenbakterium *Bacillus cereus* auf einer Blut-Nährplatte und rechts sieht man eine Einzelkultur auf einer Malzplatte.

2. METHODISCHER ANSATZ

Ziel dieser Arbeit war es, die strukturelle Festigung von historischen Kalkputzen zu untersuchen. Als Festigungsmethoden wurden die Kalkwasserfestigung und die Konsolidierung mittels *Bacillus cereus* untersucht. Bezug nehmend auf die Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) wurde die Biomineralisierung, im speziellen mit dem Bodenbakterium *Bacillus cereus*, genaueren Untersuchungen unterworfen. Die hierfür notwendigen Versuche wurden an Laborproben und vor Ort an Prüfflächen an der Kartause Mauerbach durchgeführt.

2.1 Angewandte Prüfmethoden

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden verschiedenste zerstörungsfreie und zerstörende Untersuchungen an den Putzflächen durchgeführt. Im Folgenden werden alle angewendeten Untersuchungsmethoden ausführlich beschrieben.

2.1.1 Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit

Als Ultraschall werden Schallwellen bezeichnet, die im Bereich zwischen 20 kHz und 1GHz, und somit über der menschlichen Hörschwelle, liegen. Ultraschall kann sich in Festkörpern als Longitudinalwellen und/oder Transversalwellen ausbreiten[44]. Longitudinalwellen können auch als Primärwellen bezeichnet werden. Diese breiten sich zwischen den Teilchen über Zug- und Druckkräfte aus. Anders breiten sich Transversalwellen, auch Sekundärwellen genannt, normal zur Schwingungsrichtung über Schub- und Scherkräfte aus.
Es gibt einige Arten wie Ultraschalluntersuchungen durchgeführt werden können, beispielsweise durch das Intensitätsverfahren, das Impuls-Laufzeitverfahren oder das Laufzeitverfahren. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde für die nachfolgenden Untersuchungen das Laufzeitverfahren angewendet. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein Durchschallungsverfahren, wo die wesentlichen Größen die Laufzeiten bzw. die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten darstellen. Hierfür werden Sender und Empfänger an den Prüfkörper angelegt und die Laufzeit der Schallwellen vom Sender zum Empfänger gemessen. Über den Abstand zwischen Sender und Empfänger können die Laufzeiten in Geschwindigkeiten umgerechnet werden. Da dieses Verfahren zerstörungsfrei ist, eignet es sich besonders gut für die Untersuchung von historischen Putzflächen.

[44] Fleischer, G.; Dissertation: Beurteilung von Ultraschallmessungen 2002

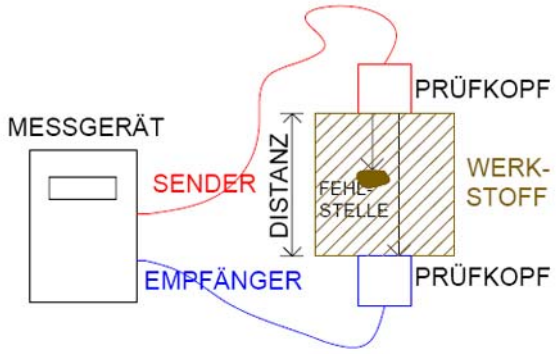

Abbildung 9: Versuchsanordnung Ultraschalluntersuchung[45]

A) Ultraschallmessungen im Labor

Bei den im Labor angewendeten Ultraschallmessungen wurde der Probekörper in einem Stativ, mit ca. 2 Bar Anpressdruck, eingespannt (Firma LABEK) und die Laufzeit der Ultraschallwellen vom Sender zum Empfänger gemessen. Dies erfolgte unter zu Hilfenahme eines EG-Meters der Firma LABEK. Die Laufzeit wird in µs gemessen und die Geschwindigkeit über die Messdistanz errechnet.

Um Unregelmäßigkeiten aufgrund von Fehlstellen im Probekörper, wie Unregelmäßigkeiten in der Porenstruktur oder der Korngrößenverteilung, vorzubeugen, wurden die Messungen in drei Richtungen, jeweils um 60° verschwenkt, durchgeführt.

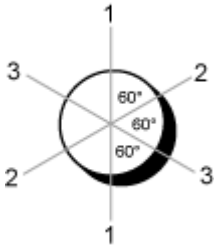

Abbildung 10: Prüfkörper bei Ultraschlluntersuchung

Weitere Fehlerquellen können beispielsweise die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit oder die Feuchtigkeit des Probekörpers[46] sein.

[45] Trauninger, D.; Diplomarbeit: Beschichtungssysteme auf Natursteinoberflächen 2007

[46] Fleischer, G.; Dissertation: Beurteilung von Ultraschallmessungen 2002

Abbildung 11: Messgerät Ultraschall

Abbildung 12: Einspannvorrichtung Ultraschall

B) Ultraschallmessungen in Mauerbach

Die Versuche an den Putzflächen der Kartause Mauerbach basieren auf den selben Grundlagen und wurden mit einem portablen Messgerät Ultasonic Tester C369 der Firma MATEST SRL durchgeführt.

Ausgehend von einem 10 cm Raster wurden Ultraschalllaufzeiten gemessen. Der Sender und der Empfänger wurden je in der Mitte der Quadrate angebracht. Die Messung erfolgte jeweils von Quadrat zu Quadrat in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Bei allen Messungen lagen die Messpunkte an den selben Stellen. Mittels gemessener Laufzeiten und der Distanz von jeweils 10 cm konnten die Geschwindigkeiten berechnet werden.

Da vor Ort an der Kartause Mauerbach stets unterschiedliche Wetterbedingungen herrschten und laut der Dissertation von G. Fleischer, verschiedenartige Witterungsbedingungen die Ergebnisse stark beeinflussen und verfälschen können, sind die Resultate dementsprechend zu werten.

Parallel zu den Ultraschalluntersuchungen wurde an den Messtagen die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Feuchtigkeit im Putz bestimmt.

2.1.2 Absanden

Die Abnahme von Abziehbildern (Peeling Test) dient der Abschätzung des Absandverhaltens der Putzflächen. Allenfalls entstandene Konsolidierungen konnten somit durch ein reduziertes Absanden festgestellt werden. Diese Methode ist zerstörungsfrei und wurde als begleitende Untersuchung herangezogen.

Versuchsaufbau und Auswertung:

Auf die zu prüfenden Flächen wurde ein Gewebeband geklebt und mit der Hand gleichmäßig festgedrückt. Danach wurde das Band unter Zuhilfenahme einer Federwaage (Fa. DR. SCALE) gleichmäßig langsam abgezogen. Über den mit der Federwaage gemessenen Widerstand beim Abziehen und dem Rückstand auf dem Gewebeband, konnte abschließend eine Quantifizierung erfolgen.

Zur Abschätzung der Menge der Rückstände auf dem Band wurden Vergleichstafeln von TERRY & CHILINGAR (1955) herangezogen. Diese haben sich als vorteilhaft erwiesen, da man im Speziellen zu geringe Rückstände stark überschätzt.[47] Eine weitere Fehlerquelle bei der Durchführung der Peelingtests stellt die Feuchtigkeit der Putzflächen dar. Aus diesem Grund sollten die Peelingtests immer bei gleich bleibenden Feuchtigkeiten durchgeführt werden.

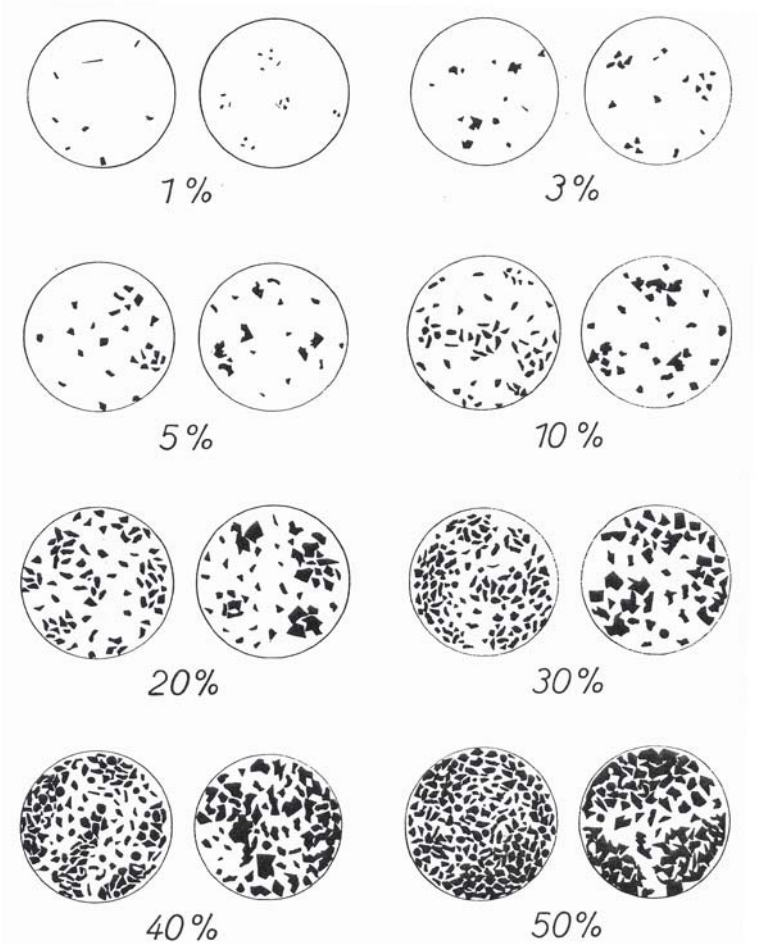

Abbildung 13: Schaubild TERRY & CHILINGAR (1955)

[47] Müller, G.; Sediment-Petrologie 1; E. Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung 1964

2.1.3 Wasseraufnahmefähigkeit

Das Wassereindringverhalten der zu testenden Putze wurde mit dem Karsten´schen Prüfröhrchen bestimmt. Als Vorteil dieses Verfahrens muss erwähnt werden, dass es sowohl im Labor als auch auf der Baustelle zerstörungsfrei angewendet werden kann.

Versuchsaufbau und Auswertung:
Das Prüfröhrchen besteht aus einer Glocke mit einer lichten Weite von 3 cm und einem darauf anschließendem, 10 cm hohem Glasrohr. Das Glasrohr besitzt eine Maßeinteilung im ml und kann auf 0,1 ml genau abgelesen werden.[48]

Abbildung 14: Karsten´sches Prüfröhrchen

Zum Aufbau des Versuches wurde das Karsten´sche Prüfröhrchen mittels Dichtmasse, in diesem Fall Kinderknetmasse, auf dem Prüfkörper aufgesetzt. Im nächsten Schritt wurde Leitungswasser bis zur Nullmarke aufgefüllt und in regelmäßigen Zeitabständen, z.B.: alle 30 Sekunden, die Menge des eingedrungenen Wassers abgelesen. Sobald 1 cm³ Wasser vom Prüfkörper aufgenommen ist, wurde dieses mit einer 1 cm³-Pipette, zwecks Gleichhaltung des Wasserspiegels, wieder nachgefüllt. Der bei diesem Versuch vorherrschende Druck von 10 cm Wassersäule kann mit einer Starkregenbelastung von ca. 100 km/h gleichgesetzt werden.[49]

Das Ergebnis dieses Versuchs ist der Wasseraufnahmekoeffizient w. Dieser gibt die vom Baustoff aufgenommene Wassermenge pro Fläche in Abhängigkeit von der Wurzel der Zeit an.

---

[48] Karsten, R.; Bauchemie; Straßenbau Chemie und Technik Verlags GmbH 1960

[49] http://www.hankammer.de/Instrumentarium_/Karsten/karsten.html

$$w = \frac{m_w}{\left(A \cdot \sqrt{t}\right)}$$ Gl. 20[50]

w... Wasseraufnahmekoeffizient [kg / (m² * √ h)]

m_W... Wassermenge [kg]

A... Fläche [m²]

t... Zeit [h]

Als Wasseraufnahmekoeffizient darf nur der absolute Wert herangezogen werden, der im Bereich des linearen Anstiegs mit der Wurzel aus der Zeit liegt.[51]

Zur Auswertung der Ergebnisse können die im allgemeinen Hochbau geltenden nachstehenden Richtwerte[52] verwendet werden.

w > 2,0 saugend

w ≤ 2,0 wasserhemmend

w ≤ 0,5 wasserabweisend

w ≤ 0,001 wasserdicht

2.1.4 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde mit Hilfe einer Gesteins-Prüfpresse der Marke quickTest MCE ermittelt. Die Festigkeit wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit nur an den, im Labor hergestellten, Prüfkörpern bestimmt. Da es sich bei diesem Versuch um eine zerstörende Untersuchungsmethode handelt, wurde dieser zum Schluss der Testreihe an der TU-Wien durchgeführt. Der Versuch basiert auf den Grundlagen der ÖNORM B 3124-4 (1981) Prüfung von Natursteinen und wurde auf die Prüfung von Kalkputzen umgelegt.

[50] Ross, H., Stahl, F.; Praxis-Handbuch Putz, 3. Auflage, Verlag Rudolf Müller 2003

[51] ÖNORM EN 1925 1999

[52] Trauninger, D.; Diplomarbeit: Beschichtungssysteme auf Natursteinoberflächen 2007

Abbildung 15: Prüfung der Spaltzugfestigkeit

Versuchsaufbau und Auswertung:
Die Prüfkörper wurden in die Presse eingespannt und bis zu einer Vorspannung von 10N weggesteuert mit 0,5 mm/min belastet. Sobald die Vorspannkraft erreicht wurde, erfolgte die Belastung mit 10 N/s kraftgesteuert, bis zum Buch des Prüfkörpers.
Das Ergebnis dieser Versuchsanordnung ist die Bruchkraft in N, welche über nachstehende Formel in die Spaltzugfestigkeit umgerechnet werden kann.

$$\sigma_{Spz} = \frac{2 \cdot F_{max}}{b \cdot h \cdot \Pi} \qquad \text{Gl. 21}$$

σ_{Spz}... Spaltzugfestigkeit [N/mm²]
F_{max}... Bruchkraft [N]
b... Breite des Prüfkörpers [mm]
h... Höhe des Prüfkörpers [mm]
π... Pi

2.1.5 Karbonatisierung

Mittels der Indikatorflüssigkeit Phenolphthalein wurde untersucht, ob die Karbonatisierung von Kalkputz bereits abgeschlossen ist. Dieser Vorgang ist vom PH-Wert der getesteten Probe abhängig. Dieser beschreibt den negativen Logarithmus der H_3O^- Konzentration und reicht von 0 bis 14.[53] Der Bereich von 0 bis 7 wird als sauer, der Bereich von 7 bis 14 als alkalisch bezeichnet. Bei einem PH-Wert im Bereich von 0 – 8,2 ist gelöstes Phenolphthalein farblos, bei einem höheren PH-Wert färbt sich die Lösung rötlich-lila und wird im stark

[53] Schneider, U., Knoblauch, H.; Bauchemie; Werner-Verlag, 4. Auflage 1995

alkalischen Bereich (PH-Wert ca. 14) wieder farblos.[54] Im Zuge der fortschreitenden Karbonatisierung des Kalkputzes sinkt der PH-Wert von ca. 13 bis zu einem PH-Wert von 8 ab.[55] Die Reduktion des PH-Wertes, also die Karbonatisierung, kann somit durch die Indikatorflüssigkeit Phenolphthalein sichtbar gemacht werden. So kann man davon ausgehen, dass die Karbonatisierung bei einer rosa Färbung noch nicht vollständig abgeschlossen ist.

Abbildung 16: Karbonatisierung

2.1.6 Feuchtigkeitsmessung

Die Feuchtigkeit im Putz wurde mit Hilfe eines Feuchtigkeitsmessers der Firma Wetekom bestimmt. Bei dieser Methode werden zwei Elektroden an den Werkstoff gedrückt und der Feuchtigkeitsgehalt anhand einer Leitfähigkeitsmessung bestimmt. Diese Messung wurde als begleitende Untersuchung durchgeführt und dient im Wesentlichen dazu, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu prüfen, da die Feuchtigkeit beispielsweise bei der Ultraschalluntersuchung die Resultate deutlich beeinträchtigen kann.[56]

Abbildung 17: Feuchtemessgerät FA. Wetekom[57]

[54] http://de.wikipedia.org/wiki/PH-Wert

[55] http://www.putz-dekor.org/abc/c_Carbonatisierung.htm

[56] Fleischer, G.; Dissertation: Beurteilung von Ultraschallmessungen 2002

[57] http://www1.westfalia-versand.at/marken/wetekom/feuchtemesser.html

2.1.7 Bestimmung der Eindringtiefe der Bakterien (PAS)[58]

Bei diesem Versuch wurde die Eindringtiefe von PAS-positiven Bakterien mittels der Perjodsäure-Schiff-Reaktion ermittelt. Diese Reaktion bewirkt eine Anfärbung des Biofilms, in diesem Fall des Muzins des *Bacillus cereus*, in fuchsinrote Farbe.

Der Färbeprozess verlangt einen genau einzuhaltenden Ablauf:
Der erste Schritt bestand darin, dass die Proben 30 Minuten in 70% Ethanol, in Rollrandgläsern angefeuchtet wurden. Nach der vorgegebenen Zeit musste das Ethanol gut abpipettiert werden. Das Abpipettieren der Flüssigkeit musste ebenso bei jedem nachfolgenden Schritt sorgfältig durchgeführt werden. Im Anschluss wurden die Proben 5 bis 8 Minuten in 0,75%iger Perjodsäurelösung (0,75% Perjodsäure in Aquadestillat) und danach für 5 Minuten in Ethanol geschüttelt. Vor der Färbung in Schiff´s Reagenz mussten die Proben noch für 5 Minuten mit fließendem Leitungswasser gespült werden. Für die Färbung selbst wurden die Proben ca. 30 Sekunden in Schiff´s Reagenz (SIGMA S-5133) geschüttelt, wobei die fortschreitende Färbung der Flüssigkeit beobachtet werden konnte. Zur Fixierung der Farbe und zur Entfernung der überschüssigen Säure wurden die Proben 2mal für je 3 Minuten in einer 0,6%igen Natriumsulfitlösung (0,6% Natriumsulfit in Leitungswasser: 1N HCL = 95:5) geschüttelt und abschließend für weitere 10 Minuten unter fließendem Leitungswasser gespült. Zur Lagerung der gefärbten Proben wurden diese in 70%igem Ethanol konserviert.

2.1.8 Reisolierung des *Bacillus cereus*[59]

Zur Isolierung von Bakterien aus natürlichen oder künstlichen „Steinen“ gibt es zwei Möglichkeiten. Die Isolierung mittels „Nadeltechnik“ und die „Ausschüttelung“, welche in diesem Fall ihre Anwendung fand. Im Zuge der „Ausschüttelung“ können zusätzlich auch Keimzahlen bestimmt werden.

Vorgangsweise:
Zu Beginn der Versuchsanordnung wurden die Proben unter sterilen Bedingungen mit einem Mörser zerkleinert. Im nächsten Schritt wurden 1g der zerkleinerten Probe in 10ml steriler 0,001%iger Tween80-Lösung (in 0,9% NaCl) eingewogen und eine Stunde „ausgeschüttelt“, das heißt, die Proben wurden in dieser Lösung für eine Stunde geschwenkt. Zum Schluss musste je 100µl der Lösung auf Malzplatten ausplattiert werden. Die Lagerung der Proben erfolgte bei Raumtemperatur und die Auszählung der Kolonien erfolgte 24 Stunden später.

[58] Sterflinger, K.; Allgemeine Mykologie, Skriptum BOKU 2005

[59] Sterflinger, K.; Allgemeine Mykologie, Skriptum BOKU 2005

Ergänzend wurden von einigen Proben zwei Verdünnungsstufen, mit dem Faktor 10, angelegt, da ohne dies die Auszählung der Kolonien nicht möglich gewesen wäre.

2.1.9 Dünnschliffanalytik

Die Dünnschliffe wurden von der Firma Geo. Präp. angefertigt und anschließend einer genauen mikroskopischen Untersuchung unterzogen. Für die Herstellung der Dünnschliffe wurden die Proben mittels Vakuumimprägnierung in Kunstharz getränkt. Nach dem Erhärten wurden die Probestücke in ca. 0,025-0,003mm dicke Schichten geschliffen und auf eine Glasträgerplatte geklebt.[60] Die Abmessungen der Glasträgerplatte betragen ca. 2,75cm x 4,80cm.

2.1.10 Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop

Mit dem Rasterelektronenmikroskop können Oberflächen mit Hilfe eines sehr fein gebündelten Elektronenstrahls abgetastet und somit 3-dimensional dargestellt werden. Hierbei handelt es sich um ein optisches Verfahren, womit bis zu 100.000-fache[61] Vergrößerungen erstellt werden können.

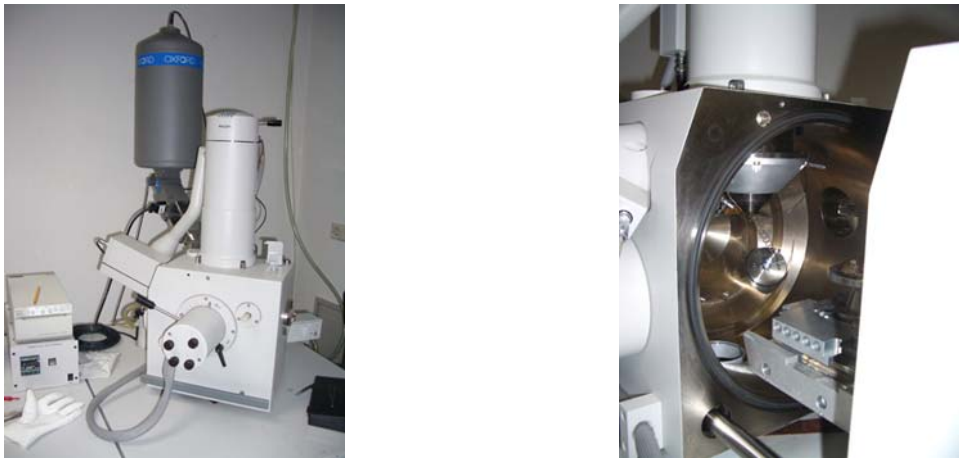

Abbildung 18: links: REM (oben Säule, darunter Kammer), rechts: Kammer REM

[60] http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1987057100473

[61] http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/REMHerbst2001.html

Das Rasterelektronenmikroskop besteht aus einer Säule, an welcher am oberen Ende ein Glühdraht angebracht ist und einer darunter liegenden Kammer, in der der eigentliche Vorgang des Mikroskopierens stattfindet. In der Säule wird bei 20kV-Hochspannung ein fein gebündelter Elektronenstrahl erzeugt, welcher in der Kammer im Hochvakuum die Oberfläche der Probe abtastet bzw. abrastert.
Im Wesentlichen können mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops drei verschiedene Versuche durchgeführt werden. Als erstes gibt es das Verfahren der Sekundärelektroden (SE). Mit diesem „Effekt“ kann ein dreidimensionales Bild mit guter Tiefenschärfe (Licht/Schatten) dargestellt werden. Dieses Verfahren wird hauptsächlich an Bruchstücken angewendet.
Das zweite Verfahren beschreibt die so genannten Rückstreuelektronen (BSE – Back Scattered Elektron), welche zur Darstellung von Dünnschliffen verwendet werden. Hierbei entsteht keine morphologische Abbildung, sondern eine „chemische“ Abbildung, bei welcher schwere Elemente hell und leichte Elemente dunkel dargestellt werden.
Als dritte Untersuchungsvariante dient ein energiedispersives Röntgen-Mikroanalysesystem, mit Hilfe dessen es möglich ist, chemische Analysen von ausgewählten Objekten durchzuführen.
Da nur leitende Objekte dargestellt werden können, müssen die Proben vorab präpariert werden. Hierzu werden die Bruchstücke, zur Erhöhung der Leitfähigkeit, mit Gold und die Dünnschliffe mit Kohlenstoff bedampft.

Die Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop wurden am Institut für Kunst und Technologie der Universität für angewandte Kunst in Wien, unter der Leitung von a.o. Univ. Prof. Dr. Johannes Weber, durchgeführt.

2.2 Laborprüfkörper

Dank der, von den Mitarbeitern der Restaurierwerkstatt Baudenkmale in der Kartause Mauerbach (Bundesdenkmalamt) hergestellten Putzprobekörpern, konnten zahlreiche Konsolidierungsversuche an Laborprüfkörpern durchgeführt werden. Die Proben wiesen eine zylindrische Form mit einem Durchmesser von etwa 70 mm auf und eine Dicke von etwa 25 mm. Für die Versuche wurden 100 Probekörper mit Sumpfkalk hergestellt. Zur Aushärtung wurden je 50 Stück der Proben im Keller und je 50 Stück der Proben im Labor gelagert, um zusätzlich den Einfluss verschiedenartiger Luftfeuchtigkeiten während der Aushärtung zu testen.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden noch weitere Proben (Herstellung 2004) für die Analyse miteinbezogen. Da die Putzproben 2006 mit einem anderen Zuschlagsstoff als die Proben 2004 hergestellt wurden, sind diese nicht unmittelbar vergleichbar. Die Proben wurden im Sumpfkalk/Zuschlagsstoff – Verhältnis 1/3 hergestellt.

In der nachfolgenden Tabelle werden die Zuschlagsstoffe der Kalkputzproben 2004/2006 genauer beschrieben.

Tabelle 3: Zuschlagsstoff Laborproben 2004/2006

	Laborproben: Herstellung 2004	Laborproben: Herstellung 2006
Zuschlagsstoff	Kabelsand	Gewaschener Estrichsand (Fa. Schauerhuber)
Mineralbestand	Quarz Feldspat Glimmer Quarzit Hornstein	Quarz Feldspat Glimmer Calcit Hornstein
Kornform	Sehr gut gerundet (große Körner) bis eckig (kleine Körner)	Sehr gut gerundet (große Körner) bis eckig (kleine Körner)
Größtkorn	Ca. 5mm	Ca. 5mm

An den Laborprüfkörpern wurden die unten angeführten Untersuchungen zur Bestimmung der Wirkungsweise der Kalkwasserfestigung und der bakteriellen Festigung durchgeführt.

- Ultraschallgeschwindigkeiten
- Absanden
- Wasseraufnahmefähigkeit
- Spaltzugfestigkeit
- Karbonatisierung
- Bestimmung der Eindringtiefe der Bakterien (PAS)
- Reisolierung des *Bacillus cereus*
- Dünnschliffanalytik

Abbildung 19: Laborprüfkörper in Prüfpresse

2.3 Prüfflächen Mauerbach

Die Prüfflächen an der Kartause Mauerbach wurden vom Bundesdenkmalamt zur Verfügung gesellt. Da für die Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) bereits Versuche, über das Wachstum von Bakterien an Putzflächen, an der Kartause durchgeführt wurden, wurden diese Flächen erneut für folgende Versuche herangezogen. Hierbei handelt es sich um Flächen, die an der Nordseite der Kartause liegen, um bestmögliche Bedingungen für das Bakterienwachstum zu erhalten. Die Flächen befinden ca. 2,5m über dem Boden, um sicherzustellen, dass die Putzflächen vor eventuell aufsteigender Mauerfeuchte und Passanten geschützt sind. Weiters ist zu erwähnen, dass die Putzflächen eine Größe von ca. 50cm x 50cm haben und mindestens einen Abstand von 25cm zueinander aufweisen. Da diese Putzflächen bereits für frühere Versuche verwendet wurden, waren zu je Putzfläche 1 bis 2 Löcher von ca. 5cm x 5cm und einer Tiefe von ca. 2cm vorhanden.

An der Kartause Mauerbach wurden untenstehende Untersuchungen, zur Bestimmung der Wirkungsweise der Kalkwasserfestigung und der bakteriellen Festigung mittels *Bacillus cereus*, durchgeführt. Die ersten vier Untersuchungsmethoden wurden vor Ort abgewickelt und die Untersuchungsmethoden 5 bis 7 (PAS-Färbung bis Dünnschliffanalytik) wurden anhand später entnommener Proben durchgeführt.

- Absanden
- Wasseraufnahmefähigkeit
- Ultraschallgeschwindigkeiten
- Leitfähigkeitsmessung zur Feuchtigkeitsabschätzung
- Bestimmung der Eindringtiefe der Bakterien (PAS)
- Reisolierung des *Bacillus cereus*
- Dünnschliffanalytik

Abbildung 20: Prüfflächen an der Kartause Mauerbach

Zum Erreichen der Flächen wurde von den Mitarbeitern des Bundesdenkmalamtes ein Gerüst aufgestellt.

Abbildung 21: links: Putzfläche 1, rechts: Putzfläche 2

Die Putzfläche 1 zeigt im oberen Bereich starkes Absanden. Der untere weiße Bereich sandet nicht ab, hier zeigt sich die Oberfläche relativ homogen und fest. Die zweite Putzfläche sandet an der gesamten Fläche stark ab. Die Oberfläche ist sehr porös, ungleichförmig und weist ein aufgelockertes Gefüge auf.

Abbildung 22: links: Putzfläche 3, rechts: Putzfläche 4

An der Putzfläche drei kann ein geringeres Absanden als bei der zweiten Putzfläche festgestellt werden. Die Fläche ist in sich homogen und weist mehrere kleinere Risse auf. Die Oberfläche der vierten Prüffläche ist glatt. Man kann zwei verschiedene Oberflächen-Niveaus erkennen. Des Weiteren weist die Fläche einen deutlichen Riss, der sich von links nach rechts zieht, und zahlreiche kleinere Risse, speziell im linken unteren Teil, auf.

Abbildung 23: links: Putzfläche 5, rechts: Putzfläche 6

Die Prüffläche 5 ist von einem weißen Band durchzogen. In diesem Bereich ist die Fläche verhältnismäßig glatt. Der restliche Bereich ist ähnlich der Fläche 3. Die gesamte Fläche sandet nur wenig ab. Die gesamte Prüffläche 6 entspricht dem weißen Bereich der fünften Fläche. Man kann einige markante Risse erkennen.

Abbildung 24: links: Putzfläche 7, rechts: Putzfläche 8

Prüffläche 7 ist homogen und sandet nur wenig ab. Die Fläche 8 ist ebenfalls recht homogen und zeigt kein deutliches Absanden, allerdings befinden sich in dieser Putzfläche zahlreiche Risse.

Abbildung 25: Putzfläche 9

Die Prüffläche 9 ist der Putzfläche 8 sehr ähnlich, diese ist jedoch im Gesamten gesehen inhomogener.

2.4 Arbeitsvorbereitungen

Die Arbeitsvorbereitungen für die bakterielle Festigung wurden auf der Universität für Bodenkultur in Wien durchgeführt. Vielen Dank an das Team des ACBR, ohne welches diese Arbeiten nicht durchführbar gewesen wären. Als Anleitung für die Herstellung des Carbonatwassers und der Bakterienkultur wurde die Diplomarbeit von Claudia Kerner herangezogen.

2.4.1 Herstellung Carbonatwasser

Im Rahmen der bakteriellen Festigung wurde als Calciumquelle ebenfalls mit Kalkwasser gearbeitet. Da *Bacillus cereus* einen eher neutralen bis leicht basischen PH-Wert benötigt (PH-Wertbereich von ca. 5 bis 9), musste der PH-Wert des Kalkwassers abgesenkt werden. In der Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) wurde zur Senkung des PH-Wertes von Kalkwasser mittels eines Magnetrührers CO_2 zugeführt, dies führte in dieser Diplomarbeit, in der vorgegebenen Zeit zu keinem akzeptablen Ergebnis und so wurde zur Senkung des PH-Wert Sodawasser beigegeben, bis sich der PH-Wert auf 8,0 eingestellt hatte. Dies erwies sich als effiziente Möglichkeit den PH-Wert von Kalkwasser rasch zu senken.

2.4.2 Herstellung der Bakterienkultur

Zur Herstellung der Bakterien – Hauptkultur mussten einige Vorarbeiten geleistet werden. Die genaue Vorgangsweise wurde der Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) und der Produktbeschreibung von CALCITE 2000 entnommen.

Folgende Arbeitsschritte waren dazu nötig:

1) Beschaffung des Bakterienstammes *Bacillus cereus*,
2) Herstellung einer Vornährlösung,
3) Herstellung einer Vorkultur,
4) Herstellung einer Nährlösung und
5) Herstellung der Hauptkultur;

ad 1) Beschaffung des Bakterienstammes *Bacillus cereus*

Vielen Dank an das Institut für angewandte Mikrobiologie (ACBR) der BOKU – Wien, die mir den benötigten *Bacillus*stamm *cereus* für die nachfolgenden Untersuchungen zur Verfügung gestellt hat.

ad 2) Herstellung der Vornährlösung

Die Vornährlösung dient dazu, dem Bakterium von Beginn an eine bestmögliche Wachstumsgrundlage zu bieten. Zur Anfertigung der Vornährlösung werden 1% Bacto Casiton und 0,1% $MgSO_4$ x $7H_2O$ in einer Pufferlösung gelöst und anschließend der PH-Wert von 6,5, mittels HCl, NaOH eingestellt. Danach wird die Lösung mit deionisiertem Wasser auf einen Liter aufgefüllt. Zum Sterilisieren der Vornährlösung muss diese im Anschluss bei 121°C 15 Minuten autoklaviert werden.

Die Pufferlösung dient zur Steigerung und Verlängerung des bakteriellen Wachstums und stabilisiert den PH-Wert der Lösung. Da es sich bei der Pufferlösung um eine molekulare Lösung handelt, wurden vorab die Molgewichte berechnet.

K_2HPO_4 … 10mMol entsprechen 1,74g

NaH_2PO_2 x H_2O … 10mMol entsprechen 1,38g

Abbildung 26: PH-Wert-Messung

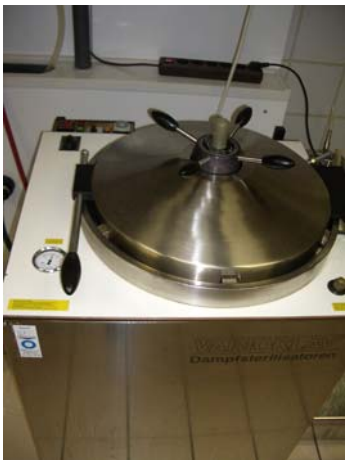

Abbildung 27: Autoklav

ad 3) Herstellung der Vorkultur

Hierbei wird die Vornährlösung mit dem *Bacillus cereus* überimpft und im Brutschrank bei ca. 28°C 24 Stunden geschwenkt.

ad 4) Herstellung der Hauptnährlösung

Zur Herstellung der Hauptnährlösung werden 1% Bacto Casiton, 1% $Ca(CH_3COOH)_2$ und 0,2% K_2CO_3 benötigt. Die oben genannten Inhaltsstoffe werden vorab in 800ml deionisiertem Wasser gelöst und der PH-Wert mit HCl, NaOH auf 8,0 eingestellt. Danach wird die Lösung mit deionisiertem Leitungswasser auf einen Liter aufgefüllt und bei 121°C für 15 Minuten autoklaviert.

ad 5) Herstellung der Hauptkultur

Für die Erzeugung der Hauptkultur wird die Vorkultur mit der Hauptnährlösung im Verhältnis 1:10 verdünnt.

Die Hauptkultur wird ebenfalls im Brutschrank bei ca. 28°C für eine Dauer von ca. 72 Stunden geschwenkt. Nach dieser Zeit ist die benötigte Zellenzahl von ca.$5 \cdot 10^6$ Zellen/ml erreicht und kann anschließen auf die Proben appliziert werden.

Ein wichtiger Punkt war die Überprüfung, ob steril gearbeitet wurde. Hierfür wurden Proben der Hauptkultur entnommen und auf einer Malzplatte ausgestrichen. Nach 24 Stunden konnte man die Sterilität durch das Wachstum auf der Malzplatte feststellen.

Die Überprüfung der vorhandenen Zellenzahl pro Milliliter Lösung erfolgte durch eine Auszählung mittels Thomakammer. Hierfür wurde die Hauptkultur 1:10 verdünnt und unter dem Mikroskop durch zu Hilfenahme der Thomakammer ausgezählt.

Auszählung der Zellen mit Hilfe der Thomakammer:

Die Thomakammer erlaubt eine quantitative Bestimmung der Zellenzahl pro definiertem Volumen. Diese besteht aus der Trägerglasplatte und einem Deckglas. Auf der Glasplatte sind 3 Stege ausgebildet, wobei der Mittelsteg gegenüber den Seitenstegen abgesenkt ist. Der mittlere Steg ist quergeteilt und in der oberen und der unteren Hälfte des Mittelsteges ist je ein quadratisches Netz eingeätzt, welches in je 16 Großquadrate und 16 Kleinquadrate geteilt ist. So kann über dieses genau definierte Volumen der Quadrate und die Anzahl der Zellen in den Quadraten das gewünschte Ergebnis berechnet werden. Da die Auszählung und die Füllung der Kammer sehr fehleranfällig ist, sollte diese insgesamt 4-mal frisch gefüllt und gezählt werden (je Seite werden ca. 100 Kleinquadrate ausgezählt).

$$\frac{Zellenzahl}{ml} = \frac{Anzahl \cdot gezählter \cdot Zellen}{Anzahl \cdot gezählter \cdot Kleinquadrate \cdot 4 \cdot 10^6} \qquad \text{Gl. 22}$$

Abbildung 28: Thomakammer

Ergebnisse der Auszählung der Bakterienkultur:

Es wurden zwei von einander unabhängige Versuchsreihen für die Konsolidierung mittels *Bacillus cereus*, durchgeführt. Bei der ersten Versuchsreihe wurden die Hauptkultur und die Nährlösungen, mittels Essigsäure, auf einen PH-Wert von 8,0 eingestellt (Ausgangs- PH-Wert 8,2) und es konnten hiermit Keimzahlen von ca. $3,5*10^8$ erreicht werden. Diese Versuchsreihe wurde an Laborproben aus dem Jahr 2006, keller- und laborgelagert, und an den Prüfflächen der Kartause Mauerbach durchgeführt.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde der PH-Wert nicht abgemindert und dieser stellte sich auf ca. 8,2 ein. Mit diesem etwas höheren PH-Wert konnten nur Keimzahlen von ca. $5,0*10^7$ erreicht werden, was für die hier gestellten Anforderungen ebenfalls als ausreichend angesehen werden konnte. Die Festigung mit den Medien aus der zweiten Versuchsreihe wurden auf Laborproben aus dem Jahr 2006, kellergelagert, aus dem Jahr 2004, laborgelagert, und an den Prüfflächen der Kartause Mauerbach durchgeführt.

2.5 Festigungsmaßnahmen

Als Festigungsmaßnahmen wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit die Festigung mittels Kalkwasser und die Festigung mittels *Bacillus cereus* untersucht.

2.5.1 Allgemeine Applikationstechnik

Voraussetzung für die Applikation von Konservierungsmedien auf Putzen sind optimale Penetrationsfähigkeit des Festigungsmittels sowie eine gute Absorptionsfähigkeit des Putzes. Die Applikation der oben angeführten Medien erfolgte im Labor und in Mauerbach mittels Sprühflaschen. Es wurde für jedes applizierte Medium eine eigene Sprühflasche verwendet. Die Applikation erfolgte halbstündig, wobei jeweils ein halber Liter Lösung pro Putzfläche appliziert wurde. Danach wurde eine halbe Stunde Pause eingelegt, um die Fläche nicht zu übersättigen, dann wurde weiter appliziert. Die Applikation der Medien wurde Bezug nehmend auf die Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) durchgeführt und weiters wurden die Produktbeschreibungen von CALCITE (2001) berücksichtigt.

Die Beschriftung der Proben erfolgt nach folgendem Schema:

Erste Stelle: Bakterienstamm

- 0… ohne Bakterien
- BC… Applikation *Bacillus cereus*

Zweite Stelle: Nährlösung

- 0… ohne Nährlösung
- NL… Applikation 1 Nährlösung
- ½NL… Applikation ½ Nährlösung

Dritte Stelle: Kalkwasser

- 0… ohne Kalkwasser
- KW… Applikation Kalkwasser

Vierte Stelle: Probennummer und Lagerungsart

- 1 bis 5 K Kellerlagerung
- 1 bis 5 L Laborlagerung

2.5.2 Applizierte Medien Laborproben

- Vorversuche:

Die Spaltzugfestigkeit der Proben wurde nach 28 Tagen, 56 Tagen und 112 Tagen ermittelt. Zusätzlich zu diesen Versuchen wurden, im Zeitraum von 56 bis 112 Tagen, einige Laborproben mit Kalkwasser gefestigt und anschließend ebenfalls die Spaltzugfestigkeit ermittelt. Geprüft wurden je fünf Proben um die vorhandene Streuung auszugleichen.

- Hauptversuche:

Beim Hauptversuch wurden die Putzproben mit Kalkwasser und biomineralisierenden Bakterien behandelt. Zur Untersuchung der Konsolidierung mittels Biomineralisation wurden die Putzproben mittels *Bacillus cereus* gefestigt und zur Abschätzung des Nährmittelsbedarfs wurden einige Variationen, mit voller Nährlösung, mit halber Nährlösung, ohne Nährlösung und mit oder ohne Kalkwasser, untersucht. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden hier jeweils zwei bzw. drei Proben mit denselben Medien gefestigt. Nachfolgend steht eine Zusammenfassung der applizierten Medien.

Putzprobe: unbehandelt	(0-0-0)
Putzprobe: Kalkwasser	(0-0-KW)
Putzprobe: *Bacillus cereus*	(BC-0-0)
Putzprobe: *Bacillus cereus* und ½ Nährlösung	(BC-½NL-0)
Putzprobe: *Bacillus cereus* und Nährlösung	(BC-NL-0)
Putzprobe: Carbonatwasser und *Bacillus cereus*	(BC-0-KW)
Putzprobe: Carbonatwasser, *Bacillus cereus* und ½ Nährlösung	(BC-½NL-KW)
Putzprobe: Carbonatwasser, *Bacillus cereus* und Nährlösung	(BC-NL-KW)

Die Festigung erfolgte in zwei unabhängigen Versuchsreihen, wobei im Zuge der ersten Versuchsreihe die Applikation der Festigungsmedien an Putzproben aus dem Jahr 2006 (keller- und laborgelagert) und bei der zweiten Versuchsreihe an Putzproben aus dem Jahr 2004 (laborgelagert) und 2006 (kellergelagert) durchgeführt wurde.

Im Gegensatz zu den Putzflächen an der Kartause Mauerbach, wurde die Applikation der Medien an den Laborproben in liegenden Behältnissen durchgeführt. Dadurch kann gewährleistet werden, dass die aufgetragenen Medien tatsächlich in den Probekörper eindringen und nicht nur an der Oberfläche bleiben.

Applizierte Medien/Mengen:

Kalkwasserfestigung:

Kalkwasser: ca. 16l/m² (1,7g $Ca(OH)_2$ /l), PH-Wert 12,7

Festigung mit *Bacillus cereus*:

Bacillus cereus: ca. 2l/m² (3,5*10^8 Zellen/ml)

1. Versuchsreihe PH-Wert 8,0
2. Versuchsreihe PH-Wert 8,2

Nährlösung: ca. 2l/m²

1. Versuchsreihe PH-Wert 8,0
2. Versuchsreihe PH-Wert 8,2

Carbonatwasser: ca. 2l/m² (1,7g $Ca(OH)_2$ /l), PH-Wert stets 8,0

2.5.3 Applizierte Medien Putzflächen Mauerbach

Bei einer früheren Diplomarbeit (Claudia Kerner, 2005) wurde an der Kartause Mauerbach bereits die bakterielle Festigung versuchsweise erprobt. Diese Untersuchungen wurden in dieser Diplomarbeit nicht durchgeführt!

Applizierte Medien 2005[62]

Putzfläche 1: Kalkwasser
Putzfläche 2: Carbonatwasser
Putzfläche 3: *Myxococcus* xanthus
Putzfläche 4: *Bacillus cereus* und Carbonatwasser
Putzfläche 5: *Myxococcus xanthus* und Carbonatwasser
Putzfläche 6: *Bacillus cereus*
Putzfläche 7: Destilliertes Wasser
Putzfläche 8: Carbonatwasser und Bakteriennährlösung
Putzfläche 9: Kalkwasser und Bakteriennährlösung

[62] Kerner, C.; Diplomarbeit, Konsolidierung von historischen Kalkputzen mit Kalkwasser und Bakterien 2005

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde an diesen bestehenden Putzflächen abermals Untersuchungen durchgeführt und Proben entnommen. Hierfür wurden die Putzflächen neu zugeteilt:

Putzfläche 3 und 6:	Carbonatwasser, *Bacillus cereus*	(BC-0-KW)
Putzfläche 4 und 7:	Carbonatwasser, *Bacillus cereus*, Nährlösung	(BC-NL-KW)
Putzfläche 5 und 8:	Carbonatwasser, *Bacillus cereus*, ½ Nährlösung	(BC-½NL-KW)
Putzfläche 9:	Kalkwasser	(0-0-KW)

Auch hier wurden zwei unabhängige Versuchsreihen durchgeführt, wobei die Putzflächen 6 bis 9 in der ersten Versuchsreihe gefestigt wurden und die Putzflächen 3 bis 5 in der zweiten Versuchsreihe.

Applizierte Medien/Mengen:

Kalkwasserfestigung:

Kalkwasser: ca. 16l/m² (1,7g $Ca(OH)_2$/l), PH-Wert 12,7

Festigung mit *Bacillus cereus*:

Bacillus cereus: ca. 2l/m² ($3,5*10^8$ Zellen/ml)

1. Versuchsreihe PH-Wert 8,0
2. Versuchsreihe PH-Wert 8,2

Nährlösung: ca. 2l/m²

1. Versuchsreihe PH-Wert 8,0
2. Versuchsreihe PH-Wert 8,2

Carbonatwasser: ca. 2l/m² (1,7g $Ca(OH)_2$/l), PH-Wert stets 8,0

3. ERGEBNISSE

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Vorgangsweise und die Untersuchungsmethoden beschrieben. Als Festigungsmethoden wurden die Kalkwasserfestigung und die Festigung mittels *Bacillus cereus* gewählt. Die Untersuchung der Biomineralisierung erfolgte in Anlehnung an die Versuche in der Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005). Einerseits wurden die Versuche an Laborprüfkörpern durchgeführt wurden und andererseits erfolgten die Versuche an Prüfflächen an der Kartause Mauerbach. In weiterer Folge werden die Untersuchungsergebnisse graphisch dargestellt und ausgewertet.

3.1 Putzproben Labor

An den Laborproben wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Neben den Hauptversuchen, wo die Festigung mittels Kalkwasser und biomineralischer Festigung untersucht wurde, erfolgten vorab einige Vorversuche, welche als Grundlage für die weiteren Versuche dienen sollten. Diese sind genau unter Kapitel 2.5.2 beschrieben.

3.1.1 Ultraschallmessung

Die Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeiten wurde mit Hilfe des Laufzeitverfahrens durchgeführt. Eine genaue Beschreibung des Laufzeitverfahren wird im Kapitel 2.1.1 angeführt.

Im Rahmen der Voruntersuchungen konnten keine Ultraschalluntersuchungen durchgeführt werden, da die Putzproben noch nicht ausreichend gefestigt waren. Da die Festigkeit sowohl bei der ersten, als auch bei der zweiten Versuchsreihe ausreichend gegeben waren, konnte im Rahmen der Hauptversuche die Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten durchgeführt werden.

1. Versuchsreihe:

Tabelle 4: Ultraschallgeschwindigkeiten, 1. Versuchsreihe, Laborproben

Probenbezeichnung	Ultraschallgeschwindigkeiten	
	2006 Kellerlagerung	2006 Laborlagerung
0-0-0	2020 – 2132 m/s	1870 - 2070 m/s
0-0-KW	2067 – 2132 m/s	2134 – 2261 m/s
BC-0-0	2106 – 2207 m/s	2135 – 2336 m/s
BC-0-KW	1880 – 2216 m/s	2165 – 2420 m/s
BC-NL-0	1912 – 2195 m/s	1878 – 1971 m/s
BC-NL-KW	1462 – 2204 m/s	2092 – 2196 m/s
BC-½NL-0	2033 – 2274 m/s	2181 – 2235 m/s
BC-½NL-KW	1244 – 2158 m/s	1859 – 2249 m/s

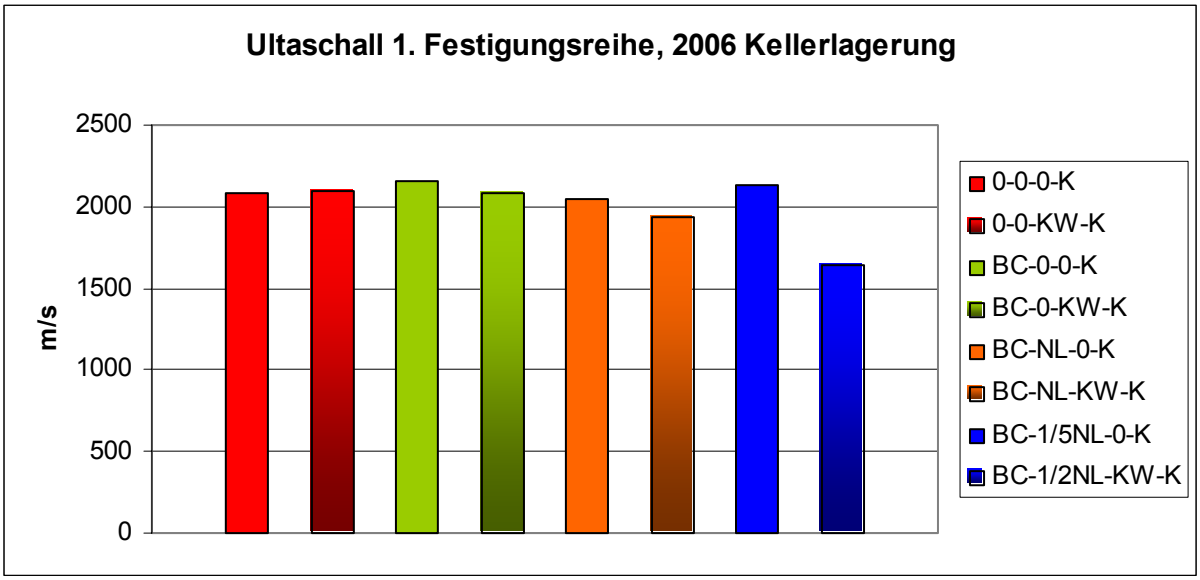

Diagramm 1: Ultraschallgeschwindigkeiten, 1.Festigungsreihe, 2006 Kellerlagerung

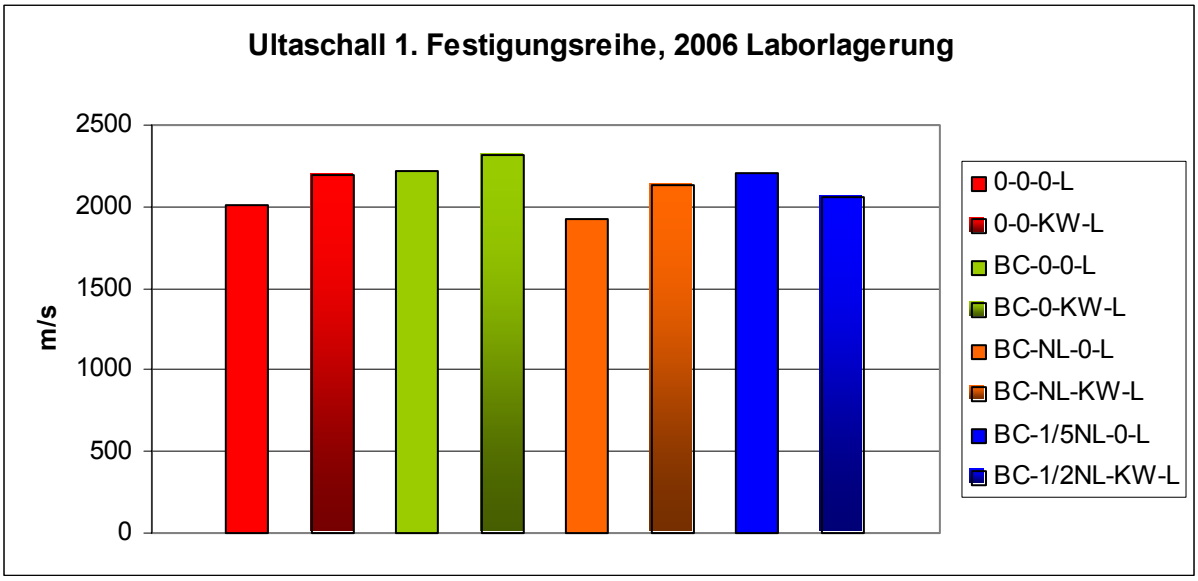

Diagramm 2: Ultraschallgeschwindigkeiten, 1.Festigungsreihe, 2006 Laborlagerung

Die Diagramme zeigen die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen. Bei der ersten Festigungsserie wurden durchwegs Ultraschallgeschwindigkeiten im Bereich von ca. 2.000 m/s gemessen. Die vorhandene Streuung der Werte kann aus Unregelmäßigkeiten in der Korngrößenverteilung und der Porenstruktur resultieren. Die mit Kalkwasser konsolidierten Proben zeigen bei beiden Lagerungsarten eine Steigerung der Ultraschallgeschwindigkeiten. Besonders auffällig ist dagegen, dass bei der Serie bakteriell gefestigter, kellergelagerter Proben, die unteren Werte der zusätzlich mit Kalkwasser behandelten Proben deutlich schlechter sind, als jene ohne Kalkwasser. Diese Auffälligkeit kann allerdings bei den laborgelagerten Proben nicht bestätigt werden, diese zeigen durchwegs eine Steigerung der Ultraschallgeschwindigkeiten.

2. Versuchsreihe:

Tabelle 5: Ultraschallgeschwindigkeiten, 2. Versuchsreihe, Laborproben

Probenbezeichnung	Ultraschallgeschwindigkeiten	
	2006 Kellerlagerung	2004 Laborlagerung
0-0-0	1959 m/s	1699 m/s
0-0-KW	2096 – 2197 m/s	1740 – 1757 m/s
BC-0-0	2108 – 2315 m/s	1772 – 1950 m/s
BC-0-KW	2045 – 2093 m/s	1698 – 1738 m/s
BC-NL-0	1984 – 2268 m/s	1607 – 1728 m/s
BC-NL-KW	2104 – 2122 m/s	1715 – 1818 m/s
BC-½NL-0	2080 – 2275 m/s	1730 – 1802 m/s
BC-½NL-KW	2140 – 2244 m/s	1642 – 1684 m/s

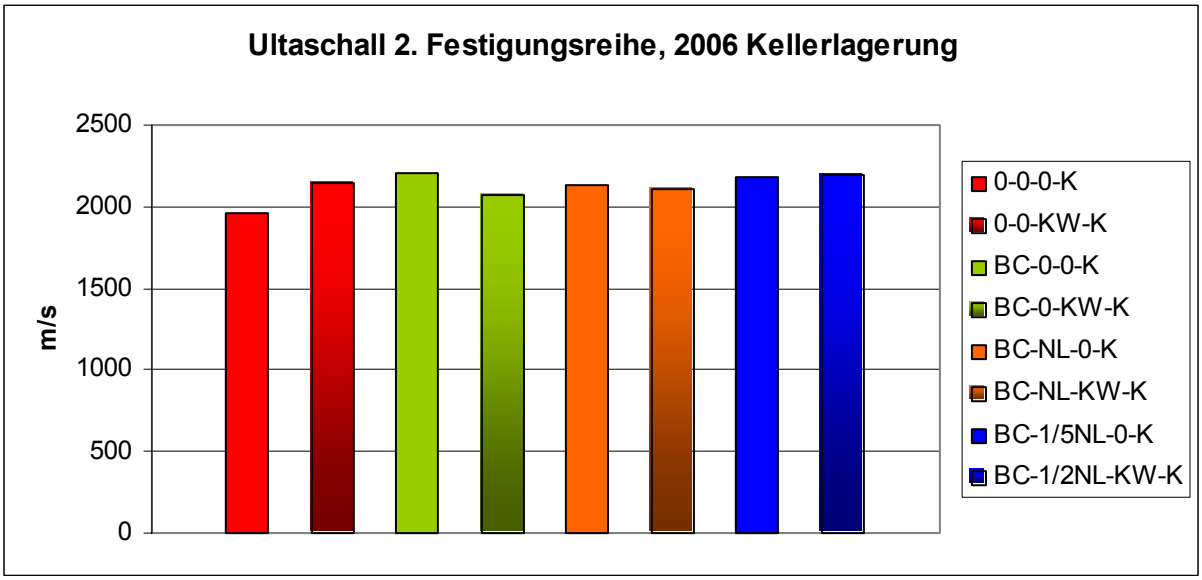

Diagramm 3: Ultraschallgeschwindigkeiten, 2.Festigungsreihe, 2006 Kellerlagerung

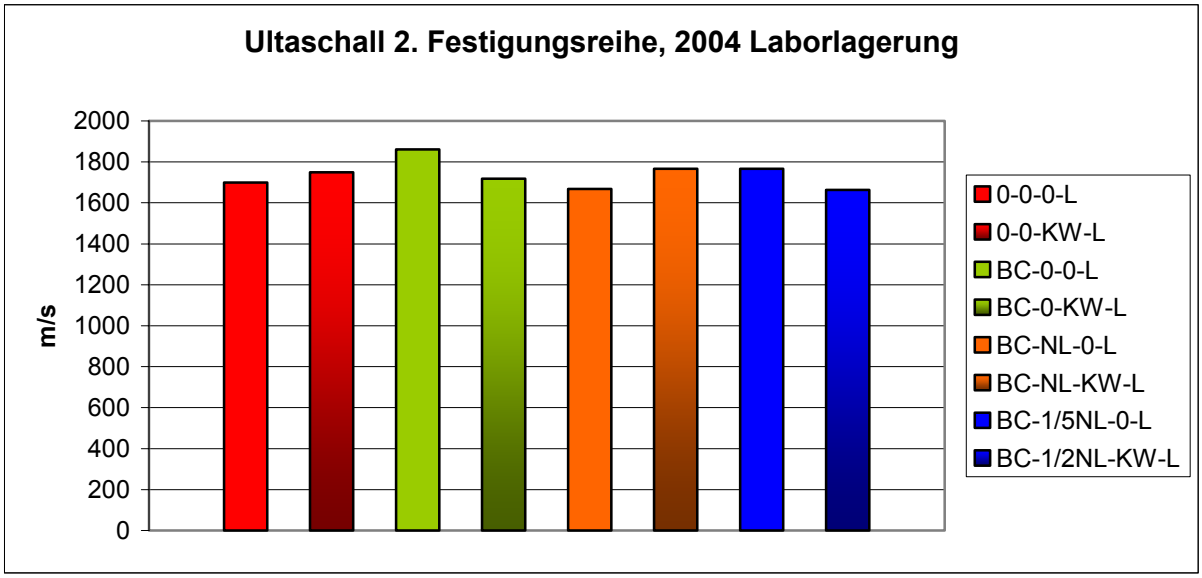

Diagramm 4: Ultraschallgeschwindigkeiten, 2.Festigungsreihe, 2004 Laborlagerung

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe zeigen ähnliche Werte, wie jene der ersten Serie. Bei den Proben aus dem Jahr 2006 liegen die Geschwindigkeiten im Bereich von ca. 2.000 m/s. Im Vergleich dazu erreichen die Proben aus dem Jahr 2004 nur Geschwindigkeiten von ca. 1.800 m/s. Die geringeren Werte lassen sich darauf zurückführen, dass für die Herstellung der Proben 2004 Kabelsand und 2006 gewaschener Estrichsand als Zuschlagstoff verwendet wurden. Die mit Kalkwasser gefestigten Proben weisen bei beiden Probeserien (2004 und 2006) eine deutliche Steigerung der Ultraschallgeschwindigkeiten auf. Die bakteriell gefestigten Proben weisen, im Vergleich zur ersten Festigungsreihe, keine starken Streuungen auf und zeigen eine Steigerung der Ultraschallgeschwindigkeiten.

3.1.2 Absanden

Die Ermittlung des Absandverhaltens der Probekörper erfolgte durch die Abnahme von Abziehbildern. Zu diesem Zweck wurde ein Klebeband mit der Hand gleichmäßig auf den Probekörper gedrückt und anschließend mit Hilfe einer Federwaage gleichmäßig langsam abgezogen. Über die Rückstände auf dem Klebeband und den Widerstand beim Abziehen konnten somit Rückschlüsse auf das Abziehverhalten gezogen werden. Zur Abschätzung der Rückstände wurden Vergleichstafeln von TERRY & CHILINGAR (1955) verwendet, siehe Kapitel 2.1.2.

Die Laborproben zeigen bei den Absandversuchen, bei beiden Versuchsreihen, ein einheitliches Bild. Da die Proben relativ „jung“ sind, sanden diese kaum ab und es kann daher auch keine Verbesserung im Absandverhalten festgestellt werden.

Der Prozentuelle Anteil der Rückstände auf dem Gewebeband beträgt ca. 1% und der Widerstand beim Abziehen des Klebebandes lag stets über 25 g/cm².

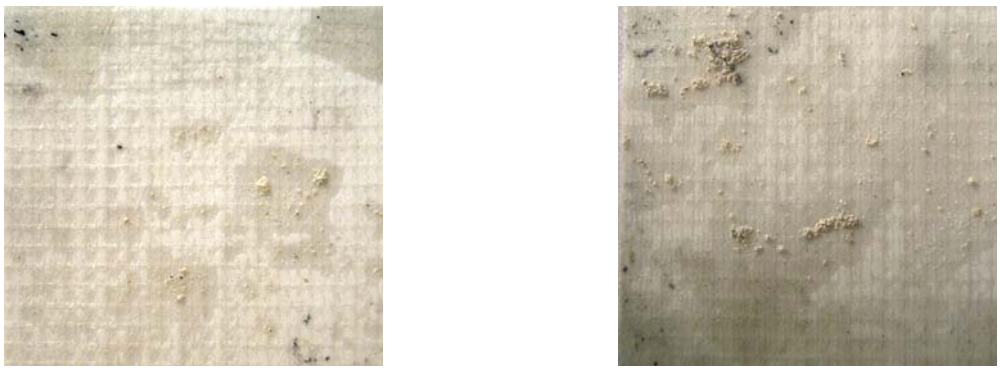

Abbildung 29: Absandversuch, links: BC-NL-0 2006K, rechts: BC-NL-0 2004L

3.1.3 Wasseraufnahmefähigkeit

Die Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten wurde mit Hilfe des Karsten´schen Prüfröhrchens durchgeführt, siehe Kapitel 2.1.3. Für diesen Versuch wurde das Karsten´sche Prüfröhrchen mittels Dichtmasse auf dem Probekörper befestigt und bis zur Nullmarke (10cm Wassersäule) mit Wasser gefüllt. Unter Gleichhaltung des Wasserspiegels wurde in Abständen von 30 Sekunden die eingedrungene Menge Wasser bestimmt. Das Ergebnis, des so genannten Wasseraufnahmekoeffizienten w, stellt die vom Baustoff aufgenommene Wassermenge pro Fläche in Abhängigkeit von der Wurzel der Zeit dar.
Einleitend werden, die hier relevanten, im allgemeinen Hochbau geltenden Richtwerte[63] für den Wasseraufnahmekoeffizienten, angeführt:

w > 2,0 saugend

w ≤ 2,0 wasserhemmend

[63] Trauninger, D.; Diplomarbeit: Beschichtungssysteme auf Natursteinoberflächen 2007

1. Versuchsreihe:

Tabelle 6: Wasseraufnahmekoeffizient, 1. Versuchsreihe, Laborproben

Probenbezeichnung	Wasseraufnahmekoeffizient	
	2006 Kellerlagerung	2006 Laborlagerung
0-0-0	8,5 – 18,6 kg/(m²*√h)	14,0 – 18,6 kg/(m²*√h)
0-0-KW	15,5 – 16,3 kg/(m²*√h)	12,4 – 14,7 kg/(m²*√h)
BC-0-0	3,1 – 15,5 kg/(m²*√h)	4,7 – 8,5 kg/(m²*√h)
BC-0-KW	4,3 – 14,7 kg/(m²*√h)	1,6 – 10,7 kg/(m²*√h)
BC-NL-0	4,3 – 13,2 kg/(m²*√h)	1,9 – 3,1 kg/(m²*√h)
BC-NL-KW	3,4 – 10,9 kg/(m²*√h)	0,8 – 1,9 kg/(m²*√h)
BC-½NL-0	3,9 – 9,3 kg/(m²*√h)	2,3 – 10,7 kg/(m²*√h)
BC-½NL-KW	3,4 – 17,1 kg/(m²*√h)	1,1 – 1,6 kg/(m²*√h)

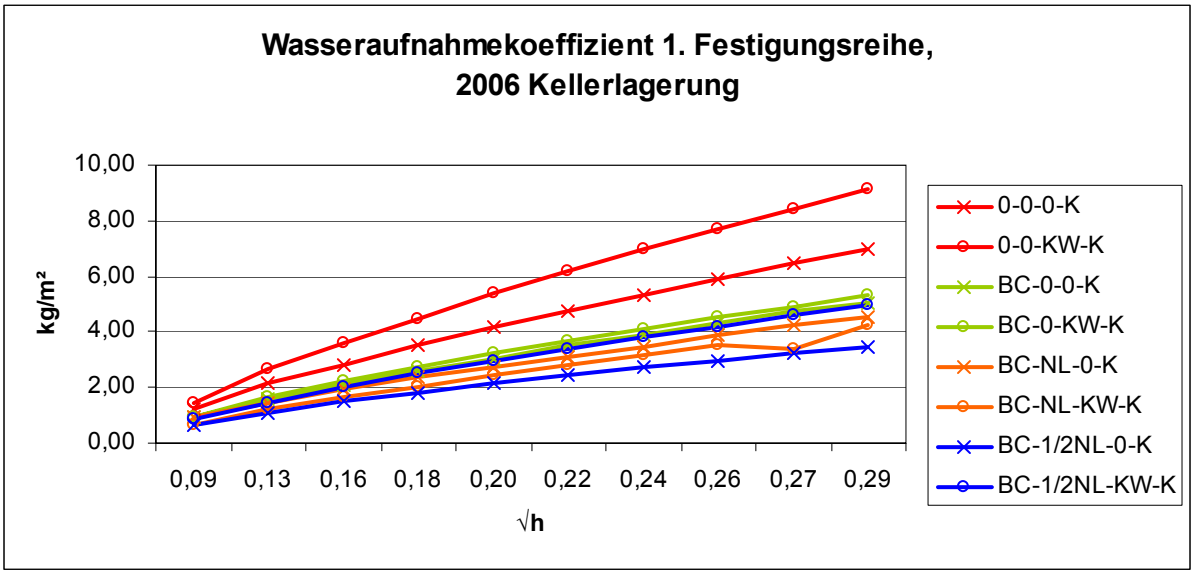

Diagramm 5: Wasseraufnahmekoeffizient, 1. Versuchsreihe, 2006 Kellerlagerung

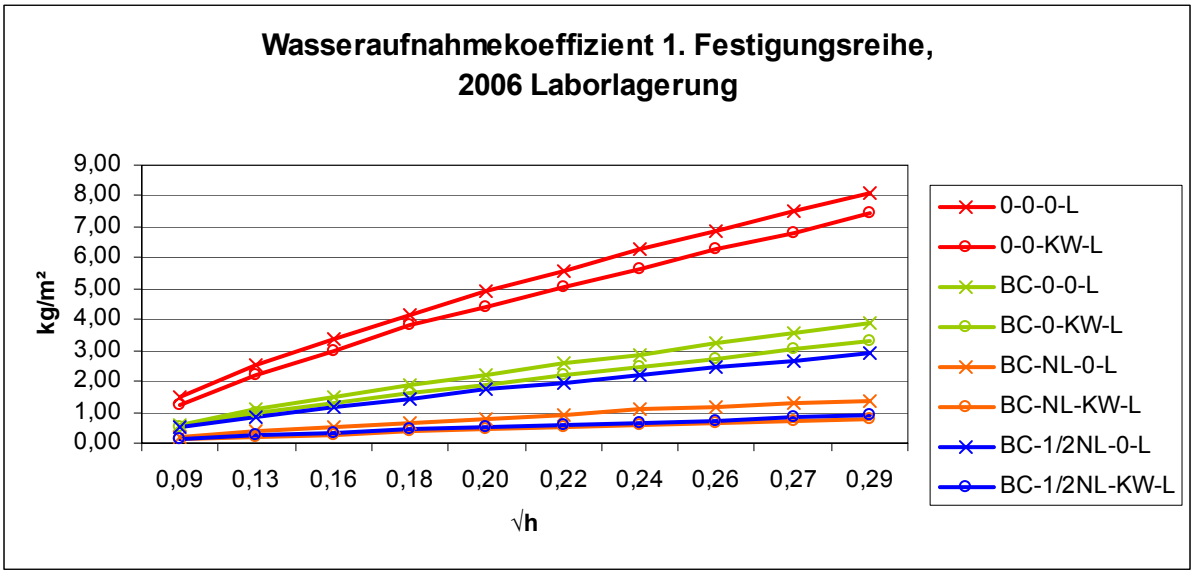

Diagramm 6: Wasseraufnahmekoeffizient, 1. Versuchsreihe, 2006 Laborlagerung

Die obigen Diagramme zeigen das Wasseraufnahmeverhalten der unbehandelten bzw. mit Kalkwasser behandelten Proben und der mit *Bacillus cereus* gefestigten Proben. Hier kann man klar erkennen, dass die mit *Bacillus cereus* behandelten Proben einen deutlich reduzierten Wasseraufnahmekoeffizienten besitzen, welcher grob dem Faktor von max. 5 bis 8 entspricht. Dieser Faktor entspricht in etwa den Ergebnissen von LOUBIERE, J. F (1996). Die Putzproben reagieren infolge der Bildung eines Oberflächenfilmes hydrophob, das heißt, dass die Proben Wasser langsamer aufnehmen und infolge dessen auch langsamer wieder abgeben. Dies konnte auch beim Austrocknen der Proben, nach dem Wasseraufnahmeverfahren, bestätigt werden. Die für die Diagramme verwendeten Werte sind Mittelwerte. An der oben stehenden Tabelle 5 kann man eine starke Streuung der Wasseraufnahmekoeffizienten erkennen. Diese Streuung lässt sich wahrscheinlich darauf zurückführen, dass die einzelnen Proben, obwohl diese aus einer Herstellungsserie stammen, in ihrer Porenstruktur und Zuschlagsverteilung etc. stark unterschiedlich sind.

2. Versuchsreihe:

Tabelle 7: Wasseraufnahmekoeffizient, 2. Versuchsreihe, Laborproben

Probenbezeichnung	Wasseraufnahmekoeffizient	
	2006 Kellerlagerung	2004 Laborlagerung
0-0-0	12,4 kg/(m²*√h)	23,3 kg/(m²*√h)
0-0-KW	14,7 kg/(m²*√h)	18,6 – 21,7kg/(m²*√h)
BC-0-0	3,1 – 10,1 kg/(m²*√h)	15,5 kg/(m²*√h)
BC-0-KW	2,3 – 3,4 kg/(m²*√h)	12,4 – 14,0 kg/(m²*√h)
BC-NL-0	10,9 – 19,4 kg/(m²*√h)	5,4 – 12,7 kg/(m²*√h)
BC-NL-KW	9,3 – 13,2 kg/(m²*√h)	6,2 – 10,9 kg/(m²*√h)
BC-½NL-0	12,4 – 15,5 kg/(m²*√h)	8,5 – 13,7 kg/(m²*√h)
BC-½NL-KW	6,2 – 7,75 kg/(m²*√h)	7,0 – 7,8 kg/(m²*√h)

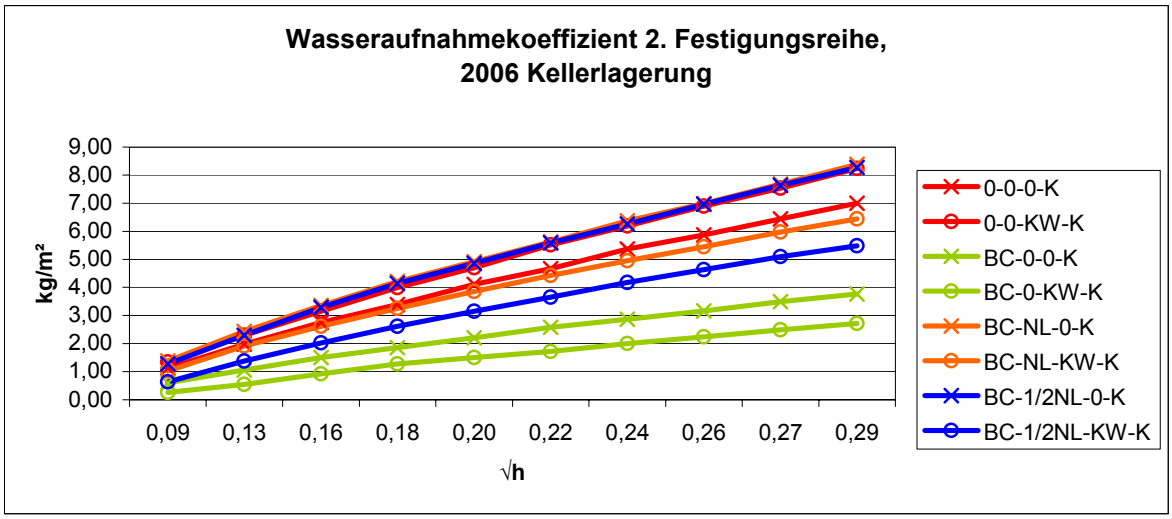

Diagramm 7: Wasseraufnahmekoeffizient, 2. Versuchsreihe, 2006 Kellerlagerung

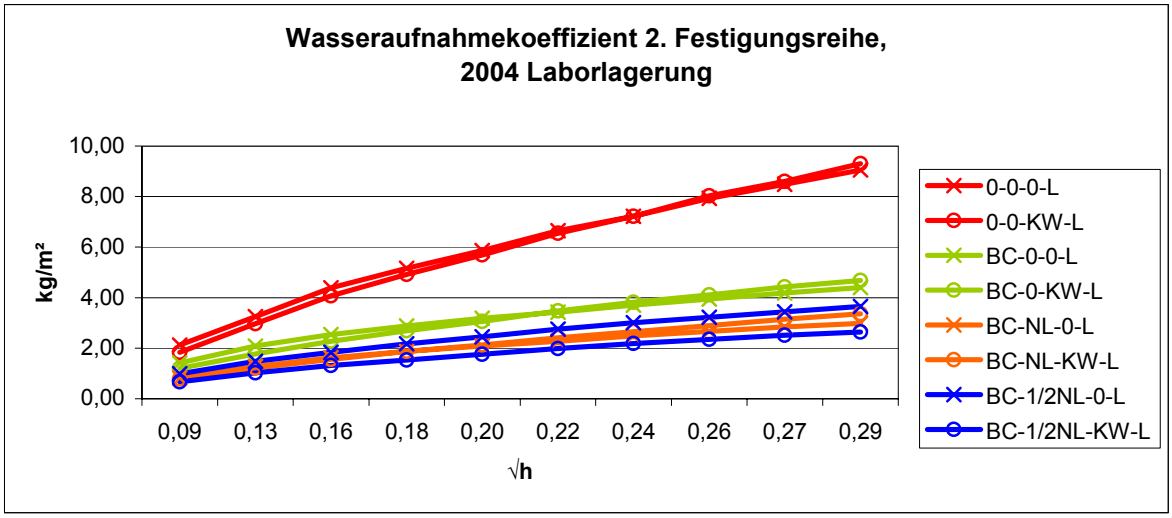

Diagramm 8: Wasseraufnahmekoeffizient, 2. Versuchsreihe, 2004 Laborlagerung

Auch der zweite Festigungsversuch zeigt, dass der Wasseraufnahmekoeffizient der ungefestigten bzw. nur mit Kalkwasser gefestigten Proben, einen höheren Wasseraufnahmekoeffizienten besitzen, als jene Proben, welche eine Behandlung mit *Bacillus cereus* erfahren haben (Bildung eines Oberflächenfilms). Die in den Diagrammen dargestellten Werte sind Mittelwerte aus den Mehrfachansätzen. Anhand der obigen Tabelle kann man erkennen, dass auch hier starke Streuungen der Ergebnisse bestehen. Der Faktor, welcher die Reduktion des Wasseraufnahmekoeffizienten beschreibt, bewegt sich wieder in einem Bereich von max. 5 bis 8.

3.1.4 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde nur an den Laborprüfkörpern durchgeführt und stellt eine zerstörende Untersuchung dar. Die Prüfkörper wurden für die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit in eine Gesteinspresse eingespannt und bis zum Bruch belastet. Als Ergebnis wird die maximale Bruchkraft ermittelt, welche über die Fläche des Prüfkörpers in die Spaltzugfestigkeit umgerechnet werden kann. Eine genaue Beschreibung der Bestimmung der Spaltzugfestigkeit ist im Kapitel 2.1.4 zu finden.

A) VORVERSUCH

Vorab wurden ausführliche Untersuchungen der Festigkeiten durchgeführt, um die genaue Festigkeitsentwicklung von Kalkputz zu ermitteln. Hierfür wurde für die Probekörper die 28-Tage-Festigkeit, die 56-Tage-Festigkeit und die Festigkeit nach 112 Tagen ermittelt. Parallel dazu wurde die erste Festigung mit Kalkwasser vorgenommen. Insgesamt wurde ein Feststoffeintrag von ca. 36g/m² erreicht. Neben den frisch hergestellten Probekörpern wurden auch noch Prüfkörper mit Herstellungsdatum 2004 getestet, welche ebenfalls vorab mit Kalkwasser konsolidiert wurden.

Proben 2006

- 28-Tage-Festigkeit
- 56-Tage-Festigkeit
- 112-Tage-Festigkeit
- 112-Tage-Festigkeit, Konsolidierung mit Kalkwasser

Proben 2006

- Spaltzugfestigkeit
- Spaltzugfestigkeit, Konsolidierung mit Kalkwasser

Proben 2006

1) *Vorversuchsreihe Nummer 1 – 28 Tage Festigkeit 11.01.2007*

Kellerlagerung:
Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,044 N/mm²
Laborlagerung:
Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,081 N/mm²

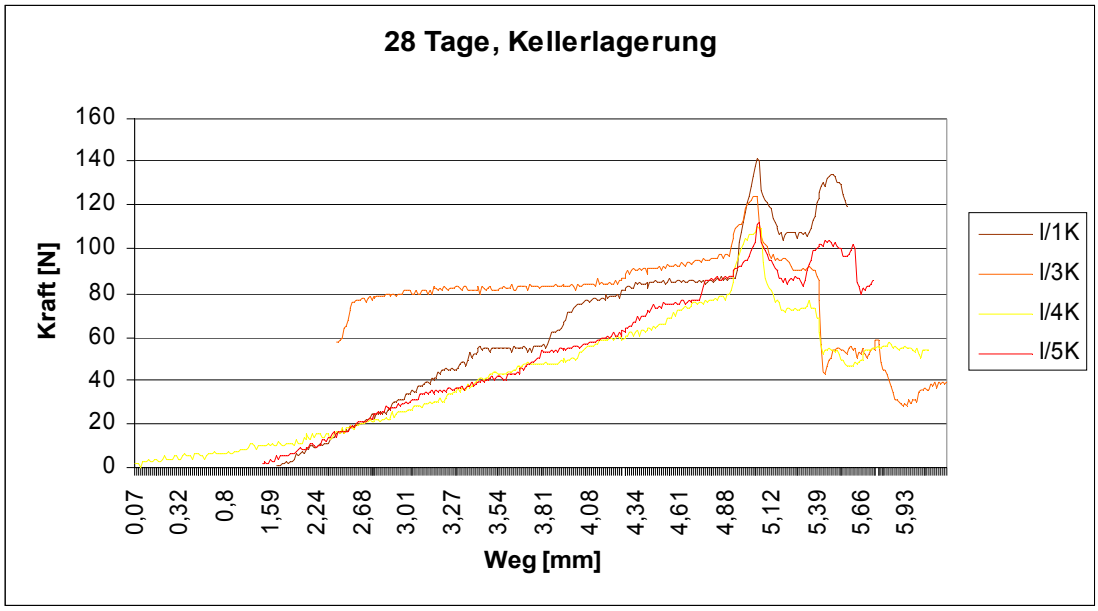

Diagramm 9: Spaltzugversuch nach 28 Tagen, Kellerlagerung

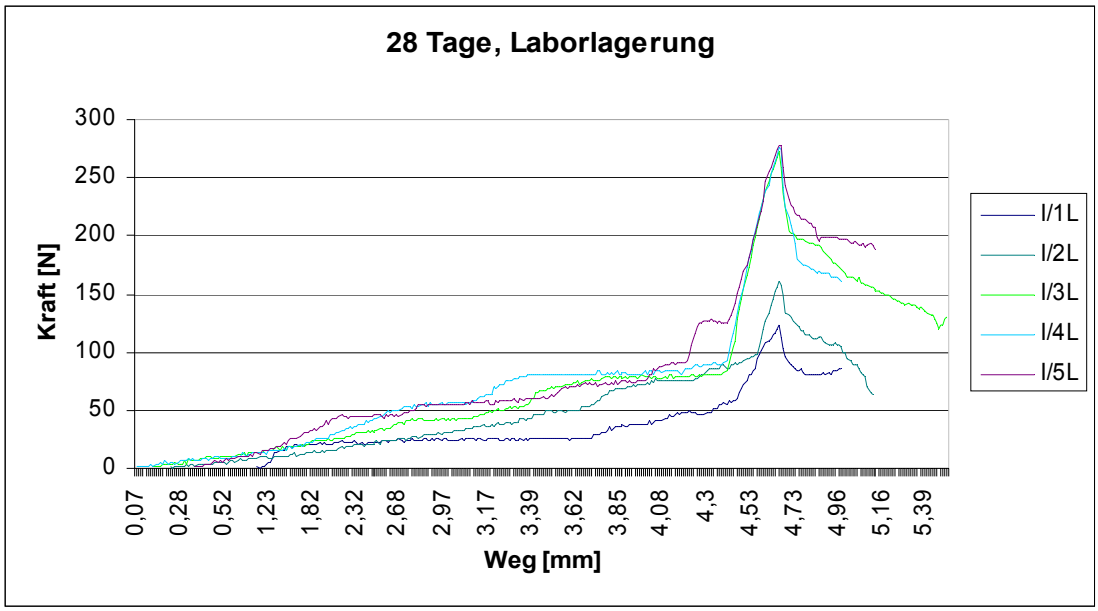

Diagramm 10: Spaltzugversuch nach 28 Tagen, Laborlagerung

Anhand der oben ersichtlichen Diagramme kann festgestellt werden, dass die Festigkeitsentwicklung stark von der Art der Lagerung abhängig ist.

Die Proben aus dem Labor zeigen hingegen eine deutliche Spitze und wirken, obwohl diese ebenfalls noch nicht karbonatisiert sind, als fester Körper.

2) Vorversuchsreihe Nummer 2 – 56 Tage Festigkeit 08.02.2007

Kellerlagerung:

Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,051 N/mm²

Laborlagerung:

Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,086 N/mm²

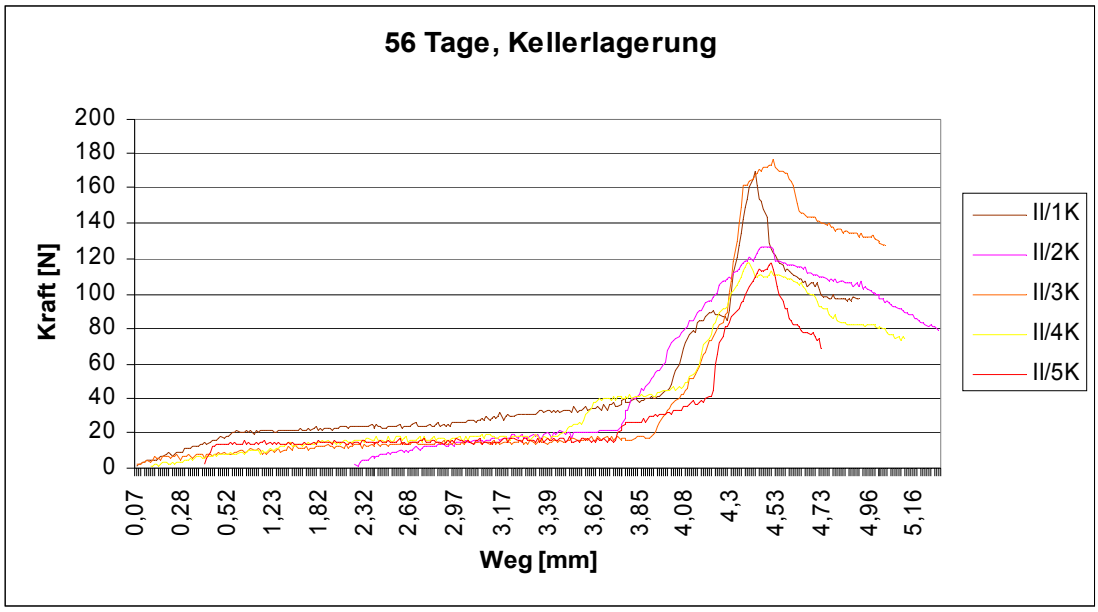

Diagramm 11: Spaltzugversuch nach 56 Tagen, Kellerlagerung

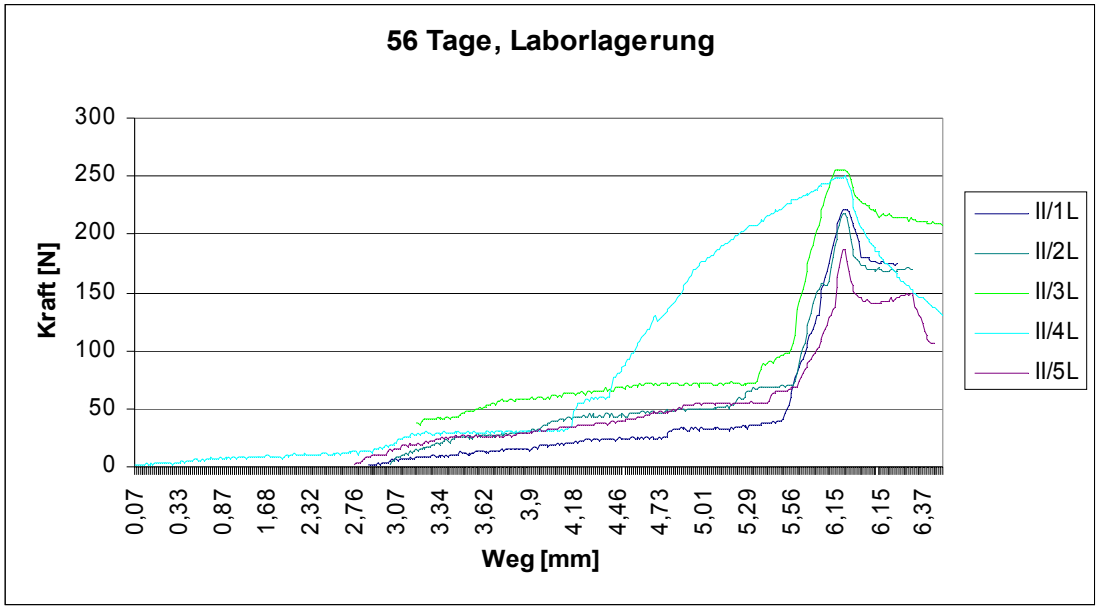

Diagramm 12: Spaltzugversuch nach 56 Tagen, Laborlagerung

3) Vorversuchsreihe Nummer 3 – 112 Tage Festigkeit 05.04.2007

Kellerlagerung:

Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,059 N/mm²

Laborlagerung:

Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,159 N/mm²

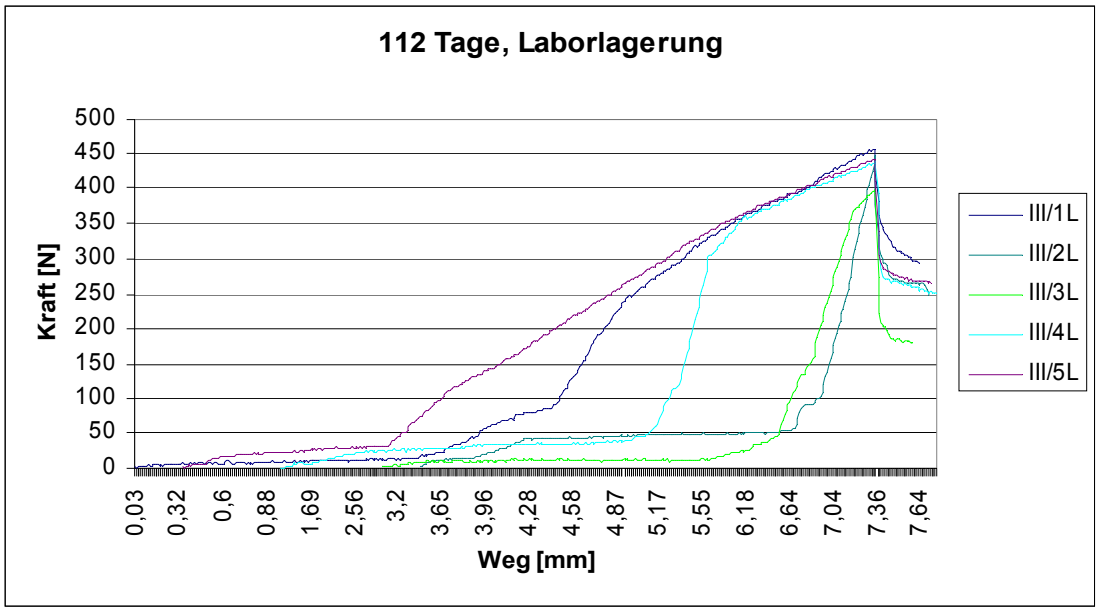

Diagramm 14: Spaltzugversuch nach 112 Tagen, Laborlagerung

4) Vorversuchsreihe Nummer 4 – 112 Tage Festigkeit 05.04.2007 Kalkwasser

Festigung mit Kalkwasser

Die Proben mit der Herstellung 2006 wurden mit Kalkwasser behandelt, um zu sehen, ob dies zu einer Verbesserung der Festigkeit führt. Hierbei wurden jeweils die Proben aus der Kellerlagerung und die Proben aus der Laborlagerung, ebenfalls 112 Tage nach der Herstellung, getestet.

Kellerlagerung Kalkwasser:

Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,228 N/mm²

Laborlagerung Kalkwasser:

Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,209 N/mm²

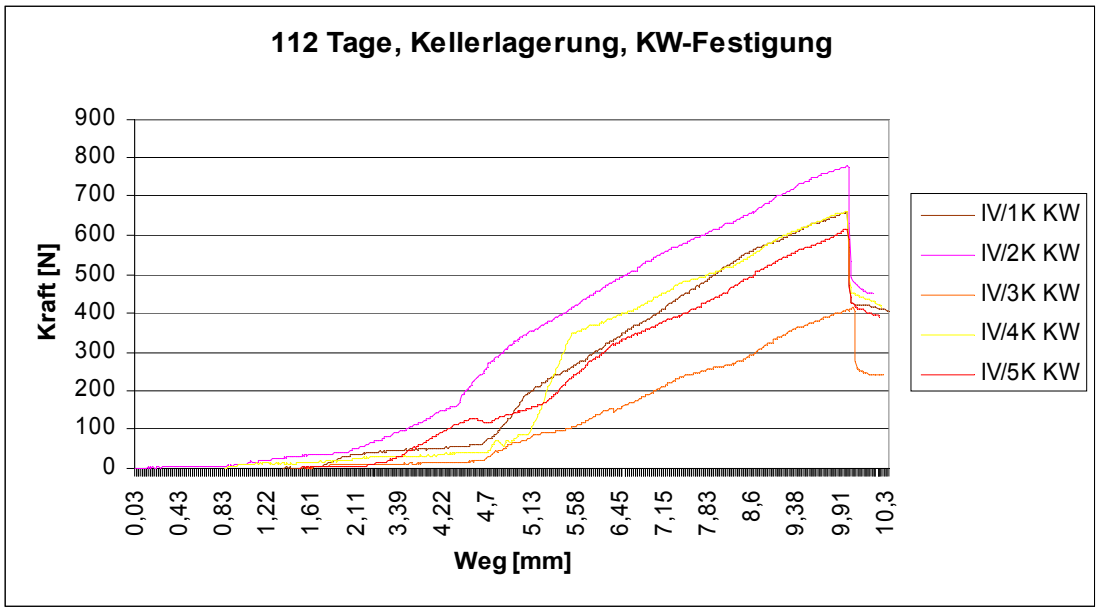

Diagramm 15: Spaltzugversuch nach 112 Tagen, Kellerlagerung, Festigung mit Kalkwasser

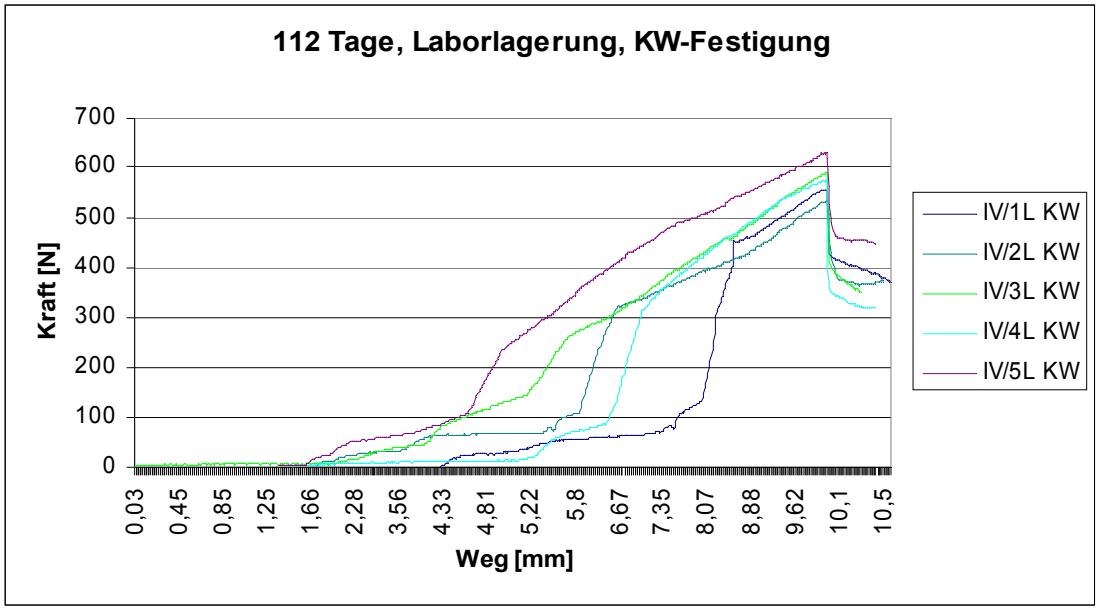

Diagramm 16: Spaltzugversuch nach 112 Tagen, Laborlagerung, Festigung mit Kalkwasser

Diese Versuchsreihe zeigt eine deutliche Steigerung der Spaltzugfestigkeiten nach der Festigung mit Kalkwasser. Weiters ist ersichtlich, dass beide Lagerungsarten, die Kellerlagerung sowie die Laborlagerung, nach der Behandlung mit Kalkwasser annähernd gleiche Festigkeitsentwicklungen zeigen.

5) Übersicht 0 – 112 Tage

Tabelle 8: Übersicht Spaltzugfestigkeit Proben 2006

Spaltzugfestigkeit (Mittelwert aus 5 Proben)	V 1 28 Tage	V 2 56 Tage	V 3 112 Tage	V 4 112 Tage KW
Kellerlagerung	0,044 N/mm²	0,051 N/mm²	0,059 N/mm²	0,228 N/mm²
Laborlagerung	0,081 N/mm²	0,086 N/mm²	0,159 N/mm²	0,209 N/mm²

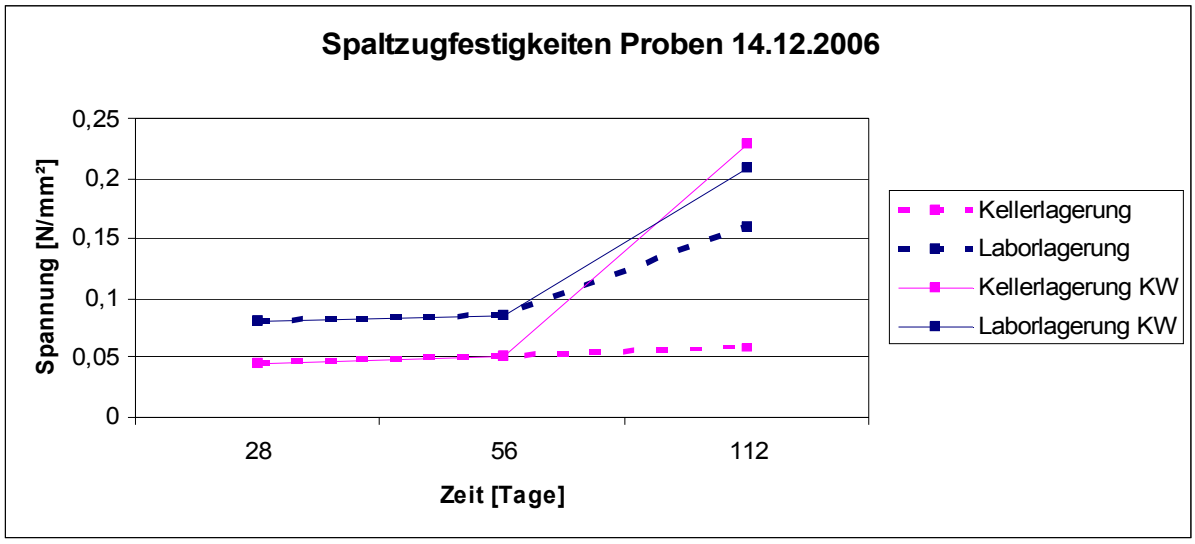

Diagramm 17: Übersicht Spaltzugfestigkeit, Proben 2006

Anhand der obigen Tabelle ist ersichtlich, dass die mit Kalkwasser gefestigten Proben eine deutliche Steigerung der Spaltzugfestigkeiten zeigen. So konnten die kellergelagerten Proben ca. die 3,9-fache und die im Labor gelagerten Proben ca. die 1,3-fache Spaltzugfestigkeit der ungefestigten Proben erreichen. Dies lässt darauf schließen, dass die Kalkwasserfestigung bei „jungen“ Kalkputzen weitaus deutlicher ausfällt, als bei bereits karbonatisierten Putzen.

Proben 2004

Parallel zu den Proben aus dem Jahr 2006 wurden ältere Proben aus dem Jahr 2004 getestet. Diese Proben wurden ebenfalls von der Restaurierwerkstätte der Kartause Mauerbach hergestellt. Zu Beginn der Versuche wurde die Festigkeit der Proben mittels Spaltzugversuch getestet. Anschließend wurden fünf der Proben mit Kalkwasser behandelt und ebenfalls getestet.

1) Vorversuchsreihe 1: Festigkeit:

Laborlagerung:
Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,121 N/mm²

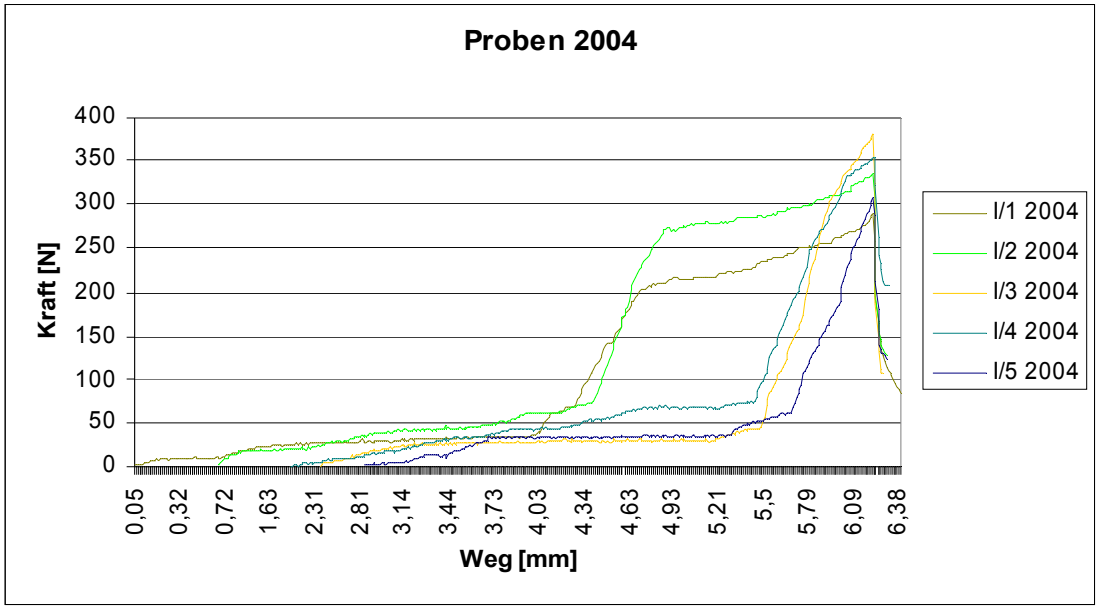

Diagramm 18: Spaltzugversuch, Proben 2004

2) Vorversuchsreihe 2: Festigkeit, Kalkwasser:

Festigung mit Kalkwasser

Die Putzproben mit der Herstellung im Jahr 2004 wurden ebenfalls mit Kalkwasser behandelt um zu sehen, ob eine Steigerung der Festigkeit möglich ist.

Laborlagerung, Kalkwasser:
Mittelwert Spaltzugfestigkeit: 0,162 N/mm²

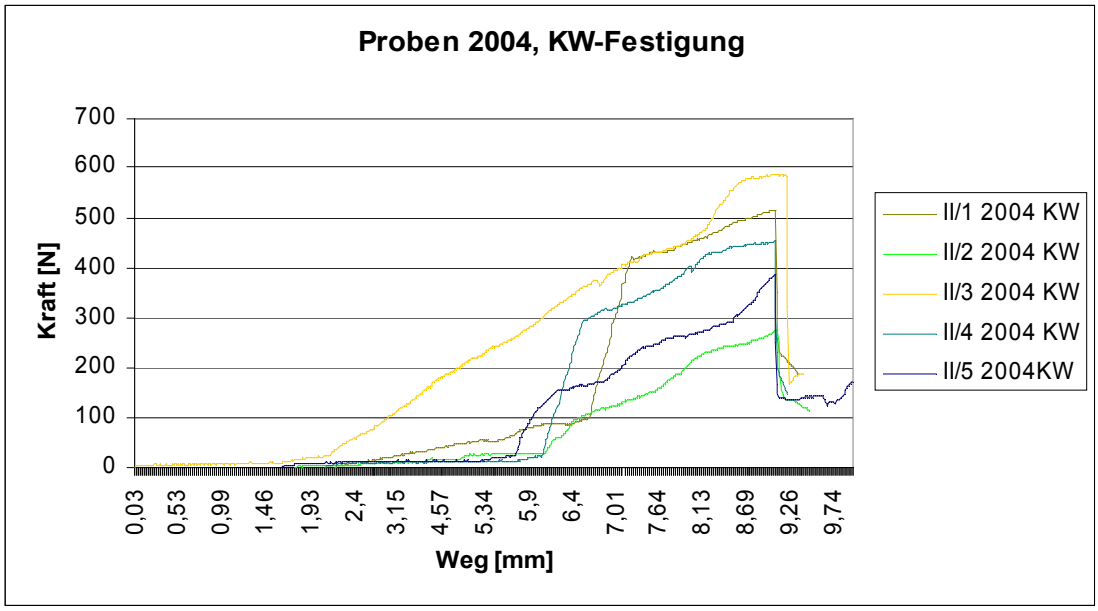

Diagramm 19: Spaltzugversuch, Proben 2004, Festigung mit Kalkwasser

Durch die Applikation von Kalkwasser konnte die Festigkeit der Proben um 34% gesteigert werden. Diese Festigkeitsentwicklung ist durchaus mit jener, der Proben aus dem Jahr 2006 zu vergleichen und bestätigt, dass es möglich ist infolge Behandlung mit Kalkwasser eine Festigung zu erzielen.

3) Ubersicht V 1 – V 2

Tabelle 9: Übersicht Spaltzugfestigkeit Proben 2004

Spaltzugfestigkeit (Mittelwert aus 5 Proben)	
Vorversuchsreihe1 2004	0,121 N/mm²
Vorversuchsreihe 2 2004 Kalkwasser	0,162 N/mm²

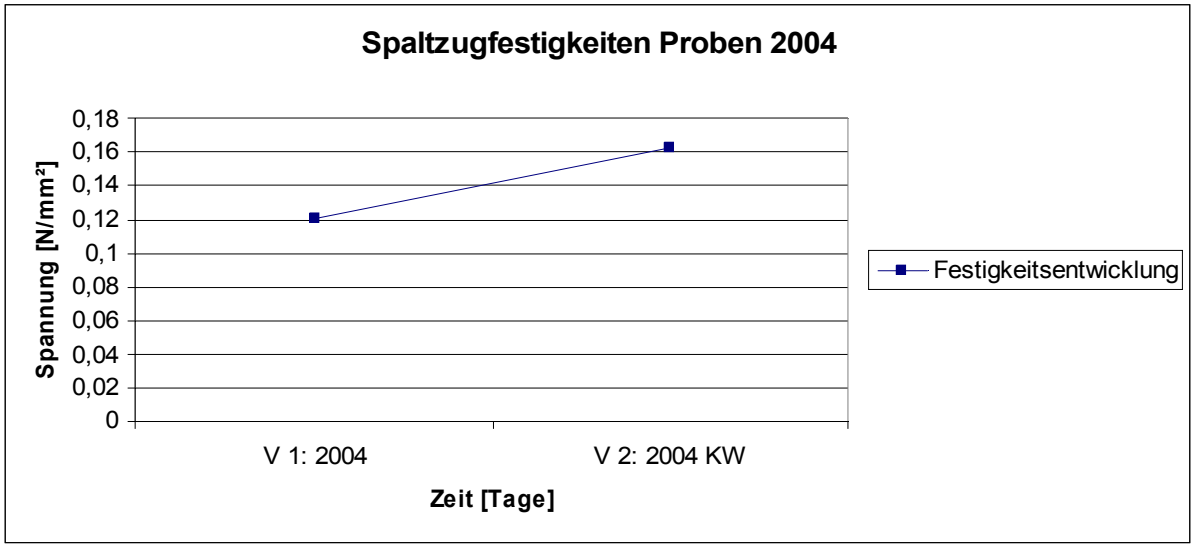

Diagramm 20: Übersicht Spaltzugfestigkeit, Proben 2004

Die Karbonatisierung ist bei historischen Bauwerken bereits abgeschlossen. Wie bei den obigen Laborversuchen aber bestätigt wird, ist die Festigung mit Kalkwasser am schnellsten bzw. am Wirkungsvollsten, wenn die Karbonatisiserung noch nicht abgeschlossen ist. Bei erhärtetem, karbonatisiertem Kalk ist die Festigung mit Kalkwasser nur sehr langsam möglich, das heißt um eine Konsolidierung nachzuweisen, müssten längere Versuchsintervalle angesetzt werden.

B) HAUPTVERSUCH

Für die Konsolidierung wurden folgenden Medien gewählt:

1) ohne Festigungsmedium	(0-0-0)
2) Festigung mit Kalkwasser	(0-0-KW)
3) Festigung mit *Bacillus cereus*	(BC-0-0)
4) Festigung mit *Bacillus cereus* und Carbonatwasser	(BC-0-KW)
5) Festigung mit *Bacillus cereus* und Nährlösung	(BC-NL-0)
6) Festigung mit *Bacillus cereus*, Nährlösung und Carbonatwasser	(BC-NL-KW)
7) Festigung mit *Bacillus cereus* und reduzierter Nährlösung	(BC-½NL-0)
8) Festigung mit *Bacillus cereus*, reduzierter Nährlösung und Carbonatw.	(BC-½NL-KW)

1. Versuchsreihe:

Tabelle 10: Spaltzugfestigkeit, 1. Versuchsreihe, Laborproben

Proben-Bezeichnung	Spaltzugfestigkeit	
	Kellerlagerung	Laborlagerung
0-0-0	0,190–0,237 N/mm²	0,154-0,259 N/mm²
0-0-KW	0,180-0,221 N/mm²	0,184-0,225 N/mm²
BC-0-0	0,111-0,126 N/mm²	0,160-0,199 N/mm²
BC-0-KW	0,111-0,190 N/mm²	0,111-0,176 N/mm²
BC-NL-0	0,119-0,164 N/mm²	0,116-0,156 N/mm²
BC-NL-KW	0,136-0,180 N/mm²	0,118-0,166 N/mm²
BC-½NL-0	0,095-0,143 N/mm²	0,125-0,167 N/mm²
BC-½NL-KW	0,105-0,133 N/mm²	0,120-0,143 N/mm²

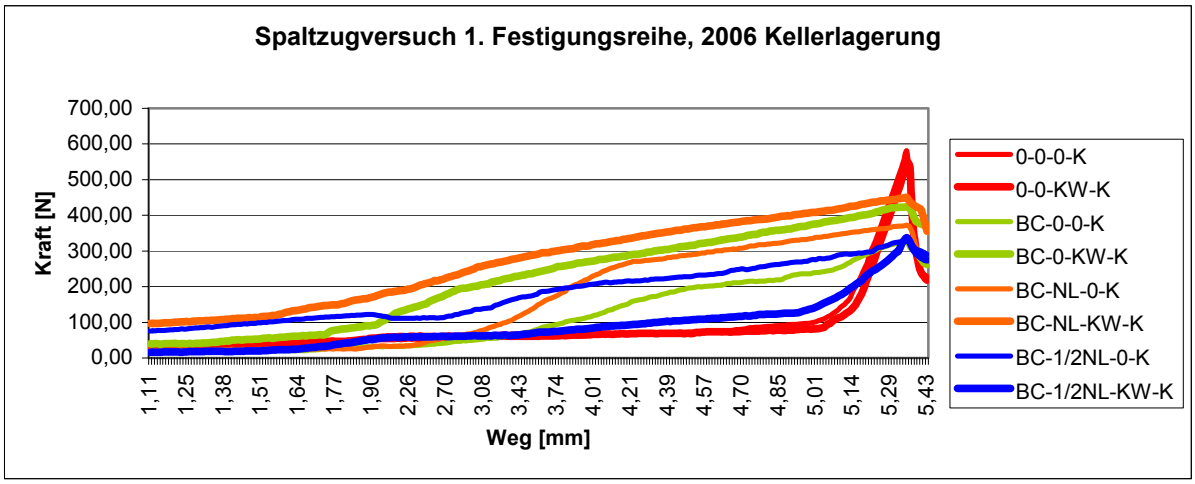

Diagramm 21: Spaltzugversuch, 1. Versuchsreihe, 2006 Kellerlagerung

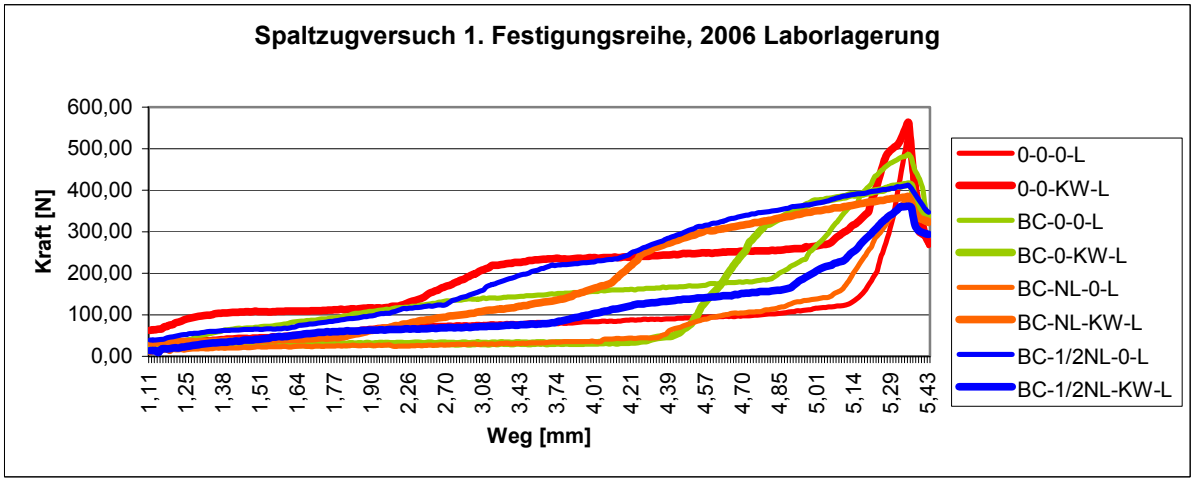

Diagramm 22: Spaltzugversuch, 1. Versuchsreihe, 2006 Laborlagerung

Anhand der Tabelle 10 kann man erkennen, dass neben den Wasseraufnahmekoeffizienten auch die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeit starken Schwankungen unterworfen sind. Die Spaltzugfestigkeit der unbehandelten Proben und jener Proben, die mit Kalkwasser gefestigten wurden, zeigen einheitlich relativ hohe Bruchfestigkeiten. Die bakteriell gefestigten Proben zeigen hingegen deutlich verminderte Bruchfestigkeiten. In der zweiten Versuchsreihe wurde die Feuchtigkeit der Putzproben nicht nur vor dem Spaltzugversuch an der Oberfläche, sonder auch nach dem Versuch an der Bruchfläche gemessen. Es zeigte sich, dass die Proben mit sehr geringen Bruchfestigkeiten noch eine Restfeuchtigkeit von ca. 10% im Inneren der Probe aufwiesen, obwohl an der Oberfläche 0% Feuchtigkeit nachgewiesen werden konnte. Diese Restfeuchtigkeit an den bakteriell gefestigten Proben, lässt sich wahrscheinlich auf die hydrophobierende Wirkung der Bakterien zurückführen. Dies könnte auch bei der ersten Versuchsreihe die verminderten Spaltzugfestigkeiten bei den bakteriell gefestigten Proben erklären.

2. Versuchsreihe

Tabelle 11: Spaltzugfestigkeit, 2. Versuchsreihe, Laborproben

Proben-Bezeichnung	Max. Bruchkraft und Spaltzugfestigkeit	
	Kellerlagerung 2006	Laborlagerung 2004
0-0-0	0,190-0,214 N/mm²	0,101-0,128 N/mm²
0-0-KW	0,160-0,170 N/mm²	0,147-0,161 N/mm²
BC-0-0	0,171-0,221 N/mm²	0,108-0,212 N/mm²
BC-0-KW	0,194-0,218 N/mm²	0,155-0,164 N/mm²
BC-NL-0	0,109-0,194 N/mm²	0,095-0,155 N/mm²
BC-NL-KW	0,148-0,212 N/mm²	0,139-0,141 N/mm²
BC-½NL-0	0,186-0,250 N/mm²	0,150-0,154 N/mm²
BC-½NL-KW	0,184-0,218 N/mm²	0,089-0,151 N/mm²

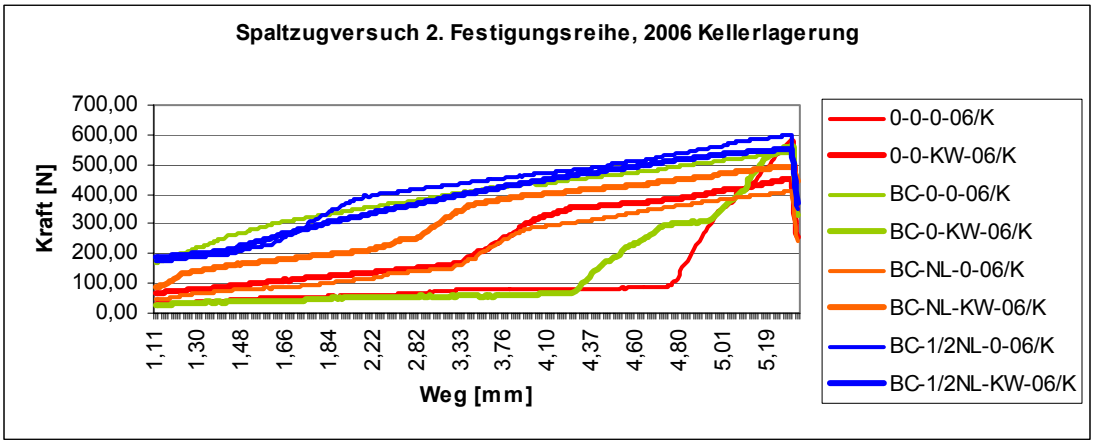

Diagramm 23: Spaltzugversuch, 2. Versuchsreihe, 2006 Kellerlagerung

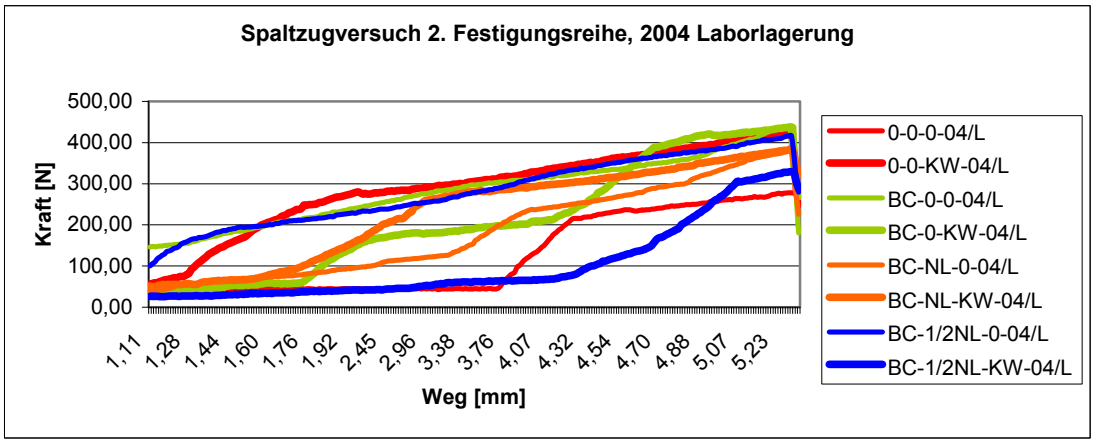

Diagramm 24: Spaltzugversuch, 2. Versuchsreihe, 2004 Laborlagerung

Im zweiten Festigungsversuch konnten deutlich höhere Spaltzugfestigkeiten erreicht werden, jedoch gibt es auch hier wieder starke Streuungen bei den Ergebnissen. Da für die Proben aus dem Jahr 2004 Kabelsand als Zuschlagstoff und für die Proben aus dem Jahr 2006 gewaschener Estrichsand als Zuschlagstoff verwendet wurde, resultieren aus dem Spaltzugfestigkeitsversuch geringere Bruchfestigkeiten der 2004 hergestellten Proben. Diese liegen bei den Putzproben, die 2004 hergestellt wurden, bei ca. 0,11 bis 0,15N/mm² und bei den Proben aus dem Jahr 2006 bei ca. 0,16 bis 0,21N/mm². Im Rahmen dieser Versuche wurde die Feuchtigkeit der Putzproben nicht nur vor dem Spaltzugversuch an der Oberfläche, sondern auch nach dem Versuch an der Bruchfläche gemessen. Es zeigte sich, dass die Proben mit sehr geringen Bruchfestigkeiten noch eine Restfeuchtigkeit von ca. 10% im Inneren der Probe aufwiesen, obwohl an der Oberfläche 0% Feuchtigkeit nachgewiesen werden konnte. Diese Restfeuchtigkeit konnte nur an den bakteriell gefestigten Proben nachgewiesen werden und lässt sich wahrscheinlich auf die hydrophobierende Wirkung der Bakterien zurückführen.

3.1.5 Karbonatisierung

Unter Zuhilfenahme der Indikatorflüssigkeit Phenolphthalein 0,1% wurde untersucht, ob die Karbonatisierung der Laborprüfkörper bereits abgeschlossen ist. Diese ist im PH-Wertbereich von 0 bis 8,2 und im stark alkalischen Bereich um 14 farblos, dazwischen färbt sich die Flüssigkeit rötlich-lila. Bei fortschreitender Karbonatisierung senkt sich der PH-Wert von ca. 13 auf bis zu 8 ab. Somit kann die Karbonatisierung ersichtlich gemacht werden.
Bei den Vorversuchen konnte man, nach dem Besprühen mit Phenolphtalein, eine deutliche Lila Färbung erkennen. Mit diesem Ergebnis war auf jeden Fall zu rechnen, da es bedeutet, dass die Proben noch nicht vollständig karbonatisiert waren.
Bei den Hauptversuchen konnte festgestellt werden, dass die Proben aus dem Jahr 2006 bereits keinen Farbumschlag mehr zeigten, die Proben aus dem Jahr 2004 jedoch schon. Hier muss allerdings festgehalten werden, dass die Ergebnisse der Bestimmung der Karbonatisierung, speziell in diesem Fall mit Vorsicht zu betrachten sind, da die Proben mit Medien mit einem PH-Wert im Bereich von 8,0 bis 8,2 behandelt wurden und dies den Farbumschlag beeinflusst haben könnte.

3.1.6 Bestimmung der Eindringtiefe der Bakterien (PAS)

Die Bestimmung der Eindringtiefe der Bakterien wurde mit Hilfe des PAS – Verfahren (Perjodsäure – Schiff Reaktion) durchgeführt. Durch diese erfolgt eine fuchsinrote Färbung von PAS – positiven Bakterien, im Speziellen eine Anfärbung des Biofilms Muzin. Der Versuchsaufbau für die Färbung mittels PAS ist sehr komplex und genau einzuhalten. Dieser wurde im Kapitel 2.1.7 genau beschrieben.
Exemplarisch wurde an einigen Proben aus der zweiten Versuchsreihe die Eindringtiefe der Bakterien festgestellt. Aufgrund der beschränkten Größe der Prüfgefäße, in denen die Färbung durchgeführt wurde, konnten nur Probestücke mit ca. 2cm x 3cm getestet werden.

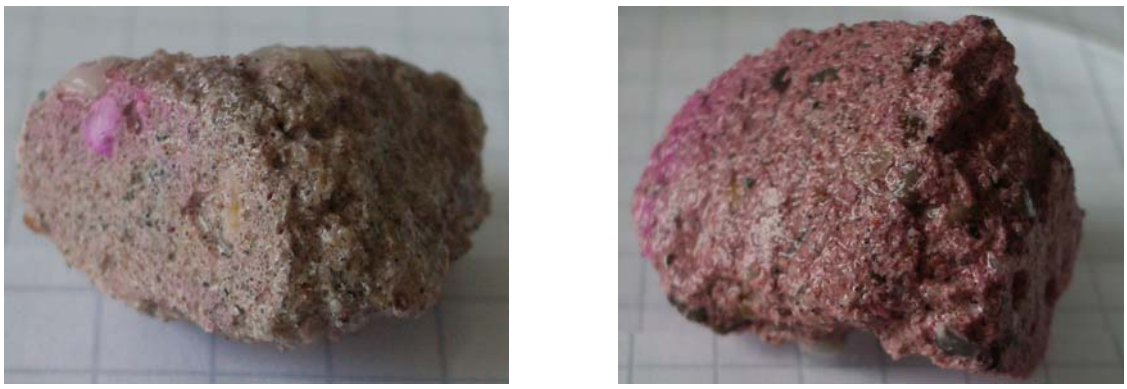

Abbildung 30: PAS, links: 0-0-KW 2004, rechts: BC-0-0 2006

Da es sich bei den Proben nicht um steril gelagerte Proben handelt, ist bei der mit Kalkwasser behandelten Probe ebenfalls ein leicht gefärbter Bereich festzustellen, diese Färbung ist allerdings vernachlässigbar. An der Probe rechts oben (BC-0-0 2006) ist durchwegs eine deutliche fuchsinrote Färbung zu erkennen. Ein Eindringen der Bakterien kann über den gesamten Probekörper festgestellt werden.

Abbildung 31: PAS, links: BC-0-KW 2004, rechts: BC-NL-0-2006

Der Probekörper BC-0-KW 2004 zeigt über die gesamte Probe nur eine leichte fuchsinrote Färbung. Im Gegensatz dazu weist die Putzprobe BC-NL-0 2006 eine deutliche Färbung und somit eine gute Eindringtiefe der Bakterien über den gesamten Probekörper auf. Anders als an der Kartause Mauerbach, wurde die Applikation der Bakterien an den Laborproben, in liegenden Behältnissen durchgeführt. Dadurch kann ein erfolgreiches Eindringen der applizierten Medien sichergestellt werden.

Abbildung 32: PAS, links: BC-NL-KW 2004, rechts: BC-½NL-0 2004

An den Proben „BC-NL-KW 2004“ und „BC-½NL-0 2004“ kann nur eine sehr leichte Färbung festgestellt werden.

Abbildung 33: PAS, links und rechts: BC-½NL-KW 2006

Die obige Abbildung zeigt die Probe BC-½NL-KW. Hier ist eine Konzentration der Bakterien auf der Oberfläche feststellbar. Es ist jedoch auch ersichtlich, dass das applizierte Medium in den gesamten Prüfkörper eingedrungen ist und die gesamte Probe eine deutliche fuchsinrote Färbung aufweist.

Auffällig ist, dass alle Proben aus dem Jahr 2006 eine deutliche Färbung der gesamten Probe aufweisen. Im Vergleich dazu kann bei den Proben aus dem Jahr 2004 kaum eine Färbung festgestellt werden. Da die Applikation der Festigungsmedien zur selben Zeit und den selben Mengen erfolgte, liegt der einzige Unterschied der 2004/2006 hergestellten Proben darin, dass bei der Herstellung der Proben 2004 Kabelsand und für die Proben 2006 gewaschener Estrichsand als Zuschlagstoff verwendet wurde. Somit kann festgestellt werden, dass das Wachstum der Bakterien von der Art des Zuschlagstoffs und des Porenraums bzw. dessen Begleitstoffen abhängig sein muss.

3.1.7 Reisolierung *Bacillus cereus*

Die Reisolierung des Bodenbakteriums *Bacillus cereus* wurde mittels der „Ausschütteltechnik“ durchgeführt. Bei dieser Technik mussten die Proben vorab zerkleinert und eine Stunde in einer Tween80-Lösung geschwenkt werden. Nach einem Tag erfolgte die Auszählung der Bakterien. Einige Proben konnten, aufgrund der zu großen Menge an Einzelkulturen, nicht ausgezählt werden. Aus diesem Grund mussten zwei zusätzliche Verdünnungsstufen angelegt werden, durch die eine Auszählung möglich wurde.

Exemplarisch wurde an einigen Proben aus der zweiten Festigungsserie die Reisolierung der applizierten Bakterien durchgeführt.

Getestete Proben, aus der zweiten Versuchsreihe:

0-0-KW 2004	ca. 4.800 Zellen pro Gramm
BC-0-0 2006	ca. 400.000 Zellen pro Gramm
(Erst in der zweiten Verdünnungsstufe auszählbar!)	
BC-0-KW 2004	ca. 2.900 Zellen je pro Gramm
BC-NL-0 2006	ca. 800.000 Zellen pro Gramm
(Erst in der zweiten Verdünnungsstufe auszählbar!)	
BC-NL-KW 2004	ca. 400 Zellen pro Gramm
BC-½NL-0 2004	ca. 3.700 Zellen pro Gramm
BC-½NL-KW 2006	ca. 400.000 Zellen pro Gramm
(Erst in der zweiten Verdünnungsstufe auszählbar!)	

Das Bakterium *Bacillus cereus* wächst in großen, „fransigen“ Einzelkulturen heran. Neben diesen konnten noch kleine, scharf abgegrenzte Kulturen isoliert werden, welche eine zusätzliche Begleitflora darstellen. Diese kann sich auf den Proben bilden, da diese unter nicht sterilen Bedingungen im Labor behandelt und untersucht wurden. Die zusätzlich vorhandene Flora wurde nicht weiter untersucht.

Die Reisolierung zeigte, dass für die Putzproben aus dem Jahr 2006 zwei zusätzliche Verdünnungsstufen angelegt werden mussten, da diese binnen 24 Stunden stark überwachsen und somit nicht mehr auszählbar waren. Dies bedeutet, dass diese Proben eine wesentlich höhere Konzentration an *Bacillus cereus* zeigen, als die Proben aus dem Jahr 2004. Dies bestätigt den infolge der PAS – Färbung ermittelten Verdacht, dass die Proben 2006 höhere Konzentrationen an *Bacillus cereus* aufweisen.

Weiters ist festzustellen, dass an der Probe (0-0-KW 2004), an welcher nur Kalkwasser appliziert wurde, auch der Bakterienstamm *Bacillus cereus* isoliert werden konnte. Grund dafür kann die nicht sterile Lagerung bzw. Transport der Putzproben sein.

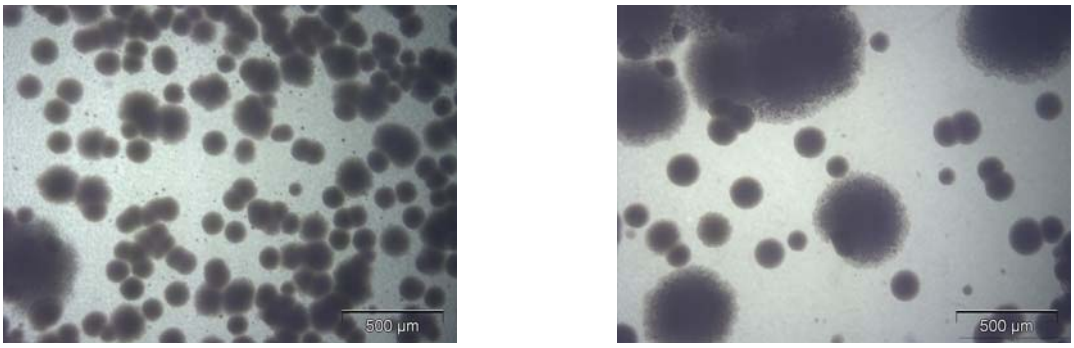

Abbildung 34: Mikroskopische Aufnahme, reisolierter Bacillus cereus

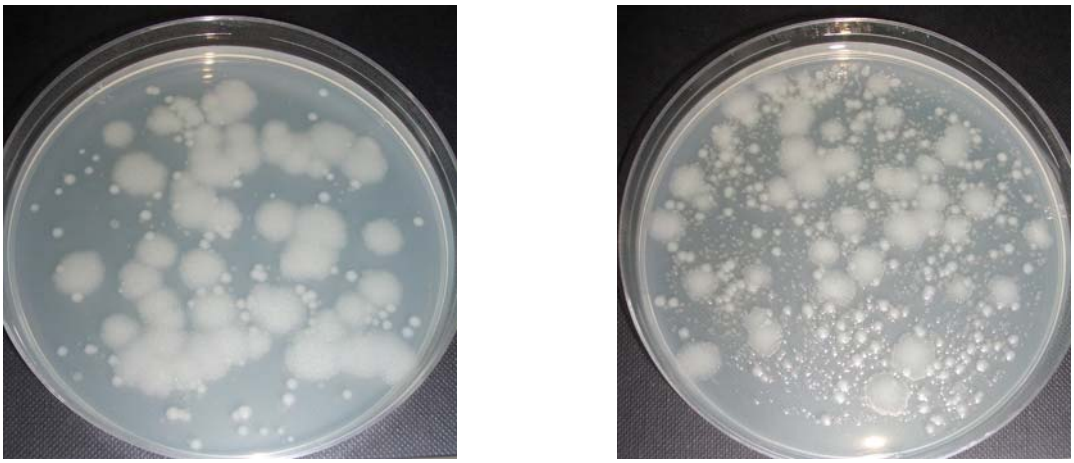

Abbildung 35: Reisolierung, links: 0-0-KW 2004, rechts: BC-½NL-0 2004

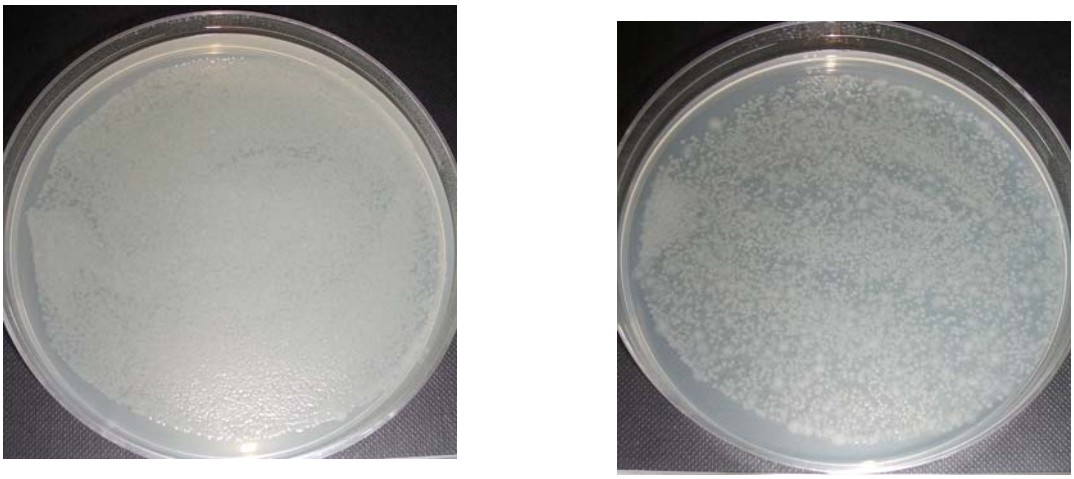

Abbildung 36: Reisolierung, links: BC-0-0 2006, rechts: BC-NL-0 2006

3.1.8 Dünnschliffanalytik

Für die Herstellung der Dünnschliffe wurden die Proben mittels Vakuumimprägnierung in Kunstharz getränkt und nach deren Aushärtung in ca. 0,025-0,003mm dicke Schichten geschliffen und auf eine Glasträgerplatte geklebt. Mit der Herstellung der Dünnschliffe wurde die Firma Geo. Präp. beauftragt. Exemplarisch wurden von einigen Proben aus der 2. Festigungsserie Dünnschliffe angefertigt. Ergänzend wurden auch zwei Dünnschliffe einer unbehandelten Probe und einer Probe aus der ersten Versuchsreihe hergestellt.

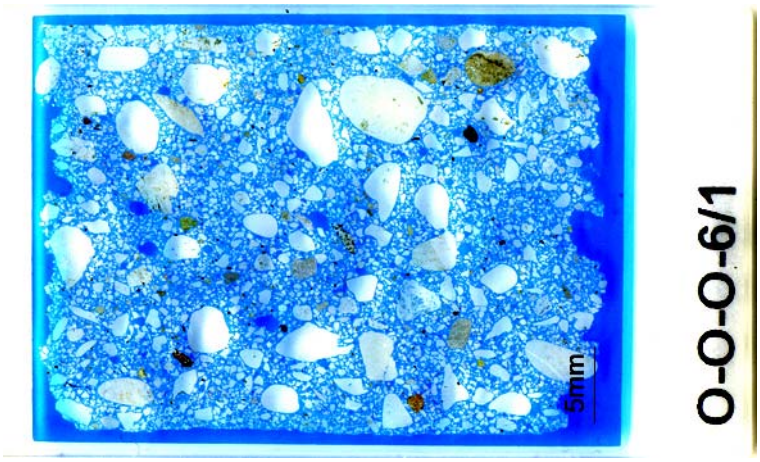

Abbildung 37: Dünnschliff 0-0-0 2006/1, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Der Dünnschliff der Probe 0-0-0 2006/1 zeigt einen gemischtkörnigen Zuschlagstoff (GK ca. 5mm) mit einigen mittelgroßen Poren. Die gesamte Probe ist relativ homogen und kompakt. Für die Herstellung aller Proben aus dem Jahr 2006 wurde als Zuschlagsstoff gewaschener Estrichsand der Firma Schauerhuber verwendet.

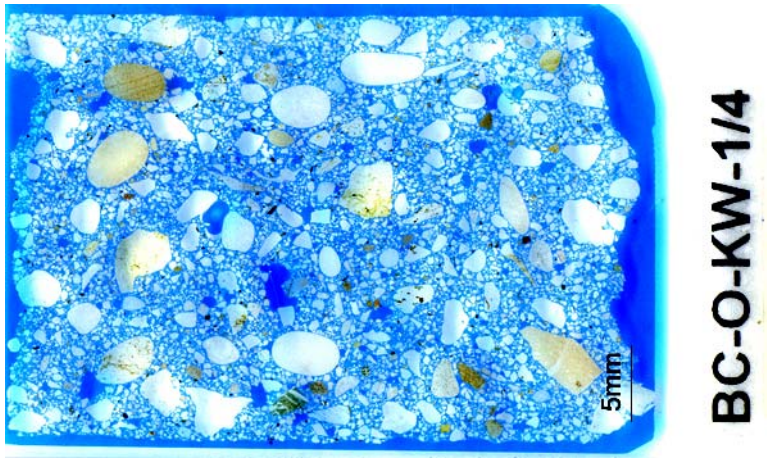

Abbildung 38: Dünnschliff BC-0-KW 2006/4, 1. Festigungsserie, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Die Probe BC-0-KW 2006/4 wurde mit der ersten Festigungsserie konsolidiert. Der Putzprobekörper stammt ebenfalls aus der 2006 hergestellten Serie und zeigt ebenfalls ein sehr gleichmäßiges und kompaktes Bild. Der Zuschlagstoff ist gemischtkörnig, mit Größtkornabmessungen bis zu ca. 5mm. Weiters sind einige Poren mit ungleichmäßiger Form zu erkennen.

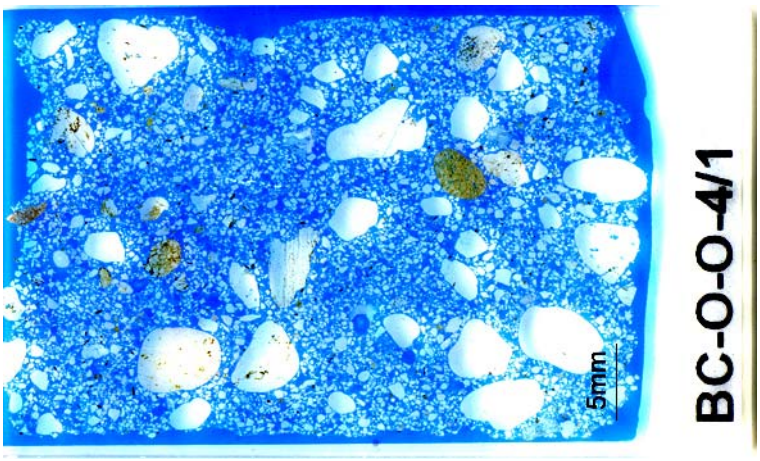

Abbildung 39: Dünnschliff BC-0-0 2004/1, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Anhand der Probe BC-0-0 2004/1 kann man deutlich erkennen, dass die 2004 hergestellten Putzproben mit einem anderen Zuschlagsstoff (siehe Kapitel 2.2) hergestellt wurden, als jene aus dem Jahr 2006. Die Probe weist einen feineren Zuschlagstoff auf, wobei auch einige große Körner mit einer maximalen Länge von ca. 5mm vorhanden sind. Das Gefüge wirkt kompakt und weist wenige kleinere Poren auf. Die Abnutzung und somit die Unebenheit der Oberfläche resultiert aus Lagerung und Transport der Probe. Als Zuschlagstoff wurde bei den Putzproben aus dem Jahr 2004 Kabelsand verwendet.

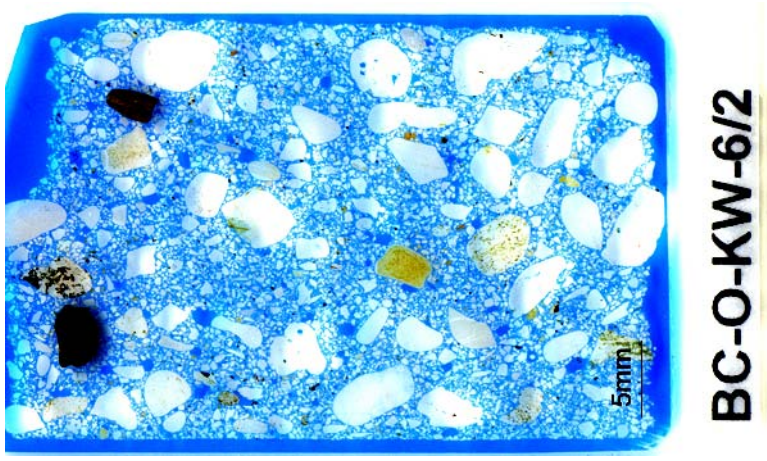

Abbildung 40: Dünnschliff BC-0-KW 2006/2, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Der Dünnschliff der Probe BC-0-KW 2006/2 weist wieder ein gemischtkörniges Gesamtbild auf und zahlreiche kleinere Poren sind zu erkennen. Weiters fällt in dem Dünnschliff auf, dass im rechten oberen Bereich gehäuft größere Zuschlagskörner, mit einer maximalen Länge von ca. 5mm vorkommen.

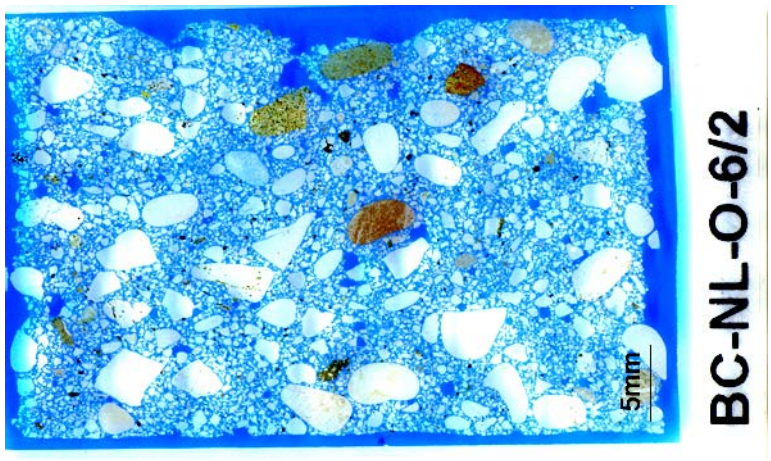

Abbildung 41: Dünnschliff BC-NL-0 2006/2, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Die Probe BC-NL-0 2006/2 besteht aus einem gemischtkörnigen Zuschlagstoff mit einigen mittelgroßen Poren. Die Größtkornabmessungen betragen ca. 4mm. Das Gesamtbild wirkt im Inneren und im unteren Bereich der Probe sehr homogen und kompakt. Der obere Bereich des Dünnschliffs ist sehr uneben, dieser Schaden könnte von der Herstellung der Dünnschliffe oder vom Transport der Proben stammen.

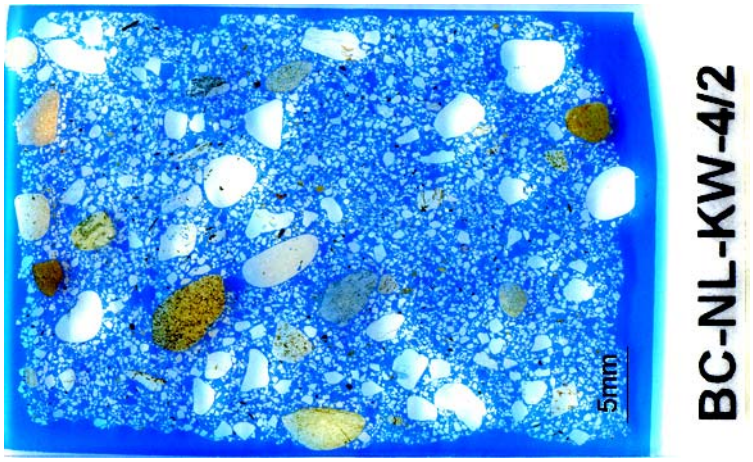

Abbildung 42: Dünnschliff BC-NL-KW 2004/2, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Der Dünnschliff der Probe BC-NL-KW 2004/2 zeigt ein homogenes Bild. Der Zuschlagstoff ist relativ fein, mit wenigen größeren Zuschlagskörnern (GK ca. 5mm). Neben einigen kleinen Poren wirkt die Probe relativ kompakt. Da die Probe aus dem Jahr 2004 stammt, zeigt die Oberfläche Spuren der Abnutzung, welche durch Lagerung und Transport entstanden sind.

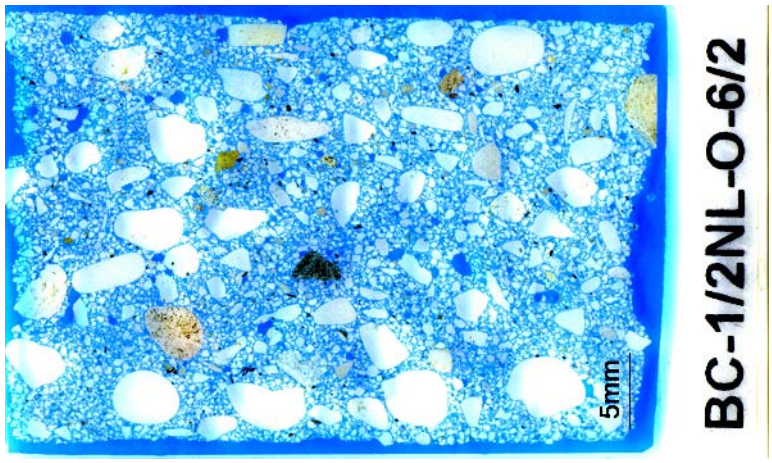

Abbildung 43: Dünnschliff BC-½NL-0 2006/2, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Die Probe BC-½NL-0 2006/2 zeigt ein sehr kompaktes und homogenes Gefüge mit einer glatten Oberfläche. Der Zuschlagstoff ist gemischtkörnig und die Probe zeigt einige kleinere Poren. An der unteren Seite des Dünnschliffs liegen einige größere Zuschlagskörner, welche sich beim Anwerfen des Putzes in dieser Weise platziert haben könnten.

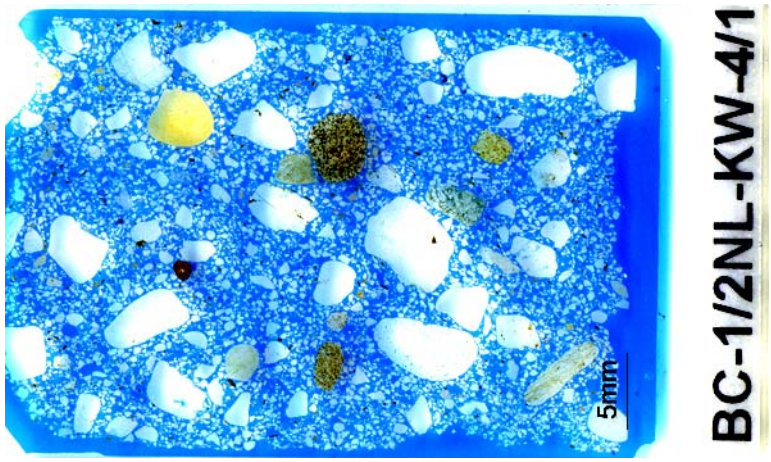

Abbildung 44: Dünnschliff BC-½NL-KW 2004/1, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Die Probe BC-½NL-KW 2004/1 besteht aus einem relativ feinen Zuschlagstoff mit zahlreichen großen Zuschlagskörnern. Das Gefüge wirkt kompakt und weist nur wenige kleine Poren auf. Die Größtkornabmessungen betragen ca. 5mm.

Detailaufnahmen:

Die Detailaufnahmen wurden an einem Mikroskop unter 20-facher Vergrößerung, an der TU – Wien angefertigt. Die Bilder wurden mit einer Digitalkamera (Pentax Optio S5i) erstellt.

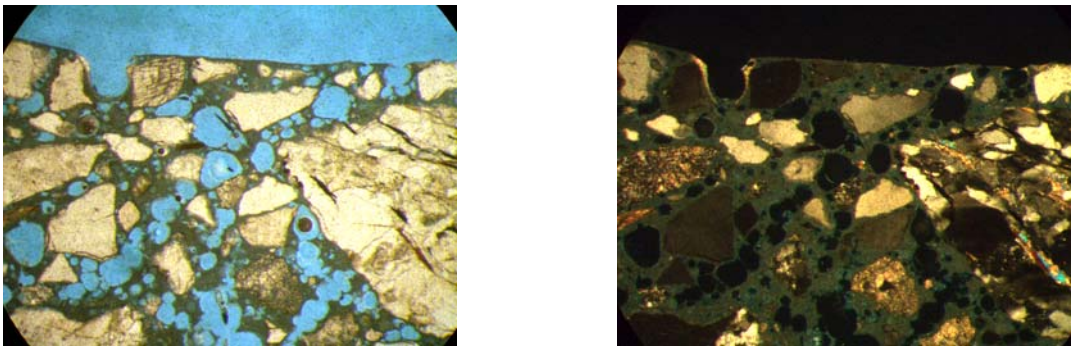

Abbildung 45: Detailaufnahme Dünnschliff BC-0-0 2004/1, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter

Bei der Detailaufnahme des Dünnschliffs der Probe BC-0-0 2004/1 kann man im linken Bereich der Oberfläche einen hellen „Überzug“ einer offenen Pore erkennen. Dieser Bereich könnte eine neu gebildete Calciumcarbonatschicht darstellen.

Abbildung 46: Detailaufnahme Dünnschliff BC-0-KW 2006/2, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter

An einer Detailaufnahme der Probe BC-0-KW 2006/2 ist an der gesamten Oberfläche ebenfalls eine helle Schicht zu erkennen, diese könnte ebenfalls auf eine Neubildung von Calciumcarbonat hinweisen. Analog ist die Detailaufnahme der Probe BC-NL-KE 2004/2 zu werten.

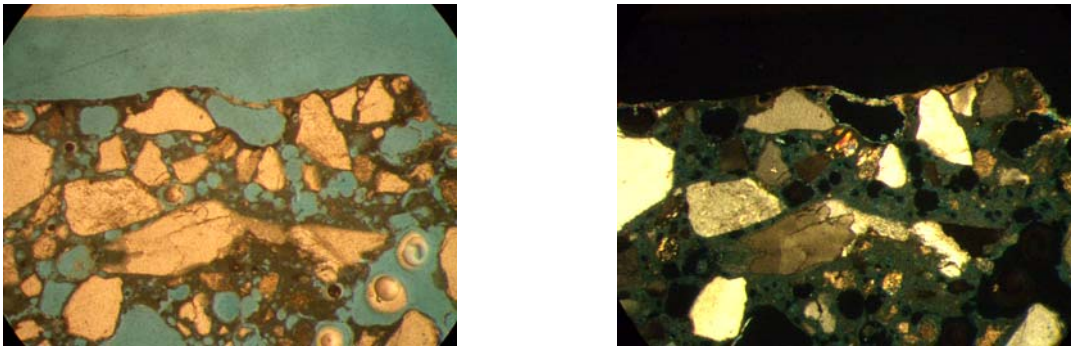

Abbildung 47: Detailaufnahme Dünnschliff BC-NL-KW 2004/2, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter

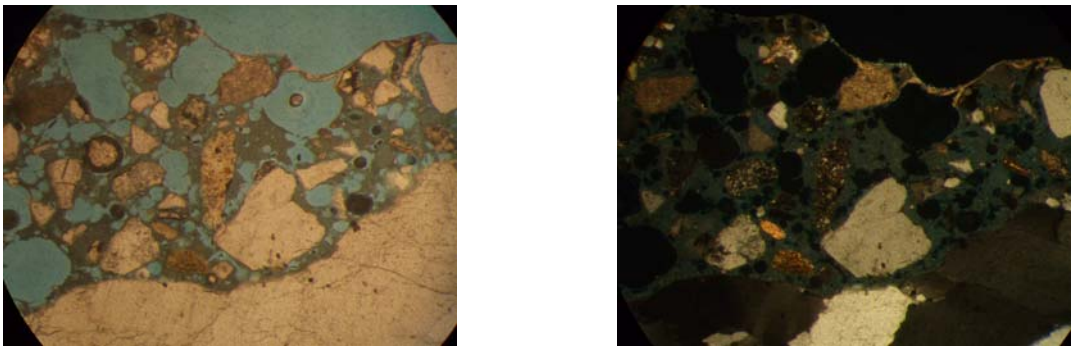

Abbildung 48: Detailaufnahme Dünnschliff BC-½NL-KW 2004/1, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter

Anhand der Detailaufnahme der Probe BC-½NL-KW 2004/1 ist ebenfalls eine hellere Schichte zu erkennen. Analog zu den hier gezeigten Proben, weist ein Großteil der Proben diese Bereiche auf, welche neu gebildetes Calciumcarbonat darstellen könnten.
Im Inneren der Prüfkörper konnten mit dem Lichtmikroskop keine eindeutigen Calcitneubildungen nachgewiesen werden.

3.1.8 Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop

Für die Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop wurde ein Bruchstück und ein Dünnschliff der Laborprobe BC-0-0 2006 untersucht. Das Bruchstück der Putzprobe wurde vor der Untersuchung unter Vakuum mit Gold bedampft, um die Leitfähigkeit der Oberfläche zu gewährleisten und anschließend mit Hilfe der Sekundärelektronen untersucht. Für die Untersuchung des Dünnschliffs mit der BSE-Methode wurde dieser zur Erhöhung der Leitfähigkeit vorab mit Kohlenstoff bedampft.

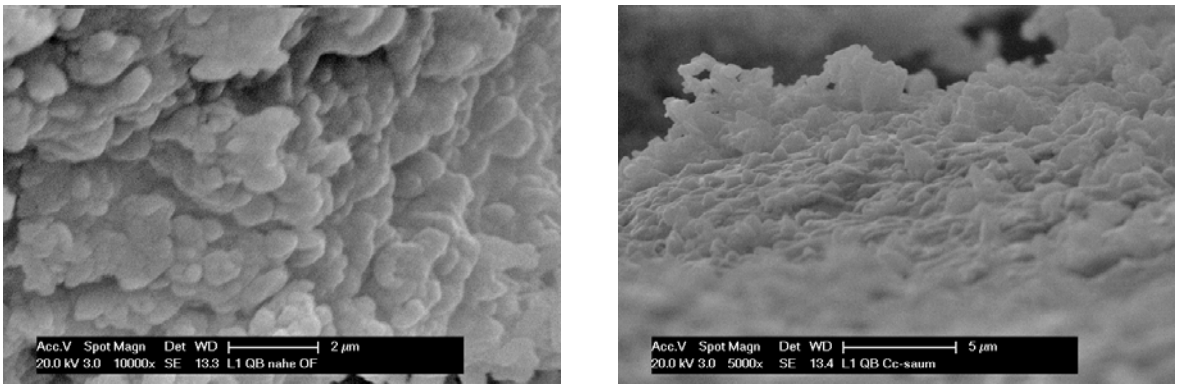

Abbildung 49: links: Biofilm nahe der Oberfläche, rechts: Calcitsaum auf Zuschlagsstoff

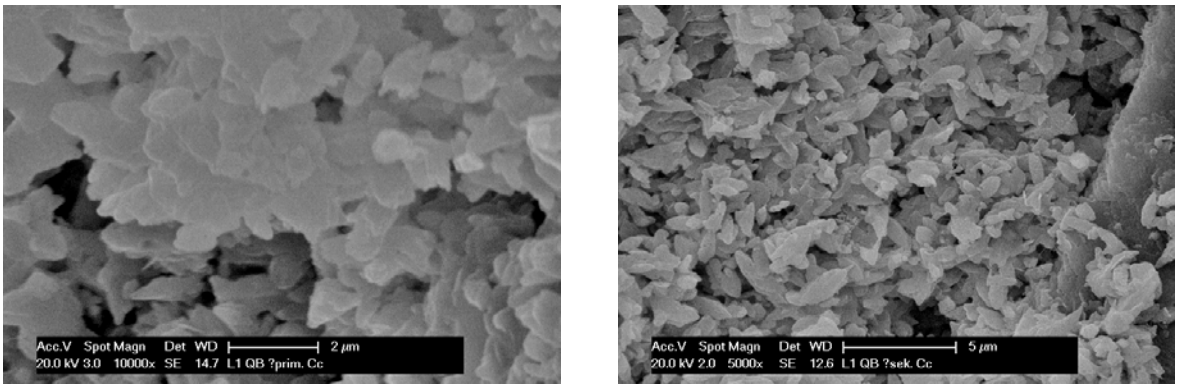

Abbildung 50: links: primärer Calcit, rechts: sekundärer Calcit

Mit Hilfe der Untersuchungen des Bruchstücks konnten keine eindeutigen Calcitneubildungen nachgewiesen werden. Um diese mit Sicherheit feststellen zu können, bedarf es monatelanger Untersuchungen verschiedenster behandelter und unbehandelter Proben. Es konnte jedoch, aufgrund des vorhandenen Mikrorissbildes, eine gewisse Nachfestigung der Proben festgestellt werden.

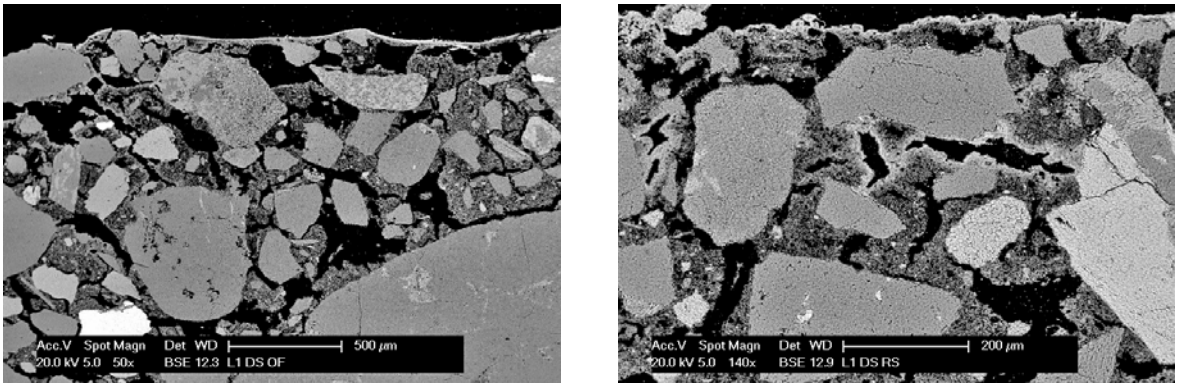

Abbildung 51: links und rechts: Dünnschliff Laborprobe

Anhand der untersuchten Dünnschliffe zeigen sich nahe der Oberfläche Nachfestigungen (helle Ränder um dunkle Poren). Diese sind mit der Nachfestigung bei Kalkwasserfestigung vergleichbar.

3.2 Putzflächen Mauerbach

An den Prüfflächen der Kartause Mauerbach wurden zerstörungsfreie Untersuchungen und letztlich auch Untersuchungen an Bruchstücken, nach Probenahme durchgeführt. Die zerstörungsfreien Untersuchungen wurden ein bzw. vier Monate nach der Applikation der Festigungsmedien durchgeführt. Die Probenahme erfolgte ca. nach eineinhalb Monate nach der Applikation der zweiten Versuchsreihe. Da bereits Untersuchungen, im Rahmen der Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005), an diesen Putzflächen durchgeführt wurden, konnten die Erfahrungen und Ergebnisse der vorangegangenen Arbeit teilweise in diese Diplomarbeit miteinbezogen werden.

3.2.1 Absanden

Zur Veranschaulichung des Absandeverhaltens wurden Peelingtests durchgeführt. Für diesen Versuch wurde ein Klebeband auf die Putzflächen geklebt und per Hand gleichmäßig festgedrückt. Unter Zuhilfenahme einer Federwaage wurde das Klebeband gleichmäßig langsam abgezogen. Über die Rückstände auf dem Klebeband und dem Widerstand beim Abziehen konnte eine Quantifizierung des Absandverhaltens erfolgen. Die Abschätzung des prozentualen Anteils der Rückstände auf dem Gewebeband, erfolgte gemäß dem Vergleichs-Schaubild von TERRY & CHILINGAR (1955), Kapitel 2.1.2. Die Bewertungen der Rückstände wurden stets am Originalklebeband vorgenommen. An dieser Stelle ist noch zu erwähnen, dass die Ergebnisse der Peelingtests stark von der Feuchtigkeit der Putzflächen abhängig sind.

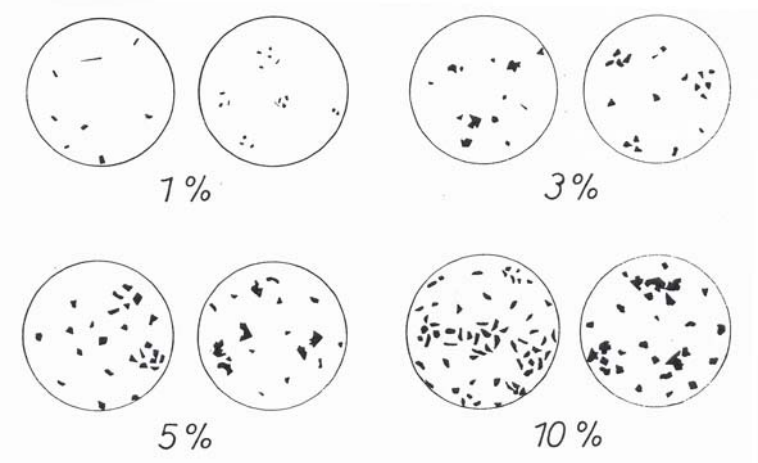

Abbildung 52: Ausschnitt Vergleichs-Schaubild TERRY & CHILINGAR (1955)

1. Versuchsreihe:

Putzfläche 6 (BC-0-KW):

Tabelle 12: Absandverhalten Fläche 6

Ort	Vor Festigung		Nach Festigung	
	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand
Fläche 6 (1)	1-3 %	5,0 g/cm²	1-3 %	17,5 g/cm²
Fläche 6 (2)	1 %	7,5 g/cm²	1 %	15,0 g/cm

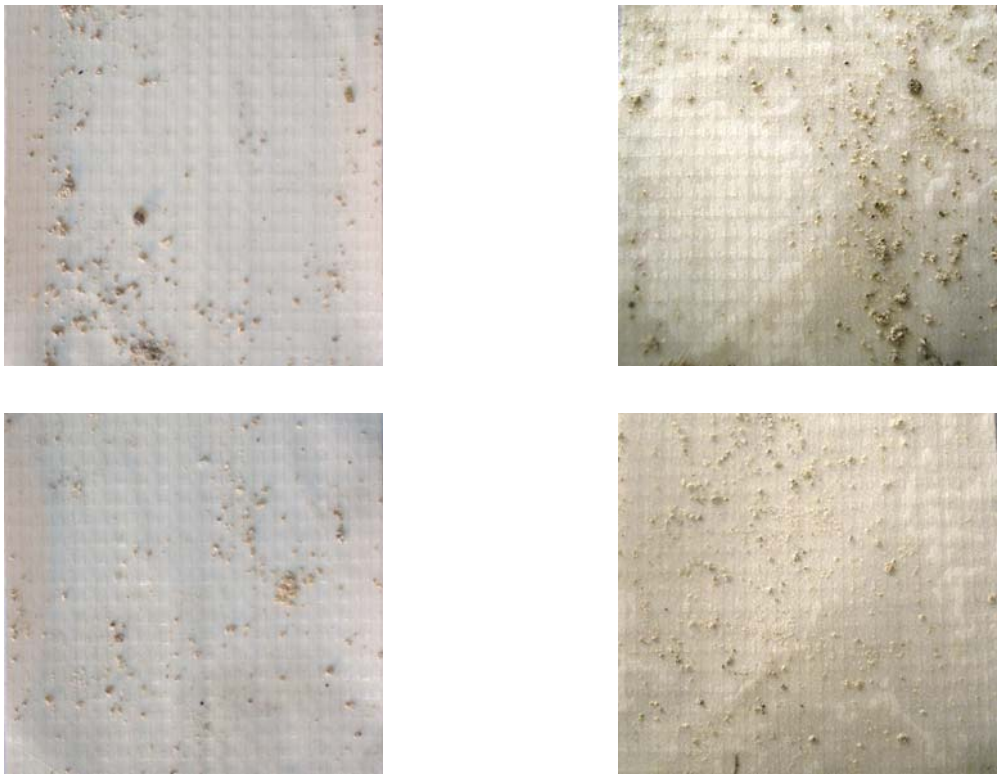

Abbildung 53: Putzfläche 6, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung

Anhand des Rückstandes auf dem Gewebeband allein, lässt sich keine Verbesserung des Absandverhaltens feststellen. Bezieht man jedoch den, für das Abziehen des Klebebandes benötigten Widerstand mit ein, so kann eine Verdichtung des Gefüges an der Putzfläche 6, festgestellt werden.

Putzfläche 7 (BC-NL-KW):

Tabelle 13: Absandverhalten Fläche 7

Ort	Vor Festigung		Nach Festigung	
	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand
Fläche 7 (1)	3-5 %	15,0 g/cm²	1-3 %	22,5 g/m²
Fläche 7 (2)	5-10 %	15,0 g/cm²	3-5 %	22,5 g/cm²

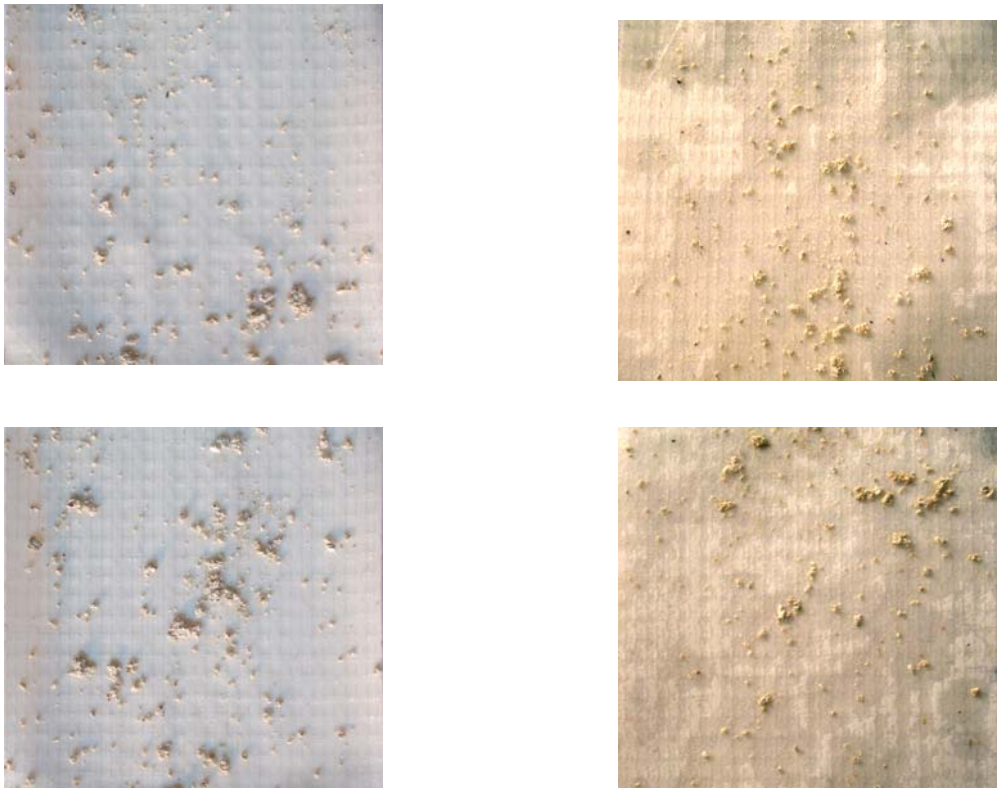

Abbildung 54: Putzfläche 7, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung

An der Prüffläche 7 kann man sowohl an den reduzierten Rückständen, als auch am größeren Widerstand eine Konsolidierung der Flächen feststellen. Somit hat die Behandlung mit *Bacillus cereus*, Nährlösung und Kalkwasser zu einer Konsolidierung der Putzfläche 7 geführt.

Putzfläche 8 (BC-½NL-KW):

Tabelle 14: Absandverhalten Fläche 8

Ort	Vor Festigung		Nach Festigung	
	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand
Fläche 8 (1)	10-20 %	20,0 g/cm²	10 %	15,0 g/cm²
Fläche 8 (2)	10 %	15,0 g/cm²	5-10 %	15,0 g/cm²

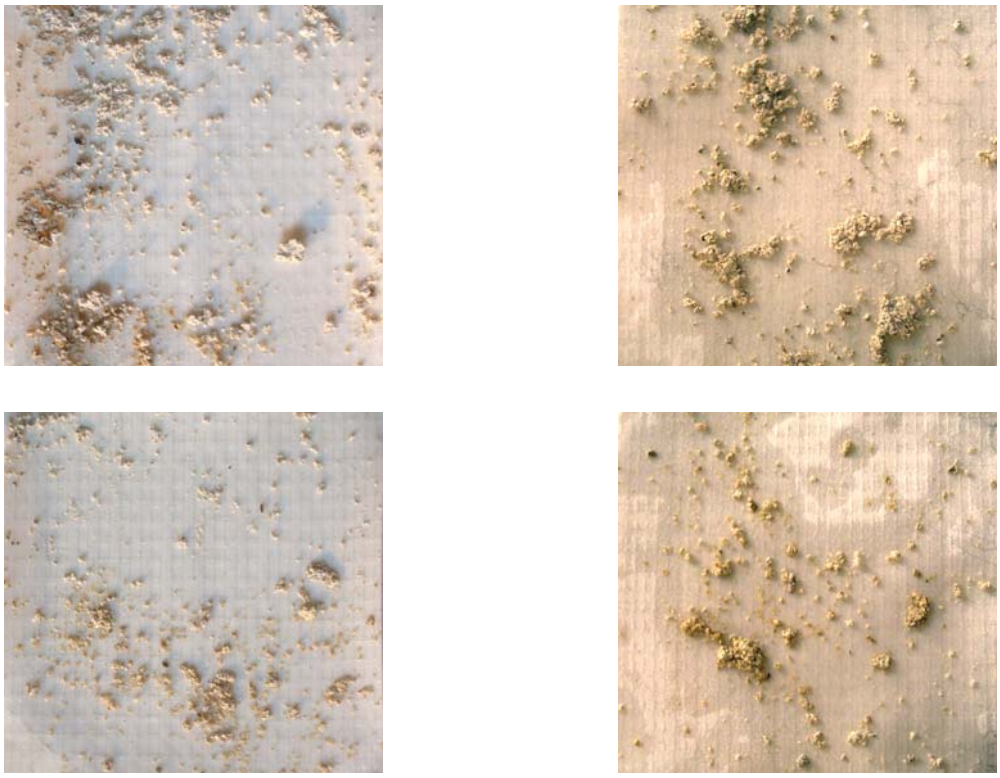

Abbildung 55: Putzfläche 8, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung

Auch an der Fläche 8 ist es durch die bakterielle Festigung zu einer Konsolidierung der Flächen gekommen. Dies zeigt sich durch die Reduktion der Rückstände auf dem Klebeband.

Putzfläche 9 (0-0-KW):

Tabelle 15: Absandverhalten Fläche 9

Ort	Vor Festigung		Nach Festigung	
	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand
Fläche 9 (1)	3-5 %	18,8 g/cm²	5-10 %	25,0 g/cm²
Fläche 9 (2)	5-10 %	21,3 g/cm²	3-5 %	20,0 g/cm²

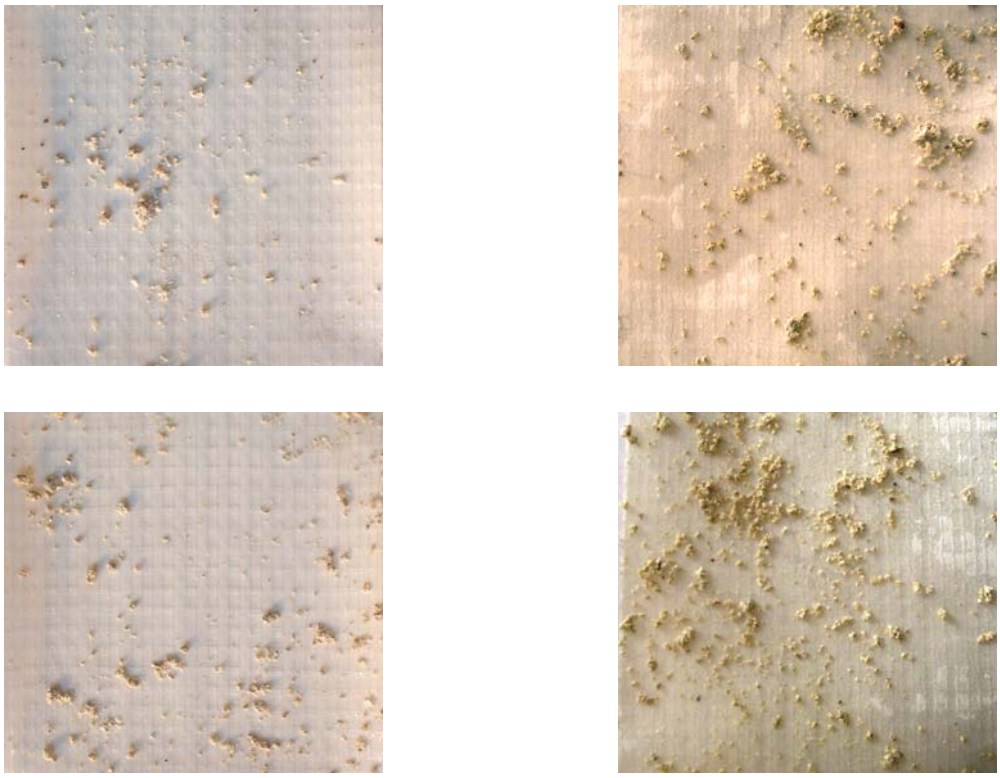

Abbildung 56: Putzfläche 9, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung

Die Wertung der Putzfläche 9, welche ausschließlich mit Kalkwasser gefestigt wurde, ist nicht so klar, wie die der vorhergegangenen Flächen. Die im Bereich (1) genommen Proben zeigen eine Zunahme der Rückstände auf dem Gewebeband und eine Zunahme des Abziehwiderstandes. Der Bereich (2) zeigt hingegen eine leichte Reduktion des Absandverhaltens, mit in etwa gleich bleibendem Abziehwiderstand.

2. Versuchsreihe:

Putzfläche 3 (BC-0-KW):

Tabelle 16: Absandverhalten Fläche 3

Ort	Vor Festigung		Nach Festigung	
	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand
Fläche 3 (1)	5 %	12,5 g/cm²	5 %	17,5 g/cm²
Fläche 3 (2)	5-10 %	12,5 g/cm²	5-10 %	12,5 g/cm²

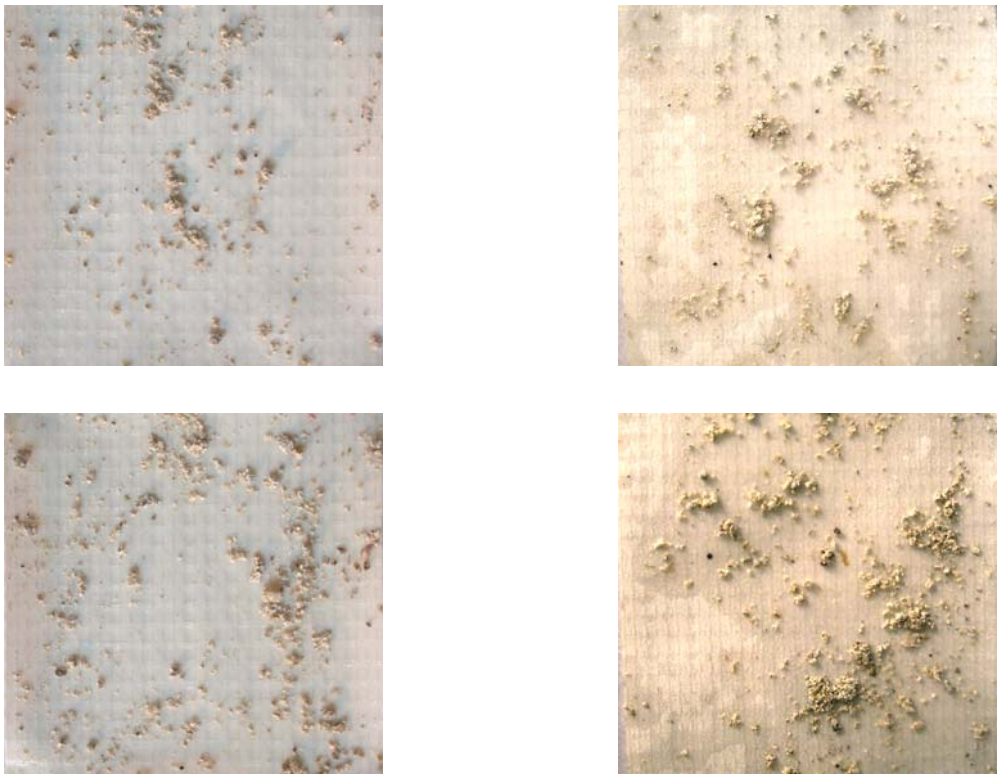

Abbildung 57: Putzfläche 3, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung

Anhand der oben angeführten Tabelle kann im Bereich (1) eine Zunahme des Abziehwiderstandes festgestellt werden. Dagegen kann keine Reduktion der Rückstände auf dem Gewebeband bestimmt werden. Die Probe, die im Bereich (2) genommen wurde, weist keine Veränderung auf.

Putzfläche 4 (BC-NL-KW):

Tabelle 17: Absandverhalten Fläche 4

Ort	Vor Festigung		Nach Festigung	
	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand
Fläche 4 (1)	1-3 %	12,5 g/cm²	1-3 %	12,5 g/cm²
Fläche 4 (2)	1-3 %	10,0 g/cm²	1 %	12,5 g/cm²

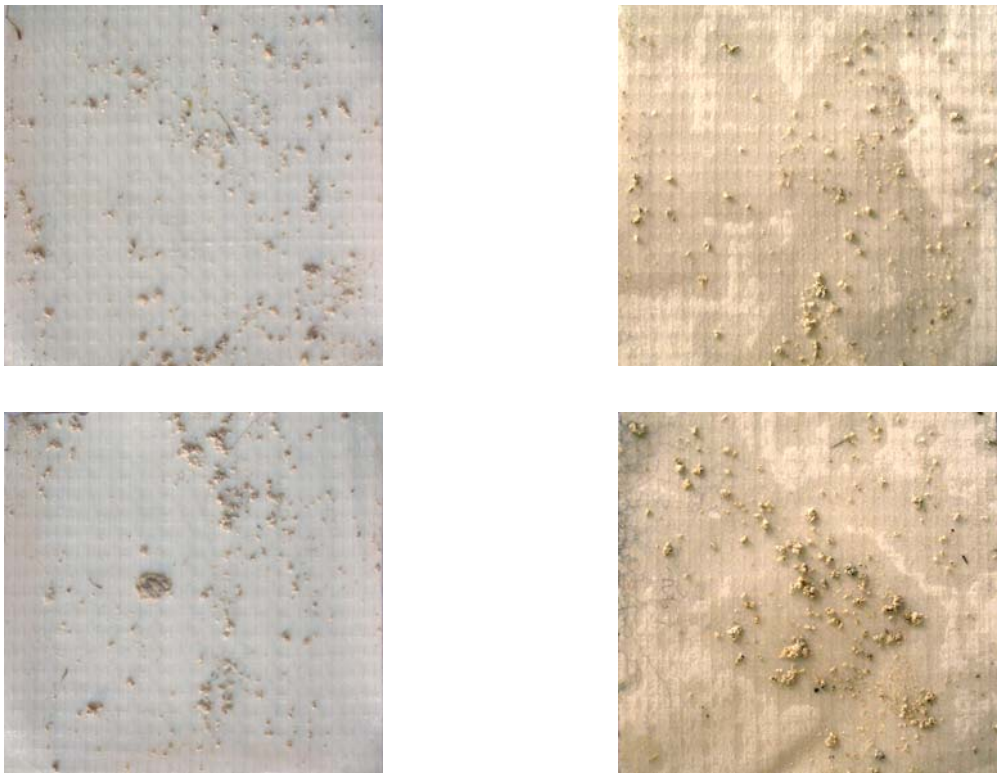

Abbildung 58: Putzfläche 4, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung

Die Fläche 4 sandet im Allgemeinen relativ wenig ab. Im Bereich (2) der Putzfläche 4 ist anhand beider Faktoren eine Verbesserung des Absandverhaltens feststellbar. Hingegen zeigt der Bereich (1) keine wesentliche Veränderung.

Putzfläche 5 (BC-½NL-KW):

Tabelle 18: Absandverhalten Fläche 5

Ort	Vor Festigung		Nach Festigung	
	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand	Prozentuelle Rückstände	Abzieh-Widerstand
Fläche 5 (1)	1-3 %	17,5 g/cm²	1 %	17,5 g/cm²
Fläche 5 (2)	1-5 %	17,5 g/cm²	1-3 %	20,0 g/cm²

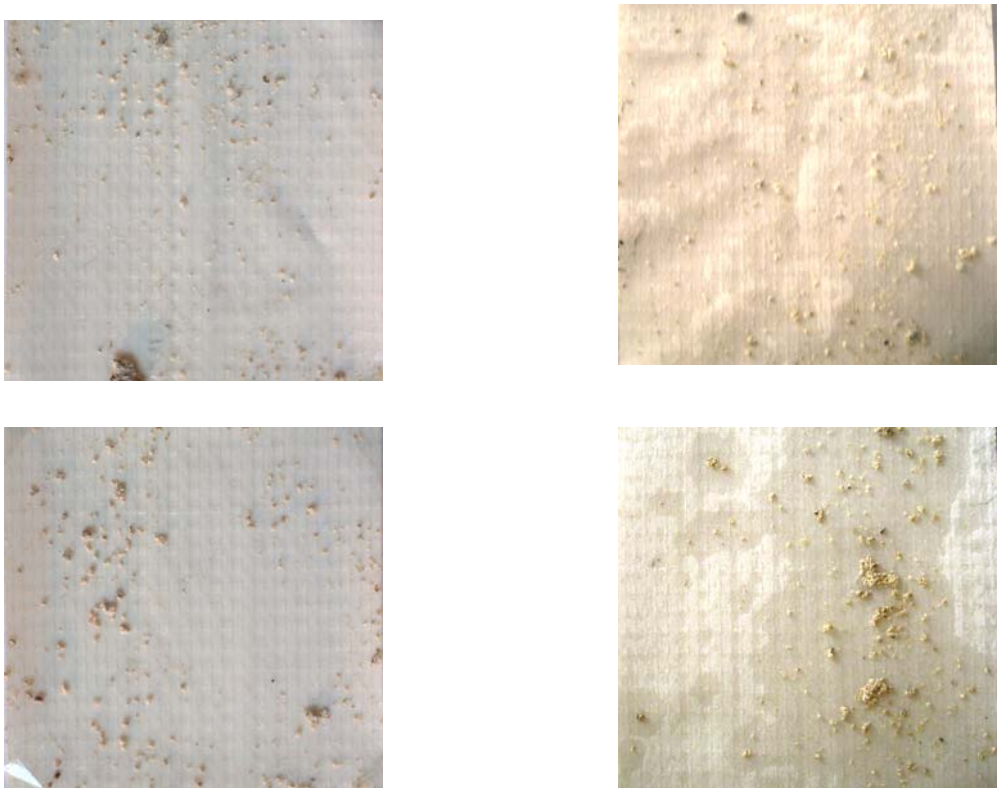

Abbildung 59: Putzfläche 5, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung

Wie die Putzfläche 4 weist sich die Putzfläche 5 durch ein geringes Absanden aus. In beiden Bereichen zeigt sich eine Verbesserung im Absandverhalten, durch den Rückgang der Restbestände auf dem Klebeband. Der gemessene Abziehwiderstand zeigt kaum Veränderungen.

3.2.2 Feuchtigkeit und Ultraschallgeschwindigkeit

Als nächster Schritt wurden Ultraschalluntersuchungen und parallel dazu Leitfähigkeitsmessungen zur Feuchtigkeitsabschätzung der bestehenden Flächen vor der Festigung vorgenommen. Um eine solide Auswertungsbasis zu schaffen, wurden diese Voruntersuchungen an drei verschiedenen Tagen vorgenommen. Da die Ultraschallgeschwindigkeiten stark von den jeweiligen Wetterverhältnissen abhängen, wurden Tage mit unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten gewählt. Für den Vergleich vor/nach der Festigung wurde, aufgrund der großen Datenmenge, nur ein Tag mit annähernd gleichen Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnissen gewählt.
Die Ermittlung der Feuchtigkeit erfolgte unter zu Hilfenahme eines Feuchtemessers der Firma Wetekom. Mittels Leitfähigkeitsmessung durch zwei Elektroden konnte die Feuchtigkeit ermittelt werden. Die Ultraschallmessung wurde mit Hilfe des Laufzeitverfahren durchgeführt.

Die unten angeführte Abbildung zeigt die für diese Diplomarbeit geltenden Legenden für Feuchtigkeit und Ultraschall. Die Einteilungen hierfür sind in Abstimmung mit der Diplomarbeit von Claudia Kerner entstanden.

Abbildung 60: links: Legende Feuchtigkeit, rechts: Legende Ultaschall

1. Versuchseihe:

Putzfläche 6 (BC-0-KW):

An Fläche 6 zeigte sich, bei annähernd gleichen Witterungsbedingungen, eine Konsolidierung über die ganze Testfläche. Einzig im linken Randbereich konnte keine Festigung bestätigt werden.

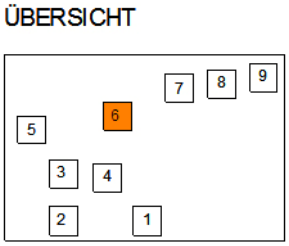

Abbildung 61: Lage Fläche 6

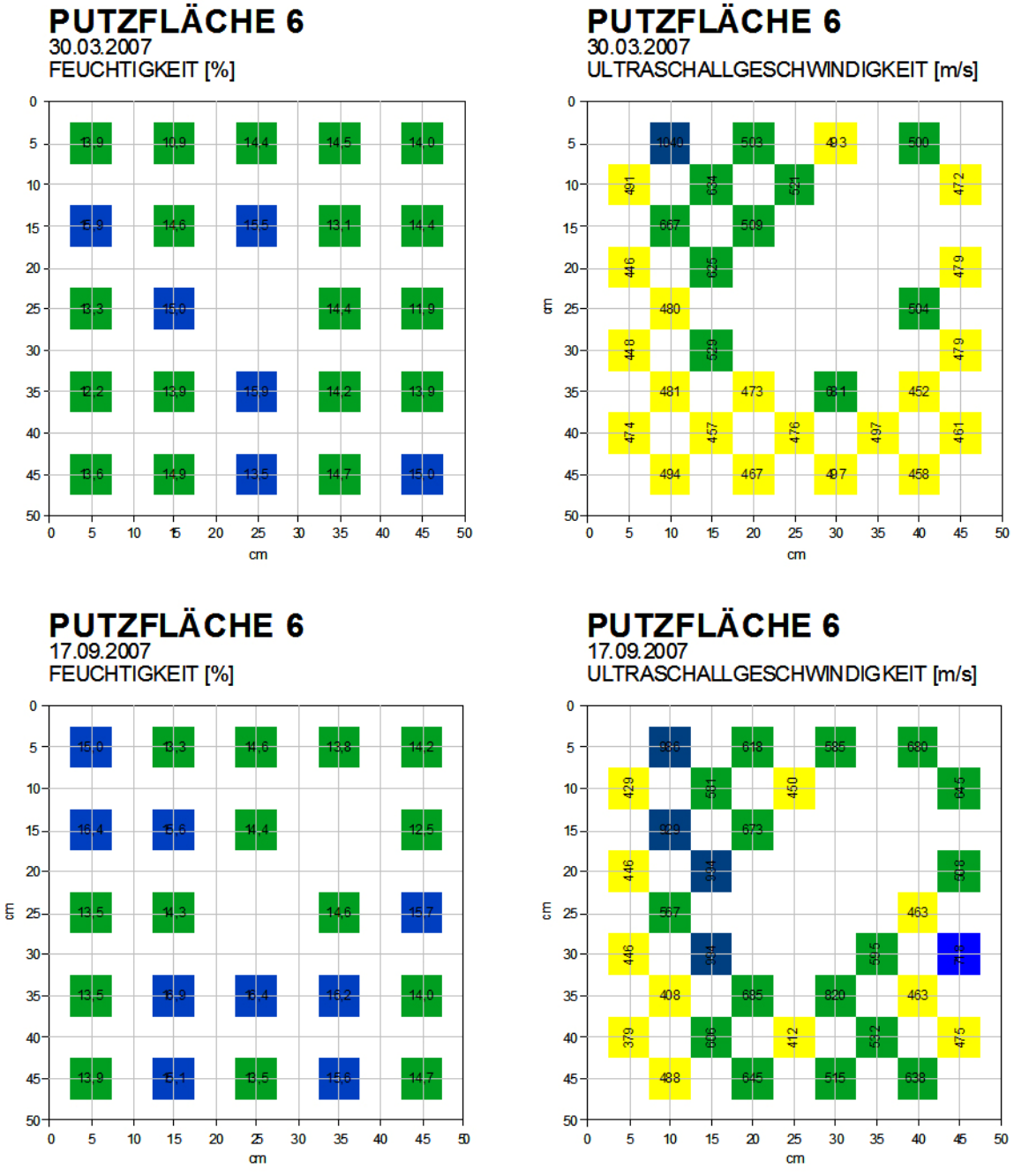

Abbildung 62: Putzfläche 6: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung

Putzfläche 7 (BC-NL-KW):

Eine Verbesserung des Gefüges konnte auch bei Prüffläche 7 abgeleitet werden. Hier zeigte sich in der gesamten linken Hälfte eine deutliche Steigerung der Ultraschall-geschwindigkeiten.

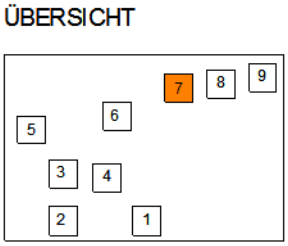

Abbildung 63: Lage Fläche 7

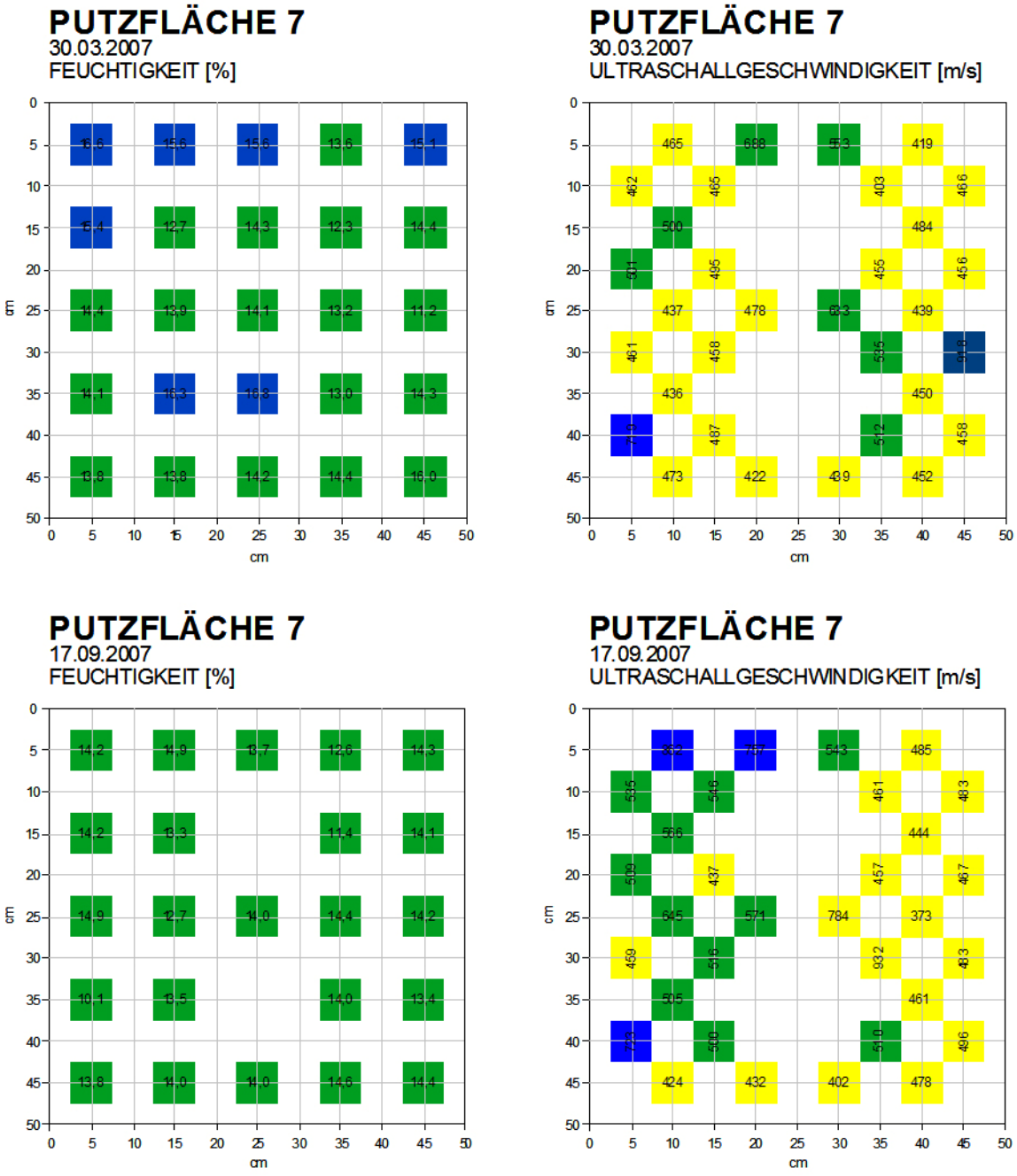

Abbildung 64: Putzfläche 7: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung

Putzfläche 8 (BC-½NL-KW):

Genauso war es bei Fläche 8, nach der Festigung, zu einer Erhöhung der Ultaschallgeschwindigkeiten und somit zu einer Konsolidierung des Gefüges gekommen. Der obere Bereich zeichnete sich hier besonders ab.

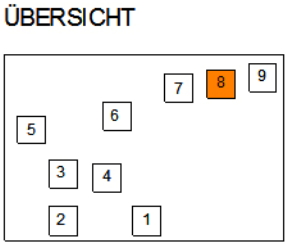

Abbildung 65: Lage Fläche 8

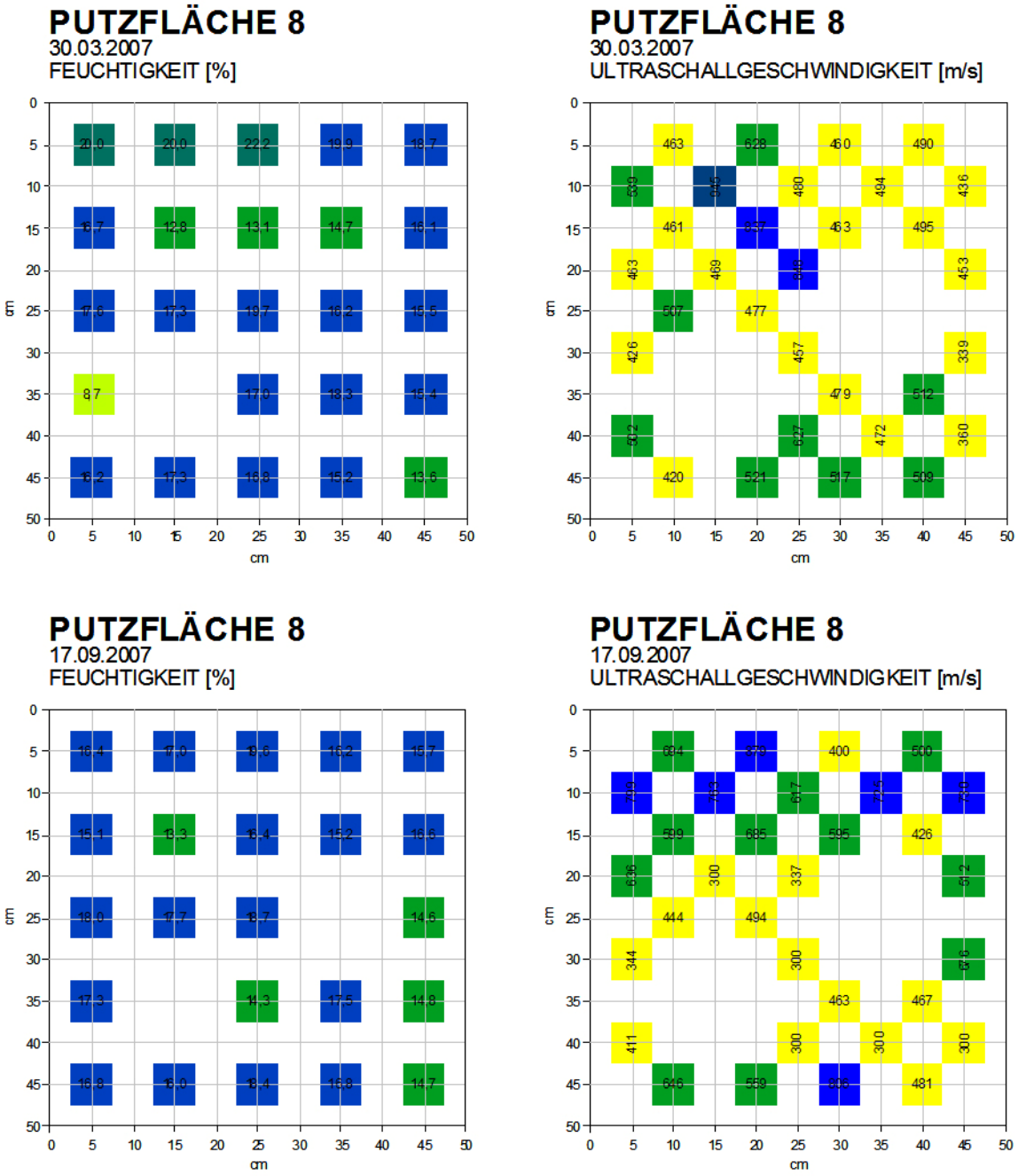

Abbildung 66: Putzfläche 8: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung

Putzfläche 9 (0-0-KW):

Durch die alleinige Festigung mit Kalkwasser konnte ebenfalls eine Zunahme der Ultraschallgeschwindigkeiten an Putzfläche 9 festgestellt werden.

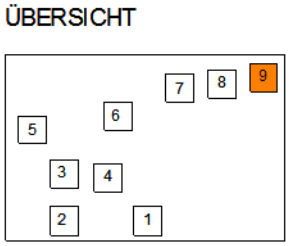

Abbildung 67: Lage Fläche 9

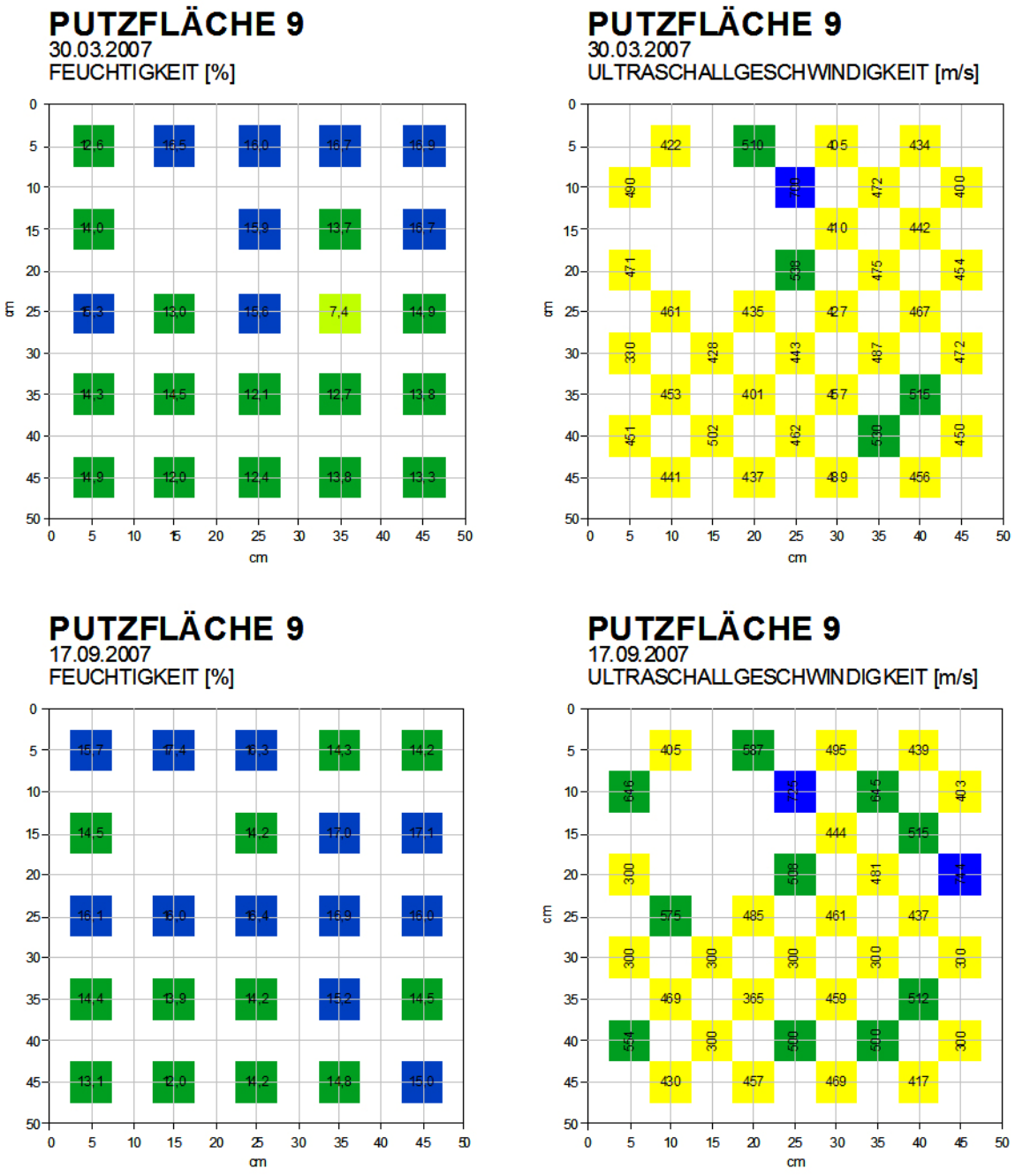

Abbildung 68: Putzfläche 9: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung

2. Versuchsreihe:

Putzfläche 3 (BC-0-KW):

Die Ultraschallgeschwindigkeiten an Putzfläche 3 sind annähernd konstant geblieben. Dies lässt sich wahrscheinlich darauf zurückführen, dass das Gefüge der Fläche 3, im Vergleich zu den Flächen 6 bis 9, wesentlich stärker zerstört und von zahlreichen großen Rissen durchzogen war.

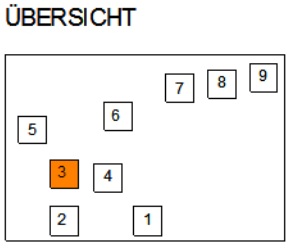

Abbildung 69: Lage Fläche 3

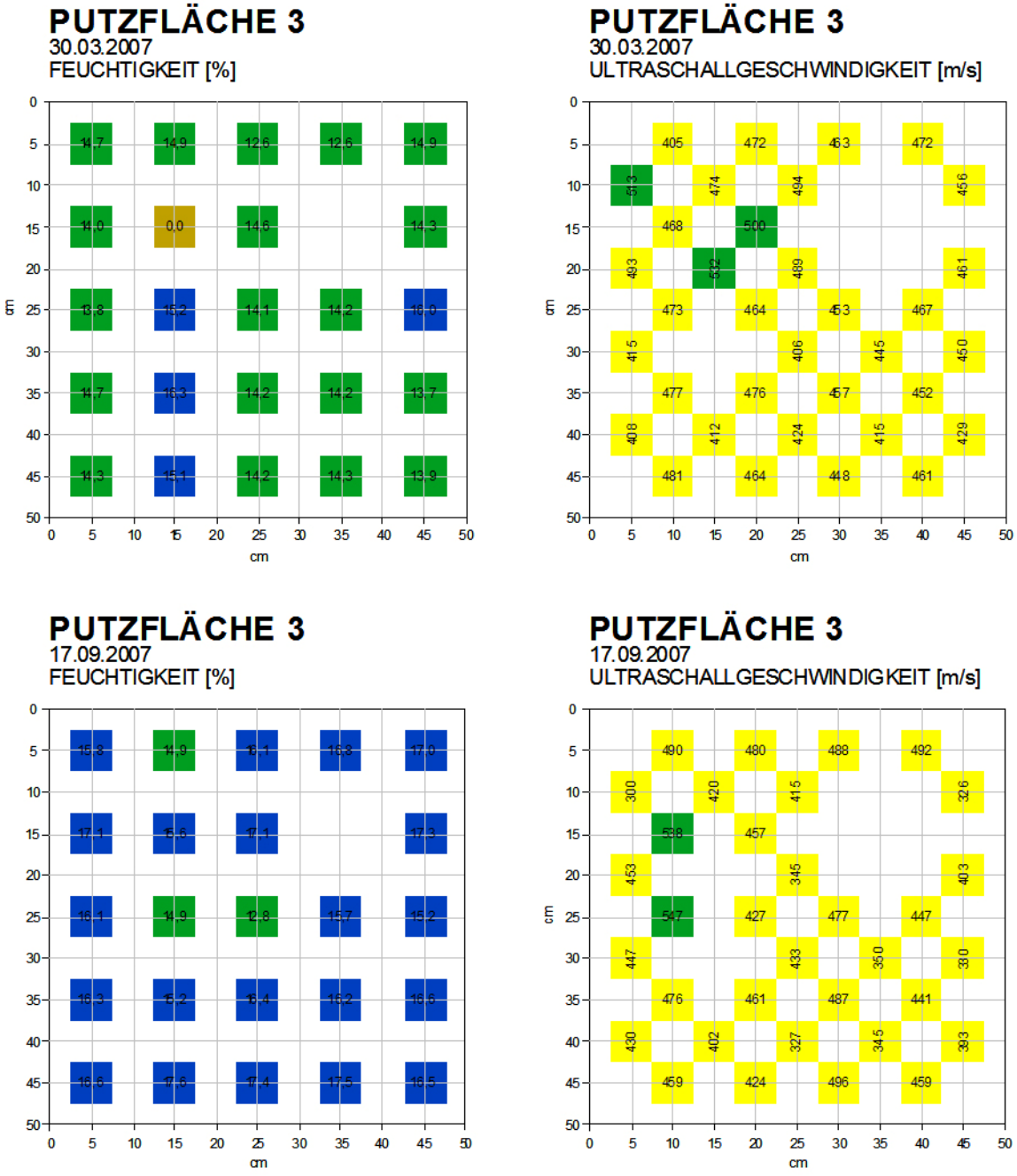

Abbildung 70: Putzfläche 3: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung

Putzfläche 4 (BC-NL-KW):

Die Putzfläche 4 verhielt sich ähnlich der Putzfläche 3. Es lies sich allerdings, im rechten untern Bereich, eine Steigerung der Ultraschallgeschwindigkeiten feststellen. Diese Putzfläche wies ebenfalls starke Zerstörungen und Risse über die gesamte Fläche auf.

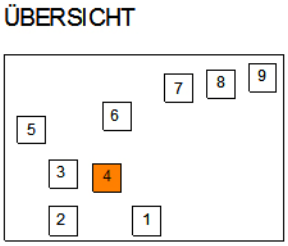

Abbildung 71: Lage Fläche 4

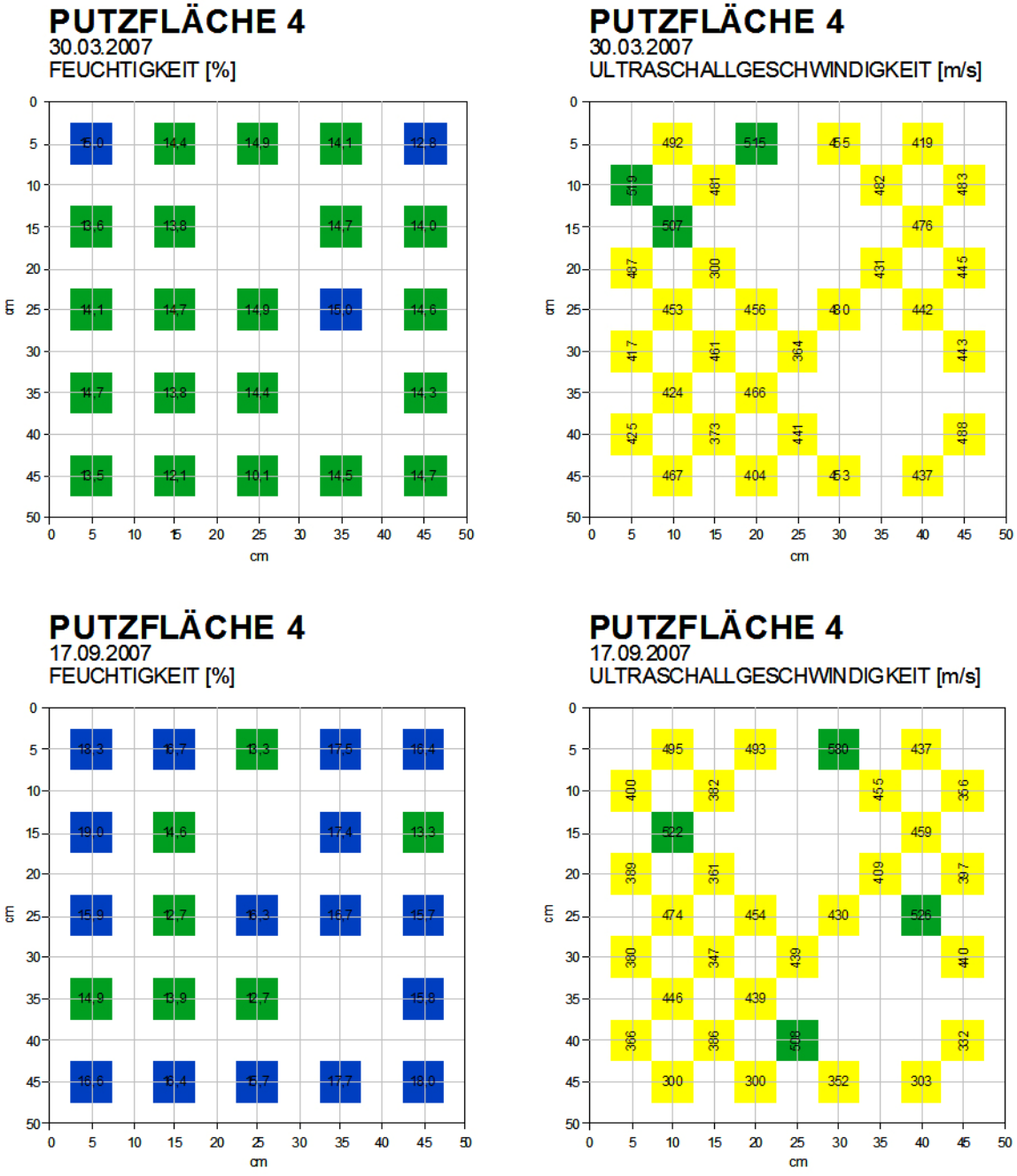

Abbildung 72:: Putzfläche 4: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung

Putzfläche 5 (BC-½NL-KW):

Die Putzfläche 5 zeigte ein gemischtes Bild. Erhöhte Ultraschallgeschwindigkeiten konnte man besonders im oberen Bereich der Putzfläche erkennen. Im unteren Bereich der Fläche 5 erschwerten einige Risse die Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten.

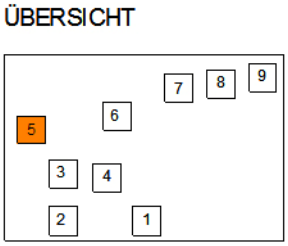

Abbildung 73: Lage Fläche 5

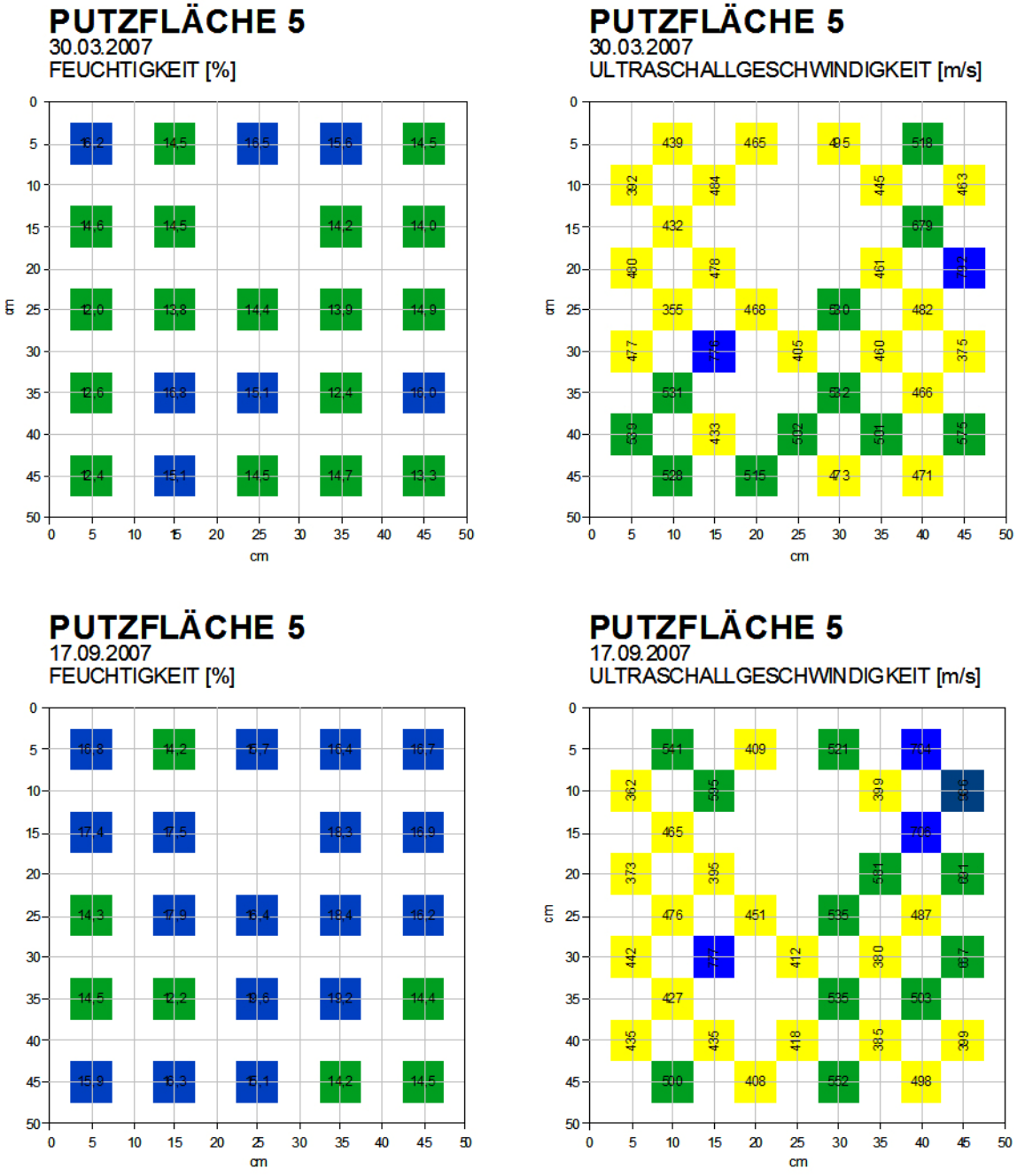

Abbildung 74: Putzfläche 5: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung

3.2.3 Wasseraufnahmefähigkeit

Mit Hilfe des Karsten´schen Prüfröhrchen konnte die Wasseraufnahmefähigkeit der Putzflächen ermittelt werden, siehe Kapitel 2.1.3. Für diesen Versuch wurde das Karsten´sche Prüfröhrchen mittels Dichtmasse auf den Putzflächen befestigt und bis zur Nullmarke (10cm Wassersäule) mit Wasser gefüllt. Unter Gleichhaltung des Wasserspiegels wurde in Abständen von 30 Sekunden die eingedrungene Menge Wasser bestimmt. Als Ergebnis wurde der so genannte Wasseraufnahmekoeffizient w errechnet. Dieser beschreibt die vom Baustoff aufgenommene Wassermenge pro Fläche in Abhängigkeit von der Wurzel der Zeit.

1. Versuchsreihe

Tabelle 19: Wasseraufnahmekoeffizient, 1. Versuchsreihe, Mauerbach

Probenbezeichnung	Wasseraufnahmekoeffizient
Putzfläche 6 (BC-0-KW)	20,15 kg/(m²*√h)
Putzfläche 7 (BC-NL-KW)	20,15 kg/(m²*√h)
Putzfläche 8 (BC-½NL-KW)	20,15 kg/(m²*√h)
Putzfläche 9 (0-0-KW)	20,15 kg/(m²*√h)

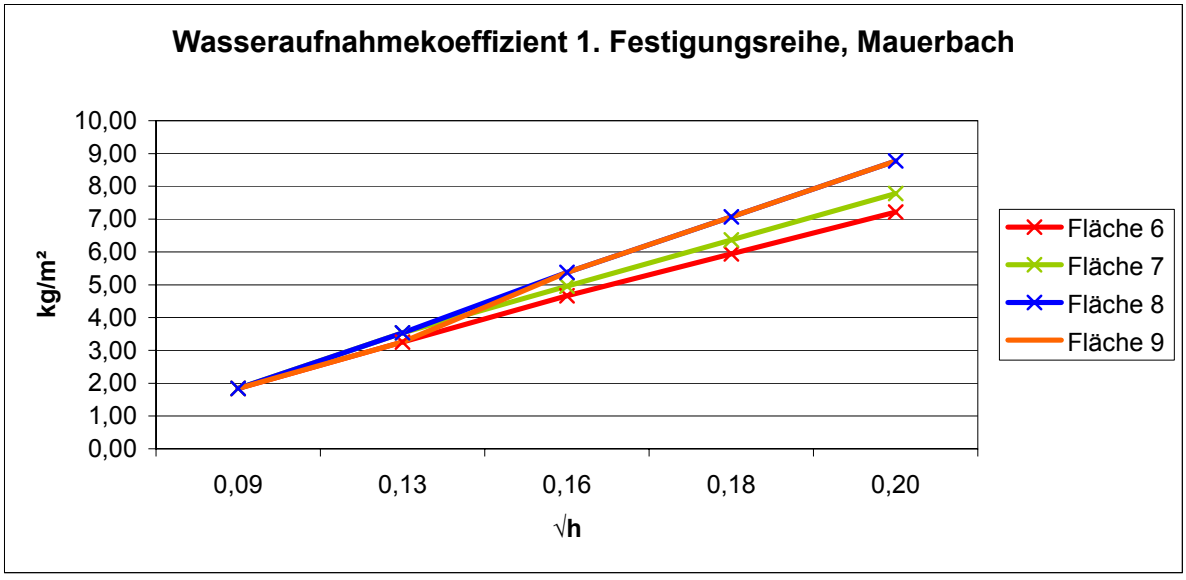

Diagramm 25: Wasseraufnahmekoeffizient, 1. Versuchsreihe, Mauerbach

Der Wasseraufnahmekoeffizient, der in Mauerbach untersuchten Flächen, beträgt ca. 20kg/(m²*√h). Gemäß der im Hochbau allgemein geltenden Richtwerte kann der Wasseraufnahmekoeffizient ab einem Wert von 2,0[64] als saugend bezeichnet werden, siehe Kapitel 2.1.3. Dieser hohe Wert resultiert daraus, dass diese Flächen außer den geringen Gefügezerstörungen noch zahlreiche Risse aufweisen und aus mehreren, nicht zusammenhängenden Schichten bestehen. Daraus folgt, dass es nur zu einer Reduktion des Wasseraufnahmekoeffizienten kommt, wenn die zu festigenden Flächen vergleichsweise gut gefestigt sind.

2. Versuchsreihe

Tabelle 20: Wasseraufnahmekoeffizient, 2. Versuchsreihe, Mauerbach

Probenbezeichnung	Wasseraufnahmekoeffizient
Putzfläche 3 (BC-0-KW)	41,84 kg/(m²*√h)
Putzfläche 4 (BC-NL-KW)	19,37 kg/(m²*√h)
Putzfläche 5 (BC-½NL-KW)	17,05 kg/(m²*√h)
Putzfläche 9 (0-0-KW)	20,15 kg/(m²*√h)

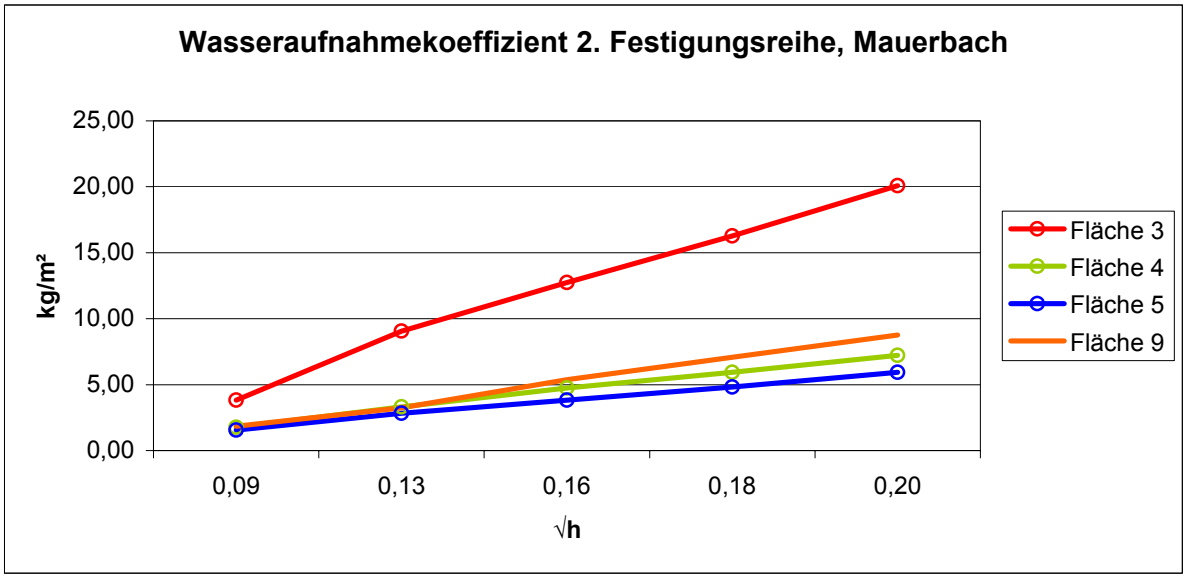

Diagramm 26: Wasseraufnahmekoeffizient, 2. Versuchsreihe, Mauerbach

[64] Trauninger, D.; Diplomarbeit: Beschichtungssysteme auf Natursteinoberflächen 2007

Analog der ersten Versuchsreihe liegen auch hier die Werte im stark saugenden Bereich. Der Wasseraufnahmekoeffizient der Fläche 3 ist im Vergleich zu den restlichen Flächen ca. doppelt so groß. Dieser große Unterschied resultiert darin, dass das Gefüge der Fläche 3 stark geschädigt ist und zahlreiche Risse vorhanden sind. Die Putzflächen 4,5 und 9 weisen ebenso zahlreiche Risse auf und bestehen aus mehreren, nicht zusammenhängenden Schichten.

3.2.4 Probenahme

Bestimmung der Eindringtiefe der Bakterien (PAS)

An allen Proben wurde die Eindringtiefe der Bakterien festgestellt. Mittels PAS – Verfahren (Perjodsäure – Schiff Reaktion) erfolgte eine fuchsinrote Färbung von PAS – positiven Bakterien. Der Versuchsaufbau für die Färbung mittels PAS ist sehr komplex und genau einzuhalten und im Kapitel 2.1.7 genauer beschrieben.

Gemäß den Anweisungen der Produktbeschreibung der Calcite – Methode sollte die Applikation der Bakterien nur dann erfolgen, wenn gewährleistet ist, dass bis mindestens fünf Tage nach der Applikation kein Regen fällt[65]. Aufgrund der wechselhaften Wetterlage in Österreich war dies bei keiner der Applikationen, weder in der ersten Versuchsreihe, noch in der Zweiten möglich.

1. Versuchsreihe:

Abbildung 75: PAS, links: Fläche 6 (BC-0-KW), rechts: 7 (BC-NL-KW)

[65] Calcite 2000 1999

Abbildung 76: PAS, links: Fläche 8 (BC-½NL-KW), rechts: Fläche 9 (0-0-KW)

Bei der Ermittlung der Eindringtiefe der Bakterien an den Probeflächen der Kartause Mauerbach ist deutlich ersichtlich, dass sich die Bakterien vor allem auf der Putzoberfläche, beziehungsweise an offenen Rissflächen festgesetzt haben. An der Fläche 6 kann man eine Eindringtiefe bis max. 5mm in den Prüfkörper festgestellt werden. Die Flächen 7 und 8 zeigen nur eine sehr geringe Eindringtiefe von max. 1mm. Bei Fläche 9, welche ausschließlich mit Kalkwasser gefestigt wurde, kann man eine vernachlässigbare, sehr leichte fuchsinrote Einfärbung erkennen. Diese ist jedoch darauf zurückzuführen, dass es an dem Putz der Kartause bereits zu einer natürlichen Besiedelung von Bakterien gekommen war.

2. Versuchsreihe:

Abbildung 77: PAS, links: Fläche 3 (BC-0-KW), rechts: Fläche 4 (BC-NL-KW)

Abbildung 78: PAS, links: Fläche 4 (BC-NL-KW), untere Putzschicht, rechts: Fläche 5 (BC-½NL-KW)

An den Fläche 3 und 4 ist neben der Färbung des Biofilms an der Oberfläche der Putzproben, auch eine Eindringtiefe der Bakterien bis max. 5mm ersichtlich. Die untere Putzschicht der Putzfläche 4 weist eine vernachlässigbare, sehr leichte Färbung auf. Anhand der Färbung der Fläche 5 konnte lediglich eine oberflächliche Färbung festgestellt werden, welche nur bis max. 1mm eingedrungen ist.

Reisolierung *Bacillus cereus*

An allen Proben wurde die Reisolierung der applizierten Bakterien mittels der „Ausschütteltechnik“ durchgeführt. Bei dieser Technik mussten die Proben vorab zerkleinert werden und eine Stunde in einer Tween80-Lösung geschwenkt werden. 24 Stunden später erfolgte die Auszählung der Bakterien. Da einige Proben, aufgrund der zu großen Menge an Einzelkulturen, nicht ausgezählt werden konnten, musste zusätzlich eine Verdünnungsstufe angelegt werden, durch die eine Auszählung ermöglicht wurde.

1. Versuchsreihe

Putzfläche 6:	ca. 4.600 Zellen pro Gramm
Putzfläche 7:	ca. 4.000 Zellen pro Gramm
Putzfläche 8:	ca. 3.700 Zellen pro Gramm
Putzfläche 9:	ca. 1.200 Zellen pro Gramm

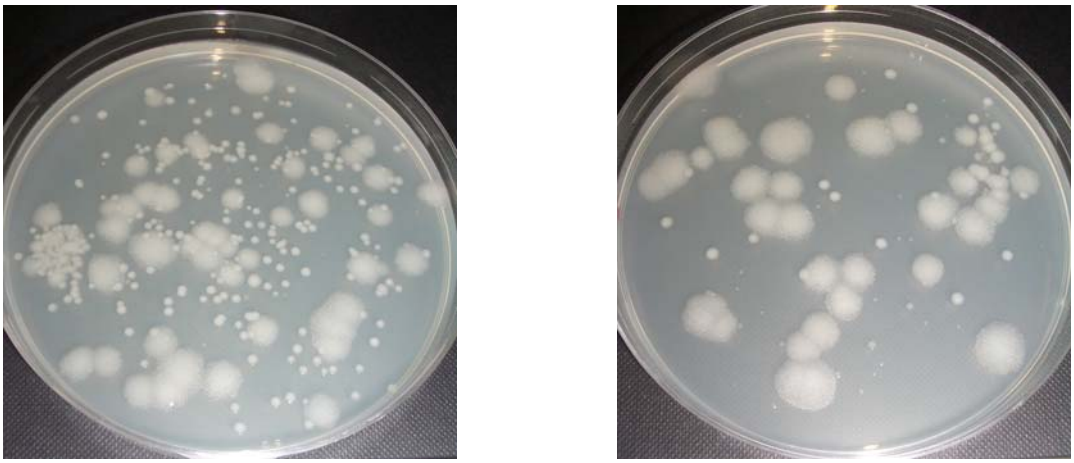

Abbildung 79: Reisolierung, links: Fläche 6 (BC-0-KW), rechts: 7 (BC-NL-KW)

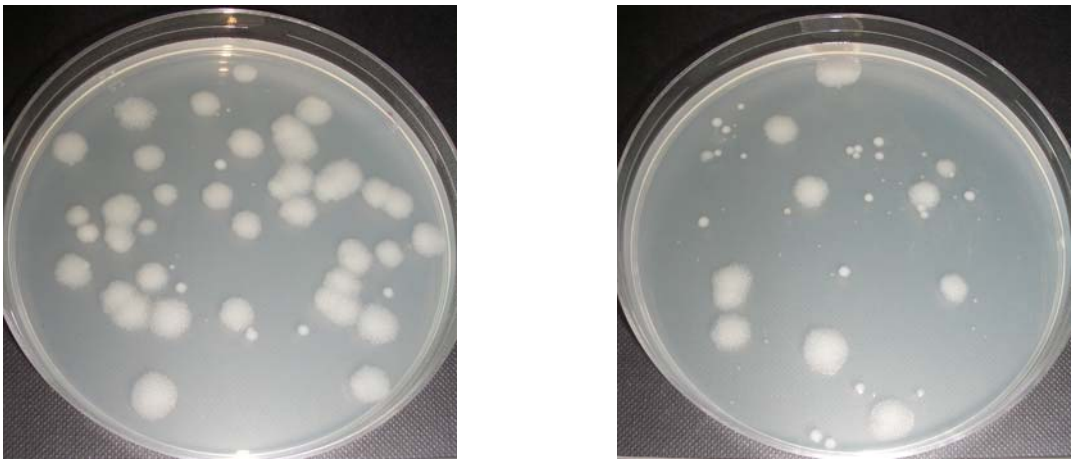

Abbildung 80: Reisolierung, links: Fläche 8 (BC-½NL-KW), rechts: Fläche 9 (0-0-KW)

Die Proben der ersten Versuchsreihe konnten allesamt bei der ersten Isolierung ausgezählt werden. Es ist gut ersichtlich, dass auch bei der Fläche 9 einige Kulturen des *Bacillus cereus* isoliert werden konnten. Dies lässt sich durch die natürliche Besiedelung der Putzflächen mittels Bakterien erklären. Einzelne Kolonien können entweder durch den beim Auftragen entstandenen Sprühnebel oder den unsterilen Transport der Proben, auf die Testfläche 9 gelangt sein.

2. Versuchsreihe:

Putzfläche 3: ca. 25.000 Zellen pro Gramm
(Erst in der ersten Verdünnungsstufe auszählbar)
Putzfläche 4: ca. 13.000 Zellen pro Gramm
(Erst in der ersten Verdünnungsstufe auszählbar)
Putzfläche 4, unten: ca. 700 Zellen pro Gramm
Putzfläche 5: ca. 1.700 Zellen pro Gramm

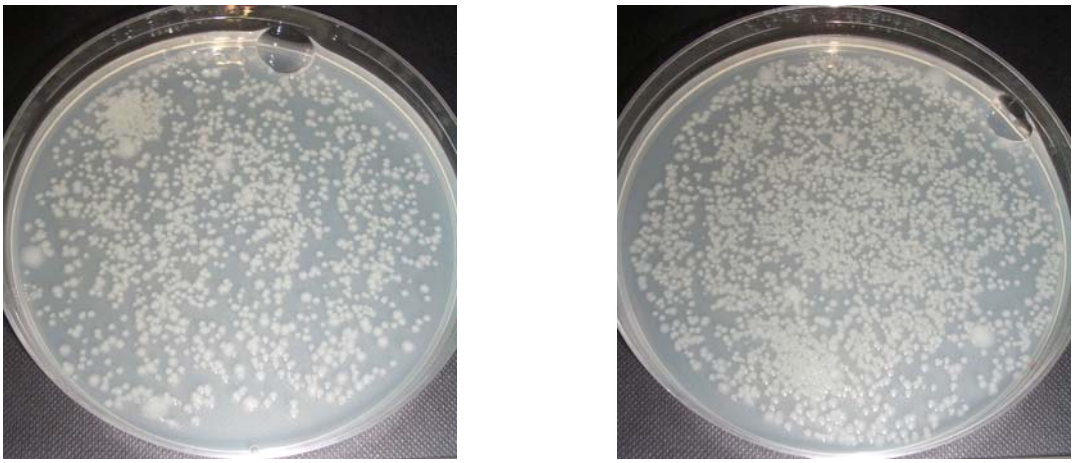

Abbildung 81: Reisolierung, links: Fläche 3 (BC-0-KW), rechts: Fläche 4 (BC-NL-KW)

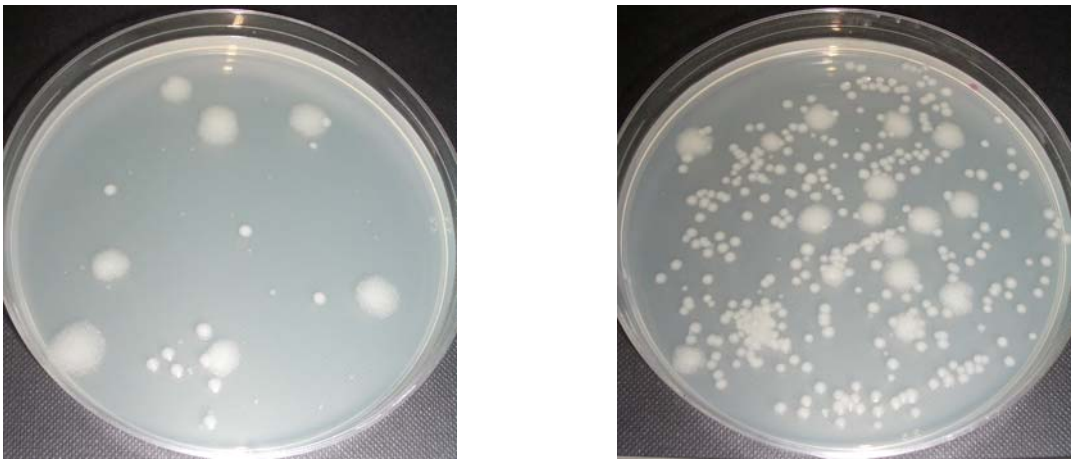

Abbildung 82: Reisol., links: Fläche 4 (BC-NL-KW), untere Putzsch., rechts: Fläche 5 (BC-½NL-KW)

Bei der zweiten Festigungsreihe war es für die Flächen 3 und 4 notwendig, eine weitere Verdünnungsstufe zur Auszählung der Einzelkulturen anzulegen. Wie auch bei den Laborproben konnte bei diesen Proben eine Begleitflora festgestellt werden. Diese wurde im Zuge dieser Diplomarbeit nicht näher untersucht. *Bacillus cereus* wächst in großen, fransigen Einzelkulturen heran, wogegen die begleitende Flora leicht zu unterscheiden ist, da diese kleine, scharf abgegrenzte Kulturen darstellen.

Dünnschliffanalytik

Für die Herstellung der Dünnschliffe wurden die Proben mittels Vakuumimprägnierung in Kunstharz getränkt und nach der Erhärtung in ca. 0,025-0,003mm dicke Schichten geschliffen und auf eine Glasträgerplatte geklebt. Die Dünnschliffe wurden von der Firma Geo. Präp. angefertigt.

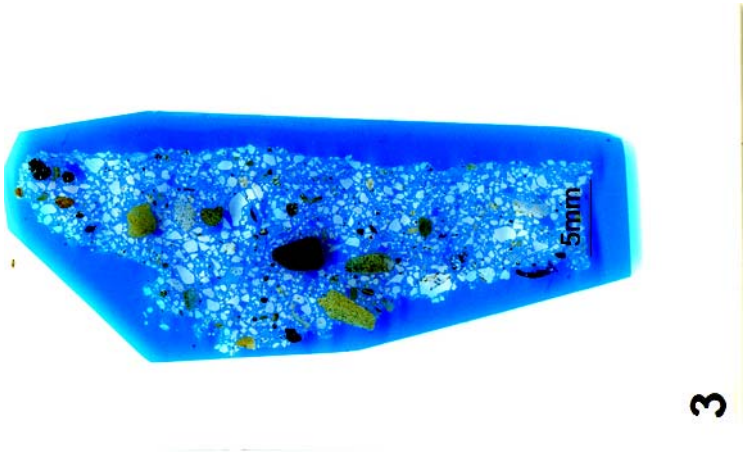

Abbildung 83: Dünnschliff Putzfläche 3, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Putzfläche 3 weist ein deutlich gelockertes Gefüge mit zahlreichen Poren auf. Die Verteilung des Zuschlags ist relativ ungleichmäßig, einzelne größere Körner (GK ca. 3mm) sind im Dünnschliff ersichtlich. Der Dünnschliff zeigt eine aufgelockerte und relativ unebene Putzoberfläche.

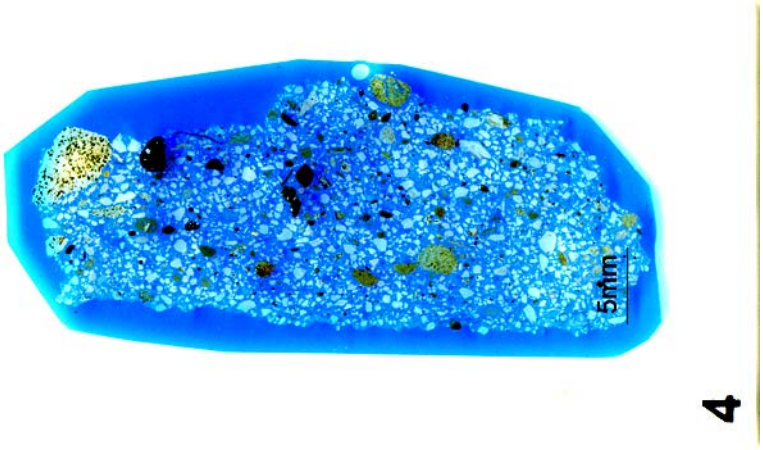

Abbildung 84: Dünnschliff Putzfläche 4, Putzoberfläche am unteren Bildrand

Die **Putzfläche 4** ist wesentlich kompakter als die Putzfläche 3. Vereinzelt sind kleinere Poren und ein feiner Riss nahe der Oberfläche zu erkennen. Bis auf ein Zuschlagskorn im linken oberen Eck (ca. 5mm) weist diese Putzfläche eine gleichmäßige Korngrößenverteilung auf. Die Oberfläche der vierten Putzfläche ist, ähnlich der dritten Putzfläche, uneben.

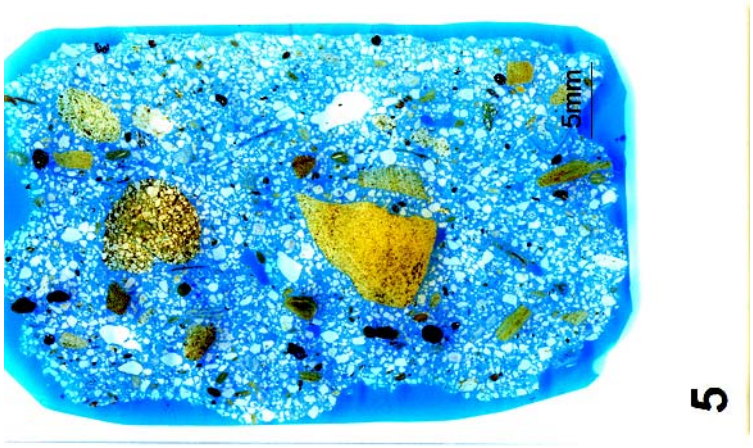

Abbildung 85: Dünnschliff Putzfläche 5, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Die **Putzfläche 5** ist sehr inhomogen und weist eine verhältnismäßig ebene Oberfläche auf. Einige längliche Poren, welche um verwittertes, organisches Material entstanden sind, sind ersichtlich. Auffällig sind die zahlreichen großen Zuschlagskörner, welche Größtabmessungen bis zu ca. 8mm aufweisen.

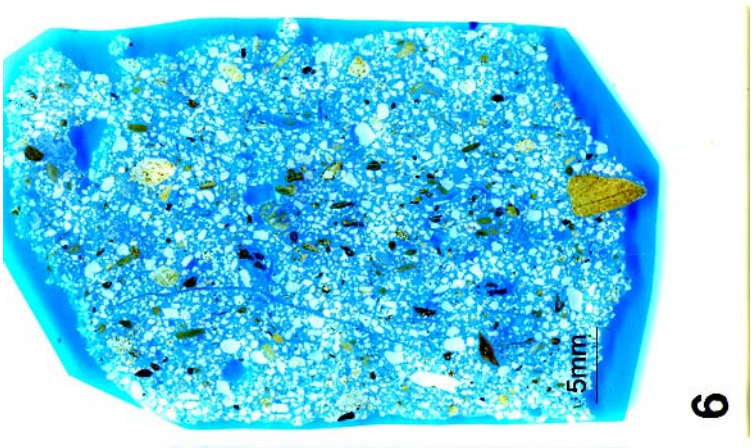

Abbildung 86: Dünnschliff Putzfläche 6, Putzoberfläche am unteren Bildrand

Die **Putzfläche 6** weist ein relativ homogenes Gefüge und eine ebene Oberfläche auf. Der Zuschlagsstoff besteht größtenteils aus relativ feinen Körnern. Ein einziges größeres Zuschlagskorn mit ca. 4mm Länge ist an der rechten Seite zu erkennen. Der Dünnschliff zeigt zahlreiche Poren und einen deutlichen Riss, welcher sich fast über die gesamte Länge des Dünnschliffs erstreckt. Einige kleinere oberflächennahe Risse sind ebenfalls zu erkennen.

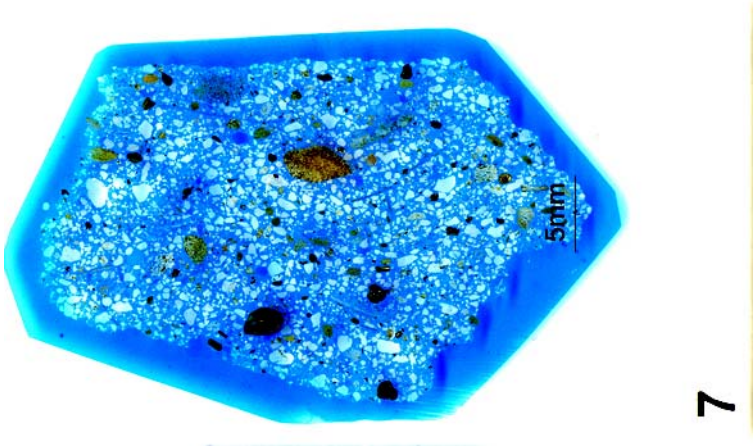

Abbildung 87: Dünnschliff Putzfläche 7, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Die **Putzfläche 7** zeigt ein relativ homogenes und kompaktes Gefüge mit einer glatten Oberfläche. Es sind nur wenige kleinere Poren zu erkennen. Neben einem feinen Zuschlagsstoff sind einige größere Körner zu erkennen. Diese weisen eine maximale Seitenlänge von ca. 3mm auf.

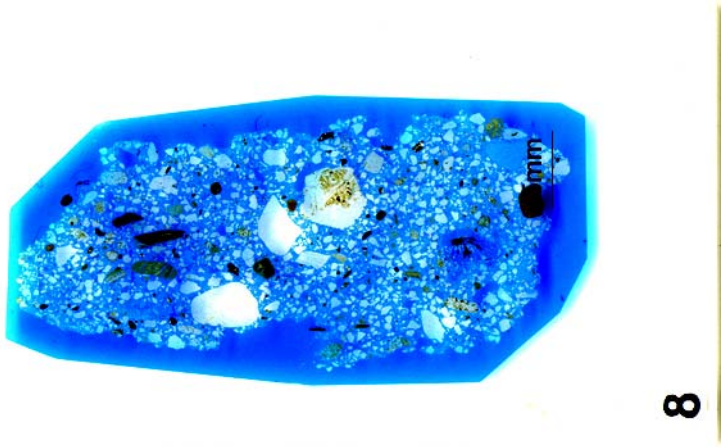

Abbildung 88: Dünnschliff Putzfläche 8, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Die **Putzfläche 8** ist sehr inhomogen und weist ein stark aufgelockertes Gefüge mit zahlreichen, verschiedengroßen Poren auf. Anhand des Dünnschliffs kann man eine stark zerrüttete Oberfläche erkennen. Einige größere Zuschlagskörner mit einer maximalen Länge von ca. 3mm sind ungleichmäßig im Putz verteilt.

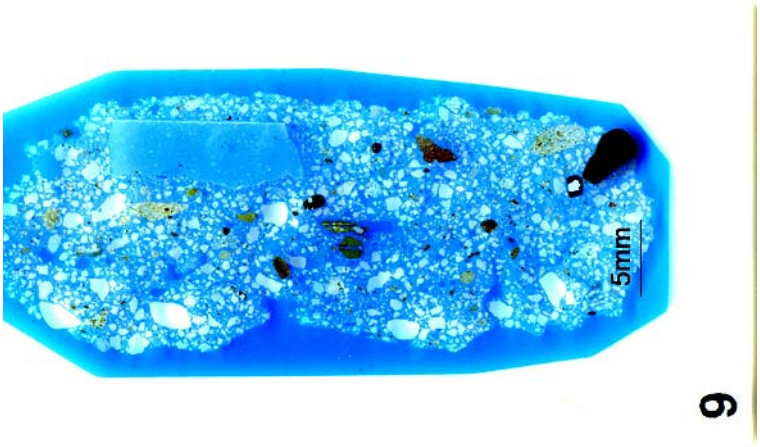

Abbildung 89: Dünnschliff Putzfläche 9, Putzoberfläche am oberen Bildrand

Die **Putzfläche 9** weist ebenfalls ein aufgelockertes Gefüge mit einer unebenen Oberfläche auf. Der Dünnschliff weist im linken oberen Bereich eine Fehlstelle auf. Die Putzfläche weist zahlreiche verschiedenförmige Poren und einen relativ gleichmäßig verteilten Zuschlagsstoff auf.

Detailaufnahmen:
Die Detailaufnahmen wurden an einem Mikroskop unter 20-facher Vergrößerung, an der TU – Wien angefertigt. Die Bilder wurden mit einer Digitalkamera (Pentax Optio S5i) erstellt.

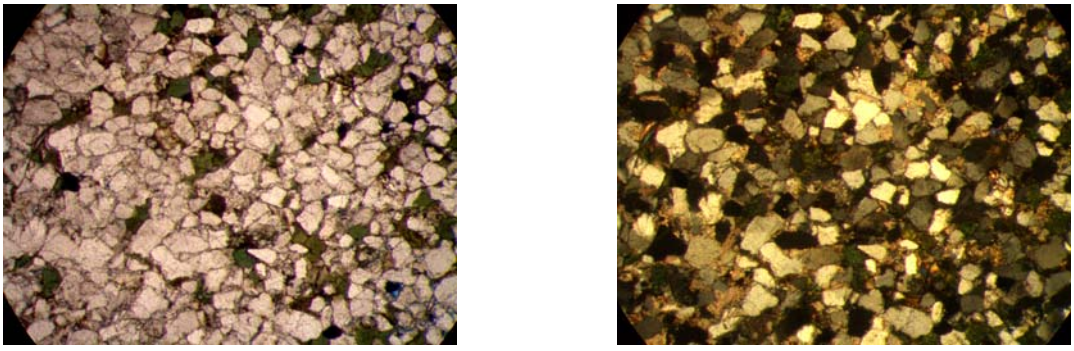

Abbildung 90: Detailaufnahme Dünnschliff Putzfläche 4, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter

Diese Detailaufnahme der Putzfläche 4 zeigt einen Quarz, welcher unter Verwendung eines Polarisationsfilters die Lichtbrechung deutlich macht.
Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Detailaufnahme der Putzfläche 8.

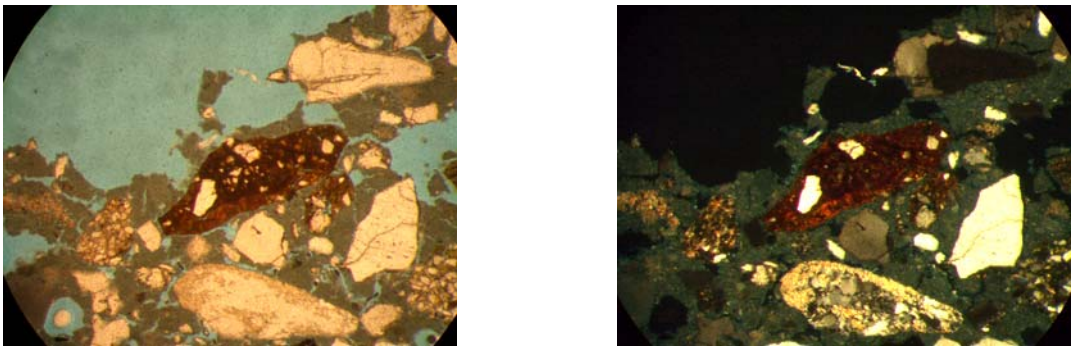

Abbildung 91: Detailaufnahme Dünnschliff Putzfläche 8, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter

An den Dünnschliffen der Putzflächen an der Kartause Mauerbach, konnten mit dem Lichtmikroskop ebenfalls keine eindeutigen Calcitneubildungen nachgewiesen werden.

Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop

Exemplarisch wurde ein Bruchstück aus der Putzfläche 3 mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Hierfür wurde die Probe vorab unter Vakuum mit Gold bedampft, um die Leitfähigkeit der Probe zu gewährleisten. Anschließend wurde das Bruchstück mit Hilfe von Sekundärelektronen im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Nahe der Oberfläche konnte ein Bakterienfilm festgestellt werden, jedoch keine eindeutigen Calcitneubildungen. Dünnschliffe der Putzflächen wurden hierbei nicht untersucht.

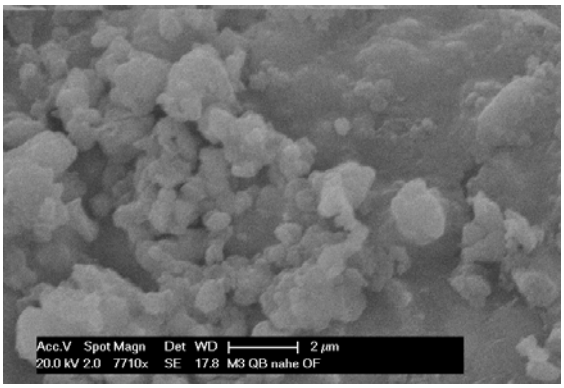

Abbildung 92: Putzfläche 3: Bakterienfilm nahe der Oberfläche

Charakterisierung der Putzflächen:

Die Angaben bezüglich Mineralbestand, Kornform und Sieblinien sind der Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) entnommen.

- Mineralbestand Zuschlag:

Tabelle 21: „Mineralbestand des Zuschlagstoffes" Diplomarbeit Kerner, C. (2005)

Putzfläche/ Minerale	Putz-fläche 3	Putz-fläche 4	Putz-fläche 5	Putz-fläche 6	Putz-fläche 7	Putz-fläche 8	Putz-fläche 9
Kalkspatzen	1,57 %	6,22 %	6,65 %	8,03 %	3,15 %	3,90 %	o. A.
Quarz	63,97 %	67,30 %	58,37 %	54,74 %	63,52 %	59,48 %	o. A.
Feldspat	0,52 %	0,81 %	2,96 %	1,70 %	1,31 %	3,64 %	o. A.
Glimmer	11,75 %	17,30 %	24,63 %	22,63 %	15,75 %	23,38 %	o. A.
Lithische Fragmente	19,58 %	2,97 %	5,42 %	12,17 %	14,96 %	7,01 %	o. A.
Hornstein	0,00 %	0,27 %	0,25 %	0,00 %	0,00 %	0,78 %	o. A.
Granat	2,61 %	5,14 %	1,72 %	0,73 %	1,31 %	1,82 %	o. A.

Hauptanteil des Zuschlagstoffes stellt in allen Putzflächen das Mineral Quarz dar. Am zweithäufigsten kommen Glimmer und lithische Fragmente (Quarzsandsteine etc.) vor. Auffallend sind die teileweise ebenfalls recht häufig vorkommenden Kalkspatzen, welche dem Putz ein gewisses „Selbstheilungspotenzial" zukommen lassen. Mit relativ geringen Anteilen findet sich im Putz auch Feldspat, Hornstein und Granat. Der Zuschlag stammt also aus der Flyschzone, wahrscheinlich aus der nächsten Umgebung der Kartause, vermutlich aus dem Mauerbach, der direkt neben der Kartause fließt.

- Kornform Zuschlag:

Tabelle 22 „Kornform des Zuschlagstoffes“ Diplomarbeit, Kerner, C. (2005)

Putzfläche/ Kornform	Putz-fläche 3	Putz-fläche 4	Putz-fläche 5	Putz-fläche 6	Putz-fläche 7	Putz-fläche 8	Putz-fläche 9
Gut gerundet	0,00 %	0,27 %	0,25 %	0,24 %	0,00 %	0,26 %	o. A.
Gerundet	8,88 %	9,46 %	11,08 %	12,17 %	9,19 %	8,57 %	o. A.
Kanten-gerundet	75,98 %	64,05 %	55,67 %	67,40 %	67,19 %	56,62 %	o. A.
Eckig	12,53 %	14,05 %	14,04 %	16,30 %	11,29 %	14,55 %	o. A.
Plättchen-förmig	2,61 %	12,16 %	18,97 %	3,89 %	12,34 %	20,00 %	o. A.

Anhand der Aufschlüsselung der Kornform zeigt sich, dass die Mehrheit der Zuschlagskörner eine kantengerundete Form aufweist. Es wird vermutet, dass Flusssand aus dem nahe gelegenen Mauerbach, als Zuschlagstoff verwendet wurde.

- Sieblinien Zuschlag:

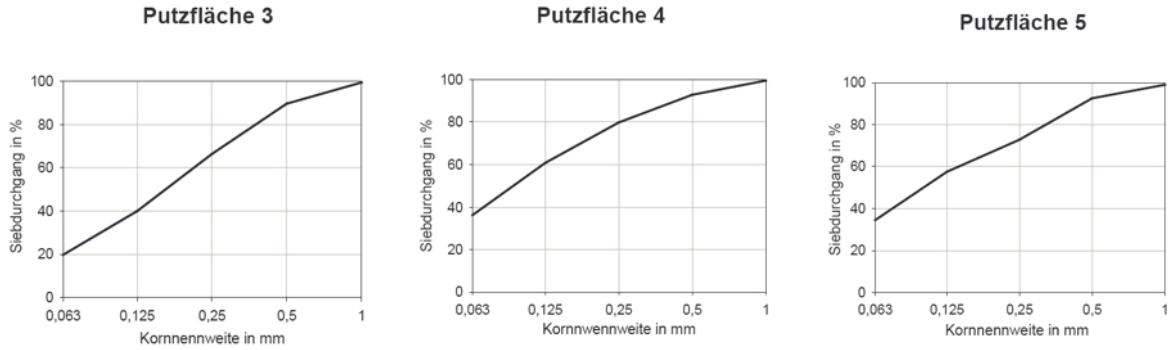

Abbildung 93: „Sieblinien des Zuschlagstoffes der Putzfläche 3, 4 und 5“ Diplomarbeit, Kerner, C. (2005)

Abbildung 94: „Sieblinien des Zuschlagstoffes der Putzflächen 6, 7 und 8“ Diplomarbeit, Kerner, C. (2005)

Bei der Ermittlung der Sieblinien aus der Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) ist ein hoher Anteil an sehr feinem Zuschlag, bis zu 40% Mehlkornanteil, aufgefallen, wobei dieser zum größten Teil aus Glimmerplättchen besteht. Weiters konnte ein Zusammenhang zwischen Glimmerplättchen, plättchenförmiger Kornform und hohem Tonanteil dokumentiert werden.

Wetterdaten Mauerbach:

Die Wetterdaten von Kartause Mauerbach wurden vom Bundesdenkmalamt zur Verfügung gestellt und ergänzend wurden Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur zur Zeit der Applikationen und der Untersuchungen gemessen. In der Abbildung 91 sind die Wetterdaten aus Mauerbach im Zeitraum von April bis September 2007 dargestellt. Da alle verwendeten Daten immer um 12 Uhr mittags gemessen wurden, wurden bei dieser Darstellung Tag-Nacht- Schwankungen nicht dargestellt.

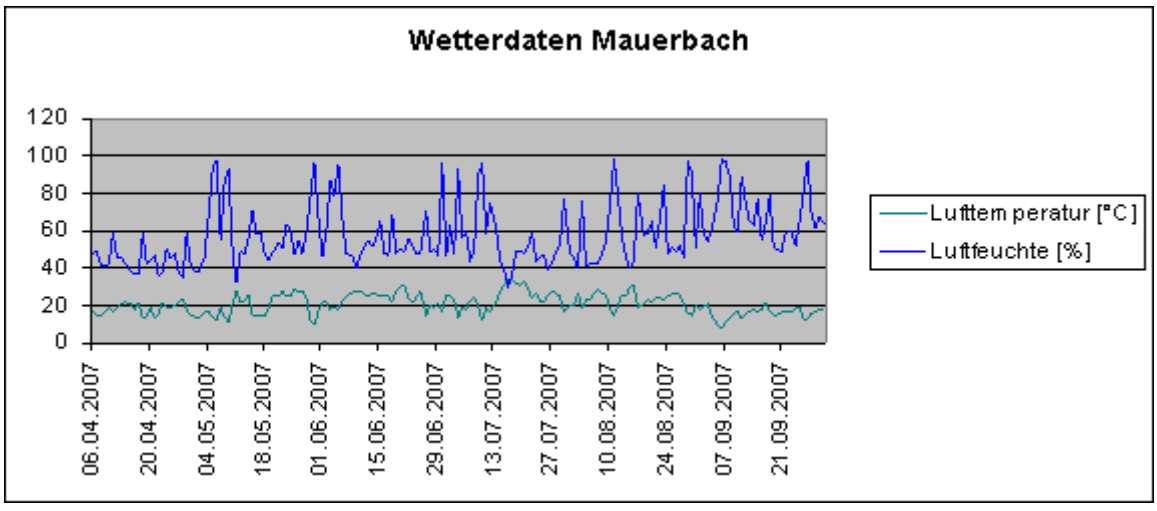

Abbildung 95: Wetterwerte Mauerbach (April bis September 2007)

Wie an den Wetterdaten zu erkennen ist, war dieser Sommer sehr wechselhaft. Aus diesem Grund war es nicht möglich, die in der Produktbeschreibung der Calcite – Methode beschriebene Forderung, dass mind. 5 Tage nach der Applikation kein Regen fallen sollte,[66] einzuhalten.

Die beiden nachfolgenden Tabellen zeigen die Wetterverhältnisse während der Applikation der Festigungsmedien und während der Untersuchungen an der Kartause Mauerbach.

Tabelle 23: Wetterdaten zur Zeit der Applikation der ersten und zweiten Versuchsreihe

Applikationen		Luftfeuchtigkeit	Lufttemperatur
1. VR:	07.05.2007	55 %	19,5 °C
	07.05.2007	87 %	14,4 °C
	09.07.2007	90 %	20,1 °C
	10.07.2007	96 %	12,5 °C
2. VR:	10.08.2007	73 %	17,7 °C
	11.08.2007	98%	15,5 °C

Tabelle 24: Wetterdaten zur Zeit der Grund- und Hauptuntersuchungen

Untersuchungen		Luftfeuchtigkeit	Lufttemperatur
GU:	07.03.2007	59 %	10,0 °C
	16.03.2007	64 %	15,0 °C
	30.03.2007	74 %	7,0 °C
HU:	09.07.2007	90 %	20,1 °C
	17.09.2007	64 %	22,3 °C

[66] Calcite 2000 1999

4. INTERPRETATION UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

4.1 Prüfkörper Labor

Die Laborprüfkörper wurden nach der Applikation verschiedenen Untersuchungen unterzogen. Die Untersuchung des Absandverhaltens der Laborproben führte zu keinen Ergebnissen, da diese „jungen“ Kalkputzproben nicht absandeten.

Die Laborputzproben wurden im weiteren auch Ultraschalluntersuchungen unterworfen. Diese zeigten, dass es infolge der Kalkwasserfestigung zu einer Steigerungen der Ultraschallgeschwindigkeiten, in beiden Versuchsreihen, kam. Bei der Festigung mittels biomineralisierenden Bakterien wurden, aufgrund von Fehlstellen im Probekörper, teilweise starke Schwankungen der Ergebnisse verzeichnet, es konnte aber ebenfalls eine Steigerung der Ultraschallgeschwindigkeiten festgestellt werden. Weiters konnte festgestellt werden, dass zur Verbesserung des Gefüges der Putzproben keine Nährlösung benötigt wird und frisch hergestellte Laborproben, welche noch nicht karbonatisiert sind, keine zusätzliche Calciumquelle zur Festigung mittels biomineralisierenden Bakterien benötigen.

Die Spaltzugfestigkeit der Laborproben wurde in mehreren Versuchen ermittelt. Bei den Vorversuchen wurde die Festigkeitsentwicklung eines frisch hergestellten Putzes (Ende 2006) und die Konsolidierung mittels Kalkwasser an „jungen“ Putzen untersucht. Es zeigte sich, dass die Kalkwasserfestigung an „jungen“ Kalkputzproben eine deutliche Steigerung der Spaltzugfestigkeit bewirkt. Weiters kann festgehalten werden, dass die Festigung von noch nicht karbonatisierten Kalkputzen weitaus deutlicher ausfällt bzw. schneller abläuft, als die Festigung von bereits karbonatisierten Putzen. Beim Hauptversuch wurde die Festigung mittels Kalkwasser und mittels biomineralisierenden Bakterien in zwei Versuchsreihen untersucht. Infolge der Festigung mittels Kalkwasser konnte wieder eine deutliche Steigerung der Spaltzugfestigkeit ermittelt werden. Die Ergebnisse, der mit *Bacillus cereus* gefestigten Proben, zeigten ebenfalls Steigerungen der Spaltzugfestigkeit. Einige der Proben wiesen jedoch eine Reduzierung der Spaltzugfestigkeit auf. Im Zuge der Feuchtigkeitsmessung konnte festgestellt werden, dass diese Proben, obwohl diese an der Oberfläche getrocknet waren, im Inneren der Proben eine Restfeuchte von ca. 10% aufwiesen. Dies kann jedoch darauf zurückgeführt werden, dass es infolge der Bildung eines Oberflächenfilms, zur Hydrophobierung der Proben gekommen ist. Weiters konnte auch anhand der Spaltzugfestigkeit festgestellt werden, dass für die Festigung mittels *Bacillus cereus* weder Nährlösung, noch Kalkwasser als Calciumquelle (noch nicht karbonatisierte

Putzproben) notwendig sind. Es ist jedoch zu beachten, dass die Schwankungsbreite der Festigkeiten der einzelnen Proben teilweise größer ist, als die relative Steigerung der Festigung infolge der Festigung mittels *Bacillus cereus*. Somit sind die Verbesserungen der Festigkeitsentwicklung, mit den hier verwendeten Untersuchungsmethoden, nur sehr schwer ersichtlich.

Zusätzlich zu den bisher erwähnten Versuchen wurde auch die Wasseraufnahmefähigkeit der Proben getestet. Infolge Kalkwasserfestigung konnte keine Hydrophobierung fesgestellt werden. Die mittels Bakterien gefestigten Proben zeigten jedoch, dass infolge der Bildung eines Oberflächenfilms, welcher aus Bakterien und Nährlösung besteht, zur Hydrophobierung der Proben gekommen ist. Analog zu den Forschungsergebnissen von LOUBIERE, J. F (1996) konnte auch hier eine maximale Reduktion des Wasseraufnahmekoeffizienten um den Faktor 5 bis 8 festgestellt werden. Somit liegen die niedrigsten Werte im Umschlagbereich von saugend zu wasserhemmend.

Abschließend wurden anhand der Bruchstücke noch einige Versuche im Labor durchgeführt. So wurde die Eindringtiefe der Bakterien mittels PAS – Färbung ermittelt. Da die Applikation der Festigungsmedien an den Laborproben in liegenden Behältnissen durchgeführt wurde, konnte das Eindringen der Bakterien in den gesamten Prüfkörper gewährleistet werden. Auffällig ist, dass die Proben aus dem Jahr 2006 eine weit stärkere Färbung zeigten, als jene Proben aus dem Jahr 2004. Da die Applikation der Festigungsmedien zur selben Zeit und den selben Mengen erfolgte, liegt der einzige Unterschied der 2004/2006 hergestellten Proben darin, dass bei der Herstellung der Proben 2004 Kabelsand und für die Proben 2006 gewaschener Estrichsand als Zuschlagstoff verwendet wurde. Somit kann festgestellt werden, dass das Wachstum der Bakterien von der Art des Zuschlagstoffs und des Porenraums bzw. dessen Begleitstoffen abhängig sein muss. Dieselben Ergebnisse konnten auch im Zuge der Reisolierung des *Bacillus cereus* festgestellt werden. Anhand der an den Bruchstücken durchgeführten Untersuchungen ist wieder zu erkennen, dass der Erfolg der Biomineralisierung weder von zusätzlich applizierter Nährlösung, noch von zusätzlich appliziertem Kalkwasser abhängig ist, sondern von anderen Parametern, wie dem Gefüge und dem Porenraum des Putzes.

Anhand der Untersuchung der Dünnschliffe mit dem Lichtmikroskop und der Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop, konnten im Inneren der Prüfkörper keine eindeutigen Calcitneubildungen nachgewiesen werden.

Die Methode der Biomineralisierung wurde bisher fast ausschließlich an Kalkstein getestet. Der Gefügezustand von Kalkstein ist wahrscheinlich nicht so starken Streuungen, wie jener

eines Kalkputzes unterworfen. Aus diesem Grund sind im Rahmen der Putzsanierung noch zahlreiche weitere Forschungen notwendig. Die Herstellung der Laborputzproben wurde von einem Restaurator durchgeführt, um möglichst gleichmäßige Putzproben zu erhalten. Trotzdem sind die Proben in ihrer Struktur unterschiedlich und somit lassen sich auch die zum Teil sehr stark schwankenden Ergebnisse erklären.

4.2 Prüfflächen Mauerbach

An der Kartause Mauerbach wurden vorab einige zerstörungsfreie Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Peelingtests zeigten, dass sich infolge aller angewendeten Festigungsmedien eine Reduzierung des Absandens einstellte. Da es sich bei dem verwendeten Klebeband um ein sehr stark klebendes Gewebeband handelte, konnten nur geringe Reduzierungen der Rückstände festgestellt werden. Aus diesem Grund wäre ein weniger stark klebendes Klebeband zu empfehlen! Zusätzlich zu den Rückständen auf dem Klebeband wurde der Widerstand beim Abziehen mittels Federwaage gemessen. Diese zusätzliche Messgröße war für Auswertung des Absandverhaltens der Putzflächen sehr hilfreich. Alle Putzflächen zeigten eine geringe Verbesserung des Absandverhaltens, woraus man schließen kann, dass zur erfolgreichen Konsolidierung mittels *Bacillus cereus*, keine zusätzliche Nährlösung notwendig ist.

An den Putzflächen der Kartause Mauerbach wurden außerdem eine Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten und eine Feuchtigkeitsmessung vorgenommen. An allen Versuchsflächen konnte eine Steigerung der Ultraschallgeschwindigkeiten festgestellt werden. Da einige der Flächen massive Gefügezerstörungen und Risse aufweisen, konnte in diesen Bereichen keine Stabilisierung des Gefüges festgestellt werden. Betrachtet man beide Versuchsreihen zusammen, kann auch hier bestätigt werden, dass keine Notwendigkeit zusätzlicher Nährlösung zur die Festigung mittels *Bacillus cereus* besteht.

Die Ermittlung der Wasseraufnahmefähigkeit an den Flächen der Kartause Mauerbach zeigte keine Reduktion des Wasseraufnahmekoeffizienten. Dies resultiert daraus, dass die Putzflächen teilweise von einem Mikro- und Makrorisssystem durchzogen sind, welches sowohl normal, als auch parallel zur Oberfläche verläuft. Ein weiterer Grund hierfür könnte sein, dass der Regen die applizierten Medien teilweise wieder abgewaschen haben könnte, da es bis zu fünf Tage nach jeder Applikation geregnet hatte.

Nach der Applikation der Festigungsmedien wurden einige Proben genommen, an welchen einige Laborversuche vorgenommen wurden. Die PAS – Färbung zeigte, dass die Bakterien zum größten Teil an den Putzoberflächen verblieben waren und nur bis in eine geringe Tiefe

in den Baustoff eingedrungen sind. Da es im Zeitraum von bis zu fünf Tagen nach jeder Applikation geregnet hatte, könnten die applizierten Festigungsmedien abgewaschen worden sein. Die Ergebnisse der Reisolierung des *Bacillus cereus* glichen weitgehend den Resultaten aus der PAS-Färbung. An allen Flächen konnten Einzelkulturen des Bodenbakteriums *Bacillus cereus* reisoliert werden. Da die Probenahme nur eine Stichprobe und nicht den gesamten Bereich der Putzfläche darstellt, sind die Schwankungen in der Zellenzahl nicht zu kritisch zu betrachten. Die Reisolierung der Einzelkulturen zeigte, dass für ein erfolgreiches Bakterienwachstum keine zusätzlich applizierte Nährlösung notwendig ist.

Abschließend wurden auch von den Bruchstücken der Putzflächen vor Ort Dünnschliffe angefertigt. Im Inneren der Prüfkörper konnten auch hier mit dem Lichtmikroskop keine eindeutigen Calcitneubildungen nachgewiesen werden. Mit Hilfe der Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop konnten auch keine eindeutigen Calcitneubildungen nachgewiesen werden.

Abschließend werden hier zwei kurze Anmerkungen bezüglich der Festigung mittels *Bacillus cereus* angeführt.

- Gemäß den Anweisungen der Produktbeschreibung der Calcite – Methode sollte die Applikation der Bakterien nur dann erfolgen, wenn gewährleistet ist, dass bis mindestens fünf Tage nach der Applikation der Hauptkultur und der Nährmedien kein Regen fällt[67]. Aufgrund der wechselhaften Wetterlage in Österreich war dies bei keiner der Applikationen, weder in der ersten Versuchsreihe, noch in der Zweiten möglich. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse der Untersuchungen an den Putzflächen der Kartause Mauerbach mit Vorsicht zu betrachten.
- Da die Putzflächen an der Kartause Mauerbach teilweise sehr stark geschädigt sind, sollten die Flächen unbedingt vor erneuten Versuchen saniert werden. Da die, in dieser Diplomarbeit getesteten Konsolidierungsmaßnahmen, eine sanfte Festigungsmethode darstellen und nur Putze mit minimaler Gefügezerstörung (Überbrückung von Rissen bis 2 – 50µm²) oder Absanden festigen können, sollten in jedem Fall die zahlreichen Risse im Putz mittels Kalkschlämmen etc. saniert werden.

[67] Calcite 2000 1999

4.3 Zusammenschau zwischen Labor und Mauerbach

Gemäß der zu Beginn dieser Diplomarbeit gestellten Fragestellung erfolgt eine Zusammenschau der Laborergebnisse und der Ergebnisse der Putzflächen an der Kartause Mauerbach.

- Strukturelle Festigung mit Kalkwasser:

Die Kalkwasserfestigung wurde sowohl im Labor, als auch vor Ort an Putzflächen der Kartause Mauerbach untersucht. Anhand der Laborproben wurde vorab die Festigungsentwicklung der frisch hergestellten Proben untersucht und anschließend begleitend wurde die Kalkwasserfestigung an frischen und etwa drei Jahre alten Proben untersucht. Alle angewendeten Untersuchungsmethoden haben ergeben, dass die Konsolidierung mit Kalkwasser zur Stabilisierung des Kornverbandes von Kalkputzen führt. An den Laborproben konnte ebenfalls festgestellt werden, dass im Besonderen die Festigung von frischen Kalkputzproben zu deutlichen Festigungssteigerungen führt, da nicht vollständig karbonatisierte Proben ein besonders großes Festigungspotential besitzen. An den Putzflächen der Kartause Mauerbach zeigte die Festigung allein mit Kalkwasser ebenfalls Erfolg. Allerdings ist hier anzumerken, dass im Zuge der Reisolierung der Bakterien festgestellt wurde, dass es auch an dieser Fläche zur Besiedelung mittels *Bacillus* cereus gekommen ist und somit nicht von „alleiniger" Kalkwasserfestigung gesprochen werden kann.

- Strukturelle Festigung mit *Bacillus cereus*:

Im Rahmen der Biomineralisierung waren einige Punkte abzuklären, wie beispielsweise die Notwendigkeit zusätzlicher Nährlösung oder die Notwendigkeit von Kalkwasser als Calciumquelle. Die Konsolidierung mittels des Bodenbakteriums *Bacillus cereus* wurde ebenfalls an Laborproben und an Putzflächen der Kartause Mauerbach getestet. Hierfür wurden verschiedene Ansätze, mit und ohne Nährlösung bzw. Kalkwasser, getestet. Alle durchgeführten Untersuchungsmethoden zeigen, dass für den Festigungserfolg dieser Methode keine Notwendigkeit zusätzlich applizierter Nährlösung besteht. An den Putzflächen der Kartause Mauerbach konnten so beispielsweise an der Fläche ohne zusätzliche Nährlösung, die meisten Einzelkulturen reisoliert und eine gute Eindringtiefe der Bakterien erreicht werden. Anhand der Ergebnisse der Laborproben zeigt sich zusätzlich, dass frisch hergestellte, noch nicht karbonatisierte Putzproben keine zusätzliche Calciumquelle zur Stabilisierung des Kornverbandes benötigen, da noch genügend „freies" Ca^{2+} bzw. $Ca(OH)_2$ für die im Putz ablaufenden, chemischen Prozesse vorhanden ist. Dagegen ist in karbonatisierten Putzen, Kalkwasser als Calciumquelle für die Bildung eines neuen, stärkenden Calciumnetzes unerlässlich.

Infolge der durchgeführten Untersuchungen hat sich weiters gezeigt, dass der Erfolg der Biomineralisierung neben dem Vorhandensein zusätzlicher Nährlösung und/oder Kalkwasser auch von anderen wichtigen Parametern, wie dem Gefüge und Porenraum des Putzes abhängig ist.

Eine zusätzliche Fragestellung dieser Diplomarbeit war, ob zuviel Nährmedium bzw. abgestorbene Bakterien Nährboden für schädliche Organismen darstellen. Bereits in der Diplomarbeit von Claudia Kerner (2005) konnte festgestellt werden, dass es infolge zusätzlicher Nährlösung bzw. abgestorbener Bakterien (*Myxococcus xanthus*) zu biogenen Verfärbungen der Oberfläche gekommen ist. Es kann allerdings nicht nur aufgrund der obigen Probleme zur Schädigung des Putzes kommen, sondern auch aufgrund der verwendeten Nährlösung selbst. So wird bei der „Calcite" – Methode Calciumacetat als Kalkquelle beigegeben. Infolge der Abspaltung des Calcium – Ions, welches ebenfalls als Calciumquelle dient, entsteht Essigsäure, die den Kalkputz schädigen könnte. Weiters wird bei dieser Methode zur Anzüchtung der Vorkultur in einer Vornährlösung Magnesiumsulfat ($MgSO_4$), ein Magnesiumsalz der Schwefelsäure, in geringer Menge beigegeben. Da Schwefelsäure bekanntlich Kalk lösen kann bzw. zu Gips umwandelt, ist auch die Anwendung der Vornährlösung zu überdenken.

Bei der intensiven Auseinandersetzung mit diesem Thema, konnte ich feststellen, dass es einige verschiedene Ansätze zu dieser Problematik gibt. Zum Beispiel verfolgen die neuen Forschungsarbeiten von JIMENEZ-LOPEZ, C., et. al. (2007) den Ansatz vollkommen auf die Applikation von Bakterien zu verzichten und anstelle dessen lediglich mit der Applikation von steriler Nährlösung vorhandene Bakterien zu aktivieren und somit den Kalkstein zu festigen[68].

[68] Jimenez-Lopez, C., et. al.; Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone 2007

5. AUSBLICK UND OFFENE BZW. NEUE FRAGESTELLUNGEN

Im Verlauf dieser Diplomarbeit wurden zahlreiche Versuche im Rahmen der strukturellen Festigung von historischen Putzen durchgeführt. Einige der anfangs gestellten Fragen konnten geklärt werden, jedoch wurden auch zahlreiche neue Fragen bzw. Problematiken aufgetan.

Die Konsolidierung mit Kalkwasser führte bei den durchgeführten Untersuchungsmethoden durchwegs zu guten Festigungserfolgen. Sowohl bei den Laborproben, als auch an der Putzfläche der Kartause Mauerbach konnte eine Erhöhung der Festigkeiten bzw. eine Stabilisierung des Kornverbandes festgestellt werden.
Die Untersuchungsergebnisse, der mittels biomineralisierenden Bakterien gefestigten Proben, zeigten keinen so deutlichen Festigungserfolg, wie jene nur mit Kalkwasser gefestigten Proben. Es wurde bereits bei den Forschungsarbeiten von RODRIGUEZ-NAVARRO et. al. (2002) festgestellt, dass die Calcite – Methode zwei wesentliche Einschränkungen besitzt. Einerseits wurde bei zahlreichen Versuchen festgestellt, dass die Eindringtiefe, welche im Wesentlichen von der Porosität des zu festigenden Materials abhängig ist, nur unzureichend ist. Andererseits kann es infolge sporenbildender Bakterien zu einem unkontrollierbaren Bakterienwachstum und zur Bildung eines Oberflächenfilms aus biologischem Material kommen, welche den Gasaustausch zwischen dem Putz und der Umgebung vermindern und somit den Verfall des Materials beschleunigen können.
Des Weiteren wird bei der „Calcite“ – Methode Calciumacetat als Calciumquelle beigegeben. Dieses setzt infolge der Abspaltung des Calcium – Ions Essigsäure frei, welche zu Schädigungen des Kalkputzes führen könnte. Ferner wird zur Anzüchtung der Vorkultur in einem Vornährmedium Magnesiumsulfat ($MgSO_4$), ein Magnesiumsalz der Schwefelsäure, in geringer Menge beigegeben. Die Anwendung dieses Vornährmediums sollte ebenfalls überdacht werden, da Schwefelsäure bekanntlich Kalk lösen kann bzw. zu Gips umwandelt und somit ebenfalls schädigend wirkten kann.
Aufgrund dieser Einschränkungen ist es fraglich, ob weitere Untersuchungen im Rahmen der Calcite – Methode sinnvoll sind.

Ein neuer Ansatz für weitere Forschungen im Bereich der Biomineralisierung könnte beispielsweise auf der Basis historischer Rezepte von Kalkputzen erfolgen. Wie bekannt ist, wurden bei historischen Putzen oftmals Kasein oder Blutwasser etc. beigemengt, um die Widerstandsfähigkeit von Kalkputzen zu erhöhen oder eine Verminderung in der Rissbildung zu bewirken.
Für den Prozess der Biomineralisierung sind zwei grundlegende Elemente unerlässlich, einerseits aerobe, heterotrophe Bakterien und andererseits eine Calciumquelle. Um das Wachstum dieser aeroben, heterotrophen Bakterien, wie *Bacillus cereus* zu gewährleisten, wird eine Proteinquelle benötigt, welche beispielsweise auf der Basis von Kasein oder Blutwasser hergestellt werden könnte. Als Calciumquelle könnte, wie gehabt, Kalkwasser mit einem PH-Wert von etwa 8,0 auf den Putz appliziert werden.
Diese Versuche sollten allenfalls auf der Basis von sterilen Produkten erfolgen, um Beeinflussungen der Ergebnisse infolge Verunreinigungen der Bestandteile ausschließen zu können.

Einen weiteren wichtigen Punkt stellt die genaue Untersuchung des Diffusionsverhaltens bakteriell gefestigter Putze dar. Infolge der Applikation von *Bacillus cereus* kommt es zur Bildung von einem Oberflächenfilm, welcher eine hydrophobierende Wirkung besitzt, d.h., dass der Gasaustausch zwischen dem Putz und der Umwelt behindert wird. Im Falle nachfolgender Untersuchungen sollte nicht nur der Wasseraufnahmekoeffizient, sondern ebenso das Wasserabgabevermögen der Putzproben untersucht werden.

Ein letzter wichtiger Punkt wäre die genaue Auswahl der anzuwendenden Untersuchungsmethoden. Im Zuge dieser Diplomarbeit haben sich einige Versuchsanordnungen als zu ungenau erwiesen. Die Schwankungsbreiten der Festigkeit der einzelnen Laborproben war größer, als die relative Steigerung der Festigkeiten infolge der Festigung mittels *Bacillus cereus*, somit eine Verbesserungen der Festigkeitsentwicklung, mit den hier angewandten Untersuchungsmethoden, nur sehr schwer ersichtlich. Für die genaue Auswertung des Festigungserfolges infolge Biomineralisierung, sollte der Schwerpunkt der Untersuchungen an der Universität für Bodenkultur in Wien angesetzt werden.

Die strukturelle Festigung von Kalkputzen ist ein sehr komplexes Gebiet, welches genügend Platz für zahlreiche weitere Untersuchungen offen hält.

LITERATURNACHWEIS

LITERATUR

ATLAS, R. M., CHOWDHURY, A. N., LAL GAURI, K., (1988)
Microbial Calcification of Gypsum-Rock and Sulfated Marble
Studies in Conservation 33

BACHEM, A. (2001)
Kombinationen von Biozidbehandlung und Beschichtung von Kalksteinoberflächen zum Schutz vor mikrobiell induzierten Schadensprozessen
Diplomarbeit, FH – Hildesheim

BIELEFELD, T. (2001)
Der Einfluss ausgewählter Reinigungsmaterialien auf den mikrobiellen Befall und die physikalischen Eigenschaften des mineralischen Untergrundes
Diplomarbeit, FH – Hildesheim

CALCITE 2000 (1999)
Product Description of a patented biomineralisationprocess
CAÑAVERAS J.C.,HOYOS, M., SANCHEZ-MORAL, S., SANZ-RUBIO, E., BEDOYA, J., SOLER, V., GROTH, I., SCHUHMANN, P., LAIZ, L., GONZALEZ, I., & SAIZ-JIMENEZ, C.

CHARTA VON VENEDIG (1964)
Internationale Charta über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (Denkmalbereiche)
Deutsche Fassung vom April 1989; BACHER, E., DEITERS, L., PETZET, M., WYSS, A.

CYPIONKA, H. (2005)
Grundlagen der Mikrobiologie, 3. Auflage
Springer-Verlag

DENKMALSCHUTZGESETZ (1999)
BGBl. I Nr. 170/1999

DETTMERING, T., KOLLMANN, H. (2001)
Putze in der Bausanierung und Denkmalpflege, 1. Auflage
Verlag Bauwesen Berlin

DREYER, J. (2004)
Bauphysikalische Diagnose – 1. Teil und 2. Teil
Vorlesungsunterlagen, TU – Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz

FLEISCHER, G. (2002)
Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege
Unveröffentlichte Dissertation, TU – Wien

FOROUTAN, H. (1999)
Historische Putze
Diplomarbeit, TU – Wien
GÄNSSMANTEL, J. (2002)
Kalkputze in der Denkmalpflege
Hindelanger Baufachkongress 2002: „Kalkputze“
HEILING, K. (2003)
Der Einfluss ausgewählter Reinigungsmaterialien auf den mikrobiellen Befall und die physikalischen Eigenschaften des mineralischen Untergrundes
Diplomarbeit, FH – Hildesheim
JIMENEZ-LOPEZ, C.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; PINAR, G.; CARRILLO-ROSÚA, F.J.; RODRIGUEZ-GALLEGO, M.; GONZALEZ.MUNOZ, M.T. (2007)
Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone
Chemosphere 68
KARSTEN, R. (1960)
Bauchemie für Schule und Baupraxis
Straßenbau Chemie und Technik Verlags – GmbH Heideberg
KERNER, C. (2005)
Konsolidierung von historischen Kalkputzen mit Kalkwasser und Bakterien
Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU – Wien
KNOBLAUCH, H., SCHNEIDER, U. (1995)
Bauchemie, 4. Auflage
Werner Verlag
KOCH, A. (2006)
Deformation von Fassadenplatten aus Marmor
Universitätsverlag Göttingen
KRETSCHMER, A. (2003)
Die Kalkhydratwasser – Festigung zur Konsolidierung historischer Putze
Diplomarbeit, FH – Potsdam
LOUBIERE, J. F. (1996)
Biomineralization Prozess for the Natural Protection of Stones and Buildings
Calcite S. A.
MAIER, J. (2007)
Putz und Stuck; Materialien, Anwendungstechniken, Restaurierung
Fraunhofer IRB Verlag

MÜLLER, G. (1964)
Sediment Petrologie – 1. Teil: Methoden der Sediment – Untersuchung
E. Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung
MÜLLER, W., VOGEL, G. (1997)
dtv – Atlas Baukunst Band 1 und 2, 11. Auflage
Deutscher Taschenbuchverlag
OKRUSCH, M., MATTHES, S. (2005)
Mineralogie
Springer Verlag
ORIAL, G., CASTANIER, S., LE-METAYER, G., LOUBIÈRE J. F. (1993)
The Biomineralisazion: A New Process to Protect Calcareous Stone; Applied to Historic Monuments
Biodeterioration of Cultural Property 2
RÖLLEKE, S. (1999)
Identifikation von Mikroorganismen als Verursacher von Schäden an Bauwerken
DGZfP – Berichtsband BB 69-CD, Vortrag H1
Feuchttag 1999
RODRIGUEZ-NAVARRO, C., RODRIGUEZ-GALLEGO, M., CHEKROUN, K. B., GONZALEZ-MUÑOZ, M. T. (2003)
Conservation of Ornamental Stone by *Myxococcus xanthus*–Induced Carbonate Biomineralisazion
Applied and Environmental Microbiology, American Society for Microbiology
ROSS, H., STAHL, F. (2003)
Praxis – Handbuch Putz, 3. Auflage
Verlag Rudolf Müller
RÖSLER, H. J. (1991)
Lehrbuch der Mineralogie
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig
SCHNEIDER, U. (1999)
Wiener Baustofflehre Blätter: Mörtel, Bindemittel
Vorlesungsunterlagen, TU – Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz
SISÍ, M. M., CONESA, O. G., MORÁN, F. A. (2002)
Der Kalkputz (Deutsche Ausgabe)
Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart München
STARK, J., WICHT, B. (2000)
Zement und Kalk; Der Baustoff als Werkstoff
Birkhäuser Verlag

STERFLINGER, K. (2005)
Allgemeine Mykologie, Übungen SS 2005
Vorlesungsunterlagen, BOKU, ACBR
STUMM, W., MORGAN, J.J., (1996)
Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria And Rates In Natural Waters
John Wiley & Son, Inc. New York
TIANO, P., (1995)
Stone Reinforcement by Calcite Crystal Precipitation Induced by Organic Matrix Macromolecules
Studies in Conservation 40
TRAUNINGER, D. (2007)
Beschichtungssysteme auf Natursteinoberflächen
Diplomarbeit, TU – Wien
WEISSENBACH, H. (1997)
Unterlagen zu: Demonstration von historischen Kalkmörtel
Kartause Mauerbach

NORMEN UND RICHTLINIEN

ÖNORM EN 459 Teil 1 und Teil 2 (2002) – Baukalk
ÖNORM EN 998 Teil 1 (2006) – Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau
ÖNORM EN 1015 Teil 2 und Teil 11 (2007) – Prüfverfahren für Mörtel
ÖNORM EN 1018 (2006) Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Calciumcarbonat
ÖNORM EN 1925 (1999) – Prüfverfahren für Naturstein
Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung
ÖNORM B 3124 Teil 4 (1981) – Prüfverfahren für Natursteine
mechanische Gesteinseigenschaften; einaxiale Zugfestigkeit (Spaltzugfestigkeit)
ÖNORM B 3135 (2003) – Gesteinskörnung für Mörtel
ÖNORM B 3327 Teil 1 (2002) - Zemente gemäß ÖNORM EN 197-1 für besondere Verwendungen
ÖNORM B 3327 Teil 2 (2001) - Zemente gemäß ÖNORM EN 197-1 für besondere Verwendungen
ÖNORM B 3344 (2006) – Baustellengemischte Mauer- und Putzmörtel
ÖNORM B 3346 (2001) – Putzmörtel – Regeln für die Verwendung und Verarbeitung

INTERNETQUELLEN

DULLINGER KALK

http://www.kalk.at

BAUMIT

http://www.baumit.com/baumit/at/main4/sub2/02824/index.shtml

BAUMARKT

http://www.baumarkt.de/nxs/735///baumarkt/47/52/schablone1/putzrisse_in_der_fassade_und_in_innenwaenden__was_tun.htm

FRAUNHOFER IRB BAUFACHINFORMATION

http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1988067127030

UNIVERSITÄT WEIMAR

http://www.uni-weimar.de/Bauing/bauchemie/Downloads/Praktikum3S/Versuch5.pdf

KALK-KONTOR

http://www.kalk-kontor.de/media/ti_kalkschlaemme.pdf

UNIVERSITÉ DE RENNES 1

http://www.verceram.univ-rennes1.fr/JLivage/biomineralisation.pdf

WIKIPEDIA

http://de.wikipedia.org/wiki/Ph-wert

FACHGRUPPE PUTZ UND DEKOR

http://www.putz-dekor.org/abc/c_Carbonatisierung.htm

WESTFALIA-VERSAND

http://www1.westfalia-versand.at/marken/wetekom/feuchtemesser.html

FRAUNHOFER IRB BAUFACHINFORMATION

http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1987057100473

UNIVERSITÄT ULM (2001)

http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/REMHerbst2001.html

HAHNKAMMER GmbH

http://www.hankammer.de/Instrumentarium_/Karsten/karsten.html

SINEXX

http://www.scinexx.de/index.php?cmd=focus_detail2&f_id=205&rang=6Stichwort

DER TAGESSIPEGEL

http://www.tagesspiegel.de/magazin/wissen/gesundheit/Gesundheit;art300,2224215

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Kalkkreislauf 12
Abbildung 2: Gipskreislauf 15
Abbildung 3: links: Sackrisse, rechts: Schwindrisse 25
Abbildung 4: links: Kerbrisse, rechts: Fugenrisse 26
Abbildung 5: Deckenschubrisse 27
Abbildung 6: Chemischen Aufbau von Polyvinylacetatharz 30
Abbildung 7: Gleichgewicht von HCO_3^- und CO_3^{2-} in Abhängigkeit vom PH-Wert 31
Abbildung 8: links: Bacillus cereus auf Blut-Nährplatte, rechts: Einzelkultur Bacillus cereus 35
Abbildung 9: Versuchsanordnung Ultraschalluntersuchung 37
Abbildung 10: Prüfkörper bei Ultraschlluntersuchung 37
Abbildung 11: Messgerät Ultraschall 38
Abbildung 12: Einspannvorrichtung Ultraschall 38
Abbildung 14: Karsten´sches Prüfröhrchen 40
Abbildung 15: Prüfung der Spaltzugfestigkeit 42
Abbildung 17: Feuchtemessgerät FA. Wetekom 43
Abbildung 18: links: REM (oben Säule, darunter Kammer), rechts: Kammer REM 45
Abbildung 19: Laborprüfkörper in Prüfpresse 48
Abbildung 20: Prüfflächen an der Kartause Mauerbach 49
Abbildung 21: links: Putzfläche 1, rechts: Putzfläche 2 50
Abbildung 22: links: Putzfläche 3, rechts: Putzfläche 4 50
Abbildung 23: links: Putzfläche 5, rechts: Putzfläche 6 51
Abbildung 24: links: Putzfläche 7, rechts: Putzfläche 8 51
Abbildung 25: Putzfläche 9 52
Abbildung 29: Absandversuch, links: BC-NL-0 2006K, rechts: BC-NL-0 2004L 66
Abbildung 30: PAS, links: 0-0-KW 2004, rechts: BC-0-0 2006 83
Abbildung 31: PAS, links: BC-0-KW 2004, rechts: BC-NL-0-2006 84
Abbildung 32: PAS, links: BC-NL-KW 2004, rechts: BC-½NL-0 2004 84
Abbildung 33: PAS, links und rechts: BC-½NL-KW 2006 85
Abbildung 34: Mikroskopische Aufnahme, reisolierter Bacillus cereus 86
Abbildung 35: Reisolierung, links: 0-0-KW 2004, rechts: BC-½NL-0 2004 87
Abbildung 36: Reisolierung, links: BC-0-0 2006, rechts: BC-NL-0 2006 87
Abbildung 37: Dünnschliff 0-0-0 2006/1, Putzoberfläche am oberen Bildrand 88
Abbildung 38: Dünnschliff BC-0-KW 2006/4, 1. Festigungsserie, Putzoberfläche am oberen Bildrand 88
Abbildung 39: Dünnschliff BC-0-0 2004/1, Putzoberfläche am oberen Bildrand 89

Abbildung 40: Dünnschliff BC-0-KW 2006/2, Putzoberfläche am oberen Bildrand 89
Abbildung 41: Dünnschliff BC-NL-0 2006/2, Putzoberfläche am oberen Bildrand..... 90
Abbildung 42: Dünnschliff BC-NL-KW 2004/2, Putzoberfläche am oberen Bildrand..... 90
Abbildung 43: Dünnschliff BC-½NL-0 2006/2, Putzoberfläche am oberen Bildrand..... 91
Abbildung 44: Dünnschliff BC-½NL-KW 2004/1, Putzoberfläche am oberen Bildrand..... 91
Abbildung 45: Detailaufnahme Dünnschliff BC-0-0 2004/1, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter..... 92
Abbildung 46: Detailaufnahme Dünnschliff BC-0-KW 2006/2, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter..... 92
Abbildung 47: Detailaufnahme Dünnschliff BC-NL-KW 2004/2, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter..... 92
Abbildung 48: Detailaufnahme Dünnschliff BC-½NL-KW 2004/1, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter 93
Abbildung 49: links: Biofilm nahe der Oberfläche, rechts: Calcitsaum auf Zuschlagsstoff 93
Abbildung 50: links: primärer Calcit, rechts: sekundärer Calcit 94
Abbildung 51: links und rechts: Dünnschliff Laborprobe 94
Abbildung 52: Ausschnitt Vergleichs-Schaubild TERRY & CHILINGAR (1955)..... 95
Abbildung 53: Putzfläche 6, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung..... 96
Abbildung 54: Putzfläche 7, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung..... 97
Abbildung 55: Putzfläche 8, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung..... 98
Abbildung 56: Putzfläche 9, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung..... 99
Abbildung 57: Putzfläche 3, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung..... 100
Abbildung 58: Putzfläche 4, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung..... 101
Abbildung 59: Putzfläche 5, oben (1) und unten (2) links: vor Festigung, rechts: nach Festigung..... 102
Abbildung 60: links: Legende Feuchtigkeit, rechts: Legende Ultaschall..... 103
Abbildung 61: Lage Fläche 6..... 104
Abbildung 62: Putzfläche 6: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung 104
Abbildung 63: Lage Fläche 7..... 105
Abbildung 64: Putzfläche 7: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung 105
Abbildung 65: Lage Fläche 8..... 106
Abbildung 66: Putzfläche 8: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung 106

Abbildung 67: Lage Fläche 9 107
Abbildung 68: Putzfläche 9: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung 107
Abbildung 69: Lage Fläche 3 108
Abbildung 70: Putzfläche 3: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung 108
Abbildung 71: Lage Fläche 4 109
Abbildung 72:: Putzfläche 4: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung 109
Abbildung 73: Lage Fläche 5 110
Abbildung 74: Putzfläche 5: oben: vor Festigung, unten: nach Festigung 110
Abbildung 75: PAS, links: Fläche 6 (BC-0-KW), rechts: 7 (BC-NL-KW) 113
Abbildung 76: PAS, links: Fläche 8 (BC-½NL-KW), rechts: Fläche 9 (0-0-KW) 114
Abbildung 77: PAS, links: Fläche 3 (BC-0-KW), rechts: Fläche 4 (BC-NL-KW) 114
Abbildung 78: PAS, links: Fläche 4 (BC-NL-KW), untere Putzschicht, rechts: Fläche 5 (BC-½NL-KW) 115
Abbildung 79: Reisolierung, links: Fläche 6 (BC-0-KW), rechts: 7 (BC-NL-KW) 116
Abbildung 80: Reisolierung, links: Fläche 8 (BC-½NL-KW), rechts: Fläche 9 (0-0-KW) 116
Abbildung 81: Reisolierung, links: Fläche 3 (BC-0-KW), rechts: Fläche 4 (BC-NL-KW) 117
Abbildung 82: Reisol., links: Fläche 4 (BC-NL-KW), untere Putzschicht, rechts: Fläche 5 (BC-½NL-KW) 117
Abbildung 83: Dünnschliff Putzfläche 3, Putzoberfläche am oberen Bildrand 118
Abbildung 84: Dünnschliff Putzfläche 4, Putzoberfläche am unteren Bildrand 118
Abbildung 85: Dünnschliff Putzfläche 5, Putzoberfläche am oberen Bildrand 119
Abbildung 86: Dünnschliff Putzfläche 6, Putzoberfläche am unteren Bildrand 119
Abbildung 87: Dünnschliff Putzfläche 7, Putzoberfläche am oberen Bildrand 120
Abbildung 88: Dünnschliff Putzfläche 8, Putzoberfläche am oberen Bildrand 120
Abbildung 89: Dünnschliff Putzfläche 9, Putzoberfläche am oberen Bildrand 121
Abbildung 90: Detailaufnahme Dünnschliff Putzfläche 4, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter 121
Abbildung 91: Detailaufnahme Dünnschliff Putzfläche 8, 20-fache Vergrößerung, links ohne, rechts mit Polarisationsfilter 122
Abbildung 92: Putzfläche 3: Bakterienfilm nahe der Oberfläche 122
Abbildung 93: „Sieblinien des Zuschlagstoffes der Putzfläche 3, 4 und 5“ Diplomarbeit, Kerner, C. (2005) 124
Abbildung 94: „Sieblinien des Zuschlagstoffes der Putzflächen 6, 7 und 8“ Diplomarbeit, Kerner, C. (2005) 125
Abbildung 95: Wetterwerte Mauerbach (April bis September 2007) 125

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Gebräuchliche Mischungsverhältnisse für Putzmörtel in Raumteilen, lt. ÖN B3344 (2006) *20*
Tabelle 2: Mechanische Kennwerte Mechanische Kennwerte von Putzen *21*
Tabelle 3: Zuschlagsstoff Laborproben 2004/2006 ..... *47*
Tabelle 4: Ultraschallgeschwindigkeiten, 1. Versuchsreihe, Laborproben *62*
Tabelle 5: Ultraschallgeschwindigkeiten, 2. Versuchsreihe, Laborproben *64*
Tabelle 6: Wasseraufnahmekoeffizient, 1. Versuchsreihe, Laborproben *67*
Tabelle 7: Wasseraufnahmekoeffizient, 2. Versuchsreihe, Laborproben *69*
Tabelle 8: Übersicht Spaltzugfestigkeit Proben 2006 ..... *76*
Tabelle 9: Übersicht Spaltzugfestigkeit Proben 2004 ..... *78*
Tabelle 10: Spaltzugfestigkeit, 1. Versuchsreihe, Laborproben *80*
Tabelle 11: Spaltzugfestigkeit, 2. Versuchsreihe, Laborproben *81*
Tabelle 12: Absandverhalten Fläche 6 ..... *96*
Tabelle 13: Absandverhalten Fläche 7 ..... *97*
Tabelle 14: Absandverhalten Fläche 8 ..... *98*
Tabelle 15: Absandverhalten Fläche 9 ..... *99*
Tabelle 16: Absandverhalten Fläche 3 ..... *100*
Tabelle 17: Absandverhalten Fläche 4 ..... *101*
Tabelle 18: Absandverhalten Fläche 5 ..... *102*
Tabelle 19: Wasseraufnahmekoeffizient, 1. Versuchsreihe, Mauerbach *111*
Tabelle 20: Wasseraufnahmekoeffizient, 2. Versuchsreihe, Mauerbach *112*
Tabelle 21: „Mineralbestand des Zuschlagstoffes“ Diplomarbeit Kerner, C. (2005) *123*
Tabelle 22 „Kornform des Zuschlagstoffes“ Diplomarbeit, Kerner, C. (2005) *124*
Tabelle 23: Wetterdaten zur Zeit der Applikation der ersten und zweiten Versuchsreihe *126*
Tabelle 24: Wetterdaten zur Zeit der Grund- und Hauptuntersuchungen *126*

ANHANG

Auszählung Hauptkultur Thomakammer

$$\text{Zellenzahl/ml} = \frac{\text{Anzahl der gezählten Zellen}}{\text{Anzahl der ausgezählten Kleinquadrate}} \times 400 \times 10^4$$

1. Versuchsreihe

Verdünnung 1:10

Ausgezählte Kleinquadrate: 128

1. Auszählung		2. Auszählung	
1	161	1	165
2	161	2	125
3	157	3	169
4	155	4	147
5	155	5	154
6	157	6	140
7	162	7	127
8	160	8	133
Summe	**1268**	**Summe**	**1160**

3. Auszählung		4. Auszählung	
1	169	1	150
2	133	2	137
3	171	3	159
4	141	4	159
5	124	5	148
6	130	6	169
7	117	7	172
8	138	8	142
Summe	**1123**	**Summe**	**1236**

1. Auszählung =	3,96	$*10^8$	Zellen/ml
2. Auszählung =	3,63	$*10^8$	Zellen/ml
3. Auszählung =	3,51	$*10^8$	Zellen/ml
4. Auszählung =	3,86	$*10^8$	Zellen/ml

Auszählung Hauptkultur Thomakammer

$$\text{Zellenzahl/ml} = \frac{\text{Anzahl der gezählten Zellen}}{\text{Anzahl der ausgezählten Kleinquadrate}} \times 400 \times 10^4$$

2. Versuchsreihe

Verdünnung 1:1

Ausgezählte Kleinquadrate: 128

1. Auszählung		2. Auszählung	
1	183	1	204
2	168	2	193
3	255	3	191
4	221	4	195
5	229	5	183
6	214	6	198
7	188	7	193
8	176	8	191
Summe	**1634**	**Summe**	**1548**

3. Auszählung		4. Auszählung	
1	208	1	195
2	189	2	193
3	197	3	221
4	212	4	204
5	197	5	193
6	186	6	184
7	214	7	207
8	205	8	194
Summe	**1608**	**Summe**	**1591**

1. Auszählung =	5,11	$*10^7$	Zellen/ml
2. Auszählung =	4,84	$*10^7$	Zellen/ml
3. Auszählung =	5,03	$*10^7$	Zellen/ml
4. Auszählung =	4,97	$*10^7$	Zellen/ml

Ultraschalluntersuchung: 1. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Bezeichnung	1. Messung		2. Messung		3. Messung		**Mittelwert**	
2 Bar Druck	[µs]	[m/s]	[µs]	[m/s]	[µs]	[m/s]	**[m/s]**	**[m/s]**
Bacillus Cereus Laborlagerung								
V/1L	32,00	2188	33,00	2121	33,40	2096	**2135**	
V/2L	32,70	2141	32,00	2188	31,60	2215	**2181**	
V/3L	30,40	2303	29,80	2349	29,70	2357	**2336**	**2217**
Bacillus Cereus Kellerlagerung								
V/1K	31,70	2208	32,80	2134	30,70	2280	**2207**	
V/2K	33,30	2102	32,20	2174	34,30	2041	**2106**	
V/3K	35,10	1994	30,30	2310	32,10	2181	**2162**	**2158**
Bacillus Cereus + Kalkwasser Laborlagerung								
V/4L	30,10	2326	29,70	2357	29,60	2365	**2349**	
V/5L	33,80	2071	33,10	2115	30,30	2310	**2165**	
V/6L	29,60	2365	28,90	2422	28,30	2473	**2420**	**2312**
Bacillus Cereus + Kalkwasser Kellerlagerung								
VI/4K	35,20	1989	32,40	2160	30,50	2295	**2148**	
VI/5K	31,60	2215	31,10	2251	32,10	2181	**2216**	
VI/6K	33,20	2108	52,30	1338	31,90	2194	**1880**	**2081**
Bacillus Cereus + Nährlösung Laborlagerung								
VI/1L	36,40	1923	34,30	2041	35,90	1950	**1971**	
VI/2L	36,30	1928	36,10	1939	39,60	1768	**1878**	
VI/3L	35,20	1989	37,70	1857	35,90	1950	**1932**	**1927**
Bacillus Cereus + Nährlösung Kellerlagerung								
VI/1K	31,90	2194	51,70	1354	32,00	2188	**1912**	
VI/2K	34,50	2029	33,70	2077	34,90	2006	**2037**	
VI/3K	32,30	2167	31,70	2208	31,70	2208	**2195**	**2048**
Bacillus Cereus + Nährlösung + Kalkwasser Laborlagerung								
VI/4L	33,20	2108	33,40	2096	33,80	2071	**2092**	
VI/5L	33,70	2077	32,90	2128	33,80	2071	**2092**	
VI/6L	31,30	2236	33,10	2115	31,30	2236	**2196**	**2127**
Bacillus Cereus + Nährlösung + Kalkwasser Kellerlagerung								
VI/4K	31,80	2201	32,30	2167	31,20	2244	**2204**	
VI/5K	33,70	2077	30,80	2273	33,30	2102	**2151**	
VI/6K	54,40	1287	54,80	1277	38,40	1823	**1462**	**1939**

Ultraschalluntersuchung: 1. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Bezeichnung	1. Messung		2. Messung		3. Messung		**Mittelwert**	
2 Bar Druck	[µs]	[m/s]	[µs]	[m/s]	[µs]	[m/s]	**[m/s]**	**[m/s]**
Bacillus Cereus + ½ Nährlösung Laborlagerung								
VII/1L	31,20	2244	30,30	2310	33,30	2102	**2219**	
VII/2L	31,70	2208	31,70	2208	30,60	2288	**2235**	
VII/3L	35,20	1989	31,30	2236	30,20	2318	**2181**	**2211**
Bacillus Cereus + ½ Nährlösung Kellerlagerung								
VII/1K	32,70	2141	33,70	2077	34,60	2023	**2080**	
VII/2K	35,70	1961	35,50	1972	32,30	2167	**2033**	
VII/3K	31,40	2229	29,10	2405	32,00	2188	**2274**	**2129**
Bacillus Cereus + ½ Nährlösung + Kalkwasser Laborlagerung								
VII/4L	33,30	2102	35,80	1955	32,60	2147	**2068**	
VII/5L	37,00	1892	37,30	1877	38,70	1809	**1859**	
VII/6L	31,40	2229	30,40	2303	31,60	2215	**2249**	**2059**
Bacillus Cereus + ½ Nährlösung + Kalkwasser Kellerlagerung								
VII/4K	54,80	1277	57,20	1224	56,90	1230	**1244**	
VII/5K	42,20	1659	52,50	1333	43,10	1624	**1539**	
VII/6K	32,80	2134	32,50	2154	32,00	2188	**2158**	**1647**
Kalkwasser Laborlagerung								
VIII/1L	31,60	2215	30,10	2326	31,20	2244	**2261**	
VIII/2L	33,10	2115	32,90	2128	32,40	2160	**2134**	**2198**
Kalkwasser Kellerlagerung								
VIII/1K	32,50	2154	32,50	2154	33,50	2090	**2132**	
VIII/2K	34,30	2041	32,60	2147	34,80	2011	**2067**	**2099**
Unbehandelt Laborlagerung								
IX/1L	34,10	2053	34,20	2047	33,50	2090	**2063**	
IX/2L	34,40	2035	34,00	2059	33,10	2115	**2070**	
IX/3L	39,10	1790	37,30	1877	36,00	1944	**1870**	
IX/4L	35,20	1989	34,50	2029	33,80	2071	**2030**	**2008**
Unbehandelt Kellerlagerung								
IX/1K	33,30	2102	32,60	2147	33,60	2083	**2111**	
IX/2K	35,40	1977	34,80	2011	33,80	2071	**2020**	
IX/3K	35,00	2000	33,30	2102	34,30	2041	**2048**	
IX/4K	32,60	2147	33,10	2115	32,80	2134	**2132**	**2078**

Ultraschalluntersuchung: 2. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Bezeichnung	1. Messung		2. Messung		3. Messung		**Mittelwert**	
2 Bar Druck	[µs]	[m/s]	[µs]	[m/s]	[µs]	[m/s]	**[m/s]**	**[m/s]**
BC-0-0	2004 Laborlagerung							
04/1	36,50	1918	35,40	1977	35,80	1955	**1950**	
04/2	41,50	1687	39,60	1768	37,60	1862	**1772**	**1861**
BC-0-0	2006 Kellerlagerung							
06/1	32,70	2141	34,60	2023	32,40	2160	**2108**	
06/2	29,90	2341	30,50	2295	30,30	2310	**2315**	**2212**
BC-0-KW	2004 Laborlagerung							
04/1	41,10	1703	39,20	1786	40,60	1724	**1738**	
04/2	40,90	1711	40,60	1724	42,20	1659	**1698**	**1718**
BC-0-KW	2006 Kellerlagerung							
06/1	33,60	2083	34,20	2047	34,90	2006	**2045**	
06/2	32,10	2181	34,40	2035	33,90	2065	**2093**	**2069**
BC-NL-0	2004 Laborlagerung							
04/1	44,00	1591	43,20	1620	43,50	1609	**1607**	
04/2	39,30	1781	41,50	1687	40,80	1716	**1728**	**1667**
BC-NL-0	2006 Kellerlagerung							
06/1	34,10	2053	38,40	1823	33,70	2077	**1984**	
06/2	31,50	2222	30,30	2310	30,80	2273	**2268**	**2126**
BC-NL-KW	2004 Laborlagerung							
04/1	39,10	1790	38,40	1823	38,00	1842	**1818**	
04/2	39,60	1768	42,90	1632	40,10	1746	**1715**	**1767**
BC-NL-KW	2006 Kellerlagerung							
06/1	33,60	2083	33,40	2096	32,80	2134	**2104**	
06/2	32,70	2141	33,60	2083	32,70	2141	**2122**	**2113**

Ultraschalluntersuchung: 2. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Bezeichnung	1. Messung		2. Messung		3. Messung		**Mittelwert**	
2 Bar Druck	[µs]	[m/s]	[µs]	[m/s]	[µs]	[m/s]	**[m/s]**	**[m/s]**
BC-1/5NL-0	2004 Laborlagerung							
04/1	38,80	1804	37,70	1857	40,10	1746	**1802**	
04/2	40,00	1750	40,60	1724	40,80	1716	**1730**	**1766**
BC-1/5NL-0	2006 Kellerlagerung							
06/1	34,30	2041	33,30	2102	33,40	2096	**2080**	
06/2	30,90	2265	31,00	2258	30,40	2303	**2275**	**2177**
BC-1/5NL-KW	2004 Laborlagerung							
04/1	41,80	1675	40,70	1720	42,20	1659	**1684**	
04/2	44,40	1577	42,60	1643	41,00	1707	**1642**	**1663**
BC-1/5NL-KW	2006 Kellerlagerung							
06/1	33,60	2083	31,60	2215	33,00	2121	**2140**	
06/2	31,60	2215	31,00	2258	31,00	2258	**2244**	**2192**
0-0-KW	2004 Laborlagerung							
04/1	39,20	1786	40,90	1711	40,60	1724	**1740**	
04/2	41,40	1691	38,50	1818	39,70	1763	**1757**	**1749**
0-0-KW	2006 Kellerlagerung							
06/1	33,40	2096	33,40	2096	33,40	2096	**2096**	
06/2	31,80	2201	31,80	2201	32,00	2188	**2197**	**2146**
0-0-0	2004 Laborlagerung							
04/1	42,00	1667	41,90	1671	39,80	1759	**1699**	**1699**
0-0-0	2006 Kellerlagerung							
06/1	35,50	1972	35,80	1955	35,90	1950	**1959**	**1959**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

Herstellung 14.12.2006

Versuch 11.01.2007

28 Tage Festigkeit Kellerlagerung

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Kellerlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
I/1K	141	N	0,0513	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*PI)**
I/2K	6,9	bar	--		
I/3K	124	N	0,0451	N/mm²	
I/4K	110	N	0,0400	N/mm²	
I/5K	112	N	0,0407	N/mm²	
Mittelwert	**121,75**	**N**	**0,0443**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben

Herstellung 14.12.2006

Versuch 11.01.2007

28 Tage Festigkeit Laborlagerung

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
I/1L	123	N	0,0447	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
I/2L	161	N	0,0586	N/mm²	
I/3L	271	N	0,0986	N/mm²	
I/4L	274	N	0,0997	N/mm²	
I/5L	277	N	0,1008	N/mm²	
Mittelwert	**221,2**	**N**	**0,0805**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben

Herstellung 14.12.2006

Versuch 08.02.2007

56 Tage Festigkeit Kellerlagerung

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Kellerlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
II/1K	170	N	0,0618	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
II/2K	126	N	0,0458	N/mm²	
II/3K	176	N	0,0640	N/mm²	
II/4K	118	N	0,0429	N/mm²	
II/5K	117	N	0,0426	N/mm²	
Mittelwert	**141,4**	**N**	**0,0514**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben
Herstellung 14.12.2006
Versuch 08.02.2007
56 Tage Festigkeit Laborlagerung

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch: Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
II/1L	221	N	0,0804	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*PI)**
II/2L	271	N	0,0986	N/mm²	
II/3L	255	N	0,0928	N/mm²	
II/4L	250	N	0,0909	N/mm²	
II/5L	186	N	0,0677	N/mm²	
Mittelwert	**236,6**	**N**	**0,0861**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben

Herstellung 14.12.2006

Versuch 05.04.2007

112 Tage Festigkeit Kellerlagerung

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Kellerlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
III/1K	188	N	0,0684	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
III/2K	183	N	0,0666	N/mm²	
III/3K	75	N	0,0273	N/mm²	
III/4K	176	N	0,0640	N/mm²	
III/5K	195	N	0,0709	N/mm²	
Mittelwert	**163,4**	**N**	**0,0594**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben

Herstellung 14.12.2006

Versuch 05.04.2007

112 Tage Festigkeit Laborlagerung

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
III/1L	456	N	0,1659	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
III/2L	447	N	0,1626	N/mm²	
III/3L	399	N	0,1451	N/mm²	
III/4L	437	N	0,1590	N/mm²	
III/5L	442	N	0,1608	N/mm²	
Mittelwert	**436,2**	**N**	**0,1587**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben

Herstellung 14.12.2006

Versuch 05.04.2007

112 Tage Festigkeit Kellerlagerung KW

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Kellerlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
IV/1K KW	659	N	0,2397	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
IV/2K KW	776	N	0,2823	N/mm²	
IV/3K KW	416	N	0,1513	N/mm²	
IV/4K KW	663	N	0,2412	N/mm²	
IV/5K KW	616	N	0,2241	N/mm²	
Mittelwert	**626**	**N**	**0,2277**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben

Herstellung 14.12.2006

Versuch 05.04.2007

112 Tage Festigkeit Laborlagerung KW

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
IV/1L KW	554	N	0,2015	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
IV/2L KW	532	N	0,1935	N/mm²	
IV/3L KW	589	N	0,2143	N/mm²	
IV/4L KW	574	N	0,2088	N/mm²	
IV/5L KW	629	N	0,2288	N/mm²	
Mittelwert	**575,6**	**N**	**0,2094**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben

Herstellung 2004

Versuch 08.02.2007

Proben 2004

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
	10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
I/1 2004	289	N	0,1051	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
I/2 2004	334	N	0,1215	N/mm²	
I/3 2004	379	N	0,1379	N/mm²	
I/4 2004	353	N	0,1284	N/mm²	
I/5 2004	307	N	0,1117	N/mm²	
Mittelwert	**332,4**	**N**	**0,1209**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben

Herstellung 2004

Versuch 27.03.2007 KW

Proben 2004 KW

Spaltzugfestigkeit:

Proben	Breite =	25	mm
	Höhe =	70	mm
	QS-Fläche=	1750	mm²

Versuch	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
	10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung		Formel:
II/1 2004 KW	277	N	0,1008	N/mm²	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
II/2 2004 KW	587	N	0,2135	N/mm²	
II/3 2004 KW	454	N	0,1652	N/mm²	
II/4 2004 KW	388	N	0,1411	N/mm²	
II/5 2004 KW	516	N	0,1877	N/mm²	
Mittelwert	**444,4**	**N**	**0,1617**	**N/mm²**	

Spaltzugfestigkeit Laborproben

1. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: O-O-O

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
O-O-O-1L	466,00	N	0,1695	N/mm²
O-O-O-2L	422,00	N	0,1535	N/mm²
O-O-O-4L	712,00	N	0,2590	N/mm²
Mittelwert	**533,33**	**N**	**0,1940**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
O-O-O-1K	589,00	N	0,2143	N/mm²
O-O-O-2K	521,00	N	0,1895	N/mm²
O-O-O-3K	553,00	N	0,2012	N/mm²
O-O-O-4K	652,00	N	0,2372	N/mm²
Mittelwert	**578,75**	**N**	**0,2105**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

1. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: O-O-KW

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
O-O-KW-1L	617,00	N	0,2245	N/mm²
O-O-KW-2L	507,00	N	0,1844	N/mm²
Mittelwert	**562,00**	**N**	**0,2044**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
O-O-KW-1K	494,00	N	0,1797	N/mm²
O-O-KW-2K	608,00	N	0,2212	N/mm²
Mittelwert	**551,00**	**N**	**0,2004**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

1. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-O-O

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-O-O-1L	548,00	N	0,1994	N/mm²
BC-O-O-2L	439,00	N	0,1597	N/mm²
BC-O-O-3L	473,00	N	0,1721	N/mm²
Mittelwert	**486,67**	**N**	**0,1770**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-O-O-1K	339,00	N	0,1233	N/mm²
BC-O-O-2K	347,00	N	0,1262	N/mm²
BC-O-O-3K	304,00	N	0,1106	N/mm²
Mittelwert	**330,00**	**N**	**0,1200**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

1. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-O-KW

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-O-KW-1L	484,00	N	0,1761	N/mm²
BC-O-KW-2L	304,00	N	0,1106	N/mm²
BC-O-KW-3L	457,00	N	0,1662	N/mm²
Mittelwert	**415,00**	**N**	**0,1510**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-O-KW-1K	522,00	N	0,1899	N/mm²
BC-O-KW-2K	304,00	N	0,1106	N/mm²
BC-O-KW-3K	409,00	N	0,1488	N/mm²
Mittelwert	**411,67**	**N**	**0,1498**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

1. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-NL-O

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*PI)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-NL-O-1L	429,00	N	0,1561	N/mm²
BC-NL-O-2L	319,00	N	0,1160	N/mm²
BC-NL-O-3L	402,00	N	0,1462	N/mm²
Mittelwert	**383,33**	**N**	**0,1395**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-NL-O-1K	326,00	N	0,1186	N/mm²
BC-NL-O-2K	450,00	N	0,1637	N/mm²
BC-NL-O-3K	340,00	N	0,1237	N/mm²
Mittelwert	**372,00**	**N**	**0,1353**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

1. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-NL-KW

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*PI)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	

Versuch Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-NL-KW-1L	323,00	N	0,1175	N/mm²
BC-NL-KW-2L	456,00	N	0,1659	N/mm²
BC-NL-KW-3L	374,00	N	0,1361	N/mm²
Mittelwert	**384,33**	**N**	**0,1398**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-NL-KW-1K	494,00	N	0,1797	N/mm²
BC-NL-KW-2K	480,00	N	0,1746	N/mm²
BC-NL-KW-3K	375,00	N	0,1364	N/mm²
Mittelwert	**449,67**	**N**	**0,1636**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

1. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-0,5NL-O

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	

Versuch: Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-0,5NL-O-1L	343,00	N	0,1248	N/mm²
BC-0,5NL-O-2L	432,00	N	0,1572	N/mm²
BC-0,5NL-O-3L	459,00	N	0,1670	N/mm²
Mittelwert	**411,33**	**N**	**0,1496**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-0,5NL-O-1K	262,00	N	0,0953	N/mm²
BC-0,5NL-O-2K	330,00	N	0,1200	N/mm²
BC-0,5NL-O-3K	394,00	N	0,1433	N/mm²
Mittelwert	**328,67**	**N**	**0,1196**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

1. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-0,5NL-KW

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	

Versuch: Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min
10 N/s kraftgesteuert

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-0,5NL-KW-1L	394,00	N	0,1433	N/mm²
BC-0,5NL-KW-2L	329,00	N	0,1197	N/mm²
Mittelwert	**361,50**	**N**	**0,1315**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-0,5NL-KW-1K	359,00	N	0,1306	N/mm²
BC-0,5NL-KW-2K	289,00	N	0,1051	N/mm²
BC-0,5NL-KW-3K	365,00	N	0,1328	N/mm²
Mittelwert	**337,67**	**N**	**0,1228**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

2. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: O-O-O

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	
Versuch	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min 10 N/s kraftgesteuert			

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
O-O-O-04/1L	278,00	N	0,1011	N/mm²
O-O-O-04/2L	353,00	N	0,1284	N/mm²
O-O-O-04/3L	307,00	N	0,1117	N/mm²
Mittelwert	**312,67**	**N**	**0,1137**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
O-O-O-06/1K	585,00	N	0,2128	N/mm²
O-O-O-06/2K	589,00	N	0,2143	N/mm²
O-O-O-06/2K	521,00	N	0,1895	N/mm²
Mittelwert	**565,00**	**N**	**0,2055**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

2. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: O-O-KW

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	
Versuch	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min 10 N/s kraftgesteuert			

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
O-O-KW-04/1L	405,00	N	0,1473	N/mm²
O-O-KW-04/2L	443,00	N	0,1612	N/mm²
Mittelwert	**424,00**	**N**	**0,1542**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
O-O-KW-06/1K	438,00	N	0,1593	N/mm²
O-O-KW-06/2K	465,00	N	0,1692	N/mm²
Mittelwert	**451,50**	**N**	**0,1642**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

2. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-O-O

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*PI)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	
	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5			
Versuch	mm/min			
	10 N/s kraftgesteuert			

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-O-O-04/1L	583,00	N	0,2121	N/mm²
BC-O-O-04/2L	298,00	N	0,1084	N/mm²
Mittelwert	**440,50**	**N**	**0,1602**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-O-O-06/1K	471,00	N	0,1713	N/mm²
BC-O-O-06/2K	606,00	N	0,2205	N/mm²
Mittelwert	**538,50**	**N**	**0,1959**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

2. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-O-KW

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	
Versuch	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min 10 N/s kraftgesteuert			

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-O-KW-04/1L	450,00	N	0,1637	N/mm²
BC-O-KW-04/2L	425,00	N	0,1546	N/mm²
Mittelwert	**437,50**	**N**	**0,1592**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-O-KW-06/1K	534,00	N	0,1943	N/mm²
BC-O-KW-06/2K	599,00	N	0,2179	N/mm²
Mittelwert	**566,50**	**N**	**0,2061**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

2. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-NL-O

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	
Versuch	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min 10 N/s kraftgesteuert			

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-NL-0-04/1L	260,00	N	0,0946	N/mm²
BC-NL-0-04/2L	426,00	N	0,1550	N/mm²
Mittelwert	**343,00**	**N**	**0,1248**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-NL-0-06/1K	299,00	N	0,1088	N/mm²
BC-NL-0-06/2K	533,00	N	0,1939	N/mm²
Mittelwert	**416,00**	**N**	**0,1513**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

2. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-NL-KW

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	
Versuch	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min 10 N/s kraftgesteuert			

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-NL-KW-04/1L	387,00	N	0,1408	N/mm²
BC-NL-KW-04/2L	382,00	N	0,1390	N/mm²
Mittelwert	**384,50**	**N**	**0,1399**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-NL-KW-06/1K	407,00	N	0,1481	N/mm²
BC-NL-KW-06/2K	582,00	N	0,2117	N/mm²
Mittelwert	**494,50**	**N**	**0,1799**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

2. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-0,5NL-O

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	
Versuch	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min 10 N/s kraftgesteuert			

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-0,5NL-O-04/1L	411,00	N	0,1495	N/mm²
BC-0,5NL-O-04/2L	423,00	N	0,1539	N/mm²
Mittelwert	**417,00**	**N**	**0,1517**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-0,5NL-O-06/1K	512,00	N	0,1863	N/mm²
BC-0,5NL-O-06/2K	687,00	N	0,2499	N/mm²
Mittelwert	**599,50**	**N**	**0,2181**	**N/mm²**

Spaltzugfestigkeit Laborproben

2. Festigungsserie

Spaltzugfestigkeit: BC-0,5NL-KW

Proben	Breite =	25	mm	Formel:
	Höhe =	70	mm	**2*Fmax/(b*h*Pl)**
	QS-Fläche=	1750	mm²	
Versuch	Vorspannung 10 N weggesteuert 0,5 mm/min 10 N/s kraftgesteuert			

Laborlagerung	Max. Kraft		Spannung	
BC-0,5NL-KW-04/1L	414,00	N	0,1506	N/mm²
BC-0,5NL-KW-04/2L	245,00	N	0,0891	N/mm²
Mittelwert	**329,50**	**N**	**0,1199**	**N/mm²**
Kellerlagerung				
BC-0,5NL-KW-06/1K	598,00	N	0,2175	N/mm²
BC-0,5NL-KW-06/2K	506,00	N	0,1841	N/mm²
Mittelwert	**552,00**	**N**	**0,2008**	**N/mm²**

Wassereindringversuch: 1. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Bacillus Cereus Laborlagerung

	V/1L		V/2L		V/3L		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,30	4,65	0,40	6,20	0,55	8,52	**6,46**
60 Sek.	0,58	6,36	0,75	8,22	0,95	10,41	**8,33**
90 Sek.	0,82	7,34	1,05	9,39	1,28	11,45	**9,39**
120 Sek.	1,05	8,14	1,32	10,23	1,60	12,40	**10,25**
150 Sek.	1,25	8,66	1,60	11,09	1,88	13,03	**10,93**
180 Sek.	1,45	9,17	1,85	11,70	2,15	13,60	**11,49**
210 Sek.	1,60	9,37	2,07	12,12	2,40	14,06	**11,85**
240 Sek.	1,85	10,14	2,32	12,71	2,70	14,79	**12,55**
270 Sek.	2,05	10,59	2,55	13,17	2,95	15,24	**13,00**
300 Sek.	2,25	11,03	2,80	13,72	3,12	15,29	**13,35**

Bacillus Cereus Kellerlagerung

	V/1K		V/2K		V/3K		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,75	11,62	0,20	3,10	1,00	15,50	**10,07**
60 Sek.	1,32	14,46	0,35	3,84	1,65	18,08	**12,13**
90 Sek.	1,80	16,11	0,55	4,92	2,12	18,97	**13,33**
120 Sek.	2,20	17,05	0,70	5,42	2,60	20,15	**14,21**
150 Sek.	2,60	18,02	0,85	5,89	3,00	20,79	**14,90**
180 Sek.	2,95	18,66	1,00	6,33	3,45	21,83	**15,61**
210 Sek.	3,30	19,33	1,15	6,74	3,80	22,26	**16,11**
240 Sek.	3,65	20,00	1,30	7,12	4,18	22,90	**16,67**
270 Sek.	4,00	20,66	1,45	7,49	4,55	23,50	**17,22**
300 Sek.	4,30	21,07	1,55	7,60	4,90	24,01	**17,56**

Bacillus Cereus + Kalkwasser Laborlagerung

	V/4L		V/5L		V/6L		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,65	10,07	0,10	1,55	0,40	6,20	**5,94**
60 Sek.	1,05	11,51	0,20	2,19	0,75	8,22	**7,31**
90 Sek.	1,45	12,97	0,28	2,51	1,00	8,95	**8,14**
120 Sek.	1,80	13,95	0,38	2,94	1,22	9,45	**8,78**
150 Sek.	2,10	14,55	0,45	3,12	1,48	10,26	**9,31**
180 Sek.	2,35	14,87	0,55	3,48	1,70	10,76	**9,70**
210 Sek.	2,70	15,82	0,65	3,81	1,90	11,13	**10,25**
240 Sek.	3,00	16,44	0,75	4,11	2,05	11,23	**10,59**
270 Sek.	3,25	16,79	0,85	4,39	2,30	11,88	**11,02**
300 Sek.	3,50	17,15	0,95	4,66	2,50	12,25	**11,35**

Wassereindringversuch: 1. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Bacillus Cereus + Kalkwasser Kellerlagerung

	V/4K		V/5K		V/6K		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,80	12,40	0,95	14,72	0,28	4,34	**10,49**
60 Sek.	1,35	14,79	1,60	17,53	0,55	6,03	**12,78**
90 Sek.	1,80	16,11	2,10	18,79	0,78	6,98	**13,96**
120 Sek.	2,25	17,43	2,55	19,76	1,00	7,75	**14,98**
150 Sek.	2,65	18,37	3,05	21,14	1,15	7,97	**15,82**
180 Sek.	3,00	18,98	3,42	21,64	1,35	8,54	**16,39**
210 Sek.	3,35	19,62	3,80	22,26	1,52	8,90	**16,93**
240 Sek.	3,70	20,27	4,18	22,90	1,70	9,31	**17,50**
270 Sek.	4,00	20,66	4,55	23,50	1,90	9,82	**17,99**
300 Sek.	4,30	21,07	4,90	24,01	2,05	10,05	**18,38**

Bacillus Cereus + Nährlösung Laborlagerung

	VI/1L		VI/2L		VI/3L		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,20	3,10	0,12	1,86	0,12	1,86	**2,27**
60 Sek.	0,32	3,51	0,25	2,74	0,22	2,41	**2,89**
90 Sek.	0,42	3,76	0,35	3,13	0,32	2,86	**3,25**
120 Sek.	0,52	4,03	0,45	3,49	0,42	3,25	**3,59**
150 Sek.	0,62	4,30	0,55	3,81	0,52	3,60	**3,90**
180 Sek.	0,70	4,43	0,65	4,11	0,62	3,92	**4,15**
210 Sek.	0,80	4,69	0,75	4,39	0,72	4,22	**4,43**
240 Sek.	0,88	4,82	0,82	4,49	0,82	4,49	**4,60**
270 Sek.	0,95	4,91	0,90	4,65	0,90	4,65	**4,74**
300 Sek.	1,02	5,00	0,95	4,66	0,95	4,66	**4,77**

Bacillus Cereus + Nährlösung Kellerlagerung

	VI/1K		VI/2K		VI/3K		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,80	12,40	0,28	4,34	0,85	13,17	**9,97**
60 Sek.	1,25	13,70	0,45	4,93	1,40	15,34	**11,32**
90 Sek.	1,68	15,03	0,62	5,55	1,80	16,11	**12,23**
120 Sek.	2,05	15,88	0,80	6,20	2,18	16,89	**12,99**
150 Sek.	2,30	15,94	0,92	6,38	2,52	17,47	**13,26**
180 Sek.	2,62	16,58	1,05	6,64	2,90	18,35	**13,86**
210 Sek.	2,98	17,46	1,18	6,91	3,20	18,74	**14,37**
240 Sek.	3,30	18,08	1,32	7,23	3,55	19,45	**14,92**
270 Sek.	3,60	18,60	1,45	7,49	3,90	20,15	**15,41**
300 Sek.	3,90	19,11	1,60	7,84	4,15	20,34	**15,76**

Wassereindringversuch: 1. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Bacillus Cereus + Nährlösung + Kalkwasser Laborlagerung

	VI/4L		VI/5L		VI/6L		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,05	0,77	0,05	0,77	0,12	1,86	**1,14**
60 Sek.	0,12	1,31	0,07	0,77	0,20	2,19	**1,42**
90 Sek.	0,20	1,79	0,10	0,89	0,30	2,68	**1,79**
120 Sek.	0,25	1,94	0,12	0,93	0,40	3,10	**1,99**
150 Sek.	0,30	2,08	0,15	1,04	0,50	3,47	**2,19**
180 Sek.	0,32	2,02	0,18	1,14	0,60	3,80	**2,32**
210 Sek.	0,35	2,05	0,20	1,17	0,68	3,98	**2,40**
240 Sek.	0,38	2,08	0,22	1,21	0,75	4,11	**2,47**
270 Sek.	0,42	2,17	0,24	1,24	0,85	4,39	**2,60**
300 Sek.	0,45	2,21	0,26	1,27	0,92	4,51	**2,66**

Bacillus Cereus + Nährlösung + Kalkwasser Kellerlagerung

	VI/4K		VI/5K		VI/6K		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,70	10,85	0,52	8,06	0,22	3,41	**7,44**
60 Sek.	1,25	13,70	0,90	9,86	0,38	4,16	**9,24**
90 Sek.	1,75	15,66	1,20	10,74	0,50	4,47	**10,29**
120 Sek.	2,20	17,05	1,50	11,62	0,62	4,80	**11,16**
150 Sek.	2,60	18,02	1,80	12,48	0,75	5,20	**11,90**
180 Sek.	3,05	19,30	2,10	13,29	0,85	5,38	**12,65**
210 Sek.	3,40	19,92	2,38	13,94	0,98	5,74	**13,20**
240 Sek.	3,80	20,82	2,65	14,52	1,08	5,92	**13,75**
270 Sek.	4,15	21,44	2,90	14,98	0,18	0,93	**12,45**
300 Sek.	4,50	22,05	3,20	15,68	1,28	6,27	**14,67**

Bacillus Cereus + ½ Nährlösung Laborlagerung

	VII/1L		VII/2L		VII/3L		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,25	3,87	0,65	10,07	0,15	2,32	**5,42**
60 Sek.	0,45	4,93	1,15	12,60	0,25	2,74	**6,76**
90 Sek.	0,60	5,37	1,60	14,32	0,30	2,68	**7,46**
120 Sek.	0,75	5,81	1,95	15,11	0,35	2,71	**7,88**
150 Sek.	0,90	6,24	2,35	16,29	0,42	2,91	**8,48**
180 Sek.	1,00	6,33	2,65	16,77	0,50	3,16	**8,75**
210 Sek.	1,10	6,44	3,00	17,57	0,55	3,22	**9,08**
240 Sek.	1,25	6,85	3,30	18,08	0,60	3,29	**9,41**
270 Sek.	1,35	6,97	3,65	18,86	0,65	3,36	**9,73**
300 Sek.	1,50	7,35	3,95	19,36	0,72	3,53	**10,08**

Wassereindringversuch: 1. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Bacillus Cereus + ½ Nährlösung Kellerlagerung

	VII/1K		VII/2K		VII/3K		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,25	3,87	0,60	9,30	0,50	7,75	**6,97**
60 Sek.	0,40	4,38	1,05	11,51	0,90	9,86	**8,58**
90 Sek.	0,55	4,92	1,38	12,35	1,20	10,74	**9,34**
120 Sek.	0,70	5,42	1,68	13,02	1,50	11,62	**10,02**
150 Sek.	0,82	5,68	1,95	13,51	1,80	12,48	**10,56**
180 Sek.	0,92	5,82	2,18	13,79	2,05	12,97	**10,86**
210 Sek.	1,05	6,15	2,40	14,06	2,28	13,36	**11,19**
240 Sek.	1,18	6,47	2,65	14,52	2,45	13,42	**11,47**
270 Sek.	1,25	6,46	2,85	14,72	2,70	13,95	**11,71**
300 Sek.	1,40	6,86	3,05	14,95	2,92	14,31	**12,04**

Bacillus Cereus + ½ Nährlösung + Kalkwasser Laborlagerung

	VII/4L		VII/5L		VII/6L		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,10	1,55	0,07	1,08	0,10	1,55	**1,39**
60 Sek.	0,18	1,97	0,15	1,64	0,18	1,97	**1,86**
90 Sek.	0,23	2,06	0,22	1,97	0,25	2,24	**2,09**
120 Sek.	0,30	2,32	0,30	2,32	0,30	2,32	**2,32**
150 Sek.	0,35	2,43	0,35	2,43	0,35	2,43	**2,43**
180 Sek.	0,40	2,53	0,43	2,72	0,40	2,53	**2,59**
210 Sek.	0,48	2,81	0,50	2,93	0,45	2,64	**2,79**
240 Sek.	0,52	2,85	0,55	3,01	0,48	2,63	**2,83**
270 Sek.	0,60	3,10	0,62	3,20	0,50	2,58	**2,96**
300 Sek.	0,68	3,33	0,68	3,33	0,52	2,55	**3,07**

Bacillus Cereus + ½ Nährlösung + Kalkwasser Kellerlagerung

	VII/4K		VII/5K		VII/6K		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,22	3,41	0,45	6,97	1,10	17,05	**9,14**
60 Sek.	0,40	4,38	0,78	8,55	1,92	21,04	**11,32**
90 Sek.	0,60	5,37	1,05	9,39	2,55	22,82	**12,53**
120 Sek.	0,75	5,81	1,30	10,07	3,25	25,18	**13,69**
150 Sek.	0,90	6,24	1,52	10,53	3,85	26,68	**14,49**
180 Sek.	1,00	6,33	1,78	11,26	4,35	27,52	**15,04**
210 Sek.	1,12	6,56	2,00	11,71	4,90	28,70	**15,66**
240 Sek.	1,25	6,85	2,18	11,94	5,40	29,59	**16,13**
270 Sek.	1,40	7,23	2,40	12,40	5,90	30,48	**16,70**
300 Sek.	1,52	7,45	2,62	12,84	6,45	31,61	**17,30**

Wassereindringversuch: 1. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Kalkwasser Laborlagerung

		VIII/1L		VIII/2L			**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	0,80	12,40	0,95	14,72		**13,56**
60	Sek.	1,45	15,89	1,70	18,63		**17,26**
90	Sek.	2,00	17,89	2,25	20,13		**19,01**
120	Sek.	2,55	19,76	2,85	22,08		**20,92**
150	Sek.	2,95	20,45	3,30	22,87		**21,66**
180	Sek.	3,30	20,88	3,85	24,36		**22,62**
210	Sek.	3,75	21,97	4,25	24,89		**23,43**
240	Sek.	4,10	22,46	4,75	26,03		**24,25**
270	Sek.	4,50	23,25	5,15	26,60		**24,92**
300	Sek.	4,85	23,77	5,65	27,69		**25,73**

Kalkwasser Kellerlagerung

		VIII/1K		VIII/2K			**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	1,00	15,50	1,05	16,27		**15,88**
60	Sek.	1,80	19,72	1,95	21,37		**20,55**
90	Sek.	2,40	21,47	2,65	23,71		**22,59**
120	Sek.	3,05	23,63	3,30	25,57		**24,60**
150	Sek.	3,70	25,64	3,95	27,38		**26,51**
180	Sek.	4,20	26,57	4,55	28,79		**27,68**
210	Sek.	4,80	28,12	5,10	29,87		**28,99**
240	Sek.	5,20	28,49	5,65	30,96		**29,72**
270	Sek.	5,75	29,70	6,15	31,77		**30,74**
300	Sek.	6,20	30,38	6,70	32,83		**31,61**

Unbehandelt Laborlagerung

		IX/1L		IX/2L		IX/3L		IX/4L		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	1,05	16,27	1,00	15,50	1,20	18,60	0,90	13,95	**16,08**
60	Sek.	1,85	20,27	1,65	18,08	2,10	23,01	1,50	16,44	**19,45**
90	Sek.	2,45	21,92	2,15	19,24	2,90	25,95	2,00	17,89	**21,25**
120	Sek.	3,05	23,63	2,70	20,92	3,55	27,51	2,45	18,98	**22,76**
150	Sek.	3,60	24,95	3,15	21,83	4,20	29,11	2,90	20,10	**24,00**
180	Sek.	4,05	25,62	3,60	22,78	4,90	31,00	3,25	20,56	**24,99**
210	Sek.	4,55	26,65	4,05	23,72	5,50	32,22	3,60	21,09	**25,92**
240	Sek.	5,00	27,40	4,45	24,38	6,05	33,15	3,95	21,64	**26,64**
270	Sek.	5,50	28,41	4,85	25,05	6,60	34,09	4,25	21,95	**27,38**
300	Sek.	5,95	29,16	5,25	25,73	7,15	35,04	4,55	22,30	**28,06**

Wassereindringversuch: 1. Festigungsreihe Laborprüfkörper

Unbehandelt Kellerlagerung

	IX/1K		IX/2K		IX/3K		IX/4K		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	1,10	17,05	0,55	8,52	0,70	10,85	1,20	18,60	**13,75**
60 Sek.	1,85	20,27	1,00	10,96	1,20	13,15	2,05	22,46	**16,71**
90 Sek.	2,40	21,47	1,30	11,63	1,65	14,76	2,65	23,71	**17,89**
120 Sek.	3,00	23,25	1,65	12,79	2,05	15,88	3,25	25,18	**19,27**
150 Sek.	3,50	24,26	1,95	13,51	2,40	16,63	3,85	26,68	**20,27**
180 Sek.	4,00	25,31	2,25	14,24	2,80	17,71	4,40	27,84	**21,27**
210 Sek.	4,45	26,07	2,55	14,94	3,15	18,45	4,95	28,99	**22,11**
240 Sek.	4,90	26,85	2,85	15,62	3,50	19,18	5,50	30,14	**22,94**
270 Sek.	5,35	27,64	3,10	16,01	3,80	19,63	6,00	30,99	**23,57**
300 Sek.	5,75	28,18	3,35	16,42	4,15	20,34	6,50	31,85	**24,20**

Wassereindringversuch: 2. Festigungsreihe Laborprüfkörper

BC-0-0				2004 Laborlagerung		
		04/1		04/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	1,00	15,50	1,00	15,50	**15,50**
60	Sek.	1,55	16,99	1,40	15,34	**16,16**
90	Sek.	1,95	17,45	1,65	14,76	**16,11**
120	Sek.	2,25	17,43	1,82	14,10	**15,77**
150	Sek.	2,55	17,67	1,95	13,51	**15,59**
180	Sek.	2,80	17,71	2,05	12,97	**15,34**
210	Sek.	3,05	17,87	2,18	12,77	**15,32**
240	Sek.	3,28	17,97	2,30	12,60	**15,29**
270	Sek.	3,52	18,18	2,40	12,40	**15,29**
300	Sek.	3,72	18,23	2,50	12,25	**15,24**
BC-0-0				2006 Kellerlagerung		
		06/1		06/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	0,65	10,07	0,20	3,10	**6,59**
60	Sek.	1,15	12,60	0,35	3,84	**8,22**
90	Sek.	1,62	14,49	0,50	4,47	**9,48**
120	Sek.	2,00	15,50	0,62	4,80	**10,15**
150	Sek.	2,40	16,63	0,72	4,99	**10,81**
180	Sek.	2,80	17,71	0,85	5,38	**11,55**
210	Sek.	3,10	18,16	0,95	5,56	**11,86**
240	Sek.	3,45	18,90	1,02	5,59	**12,25**
270	Sek.	3,82	19,73	1,12	5,79	**12,76**
300	Sek.	4,10	20,09	1,22	5,98	**13,04**
BC-0-KW				2004 Laborlagerung		
		04/1		04/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	0,90	13,95	0,80	12,40	**13,17**
60	Sek.	1,35	14,79	1,15	12,60	**13,70**
90	Sek.	1,72	15,39	1,50	13,42	**14,41**
120	Sek.	2,00	15,50	1,80	13,95	**14,72**
150	Sek.	2,32	16,08	2,00	13,86	**14,97**
180	Sek.	2,62	16,58	2,30	14,55	**15,56**
210	Sek.	2,88	16,87	2,52	14,76	**15,82**
240	Sek.	3,05	16,71	2,75	15,07	**15,89**
270	Sek.	3,30	17,05	2,95	15,24	**16,14**
300	Sek.	3,52	17,25	3,10	15,19	**16,22**

Wassereindringversuch: 2. Festigungsreihe Laborprüfkörper

BC-0-KW			2006 Kellerlagerung		
	06/1		06/2		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,15	2,32	0,22	3,41	**2,87**
60 Sek.	0,38	4,16	0,40	4,38	**4,27**
90 Sek.	0,60	5,37	0,70	6,26	**5,82**
120 Sek.	0,85	6,59	0,95	7,36	**6,97**
150 Sek.	1,02	7,07	1,10	7,62	**7,35**
180 Sek.	1,15	7,28	1,28	8,10	**7,69**
210 Sek.	1,35	7,91	1,48	8,67	**8,29**
240 Sek.	1,52	8,33	1,65	9,04	**8,68**
270 Sek.	1,70	8,78	1,82	9,40	**9,09**
300 Sek.	1,85	9,07	2,00	9,80	**9,43**
BC-NL-0			2004 Laborlagerung		
	04/1		04/2		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,35	5,42	0,82	12,71	**9,07**
60 Sek.	0,60	6,57	1,20	13,15	**9,86**
90 Sek.	0,80	7,16	1,48	13,24	**10,20**
120 Sek.	0,95	7,36	1,70	13,17	**10,27**
150 Sek.	1,05	7,28	1,90	13,17	**10,22**
180 Sek.	1,20	7,59	2,02	12,78	**10,19**
210 Sek.	1,32	7,73	2,20	12,89	**10,31**
240 Sek.	1,42	7,78	2,35	12,88	**10,33**
270 Sek.	1,52	7,85	2,50	12,91	**10,38**
300 Sek.	1,60	7,84	2,62	12,84	**10,34**
BC-NL-0			2006 Kellerlagerung		
	06/1		06/2		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	1,25	19,37	0,70	10,85	**15,11**
60 Sek.	2,25	24,66	1,20	13,15	**18,90**
90 Sek.	3,10	27,74	1,65	14,76	**21,25**
120 Sek.	3,90	30,22	2,05	15,88	**23,05**
150 Sek.	4,60	31,88	2,35	16,29	**24,08**
180 Sek.	5,25	33,22	2,70	17,08	**25,15**
210 Sek.	5,95	34,85	3,05	17,87	**26,36**
240 Sek.	6,55	35,89	3,32	18,19	**27,04**
270 Sek.	7,25	37,45	3,60	18,60	**28,02**
300 Sek.	7,95	38,96	3,90	19,11	**29,04**

Wassereindringversuch: 2. Festigungsreihe Laborprüfkörper

BC-NL-KW				2004 Laborlagerung		
		04/1		04/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	0,40	6,20	0,70	10,85	**8,52**
60	Sek.	0,60	6,57	1,12	12,27	**9,42**
90	Sek.	0,75	6,71	1,45	12,97	**9,84**
120	Sek.	0,90	6,97	1,75	13,56	**10,27**
150	Sek.	1,00	6,93	2,00	13,86	**10,40**
180	Sek.	1,12	7,09	2,30	14,55	**10,82**
210	Sek.	1,25	7,32	2,50	14,64	**10,98**
240	Sek.	1,35	7,40	2,75	15,07	**11,23**
270	Sek.	1,50	7,75	2,95	15,24	**11,49**
300	Sek.	1,60	7,84	3,15	15,44	**11,64**
BC-NL-KW				2006 Kellerlagerung		
		06/1		06/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	0,60	9,30	0,85	13,17	**11,24**
60	Sek.	1,20	13,15	1,50	16,44	**14,79**
90	Sek.	1,70	15,21	2,00	17,89	**16,55**
120	Sek.	2,15	16,66	2,45	18,98	**17,82**
150	Sek.	2,55	17,67	2,90	20,10	**18,89**
180	Sek.	2,95	18,66	3,30	20,88	**19,77**
210	Sek.	3,30	19,33	3,70	21,67	**20,50**
240	Sek.	3,65	20,00	4,05	22,19	**21,09**
270	Sek.	4,00	20,66	4,45	22,99	**21,83**
300	Sek.	4,25	20,83	4,85	23,77	**22,30**
BC-1/2NL-0				2004 Laborlagerung		
		04/1		04/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	0,85	13,17	0,55	8,52	**10,85**
60	Sek.	1,25	13,70	0,85	9,31	**11,51**
90	Sek.	1,55	13,87	1,05	9,39	**11,63**
120	Sek.	1,82	14,10	1,25	9,69	**11,89**
150	Sek.	2,02	14,00	1,45	10,05	**12,02**
180	Sek.	2,30	14,55	1,60	10,12	**12,34**
210	Sek.	2,50	14,64	1,75	10,25	**12,45**
240	Sek.	2,65	14,52	1,90	10,41	**12,47**
270	Sek.	2,82	14,57	2,05	10,59	**12,58**
300	Sek.	2,98	14,60	2,18	10,68	**12,64**

Wassereindringversuch: 2. Festigungsreihe Laborprüfkörper

BC-1/2NL-0				2006 Kellerlagerung		
		06/1		06/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	1,00	15,50	0,80	12,40	**13,95**
60	Sek.	1,70	18,63	1,55	16,99	**17,81**
90	Sek.	2,45	21,92	2,20	19,68	**20,80**
120	Sek.	3,05	23,63	2,80	21,70	**22,66**
150	Sek.	3,55	24,60	3,32	23,01	**23,81**
180	Sek.	4,05	25,62	3,85	24,36	**24,99**
210	Sek.	4,55	26,65	4,30	25,19	**25,92**
240	Sek.	5,05	27,67	4,80	26,30	**26,98**
270	Sek.	5,55	28,67	5,25	27,12	**27,90**
300	Sek.	6,00	29,40	5,70	27,93	**28,67**
BC-1/2NL-KW				2004 Laborlagerung		
		04/1		04/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	0,45	6,97	0,50	7,75	**7,36**
60	Sek.	0,70	7,67	0,75	8,22	**7,94**
90	Sek.	0,90	8,05	0,95	8,50	**8,28**
120	Sek.	1,02	7,90	1,15	8,91	**8,41**
150	Sek.	1,18	8,18	1,30	9,01	**8,59**
180	Sek.	1,30	8,22	1,50	9,49	**8,86**
210	Sek.	1,45	8,49	1,65	9,66	**9,08**
240	Sek.	1,55	8,49	1,78	9,75	**9,12**
270	Sek.	1,65	8,52	1,90	9,82	**9,17**
300	Sek.	1,72	8,43	2,02	9,90	**9,16**
BC-1/2NL-KW				2006 Kellerlagerung		
		06/1		06/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	0,50	7,75	0,40	6,20	**6,97**
60	Sek.	1,10	12,05	0,85	9,31	**10,68**
90	Sek.	1,65	14,76	1,22	10,92	**12,84**
120	Sek.	2,15	16,66	1,55	12,01	**14,34**
150	Sek.	2,60	18,02	1,85	12,82	**15,42**
180	Sek.	3,05	19,30	2,12	13,41	**16,35**
210	Sek.	3,50	20,50	2,40	14,06	**17,28**
240	Sek.	3,90	21,37	2,65	14,52	**17,94**
270	Sek.	4,30	22,21	2,90	14,98	**18,60**
300	Sek.	4,70	23,03	3,05	14,95	**18,99**

Wassereindringversuch: 2. Festigungsreihe Laborprüfkörper

0-0-KW				2004 Laborlagerung		
		04/1		04/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	1,40	21,70	1,20	18,60	**20,15**
60	Sek.	2,20	24,11	2,00	21,92	**23,01**
90	Sek.	2,95	26,39	2,80	25,05	**25,72**
120	Sek.	3,55	27,51	3,40	26,35	**26,93**
150	Sek.	4,05	28,07	4,00	27,72	**27,90**
180	Sek.	4,60	29,10	4,65	29,42	**29,26**
210	Sek.	5,05	29,58	5,15	30,17	**29,87**
240	Sek.	5,60	30,68	5,75	31,51	**31,09**
270	Sek.	6,00	30,99	6,15	31,77	**31,38**
300	Sek.	6,45	31,61	6,70	32,83	**32,22**
0-0-KW				2006 Kellerlagerung		
		06/1		06/2		**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	0,95	14,72	0,95	14,72	**14,72**
60	Sek.	1,65	18,08	1,60	17,53	**17,81**
90	Sek.	2,25	20,13	2,20	19,68	**19,91**
120	Sek.	2,90	22,47	2,75	21,31	**21,89**
150	Sek.	3,40	23,56	3,25	22,52	**23,04**
180	Sek.	4,00	25,31	3,80	24,04	**24,67**
210	Sek.	4,50	26,36	4,25	24,89	**25,63**
240	Sek.	5,00	27,40	4,75	26,03	**26,71**
270	Sek.	5,50	28,41	5,15	26,60	**27,51**
300	Sek.	6,00	29,40	5,65	27,69	**28,55**
0-0-0				2004 Laborlagerung		
		04/1				**Mittelwert**
		[ml]	[kg/(m²*√h)]			**[kg/(m²*√h)]**
30	Sek.	1,50	23,25			**23,25**
60	Sek.	2,30	25,20			**25,20**
90	Sek.	3,10	27,74			**27,74**
120	Sek.	3,65	28,28			**28,28**
150	Sek.	4,15	28,76			**28,76**
180	Sek.	4,70	29,74			**29,74**
210	Sek.	5,10	29,87			**29,87**
240	Sek.	5,60	30,68			**30,68**
270	Sek.	6,00	30,99			**30,99**
300	Sek.	6,40	31,36			**31,36**

Wassereindringversuch: 2. Festigungsreihe Laborprüfkörper

0-0-0 2006 Kellerlagerung

	06/1		**Mittelwert**
	[ml]	[kg/(m²*√h)]	**[kg/(m²*√h)]**
30 Sek.	0,80	12,40	**12,40**
60 Sek.	1,40	15,34	**15,34**
90 Sek.	1,95	17,45	**17,45**
120 Sek.	2,40	18,60	**18,60**
150 Sek.	2,90	20,10	**20,10**
180 Sek.	3,30	20,88	**20,88**
210 Sek.	3,80	22,26	**22,26**
240 Sek.	4,15	22,74	**22,74**
270 Sek.	4,55	23,50	**23,50**
300 Sek.	4,95	24,26	**24,26**

Wassereindringversuch: 1.Festigungsserie Mauerbach

			FL 6: BC-0-KW			FL 7: BC-NL-KW		
		[√h]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[kg/(m²)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[kg/(m²)]
30	Sek.	0,09	1,30	20,15	1,84	1,30	20,15	1,84
60	Sek.	0,13	2,30	25,20	3,25	2,50	27,40	3,54
90	Sek.	0,16	3,30	29,53	4,67	3,50	31,32	4,95
120	Sek.	0,18	4,20	32,54	5,94	4,50	34,87	6,37
150	Sek.	0,20	5,10	35,35	7,22	5,50	38,12	7,78

			FL 8: BC-1/2NL-KW			FL 9: 0-0-KW		
		[√h]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[kg/(m²)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[kg/(m²)]
30	Sek.	0,09	1,30	20,15	1,84	1,30	20,15	1,84
60	Sek.	0,13	2,50	27,40	3,54	2,30	25,20	3,25
90	Sek.	0,16	3,80	34,00	5,38	3,80	34,00	5,38
120	Sek.	0,18	5,00	38,74	7,07	5,00	38,74	7,07
150	Sek.	0,20	6,20	42,97	8,77	6,20	42,97	8,77

Wassereindringversuch: 2.Festigungsserie Mauerbach

			FL 3: BC-0-KW			FL 4: BC-NL-KW		
		[√h]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[kg/(m²)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[kg/(m²)]
30	Sek.	0,09	2,70	41,84	3,82	1,25	19,37	1,77
60	Sek.	0,13	6,40	70,13	9,05	2,35	25,75	3,32
90	Sek.	0,16	9,00	80,53	12,73	3,35	29,97	4,74
120	Sek.	0,18	11,50	89,11	16,27	4,20	32,54	5,94
150	Sek.	0,20	14,20	98,42	20,09	5,10	35,35	7,22

			FL 5: BC-1/2NL-KW			FL 9: 0-0-KW		
		[√h]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[kg/(m²)]	[ml]	[kg/(m²*√h)]	[kg/(m²)]
30	Sek.	0,09	1,10	17,05	1,56	1,30	20,15	1,84
60	Sek.	0,13	2,00	21,92	2,83	2,30	25,20	3,25
90	Sek.	0,16	2,70	24,16	3,82	3,80	34,00	5,38
120	Sek.	0,18	3,40	26,35	4,81	5,00	38,74	7,07
150	Sek.	0,20	4,20	29,11	5,94	6,20	42,97	8,77