

FACHHOCHSCHULE POTSDAM
FACHBEREICH ARCHITEKTUR UND STÄDTEBAU
STUDIENGANG RESTAURIERUNG

**Karolingische Flechtwerksteine aus Laaser Marmor in Müstair
Bestandsaufnahme und Erhaltungskonzept**

Diplomarbeit
in der Studienrichtung
Konservierung und Restaurierung von Objekten aus Stein

vorgelegt von
Kati Friedmann
Potsdam, 6. März 2009

Erstprüfer: Professor Gottfried Hauff
Zweitprüferin: Dr. Christine Bläuer

Danksagung

Viele Menschen haben auf sehr unterschiedliche Art und Weise dazu beigetragen, dass diese Arbeit zu Stande gekommen ist. Ihnen allen möchte ich danken.

Dr. Christine Bläuer hat mir in der Schweiz alle Türen geöffnet und alle Wege bereitet, sie hat mit mir diskutiert und Pizza gegessen.

Professor Gottfried Hauff war vier Jahre lang mein Lehrer, er war es, der mir die Wissenschaft nahegebracht hat.

In der Schweiz habe ich mich immer wie zu Hause gefühlt. Bei Urs Clavadetscher möchte ich mich für die Bereitstellung einer großen finanziellen Unterstützung bedanken. Jürg Goll und Erich Tscholl von der Bauhütte und viele andere in der Schweiz hatten stets Zeit für mich, und ich hatte einen Arbeitsplatz, wann immer ich ihn brauchte.

Martina Nicca, stets herzlich, wie alle Schweizer Freunde, hat mir Hinweise gegeben und Literatur zur Verfügung gestellt.

Dr. Peter Kozub danke ich für die Geduld, mit der er mir das Ultraschallgerät immer wieder aufgebaut hat (muss ich noch mehr sagen?).

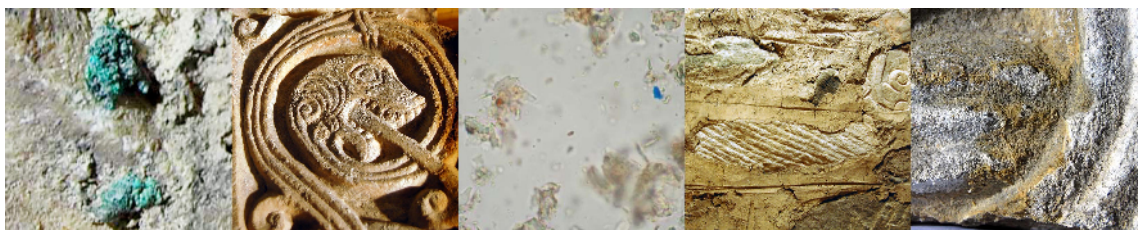
Mein Dank gilt auch Dr. Steffen Laue und Christine Fuchs.

Ein spezielles Dankeschön an Stefan Grell. Stefan schaut stets nach links und rechts, und nach neuen Wegen, denn für ihn ist die Theorie nur so gut, wie sie sich in der Praxis verwirklichen lässt. Und das gibt er weiter.

Auch meine Eltern möchte ich nennen, und Simone, die mich auch in den letzten Tagen vor dem Abgabetermin ertragen hat und diesen Tag mit mir gemeinsam herbei gesehnt hat.

Bei technischen Fragen und seltsamen Diagrammen konnte ich immer auf Detlef zählen.

Unterstützt haben mich auch: Dr. Michael Pfanner (ARGE Pfanner), Dr. Markus Boos (Remmers), Herrn Fritz Hürbin (Fa. Intermonument) und Mark Praus (Fa. Trigonart), des weiteren Sabine Schwerdtfeger und Dr. Stefan Simon vom Rathgen-Labor und Dipl. Ing. Andreas Protz (FEAD GmbH).



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	6
2 Objektbeschreibung	8
2.1 Das Kloster in Müstair.....	8
2.1.1 Klostergeschichte.....	8
2.1.2 Baugeschichte und archäologischer Überblick über die Bauphasen.....	9
2.1.3 Der Plantaturm.....	11
2.1.4 Die Wandmalereien in der Klosterkirche.....	11
2.2 Flechtwerksteine.....	12
2.2.1 Begriffsklärung.....	13
2.2.2 Funktion.....	13
2.2.3 Herkunft und Entstehung.....	16
2.2.4 Datierung.....	17
2.2.5 Material und Farbgebung.....	19
2.3 Geschichte der Flechtwerksteine in Müstair.....	19
2.3.1 Verbleib und Bergung.....	19
2.3.2 Bearbeitungsspuren.....	20
2.3.3 Bisherige Maßnahmen.....	21
2.3.4 Bisherige Untersuchung.....	21
2.3.5 Nomenklatur.....	22
2.3.6 Derzeitige Lagerung der Steine.....	22
2.4 Rahmenbedingungen.....	23
2.4.1 Klima in Müstair.....	23
2.4.2 Baugebundene Einflüsse im Kloster.....	23
2.4.3 Naturkatastrophen.....	24
2.5 Gesteinseigenschaften des Laaser Marmor.....	24
2.5.1 Allgemeine Gesteinseigenschaften von Laaser Marmor.....	25
2.5.2 Verwitterungsmechanismen von Laaser Marmor.....	32
3 Bestandsaufnahme der Steine	38
3.1 Untersuchung der 400 Steine und Steinfragmente.....	38
3.1.1 Bebildertes Glossar.....	38
3.1.2 Anfertigen einer Übersicht über die frei zugänglichen Fragmente.....	41
3.2 Exemplarische Untersuchung ausgewählter Steine.....	42
3.2.1 Vorgehensweise.....	42
3.2.2 Beobachtungen.....	42
3.3 Kartierung.....	45
3.3.1 Einleitung.....	45
3.3.2 Durchführung.....	46
3.4 Salzuntersuchung.....	46
3.5 Probenahme und Untersuchungen.....	50
3.6 Tropfentest.....	53
3.7 Schadensursachen, Interpretation und Bewertung.....	53

3.8 Polychromie.....	57
3.8.1 Theorie der Farbfassungen auf Marmor.....	57
3.8.2 Die Pigmente.....	57
3.8.3 Bisherige Untersuchung.....	58
3.8.4 Vorgehensweise.....	58
3.8.5 Befund.....	59
3.8.6 Weitere Maßnahmen.....	60
3.8.6.1 Farbspuren.....	60
3.8.6.2 Untersuchungsmethoden.....	61
3.9 Handwerkliche Qualität.....	62
4 Allgemeines Konservierungskonzept	65
4.1 Ziel der Erhaltungsmaßnahmen.....	65
4.2 Diskussion zum Umgang mit den salzbelasteten Steinen.....	66
4.3 Festigung.....	68
4.4 Fehlstellenergänzung, Rissinjektion und Hohlraumhinterfüllung.....	69
4.5 Reinigung.....	71
4.6 Verkleben.....	72
4.7 Zusammenfassung.....	74
5 Detailliertes Konzept zu Vorfestigung und Entsalzung.....	75
5.1 Grundlagen der Entsalzung.....	75
5.1.1 Mechanismen der Entsalzung.....	75
5.1.2 Methoden der Entsalzung.....	77
5.2 Grundlagen zur Vorfestigung von Marmor für eine Entsalzung.....	78
5.2.1 Anforderungen an eine Vorfestigung.....	79
5.2.2 Festigungsmittel.....	81
5.3 Eingrenzen der zu testenden Methode.....	84
5.3.1 Wahl der Entsalzungsmethode.....	85
5.3.2 Wahl des Mittels zur Vorfestigung.....	85
5.4 Prüfmethoden.....	88
5.4.1 Tropfentest.....	88
5.4.2 Messung der elektrischen Leitfähigkeit.....	89
5.4.3 Messung der Ultraschallgeschwindigkeit.....	90
5.5 Versuchsreihen.....	94
5.5.1 Vorproben mit Lockermaterial.....	94
5.5.2 Klebeversuche auf einer Marmorplatte.....	97
5.5.3 Künstlich verwitterte Bohrkernreihe.....	99
5.5.4 Prismen.....	108
5.6 Bewertung der Versuche.....	109
5.6.1 Schwierigkeiten bei der Auswertung.....	109
5.6.2 Erfolge bei der Auswertung.....	110
5.7 Empfehlungen	110
6 Lagerung, Transport und Präsentation.....	112
6.1 Kurzfristige Maßnahmen.....	112

6.2 Klima.....	112
6.3 Beschriftung.....	113
6.4 Kartierung.....	115
6.5 Bestandsblatt.....	115
6.6 Verpackung für Lagerung und Transport	116
6.7 Scannen.....	118
6.8 Präsentation bzw. Aufstellung.....	119
7 Zusammenfassung und Resümee.....	121
8 Ausblick.....	123
9 Quellennachweis.....	124
10 Glossar.....	139
11 Verzeichnis der Abkürzungen.....	140
12 Abbildungsverzeichnis.....	141
13 Tabellenverzeichnis.....	144

1 Einleitung

Im Benediktinerkloster St. Johann in Müstair wurden bei verschiedenen Grabungskampagnen Flechtwerksteine aus Laaser Marmor geborgen. Diese Steine sind zum größten Teil Bauelemente karolingischer Schrankenanlagen. Sie sind von hohem kunsthistorischen Wert, da sie ein wichtiges Zeugnis für die Ausstattung des Innenraumes karolingischer Kirchen sind. Das Dekor der Steine und die Art der Bearbeitung, die vielseitige und lange Geschichte, sowie das reinweiße Marmoraterial, aus dem sie gemacht sind, haben mich davon überzeugt, dass diese Steine ein interessantes Thema darstellen.

Die Steine lagern in einem Kulturgüterschutzraum und sind für die Öffentlichkeit nicht zugänglich. Einige von ihnen sind in einem konservatorisch bedenklichen Zustand und müssen dringend konserviert werden.

Es galt, eine umfangreiche Bestandsaufnahme durchzuführen, und darauf aufbauend ein Konservierungskonzept zu entwickeln.

Zusätzlich sollen die Steine auf Polychromiereste hin untersucht werden, sowie auf besondere Kennzeichen, die eine Unterscheidung und Zuordnung der Steine ermöglicht. Sämtliche Veränderungen an den Objekten mussten identifiziert und die Ursachen für Verwitterung geklärt werden. Nur, wenn man weiß, in welchem Maße Schäden im Voranschreiten sind, kann der genaue Konservierungsbedarf ermittelt werden.

Neben der Bewertung des konservatorischen Zustandes ist es ebenfalls wichtig, auch Funktion und Material, sowie die Geschichte zu kennen.

Es sollten außerdem Methoden für die Erhaltung der Steine aufgezeigt werden, die neben der Konservierung auch Aspekte der Lagerung, des Transports und der künftigen Handhabung bei der kunstwissenschaftlichen Untersuchung betreffen.

Da es sich um eine sehr große Menge von Objekten mit stark unterschiedlichen Erhaltungszuständen handelt, stellte die Bestandsaufnahme und das Entwickeln eines

Erhaltungskonzeptes eine Herausforderung dar. Der Rahmen einer Diplomarbeit ist zeitlich begrenzt, und so wurde nur ein Thema intensiver behandelt, das besonders interessant schien: Die Entsalzung von Marmor mit einem stark entfestigtem Gefüge. Dieses ist ein eher seltenes Phänomen, das vorwiegend bei archäologischen Funden auftritt. Es wurde in der Literatur sehr wenig behandelt, so dass einige naturwissenschaftliche Test durchgeführt wurden.

Diese Arbeit ist, der Aufgabe entsprechend, aus mehreren Teilen zusammengesetzt. Die erste Hälfte beschäftigt sich mit Hintergrundinformationen und einer ausführlichen Bestandsaufnahme, bei der auch Proben untersucht wurden, um möglichst genaue Kenntnisse über die Steine zu bekommen. Die zweite Hälfte beschäftigt sich mit Maßnahmen zur Erhaltung, wobei in diesem Teil auch die praktischen Versuche zu Vorfestigung und Entsalzung durchgeführt wurden.

2 Objektbeschreibung

Das Kloster St. Johann in Müstair ist eines der am besten erhaltenen karolingischen Klöster weltweit und wurde 1983 in die UNESCO-Weltkulturerbeliste eingetragen.

Bei archäologischen Ausgrabungen wurden in den Mauern und Fundamenten, aber auch im Boden, karolingische Flechtwerksteine aus Laaser Marmor freigelegt und geborgen. Es handelt sich hierbei um Bauelemente der karolingischen Kirchengestaltungen. Diese Schranken wurden nach etwa 150 Jahren entfernt und die Steine wurden als Spolien neu verbaut. Mittlerweile liegen etwa 1300 Fragmente vor, die in einem Kulturgüterschutzraum eingelagert sind. Etwa 400 Steine und Steinfragmente liegen offen auf Tischen im Raum vor und wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit näher untersucht.

2.1 Das Kloster in Müstair

2.1.1 *Klostergeschichte*

Das karolingische Benediktinerinnenkloster St. Johann in Müstair befindet sich im Münstertal, im schweizerischen Kanton Graubünden und liegt 1250 Meter über dem Meeresspiegel. An sehr wichtigen Verkehrsverbindungen von Nord nach Süd und von Ost nach West gelegen, hatte es verkehrsgeographisch eine sehr große Bedeutung. Durch den Vinschgau führte seit der römischen Kaiserzeit die Via Claudia als Verbindungsstraße von Verona über den Reschenpass nach Landeck und weiter bis Augsburg. Über den Ofenpass gelangte man nach Engadin und nach Chur.

Bereits in der Bronzezeit war das Gelände des Klosters besiedelt, wie archäologische Ausgrabungen ergeben haben. Auch fanden sich Reste römischer und frühchristlicher Besiedelung.¹

Das ursprüngliche Benediktinerkloster St. Johann wurde nach der Überlieferung von 742 bis 814 durch Karl den Großen gegründet. Eine erste urkundliche Erwähnung fand es im ersten Viertel des 9. Jahrhunderts. Zunächst hieß es Kloster Tubaris, von 1157 an wurde es nur noch Monasterium genannt, wovon sich der heutige Name Müstair ableitet. In der Mitte des 9. Jahrhunderts lebten 45 Mönche im Kloster, gegen Ende des 9. Jahrhunderts bildeten nur noch acht Mönche den Konvent von Müstair, deren

¹Tabernero, José Diaz: Die Fundmünzen aus dem Kloster St. Johann in Müstair (1996), Seite 13.

Hauptaufgabe das Abhalten von Gottesdiensten, Beten und das Beherbergen von Reisenden durch die Alpenpässe war. Zu Beginn des 12. Jahrhunderts, zur Zeit des Investiturstreits, wurde das Kloster in ein Nonnenkloster umgewandelt und gelangte so zu neuer Blüte.

Im Zuge des Schwabenkrieges wurde das Kloster im Jahr 1499 stark verwüstet. Im 16. Jahrhundert erlebte das Kloster einen neuen Aufschwung und immer mehr Novizinnen traten in das Kloster ein. Regina Planta war die letzte Bündener Äbtissin.² Nach ihr wurde der in der zweiten Hälfte des 10. Jahrhunderts erbaute Turm benannt.³

Im März 1799 wurden Kirchen- und Klostereinrichtung von französischen Soldaten teilweise zerstört und geraubt.

Im 19. Jahrhundert, unter der Kastvogtei der Bündener Regierung, erholte sich das Kloster wieder. Heute leben 12 Nonnen im Kloster.⁴

2.1.2 Baugeschichte und archäologischer Überblick über die Bauphasen

Seit dem Jahr 1969 finden im Bereich des Klosters intensive archäologische Ausgrabungen, die längste Zeit unter Leitung von Prof. H.R. Sennhauser statt. Es wurden vorwiegend die Wirtschafts- und Wohnbauten, sowie der Bereich in und um die Kreuzkapelle ergraben. Eine wichtige Erkenntnis dabei war, dass sich das ursprüngliche karolingische Kloster nicht, wie ursprünglich angenommen, im Norden der Klosterkirche befand. Stattdessen verliefen der Kreuzgang mit den umgebenden doppelgeschossigen Wohntrakten an der Stelle des heutigen Südhofes. Die nördlich vom Kloster gelegene Kirche ist auch bei anderen Bündner Klöstern (Disentis, Pfäfers) nachgewiesen.⁵

Die Klosteranlage ist erst im Anschluss an die Kirche gebaut worden und vermutlich als regelmäßiger Gesamtkomplex in einem Zug entstanden. Die karolingische Klosteranlage wird als das ursprüngliche Gründungskloster angesehen.

²Im Jahr 1810 wurde durch den Bischof von Chur angeordnet, dass dem Kloster künftig keine Äbtissin, sondern eine Priorin vorstehen solle.

³ Taberero, José Diaz (1996), Seite 13.

⁴ Taberero, José Diaz (1996), Seite 13.

⁵Sennhauser, Hans Rudolf: Baugeschichte und Bedeutung des Klosters St. Johann (2002), Seite 17.

Dendrochronologische Untersuchungen haben das Jahr 775 als Erbauungsjahr ergeben.⁶ Die Klosterkirche war für das Volk nicht zugänglich und ausschließlich für die Mönche durch die Annexräume betretbar. Durch große Bogentore zogen sie über Stufen zum Altarhaus.⁷

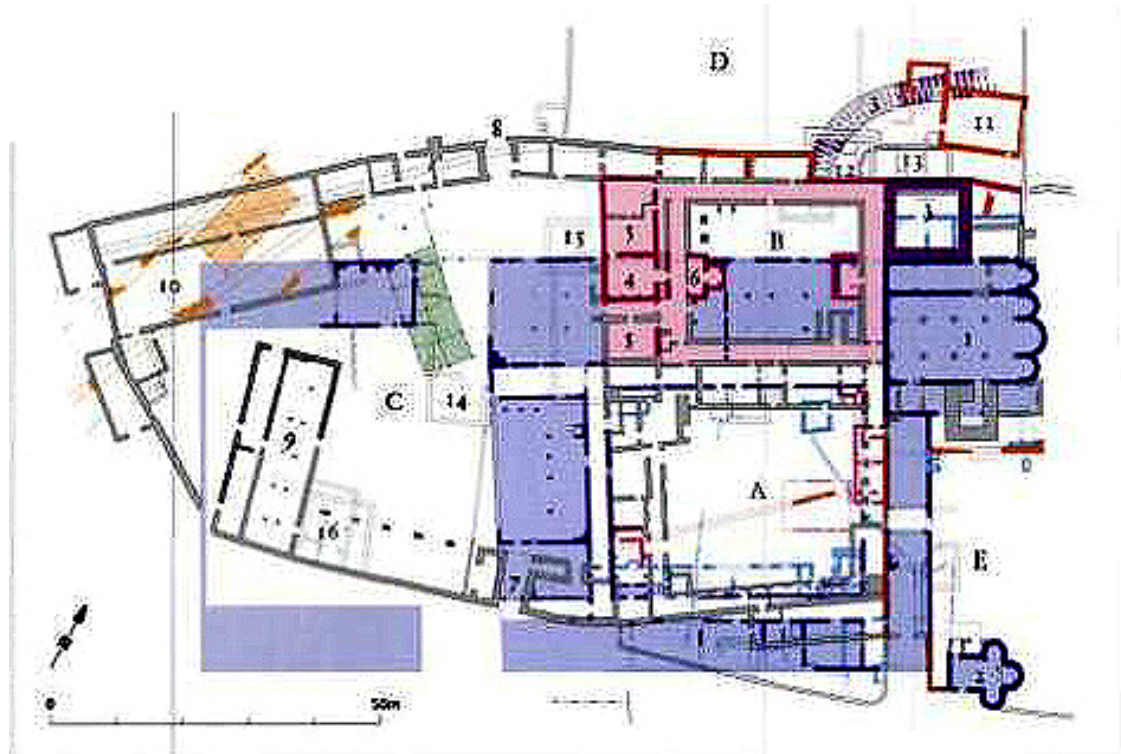


Abbildung 1: Archäologischer Übersichtsplan des Kloster Müstair.⁸

Orange	prähistorisches Pfostengebäude mit Trockenmauerzügen, Bronzezeit
Grün	spätromantisches (?) Pfostengebäude
Blau	karolingische Klosteranlage, letztes Viertel 8. Jahrhundert.
Dunkelblau	ergrabene Mauern
Violett	frühere Außenbauten an die karolingische Klosteranlage
Rosa	romanische Bischofsresidenz
Grau	bestehende Klosteranlage

A	Südhof
B	Nordhof

⁶ vgl. zur Baugeschichte des Klosters: Sennhauser, Hans Rudolf: Baugeschichte und Bedeutung des Klosters St. Johann (2002), Seite 17-25.

⁷ Sennhauser, Hans Rudolf (2002), Seite 17-25.

⁸ Taberero, José Diaz (1996), Seite 15.

C	Westhof / Wirtschaftshof
D	Oberer Garten / Klostergarten
E	Kirchweg / Friedhof

1	Karolingische Klosterkirche mit Nord- und Südanne
2	Doppelgeschossige Heiligkreuz-Kapelle, karolingisch, umgebaut um 1500
3	„Plantatum“ mit zugehörigem Graben, zweite Hälfte 10. Jahrhundert, umgebaut um 1500
4 - 6	Ehemalige Bischofsresidenz mit Wohnturm 4, Norpertsaal 5 und doppelgeschossiger Kapelle St. Ulrich und Nikolaus 6
7	Südlicher Torturm, um 1500 über älterer Toranlage errichtet
8	Nördlicher Torturm, um 1500
9	Südwall, 1707
10	Nordwall, um 1500
11	„Eginoturm“, Bischofsresidenz des 12. Jahrhunderts
12	Küchenanbau, Spätmittelalter
13	Wohnanbau, 15. Jahrhundert
14	Mühle oder Schmiede, Spätmittelalter
15	Küchenanbau am Norpertrakt, Spätmittelalter
16	Stallanbau, Spätmittelalter

Tabelle 1: Archäologische Übersicht des Kloster Müstair.⁹

2.1.3 *Der Plantatum*

Im 10. Jahrhundert wurde der Nordannex der Kirche, vermutlich nach einem Brand, abgebrochen. An seiner Stelle entstand ein fester, im Norden durch Palisaden und Graben gesicherter Wohnturm, dessen Erbauung dendrochronologisch auf das Jahr 957 datiert werden konnte. In der ersten und zweiten Etage wurde bei der Erbauung eine Toilettenanlage eingebaut, eine Tatsache, die den später in Plantatum umbenannten Bau als Wohnanlage sichert.

Die Nonnen errichteten später ihr Refektorium im ersten Stock des Turmes, im zweiten befand sich die Wohnung der Äbtissin und im dritten befand sich der Schlafsaal. Später wurden dort Zellen für die Novizinnen eingerichtet.

2.1.4 *Die Wandmalereien in der Klosterkirche*

Die in der Klosterkirche befindlichen karolingischen und romanischen Wandmalereien sind in ihrem Bestand einmalig auf der Welt und gaben Anlass, das Kloster Müstair 1983 in die Liste des UNESCO Weltkulturerbes aufzunehmen.

Erste Fragmente von karolingischen Wandmalereien wurden 1894 im Dachraum der Saalkirche gefunden. Zunächst wurden sie für romanisch gehalten. In den Jahren 1908

⁹ vgl. Büro Prof. H.R. Sennhauser, in: Taberner, José Diaz (1996), Seite 15.

und 1909 wurden Teile der im Dachraum entdeckten Malereien abgenommen und auf Leinwand übertragen. Von 1947 bis 1951 wurden in der Klosterkirche umfassende Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt, bei der die Wandmalereien freigelegt und restauriert wurden. Bereits in den 60er Jahren wurden zahlreiche Schäden wie Salzausblühungen, Hohllagigkeit des Putzes und Verschmutzungen festgestellt.¹⁰ Zahlreiche Forschungsprojekte zu Restaurierungs- und Konservierungsfragen wurden in der Kirche durchgeführt. Viele Erfahrungen und Kenntnisse, die heute im Bereich der Konservierung von Wandmalereien im Zusammenhang mit bauschädlichen Salzen und Klima existieren, sind auf die intensive Forschung und Arbeit in Müstair zurückzuführen und spiegeln sich in zahlreichen Veröffentlichungen wider.¹¹

2.2 Flechtwerksteine

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts werden in Müstair archäologische Ausgrabungen durchgeführt. Mittlerweile wurde eine Sammlung von etwa 1300 Marmorfragmenten katalogisiert, und weitere Stücke werden diese Sammlung noch ergänzen. Ein Teil dieser Stücke kann anhand baulicher Merkmale zugeordnet werden. Es handelt sich vorwiegend um Bauelemente von karolingischen Schrankenanlagen. Die Formen sind sehr vielfältig, und die Fragmente lassen sich nur zum Teil zusammenfügen. So gibt es beispielsweise mindestens 12 verschiedene Bögen. Eine Vielzahl befindet sich noch ungeborgen in der Erde und im Mauerwerk. Daher ist zu vermuten, dass es sich dabei um Teile mehrerer Schrankenanlagen handelt.¹²

Da die Fundsituation in Müstair günstig ist, lassen sich die Stücke relativ genau datieren. Die vorliegenden Flechtwerksteine wurden überwiegend im originalen Mauerwerk des Plantaturms geborgen. Dies ermöglicht eine relativ genaue Datierung der Standzeit der Schrankenanlage. Sie muss nach 775, dem Gründungsjahr des Klosters, in der Kirche aufgestellt, und im Jahr 957, dem Jahr der Erbauung des Plantaturms, wieder entfernt worden sein.¹³

Die Motive der Steinornamentik sind sehr vieldeutig und übermitteln Bildinhalte. Sie sind als aussagekräftige Kunstwerke anzusehen.¹⁴

¹⁰ Rutishauser, Hans; Wyss, Alfred: Einleitung (2002), Seite 12.

¹¹z.B.: Wandmalereizerfall, Salze und Raumklima in der Klosterkirche von Müstair (1991), Seite 171-200.

¹²Jürg Goll: Müstair, Ausgrabung und Bauuntersuchung im Kloster St. Johann (2005), Seite 61.

¹³Jürg Goll (2005), Seite 61.

¹⁴Jürg Goll (2005), Seite 61.

2.2.1 *Begriffsklärung*

Unter dem Begriff Flechtwerksteine versteht man ornamentierte Fragmente aus Stein, die Bestandteil von Kircheneinrichtungen im 8., 9. und 10. Jahrhundert waren. Karolingische Flechtwerksteine wurden in Italien (vor allem in Nord- und Mittelitalien), Spanien, Frankreich, der Schweiz, Ungarn, Dalmatien (Region im Süden Kroatiens), Kärnten, Süddeutschland und im Rheinland gefunden.

Ihre Ornamentik besteht aus drei-, vier- und sechssträhnigen Bändern, die geflochten, miteinander verschlungen, verknotet oder gedreht sein können. Das Grundmuster tritt bei manchen Steinen auch in Form eines Rautengitters auf, welches ebenfalls geflochten ist. Eine weitere Gruppe von Motiven stellen die Schlingmuster dar, sowie medaillonartig und quadratisch geformte Steine.

Die technisch richtigen Knoten sind stilisiert, beispielsweise in den Ecken auseinandergezogen oder brezelförmig. Das Flechtwerk kann als Rahmen- und als Füllornament dienen. Die Ornamentik besteht außerdem aus vegetabilischem Zierrat, beispielsweise Rosetten, Blättern, Trauben Dreisprossen, Vögeln und andere Tieren zusammen.¹⁵

2.2.2 *Funktion*

Die Flechtwerksteine wurden unter anderem zu Chorschranken in karolingischen Kapellen zusammengesetzt. Die Chorschranke trennt den Chorraum vom Kirchenschiff und ergibt einen Mönchsumgang. Aus diesem Grund ist ein Teil der Steine beidseitig sichtbar und wurde entsprechend auf Vorder- und Rückseite dekoriert.

Darüber hinaus wurden sie zu Ambonen¹⁶ und Altarantependien, als auch zu Ziborien-Baldachinen zusammengesetzt¹⁷. Auch für andere Umschrankungen wurden sie verwendet.¹⁸ So konnte in der Klosterkirche von Echternach nachgewiesen werden, dass das Grab des Hl. Willibrord umschrankt war, ebenso wie ein Heiligengrab in Molzbichl.¹⁹

¹⁵ Johannson-Meery, Barbara: Karolingerzeitliche Flechtwerksteine aus dem Herzogtum Baiern und aus Bayerisch-Schwaben (1993), Seite 9-11.

¹⁶ Leseputz in frühchristlichen Kirchen.

¹⁷ Ein auf Säulen ruhender Aufbau über einem Altar.

¹⁸ Johannson-Meery, Barbara (1993), Seite 12.

¹⁹ Karpf, Kurt: Frühmittelalterliche Flechtwerksteine in Karantanien – Marmorne Kirchenausstattungen aus tassilonisch-karolingischer Zeit (2001), Seite 21.

Es gibt verschiedene Chorschrankentypen. Zum einen bestehen sie nur aus Platten, Pfeilern, Friesen und eventuell Sockeln. Ein anderer Typ besitzt darüber hinaus noch einen Aufbau aus Säulen, die durch Trabes²⁰ verbunden waren, und einen den Chorschrankendurchgang bekrönenden Bogen oder Giebel. Bei Trabes sind mitunter Abschrägungen an der Oberkante vorgenommen worden, die zu ihrer Identifizierung beitragen können.



Abbildung 2: rechte Abbildung: Split in Dalmatien: karolingische Trabesschranke in der Kapelle St. Martin.

Abbildung 3: linke Abbildung: Grado in Oberitalien: Wiedererrichtete frühbyzantinische Trabesschranke in der Basilika S. Maria delle Grazie.

Pfeilern wurden, aufgrund ihrer Funktion als Stützen, etwas massiver gefertigt. Ihre Musterung ist meist einzeilig. Die Seitenflächen der Pfeiler blieben undekoriert und wurden mit Nuten oder Dübellöchern versehen. Zwischen die Pfeiler wurden die dünneren Platten eingelassen. Diese sind entsprechend an den Seitenflächen oft gekehlt oder abgeschrägt, um mit der Nut verkröpft zu werden, oder sie besitzen Dübellöcher, sodass eine Verbindung mit Hilfe von Bolzen hergestellt werden konnte.

Gesimse bildeten den oberen Abschluss der Chorschranken. Die Frieze wurden entweder auf den Flechtwerkplatten eingemeißelt, oder es wurden separate Balken mit meist einzeiligen Mustern als Dekoration hergestellt. Dünnere Marmorplatten waren

²⁰ Querstreifen, Balken

mitunter in Sockelsteine eingelassen. Diese ähneln in Größe und Bearbeitung den Friesen.

Bögen zur Überspannung der Chorschrankendurchgänge besitzen im allgemeinen eine höhere lichte Weite als Ziborienplatten. Ziborienplatten schließen in den meisten Fällen nach oben hin gerade ab und zeigen an der Unterseite eine bogenförmige Einbuchtung. Das Muster zeichnet häufig die charakteristische Form der Ziborienplatten nach.

Die Ambonen lassen sich ebenfalls in zwei Gruppen unterteilen. Es gibt Typen mit konvexer Brüstung, aber auch einige mit rechteckigem Podest und ebenen Brüstungsplatten. Da nicht bewiesen ist, dass das Kreuzmotiv nur auf Ambonen vorkam, ist eine Unterscheidung von eckigen Ambonen und Chorschrankenplatten kaum möglich. Im allgemeinen waren die Ambonen mit abgeschrägten Wangen verbunden, hinter denen sich Stufen verbargen.

Die Identifizierung von Flechtwerkplatten als Altarantependien ist ebenfalls problematisch. Es wurde nachgewiesen, dass solche Platten erst in späterer Zeit zu Antependien zusammengesetzt wurden.²¹



Abbildung 4: karolingischer Flechtwerkstein aus Müstair, Balken (Ba 21).

²¹Johannson-Meery, Barbara (1993), Seite 17 -19.



Abbildung 5 und Abbildung 6: karolingische Flechtwerksteine aus Müstair (links Balken, rechts Teil vom Mobiliar).

2.2.3 *Herkunft und Entstehung*

Über die Herkunft und die Entstehung von Flechtwerksteinen gibt es mehrere Theorien, die zum Teil widerlegt werden konnten, teilweise aber auch nebeneinander existieren. Beispielsweise wurde die frühere Annahme, Flechtwerksteine seien langobardischen Ursprungs, wurde heftig diskutiert und letztendlich widerlegt.²²

Nach dem heutigen Stand der Forschung ist die karolingische Flechtwerkornamentik auf Stein aus der römischen Antike überliefert. Es wird davon ausgegangen, dass es keine kontinuierliche Entwicklung seit der Spätantike auf italienischem Boden gab und die Flechtwerkornamentik über Spanien, das römische Provinz war, und über Südfrankreich nach Norditalien gelangte. In den friedlichen Regionen des ehemaligen römischen Reiches war die römisch-antike Tradition der Steinmetzkunst in Ansätzen noch vorhanden. Hier verbreitete sich die Flechtwerkornamentik, die ihre größte Blüte in Norditalien erlebte. Im Laufe des 8. Jahrhunderts veränderte sie ihren Charakter hin zu einem relativ flachen, vornehmlich graphischen Ornament. Von der Flechtwerkornamentik Norditaliens gingen Einflüsse auf die Steinmetzkunst sämtlicher angrenzender Gebiete über.²³

²² in: Johannson-Meery, Barbara (1993), Seite 19.

²³ Johannson-Meery, Barbara (1993), Seite 19.

2.2.4 Datierung

Gleichfalls stellt die Datierung von Flechtwerksteinen eine große Schwierigkeit dar. Die Steine befinden sich kaum noch an ihrem ursprünglichen Ort, sondern liegen als Spolien in anderen Bauwerken, oder als Fundstücke archäologischer Ausgrabungen vor. Verschiedene Theorien zur Einordnung anhand der technischen Ausführung und anhand des Stils der Dekoration wurden aufgestellt, die zwar keine exakte Einordnung ermöglichen, jedoch Tendenzen und Entwicklungen aufzeigen.

Nach Kautzsch lassen sich die Flechtwerksteine in einen Frühstil, der von Anfang bis Mitte des 8. Jahrhunderts, und einen Spätstil, der Ende des 8. bis Anfang des 9. Jahrhunderts angesiedelt wird, unterteilen.²⁴

Nach seiner Theorie gehören das zweistreifige Band, die gerundete Oberfläche, sowie dekorative Bohrlöcher zu technischen Merkmalen des Frühstils. Dabei existieren naturalistische und stilistische Motive nebeneinander, Ranken besitzen runde Stiele und organisch heraus wachsende Blätter und Früchte. Die Blattflächen sind häufig dekorativ ornamentiert. Auch Tierdarstellungen und antikisierende Motive wie Perlband oder Astragalstab seien in dieser Phase häufiger zu finden.

Im Spätstil seien die antiken Motive fast völlig verschwunden und die Ranken würden zunehmend stilisierter. Abstrakt ornamentales Flechtwerk dominiert gegenüber allen anderen Formen. Vereinzelte Überreste älterer Überlieferungen, wie große Kreuze, seien zusammen mit den Korbböden die einzigen Zentralmotive. Die Fläche sei nicht mehr mit füllenden Motiven ausgefüllt, stattdessen würden die Flächen mit Flechtwerk in Form von Netzmustern überzogen.²⁵

Er gibt aber auch zu bedenken, dass einige Werkstätten den späteren Stil -oder bestimmte Merkmale dessen- bereits sehr früh eingeführt und andere Werkstätten sehr lange an ihren Traditionen festgehalten haben.

Bei einer anderen Datierungskonzeption durch Fillitz wird die Entwicklung der Darstellungen der Tiermotive erörtert. Die Tiere, wie auch die Ornamentik aus der ersten Hälfte des 8. Jahrhunderts besitzen demnach eine ausgeprägte Körperlichkeit, die

²⁴ Johannson-Meery, Barbara (1993), Seite 23-24.

²⁵ Johannson-Meery, Barbara (1993), Seite 23-24.

durch eine besonders plastische Darstellung erreicht wurde. Nach der Mitte des 8. Jahrhunderts kommt es zu einer „Auflösung des Körperhaften“.²⁶ Zum Ende des 8. Jahrhunderts erhalten die Körper eine neue Form. Durch eine Konturlinie werden die Schraffuren zusammen gebunden und mit den Ornamentformen gleich geordnet. Das dreistreifige Band, das in dieser Zeit auftaucht, wird in dieser Datierungskonzeption als einfaches Band mit Konturlinie angesehen. Im frühen 9. Jahrhundert finden sich dem entsprechend die reifsten Werke des Flechtwerkstils. Sie besitzen zu dieser Zeit eine sorgfältige Komposition und keine zufälligen Füllmotive. Die Tiere gewinnen durch den Wegfall der Konturlinie an lebendigerer Ausdruckskraft, die Binnenzeichnung dient zur näheren Kennzeichnung körperlicher Formen. Durch das scharfkantige Abheben der Reliefschicht vom Reliefgrund ist jede Form deutlich umrissen. Es erfolgt noch in der ersten Hälfte eine Weiterentwicklung, bei der sich der Reliefhintergrund dichter füllt und bald ganz zurückgedrängt wird. Später kommt es zu einem Zurückgreifen auf die Vor- und Frühphasen des Stiles.²⁷

Eine weitere Datierung wurde ausschließlich anhand von Merkmalen der technischen Ausführung durchgeführt. Auch wenn sich auf diesem Weg keine kontinuierliche Entwicklung ablesen lässt, da während einer Zeitspanne verschiedene Bearbeitungsweisen festgestellt wurden, werden doch Entwicklungstendenzen über die gesamte Zeitspanne aufgezeigt.

Die Bearbeitungsspuren gröberer Werkzeuge sind durch eine nachträgliche Überarbeitung der Oberfläche verschwunden. Die zunächst gerundeten Oberflächen der Ranken und Bänder wurden zunehmend scharfkantiger und schließlich in einer Art Kerbschnittornamentik gearbeitet. Die Reliefschicht hob sich im Laufe der Entwicklung immer deutlicher vom Reliefgrund durch scharfkantiges Ausmeißeln ab. Die Relieftiefe nahm entsprechend den angestrebten größeren Kontrasten von Reliefschicht und Grund bis zum reifen Stil hin zu und später wieder ab. Zu Beginn der Entwicklung beschränkte sich der Werkzeuggebrauch auf das Spitzeisen und ein schmales Flacheisen. Für die

²⁶zitiert in: Johannson-Meery, Barbara (1993), Seite 25.

²⁷Johannson-Meery, Barbara (1993), Seite 25.

Folgezeit wurde eine Erweiterung des Werkzeugsortiments anhand von Spuren auf den Steinen festgestellt. Zur Oberflächenbearbeitung diente das Beizeisen, zur Abarbeitung nach dem Spitzten kam das Zahneisen zum Einsatz.

Anhand der Werkzeugspuren auf den Flechtwerksteinen lassen sich somit Schlüsse auf die technische Ausstattung der ausführenden Werkstatt ziehen.²⁸

2.2.5 *Material und Farbgebung*

Flechtwerksteine wurden zumeist aus Marmor, vorwiegend einheimischer Herkunft, hergestellt. Die verwendeten Steinbrüche wurden mitunter bereits in der Antike genutzt, wie auch Gesteine aus Gummern bei Villach. In Bayern wurden in frühmittelalterlichen Klöstern Flechtwerksteine aus Kalkstein und Sandstein gefunden.²⁹

Die als Flachreliefs gearbeiteten Flechtwerksteine erhalten durch den Wechsel von Licht und Schatten einen besonderen Reiz. Möglicherweise wurde durch das Aufbringen von Farbe auf den Reliefhintergrund versucht, diesen Effekt noch zu verstärken. In Bayern wurden vereinzelt rote Farbspuren in den Tiefen der Flechtwerksteine gefunden.³⁰ In Molzbichl haben sich Reste einer roten Bemalung auf einem Plattenbruchstück erhalten. Dies lässt die Vermutung zu, dass auch andere frühmittelalterliche Chorschranken farbig gefasst waren. Es ist auch vorstellbar, dass durch die Farbgebung in den Reliefvertiefungen Durchbruchsarbeiten nach byzantinischem Vorbild imitiert werden sollten.³¹ Doch auch weiße Fassungsreste an Sandstein und Kalkstein, die eventuell zur Imitation von Marmor aufgebracht wurden, konnten entdeckt werden.³²

2.3 **Geschichte der Flechtwerksteine in Müstair**

2.3.1 *Verbleib und Bergung*

Die Flechtwerksteine in Müstair wurden während verschiedener archäologischer Grabungskampagnen seit Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts nach und nach geborgen, die meisten von ihnen aus dem Mauerwerk oder dem Fundament des vor 957

²⁸Johannson-Meery, Barbara (1993), Seite 25-26.

²⁹Dannheimer, Hermann: Steinmetzarbeiten der Karolingerzeit (1980), Seite 14.

³⁰Dannheimer, Hermann (1980), Seite 42, 61.

³¹Karpf, Kurt (2001), Seite 21.

³²Dannheimer, Hermann (1980), Seite 40, 58, 59.

erbauten Plantaturms. Ein weiterer großer Teil der Stücke wurde an anderen Teilen des Klosters in Mauern oder im Erdboden gefunden.

Die wenigsten Stücke wurden steinsichtig verbaut, der größte Teil der Flechtwerksteine war vollständig eingemauert. Mitunter wurden die Steine auch mehrfach verwendet. An einigen Stellen sind Fragmente im Mauerwerk erkennbar, die einen Eindruck davon vermitteln, wie die Steine über Jahrhunderte hinweg verblieben sind. Da die zum Teil romanischen Mauern nicht aufgebrochen, und die darin befindlichen Steine und Fragmente nicht geborgen werden, kann die Sammlung niemals vollständig zusammengeführt werden.



Abbildung 7: Ungeborgene Flechtwerksteine im romanischen Mauerwerk.

2.3.2 Bearbeitungsspuren

Noch heute zeigen die Flechtwerksteine die Spuren ihrer Bearbeitung sehr deutlich. Die dekorierten Sichtflächen wurden sehr fein mit dem Beizeisen ausgearbeitet. Die Bänder wurden überwiegend kerbschnittartig, vereinzelt aber auch rund ausgeführt. Die Seitenflächen mit den Nuten oder Einkerbungen für die Befestigung, sowie die Rückseiten wurden mit einem zahneisenähnlichen Werkzeug geglättet. Einige Seitenflächen wurden mit dem Spitz Eisen ausgearbeitet, wobei dieses nicht nur zum groben Bossieren verwendet wurde, sondern eine sauber punktgepitzte Oberfläche erzielt wurde.

Vereinzelte Scharrierungen an den Kopfseiten können aus späterer Zeit sein. Möglicherweise wurden die Steine für ihre neue Verwendung zurecht gearbeitet.

2.3.3 *Bisherige Maßnahmen*

Die Geschichte der Flechtwerksteine hinsichtlich durchgeführter Maßnahmen kann nur bruchstückhaft rekonstruiert werden.³³ Die geborgenen Steine wurden durch verschiedene Restauratoren behandelt, wobei nicht alle Maßnahmen dokumentiert wurden. Sichtbar sind verschiedene Klebungen, die teilweise mangelhaft mit grauem oder gelbem Kleber ausgeführt wurden. Außerdem wurden Festigungsversuche mit Kalksinterwasser durchgeführt. Diese Maßnahme wurde nicht dokumentiert und es ist nicht bekannt, an welchen Steinen dies durchgeführt wurde.³⁴ An mindestens einem Fragment wurde eine Entsalzung im Wasserbad durchgeführt.³⁵

Vereinzelte Fragmente mit einem Holzspachtel von Mörtelresten gereinigt. Durch Zerkleinern des Mörtels haben sich die Steinporen mit einem sehr feinen Staub verfüllt, sodass ihre Oberfläche nun glänzend erscheint.

Im Juni 2007 wurden bei einigen Fragmenten alte Klebungen gelöst und mit dem lösemittellöslichen Kunstharz Paraloid B 72 neu verklebt. Diese Maßnahme wurde dokumentiert.³⁶

2.3.4 *Bisherige Untersuchung*

In den Jahren von 2003 bis 2005 wurde ein Rohkatalog der Flechtwerksteine angefertigt, der laufend aktualisiert wird.³⁷ Dazu wurden die Fragmente und Splitter zu Werkstücken zusammengefügt, soweit dies möglich war. Dazu wurden die Steine im Kulturgüterschutzraum nach Katalognummern sortiert ausgebreitet. Für den Katalog erfolgte eine Beschreibung nach wissenschaftlichen Kriterien.³⁸ Soweit es möglich war, wurden die Fragmente anhand konstruktiver Kennzeichen, wie Form, Verlauf des

³³Im Verlauf der Bestandsaufnahme wurden Indizien gefunden, die auf weitere, hier nicht genannte Maßnahmen hindeuten.

³⁴Freundliche mündliche Mitteilung von Jürg Goll (9.9.2008, 16 Uhr).

³⁵Entnommen aus den Datenbank der Bauhütte in Münstair des Archäologischen Dienst Graubünden. (es handelt sich um das Fragment M86/6'767, das später ausführlicher untersucht wurde).

³⁶Nicca, Martina: Restaurierbericht (2007).

³⁷Roth-Rubi, Katrin; Sennhauser, Hans Rudolf: Karolingische Flechtwerk-Skulptur - Katalog der Stücke aus Münstair, Schänis und aus dem Tessin.

³⁸Jürg Goll: Münstair, Ausgrabung und Bauuntersuchung im Kloster St. Johann (2006), Seite 33.

Musters und Verbindungselementen nach Bauelementen sortiert. Außerdem wurde ein Großteil der Marmorfragmente gezeichnet und fotografiert.

Seit einigen Jahren werden regelmäßig internationale Symposien auf internationaler Ebene in Müstair zum Thema Flechtwerksteine abgehalten, um wissenschaftliche Fragen zu klären und zu diskutieren.

2.3.5 Nomenklatur

Für alle geborgenen Stücke wurde von den vor Ort tätigen Archäologen eine Nomenklatur entwickelt, die auch in dieser Diplomarbeit verwendet wurde. Jedes Fragment besitzt eine Inventarnummer. Diese setzt sich aus einem M mit zwei darauf folgenden Zahlen zusammen, die das Fundjahr angeben. Danach folgt ein Slash mit einer weiteren vier- bis sechststelligen Zahl.

Fragmente, denen eine bauliche Funktion zugeordnet werden konnte, erhielten eine weitere Bezeichnung. Diese setzt sich aus zwei bis drei Buchstaben zusammen, die den Bauelementtyp (Balken, Platte, Kapitell usw.) angeben, sowie einer durchlaufenden Nummerierung, zusammen. Diese Nummer ist nicht auf den Fragmenten aufgebracht, denn ausschließlich die Inventarnummer gilt als verbindlich.

Bei Beschreibungen der Fragmente werden alle Bildseiten der Bauelemente mit A, die Rückseiten mit B bezeichnet. Aus der Sicht des Objektes wird die linke Seite als C1, die rechte Seite als C2 bezeichnet, die obere Seite als D1 und die Untere Seite als D2 bezeichnet.

2.3.6 Derzeitige Lagerung der Steine

Die katalogisierten Fragmente und Splitter befinden sich in einem Kulturgüterschutzraum, wo sie zu einem großen Teil auf provisorischen Tischen ausgebreitet sind.

Im Kulturgüterschutzraum wird eine konstante Luftfeuchte von 60% angestrebt. Diese Festlegung ergibt sich nicht nur durch die Marmorfragmente, sondern ist durch zahlreiche andere archäologische Funde aus Metall, sowie Keramiken und Knochen vorgegeben.

Die meisten der Fragmente liegen ohne Unterlage auf gelb gestrichenen Schalungsbrettern. Die Steine sind nicht abgedeckt. Die restlichen Fragmente sind - größtenteils in offenen Kisten - in Regalen gelagert. Der Raum ist nicht frei zugänglich,

doch bei gelegentlichen Führungen werden die Steine angefasst und bewegt.

Seit einigen Jahren werden die Inventarnummern mit Tinte auf eine Stelle der Steine aufgebracht, die mit Paraloid B 72 abgesperrt wurde.³⁹ Auf diese Weise können sie rückstandslos vom Gestein entfernt werden. Die zugehörigen Bezeichnungen der Bauelemente sind jedoch auf Klebebandstreifen geschrieben, die mitunter auf die Steinfragmente aufgeklebt sind. Frühere Bezeichnungen sind direkt auf das Gestein geschrieben.

2.4 Rahmenbedingungen

Rahmenbedingungen, wie Klima, bauliche Veränderungen und Naturkatastrophen, können mitunter Einfluss auf das heutige Erscheinungsbild der Flechtwerksteine ausgeübt haben. Es soll an dieser Stelle auf die wichtigsten Einflüsse eingegangen werden.

2.4.1 *Klima in Müstair*

Müstair liegt im Bereich des Inneralpinen Klimatyps, der sich durch eine relativ geringe Anzahl von jährlichen Niederschlagstagen, geringer Wolkendichte und Nebelhäufigkeit auszeichnet. In diesen Zonen herrscht allgemein eine niedrige relative Luftfeuchte, die oft auf bis unter 15% absinkt. Im Winter herrschen niedrige Temperaturen. Das niedrigste Monatsmittel liegt bei $-3,5^{\circ}\text{C}$. Die mittlere Jahresschwankung beträgt 18°C , was als große Schwankung anzusehen ist. Die Globaleinstrahlung ist sehr hoch und das Monatsmittel im Juli beträgt 220 W/m^2 . Die Lufttemperatur im wärmsten Monat ist sehr hoch. Der Jahresniederschlag im Münstertal beträgt 700 bis 800 mm.⁴⁰

2.4.2 *Baugebundene Einflüsse im Kloster*

Seit der Erbauung des Klosters wurden, häufig nach Bränden oder Zerstörungen, zahlreiche Bauveränderungen vorgenommen.

Der Plantaturm wurde auf die Ruine des abgebrannten karolingischen Gebäudes nördlich vor den Kirchen-Nordannex gebaut. Vermutlich hat dieser Brand auch die

³⁹Freundliche mündliche Mitteilung von Martina Nicca (8.9.2008, 14 Uhr).

⁴⁰Zoller, Heinrich: Über die naturräumlichen Voraussetzungen im Umkreis des Klosters St. Johann in Müstair (2008), Seite 23.

Kirche des Klosters in Bereichen beschädigt.⁴¹ 1499 gab es einen großen Klosterbrand, dem eine spätgotische Erneuerungsphase folgte.⁴² Brände haben an einigen der Flechtwerksteine Spuren in Form von Verfärbungen hinterlassen. Doch andere bauliche Einflüsse haben das heutige Erscheinungsbild der Steine noch stärker beeinflusst:

In den Winkel östlich des Plantaturms und nördlich des Nordannexes existierte ein ummauerter Hof, von dem aus die Treppe zum Hocheingang des Plantaturms gestanden haben muss. In der Nordostecke des Hofes befand sich eine 2,5m tiefe Zisternengrube und ein Kanal, über welchen vermutlich Dachwasser von der Klosterkirche hergeleitet wurde. Salze, die in den dort gefundenen Steinen vorlagen, zeugen davon.

In der Heiligkreuz-Kapelle gibt es Hinweise darauf, dass eine Chorschrankenanlage existiert hat. Abdrücke finden sich in alten Mörtelgussböden. Auch hier ist ein Teil der Decke einem Brand zum Opfer gefallen.⁴³

Als weitere baubedingte Ursachen ist zu nennen, dass einige Steine als Spolien in einer Räucherammer oder neben einem Backofen verbaut wurden.

2.4.3 *Naturkatastrophen*

Das Kloster ist an einer vor Naturkatastrophen relativ geschützten Stelle im Münstertal erbaut worden. Es wird vermutet, dass das Kloster in Müstair und seine Umgebung von Murgängen mit grobblockigem Geschiebe weitgehend verschont geblieben ist. Normale Überschwemmungen des Valarola-Bachs sind dagegen durchaus möglich gewesen.⁴⁴

2.5 **Gesteinseigenschaften des Laaser Marmor**

Die vorliegenden karolingischen Flechtwerksteine sind nach dem heutigen Kenntnisstand sämtlich aus Laaser Marmor hergestellt.⁴⁵ Marmor ist ein kristallines Metamorphitgestein aus Calcit.

⁴¹Sennhauser, Hans Rudolf; und Mitarbeiter: Müstair, Ausgrabung und Bauuntersuchung im Kloster St. Johann (2003), Seite 38, 42.

⁴²Sennhauser, Hans Rudolf; und Mitarbeiter (2003), Seite 43.

⁴³Goll, Jürg: Bau und Gestalt der Heiligkreuzkapelle (2002), Seite 172.

⁴⁴Trümpy, Rudolf: Zur Geologie des Münstertals (2008), Seite 21.

⁴⁵Roth-Rubi, Katrin; Sennhauser, Hans Rudolf: Karolingische Flechtwerkskulptur - Katalog der Stücke aus Müstair, Schänis und aus dem Tessin (Stand März 2007), Seite 5.

2.5.1 Allgemeine Gesteinseigenschaften von Laaser Marmor

Der Laaser Marmor ist ein fast reinweißes mittelkörniges Karbonatgestein, das im Laaser Tal im Vinschgau, südlich von Laas abgebaut wird.⁴⁶ Auf der Südseite des Etschtales gibt es zwei Brüche, in denen das Material gebrochen wird.⁴⁷ Der Laaser Marmor ist ein beliebtes Bildhauergestein und wird auf der gesamten Welt verwendet. Auch in Berlin und München finden sich zahlreiche Beispiele dafür. Ein von zahlreichen Beispielen in Berlin ist die Helmholtz-Statue von Ernst Herter vor der Berliner Humboldt-Universität, eines aus München sind die Löwen vor der Feldherrenhalle in München⁴⁸. Er ist ebenso reinweiß und kristallin wie der Carrara-Marmor, ist jedoch sehr viel härter und widerstandsfähiger.

Mineralbestand

Der Laaser Marmor besteht zu 98 bis 99 Prozent aus Calcit, als Nebengemengteile besitzt er Dolomit, Hell- und Dunkelglimmer, Quarz, Aktinolit (Tremolit), sowie akzessorisch Pyrit, Rutil, Zirkon und Sphen.⁴⁹

Physiko-mechanische Eigenschaften

Die folgenden Angaben zu den physiko-mechanischen Eigenschaften von Laaser Marmor wurden der Literatur entnommen. Im praktischen Teil dieser Arbeit wurde ein Teil dieser Eigenschaften an bruchfrischem Probematerial ermittelt. Die Ergebnisse stimmten mit den genannten Werten überein. (Die ermittelten Werte finden sich im Anhang.)

Die Reindichte (nach DIN 52102 von 1988 als Dichte bezeichnet) ist der Quotient aus dem Gewicht und dem Volumen des Steingerüstes. Sie beträgt 2,72 g/cm³.

Die Rohdichte (nach DIN 52102 von 1988 als Trockenrohddichte bezeichnet) ist der Quotient aus dem Gewicht und dem Volumen des Steingerüstes einschließlich dem Porenraum und beträgt 2,71 g/cm³.

Die Haftzugfestigkeit: ist ein Maß für den Grad der Kohäsion des Mineralverbandes. Die Haftzugfestigkeit von Laaser Marmor beträgt 5,3 MPa, der Wert von Carrara-Marmor liegt dagegen bei nur 3,5 MPa.

⁴⁶Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W.: Experimentelle Untersuchungen zum Verwitterungsverhalten des Laaser Marmors in alpiner Umgebung (1996), Seite 67.

⁴⁷Poschod, Klaus: Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluß auf die Verwitterung (1990), Seite 16.

⁴⁸http://de.wikipedia.org/wiki/Laaser_Marmor (27.2.2009, 22 Uhr).

⁴⁹Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W. (1996), Seite 67.

Die einaxiale Biegezugfestigkeit beträgt, je nach angewandtem Verfahren und verwendetem Gerät zwischen 11,9 und 19 MPa. Die zweiaxiale Biegezugfestigkeit beträgt 17,3 MPa. Beide Werte fallen hier etwas geringer aus als die des Carrara-Marmor (Einaxial: 13,5 - 19,8 MPa, zweiaxial: 18,6 MPa).

Die Druckfestigkeit beträgt, je nach angewandtem Verfahren und verwendetem Gerät, zwischen 82 und 122 MPa.⁵⁰

Porenraumgefüge

Die Gesamtporosität von Laaser Marmor beträgt etwa 0,7 Vol%⁵¹. Damit ist er als sehr dichtes Gestein anzusehen. Der Porenraum besteht bei Marmoren im allgemeinen aus Porenkanälen, die vollständig miteinander verbunden sind. Isolierte Poren, wie Sackporen, treten so gut wie nie auf.⁵²

Poren liegen bei Marmoren in Form von Hohlräumen zwischen den Mineralen (intergranulare Porosität) oder als Hohlräume innerhalb der Minerale (intragranulare Porosität) vor. Erst bei verwitterten Marmoren treten Risse, Kluftporositäten und kavernöse Porositäten durch verwitterungsbedingte Auslaugung auf.⁵³ Marmore besitzen daher im allgemeinen fast ausschließlich Plattenspaltporen, die sehr großflächig, jedoch geringmächtig sind.⁵⁴ Die Spaltporen haben fast immer planparallele sich gegenüberliegenden Porenwände.⁵⁵ Die mittels Quecksilberporosimetrie ermittelte Poreneingangsradienverteilung ergeben Maxima bei 0,1µm und 100µm⁵⁶, nach Poschlod bis 45µm. Diese großen Porenradien sind jedoch nicht im Mikroskop zu beobachten. Sie resultieren daraus, dass bei der Quecksilberporosimetrie die Radien von Zylinderporen ermittelt werden, in der Praxis jedoch Plattenspaltporen vorliegen. Durch deren Großflächigkeit werden große Porenradien vorgetäuscht.⁵⁷ Die mittels Quecksilberporosimetrie ermittelten Ergebnisse sind daher für Marmore und auch für Granite nicht geeignet bzw. müssen im Zusammenhang mit der Mikroskopie

⁵⁰Poschlod, Klaus (1990), Seite 25-27.

⁵¹Abhängig von der Messmethode: mit Quecksilberporosimetrie: 0,73Vol.%, mit der Auftriebsmethode 0,54Vol.% ; Poschlod, Klaus (1990), Seite 19.

⁵²Poschlod, Klaus (1990), Seite 18.

⁵³Poschlod, Klaus (1990), Seite 18.

⁵⁴Poschlod, Klaus (1990), Seite 22.

⁵⁵Simon, Stefan: Zur Verwitterung und Konservierung kristallinen Marmors (2001), Seite 21.

⁵⁶Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W. (1996), Seite 67.

⁵⁷Poschlod, Klaus (1990), Seite 22.

ausgewertet werden.

Die Frostbeständigkeit wird anhand des Hirschwaldkoeffizienten angegeben.⁵⁸ Auch wenn der Laaser Marmor mit einem Wert von 0,75 nicht mehr als frostbeständig gelten dürfte, wird er im Vergleich mit anderen Marmorsorten als frostbeständig angesehen.⁵⁹

Kornform, Korngröße und Korngrößenverteilung

Anders als bei Carrara-Marmor handelt es sich bei Laaser Marmor um ein mittelkristallines Gestein, das als witterungsbeständig und hart gilt. Die durchschnittliche Korngröße beträgt 1,1mm.⁶⁰ Die mittlere Korngröße liegt bei etwa 400µm. Der Laaser Marmor besitzt ein überwiegend equigranulares Korngefüge. In einigen Bereichen können die Korngrößen jedoch variieren. Der Laaser Marmor gilt als granoblastisch, das heißt, die Minerale sind überwiegend isometrisch.⁶¹ Das Gefüge des Laaser Marmor zeigt eine geregelte bis mehr oder weniger richtungslos-körnige Textur.⁶²

Kornbindung und Kornkontakte

Marmore sind metamorphe Gesteine, bei denen die Körner direkt ohne Bindemittel durch sogenannte unmittelbare Kornbindung“ miteinander verwachsen sind. Einer wichtiger Parameter bei der Marmorverwitterung ist die Stärke der Verzahnung der Kristalle untereinander, die großen Einfluss auf die Festigkeit des Gefüges ausübt. Die Verzahnung lässt sich anhand des „Formfaktors“ angeben, einem dimensionslosen Wert, der unabhängig von der Korngröße ist. Je größer die Verzahnung eines Gesteins ist, und somit die Festigkeit, desto niedriger ist der Formfaktor. Laaser Marmor weist den verhältnismäßig niedrigen Wert von 0,59 auf, seine Verzahnung ist damit sehr hoch. Carrara-Marmor hat einen Formfaktor von 0,72 und ist damit weniger gut verzahnt.⁶³

⁵⁸Der Hirschwaldkoeffizient S errechnet sich aus der Porosität und dem maximalen Sättigungskoeffizienten, und beträgt bei Laaser Marmor 0,75; zwischen 0,86 und 0,89 gelten Gesteine als frostbeständig.

⁵⁹Simon, Stefan (2001), Seite 23.

⁶⁰Poschod, Klaus (1990), Seite 16.

⁶¹Rüdrich, Jörg Michael: Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore (2003), Seite 32.

⁶²Sheremeti-Kabashi, Flurije: Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Carrara-Marmor und deren Einfluss auf die Verwitterung (2002), Seite 15.

⁶³Grimm, Wolf-Dieter: Beobachtungen und Überlegungen zur Verformung von Marmorobjekten durch

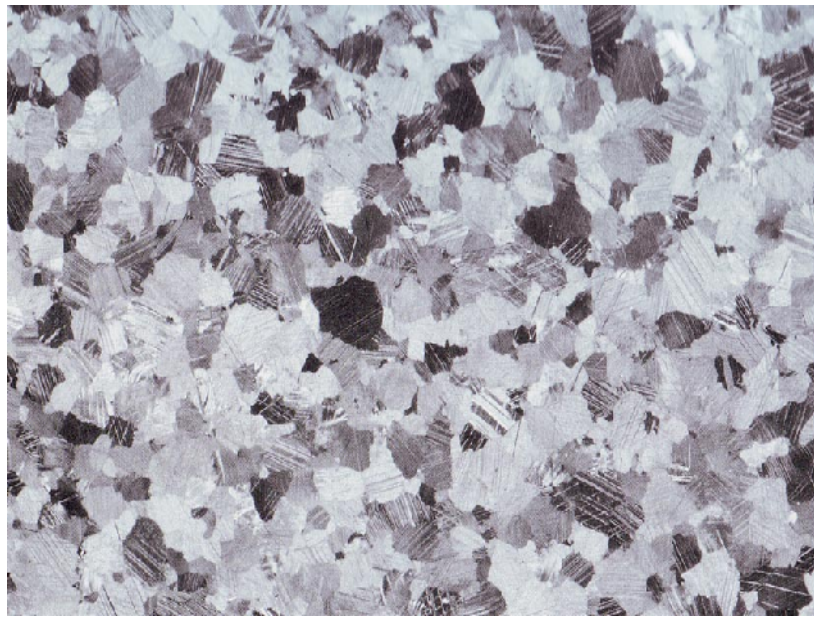


Abbildung 8: Dünnschliff aus Laaser Marmor unter dem Polarisationsmikroskop (Bildausschnitt 1,7cm x 1,1 cm).

Phasengrenzflächen

Für die Kenntnis eines Gesteins sind die Vorgänge an den Phasengrenzflächen sehr entscheidend. Entlang der Phasengrenzflächen zwischen Porenraum und Festkörper (Mineralkorn) entsteht ein Bereich, indem sich eine eigene Grenzschichtphase bildet, die andere Eigenschaften als die freien Phasen ausweist. Die an jeder Phasengrenze auftretenden unausgeglichene Energieverhältnisse in den äußersten Atom- und Moleküllagen bedingen die Ausbildung von Oberflächenpotentialen. Thermodynamisch betrachtet werden diese als freie Grenzflächenenthalpie definiert. Die Vorgänge an den Grenzflächen sind relevant für die Trocknungsvorgänge, den Feuchtehaushalt in kleinen Poren, aber auch für die Anbindung von Festigungsmitteln.⁶⁴

Grundlage zur Ausbildung von Hydrathüllen sind die Dipoleigenschaften des Wassers. Zwischen den Mineralpartikel bilden sich hintereinander verschiedene Wasserschichten aus.

An der Festkörperoberfläche bildet sich die sogenannte STERN-Schicht, bei der das Wasser als feste Wasserhülle um die Minerale liegt. Das gebundene Wasser der STERN-Schicht wird erst bei Temperaturen von 140 bis 350°C abgegeben.⁶⁵

Daran grenzt die GOUY-CHAPMAN-Lage, bei der das Wasser als diffuse Doppelschicht Gefügauflockerung (1999), Seite 201.

⁶⁴Poschlod, Klaus (1990), Seite 28.

⁶⁵Poschlod, Klaus (1990), Seite 28.

vorliegt. Diese Schicht stellt den Übergangsbereich von festgebundenem Wasser zum freien Porenwasser dar. Bei Temperaturen von 100 bis 140°C wird dieses Wasser abgegeben.

Das freie Porenwasser kann bereits bei einer Temperatur von 30°C abgegeben werden. Bei 105°C liegt kein freies Porenwasser im Gestein mehr vor. In der Literatur heißt es, dass sich das Vorkommen von freiem Porenwasser auf Poren $> 0,1\mu\text{m}$ beschränkt.⁶⁶

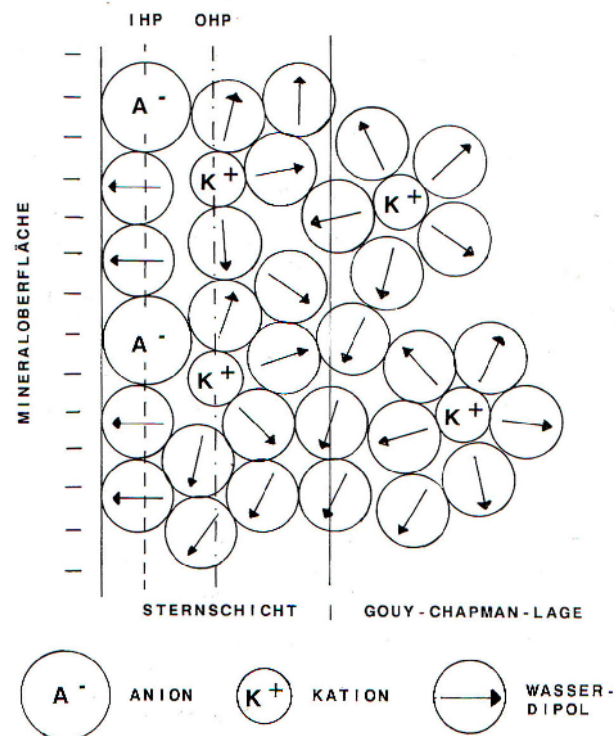


Abbildung 9: Aufbau der Hydrathüllen.

Das Zetapotential

Das Zeta-Potential ist das Potential in der Grenzfläche zwischen mobilem Teil und immobilen Teil der GOUY-CHAPMAN-Lage. Sehr hohe Zeta-Potentiale bewirken eine Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten in Mikroporen. Das Zeta-Potential ist messbar. Bei Laaser Marmor beträgt der Wert $-13,9\text{mV}$ und ist damit weniger negativ als das von Carrara-Marmor oder silikatisch gebundenen Graniten.⁶⁷ Das Zeta-Potential steigt bei verwittertem Laaser Marmor noch weiter an, was auf eine partielle Mineralumwandlung zurückzuführen ist. Damit geht eine verlangsamte Wassermigration in kleineren Poren einher.

⁶⁶Poschlod, Klaus (1990), Seite 28.

⁶⁷Poschlod, Klaus (1990), Seite 33, 48.

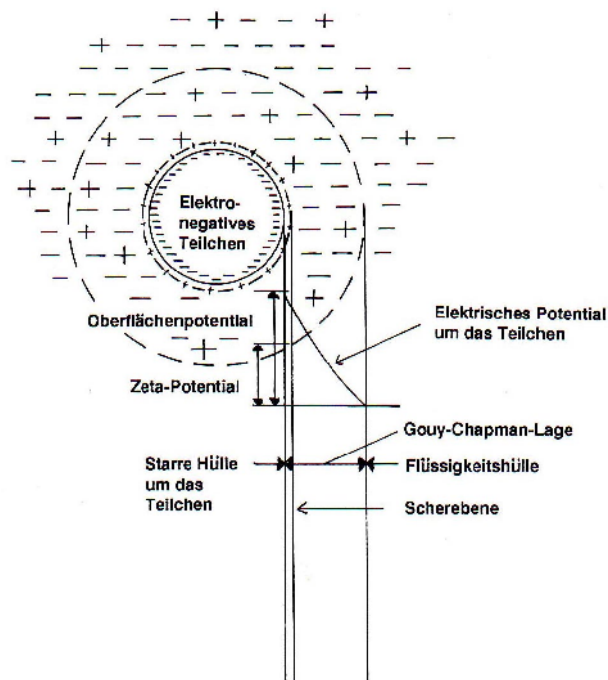


Abbildung 10: Entstehung des Zeta-Potentials am Beispiel eines Kolloidteilchens.

Feuchtehaushalt

Der w-Wert (Wasseraufnahmekoeffizient) von unverwittertem Laaser Marmor wurde mit 0,007 kg/m² √h und der B-Wert (Wassereindringkoeffizient) mit 1,7 mm/√h angegeben. Letzterer Wert ist, verglichen mit Sandsteinen, die ähnliche w-Werte aufweisen, als sehr hoch anzusehen. Der Grund dafür liegt in der Wirkung der Plattenspaltporen.⁶⁸

Anisotropie

Die Druckeinwirkung während der Metamorphose führte zu einer anisotropen Orientierung der Calcitkristalle und damit des Gesteines. Die Anisotropie kann mathematisch mit einer Kugel erklärt werden. Die drei senkrecht aufeinander stehenden Achsen x, y und z sind die Hauptverformungsachsen. Bei Deformation führt das modellhaft beschrieben zu einer Ellipsenform, die z-Achse verkürzt sich dabei, während die x die längste Achse und die y-Achse die mittlere ist.⁶⁹

⁶⁸Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W. (1996), Seite 70.

⁶⁹Fimmel, Romana, Weber, Johannes, Bayer, Karol, Mirwald, Peter W.: Preliminary results after a short term exposure of marble samples from Laas and Sterzing (Alps, N-Italy) (1995), Seite 3, 4.

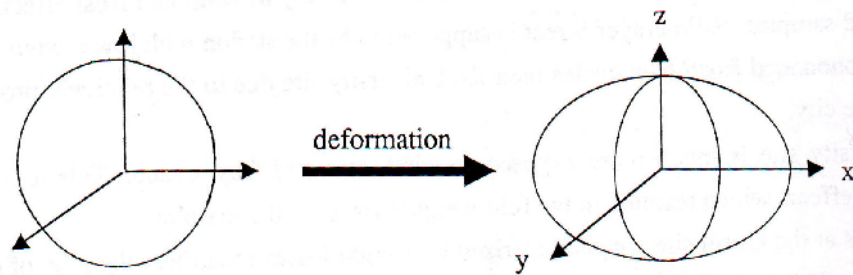


Abbildung 11: Veranschaulichung der Anisotropie anhand von Kugel und Ellipse.

Aufgrund der Anisotropie der Calcitkörner ist der thermische Ausdehnungskoeffizient bei Marmoren von besonderer Bedeutung. Bei einer Temperaturzunahme dehnt sich das Kristall in einer Richtung aus und zieht sich in den senkrecht dazu liegenden Richtungen zusammen. Dieses Verhalten führt zu Spannungen, die eine Auflockerung des Korngefüges mit sich führt. Die kristallographische Orientierung im Gestein ist daher sehr entscheidend für das Verwitterungsverhalten des Marmors. Wenn die stark anisotropen gesteinsbildenden Minerale, in diesem Fall die Calcitkristalle, eine Vorzugsorientierung aufweisen, zeigt das Gesamtgestein eine intrinsische (von innen herkommende) Anisotropie.⁷⁰ Der Anisotropiekoeffizient wurde anhand einer Marmorkugel ermittelt und beträgt 0,3. Durch thermische Belastung vergrößerte sich der Koeffizient auf 0,8⁷¹. Der Anisotropie wird aus der minimalen und der maximalen Ultraschallgeschwindigkeit berechnet:

$$V_{\max} - V_{\min} / V_{\text{mean}}$$

Der hohe Anisotropie-Effekt entspricht aber nicht dem hohen Grad der Orientierung von Calcitkristallen, da er durch Dichteinhomogenitäten und die Änderungen der Korn-Korn-Kontakte durch die Verwitterung zustande kommt.⁷²

⁷⁰Sheremeti-Kabashi, Flurije (2002), Seite 43.

⁷¹Sheremeti-Kabashi, Flurije (2002), Seite 96.

⁷²Sheremeti-Kabashi, Flurije (2002), Seite 96.

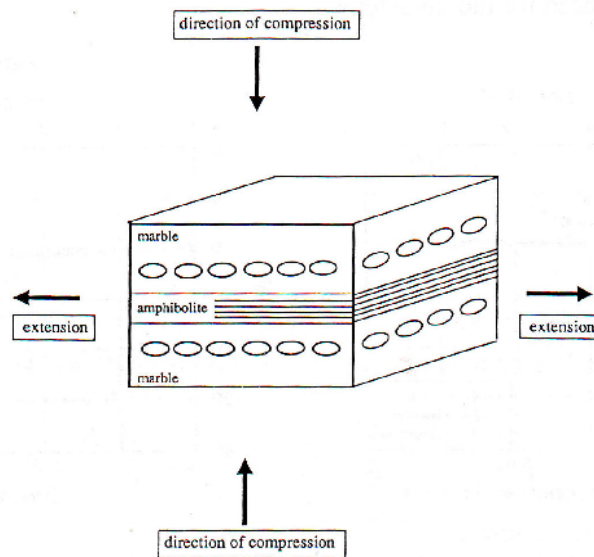


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Druckwirkung.

2.5.2 Verwitterungsmechanismen von Laaser Marmor

Die häufigste Verwitterungsart bei Laaser Marmor ist Riss- und Schalenbildung. Weitere typische Schäden sind auch das Abbröckeln, Absanden (auch Abzuckern oder Abgrusen). Beim Absanden handelt es sich um einen Zerfall in sichtbare Einzelkörner. Bröckeln ist das Ausbrechen des Gesteins in kompakte unregelmäßige Partikel in Größenordnungen von Millimetern bis hinzu Zentimeter-großen Stücken. Dieser Vorgang ist durch Risse im Gefüge bedingt. Bei Laaser Marmor ist vorherrschend ein Abzuckern Korn für Korn zu beobachten, weniger häufig findet sich ein Aufbrechen der Körner in sich. Schalenbildung im Anfangsstadium ist bei Marmoren kaum sichtbar. Im Gegensatz zu Carrara-Marmor, der kontinuierlich Substanz verliert, ist bei Laaser Marmor zunächst nichts zu beobachten. Es bilden sich Risse und die erste Kristallschicht platzt ab. Dann erst führt die nun größere Oberfläche zu progressiver Verwitterung.⁷³

Auch Verfärbungen durch Mobilisierung organischer und anorganischer Gesteinsbestandteile durch Luftsauerstoff und Wasser treten sehr häufig auf.

Verwitterung an den Korn-zu Kornkontakten

Das Gestein kann bei einem Verwitterungsangriff sowohl an den Kornkontakten, als auch quer durch die Körner hindurch aufbrechen. Während bei frisch gebrochenem Marmor beide

⁷³Poschlod, Klaus (1990), Seite 45, 46.

Möglichkeiten bestehen, führen chemische und physikalische Angriffe bei verwittertem Marmor zu einer Entfestigung des Kornverbandes, sodass ein Aufbrechen vorwiegend an den schwachen Kornbindungen erfolgt⁷⁴.

Aufgrund der Gesamtlänge der Korn zu Kornkontakte bei Angriffen, die entlang der Korngrenzen verlaufen, bieten feinkörnige Marmore eine größere Angriffsfläche. Der mittelkörnige Laaser Marmor gilt diesbezüglich als witterungsbeständiger.

Durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Körner, speziell durch die Anisotropie des Calcits,⁷⁵ kann sich der Kornverband lockern.

Durch den Eintrag von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen jeglicher Art ändert sich Oberflächenladung. Das Zetapotential von verwittertem Marmor kann sich verdoppeln. Das beeinflusst die Adhesivkräfte negativ und führt ebenfalls zu einer Gefügauflockerung.

Chemisches Verhalten

Die durch Säureeinwirkung bedingten Lösungsprozesse von Calcitkristallen sind sehr komplex. Sie verlaufen in Abhängigkeit von der Konzentration des Lösungsmittels, dem pH-Wert, der Temperatur und dem Kristallgefüge. Besonders relevant ist bei allen Carbonatgesteinen der Verwitterungsangriff durch Kohlensäure. Aggressive Niederschläge mit hohem CO₂ - Gehalt bedingen, dass Carbonate als Bicarbonate gelöst werden. Dem Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht entsprechend kann damit eine Wiederausfällung (Versinterung) von Calcit an einer anderen Stelle verbunden sein. Dies kann zu einer Schalenbildung beitragen.⁷⁶

Bei frischen Marmoren bewirkt dies, dass die Oberfläche der außen exponierten Marmorwerksteine und Denkmäler in absehbarer Zeit rau wird und ihre Politur verliert. Nach längerer Zeit wird die Oberfläche mit einem Relief überzogen sein, bei dem Strukturen und Texturen, die durch die Bearbeitung der Oberfläche unkenntlich geworden sind, wieder herauspräpariert werden. Wege in das Gesteinsinnere können freigelegt werden, wodurch der Lösungsangriff zusätzlich verstärkt werden kann. Diese Gesteinskorrosion wurde an verschiedenen Orten und auf verschiedene Weise ermittelt. Insgesamt streuen die Korrosionsraten durch Lösung und oberflächliche Entfestigung zwischen 1µm und 100 µm pro Jahr, was eine Rückwitterung von 0,1 mm bis 10 mm pro Jahrhundert bedeutet. Bei entfestigten Marmoren mit erhöhtem Wasserdurchsatz im aufgebrochenen Gefüge können die Lösungsvorgänge auch gesteinsintern zur

⁷⁴Grimm, Wolf-Dieter (1999), Seite 199.

⁷⁵Poschod, Klaus (1990), Seite 49.

⁷⁶Grimm, Wolf-Dieter (1999), Seite 206.

Erweiterung der Poren führen und damit zusätzlich zu einer Lockerung des Kristallverbandes beitragen.⁷⁷

Porenraumabhängige Eigenschaften

Entscheidend für das Verwitterungsverhalten sind auch die porenraumabhängigen Eigenschaften eines Gesteins.

Die Gesamtporosität bei frischen Marmoren liegt unter 1 Vol. %, sodass Einwirkungen des Porenwassers auf das Gefüge gering bleiben. Dagegen kann die Porosität bei verwitterten Marmoren durch Gefügauflockerung auf bis zu 10 Vol. % ansteigen. Damit wird die Gesteinsfestigkeit stark herabgesetzt und die verwitternde Wirkung des Wassers oder der Salze im Porenraum kann sich beträchtlich erhöhen.

Die Porengrößenverteilung beeinflusst die Permeabilität gegenüber Flüssigkeiten und Gasen, sowie den Ablauf von Eis- und Salzkristallisation im Gefüge und deren gefügesprengende Wirksamkeit. Bei frischen Marmoren überwiegen Mikroporen und feine Kapillarporen. Verwitterte Marmore weisen zunehmend grobe Kapillarporen auf.⁷⁸

Im Porenraum zirkulierende Salzlösungen verteilen sich gleichmäßiger Durchfeuchtung, wobei die Salzkonzentration im Marmor weitgehend einheitlich ist.

Bei einem Trocknungsvorgang verdunstet das Wasser im Oberflächenbereich unter Ausbildung von Salzen. Nachdem die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge durch Kapillartransport nicht mehr nachgeliefert werden kann, verlagert sich die Verdunstungszone nach innen und das verdunstende Wasser wird durch Dampfdiffusion nach außen abtransportiert. Dies bewirkt eine Salzkonzentration im Porengefüge. Bei einem erneuten Befeuchtungsereignis wird weniger konzentriertes Wasser eingebracht. Durch Ionendiffusion stellt sich nach einer gewissen Zeit ein Konzentrationsgleichgewicht ein. Die so entstehende Migration führt zu Änderungen des Oberflächenpotentials der Körner und führt zu Störungen der Haftungsverhältnisse im Kornverband.⁷⁹

Mit zunehmendem Wassergehalt ist ein Abfall des E-Moduls zu verzeichnen. Auch die Biegezugfestigkeit wird durch Feuchtigkeit herabgesetzt. Die einzelnen Bestandteile zerfallen in feuchtem Zustand leichter in ihre Einzelbestandteile als in trockenem Zustand.⁸⁰

Das ungünstige Verhältnis von großen Porenradien (45µm) zu einem relativ kleinen

⁷⁷Grimm, Wolf-Dieter (1999), Seite 206.

⁷⁸Grimm, Wolf-Dieter (1999), Seite 199.

⁷⁹Poschlod, Klaus (1990), Seite 49.

⁸⁰Grimm, Wolf-Dieter (1999), Seite 199-207.

Porenraum führt zu einem schnellen und tiefen Eindringen in das Innere des Gesteins, da Wasser nicht von einem größeren Porenraum oder einer Adsorberfläche zurückgehalten werden kann. Dabei umspült das Wasser, das Schadstoffe enthält, die einzelnen Mineralkörner und stört die Haftungskräfte der Körner untereinander. Bei Laaser Marmor ist dies jedoch eher selten die Ursache für Abgrusen.⁸¹

Mikrobiologie

Bewuchs durch Algen, Pilze, Flechten und andere Organismen kann die oberflächliche und die subkutane Korrosion des Marmors erheblich beschleunigen. Dabei treten Gesteinszerstörungen nicht nur durch Lösungsangriffe, sondern auch durch mechanisches Aushebeln der Calcitkristalle auf.

Vollständige Strukturzerstörung

Bei langanhaltender Schädigung kann der Kornverband vollkommen zerstört werden, bis hin zum Zerfall zum Einzelkristall. Dieses Phänomen wird auch als Verzuckerung bezeichnet. Mitunter wird das Objekt dann nur noch durch eine außen aufgewachsene Kruste oder durch eine dünne verfestigte Gesteinshaut gehalten. Dieses Phänomen ist sowohl bei überdacht gelagerten Marmorobjekten als auch bei freistehenden aufgetreten.⁸²

Verwitterungsverhalten in Abhängigkeit vom Klima

Bei nasser Exposition waschen Regen und darin gelöste Säuren die oberflächennahen Strukturen aus. Bei trockener Exposition hingegen werden SO₂, NO_x, Chloride, Ruß- und Flugaschepartikel zunächst auf der Oberfläche akkumuliert. An regengeschützten Partien können sich so Schmutzschichten aus Carbonaten, Sulfaten, Staub, Flugasche, Ruß und anderen Substanzen bilden. Diese setzen meist die Wasserdampfdiffusion herab. Ultraschallmessungen an trocken exponierten Probekörpern ergaben mitunter sogar einen Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit, was auf die Verdichtungen durch Krusten an der Oberfläche zurückzuführen ist.⁸³ Eine verdichtete Kruste kann zu einem Feuchtigkeitssprung führen. Zusammen mit Temperaturschwankungen treten in der Grenzzone Spannungen auf, so dass sich entfestigte Mürbzonen unterhalb der Schmutzkruste bilden. Zusätzlich kann dies eine Feuchteübersättigung im Innern bewirken. An der Oberfläche ist dies zunächst nur in Form von Rissen zu erkennen, da erst nach gewisser Zeit die Schalen oberflächenparallel abplatzen.⁸⁴

⁸¹Poschlod, Klaus (1990), Seite 49.

⁸²Grimm, Wolf-Dieter (1999), Seite 206/207.

⁸³Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W. (1996), Seite 70.

⁸⁴Poschlod, Klaus (1990), Seite 50.

Durch Einwirkung von Nebel, Tau, Luftfeuchte oder Gesteinsfeuchte wird durch chemische und physikalische Prozesse die Gesteinszerstörung in Gang gesetzt. Freibewitterungsversuche mit Probekörpern aus Laaser Marmor ergaben, dass sich bei trockener Exposition vor allem Kornverlust, aber auch Anlagerung von exogenem Material, wie Biomasse, Staub und Ruß zeigen. Die Abtragmasse bei exponierten Probekörpern scheint mit zunehmender Expositionsdauer abzunehmen.⁸⁵

In einer Verwitterungssimulation wurde herausgestellt, dass die Luftfeuchte bei der Schadstoffaufnahme aus der Luft eine entscheidende Rolle spielt. Eine Erhöhung um 18 % von 62 % auf 80 % rel. LF. steigerte die Bildungsrate von Sulfat um das drei- bis sechsfache und die Bildung von Nitrat um das sechs- bis sechzehnfache. Bei einer Luftfeuchte von 80 % kommt es zu Kondensation in den Poren, womit die Schadstoffaufnahme in das Gestein erhöht wird.⁸⁶

Die Nebengemengteile des Laaser Marmors

Da die im Gestein enthaltenen Nebengemengteile durch Lösungsvorgänge zur Entstehung von Verfärbungen eine wichtige Rolle spielen können, sollen sie an dieser Stelle kurz tabellarisch erläutert werden.

Außerdem enthält der Laaser Marmor weitere Minerale akzessorisch.

⁸⁵Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W. (1996), Seite 68 und 69.

⁸⁶Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W. (1996), Seite 71.

Name	Chemische Formel	Eigenschaften	Farbe
Dolomit ⁸⁷	CaMg(CO ₃) ₂	Chemischen Aggressoren gegenüber beständiger als Calcit	weiß, hellgrau, schmutzig-braun, cremefarben, gelblich oder rötlich
Glimmer ⁸⁸	theoretische Formel K (Mg, Al, Fe, Cr) ₂₋₃ (OH,F) ₂ (Fe, Al)Si ₃ O ₁₀ .	Gruppe von Mineralen mit blättrigem Habitus; die gebundenen Metalle sind dabei beliebig austauschbar, Glaukonit, verursacht als erdiges Glimmermaterial als Verwitterungsprodukt eine Grünfärbung im Gestein	Biotit (mit Eisen): dunkelbraun bis tiefschwarz Muskovit (mit Kalium und Fluor): silberglänzend Serizit (mit Kalium): dezent bläulich, grünlich oder grau Phengit (mit Kalium und Eisen): hellgrün schimmernd Phlogopit (mit Magnesium): hellbraun bis violett
Quarz ⁸⁹	SiO ₂	neben den Feldspäten das häufigste Mineral der Erde	meist farblos oder blass gelb bis rot
Tremolit , Aktinolith ⁹⁰	Ca ₂ (Mg,Fe ²⁺) ₅ [O H Si ₄ O ₁₁] ₂ ,	Bandsilikate aus der Gruppe der Calciumamphibole	

Tabelle 2: Die Nebengemengteile des Laaser Marmor, ihre chemische Zusammensetzung und ihre Farbigkeit.

Name	Chemische Formel	Farbe
Pyrit, Markasit ⁹¹	Eisen-Sulfide FeS ₂ .	metallisch oder schwarz
Rutil. ⁹²	Titanoxid	rot, gelb und schwarz gefärbt
Zirkon ⁹³	ZrSiO ₂	rosafarbene, braune oder rote Körner
Sphen, auch Titanit ⁹⁴	CaTiOSiO ₄ .	kräftig honiggelbe Kristalle

Tabelle 3: Akzessorische Bestandteile des Laaser Marmors, ihre chemische Zusammensetzung und Farbigkeit.

⁸⁷Müller, Friedrich: Gesteinskunde – Lehrbuch und Nachschlagewerk über Gesteine für Hochbau, Innenarchitektur, Kunst und Restauration (1994), Seite 29.

⁸⁸Müller, Friedrich (1994), Seite 34.

⁸⁹Müller, Friedrich (1994), Seite 30.

⁹⁰<http://de.wikipedia.org/wiki/Aktinolith> und <http://de.wikipedia.org/wiki/Tremolit> (22.August 2008, 9Uhr)

⁹¹Müller, Friedrich (1994), Seite 39.

⁹²Müller, Friedrich (1994), Seite 42.

⁹³Müller, Friedrich (1994), Seite 36.

⁹⁴Müller, Friedrich (1994), Seite 36.

3 Bestandsaufnahme der Steine

Entsprechend der verschiedenen Umnutzung der Steine als Spolien, weisen sie sehr unterschiedliche Erhaltungszustände auf. Als erster Schritt zur Annäherung an die Erarbeitung eines Konservierungskonzeptes für die Flechtwerksteine erfolgte eine umfassende Bestandsaufnahme.

Die Untersuchung der in Müstair vorliegenden Flechtwerksteine beinhaltete, neben dem Erhaltungszustand, auch die Suche nach Fassungsresten, Kennzeichen der Bearbeitung der Steine und besondere Kennzeichen des Steinmaterials.

Die Ermittlung des Verwitterungszustandes der Steine beinhaltete vor allem die phänomenologische Erfassung der Oberflächen. Dabei werden die Oberflächen auf farbliche und geometrische Veränderungen, Anlagerungen von Fremdstoffen, sowie Materialablösungen hin untersucht.⁹⁵ Es wurde eine Excel-Tabelle angelegt, in der alle zugänglichen Fragmente mit ihren Merkmalen und dem Konservierungsbedarf eingetragen wurden. Parallel wurde ein umfassendes bebildertes Glossar entwickelt, in dem alle Merkmale fotografisch und beschreibend dokumentiert wurden.

Im Anschluss an die Untersuchung der etwa 400 Steine und Fragmente wurden einige repräsentative, im Verwitterungsbild stark verschiedene, Stücke ausgewählt und kartiert. Der Kartierungsschlüssel wurde anhand des Glossars zusammengestellt und auf diese Fragmente angewendet. Damit konnte überprüft werden, ob er sich auf alle Steine anwenden lässt. Außerdem wurden die vorliegenden Oberflächen ausführlich beschrieben.

An diesen Steinen wurden außerdem Tropfentests auf den verschiedenen Oberflächenaufgaben durchgeführt.

Im Anschluss an die visuelle Untersuchung wurden Proben von Salzen, Krusten und Auflagen genommen.

3.1 Untersuchung der 400 Steine und Steinfragmente

3.1.1 *Bebildertes Glossar*

Um einen Überblick über vorliegende Phänomene zu erhalten, wurde ein bebildertes Glossar erstellt. (Das Glossar befindet sich im Anhang).

⁹⁵Fitzner, Bernd; Heinrichs, Kurt; Kownatzki, Ralf: Klassifizierung und Kartierung (1995), Seite 42.

Das Glossar wurde in die Obergruppen Bearbeitungsspuren, Polychromie, Gesteinsabhängige Merkmale, Kennzeichnungen durch Umnutzung, Frühere Restaurierungen, Gesteinsverlust, Veränderungen der Oberfläche, Gesteinsablösung und Gesteinsrisse unterteilt. Mit diesem Glossar soll zum einen erreicht werden, Häufigkeit und Ursachen bestimmter Phänomene zu erkennen und zu verstehen. Zum anderen ist es für die weitere Arbeit an den Steinen wichtig, ein einheitliches Vokabular zu verwenden, um eindeutig zu bleiben und Missverständnisse zu vermeiden. Sollte eine Datenbank zur Konservierung der Flechtwerksteine entwickelt werden, bzw. die bestehende Datenbank um die konservatorischen Aspekte (Vorzustand, Kartierung, Maßnahmen, etc.) erweitert werden, ist es ebenfalls notwendig, eine einheitliche Sprache zu verwenden. Das Glossar orientiert sich zum Teil an der Schadensklassifizierung nach Fitzner, Bernd; Heinrichs, Kurt; Kownatzki, Ralf.⁹⁶

Gesteinsabhängige Merkmale

Die Gruppe umfasst die makroskopisch erkennbaren Gesteinsmerkmale, die Hinweise auf verschiedene Varietäten von Laaser Marmor geben. Hierbei fällt auf, dass beinahe sämtliche Steine aus einem rein weißen Marmor material gearbeitet sind. Die Kristalle sind größtenteils mittelkristallin und auch die polygonale Kristallform ist erkennbar. Nur vereinzelt finden sich auffallend feine oder größere Körner. Nur sehr wenige Steine besitzen eine dunkle oder rötliche Bänderung. An einigen Steinen sind Glimmerlagen und andere von Calcit verschiedene Minerale zu erkennen.

Vereinzelt zeigen sich texturabhängige Bruchflächen.

Bearbeitungsspuren

Diese Gruppe enthält sämtliche Arten der handwerklichen Bearbeitung und Verbindungstechniken.

Die häufigste Bearbeitungsform ist die Ausarbeitung des Dekors mit einem Eisen, das vermutlich mit dem heute bekannten Beizeisen vergleichbar ist. Die Randflächen sind mit einem zahneisenähnlichen Eisen sehr fein ausgearbeitet. Rand- und Seitenflächen, sowie Nuten, sind vereinzelt mit einem Spitzeisen ausgearbeitet. Dabei lassen sich bahn- und punktgespitzte Oberflächen unterscheiden. An sehr wenigen Stücken finden sich scharrierte Seitenflächen, wobei es sich um spätere Umarbeitungen handeln dürfte.

⁹⁶Fitzner, Bernd; Heinrichs, Kurt; Kownatzki, Ralf (1995), Seite 54 - 71.

Fast sämtliche Stücke tragen konstruktive Kennzeichen, wie Nuten und Dübellöcher, die die Stücke als Teile einer größeren Komposition, wie einer Schranke, kennzeichnen und eine Zuordnung zu einer bestimmten Bauteilgruppe ermöglichen.

Polychromie

Diese Gruppe enthält die verschiedenen Reste von Fassung. Es wurden nur sehr wenige Partikel und Hinweise gefunden, zum Beispiel drei türkisfarbene Partikel.

Bei vereinzelt roten und hellen Belägen könnte es sich ebenfalls um Fassungsreste handeln. Auf einem Fragment ist eine weiße Farbschicht zu sehen. Besonders interessant ist ein Bogenrandstück, auf dem auf einer undekorierten Oberfläche Pinselstriche in schwarz und rot zu erkennen sind.

Merkmale durch Umnutzung

Die Gruppe beinhaltet Veränderungen am Stein, die eindeutig konstruktiven Ursachen zuzuschreiben sind. Mehrere Stücke tragen die Reste von einer Eisenverbindung oder von Holz. Auch exakt rechteckige Verfärbungen deuten auf eine einbauabhängige Veränderung hin.

Frühere Restaurierungen

In der Gruppe sind Anzeichen von früheren Eingriffen aufgenommen, sofern sie eindeutig zu erkennen sind. Diese Gruppe ist nicht als vollständig anzusehen, da nicht alle Anzeichen eindeutig zuzuordnen sind. Beispielsweise sind mögliche Rückstände der Kalkwasserfestigung stattdessen in der Gruppe Oberflächenveränderung als weiße Auflage aufgelistet.

Zusätzlich finden sich Spuren von Anstrichen nach Umnutzung der Steine.

Gesteinsverlust

Die Gruppe umfasst sämtliche Verwitterungsformen, bei denen bereits ein Verlust an Gesteinsmaterial eingetreten ist, beispielsweise durch Rückwitterung, Relief und Ausbruch.⁹⁷

Veränderungen der Oberfläche

Die Gruppe bezieht alle farblichen Veränderungen, sowie Ablagerungen an der Oberfläche und im oberflächennahen Bereich mit ein und umfasst sämtliche Phänomene, wie Verfärbungen, Krusten und Auflagen. Hierbei wird eine Unterscheidung in allochthone (fremde) Stoffe, wie Staub, mikrobieller Befall und

⁹⁷Fitzner, Bernd; Heinrichs, Kurt; Kownatzki, Ralf (1995), Seite 44 - 45.

Mörtelreste, als auch autochthone (eigene) angestrebt.⁹⁸ Auch Kombinationen aus mehreren dieser Phänomene wurden aufgelistet, da so Rückschlüsse auf die Ursache gezogen werden können.

Gesteinsablösung

Diese Gruppe beinhaltet alle vorliegenden Arten von Verwitterung, die ohne konservatorische Maßnahmen zu Gesteinsverlust führen würden. Dazu zählen körniger Zerfall, Abbröckeln, Abschuppen, Abschalen, Ablösen von texturabhängigen Gesteinselementen, Ablösen von Krusten mit Gesteinsmaterial, sowie Übergangsbereiche.

Gesteinsrisse

In dieser Gruppe werden alle Arten von Rissen aufgelistet, wobei versucht wurde, die Ursache zu finden. Es wurde unter anderem zwischen texturabhängigen und die texturunabhängigen Rissen unterschieden.

3.1.2 Anfertigen einer Übersicht über die frei zugänglichen Fragmente

Alle Fragmente, die offen zugänglich auf den Tischen im Kulturgüterschutzraum lagen (etwa 400 Stück), wurden visuell untersucht. Es wurde eine Exceltabelle angelegt, in der, nach Tischen sortiert, die charakteristischen Kennzeichen und der notwendige Konservierungsbedarf eingetragen wurden. (Die Tabelle befindet sich im Anhang)

Es wurden Inventarnummer, Bauteilzuordnung (soweit vorhanden), noch vorhandener Anteil originaler Oberfläche, besondere Merkmale, damit einhergehender Konservierungsbedarf (allgemein), Polychromiereste (soweit vorhanden), die Größe der Fragmente, Werkzeugspuren und Besonderheiten im Gestein eingetragen.

Damit konnte ein Überblick über vorliegende Schäden und Kennzeichen in Hinsicht auf Häufigkeit und Zusammenhänge geschaffen werden, und der bestehende qualitative und quantitative Konservierungsbedarf ermittelt werden. Es wurde das Vokabular aus dem bebilderten Glossar verwendet. Außerdem wurde für den Konservierungsbedarf folgende Festlegung getroffen:

Ein sehr häufiges, zum Teil akutes Problem ist der Prozess des Abgrusens. Beim Abgrusen entsteht, im Gegensatz zu Lösungsvorgängen, stets ein eckiges Relief. Aus diesem Grund wurden in der Bestandsaufnahme Zonen, bei denen das Abgrusen bereits

⁹⁸Fitzner, Bernd; Heinrichs, Kurt; Kownatzki, Ralf (1995), Seite 46 - 47.

zum Stillstand gekommen, als Relief bezeichnet, während bei Bereichen mit aktivem Abgrusen entsprechend dieses Wort verwendet wurde.

Bei einigen Steinen lösen sich nur einzelne Körner ab. Bei anderen Steinen ist ein Abgrusen in größeren Bereichen zu beobachten. Hier findet unverändert ein beträchtlicher Substanzverlust statt, der dringend aufgehalten werden muss.

In der Bestandsaufnahme wurde daher zwischen "Festigen" bei leichtem Abgrusen und "dringend Festigen" bei den letzteren Steinen unterschieden.

3.2 Exemplarische Untersuchung ausgewählter Steine

3.2.1 Vorgehensweise

Einige repräsentative Fragmente wurden sehr genau beobachtet und kartiert. Es sollten Beispiele für die wichtigsten Fundortgruppen aufgezeigt werden.

Darunter befanden sich Fragmente, die unterhalb eines Abortes lagerten und immense Krustenbildung und Steinverlust zeigen, sowie eine Platte mit dazugehörigen Fragmenten, die in der Nähe eines Backofens gefunden wurde. Außerdem wurde ein Fragment untersucht, das im oberen Bereich des Mauerwerkes geborgen wurde. D

Die Steine und Fragmente wurden hinsichtlich ihres Erhaltungszustandes, dem Verlauf von Verfärbungen und Krusten und anderen Veränderungen untersucht und es wurde versucht, vorliegende Phänomene zu interpretieren. Außerdem wurde der Konservierungsbedarf kurz erläutert. (Beschreibung und Kartierungen finden sich im Anhang).

3.2.2 Beobachtungen

Es konnte beobachtet werden, dass die Fragmente, die unterhalb des Abortes lagerten, auf zweierlei Art verwittert wurden. Im Innern des Gesteins sind Gefügeflockungen an den Korngrenzen durch mechanische Drücke durch Salze aufgetreten, was sich durch den Verlust ganzer Körner äußert. Im Bereich der Oberfläche hat sich durch Fäkalien eine Kruste gebildet, und die dazwischen und darunter liegenden Körner sind durch Anlösen spaltenparallel aufgebrochen. Große Bereich der Kruste sind bereits abgängig. Die darunterliegende sekundäre Oberfläche ist relativ gleichmäßig ausgeprägt. Die Kruste scheint auf der Oberfläche aufzuliegen. Dies ist jedoch nicht der Fall, die Kruste selbst stellt bereits sekundäre Oberfläche dar.



Abbildung 13: Abgrusender Bereich, bereits bis zu 6 cm sind von der Oberfläche zurückgewittert. Der Gesteinsverlust geschieht hier in hohem Tempo, wobei sich ganze Körner aus dem Gefüge herauslösen.



Abbildung 14: Kruste aus Calciumphosphat; ein Großteil der Kruste ist bereits abgängig. Aufgrund der relativ gleichmäßigen Ausprägung der sekundären Oberfläche scheint die Kruste jedoch oben aufzuliegen. Die darunter liegenden Bereiche sind spaltenparallel angelöst.

Neben dem Zusammenhang von Fundort und Erhaltungszustand ließen sich auch einige Theorien zur Geschichte der Flechtwerksteine untermauern.

Einige Ausbrüche sind offensichtlich beim Abbruch der Steine aus ihrem ursprünglichen Lagerungsort aufgetreten. Bruchflächen an Dübellöchern deuten darauf hin, dass die Steine beim Entfernen aus der Konstruktion am Dübel gewaltsam auseinander gehobelt wurden. Zum einen belegt dies, dass die Steine tatsächlich verbaut waren, zum anderen kann geschlossen werden, dass eine Verwendung der Steine in ihrer ursprünglichen Funktion beim Abbau nicht mehr vorgesehen war.

Es gab außerdem Hinweise dafür, dass die Steine, nachdem sie von ihrem originalen Standort entfernt wurden, mehr als einen neuen Lagerungsort hatten. Beispielsweise waren Mörtelreste auf der Oberfläche und Bruchflächen in gleichem Maße wie die restliche Oberfläche verfärbt, was darauf hindeutet, dass die Steine bereits früher schon einmal aus einem Mörtelverband ausgebaut wurden.

Darauf deutet auch der grüne Lehm, der an einigen Fragmenten, die im Plantatum geborgen wurden, auf den Oberflächen vorliegt. Nach Aussage eines Mitarbeiters der Bauhütte in Müstair gab es im Plantatum keinen grünen Lehm.⁹⁹ Möglicherweise wurde er schon vorher auf die Oberflächen aufgebracht.

⁹⁹Freundliche mündliche Mitteilung von Erich Tscholl (1. Oktober 2008, 15 Uhr).



Abbildung 15: An diesem Dübelloch findet sich ein Ausbruch. Dieser ist vermutlich beim Abbruch der ursprünglichen Konstruktion durch Auseinanderhebeln der Verbindung am Dübel entstanden. Inventarnummer: M89/10'662, Bauteil: Mo 2b oder Mo 1b.

3.3 Kartierung

3.3.1 *Einleitung*

Alle Steine und Fragmente sollten vor einer weiteren Maßnahme kartiert werden. Dies dient der Dokumentation des Ist-Zustandes. Auch durchgeführte Maßnahmen sind künftig stets in einer Kartierung einzutragen. Doch zunächst ist für die Erforschung der Steine und die Ermittlung des Konservierungsbedarfes eine gute Zustandskartierung wichtig, die nicht nur Schäden und Veränderungen beinhaltet, sondern in die auch Bearbeitungsspuren, konstruktive Kennzeichen und frühere Maßnahmen müssen eingetragen werden.

Für die Flechtwerksteine sollte ein einheitlicher Kartierungsschlüssel entwickelt werden, der die zahlreichen Verwitterungs- und Schadensphänomene vollständig berücksichtigt und damit für sämtliche Flechtwerksteine anwendbar ist. Diese Vereinheitlichung soll ermöglichen, Zusammenhänge zwischen vorliegenden Schäden und den Bedingungen, unter welchen die jeweiligen Flechtwerksteine verbaut waren, zu erkennen.

Zur Erstellung des Kartierungsschlüssels und dem dazu gehörigen Schadbildkatalog wurden sämtliche im Depot offen liegende Flechtwerksteine und Fragmente betrachtet und das zu Beginn der Voruntersuchung aufgestellte Glossar einbezogen. Eine

vollständige Kartierung wurde exemplarisch an einigen ausgewählten Steinen durchgeführt, die repräsentativ für den gesamten Bestand sind (siehe 3.2).

3.3.2 Durchführung

Zur Unterscheidung von Verwitterungsformen wurden Schraffuren, Farben und Symbole verwendet. Diese wurden der genormten Kartierungsgrundlage des niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege entnommen und auf die vorliegenden Objekte abgestimmt.

Die ausgewählten Steine wurden in-situ kartiert. Dazu wurden vorliegende Zeichnungen verwendet und die fehlenden Rückseiten und Seitenflächen ergänzt. Es wurde kein Maßstab eingehalten zugunsten einer guten Einteilung auf dem A4-Blatt. Mit Transparentpapier und Buntstiften der Firma Faber Kastell, Typ Polychromos, wurde die Kartierung durchgeführt.

Es wurden drei Ebenen angefertigt:

1. Bearbeitungsspuren und frühere Restaurierungen
2. Gesteinsverlust / Gesteinsablösung / Gesteinsrisse
3. Ablagerungen / Verfärbungen

(Die Kartierungslegende und die Kartierungen finden sich im Anhang).

3.4 Salzuntersuchung

Da es sich bei den Flechtwerksteinen um archäologische Objekte von großem Wert handelt, sollte die Probenahme möglichst gering gehalten werden. Auf die Entnahme von originaler Substanz bzw. Bohrungen jeglicher Art wurde daher vollständig verzichtet, weshalb es nicht möglich war, Salzverteilungen, Konzentrationen oder Tiefenprofile zu ermitteln.

Für die Untersuchung der Salzbelastung der Flechtwerksteine konnten zwei Proben von bereits abgängigem Lockermaterial mittels Ionenchromatographie untersucht werden. Hierbei handelte es sich jeweils um stark abgrusende Bereiche.

Des Weiteren wurden Proben von einer weißen Auflage und von weißen Krusten entnommen, von einer Oberfläche entnommen, bei denen es sich möglicherweise um Salze handeln könnte. Diese Proben wurden mikroskopisch untersucht und finden sich unter Kapitel 3.5.

Ergebnisse der Ionenchromatographie

Probe Pla 24

Bei dieser Probe handelt es sich um abgängiges Material einer Volute, bei der sich noch immer Körner aus dem Verband lösen. Die Volute ist frei von Mörtelresten. Das Fundjahr ist 1985 und der Fundort ist unbekannt.



Abbildung 16: Volute Pla 24 (Inventarnummer M85/51'146) das Lockermaterial dieser Fragmente wurde für die Ionenchromatographie verwendet. Das Fragment zeigt noch immer ein sehr starkes Abgrusen.

Ergebnis:

Die Probe der Volute Pla 24 war gering mit Anionen belastet, (ca. $1,9\mu\text{mol/kg}$), der Anteil an Kationen war dagegen relativ hoch (ca. $82\mu\text{mol/kg}$), zusammen ergeben sie 0,2 Masseprozent. Mit diesem relativ gering scheinenden Wert ist die Belastung aufgrund der hohen Dichte des Marmors jedoch als stark einzustufen.¹⁰⁰ Der Gehalt ist höher als die gesamte Wasseraufnahme von unverwittertem Laaser Marmor, die unter Atmosphärendruck 0,15 Gewichtsprozent beträgt¹⁰¹.

¹⁰⁰Derzeit gibt es keinen Richtwert, ab welchem Wert ein dichtes Gestein wie der Laaser Marmor als salzbelastet gilt. Die Werte von Sandstein, beispielsweise des WTA -Merkblatt, können nicht angewendet werden.

¹⁰¹Die Bezeichnung Gewichtsprozent wurde durch die Bezeichnung Masseprozent ersetzt. Es wird nur

Die Tatsache, dass so gut wie keine von Carbonaten verschiedene Anionen vorliegen, deutet darauf hin, dass die Salze erst nach dem Fund eingebracht wurde. Es handelt sich nicht um Salze aus Bodenlage. Denkbar wäre beispielsweise eine alkalischen Reinigung zur Entfernung von Mörtelresten oder eine Reinigung mit EDTA.¹⁰² Die Probe ist frei von Mörtelresten. Das Fundjahr 1985 ist ein weiteres Indiz für eine solche Anwendung, da diese Pasten in dieser Zeit sehr modern waren.

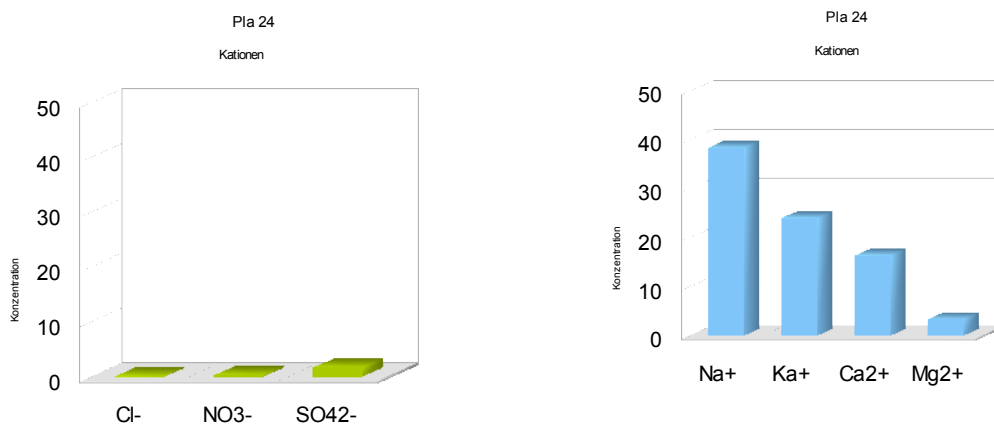


Abbildung 17: Gehalt der Ionen in der Probe Pla 24 (Stoffmengenkonzentration in µmol/kg): links Kationen, rechts Anionen

von Gewichtsprozent gesprochen, wenn die Autoren diese Bezeichnung verwendet haben.

¹⁰²Amoroso, G.G.; Fassina, V: Stone decay and conservation - atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection (1983), Seite 286.

Probe Mo 1b

Abbildung 18: Mo 1b (Inventarnummer: M93/15'398). Das Lockermaterial wurde für die Ionenchromatographie verwendet. Das Fragment ist an vielen Bereichen sehr stark abgrusend.

Bei der Probe Mo 1b handelt es sich um abgängiges Material eines Fragmentes, das sehr stark abgrust. Es wurde im Jahr 1993 unterhalb eines Abortes im Plantatum geborgen.

Ergebnis:

Bei der Probe Mo 1b ist das Verhältnis zwischen Anionen und Kationen sehr ausgeglichen. Die ermittelten Stoffkonzentrationen an Anionen beläuft sich auf 54 $\mu\text{mol/kg}$, und die der Kationen ebenfalls auf etwa 54 $\mu\text{mol/kg}$. Der Masseanteil beträgt etwa 0,26 Masseprozent, damit ist diese Probe etwas stärker belastet als die erste.

Die Probe Mo 1b wies eine auffällig hohe Chloridbelastung auf, und auch der Anteil an Calcium ist sehr hoch. Der Zusammenhang zwischen Salzbelastung und Fundort ist hier sehr eindeutig. Die Zusammensetzung von menschlichem Urin und dem Ionengehalt der Probe ähneln sich. Lediglich der Natriumgehalt der Probe ist verhältnismäßig geringer als bei Urin.

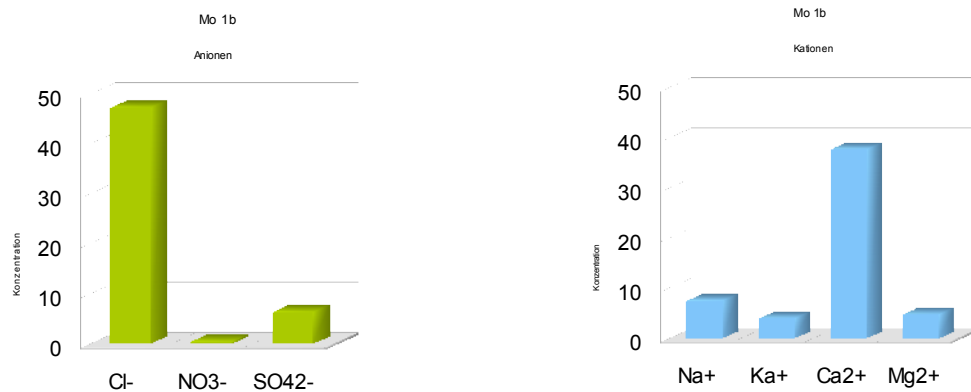


Abbildung 19: Gehalt der Ionen in der Probe Mo1b (Stoffmengenkonzentration in $\mu\text{mol/kg}$): links Kationen, rechts Anionen

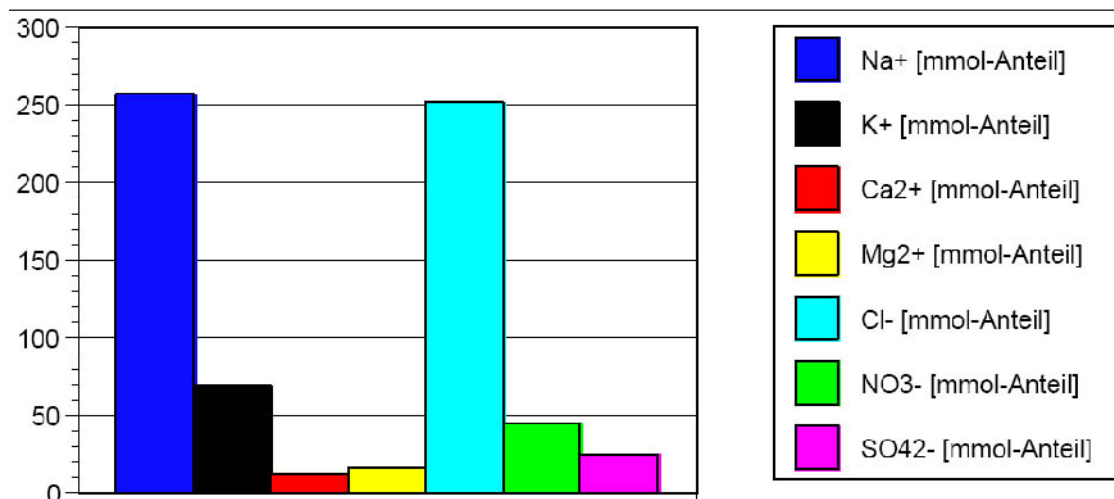


Abbildung 20: Darstellung der Zusammensetzung eines 24-Stundenharns nach Römpp, wobei Ammonium als Nitrat dargestellt ist.

3.5 Probenahme und Untersuchungen

Die Flechtwerksteine zeigen eine Vielzahl von Oberflächenbelägen, bei denen nicht eindeutig ist, worum es sich handelt. Eine rein optische Erfassung reichte nicht aus, sodass eine gezielte Probenahme erfolgte. Es wurden nur sehr geringe Mengen der Beläge von der Oberfläche entfernt.

Die Proben wurden mit einer gezielten Fragestellung entnommen. (Das Probenahmeprotokoll mit Fotos und Beschreibung der Entnahmestellen, sowie die

Vorgehensweise bei der Untersuchung befinden sich im Anhang).

Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, dass es sich bei den verschiedenen weißen Krusten und Belägen nicht um Salze, sondern um Calciumcarbonat handelt, das vermutlich durch frühere Kalksinterwasserfestigungen aufgebracht wurde. Jedoch wurde auch festgestellt, dass es eine weitere frühere Maßnahme gegeben haben muss, da ölige Bestandteile nach dem Auflösen einer Probe in Salzsäure gefunden wurden.



Abbildung 21: Rückstand nach dem Auflösen des Partikels in Salzsäure, vermutlich ölige Bestandteile einer früheren Maßnahme (Probe P06, Objektiv: 20er; Bildbreite 440µm).

Es konnte bestätigt werden, dass bei dem grünlichen Belag tatsächlich ein oder Mörtel vorlag.

Die Frage nach Polychromie konnte anhand einer Probe nicht geklärt werden. Es handelte sich um eine Eisenverbindung aus sehr feinen Partikeln.

Eine blaue Farbe konnte als modern identifiziert werden. Hier lag ein Kunststoff oder ein ähnliches organisches Material vor, bei dem es sich möglicherweise um die Abschürfung von einem Werkzeug handelte. Diese Farbspuren befanden sich an drei verschiedenen Fragmenten.

Die Verschwärzung eines Fragmentes konnte erwartungsgemäß als Ruß identifiziert werden. Das Fragment wurde in der Nähe eines Backofens gefunden und hat seine Verschwärzungen vermutlich durch den Rauch erhalten.

Auch eine Staubprobe wurde untersucht. Sie wurde einer intakten Oberfläche entnommen, enthielt jedoch auch einzelne Marmorpartikel.

Eine rot-schwarze Kruste wurde von einer Steinoberfläche entnommen. Die Kruste ist etwa einen Millimeter stark. Sie ist vermutlich vermutlich auf die Lage der betroffenen Steinfragmente unterhalb des Abortes zurückzuführen. Vor Ort wurde daher stets von Urinstein gesprochen. Die Probe wurde mittels Röntgendiffraktometrie untersucht. Es handelte sich bei dieser Probe um eine Kruste aus Calciumphosphat und Quarz. Die Phosphate dürften durch Fäkalien eingebracht worden sein.¹⁰³ Der Quarz könnte von dem grünen Lehm, der sich dort vereinzelt findet, stammen.

Auf einem Fragment fand sich eine helle Schicht. Mikroskopisch wurde ermittelt, dass es sich um eine Beschichtung handelt, die nicht aus Calciumcarbonat besteht. Die Probe wurde daraufhin mit Energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) von der Firma FEAD GmbH untersucht. Auf der Oberfläche wurden Dolomit, sowie geringe Mengen Silizium nachgewiesen, wobei es sich um Reste eines Mörtels handeln könnte.

¹⁰³Mutschmann, Johann; Stimmelmayer, Fritz: Taschenbuch der Wasserversorgung (2007), Seite 199.

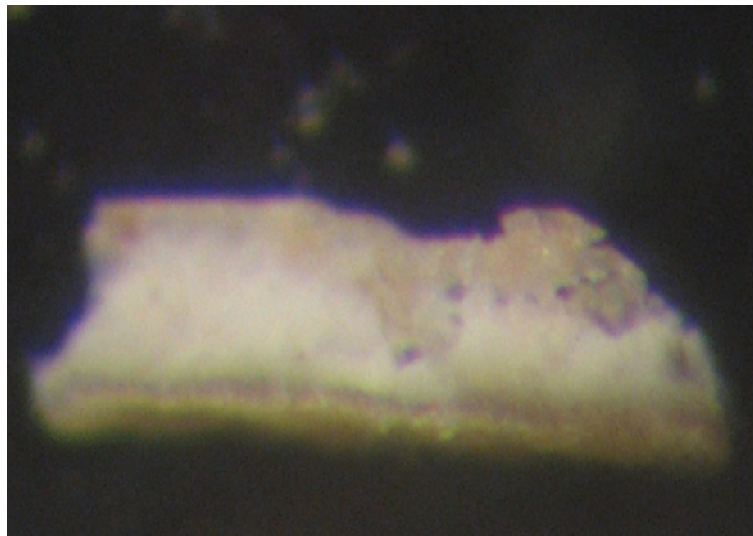


Abbildung 22: Helle Schicht im Mikroskop (Probe 01, Partikelgröße ca. 0,5mm).

3.6 Tropfentest

Um den Zustand der Flechtwerksteine beurteilen zu können, ohne Wasser in das Gestein einzubringen, wurde ein einfacher Tropfentest an ausgewählten Steinen durchgeführt. Scheinbar intaktes Material, Krusten und Aufrauungen wurden untersucht. Der Tropfentest wurde mit Ethanol durchgeführt. Aus diesem Grund wurde der Benetzungswinkel nicht bestimmt. (Eine Übersicht der Versuche findet sich im Anhang.)

Ergebnisse:

Ein Eindringen in intaktes und bruchfrisches Material war überhaupt nicht möglich. Einige intakt scheinende Bereiche dagegen haben den Tropfen verhältnismäßig schnell aufgesaugt. Das heißt, dass auch hier bereits eine leichte Vergrößerung des Porenraums eingetreten ist.

Die verwitterten abgrusenden Bereiche zeigen eine sehr starke Aufnahme. Die rote und die schwarze Kruste bilden eine verdichtete Oberfläche und die Tropfenaufnahme wurde stark verzögert.

3.7 Schadensursachen, Interpretation und Bewertung

Die verschiedenen Erhaltungszustände und Phänomene stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der Umnutzung der Steine. Die Flechtwerksteine lassen sich

anhand ihres Erhaltungszustandes und anhand ihrer Oberflächenveränderungen in Gruppen zusammenfassen, da bestimmte Phänomene mit anderen einhergehen, die mit ihrem jeweiligen Fundort in Zusammenhang stehen.

Einige Steine waren im oberen Bereich der Klostermauern verbaut. Nur vereinzelt waren sie dabei steinsichtig, zum Großteil waren sie vollständig eingemauert. Entsprechend zeigen die Steine eine vorwiegend mechanische Beanspruchung der Kanten in Form von Ausbrüchen, wo durch das Ausbrechen der Kristalle ein eckiges Relief erzeugt hat. Außerdem liegt häufig eine Schalenbildung vor. Das mechanisch erzeugte Relief ist zum Teil nur an der Oberfläche fragil. Im allgemeinen sind sie jedoch in einem guten Zustand und das Steinmaterial scheint intakt zu sein.

Andere Steine wurden im Boden gefunden, mitunter in Gräbern als Kopfstützen für Leichen. An diesen Steinen finden sich Abdrücke von Wurzeln, Oxalatschichten und gelbliche oder bräunliche Verfärbungen. Viele der Steine, die im Boden lagerten, zeigen eine angeätzte Oberfläche. Die Körner sind zum Teil spaltbarkeitsparallel angelöst oder zeigen Lochfraßkorrosion, vermutlich durch Huminsäuren aus dem Boden. Hier sind vereinzelt Festigungen vorzunehmen, im allgemeinen sind aber auch hier keine voranschreitenden Schäden zu befürchten.

Ein weiterer Teil der Steine wurde im Sockelbereich der Klostermauern oder im Fundament verschiedener Klosterbauten verbaut. Hierbei fällt besonders die größere Gruppe von Steinen auf, die unterhalb eines Abortes verbaut war. Hier liegt ein starkes Abgrusen, sowie Schalen- und Rissbildung vor. Stets weisen sie auch eine Verfärbung des Marmors hin zu graubraun auf, oft auch mit dunkelroter Kruste.

Durch Wasser aus dem Boden konnten Fremdstoffe wie Salze in das Gestein eingebracht werden. Diese Salze entsprechen in ihrer Zusammensetzung dem menschlichen Urin, der als Hauptursache für den voranschreitenden Materialverlust durch Abgrusen angesehen werden kann. Aber auch Frost und Tau können zu einer verstärkten Aufweitung der Korngrenzen führen, wodurch die Wasseraufnahme noch weiter ansteigen und die Aufnahme an Schadstoffen vergrößert werden kann. Die vorliegende rote Kruste wurde gemeinhin als Urinstein bezeichnet. Dass ein Zusammenhang zur historischen Toilettenanlage über dem Fundort einiger Steine

besteht, konnte durch die Untersuchung der roten Kruste mittels Röntgendiffraktometrie bestätigt werden. Es handelt sich hierbei um Calciumphosphat mit etwas Quarzanteil.¹⁰⁴ Calciumphosphat entsteht neben anderen Ausfällungsprodukten beim Abbau von Urin und Fäkalien in Gegenwart von Calcium.¹⁰⁵ Der Quarzanteil ist höchstwahrscheinlich auf einen grünen Lehm zurückzuführen, der auf einigen dieser Steine zu finden war.

Weitere Zusammenhänge betreffen nur vereinzelte Steine. So wurden Steine in einer Räucherkeramik verbaut, andere sind einem Brand zum Opfer gefallen, oder wurden als Trittplatte umgenutzt und weisen starken Oberflächenverlust durch Abrieb auf.

Viele Steine zeigen eine weiße Auflage, bei der es sich um Calciumcarbonat handelt, und nicht, wie zunächst angenommen, um Salze.¹⁰⁶ Es könnte sich um Rückstände einer Kalksinterwasserfestigung oder auch um Rückstände von Mörtelbelägen oder Schlämmen handeln. Diese Beläge stellen keine Gefahr für das Objekt dar, sondern bedeuten lediglich eine optische Beeinträchtigung.

Bei den gelben Filmen handelt es sich sehr wahrscheinlich um Oxalate, Salze, die sich auf Marmor in Form von Weddelit und Whewellit zeigen. Ihre Entstehung ist nicht genau gesichert. Zum einen gelten sie als Produkt von weit verbreiteten Flechtenkolonien, zum anderen existiert die Theorie, dass es sich dabei um Abbauprodukte aufgrund von Oxidation früherer antiker organischer Oberflächenbehandlungen zur Konservierung handelt.¹⁰⁷ Eine neuere Hypothese besagt, dass sich die Mikroflora in Form von Bakterien, Pilzen, Algen und Flechten aufgrund von auf welchem Weg auch immer eingebrachten organischen Materialien auf der Steinoberfläche halten konnte. Die Mikroflora produziert aufgrund von Ausscheidung und Umwandlungsprozessen verschiedene Schichten, die Oxalate in Form von Weddelit und Whewellit als Nebenprodukt enthalten. Oxalatsalze wurden gemeinsam mit anderen Zerfallsprodukten nachgewiesen, auch wenn visuell keine dieser Salze visuell

¹⁰⁴Schwerdtfeger, Sabine: Zwischenbericht vom Rathgen-Labor (email vom 5.12.2009, 9:41).

¹⁰⁵Udert, K.M.; Högger, R.; Larsen, T.A., Gujer, W.: Urinausfällungen in Urinalen und NoMix-Toiletten (2004), Seite 6-8.

¹⁰⁶Mehrere Proben eines weißen Belages wurden mikroskopisch untersucht (siehe 3.6).

¹⁰⁷Cariati, Franco; Rampazzi, Laura; Toniolo, Lucia; Pozzi, Andrea: Calcium oxalate films on stone surfaces: experimental assessment of the chemical formation (2000), Seite 180.

beobachtet wurden.¹⁰⁸ Mikroskopisch konnte nicht widerlegt werden, dass es sich um Oxalatsalze handelt.

Verfärbungen haben verschiedene Ursachen. Die roten Verfärbungen können durch Nebengemengteile des Marmors entstanden sein, zum Beispiel durch einen hohen Gehalt an instabilen Gefügeteilen wie Schichtsilikaten, zweiwertige Eisen enthaltene Silikate (Chloritite) Pyrit oder Magnesiumcarbonat (siehe Kapitel 2.5.2). Diese im Gestein vorkommenden Metallverbindung in vielen Bindungsformen und Oxidationsstufen können für Verfärbungen des Marmors verantwortlich sein. Vor allem die Verbindungen von Eisen mit Schwefel wie Pyrit und Markasit sind gegen chemische Aggressoren empfindlich. Markasit zersetzt sich bereits an der Luft, Pyrit zersetzt sich, wenn es in feinsten Verteilung vorliegt unter Bildung von Limonit (FeO OH - Eisenoxid), das eine gelbe oder braune Färbung haben kann.¹⁰⁹ Auch Kies und Mörtel können stark eisenhaltig sein und zu rötlichen Verfärbungen führen, die nicht aus gesteins eigenem Eisenoxid oder anderen Metallverbindungen herrühren.

Bräunliche bis rotbraune Verfärbungen können durch humushaltige Stoffe aus dem Erdboden entstanden sein, indem sie sich im alkalischen Bereich durch Feuchtigkeit zuzufuhr gelöst haben und an die Gesteinsoberfläche befördert wurden.

Bei Vergrauung und Verbräunung kann es sich um über die Jahrhunderte entstandene Verschmutzungen handeln, die wahrscheinlich nicht gefährlich sind. Holzbalken, mit denen die Steine in Berührung kamen, können durch ihre Gerbstoffe hellbraune Verfärbungen verursacht haben.

Auch Brände haben zu Verfärbungen, vor allem Rotfärbungen aufgrund von Eisenoxiden im Gestein geführt. Des Weiteren wurden durch Rauch, Qualm und Asche des brennenden Materials neue Ionen in das Gestein eingebracht, wodurch sich neue gesteins schädigende Komponenten ausbilden konnten. Durch Brand können Phosphor, Schwefel, Chlor und Stickstoff in das Gestein gelangen. Eisen oxidiert bei Temperaturen höher als 300°C . Die Temperaturen, die zum Kalkbrennen benötigt werden, liegen, je nach Autor, bei $812 - 1100^{\circ}\text{C}$. Da dies hier nicht eingetreten ist, muss die Brenntemperatur darunter gelegen haben.¹¹⁰

¹⁰⁸Cariati, Franco; Rampazzi, Laura; Toniolo, Lucia; Pozzi, Andrea (2000), Seite 180.

¹⁰⁹Müller, Friedrich (1994), Seite 39.

¹¹⁰Gómez-Heras, Miguel; Varas, Maria José; Álvarez de Buergo, Mónica: Characterization of changes in matrix of sandstones affected by historical fires (2004), Seite 567, 568.

3.8 Polychromie

Ein wichtiger Teil der Bestandsaufnahme wurde der Frage gewidmet, ob die vorliegenden karolingischen Flechtwerksteine ursprünglich gefasst waren. An einem karolingischen Flechtwerkstein in Molzbichl wurden Reste einer roten Bemalung an einer Flechtwerkplatte gefunden,¹¹¹ aber auch in Bayern, wo ebenfalls Flechtwerksteine in verschiedenen frühmittelalterlichen Bauwerken bei Ausgrabungen zu Tage getreten sind, gibt es vereinzelt Farbspuren auf Flechtwerksteinen.¹¹² So trägt ein Fragment aus der Kirche St. Jakob des Klosters Benediktbeuern zwischen Ammernsee, Starnberger See und Wlachensee, das mit einer Palmette verziert ist, Spuren einer roten Bemalung in den Tiefen.¹¹³ Es ist davon auszugehen, dass auch die Flechtwerksteine in Müstair ursprünglich gefasst waren. Per Augenschein ließen sich jedoch zunächst keine Fassungsreste erkennen.

3.8.1 *Theorie der Farbfassungen auf Marmor*

Es ist bekannt, dass in der europäischen Tafelmalerei der Marmorstaub für den schönsten und wertvollsten Malgrund verwendet wurde. Die Malereien auf Marmorgründen sind sehr leuchtend und wasserunlöslich. Auf Marmorgründen arbeitete man gern mit Kaseintempera und erhielt eine freskoartige Wirkung.¹¹⁴ Es ist daher davon auszugehen, dass Marmorskulpturen nicht grundiert wurden, oder dass der sehr dichte und stark geglättete Marmor für das Aufbringen einer Fassung noch isoliert wurde. Vor allem im Fall eines Auftrages der Pigmente in Temperatechnik wäre dies nicht notwendig gewesen.

3.8.2 *Die Pigmente*

Bei den Flechtwerksteinen sind ähnliche Pigmente zu vermuten, wie sie bei der Ausmalung des Kirchenraums und der Heiligkreuz-Kapelle verwendet wurden.¹¹⁵ In der karolingischen Heilig-Kreuz-Kapelle des St. Johann Klosters in Müstair wurden die

¹¹¹Karpf, Kurt (2001), Seite 21.

¹¹²Dannheimer, Hermann (1980), Seite 42.

¹¹³Dannheimer, Hermann (1980), Seite 42.

¹¹⁴Welthe, Kurt: Werkstoffe und Techniken der Malerei (2005), Seite 65, 380.

¹¹⁵Oskar Emmenegger: Karolingische und romanische Wandmalerei in der Klosterkirche: Technik, Restaurierungsprobleme, Massnahmen (2001), Seite 92.

Wandmalereien nachweislich unter anderem mit dem im Mittelalter sehr kostbaren Pigment Ägyptisch Blau gearbeitet. Dieses Pigment wurde seit dem 4. Jahrhundert nicht mehr nachgewiesen, mit Ausnahme in der Klosterkirche in Münstair.¹¹⁶

Farbe	Pigmente
Weiß	Sumpfkalk, San Giovanni, Kalksteinmehl
Gelb	gelber und braungelber Ocker, gelegentlich Beimischungen von Massicot oder Mennige; Massicot, gelegentlich Beimischungen von Mennige
Rot	Roter Ocker, Mennige, Roter Farblack (Niederschlag auf Aluminiumhydroxid)
Grün	grüne Erde, Mischung aus gelbem Ocker und Pflanzenschwarz
Blau	Ägyptisch Blau, Lapislazuli (sehr selten)
Schwarz	Pflanzenschwarz, Beinschwarz

Tabelle 4: In der Klosterkirche und der Heiligkreuz-Kapelle nachgewiesene Pigmente.¹¹⁷

3.8.3 *Bisherige Untersuchung*

Durch das Labor Consulting Sàrl in Fribourg (Bearbeiterin: Dr. Christine Bläuer) wurden bereits acht Proben, die an fünf Steinen entnommen wurden, untersucht. Dabei wurden neben Eisenoxidverbindungen, die auch eine andere Herkunft haben könnten, vereinzelt Blaupigmente nachgewiesen.

3.8.4 *Vorgehensweise*

Reste einer Fassung können nur an primären Oberflächen vorliegen. Dazu müssen auch Oberflächen mit einer aufliegenden Schicht gezählt werden, bei der sich Spuren von Polychromie darunter erhalten haben könnten. Problematisch ist hierbei, dass die aufliegenden Schichten nicht entfernt werden sollen, und somit nur kleinste Partikel abgehoben werden dürfen.

Zur Untersuchung der Steine dienten eine Stirnlupe mit einer vierfachen Vergrößerung, sowie eine Lupe mit einer dreißigfachen Vergrößerung.

Neben farbigen Pigmente wurde auch nach Bleiweißfassungen gesucht, da Bleiweiß seit Jahrhunderten das gebräuchlichste Weißpigment war, und als Bleiweiß-Ölfarbe auch zur Fassung von Naturstein (in Deutschland) verwendet wurde. Möglicherweise sind sie häufiger als andere historische Anstriche erhalten, da sie die relativ größte Verwitterungsresistenz besitzen.¹¹⁸

¹¹⁶Oskar Emmenegger (2001), Seite 92.

¹¹⁷Oskar Emmenegger (2001), Seite 92.

¹¹⁸Herm, C.; Klemm, D.D.; Snethlage, R.: Untersuchung zur Verwitterung von Farbfassung auf Naturstein

Ein eindeutiger Nachweis von Erdpigmenten dürfte wenig erfolgreich sein, da die Steine durch äußere Einflüsse schwarze, rote oder braune Verfärbungen aufweisen, die optisch und chemisch nicht von solchen Pigmenten unterscheidbar sind.

3.8.5 *Befund*

An drei Fragmenten wurden türkisfarbene Pigmentreste gefunden. Sie zeigten bei dreißigfacher Vergrößerung ein splittriges Aussehen. An einer Stelle haben sich die Pigmente wie eine Blumenkohlkruste aufgewölbt. Während zwei dieser Partikel tatsächlich auf Polychromiereste hinweisen, kann es sich bei dem Dritten auch um ein Korrosionsprodukt von einem naheliegenden Kupferfund handeln. Die beiden anderen Partikeln könnten Azurit sein, das als Verwitterungsprodukt von Kupfersulfiden in Tirol vorkommt und bereits seit der Antike bekannt ist.¹¹⁹

Andere Fragmente zeigen rötliche Färbungen, bei denen es denkbar ist, dass es sich um Polychromie handeln könnte. Die Untersuchung einer Probe ergab sehr feine Partikel von Eisenoxidverbindungen. Solche Verfärbungen befinden sich auch auf Bruchflächen. Beides spricht gegen das Vorliegen von Polychromieresten.

(1993), Seite 59.

¹¹⁹Bartl, Anna; Krekel, Christoph; Lautenschlager, Manfred; Oltrogge, Doris: Der "Liber illuministarum" aus Kloster Tegernsee (2005), Seite 540.

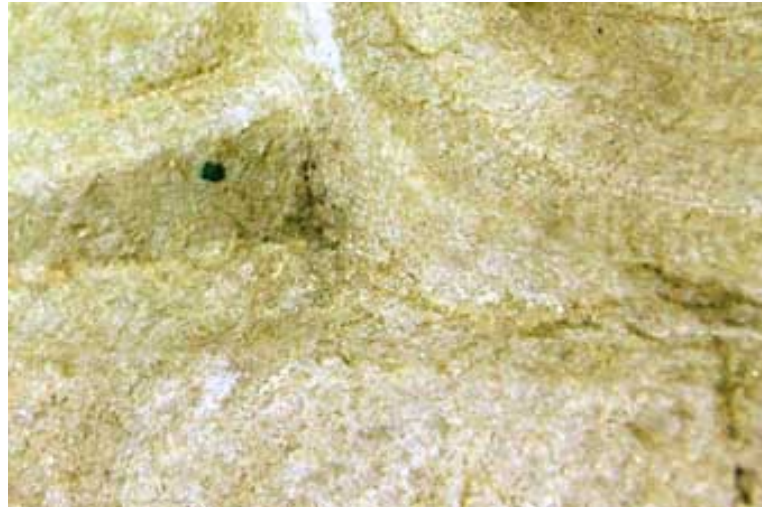


Abbildung 23: Türkisfarbener Farbreist auf einem Fragment, es könnte sich um Azurit handeln.

3.8.6 Weitere Maßnahmen

Fassungsreste in Form von wenigen Partikeln reichen nicht aus, um zu belegen, dass die Flechtwerksteine gefasst waren. Dies bedeutet, dass aufwendigere Wege zur Untersuchung eingeschlagen werden müssen. Es gibt Hinweise und Untersuchungen, die auch dann, wenn die Farbigkeit nicht mehr sichtbar ist, eine ursprüngliche Farbigkeit bezeugen könnten.

3.8.6.1 Farbspuren

Um nach weiteren Hinweisen zu suchen, soll an dieser Stelle auf Merkmale eingegangen werden, die eine Vorbereitung der Bemalung belegen, oder die Verwitterung einstiger Farbfassungen dokumentieren. Die folgenden Merkmale konnten zur Rekonstruktion der Farbigkeit antiker Skulpturen genutzt werden. Inwieweit sie auch bei den Flechtwerksteinen vorliegen, gilt zu untersuchen.

Als erstes Merkmal lassen sich möglicherweise Ritzungen (teils Konstruktions- teils Vorritzungen) beobachten. Neben erhaltenen Farbspuren gibt es sehr feinkörnige Pigmentkörner wie Rot- und Ockerpigmente, die sich in die Vertiefungen der Oberfläche verkeilt haben. Es handelt sich dabei nicht um eine originale Farbschicht.

Eine weitere Spur sind Farbschatten. Sie werden durch die ungleiche Haltbarkeit verschiedener Pigmente hervorgerufen und äußern sich in einer unterschiedlich starken sowie verschieden gearteten Verwitterung der Steinoberflächen. Diese Phänomene liefern mittels UV-Fluoreszenz und UV-Reflektographie Aufnahmen von Flächen und

Formen, die sich in verschiedenen Graustufen abzeichnen.¹²⁰ Die Zuweisung von Grauwerten zu Farben kann jedoch nur durch den Nachweis von erhaltenen Pigmenten geschehen.

Flüchtige Ockerfarbkörper hinterlassen meist die dunkelsten Flächen, da sie verhältnismäßig schnell verwittern und die Oberfläche am längsten ungeschützt verwittern kann. Eine Unterscheidung von gelbem und braunem Ocker ist nur vereinzelt möglich, da die entsprechenden Oberflächenbereiche geringfügig heller erscheinen. Frühere rote Fassungen zeigen sich heller als die der ockrigen Bereiche, dunkler jedoch als die ursprünglichen blau oder grün gefassten Flächen, die einen sehr hellen Farbschatten zeigen.

Einen weiteren Hinweis können Verwitterungsreliefs liefern. Es handelt sich um meist sehr feine Reliefs in der Steinoberfläche, die erst nach dem Verlust der schützenden Farbschicht entstanden sind. Auch hier lässt sich wieder eine graduelle Abstufung feststellen.¹²¹

3.8.6.2 Untersuchungsmethoden

Die UV-Fotografie ermöglicht, verblasste farbige Fassungen auf Filmmaterial sichtbar zu machen.¹²²

Die sichtbare UV-Fluoreszenz wird mittels kurzwelligem UV-Licht einer UV-Quelle, wie Quarzlampe, UV-Röhren oder UV-Blitz, angeregt und ermöglicht, die Farbverwitterungsschatten sichtbar zu machen.¹²³ Diese lassen sich bereits mit bloßem Auge erkennen, werden jedoch schärfer und kontrastreicher auf einer fotografischen Aufnahme.¹²⁴

¹²⁰Brinkmann, Vinzent: Die Polychromie der archaischen und frühklassischen Skulptur (2003), Seite 28.

¹²¹Brinkmann, Vinzent (2003), Seite 28-30.

¹²²Christof Wolters und das Münchner Doerner-Institut haben den Alexandersarkophag aus Sidon mit UV-Fotografie untersucht. Dazu wurde eine Studioblitzanlage mit einer sehr starken UV-Lichtquelle umgerüstet. Vor die Blitzwannen wurden große Schwarzfiltergläser (Schott UG 1) montiert. Die in die Blitzwannen eingebauten Brenner hatten keine UV-sperrende Beschichtung. Bei einem mittelgroßen Objekt reichen etwa 10 Blitze aus, um eine UV-Fluoreszenzaufnahme zu machen; Brinkmann (2003), Seite 29: Fußnote.

¹²³Brinkmann, Vinzent (2003), Seite 30.

¹²⁴Die Aufnahme wird mit normalem empfindlichen Filmmaterial gemacht. Vor das Objektiv wird ein wirkungsvoller UV-Sperrfilter gesetzt. Die vollständige Sperrung des für das menschliche Auge unsichtbarem UV-Lichts, welches das Nachleuchten im sichtbaren Bereich des Lichtes am Stein anregt,

Die UV-Reflexion ist eine weitere Methode, bei der Farbschatten sichtbar gemacht werden können. Es werden UV-Strahlen auf die Oberfläche projiziert, die dort reflektieren. Das Reflexbild wird mit Verwendung von Schwarzfiltern auf normalem Fotomaterial sichtbar. Der Einsatz spezieller UV-Optik, deren Linsen die UV-Strahlung ungehindert passieren lassen, verbessert die Resultate. Als Strahlenquelle kann eine normale Halogenlampe eingesetzt werden, die ein ausreichendes Quantum UV-Strahlung aussendet. Diese Technik liefert besonders scharfe, ausgewogen beleuchtete Bilder.¹²⁵

Eine weitere Aufnahmetechnik ist die des extremen Streiflichtes.¹²⁶ Diese wird genutzt, um das oben genannte Phänomen des Verwitterungsreliefs sichtbar zu machen. Das Streiflicht sollte stark gebündelt und möglichst durch eine Schlitzmaske geführt werden. Auch das Mikroskop sollte zur Untersuchung verwendet werden. Ein Auflichtstereomikroskop mit 10- bis 40-facher Vergrößerung ist erfolgversprechend. Dabei lassen sich Pigmente erkennen und bestimmen, die mit bloßem Auge nicht mehr zu sehen sind.

Die IR-Reflektographie ermöglicht, Vorzeichnungen unter roten pastösen Farbfassungen sichtbar zu machen. Da dies bei den Flechtwerksteinen nicht vorliegt, ist diese Untersuchungsmethode hier nicht sinnvoll.

3.9 Handwerkliche Qualität

Die Flechtwerksteine unterscheiden sich von einander in der handwerklichen Ausführung. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass verschiedene Bearbeitungsphasen vorliegen oder die Handwerker unterschiedlich ausgebildet waren. Ohne eine Schlussfolgerung zu ziehen, wurden Beispiele zusammengetragen, die eine unterschiedliche Bearbeitungsqualität belegen.

Ein wichtiges Beispiel sind geometrische Formen, bei denen der richtige Verlauf einer Form ignoriert wurde. Unter anderem wurden Voluten falsch konstruiert.

Auch die Grate und Stege liegen in unterschiedlichen Qualitäten vor. Bei einigen der

wird mit Kompositfiltern erreicht, die aus einer inneren Kunststoffschicht und zwei äußeren Glasschichten bestehen; Brinkmann, Vinzent (2003), Seite 30.

¹²⁵Brinkmann, Vinzent (2003), Seite 30.

¹²⁶Bei dieser Aufnahmetechnik wurden Kaltlichtmikroskopierlampen eingesetzt, die mit einem flexiblen Glasfaserstab ausgerüstet sind; Brinkmann, Vinzent (2003), Seite 29: Fußnote.

Steine sind diese sehr sauber und exakt ausgearbeitet, bei einem Großteil hingegen verlaufen die Grate und Stege sehr "wackelig" oder wurden mitunter nur andeutungsweise ausgearbeitet. Häufig finden sie sich nicht in der Mitte und variieren auch in ihre Stärke. Der Bänderverlauf ist häufig ungleichmäßig und kantig. Die Bänder des Flechtwerks verlaufen teilweise falsch, oder ändern willkürlich die Anzahl der Bänder. Andere Beispiele hingegen zeugen vom handwerklichen Können der ausführenden Handwerker. (Ein ausführliches Protokoll mit Beispielen findet sich im Anhang.)

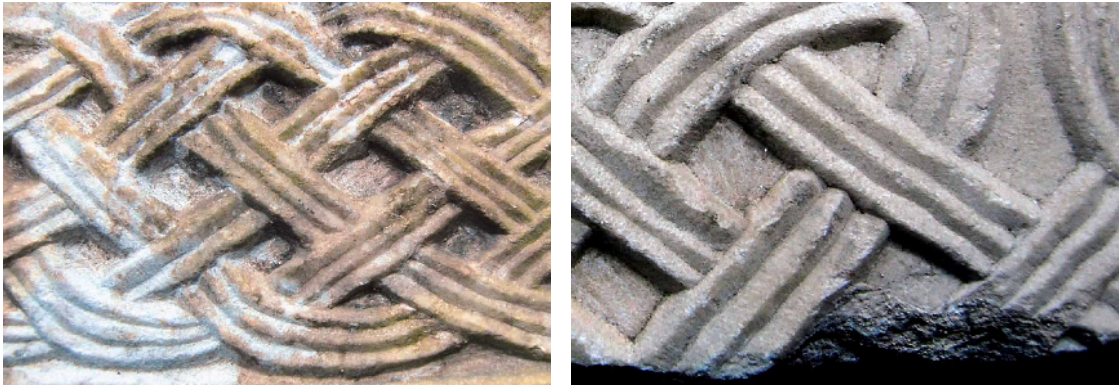


Abbildung 24: linke Abbildung: Die Anzahl der Bänder variiert von drei zu zwei.

Abbildung 25: rechte Abbildung: Die Grate und Stege sind ungleichmäßig gearbeitet. Der Bänderverlauf ändert sich nach der Durchdringung eines anderen Bandes.

4 Allgemeines Konservierungskonzept

4.1 Ziel der Erhaltungsmaßnahmen

Im allgemeinen sind die Flechtwerksteine in einem guten Zustand. An einem Teil der Fragmente sind einige Maßnahmen notwendig, um sie vor einem weiteren Zerfall zu schützen.

Bei der Entwicklung eines Konservierungskonzeptes für die Flechtwerksteine geht es um die Sicherung der gefährdeten Teile, an welchen Schäden weiterhin voranschreiten und daher gestoppt werden müssen. Da die Steine als Kunstwerk und als geschichtliches Zeugnis zu bewahren sind, sollte ihr derzeitiges Erscheinungsbild mit den zahlreichen Verfärbungen und Oberflächenveränderungen weitestgehend erhalten bleiben.¹²⁷ Das Prinzip des minimalen Eingriffs soll an den Flechtwerksteinen der Leitgedanke sein.

Zur Entwicklung eines Konservierungskonzeptes müssen die Konservierungsmaterialien nach den Aspekten der Reversibilität, bzw. der Wiederbehandelbarkeit, der Kompatibilität, der Haltbarkeit der Maßnahme, als auch der Materialidentität ausgewählt werden.¹²⁸ Die Reversibilität kann nicht in jedem Fall gewährleistet werden. Bei einer gelungenen Konservierungsmaßnahme ist dies auch nicht notwendig. Jedoch muss gesichert sein, dass die Maßnahme entweder dauerhaft effizient ist, oder sie wiederholt werden kann, im Sinne des NARA-Dokuments von 1994¹²⁹ bzw. nach den E.C.C.O: Professional Guidelines von 2002¹³⁰.

Weitere Schritte, die notwendig sind, dürfen durch eine Maßnahme nicht behindert werden.

Das Spektrum der Zustände ist recht breit und es sind zur Erhaltung der Steine mehrere Konservierungsschritte notwendig. Es soll zunächst eine Basis zur Annäherung an ein konkretes Konservierungskonzept geschaffen werden. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde der Schwerpunkt auf das Thema der Vorfestigung und zur Entsalzung gelegt, jene Maßnahmen, die am dringendsten durchgeführt werden müssen. Für andere

¹²⁷Charta von Venedig, Artikel 13.

¹²⁸Matteini, Mauro (2002), Seite 173.

¹²⁹http://www.international.icomos.org/charters/nara_e.htm (19.12.2008, 16 Uhr).

¹³⁰<http://www.ecco-eu.org/about-e.c.c.o./professional-guidelines.html> (19.12.2008, 16 Uhr).

Konservierungsschritte sind ebenfalls vorangehende Untersuchungen notwendig, die in einem anderen Rahmen durchzuführen sind.

4.2 Diskussion zum Umgang mit den salzbelasteten Steinen

Während der Bestandsaufnahme hat sich herausgestellt, dass etwa 26 Fragmente dringend gefestigt werden müssen (siehe Bestandsaufnahme im Anhang). Salze sind die Ursache für den Verlust von Körnern, die nach und nach abgrusen (siehe Kapitel Salzuntersuchung 3.5). Durch den Salzgehalt im Gestein wird der Gleichgewichtsfeuchtegehalt vervielfacht. Die Festigkeit wird gemindert und die thermische Leitfähigkeit wird signifikant erhöht. Dieser Prozess ist derzeit aktiv und muss durch angemessene Maßnahmen aufgehalten werden.

Es stellt sich die Frage, ob es ausreicht, die Salze unschädlich zu machen, oder ob eine Entsalzungsmaßnahme durchgeführt werden muss. Es ist dabei zu beachten, dass eine Festigung der betroffenen Bereiche zwingend notwendig ist. An dieser Stelle sollen die Möglichkeiten diskutiert werden.

Ein mögliche Variante im Umgang mit den Steinen wäre, ein filmbildendes Festigungsmittel einzubringen, das die Salzkristalle umschließt. Somit würde das hygri-sche Verhalten der Salze unterbunden werden. Versuche, die zum Thema durchgeführt wurden, ergaben jedoch, dass sich beispielsweise bei der Verwendung eines Alkoxysilan in Anwesenheit von Salzen kein erkennbarer Film gebildet hat. Das Arylharz Paraloid B 72 hat als einziges getestetes Produkt dauerhafte rissfreie Filme gebildet, die die Salze einschließen. Bei steigender Luftfeuchte lösten sich jedoch die Natriumchloridkristalle unterhalb des Paraloidfilms, was eine Volumenzunahme mit sich führte. Der Paraloidfilm wurde gedehnt und von der Oberfläche, auf der er auflag, abgelöst.¹³¹

Eine Festigung mit Produkten auf Kieselsäureestern ist ebenfalls problematisch. Salze können den Festigungserfolg behindern. Zum einen haben sie eine direkte Auswirkung auf die Applikation, da vom Salz besetzte Porenwickelräume nicht mehr zur Verfügung stehen und sie damit eine Art Sperrwirkung ausüben. Zum anderen behindern sie die Wirksamkeit, indem sie die Gelbildung oder die entstehende

¹³¹Berry, Janet; Price, A. Clifford (1994), Seite 847.

Gelstruktur beeinflussen. Durch die weiterhin ablaufenden salzbedingten Verwitterungsprozesse würde eine dauerhafte Festigungswirkung durch beschleunigte Alterung verkürzt werden.¹³²

Anhand von Versuchen mit Natriumchlorid belasteten Steinen konnte nachgewiesen werden, dass bei einer Verwendung von Kieselsäureestern starke Risse im Gelfilm um die Salzkristallen auftreten, wobei die Filme in Abhängigkeit vom verwendeten KSE unterschiedlich ausfielen. Spätestens bei Veränderungen der Luftfeuchte konnte eine Bewegung der Salze nicht verhindert werden.¹³³

Des Weiteren muss beachtet werden, dass Salze zu einer weiteren Erhöhung des Zeta-Potentials führen können, was die Anbindung von Produkten auf Basis von Kieselsäureestern beeinträchtigen kann.¹³⁴

Vorwiegend in den Poren mit einem Radius unter $0,1 \mu\text{m}$ werden die Veränderungen im Stein verursacht. Dies gilt vor allem bei Verwitterung durch Frost-Tau-Wechsel und Salzkristallisation.¹³⁵ Wenn das Festigungsmittel die Makroporen füllt, kann es sein, dass weitere Mikroporen entstehen, zum Beispiel durch nicht vollständig ausgefüllte Makroporen und sekundären Porenraum im Gel. Dadurch können Verwitterungsprozesse nach der Applikation eines Festigers noch beschleunigt werden.¹³⁶ Die Beeinflussung der Geldeposition durch Salze ist salzartabhängig. In vergleichbarer Weise verhalten sich NaCl, das nicht hydratstufenbildend ist und MgSo_4 , das hydratstufenbildend ist.¹³⁷

Von der Idee, die Salze durch Ummanteln unschädlich zu machen, soll aus den genannten Gründen abgesehen werden.

Stattdessen sollten die Steine einer Entsalzungsmaßnahme unterzogen werden. Hierbei müssen jedoch, anders als bei anderen Gesteinen, nicht nur die Oberflächen erreicht werden, sondern es muss von einer sehr tief reichenden Versalzung ausgegangen

¹³²Sattler, Ludwig: Steinfestigung an salzbelasteten Gesteinen (1992), Seite 166.

¹³³Berry, Janet; Price, A. Clifford: The movement of salts in consolidated stone (1994), Seite 845, 846.

¹³⁴Poschlod, Klaus (1990), Seite 33.

¹³⁵Pérez, J.L.; Villegas, R.; Vale, J.F.; Bello, M.A.; Alcalde, M.: Effects of consolidant and water repellent treatments on the porosity and pore size distribution of limestones (1995), Seite 203.

¹³⁶Pérez, J.L.; Villegas, R.; Vale, J.F.; Bello, M.A.; Alcalde, M. (1995), Seite 203.

¹³⁷Sattler, Ludwig: Steinfestigung an salzbelasteten Gesteinen (1992), Seite 165.

werden.¹³⁸

Aufgrund des starken Abgrusens wäre eine Entsalzungsmaßnahme mit Substanzverlust verbunden. Aus diesem Grund muss als erster Schritt eine Vorfestigung vorgenommen werden, die eine anschließende Entsalzung ermöglicht. Es muss eine Methode entwickelt werden, die schonend und effektiv ist. Auf die Problematik von Vorfestigung und anschließender Entsalzung von Laaser Marmor wird im experimentellen Teil ausführlich eingegangen (Kapitel 5).

4.3 Festigung

Bei der Bestandsaufnahme wurden verschiedene Arten von Entfestigung bei den Flechtwerksteinen beobachtet. Einige Fragmente haben mechanisch hervorgerufene Lockerbereiche, beispielsweise durch Drücke, die im Mauerverband auf bestimmte Stellen eingewirkt haben. Mitunter sind diese Entfestigungen nur oberflächlich und liegen hauptsächlich im Bereich von Kanten. Nur vereinzelt sind Bereiche des Dekors betroffen. Andere Fragmente weisen eine tiefer reichende strukturelle Entfestigung auf. Auch die bereits beschriebenen Steine, an denen eine Vorfestigung und eine Entsalzung vorgenommen werden müssen, sind im Anschluss erneut zu festigen, um entstehende Hohlräume auszufüllen und ein ausgeglichenes Festigungsprofil zu erreichen. Die Festigungsmaßnahme muss in diesem Fall auf die vorangegangene Vorfestigung abgestimmt sein, und generell den allgemeinen Anforderungen an eine Festigungsmaßnahme genügen.

Bei der Festigung müssen die verlorengegangenen Kornbindungskräfte des verwitterten Marmors über den spaltförmigen Porenraum hinweg ersetzt werden.¹³⁹

Die betroffenen Steine weisen mitunter eine derart starke Entfestigung auf, dass ein hohes Maß an Festigungssteigerung erreicht werden muss. Die Maßnahme sollte den Anspruch der Dauerhaftigkeit erfüllen. Des Weiteren sollen mit dem ausgewählten Festigungsmittel möglichst große Rissweiten ausgefüllt werden.

Die zahlreichen Mörtelauflagen sind zum Teil ebenfalls entfestigt und einzelne Partikel

¹³⁸Da keine Bohrproben an den Objekten durchgeführt wurden, ist diese These der Theorie der Marmorverwitterung entnommen; bei der erzwungenen Versalzung konnte bestätigt werden, dass Salze tief in den Marmor wandern.

¹³⁹Simon, Stefan (2001), Seite 23.

lösen sich ab. Daher ist zu überlegen, ob auch die Mörtelauflagen mit gefestigt werden sollten, sofern sie nicht von der Oberfläche entfernt werden.

4.4 Fehlstellenergänzung, Rissinjektion und Hohlraumhinterfüllung

Die Fragen nach Fehlstellenergänzung, Rissinjektion und Hohlraumhinterfüllung werden hier gemeinsam aufgezählt, da diese Schritte gleichermaßen Steinersatzstoffe erfordern.

An den Flechtwerksteinen sollen keine rekonstruierenden Ergänzungen durchgeführt werden. Das Schließen von Fehlstellen, vor allem zur Präsentation von zusammengehörigen Fragmenten kann jedoch notwendig sein. Zum einen lässt sich das Objekt mit einer glatten Ergänzung optisch zu einer Einheit zusammen ziehen, sodass die Lesbarkeit verbessert wird. Zum anderen kann eine Antragung auch vor Kantenausbrüchen schützen. (Mitunter kann es ausreichen, kleine gefährdete freiliegende Aggregate oder kleine Schalen anzuböschchen.)

Die Ergänzung sollte vom Niveau her etwas unterhalb der Objektoberfläche liegen und im Farbton etwas heller sein.

Des weiteren wurden bei den Flechtwerksteinen zahlreiche Risse und Schalen in verschiedenen Ausprägungen beobachtet. Vorliegenden Hohlräume sind mit einem geeigneten Injektionsmörtel zu hinterfüllen und Risse sind zu schließen. Dabei sind die zu überbrückenden Rissweiten und die Anbindung an den Marmor bei der Wahl des Mörtels zu beachten.

Für die Ergänzungsstoffe gibt es Anforderungen, die weitestgehend eingehalten werden sollten. Da die Steine im Innenraum verbleiben, sind Anforderungen bezüglich der Wasseraufnahme weniger relevant. Trotzdem sollte die Zusammensetzung der Materialien gewissenhaft erfolgen.



Abbildung 26: Marmorplatte aus dem Bodemuseum in Berlin, die Fehlstellenergänzungen (oberer Rand links und rechts, rechte untere Ecke und in der Bildfläche) sind farblich und vom Höhenniveau etwas zurückgesetzt und nicht rekonstruierend ausgeführt.

Anforderungen an einen Steinersatzstoff (nach Snethlage)

Eigenschaft	Symbol	Anforderung	Eigenschaften des Laaser Marmor
dynamischer E-Modul	E-dyn	bis 80%	
Druckfestigkeit	β_D	bis 60%	zwischen 82 und 122 MPa
Feuchtedehnkoeffizient	α_{Hy}	50-100%	
Wärmedehnkoeffizient	α_T	50-150%	
Wasseraufnahmekoeffizient	w	50-100%	0,07 kg/m ² √h
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	μ	50-100%	
Haftzugfestigkeit	β_{HZ}	0,5-0,8 $\beta_{HZ, Substrat}$	5,3MPa

Tabelle 5: Qualitätsprüfungen für Steinersatzstoffe, entnommen Snethlage, Leitfaden Steinkonservierung,¹⁴⁰ ergänzt durch die bekannten Eigenschaften von Laaser Marmor nach Poschlod.¹⁴¹

Die in Tabelle 5 genannten Werte richten sich nach den Werten des jeweiligen Substrats, in diesem Fall dem Laaser Marmor.

Die Haftzugfestigkeit sollte sehr niedrig sein, damit die Haftung im Ergänzungsstoff

¹⁴⁰Snethlage, Rolf (1997), Seite 98.

¹⁴¹vgl. Poschlod, Klaus (1990).

versagt und nicht im Gestein.

Steinergänzungsstoffe sollten nach Null auslaufend sein.

Es gibt Steinersatzstoffe aus Zement, Kalk, auf KSE-Basis, Acrylharz und Epoxidharz. Stoffe auf der Basis von Acrylharz werden vor allem für das Schließen von Fehlstellen bei Marmoren und Kalksteinen verwendet und eignen sich zum Injizieren von Rissen und zum Hinterfüllen kleiner Hohlräume. Sie können als Reinstoffe und mit Zuschlagstoffen verwendet werden. Für die Konservierung der Flechtwerksteine sind sie daher in Betracht zu ziehen.¹⁴² Für den Fall, dass auch die Festigung mit Acrylharz durchgeführt würde, wäre die Arbeit innerhalb eines Systems sicherlich als Vorteil anzusehen. Doch auch Steinersatzstoffe auf der Basis von Kalk oder Zement wären in Betracht zu ziehen. Kommerzielle Produkte auf dieser Basis besitzen meist eine hohe Plastizität und sind nicht mehr mit den Zementmörteln früherer Zeit vergleichbar.¹⁴³

Als Zuschlagstoffe können Sande oder gesiebte Kornfraktionen von Marmor verwendet werden. Es muss eine optimale Sieblinie (zum Beispiel nach DIN 1053 oder DIN 4226) ermittelt werden, die an das gewünschte Größtkorn angepasst werden muss.¹⁴⁴

Um eine geeignete Farbigkeit zu erhalten, können Pigmente verwendet werden. Es ist auch möglich, Ergänzungen in einem weißen Mörtel auszuführen und diese anschließend mit Aquarellfarbe oder ähnlichem zu retuschieren.

4.5 Reinigung

„Die Schafsköpfe glauben, die Kunst stecke in den Gestalten drin. Die Kunst sitzt aber gerade in der Haut, auf der Oberfläche.“¹⁴⁵

Maler Max Slevogt (1868 – 1932)

Das Thema Reinigung berührt nicht nur ein rein konservatorisches Problem, sondern erfordert bereits geisteswissenschaftliche Betrachtungen, da sie unmittelbar das Aussehen des Objektes betrifft und damit auch die Art seiner Präsentation. Reinigungen

¹⁴²Snethlage, Rolf (1997), Seite 96.

¹⁴³Snethlage, Rolf (1997), Seite 95.

¹⁴⁴Snethlage, Rolf (1997), Seite 96, 97.

¹⁴⁵zitiert in: Koller, Manfred; Nimmrichter, Johann: Die Reinigung von Steinoberflächen als Restaurierproblem“ (1996), Seite 117.

sind ein irreversibler Vorgang und damit gründlich abzuwägen.

Die künstlerische Autorschaft, materialspezifische Konstanten, sowie der Zeitfaktor und damit einhergehende Aspekte wie natürliche Verwitterung und Restauriereingriffe, sind vor dem Eingriff mit zu beachten. Verschmutzungen und Veränderungen, die Gefahren für das Objekt mit sich bringen, müssen entfernt werden. Das beinhaltet biogenen Bewuchs, sperrende Sinterschichten oder chemisch instabile Krusten. Die abgewitterten Oberflächen und die unschädlichen Beläge hingegen können belassen werden, da sie keine langfristigen Nachteile bewirken.¹⁴⁶

Dazu können beispielsweise die Spuren von Brand, Mörtelspuren und Oxalate gezählt werden. Da sich eventuell noch Polychromiereste unter den Belägen verbergen, sollten diese nicht entfernt werden, oder, im speziellen Fall, nur nach eingehender Überlegung und vorangegangener Dokumentation.

Die rote Kruste aus Calicumphosphat ist durch Fäkalien aus dem Abort verursachtes umgewandeltes Calciumcarbonat, also aus gesteinseigenen Bestandteilen der Originaloberfläche gebildet und enthält zu großen Teilen noch sichtbare Marmorkörner. Sie darf daher nicht entfernt werden. Da diese Krusten zu verdichteter Oberfläche führen, können sie abfallen und das daran hängende Steinmaterial mit ablösen. Die Kruste ist daher an fragilen Bereichen zu festigen und zu sichern.

Auch der gelbe Belag, bei dem es sich höchstwahrscheinlich um Oxalate handelt, ist an einigen Fragmenten bereits abgängig und hat auch hier zu Gesteinsverlust geführt. Er sollte jedoch nicht entfernt werden. Stattdessen sollten Spannungen durch Dilatation durch ein gleichmäßiges Klima verhindert werden.

Staub, Flugasche und Erde sollten von den Oberflächen entfernt werden, da sie als Fremdstoffe in das Gestein gelangen können. Sie sollten mit einem Haarpinsel oder vorsichtig mit Wattestäbchen und destilliertem Wasser entfernt werden.

Auf alle abrasive Reinigungsmethoden sollte verzichtet werden, da die Gefahr besteht, mögliche verbliebene Farbpartikel zu entfernen.

4.6 Verkleben

Die im Kulturgüterschutzraum gelagerten Fragmente sind zum Teil sortiert. Zusammengehörige Fragmente wurden, wie ein Puzzle zusammengelegt. Diese

¹⁴⁶Koller, Manfred; Nimmrichter, Johann (1996), Seite 118.

Fragmente sind zueinander beweglich. Wenn sie, zum Beispiel zu Vorführungszwecken, zusammengeschoben werden, besteht die Gefahr kleiner Ausbrüche an den Kanten. Fragmente, die sich zu einem ganzen Kontinent zusammenfügen lassen, sollten daher geklebt werden. Auch abgebrochene Ecken können auf diese Weise gegen Verlust geschützt werden. Des Weiteren wird die Lesbarkeit der Objekte erhöht.

Dazu soll auf jegliche Verdübelung verzichtet werden, um keine neuen Löcher bohren zu müssen. Klebungen sind daher besonders gewissenhaft durchzuführen. Große Fragmente sollten aus statischen Gründen durch eine Konstruktion zusammengehalten werden und unverklebt bleiben.

Abgebrochene Ecken und kleinere Teile können reversibel und ohne Dübel mit einem Reaktionsharz verklebt werden. Reaktionsharze haben den Vorteil, dass keine Volumenverminderung während der Erhärtung eintritt, anders als bei Klebstoffen mit Lösemitteln oder Kunstharzdispersionen, bei denen das Volumen nach dem Ausreagieren sehr viel niedriger ist. Daher können sie Schichtstärken von mehr als 0,5 mm überbrücken.¹⁴⁷ Epoxidharzklebungen lassen sich nicht wieder trennen, weder mit Hitze noch mit Lösungsmitteln. Daher soll auf ihre Verwendung, zumindest auf den Steinoberflächen, ebenfalls verzichtet werden. Als Alternative können die Oberflächen mit wieder anlösbaren Acrylaten abgesperrt werden und die eigentliche Klebung kann mit Epoxidharz ausgeführt werden. Kanten, die sehr genau aufeinander liegen und keine großen Schichtstärken zu überwinden sind, können mit Paraloid B 72 geklebt werden.¹⁴⁸ Dabei wird vorausgesetzt, dass bei diesen Stücken mit keiner statischen Beanspruchung zu rechnen ist.

Anpassende Fragmente, bei deren Klebung eine größere Schichtstärke zu überwinden ist, können auch mit Reaktionsklebstoffen auf Basis von MMA durchgeführt werden. Bei diesen reagiert das Monomer MMA mit Radikalbildnern zu thermoplastischem Kunststoff PMMA. Reines PMMA ist in Aceton vollständig löslich. Dazu muss es jedoch ohne Vernetzer ausreagieren.¹⁴⁹

¹⁴⁷Pung, Olaf: Methylmethacrylat (MMA)- Reaktionsharz für reversible Klebungen in der Steinrestaurierung (2005), Seite 72.

¹⁴⁸Dies wurde zum Teil bereits durch die Diplom-Restauratorin Martina Nicca durchgeführt und dokumentiert.

¹⁴⁹Pung, Olaf 2005), Seite 72.

Zum MMA muss ein lösliches Polymer als Verdickungsmittel gegeben werden, da reines MMA die Viskosität von Wasser besitzt und daher zur Verklebung ungeeignet ist. Außerdem sind Radikalbildner notwendig, meist Dibenzoylperoxid. Dieses zerfällt erst bei einer Temperatur von 60°C zu Radikalen, daher ist außerdem ein Beschleuniger notwendig, der diese Reaktion auch bei Zimmertemperatur ermöglicht. Die Elastizität von PMMA ist weit niedriger als die anderer Kunststoffe. Das E-Modul von PMMA liegt bei 3000 N/mm², damit ist dieser Kunststoff noch etwa 10-50 mal elastischer als Naturstein. Da die E-Moduli von Klebstoffen und dem zu klebenden Material möglichst dicht beieinander liegen sollen, um Scherspannungen zu vermeiden, ist eine niedrige Elastizität in diesem Fall als positiv zu bewerten.¹⁵⁰

4.7 Zusammenfassung

An einem Teil der Flechtwerksteine sind dringende Konservierungsmaßnahmen durchzuführen, um laufende Schadensprozesse aufzuhalten.

Die Eingriffe sollten möglichst zurückhaltend und auf ein Minimum reduziert werden. Die allgemeinen Anforderungen, die an Konservierungen gestellt werden, sind weitestgehend zu beachten. Da die Objekte im Innenraum bei einem konstanten Klima gelagert werden, sind nicht alle Punkte der Anforderungen strengstens einzuhalten. Das betrifft vor allem die Fragen nach Wasseraufnahme und hygrischer Dehnung.

¹⁵⁰Pung, Olaf 2005), Seite 72.

5 Detailliertes Konzept zu Vorfestigung und Entsalzung

Die Problematik der stark entfestigten salzbelasteten Steine wurde ausführlich diskutiert und in praktischen Versuchen an Probematerial untersucht.

Die Salze liegen bei den Flechtwerksteinen innerhalb des Steingefüges vor. Vermeintliche Salzkrusten haben sich als Calcitablagerungen herausgestellt und liegen nicht vor.

Bei Marmor kann der Wassertransport mit darin gelösten Schadstoffen aufgrund des Porenraumes in Form von Plattenspaltsporen sehr tief in das Gestein hineinreichen. Daher kann nicht von einer Salzkonzentration im oberflächennahen Bereich ausgegangen werden.

Große Bereiche sind sehr fragil, weshalb eine Vorfestigung vor der Entsalzung durchgeführt werden muss. Die Transportmechanismen sollten dadurch kaum beeinträchtigt werden, da längere Zeiträume der Entsalzung möglichst vermieden werden sollten. Das Gestein, vorhandene Beläge und eventuelle Fassungsreste dürfen dabei nicht zu Schaden kommen.

Es wird daher nach einer tief reichenden und schonenden Möglichkeit zur Entsalzung und anschließend nach einem adäquaten Mittel zur Vorfestigung gesucht..

5.1 Grundlagen der Entsalzung

Salzreduzierungsmaßnahmen basieren auf verschiedenen physikalischen Prinzipien. Bei einer Salzreduktion können daher verschiedene Transportmechanismen innerhalb poröser Baustoffe zur Anwendung gelangen.

5.1.1 *Mechanismen der Entsalzung*

Salze können in einem porösem Baustoff sowohl in gelöster Form und als auch auskristallisiert vorliegen. Es gibt verschiedene Mechanismen, die bei einer Entsalzungsmaßnahme genutzt werden können. Diese sollen an dieser Stelle erläutert werden.

1. Strömung der Porenflüssigkeit unter einem Druckgradienten

Bei einem andauernden Wassertransport werden die gelösten Ionen aus dem Stein

transportiert. Das nachfließende reine Wasser löst die auskristallisierten Salze nach und nach, die dann als Ionen ebenfalls abtransportiert werden.¹⁵¹

Der Großteil des strömenden Wassers wandert vorwiegend in die großen Poren. Salze in Mikroporen müssen daher zunächst in den großen Poren diffundieren, wodurch die Durchströmungsdauer erhöht werden kann. Bei feinporösem Gestein werden die mitgeführten Ionen vom Lösungsmittel mitunter getrennt und im porösen System zurückgehalten.¹⁵² Sind Risse im Gestein vorhanden, dann verläuft der Flüssigkeitstransport vor allem dort entlang.

2. Transport von Porenflüssigkeit unter der Wirkung des kapillaren Unterdrucks

Bei einem wassergesättigten Körper entstehen im Kontakt zur Umgebung mit einer relativen Luftfeuchte von unter 100% in oberflächennahen Poren Menisken. Im Wasser unterhalb der Menisken entsteht ein kapillarer Unterdruck. Je kleiner der Porenradius ist, desto größer wird der Druckunterschied. Aufgrund des Unterdruckes wird die Flüssigkeit in die Nähe der Oberfläche gezogen und verdunstet dort. Bietet man ausreichend Wasser an einer anderen Stelle des Bauteils an, so entsteht ein andauernder Flüssigkeitstransport, bei dem, wie bei 1. beschrieben, die gelösten Ionen abwandern. Dort, wo das Wasser verdunstet, tritt eine Übersättigung ein und die Salze kristallisieren aus. Es muss, um die Oberfläche nicht zu gefährden, eine ausreichend starke Kompresse oder ein Opferputz aufgebracht werden. Durch Abnehmen dieser Schichten können die Salze entsorgt werden. Bei einem Nachlassen des Feuchtenachschubs kommt dieser Prozess schnell zum Erliegen.¹⁵³

3. Diffusion gelöster Ionen

Wenn das Lösungsmittel (z.B. reines Wasser) nicht durch das Gestein strömt, sondern im System zurückbleibt, können die Ionen durch Diffusion nach außen wandern. Das Konzentrationsgefälle, das zwischen Porenflüssigkeit und Umgebung vorliegt, ist die Ursache für die Diffusion der Ionen in das umliegende Wasser. Wichtige Beispiele für die Ausnutzung dieses Effektes sind die Entsalzung im Wasserbad und die dauerfeuchte Kompresse.

Anhand des konzentrationsabhängigen Diffusionskoeffizienten des Gesteins kann die

¹⁵¹Wittmann, F.H.: Transportmechanismen bei der Entfernung von Salzen aus porösen Naturstein (2001), Seite 100.

¹⁵²Wittmann, F.H. (2001), Seite 103.

¹⁵³Wittmann, F.H. (2001), Seite 105.

Lagerungsdauer im Wasserbad bestimmt werden.

Bei der Wasserbadentsalzung kann ionenselektiv vorgegangen werden. Indem kein reines Wasser verwendet wird, sondern eine gesättigte Ca^{2+} - Lösung, werden die Calcium-Ionen nicht gelöst, da bei ihnen kein Konzentrationsgefälle zur Badflüssigkeit entsteht.¹⁵⁴

4. Elektromigration.¹⁵⁵

Die oben beschriebene Ionendiffusion ist ein sehr langsamer Prozess. Diese kann durch Anlegen eines elektrischen Feldes beschleunigt werden. Die ablaufenden Teilreaktionen sind sehr komplex und schlecht kontrollierbar. Das Gestein kann leicht zerstört werden, daher soll auf diese Methode nicht weiter eingegangen werden.

5.1.2 Methoden der Entsalzung

Die üblichen Methoden sind die Entsalzung im Wasserbad und die Entsalzung mit dauernassen oder trocknenden Kompressen, bei denen die verschiedenen Mechanismen ausgenutzt werden.

Die Entsalzung im Wasserbad gilt als die effektivste Methode.¹⁵⁶ Da die Flechtwerksteine eine gut handhabbare Größe aufweisen, ist eine Behandlung im Wasserbad sehr gut vorstellbar. Bei einer Entsalzung im Wasserbad wird die Diffusion der Ionen nach außen ausgenutzt. Dies ist ein sehr langsamer Prozess, so dass das Objekt sehr lange Zeit im Wasserbad verbleiben müsste. Es wird davon ausgegangen, dass die Salze sehr tief in das Gesteinsinnere abgewandert sind. Um diese Zonen zu erreichen, ist eine Kompressenentsalzung (weder trocknend noch dauernass) weniger günstig. Des Weiteren bedeutet die Abnahme der Kompressen eine mechanische Belastung für die Oberfläche. Die dauerhafte Durchfeuchtung ist daher zugunsten der Effektivität in Kauf zu nehmen.

Bei einer Salzreduzierung im Wasserbad wird der gesamte Stein im Wasser gelagert, wodurch die Wasseraufnahme in das Porenraumgefüge beginnt.¹⁵⁷

Bei der Salzreduktion im Wasserbad ist die Oberflächenbeschaffenheit des Objektes von Relevanz.

Um die Salze herauszulösen, muss Wasser, in dem keine Ionen vorliegen, in das Gestein gelangen, so dass sich die Kristallgitter der Salze und Salzgemische auflösen und die Kristalle in einzelne Ionen dissoziieren. Das Wasser darf nicht mit Ionen gesättigt sein, und es darf sich auch kein Konzentrationsausgleich einstellen, da die

¹⁵⁴Wittmann, F.H. (2001), Seite 106/107.

¹⁵⁵Wittmann, F.H. (2001), Seite 97.

¹⁵⁶Goretzki, L. (1996), Seite 44.

¹⁵⁷Hoferick, Frank: Entsalzung von Skulpturen aus Elbsandstein im Wasserbadverfahren, Diplomarbeit (2005), Seite 21.

Diffusion sonst endet. Daher ist eine mehrfache Wiederholung der Maßnahme bzw. ein Wasserwechsel durchzuführen.

Es sind außerdem noch Modifizierungen der Wasserbadentsalzung möglich. Man könnte beispielsweise eine Pumpe mit Ionenaustauschern anschließen, so dass die Entsalzung in fließendem Wasser durchgeführt würde. Dabei würde nicht die langsame Diffusion, sondern die Strömung von Porenflüssigkeit zur Entsalzung genutzt. Es ist ein schnellerer, jedoch riskanterer Eingriff, der zur Schwächung des Gefüges führen kann.

Außerdem ist die Möglichkeit denkbar, Calciumcarbonat im destilliertem Wasser zu lösen, bis eine Sättigung vorliegt, damit sich die Calcium- und Carbonationen des Marmors nicht lösen.

5.2 Grundlagen zur Vorfestigung von Marmor für eine Entsalzung

Das Thema der Vorfestigung zur temporären Sicherung von Marmor ist in der Literatur wenig besprochen. Einige Aspekte können aus den Erfahrungen zur Festigung von Marmor übertragen werden.

Die betroffenen Objekte sollen bis zu ihrer Konservierung vor weiterem Zerfall geschützt werden.

Im Allgemeinen ist die Aufnahme von Festigungsmittel bei porenarmem Marmor schwierig, da die kapillare Aufnahme sehr eingeschränkt ist. Durch die vorangeschrittene Verwitterung ist der Porenraum jedoch ausreichend geweitet. Der Tropfentest hat eine sehr schnelle Aufnahme ergeben. Es besteht jedoch die Gefahr, dass die benötigten Porenräume teilweise durch Salze ausgefüllt sind.

Theoretisch kann ein Festigungsmittel durch die schmalen Spaltporen sehr tief ins Gefüge eindringen, jedoch dauert dieser Vorgang sehr lange. Das einzubringende Festigungsmittel muss sehr niedrigviskos und die Partikelgröße des Feststoffs sehr gering sein, damit ein Eindringen in die schmalen Poren möglich ist. Bei der Verwendung eines flüchtigen Lösungsmittels zum Lösen eines Festiger (z.B. Kieselsäureester in MEK oder ein Acrylharz in Aceton) besteht die Gefahr eines schnellen Abdampfens und der Rückmigration des Festigers. Die Poren nahe der Oberfläche dürfen nicht verstopfen. Vor allem muss gewährleistet sein, dass eine an die Entsalzung anschließende Festigung nicht behindert wird.

Die Wiederholbarkeit der Anwendung in Form einer Festigung muss möglich sein.

Dafür wird die Reversibilität in diesem Fall ausgeklammert.

5.2.1 Anforderungen an eine Vorfestigung

Für die Festigung von Naturstein gibt es einen Anforderungskatalog, der sehr genaue Angaben einschließlich Kennwerten enthält, an denen man sich bei der Wahl und der Bewertung eines Festigungsmittel orientieren kann. Für die temporäre Vorfestigung gibt es solche konkreten Anforderungen nicht. Einige Aspekte, die bei einer Festigung zu beachten sind, können auf die Vorfestigung übertragen werden. Andere müssen ergänzt werden.

Eine der wichtigsten Forderungen ist, dass anschließende Maßnahmen nicht beeinträchtigt werden dürfen. Die Vorfestigung soll nur temporär wirken.

Im folgenden werden die Anforderungen aufgelistet, die für die Vorfestigung ebenso gelten, wie für eine Festigung, in Anlehnung an Snethlage, die durch konkrete Anforderungen an die Vorfestigung zur Entsalzung von Marmor ergänzt wurden.¹⁵⁸

Visuelle Eigenschaften

Die Behandlung darf das optische Erscheinungsbild der Flechtwerksteine nicht verändern. Das beinhaltet Farbveränderung, Verdunklung sowie Glanzbildung. Das Ergebnis der Maßnahme kann hierbei visuell beurteilt werden, wobei ein Vergleich von Fotos der unbehandelten und behandelten Oberflächen mit Farbkarte hinzugezogen werden sollten.¹⁵⁹

w-Wert und B-Wert

Die Festigungsmaßnahme sollte den Wasseraufnahmekoeffizienten und den Wassereindringkoeffizienten nicht verändern. Dies ist besonders im Fall der salzbelasteten Steine zu berücksichtigen, damit die salzreduzierenden Maßnahmen nicht behindert werden.¹⁶⁰

Eindringtiefe s

Die Eindringtiefe muss ausreichend groß sein, damit die Oberflächen nicht überfestigt. Dies könnte eine Schalenbildung verursachen. Ein ausreichendes Penetrationsvermögen erfordert eine niedrige Viskosität. Eine Rückmigration des Festigungsstoffes durch flüchtige Bindemittel muss verhindert werden.

¹⁵⁸vgl.: Snethlage, Rolf: Leitfaden Steinkonservierung (1997).

¹⁵⁹Snethlage, Rolf (1997), Seite 80, 81, 156.

¹⁶⁰Snethlage, Rolf (1997), Seite 80.

Die Eindringtiefe sollte größer als die Zone der maximalen mittleren Feuchte sein. Diese orientiert sich an den ermittelten w -Werten von unbehandeltem Gestein.

Im Fall der Flechtwerksteine sind Eindringtiefen von einigen Zentimetern erforderlich.

Hygrische Dilatation α_{hy}

Unter hygrischer Dilatation ist das Quellen und Schrumpfen unter dem Einfluss wechselnder Feuchte zu verstehen. Eine Abnahme dieser Eigenschaft durch die Behandlung darf als positiv gesehen werden. Da die Flechtwerksteine jedoch nur partiell gefestigt werden, sollte die Veränderung der hygrischen Dilatation möglichst gering bleiben, damit keine Spannungen entstehen. Trotzdem ist diese Forderung im Fall der Flechtwerksteine nur bedingt von Relevanz, da sie unter konstanter relativer Luftfeuchte und Raumtemperatur gelagert sind.

Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Dampfdiffusionssperren und Filmbildungen, bei denen der μ -Wert um mehr als das Doppelte ansteigt, sind unbedingt zu vermeiden. Lediglich eine leichte Zunahme des μ -Wertes ist akzeptabel.

Festigkeits- und Verformungseigenschaften

Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften drücken sich in den Werten der Biegezugfestigkeit, des Elastizitätsmoduls, der Haftzugfestigkeit, der Ultraschallgeschwindigkeit, sowie dem Bohrwiderstand aus. Für diese Werte gilt, dass möglichst ausgeglichene Profile erreicht werden müssen. Es dürfen keine überfestigten Zonen entstehen.

Im Falle der Flechtwerksteine, die sehr stark entfestigt sind, ist die entscheidende Frage, ob die erreichte Festigung zur Entsalzung im Wasserbad ausreichend hoch ist. Die Wirkstoffkonzentration muss daher ausreichend hoch sein. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass, auch bei der Nachfestigung, keine überfestigten Zonen entstehen. Im Falle von eingebrachten Lösungen aus mehreren Phasen dürfen sich diese während der Tränkung nicht trennen. Nach dem Verdampfen des Lösemittels dürfen die Festanteile nicht remigrieren.

Zur Ermittlung der Festigkeit sind nur Untersuchungen von Relevanz, die Aussagen über die Tiefenprofile zulassen.¹⁶¹ Das Resultat der Festigung sollte immer ein möglichst

¹⁶¹Snethlage, Rolf (1997), Seite 81 – 83.

ausgeglichenes Profil für die Festigkeit und das E-Modul sein, das sich an den Werten des unverwitterten Gesteins orientiert. Die Außenzone darf keinesfalls überfestigt werden. Der E-Modul darf nicht überproportional ansteigen, da es an der Grenzfläche von behandeltem und unbehandeltem Material sonst zu Spannungen kommen kann.¹⁶² Wichtiger ist jedoch, dass eine anschließende Festigung mit einem gleichmäßigen Profil möglich ist und dabei keine harten Zonen an der Oberfläche entstehen.

Außerdem muss das Festigungsmittel eine gute Verarbeitbarkeit gewährleisten. Es muss beständig gegen Mikroorganismen sein, es dürfen keine schädlichen Nebenprodukte im Produkt enthalten sein und auch keine schädlichen Reaktionsprodukte im Gestein verbleiben. Es sollte umweltverträglich und gesundheitlich unbedenklich für den Anwender sein.

5.2.2 *Festigungsmittel*

Derzeit befinden sich zur Marmorfestigung zahlreiche Mittel auf dem Markt. Diese sollen an dieser Stelle kurz erläutert werden.

Acrylharzvolltränkung

Eine häufige Methode in der Marmorconservierung ist die Acrylharzvolltränkung (auch Ibach-Methode). Bei diesem Verfahren werden die Objekte unter Vakuum bis in den Kern vollständig mit flüssigem Methylmethacrylat (MMA) getränkt, das zu festem Polymethylmethacrylat polymerisiert. Dieses Verfahren ist sehr erfolgreich, jedoch umstritten. Sie stellt eine endgültige Maßnahme dar. Es existiert vielfach die Meinung, man hätte es anschließend nicht mehr mit einem Marmor, sondern mit einem Kunststoff zu tun. Dagegen spricht, dass der Porenraum von Marmor sehr gering ist, und damit der eingebrachte Anteil an PMMA im Gestein. Trotzdem handelt es sich um einen schwerwiegenden Eingriff, der eher als Notfallplan zu bewerten ist.

Alternativ, und dem Vorsatz des minimalen Eingriffs entsprechend, sollten ausschließlich die entfestigten Zonen gezielt behandelt werden.

Die häufigsten Produkte sind Motema Finish X bzw. M Finish X¹⁶³ und Paraloid B 72. Außerhalb von Deutschland kommen das Alkoxysilane MTMOS

¹⁶²Snethlage, Rolf (1997), Seite 84.

¹⁶³Die Firma Interacryl gibt es nicht mehr und damit auch kein Motema. Alternativ: Firma Intermonument in der Schweiz; Freundliche mündliche Mitteilung Büro Michael Pfanner (3. November 2008, 17 Uhr); Die Adresse von Intermonument : Huerbin Kirchgasse 28 4468 Kienberg 0041628443535.

(Methyltrimethoxysilan)¹⁶⁴ und das Alkylalkoxysilan DriFilm 104 zum Einsatz. Auch Kombinationen, wie der sogenannte Bologna-Cocktail, einer Mischung aus Paraloid B 72 und DriFilm 104, Epoxidharze wie Maraset, Polyurethane und Silikonharze werden zur Marmorfestigung eingesetzt. Neuerdings werden auch modifizierte KSE-Produkte eingesetzt, mit welchen das Problem der mangelnden Anbindung an die calcitische Oberflächen verbessert werden sollte.

Acrylharze

Das häufigste zur Marmorkonservierung verwendete Acrylharz ist Paraloid B 72 der Firma Rohm und Haas. Es ist chemisch beständig und vergilbt nicht.

Wichtig ist hierbei die Konzentration des Feststoffes, sowie die Wahl des Lösemittelgemisches. Die Flüchtigkeit des Lösemittels darf nicht sehr hoch sein, damit es nicht vorzeitig verdampft. Es darf nicht vergilbend sein, da sonst auch die angesetzte Lösung nach längerer Zeit vergilbt. Auch führt ein Zurückhalten von Lösemittel im Paraloidfilm zu Vergilben. Wichtig für die ausreichende Festigung ist eine genügend große Harzmenge in das zermürbte Material. Die Lösung muss jedoch niedrig viskos sein, um ein tiefes Eindringen zu ermöglichen.

Entscheidend hierbei ist die Reversibilität des Tränkungsmediums, denn zumindest oberflächlich lässt es sich mit Lösungsmittel wieder entfernen. Es wurde nachgewiesen, dass auch ein 20 Jahre alter Paraloid B 72 Auftrag noch anlösbar und von der Oberfläche entfernbar ist.¹⁶⁵

M Finish X ist ein Copolymer, das aus Methyl- und Butylmethacrylat besteht und Säuregruppen in den Molekülen enthält, um die Anhaftung an die Oberfläche zu verbessern. Es ist im Handel in verschiedenen Konzentrationen erhältlich.

Das Lösungsmittel ist Xylene, das ein sehr gutes Penetrations- und Retentionsvermögen hat. Es gilt als schwaches, mittelflüchtiges und schnell diffundierendes Lösungsmittel und ist gesundheitsschädlich.¹⁶⁶

Siliziumorganische Verbindungen

Zu den siliziumorganischen Verbindungen zählen alle Mittel auf der Basis von Kieselsäureestern sowie Silan- und Silikonverbindungen. In Deutschland werden

¹⁶⁴Sakka, Sumio: Handbook of Sol-Gel Science and Technology (2005), Seite 483.

¹⁶⁵Koller, M.; Paschinger, H.; Richard, H.; Prandtstetten, R.: Die Wiener Pestsäule (1982), Seite 116.

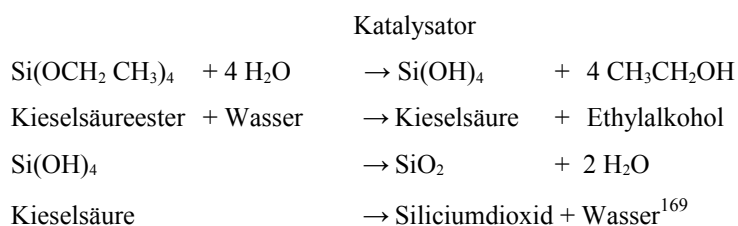
¹⁶⁶Pietsch, Annik: Lösemittel - Ein Leitfaden für die restauratorische Praxis (2002), Seite 99.

hauptsächlich Kieselsäureester verwendet. Die KSE-Produkte weisen meist eine sehr gute Eindringtiefe auf. Bei ihnen ist jedoch die schlechte Anbindung an die polare Calcitoberfläche problematisch. Die Calcitoberflächen besitzen ein sehr hohes Zeta-Potential, durch das ein ständiger Wechsel von positiver und negativer Ladung an der Oberfläche zustande kommt.¹⁶⁷ Das Zetapotential hat einen großen Einfluss auf die Trocknungsvorgänge in kleinen Poren, so dass aufgrund der geringen Porosität auch die Reaktionen der Festigungsmittel verzögert sein kann.¹⁶⁸ Kieselsäureester hydrolysieren unter dem Einfluss von Luftfeuchte mit Hilfe von Katalysatoren unter Abspaltung von Alkohol und bilden instabile Kieselsäure, die in Siliciumdioxid übergeht. Festigungsmittel, die ein gutes Eindringvermögen besitzen, bewirken aufgrund der geringen Feststoffabscheidung meist eine zu geringe Festigungssteigerung.

Reaktion:

Quarzsand wird durch Andocken von Alkoholgruppen zu flüssiger Kieselsäure. Der Kieselsäureester fällt nicht nur in kleinstmöglicher Baueinheit (Monomer: Tetraethoxysilan $\text{Si}(\text{OEt})_4$), sondern auch in größeren Moleküleinheiten an (Dimer, Trimer usw.). Die größeren Moleküle entstehen durch die Einbindung von Wasser in die Monomere, wobei jeweils zwei Alkoholgruppen abgespalten werden, die verdampfen. Dies führt zu einem Masseverlust.

Reagiert das Kieselsäureester zum Kieselgel (SiO_2), werden alle Alkoholgruppen abgeschieden.



Neben den Kieselsäureestern gibt es weitere, in Deutschland weniger verbreitete siliziumorganische Verbindungen zur Festigung von Marmor.

Dri-Film (DF-104) ist ein teilweise vorpolymerisiertes Silikonharz in Lösung. Da es sich um ein vorpolymerisiertes Mittel handelt, bildet es kein gleichmäßiges Netzwerk aus, sondern verbleibt dort, wo das Lösungsmittel verdampft. Auch die Anbindung an

¹⁶⁷Poschlod, Klaus (1990), Seite 33, 48.

¹⁶⁸Wilke, Verena: Marmorkonservierung Möglichkeiten der Marmorkonsolidierung mit kolloidalem Calciumhydroxidsol und KSE mit Haftvermittlern (2007), Seite 21.

¹⁶⁹Henning, Otto; Knöfel, Dietbert: Baustoffchemie - Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten (1997), Seite 128.

den Stein ist nicht als gut zu bewerten. Mit Lösungsmitteln kann das DF-104 auch nach Jahren noch entfernt werden und ist damit als reversibel anzusehen.¹⁷⁰

Bei dem Produkt MTMOS handelt es sich um Methyl-Trimethoxy Silan, ein reines Monomer das in-situ polymerisiert. Es polymerisiert gleichmäßig und bildet ein festigendes Netzwerk aus. Dieser Eintrag ist nicht reversibel.¹⁷¹

Kombinationen aus Acrylharzen und siliziumorganischen Verbindungen

In der Marmorkonservierung kommen häufig auch Kombinationen verschiedener Mittel zum Einsatz. Beispielsweise wurde MTMOS in Verbindung mit Paraloid B 72 zur Konservierung von ägyptischen Basreliefs aus Kalkstein angewendet.¹⁷²

Da Paraloid B 72 nur eine geringe wasserabweisende Wirkung hat, wird es häufig in Verbindung mit dem Alkylalkoxysilan DriFilm 104 der Firma Generell Electric als sogenannter Bologna-Cocktail angewendet. Mit dieser Mischung wird eine hydrophobierende Wirkung erzielt.¹⁷³

Sonstige

Neben den oben genannten Mitteln und Gemischen gibt es andere, die weniger verbreitet sind. Als Beispiel soll hier die Festigung mit Kalksinterwasser genannt werden. Mittlerweile gibt es auch Modifikationen, z.B. mit alkoholischen Kalkdispersionen und Nanokalk. Diese Produkte sind sehr umstritten und wenig erfolgversprechend und sollen an dieser Stelle nicht diskutiert werden.

Auch Epoxidharze kommen vereinzelt zum Einsatz. Ein Beispiel ist das Produkt Maraset. Auch sie sind für eine Vorfestigung nicht interessant und sollen an dieser Stelle nicht behandelt werden.

5.3 Eingrenzen der zu testenden Methode

Anhand von Probekörpern und Versuchen soll ein Weg zur Vorfestigung für eine

¹⁷⁰Charola, A.E.; Rossi-Manaresi, R.; Koestler, R.J.; Wheeler, G.E.; Tucci, A. (1984), Seite 183.

¹⁷¹Charola, A.E.; Rossi-Manaresi, R.; Koestler, R.J.; Wheeler, G.E.; Tucci, A. (1984), Seite 183.

¹⁷²Charola, A.E.; Rossi-Manaresi, R.; Koestler, R.J.; Wheeler, G.E.; Tucci, A.: SEM Examination of limestones treated with silanes or prepolymerized silicone resin in solution (1984), Seite 182.

¹⁷³Charola, A.E.; Rossi-Manaresi, R.; Koestler, R.J.; Wheeler, G.E.; Tucci, A.: SEM Examination of limestones treated with silanes or prepolymerized silicone resin in solution (1984), Seite 183.

Entsalzung gefunden werden. Dazu wurden die existierenden Mittel zur Festigung und die Methode zur Entsalzung diskutiert und anhand der oben aufgestellten Anforderungen eingegrenzt.

Im Vordergrund steht, die objektschonendste Methode zu entwickeln. Erfahrungen, die bereits im Rahmen von Forschungsprojekten und Diplomarbeiten gesammelt wurden, wurden dazu genutzt. Es sollen keine neuen Mittel getestet werden, da in dem kurzen Rahmen dieser Arbeit nicht alle Fragen beantwortet werden können und ein zu großes Unsicherheitspotential bliebe.

5.3.1 Wahl der Entsalzungsmethode

Die Entsalzung im Wasserbad scheint die effizienteste Methode zur Entsalzung. Nur diese Methode erscheint erfolgversprechend bei einer nicht nur oberflächlichen, sondern tief in das Gefüge reichenden Salzbelastung. Die Entsalzung soll in stillem Wasser durch Ionendiffusion erfolgen. Da die Entsalzung durch Diffusion im Wasserbad sehr langsam von statten geht, muss ein Zeitraum von einigen Wochen kalkuliert werden. Bei der Entsalzung der Flechtwerksteine soll das Wasser mit Calciumionen gesättigt sein.

Bei den praktischen Versuchen wird destilliertes Wasser verwendet.

5.3.2 Wahl des Mittels zur Vorfestigung

Die zur Verfügung stehenden Mittel sollen unter Berücksichtigung der oben genannten Anforderungen an dieser Stelle diskutiert werden. Es stellt sich die Frage, ob eine gute Anhaftung zwischen Festigungsmittel und Steinoberflächen bereits bei der Vorfestigung beachtet werden muss, oder ob dies erst bei der Nachfestigung im Anschluss an die Salzreduzierung erreicht werden muss.

Kieselsäureester (KSE 100, KSE 300, KSE 300 HV)

Kieselsäureester mit teilweise vorkondensierten monomeren Kieselsäureestern sind generell zur Vorfestigung von versalzten Steinobjekten geeignet, da sie gut eindringen, und die Entsalzung nicht behindern, indem sie einen eigenen sekundären Porenraum ausbilden. Der nach der Vorfestigung im Porenraum vorliegende Kieselgelfilm führt zu einer Verlangsamung des Entsalzungsvorganges. Die Vorfestigung mit KSE 510 führt zu einer wesentlichen Verlangsamung im Gegensatz zu den Produkten KSE 300 oder

KSE OH.¹⁷⁴

Von KSE OH soll abgesehen werden, da es mit dem leicht flüchtigen Lösemittel Methylethylketon (MEK) eingebracht wird. Von der Verwendung von MEK (C₄H₈O) und auch von der Verwendung von wasserfreiem Alkohol soll generell verzichtet werden, da das verwendete Lösemittel schnell verdunstet und die Gefahr einer Rückmigration besteht.¹⁷⁵

Stattdessen soll Kieselsäureester KSE 100, das zur Vorfestigung von entfestigten Bereichen von Marmor bereits mit Erfolg angewendet wurde, beispielsweise am Siegestor in München, in diesem Rahmen zur Entsalzung getestet werden.¹⁷⁶ Mit KSE 300 wurden bereits gute Salzreduzierungerfolge an künstlich versalzten und vorgefestigten Kalksteinen erzielt.¹⁷⁷ Da es aufgrund höherer Gelabscheidung bessere Festigungserfolge verspricht, soll auch dieses getestet werden. Um die Frage zu klären, ob die bessere Anbindung des Produktes mit der Haftvermittlung die Entsalzung beeinträchtigt, wurde auch das Produkt KSE 300 HV für die Versuche ausgewählt. Das KSE 300 HV wurde bereits zur Festigung von Carrara-Marmor getestet und gut bewertet.¹⁷⁸ Die drei KSE-Produkte sind ohne Lösemittelzusatz. Die Moleküle des KSE 300 sind größer als die des KSE 100. Dies gewährleistet eine Überbrückung größerer Rissweiten und eine größere Festigkeit. Jedoch wäre die Eindringtiefe des KSE 100 größer, da die Moleküle kleiner sind. Ob eine ausreichende Festigung für eine salzreduzierende Maßnahme jedoch erreicht werden kann, ist fraglich. Höhere KSE, wie KSE 510, sollen aufgrund der großen Moleküleinheiten nicht in die Versuche mit aufgenommen werden, da angenommen wird, dass eine anschließende festigende

¹⁷⁴Lukaszewicz, Jadwiga W. (1996), Seite 1206.

¹⁷⁵Freundliche mündliche Mitteilung von Dr. Boos, 3. November 2008, 14 Uhr. (Dr. Boos hat zum Verdünnen von KSE-Produkten ein reines Isoparaffin mit einem sehr hohen Siedepunkt empfohlen)

¹⁷⁶Ettl, Hans; Pfanner, Michael: Die Marmorreliefs des Münchner Siegestors – Konstruktion und Konservierung (2005), Seite 186.

¹⁷⁷Lukaszewicz, Jadwiga W. (1996), Seite 1206.

¹⁷⁸Verena Wilke hat in ihrer Bachelor-Thesis zwei KSE 300 HV getestet, die sie in ihrer Arbeit als KSE HV Standard und KSE HV neu bezeichnet hat. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um zwei verschiedene Produkte, sondern lediglich um den Wechsel des Zulieferers von Aminosilanen. Heute ist daher das als KSE HV neu bezeichnete KSE 300 HV im Handel erhältlich, das sich in der Rezeptur nicht vom alten KSE 300 HV unterscheidet. Quelle: freundliche mündliche Mitteilung von Dr. Boos, 3. November 2008, 14 Uhr.

Maßnahme erschwert werden könnte, und die Entsalzung zu stark verlangsamt wird.

Paraloid B 72

Als weiteres Produkt soll Paraloid B 72 getestet werden. Da es nicht hydrophobierend wirkt, ist möglicherweise auch eine Entsalzung möglich.

Die Konzentration des Paraloids mit sieben Prozent wurde in früheren Arbeiten als vorteilhaft für das Eindringvermögen herausgestellt. Es wurde darauf hingewiesen, dass stellenweise mehrmalige Imprägnierungen nötig seien, da mit dieser Konzentration pro Arbeitsgang nur wenig Tränkungsmedium eingebracht wird. Dabei ist auf einen einheitlichen Sättigungsgrad zu achten, da angewitterte Stellen die Lösung weit stärker ansaugen als unverwitterte.

Als Lösemittel sollen Ethanol und Aceton zum Einsatz kommen.¹⁷⁹ Dieses Lösungsmittelgemisch wurde bereits an antiken Marmorskulpturen angewendet.¹⁸⁰ Es ermöglicht ein gutes Eindringen, wobei der Ethanolanteil die Flüchtigkeit des Acetons reduzieren soll, um die befürchtete Rückmigration zu vermeiden.

M Finish X 20

Auch das Finish X wurde in die Testreihen mit einbezogen, da es ein häufig verwendetes Mittel ist. Es wurde eine 20%ige Konzentration gewählt, da die Entfestigung sehr stark ist. Sollte das Mittel eine Entsalzung prinzipiell ermöglichen, kann die Konzentration nachträglich noch verringert werden.

¹⁷⁹An der Wiener Pestsäule wurde beim Erproben dieses Harzes vor allem das Lösungsmittelgemisch erprobt, um ein möglichst gutes Eindringvermögen der Harzteile zu garantieren. Schließlich kam ein Gemisch aus Chlorothen (1,1,1-Trichloräthan), Shellsol A (aromatenreiches Erdöldestillat der Firma Shell, ersatzweise Xylol) und Cellosolveacetat (Äthylglycolacetat) im Verhältnis 1:1:1 zur Anwendung. Alleinige Wirkung der Stoffe in Paraloid: Chlorothen bewirkt keine Tiefenimprägnierung (zu rasche Verdunstung), geringe Retention (Zurückhalten). Shellsol A verdunstet langsamer, lange Retention. Cellosolveacetat erniedrigt Viskosität, nicht gut für Anlagerung im Stein. Da dieses Lösungsmittel sehr giftig ist, soll von einer Verwendung abgesehen werden.

¹⁸⁰Haug, Katrin: Aphrodite und Eros, SK 34 Antikensammlung, Zusammenfassung der Diplomarbeit auf (http://www.romoe.net/servlets/sfs;jsessionid=248B85A32C6BF9CCDC9DC9DBB55B2DA1EC4?t=/romoe/docu&e=UTF8&i=1126125415128&l=1&s=T3hRNtA6Nh5dKR5&action=view2&docu_ID=1078310756798#di1084366680690) (11.11.2008, 17 Uhr).

Die Fragestellungen bei den verschiedenen Produkten unterscheiden sich. Bei den KSE-Produkten (außer bei KSE 300 HV) wurde von vornherein davon ausgegangen, dass eine Entsalzung möglich ist. Es soll geklärt werden, ob eine ausreichende Festigkeit erzielt werden kann.

Bei Paraloid B 72 und M Finish X wird hingegen von einem guten Festigungserfolg ausgegangen. Hier soll die Frage geklärt werden, ob eine Entsalzung möglich ist. Entsprechend der Fragestellung wurden hier recht hohe Konzentrationen ausgewählt.

5.4 Prüfmethoden

Es wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Dabei sollte herausgefunden werden, welches der verwendeten Festigungsmittel die Anforderung erfüllt, ein vollständig zerstörtes Gefüge soweit zu festigen, dass eine längere Lagerung im Wasserbad möglich ist und gleichzeitig Salze hindurch zu lassen.

Als erstes wurden Ringe aus Lockermaterial aus Laaser Marmor hergestellt, die zum Teil mit Salz versetzt wurden. Sie wurden mit den 5 verschiedenen Mitteln gefestigt. Später wurden sie optisch, haptisch und mit dem Tropfenversuch bewertet.

Bei einem zweiten Versuch wurden Marmormehl, Salz, sowie eine Mischung auf eine gesägte Marmorplatte mit verschiedenen Festigern aufgeklebt. Diese wurden optisch, haptisch und mit dem Tropfenversuch bewertet.

Eine Reihe von Bohrkernen aus Laaser Marmor wurde künstlich verwittert und versalzen. Anschließend wurden die Kerne mit verschiedenen Mitteln vorgefestigt und entsalzt. Da die Bohrkern vor der Entsalzung nicht zerstört werden konnten, waren nur zerstörungsfreie Untersuchungen möglich. Es erfolgte bei dieser Reihe nach jedem Schritt eine Messung mit dem Ultraschallgerät. Der Entsalzungserfolg wurde durch die elektrische Leitfähigkeit des Wassers geprüft.

Eine Reihe von Prismen aus Laaser Marmor wurde mehrfach erhitzt und versalzen. Festigungsmittel wurden appliziert und danach wurden die Prismen entsalzt. Der Entsalzungserfolg wurde mittels elektrischer Leitfähigkeit gemessen.

5.4.1 Tropfentest

Bei dem Tropfentest wird ein definierter Tropfen, in diesem Fall destilliertes Wasser, mittels Pipette auf das Objekt gegeben. Je nach Eindringgeschwindigkeit, Ausbreitung

und Benetzungswinkel des Tropfens lässt sich schlussfolgern, ob die Oberfläche hydrophob oder hydrophil ist. Außerdem kann durch das Aufbringen eines Wassertropfens beobachtet werden, ob der Tropfen mit dem Salz in Berührung gekommen ist. Das für die Versuche verwendete Salz ist hydratstufenbildend und vergrößert sein Volumen bei Wasserkontakt.

5.4.2 Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Um den Entsalzungserfolg zu prüfen, ist die Messung der elektrischen Leitfähigkeit am besten geeignet. Die elektrische Leitfähigkeit einer Substanz sagt aus, wie gut elektrischer Strom durch sie übertragen wird.

Destilliertes Wasser hat theoretisch keine Leitfähigkeit. Befindet es sich im Gleichgewicht mit dem Kohlendioxid der Luft, hat es eine elektrische Leitfähigkeit von $10 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (20 dS/m)¹⁸¹. Erst durch die Ionen, die während der Lagerung im Wasserbad aus dem Gestein gelöst werden, erhöht sich der Wert. Die elektrische Leitfähigkeit wird mit S/cm (Siemens pro Zentimeter) angegeben. Je höher dieser Wert ist, umso höher ist der Anteil im Wasser gelöster Ionen. Mit dieser Methode können keine absoluten Mengen ermittelt werden. Da jedoch für die Versuche ausschließlich Natriumchlorid verwendet wurde, konnten anhand einer Referenzlösung dem Salzgehalt der Lösung Werte zugeordnet werden. Anhand dieser Werte kann die Menge des aus dem Stein gelösten Salzes annähernd berechnet werden.

Das Calciumcarbonat des Marmors ist nur schlecht in Wasser löslich. Der Anteil dieser Ionen wurde bei den Berechnungen vernachlässigt.

¹⁸¹<http://www.lenntech.com/deutsch/Leitf%C3%A4higkeit.htm> (17.02.2009, 14 Uhr).

Menge an NaSO ₄ / 100ml aqua dest. [g]	elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]
0,00	0,0163
0,10	0,129
0,20	2,75
0,30	4,04
0,40	5,47
0,50	6,86
0,60	8,26
0,70	9,29
0,80	10,35
0,90	11,23
1,00	12,36
2,00	24,00
10,00	83,30

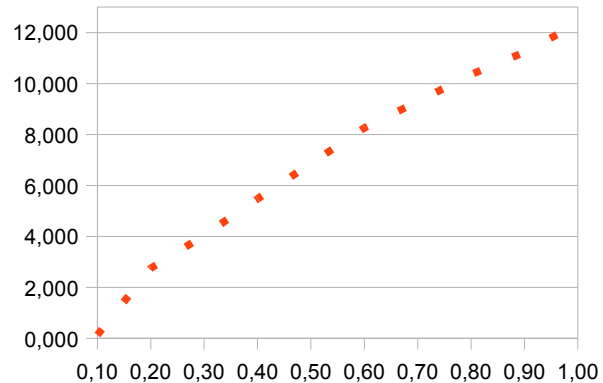


Abbildung 27: (links) Leitfähigkeitswerte in Abhängigkeit von Natriumsulfat in 100ml Wasser (Ausgang destilliertes Wasser).

Abbildung 28: (rechts) Diagramm: Leitfähigkeit von Natriumsulfat pro Salzmenge auf 100 ml destilliertes Wasser, die Leitfähigkeit ist proportional zur Salzmenge und es ergibt sich eine annähernd lineare Kurve.

5.4.3 *Messung der Ultraschallgeschwindigkeit*

Ultraschall gilt als eine zerstörungsfreie Messmethode, bei der Schallwellen mit Frequenzen höher als 18 kHz, die vom menschlichen Ohr nicht mehr wahrnehmbar sind, zum Einsatz kommen. Bei der Ultraschallausbreitung in einem Medium entstehen mindestens zwei verschiedene Wellentypen. Zum einen gibt es Kompressionswellen, auch Longitudinalwellen genannt, bei denen die Teilchenbewegung in der Ausbreitungsrichtung der Wellen stattfindet. Der zweite Wellentyp ist die Scherwelle, auch Transversalwelle genannt, bei der sich die Teilchen senkrecht zur Schwingungsrichtung ausbreiten. Es kommen außerdem Oberflächenwellen und Eigenschwingungen hinzu. Für Messungen an Naturstein werden die Geschwindigkeiten der Longitudinalwellen gemessen.¹⁸²

Bei der Ultraschallmessung werden mit einem Geber Ultraschallwellen ausgesendet. Sie durchdringen das Material und werden von einem Empfänger registriert. Anhand der Zeit, welche die Welle benötigt, um das Gestein zu durchdringen, und anhand der

¹⁸²Revez, Maria João: Of Ultrasounds and Funerary Sculptures - An Internship in Stone Conservation (2006), Seite 9, 10.

Länge des Objektes, wird die Schallwellengeschwindigkeit berechnet.

Die Ultraschallgeschwindigkeit wird dabei von den elastischen Eigenschaften des gemessenen Körpers bestimmt.¹⁸³ Die Zeit, die die Longitudinalwelle benötigt, um den Körper zu durchdringen, wird die Longitudinalwellengeschwindigkeit nach folgender Formel berechnet:

$$v_p = (l \cdot 10^3) / t_r - t_0$$

v_p = Longitudinalwellengeschwindigkeit [m/s]

l = Messdistanz [mm]

t_r = aufgezeichnete Transmissionszeit [m/s]

t_0 = Totzeit [μ s]

Die Totzeit ist die Verzögerung, die zwischen dem Betätigen der Taste und dem Austreten der Ultraschallwelle aus dem Geber entsteht.

Die Longitudinalwelle ist die Welle, die als erstes den Empfänger erreicht.

Das verwendete Gerät war der Ultraschall-Generator USG 30 von Geotron Elektronik, mit einem Fluke 192 Scopemeter mit 60 MHz und 500 MS/s. Die Auswertung auf dem Laptop wurde mit der Software LightHoue 2000-SM durchgeführt.

Gemessen wurde mit einem Geber, der Schallwellen mit einer Frequenz von 350MHz aussendete. Der verwendete Geber war der Transmitter UPG 350-T und der Empfänger war der Receiver UPE-T.

Die Ergebnisse lassen sich anhand von Richtlinien, die zum Zusammenhang zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Zustand des Marmors existieren, bewerten. Dabei existieren verschiedene Einteilungen. Es wurde eine Korrelationen zwischen der Porosität von Marmor und der Ultraschallgeschwindigkeit festgestellt.¹⁸⁴ Auch wenn die Ultraschallmessung ein sehr wichtiges Werkzeug zur Untersuchung des Zustandes von Marmor ist, darf sie nicht als einziges Mittel dienen, um eine Konservierung zu bewerten.

¹⁸³Kozub, Peter: Ultraschallprüfung in der Steinkonservierung, unveröffentlichtes Vorlesungsskript, Seite 3.

¹⁸⁴Köhler, W.; Simon, S.: The monument to Gustav II Adolf in Göteborg - Ultrasonic Investigations on the Carrara Marble Base (1993), Seite 118.

Zustand des Marmors	Schadens -klasse	V_p [km/s]	Zustand des Marmors	V_p [km/s]	Zustand des Marmors	V_p [km/s]
Köhler (1991) ¹⁸⁵			Köhler (1988) ¹⁸⁶		Köhler, Simon (1993) ¹⁸⁷	
frisch	0	$5,0 < V_p$	Bruchfrischer Marmor	< 5	unweathered marble	> 5
zunehmend porös	I	$3,0 < V_p < 5,0$	Guter Zustand	4-5	increasing porosity	3-5
absandend	II	$2,0 < V_p < 3,0$	Befriedigender Zustand	3-4	proceeding intergranular	2-3
brüchig	III	$1,5 < V_p < 2,0$	Beginnende Strukturzerstörung	2-3	disintegration beginning danger of breakdown	
zerfallen	IV	$V_p < 1,5$	Bedrohlicher Zustand	1,5-2	danger of breakdown complete structural deterioration	< 2
			Völlige Gefügezerstörung		complete structural deterioration	$< 1,5$
					acrylic-total-impregnates marble (AVT)	5-7

¹⁸⁵zitiert in: Dürrast, H.; Siegesmund, S.; Prasad, M.: Die Schadensanalyse von Naturwerksteinen mittels Ultraschalldiagnostik: Möglichkeiten und Grenzen (1999), Seite 360.

¹⁸⁶zitiert in: Sneathlage, Rolf.; Ettl, Hans; Sattler, Ludwig: Ultraschallmessungen an PMMA-getränkten Marmorskulpturen (1999), Seite 389.

¹⁸⁷Köhler, W.; Simon, S. (1993), Seite 118.

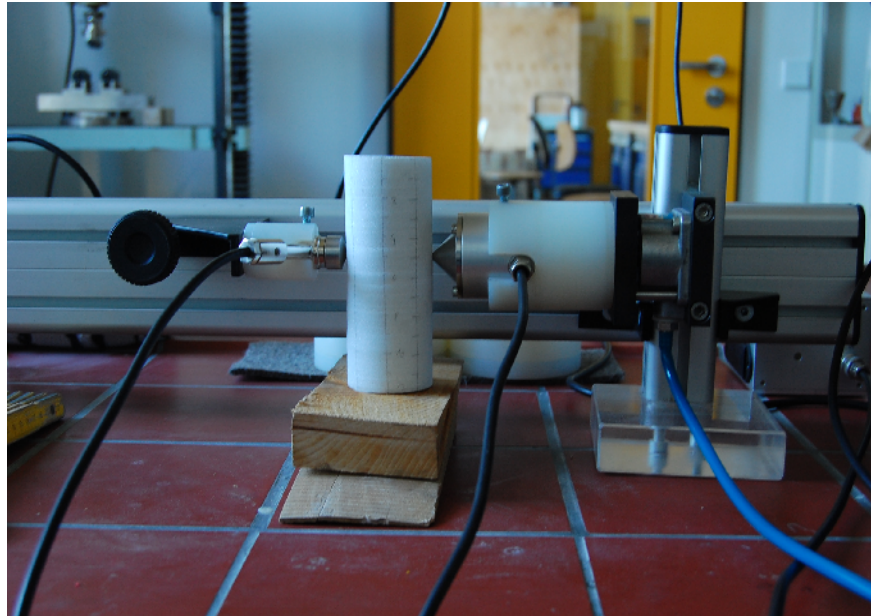


Abbildung 29: Messung mit dem Ultraschallmessgerät; verwendeter Geber: Transmitter UPG 350-T (rechts), Empfänger : Receiver UPE-T (links).

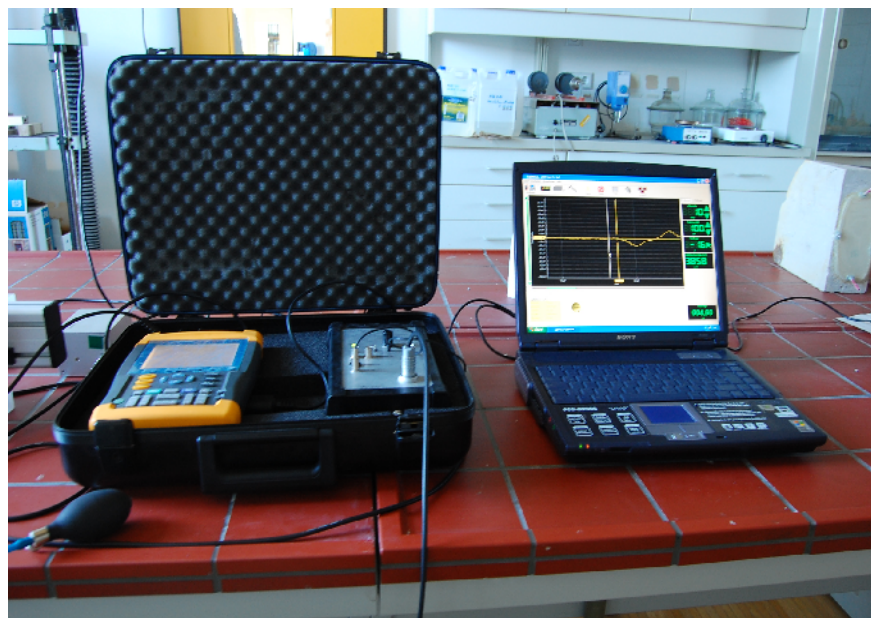


Abbildung 30: Messung mit dem Ultraschallgerät: die Ultraschallgeschwindigkeit wird mit der Software LightHouse 200-SM.

5.5 Versuchsreihen

5.5.1 *Vorproben mit Lockermaterial*

Um zu erfahren, mit welchem Festigungsmittel eine gute Verklebung und eine Überbrückung von Rissen möglich ist, wurden Proben aus Lockermaterial hergestellt. Die Hälfte der Proben wurde mit Natriumsulfat versetzt.

Herstellung

Mit dem Backenbrecher¹⁸⁸ wurde aus bruchfrischem Laaser Marmor Lockermaterial gemahlen und anschließend gesiebt. Die verwendeten Analysesiebe hatten eine Maschenweite von 2 mm bei einem Durchmesser von 9 mm, sowie von 4 mm bei einem Durchmesser von 1,4 mm. Die erreichten Korngrößen lagen somit bei etwa 1-3 mm. Etwa 5 mm hohe Ringe mit einem Durchmesser von 5 cm wurden aufgeklebt und mit abgewogenen Mengen Material aufgefüllt. Der Hälfte der Proben wurde außerdem eine definierte Menge Natriumsulfat beigemischt. Es wurden von jeder Kombination je drei Proben hergestellt.

Auf diese Ringe wurden nun verschiedene definierte Mengen Festigungsmittel (KSE 100, KSE 300 HV, Paraloid B 72(7% in Ethanol/Aceton) und M Finish X 20 mittels einer Spritze eingebracht.

Um das Ausreagieren der KSE-Produkte zu gewährleisten, wurden die Proben etwa einen Monat lang stehen gelassen. Da die mit KSE-Produkten behandelten Proben noch keine Verklebung aufzeigten, wurde die Applikation wiederholt und ein weiterer Monat abgewartet. Bei mit Paraloid B 72 gefestigten Proben wurde die Festigung an den Proben mit geringer eingebrachter Menge ebenfalls wiederholt, da die Festigung noch nicht ausreichend groß war.

¹⁸⁸Backenbrecher: Typ: Retsch BB 100 Mangan 750 W.



Abbildung 31: Herstellung von Ringen aus Lockermaterial

Untersuchung

Von jeder Kombination wurde ein Ring ausgeschalt. Dabei hat sich herausgestellt, dass keine der Proben, die mit KSE gefestigt wurden, eine ausreichende Festigung erreicht hatte, um Versuche wie Wasserdampfdiffusionswiderstandsmessung, Zugfestigkeit etc. durchzuführen. Die Proben, die mit Paraloid B 72 und M Finish X 20 behandelt wurden, waren sehr fest und hafteten am Untergrund, so dass auch sie nicht weiter geprüft werden konnten. Die Auswertung erfolgte daher auf reinen Beobachtungen. Zusätzlich wurde ein Tropfentest durchgeführt.

Ergebnisse

Bei keiner Probe konnte ein Unterschied in der Festigungswirkung zwischen den versalzten und den unversalzten Proben festgestellt werden. Dies gilt auch für die zweimal gefestigten Proben.

Mit keinem der getesteten KSE- Produkte konnte eine ausreichende Verklebung der Körner untereinander erreicht werden. Daher wurden diese Proben nachgefestigt. Nach der 2. Festigung wurde bei den Proben, die mit KSE 300 HV behandelt wurden, partiell ein Zusammenhalt der Körner erreicht. Die mit KSE 100 behandelten Proben zerfielen beim Ausschalen vollständig.

Das ist darauf zurückzuführen, dass KSE-Produkte, anders als Kunstharze, keinen Film

um die Körner legen, sondern Hohlräume ausfüllen. Die Abstände der Körner konnten nicht überbrückt werden. Ein Unterschied aufgrund beigemengten Salzes konnte nicht festgestellt werden. Optisch haben diese Produkte zunächst zu keinerlei Veränderung geführt.

Die Proben, die mit Paraloid B 72 und M Finish X 20 gefestigt wurden, hatten einen sehr guten Zusammenhalt. Während die Proben, die mit Paraloid B 72 gefestigt wurden, optisch nicht beeinträchtigt wurden, zeigten die Proben mit M Finish X 20 eine starke Glanzbildung. Möglicherweise ist dies auf eine zu hohe Konzentration an Festigungsmittel zurückzuführen.

Die Zugabe von Wasser durch die Tropfentests hat bei den versalzten Proben vereinzelt zu Ausblühungen geführt. Die KSE 300 HV-Probe war davon am stärksten betroffen. Bei Paraloid B 72 und M Finish X 20 ist dies nur in sehr kleinen Mengen aufgetreten. Interessanter war hingegen, dass die mit KSE 300 HV gefestigten Proben nach einigen Wochen eine braune Verfärbung zeigten. Dies geschah unabhängig sowohl an den versalzten, als auch unversalzten Proben.



Abbildung 32: Ringe aus Lockermaterial 3 Wochen nach dem Tropfentest: obere Reihe unversalzen, untere Reihe mit zugegebenem Natriumsulfat, links mit KSE 300 HV mit leichter Verbräunung in einigen Bereichen, sowie Effloreszenzen, rechts mit M Finish X 20 mit starker Glanzbildung und kleinen Effloreszenzen.

Auswertung

Der Versuch, Lockermaterial zu verkleben, hat ergeben, dass die KSE-Produkte nicht

geeignet sind, einen ausreichenden Zusammenhalt zu bieten. Auch das KSE mit dem Haftvermittler hatte nur eine sehr begrenzte Wirkung. Rissweiten können nicht überbrückt werden. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass dieses Mittel für den reinweißen Laaser Marmor nicht geeignet ist, da er nach einigen Wochen, vermutlich unter Zugabe von Wasser, zu Verfärbungen führt. Die Ursache ist möglicherweise bei den Aminosilanen zu sehen, ähnlich, wie bei gelblichen Kunststoffen, denen Aminbeschleuniger beigemischt sind.¹⁸⁹

Die beiden Produkte Paraloid B 72 und M Finish X 20 haben hingegen gezeigt, dass eine gute Festigung möglich ist, und außerdem, anhand vereinzelter Salzausblühungen gezeigt, dass sie die Salze nicht vollständig umhüllen, sondern auch hindurch lassen. Warum und auf welchem Weg dies geschieht, kann nicht geklärt werden. Ob dies ausreicht, um eine Entsalzung durchzuführen, ist ebenfalls in weiteren Versuchen abzusichern.

5.5.2 Klebeversuche auf einer Marmorplatte

In einem weiteren Schritt wurde versucht, einzelne Körner aus Laaser Marmor, sowie Marmormehl, reines Natriumsulfat, sowie ein Gemisch dieser auf eine gesägte Marmorplatte aufzukleben. Auch dieser Versuch sollte noch einmal die Frage beantworten, welche Festigungsmittel eine Anbindung der Körner an die calcitische Oberfläche ermöglichen.

Vorgehensweise

Jeweils einige Körner Lockermaterial, einige Gramm Marmormehl, einige Salzkörner und ein Gemisch aus allen wurde jeweils auf eine gesägte Marmorplatte gegeben. Auf diese wurde je ein Tropfen Festiger gegeben: KSE 300 HV, Paraloid B 72 und M Finish X 20.

Nach einem Monat wurde die Platte angesehen. Mit KSE 300 HV wurde keine Verklebung zwischen den Körnern und der Platte bewirkt, so dass ein weiterer Tropfen Festigungsmittel auf die Stelle gegeben wurde. Es wurde erneut ein ganzer Monat abgewartet, bis die Platte angesehen wurde. Anschließend wurden auf jede Stelle einige Wassertropfen gegeben.

¹⁸⁹Pung, Olaf (2005), Seite 73.



Abbildung 33: Klebeversuche auf einer gesägte Platte aus Laaser Marmor, vor dem Tropfentest: jeweils links oben: Natriumsulfat, links unten Marmorkörner, rechts oben Gemisch aus Marmormehl, Marmorkörnern und Natriumsulfat, rechts unten Marmormehl, von links nach rechts: KSE 300HV, M Finish X 20, Paraloid B 72.

Ergebnis

Das KSE 300 HV hat keinerlei Verklebung zwischen der Platte und den Körnern bewirkt. Die Körner lagen lose auf der Platte. Das Marmormehl hat nur zum Teil an der Platte gehaftet. Die Salze konnten mit der Platte verklebt werden, jedoch nicht gut, so dass sie abmehlten. Von dem Gemisch hafteten ebenfalls alle feinen Bestandteile gut, während die größeren Körner abfielen. Zunächst war keinerlei optische Beeinträchtigung zu beobachten. Nach einigen Wochen hatten sich die Körner und das Salz hellbraun verfärbt.

Die Klebungen mit Paraloid B 72 sind sehr gut. Es gibt keinerlei optische Beeinträchtigung und die Haftung ist bei allen vier Versuchen sehr gut.

Mit M Finish X 20 wurde eine sehr gute Klebung erzeugt, jedoch zeigen alle Proben einen glänzenden Film.

Nachdem einige Wassertropfen auf die Proben gegeben wurden, hat sich bei allen Proben zunächst ein stehender Tropfen gebildet. Nach einem Tag hatte sich auf allen Proben, bei denen Salze beteiligt waren, eine Effloreszenz gebildet. Diese war bei KSE 300 HV am stärksten ausgeprägt, bei M Finish X 20 dagegen am geringsten. Das feine Marmormehl und das Salz der KSE 300 HV Probe haben sich anschließend wieder gelöst und hatten dann keine Haftung mehr an der Marmorplatte. Die Paraloid B 72 Klebung und die mit M Finish X 20 kleben unverändert.

5.5.3 Künstlich verwitterte Bohrkernreihe

Eine den vor Ort herrschenden Gegebenheiten angepasste Situation konnte mit den bisherigen Versuchen nicht nachgestellt werden. Der Verband der Körner untereinander ist dort an den Korngrenzen aufgebrochen, jedoch sind die Körner noch weitestgehend im Gefüge vorhanden und es sind keine großen Rissweiten zu überbrücken. Auch die Art, wie Salze im Gefüge vorliegen, kann am Besten durch eine künstliche Verwitterung nachgestellt werden.

Vorüberlegung

Es muss zwischen Beschleunigung und Simulation unterschieden werden. Bei einer Beschleunigung wird ein Parameter, der die Rate einer Reaktion beeinflusst, intensiviert. Bei einer Simulation werden alle Parameter, welche eine Reaktion hervorrufen, intensiviert. Die Frage dabei ist, inwieweit die einzelnen Bedingungen verstärkt werden können, und wo die Grenzen liegen.¹⁹⁰

Dass die Grenzen nahe den natürlichen Konditionen sein sollten, scheint logisch, ist jedoch nicht wissenschaftlich. Eine Intensivierung darf jedoch die Mechanismen der Reaktionen nicht stören oder verändern. Solange diese Mechanismen nicht verändert werden, können die Bedingungen bei der künstlichen Verwitterung sehr stark intensiviert werden, auch fern von natürlichen Gegebenheiten.¹⁹¹

Vorgehensweise

Aus Laaser Marmor aus dem Natursteinwerk in Laas wurden Bohrkern gezogen, die künstlich verwittert wurden. (Die Vorgehensweise zur künstlichen Verwitterung wird im Anhang ausführlich beschrieben).

Die Kerne wurden auf einer Heizplatte dreimal für 30 min erhitzt und anschließend in kaltem Wasser abgekühlt. Durch diese Beanspruchung wurde der Porenraum aufgeweitet. Der Verwitterungsfortschritt wurde durch das Messen der Wasseraufnahme und der Ultraschallgeschwindigkeit beobachtet. Die Wasseraufnahme, die bei unverwittertem Stein kaum messbar gering war, erhöhte sich auf 0,83M%. Ultraschallmessung ergab im Profil eine relativ gleichmäßige Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit.

¹⁹⁰Skoulikidis, T.: The application and the limits of the intensification of the conditions by artificial weathering of stones (1995), Seite 464.

¹⁹¹Skoulikidis, T. (1995), Seite 464.

Bohrkern 12	Wasseraufnahme W [ml]	Wasseraufnahmegrad massebezogen W_m [M%]
bruchfrisch	0,7	0,14
nach 1. Erwärmung	1,1	0,51
nach 2. Erwärmung	1,6	0,74
nach 3. Erwärmung	1,8	0,83

Tabelle 6: Wasseraufnahme nach jedem Erwärmungsvorgang.

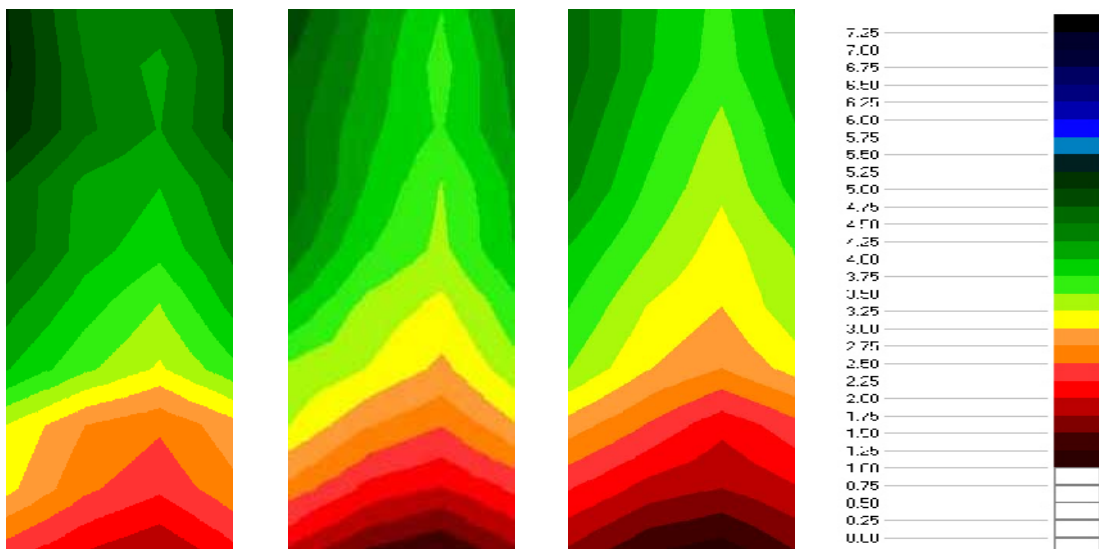


Abbildung 34: Grafiken der Ultraschallwerte nach dem Erhitzen des Bohrkerne 12 (von links nach rechts: nach dem ersten, zweiten und dritten Durchgang; erstellt mit MoistAnalyze, Skala in km/s)

Anschließend wurden die Kerne in Anlehnung an den Salzsprengtest nach DIN 52111 durchgeführt. Durch den Materialverlust der Bohrkerne, der bereits während der 10 Zyklen eintrat, konnte der Salzgehalt nicht durch Wiegen ermittelt werden.

Im Anschluss an die Salzsprengtests sollten die Bohrkerne für einen Frost-Tau-Wechsel vorbereitet werden. Dazu müssen sie vollgetränkt sein. Um ein Herauslösen vorhandener Salze zu verhindern, wurden sie bis etwa 2 cm Höhe in gesättigte Natriumsulfat-Lösung gestellt. Nach etwa 6 Stunden konnte eine starke Rissbildung beobachtet werden. An dieser Stelle konnten die Steine ohne weiteres mit der Hand auseinander gebrochen werden. Die Lagerung in gesättigter Lösung hatte nun eine vollständige Gefügezerstörung bewirkt.

Mit dem Ultraschallgerät konnte nachgewiesen werden, dass die Salze sehr tief in das Gefüge eindringen. Während der obere Bereich der Kerne nach den Salzsprengtests noch weitestgehend unverändert war, konnte nach der Tränkung eine Versalzung durch eine starke Zunahme der Ultraschallwerte nachgewiesen werden, obwohl nur die unteren 2 cm mit Salzlösung bedeckt waren.¹⁹² Die starke Zunahme der Ultraschallwerte ist auf Salze, die den Porenraum ausfüllen, zurückzuführen.

¹⁹²Vor jeder Messung wurden die Bohrkerne mindestens 24 im Klimaschrank bei 60°C gelagert.



Abbildung 35: Bohrkerne in Salzlösung, die Salzlösung ist bis in eine Höhe von 12 cm in das Gestein eingedrungen.

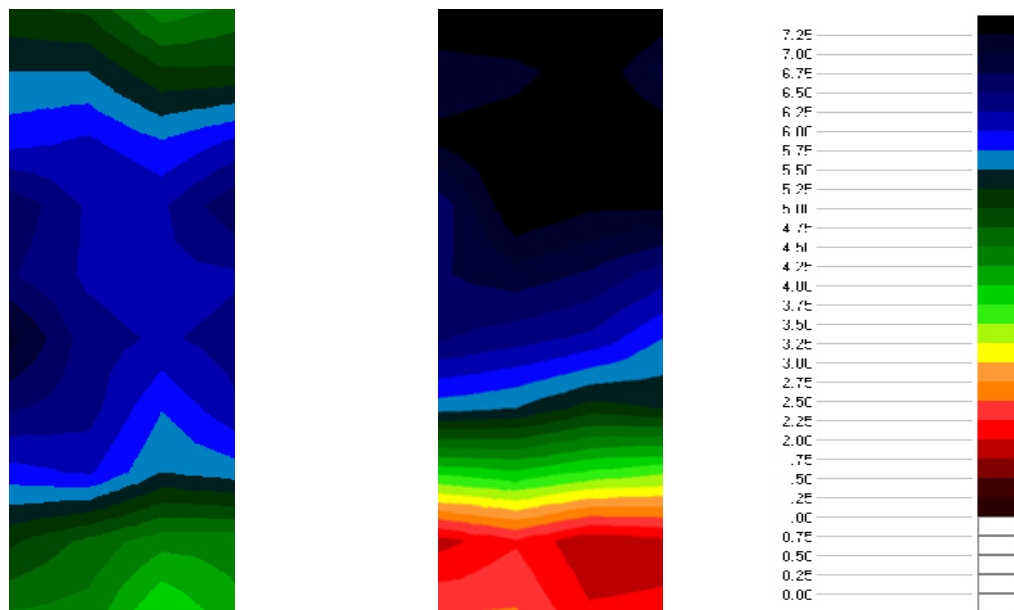


Abbildung 36: links: Bohrkern nach 10 Salzsprengtestzyklen, rechts Bohrkern nach 10 Salzsprengtestzyklen und sechsständiger Lagerung in 2cm hoher gesättigter Salzlösung (beide Kerne sind 12cm hoch und 4,9 cm breit; Skala in km/s).



Abbildung 37: Bohrkern nach der erzwungenen Versalzung: Rissbildung in etwa 2cm Höhe, in diesem Bereich lag eine vollständige Gefügezerstörung vor.

Das nun vorliegende Schadensbild entsprach dem Schadensbild der betroffenen Flechtwerksteine sehr gut, die Oberfläche zeigte ein sehr starkes Abgrusen.

Der hohe Salzgehalt ist nicht mit der Situation der Flechtwerksteine vergleichbar. Es

besteht die Gefahr, dass ein Festigungsmittel nicht eindringen kann, da der Porenraum vollständig ausgefüllt wurde.

Zum Test wurden trotzdem fünf der Kerne (1,2,4,5,6) mit den verschiedenen Festigungsmitteln getränkt.

Einer der übrigen Kerne (16) wurde in ein Entsalzungsbad gelegt. Dabei ist der untere Bereich vollständig zerfallen. Die Bereiche unterhalb des Risses wurden daher abgebrochen und separat gefestigt. Dann wurden 12 weitere Kerne für 4 Tage in ein Wasserbad gegeben, um den Salzgehalt zu reduzieren.

Die Wassermenge wurde im Verhältnis zum Gewicht des Bohrkerns dazugegeben: pro Gramm Masse des Bohrkerns wurden 1,5 ml Wasser dazugegeben.¹⁹³ Der Entsalzungserfolg wurde anhand der elektrischen Leitfähigkeit ermittelt. Nach zwei Tagen war der Wert noch sehr gering, nach fünf Tagen konnten hohe Werte zwischen 1,6 und 4,8 mS/cm gemessen werden. Die unterschiedlichen Werte der elektrischen Leitfähigkeit resultieren daraus, dass die abgetrennten Bereiche unterschiedlich groß waren, und somit auch die gemessenen Werte: Je schwerer die Bohrkernreste waren, desto höher war auch der gemessene Leitfähigkeitswert (siehe Tabelle im Anhang). Anhand der Ultraschallmessungen ist ersichtlich, dass alle Bohrkernreste, die einem Entsalzungsbad unterzogen wurden, nun ein untereinander gut vergleichbares Verwitterungsprofil aufweisen.

Die 12 salzreduzierten Bohrkernreste wurden nun ebenfalls gefestigt. Zum Teil wurde das Festigungsmittel durch Tränken eingebracht. Dazu wurden die Kerne in einen Behälter gegeben, der etwa 5 mm hoch mit Festigungsmittel gefüllt war, diesmal mit der fragilen Seite nach oben gedreht. Mit steigendem Eindringen wurde das Festigungsmittel aufgefüllt. Die Eindringhöhe an den Kernen lag dabei immer über dem Flüssigkeitsspiegel. Bei den anderen Kernen wurde das Festigungsmittel mit einer Spritze auf die fragilen Bereiche appliziert, mit dem Ziel, dass es soweit eindringt, dass alle entfestigten Bereiche getränkt werden.

Untersuchung:

Mit dem Elektronenleitfähigkeitsmessgerät wurde die Leitfähigkeit des Wassers geprüft. Da der Salzgehalt in den Kernen nicht bekannt war, konnten keine Aussagen

¹⁹³Um ein genaues Verhältnis zu bekommen, wurde die Wassermenge mit der Waage ermittelt und pro Gramm Stein wurden 1,5 Gramm Wasser eingewogen.

zur Effizienz gemacht werden. Es konnten nur Aussagen darüber getroffen werden, ob das Festigungsmittel eine Entsalzung verhindert. Außerdem wurde geprüft, ob ein Materialverlust vorlag. Die Kerne wurden vor und nach der Maßnahme gewogen. Trotzdem kann der genaue Verlust nicht bestimmt werden, da auch Salze aus dem Gestein gelöst wurden. Der Materialverlust wurde daher anhand abgängiger Körner bestimmt. Mit Hilfe des Ultraschallgerätes wurde überprüft, in welchen Bereichen eine Salzreduzierung stattgefunden hat.

Ergebnisse:

Der Festigungserfolg war bei den Bohrkernen 1-6, die ohne vorangegangene Entsalzung mit verschiedenen Mitteln gefestigt wurden, unterschiedlich. Die KSE-Produkte haben gut gefestigt, jedoch wurden die lose aufliegenden Körner nicht mit gefestigt. Körner an kleinen Rissen waren ebenfalls nicht verklebt und fielen ab. Nur bei Paraloid B 72 wurden alle Körner gefestigt und auch kleine Risse überbrückt. Bei M Finish X 20 wurden ein Glanzeffekt und eine leichte Blaufärbung beobachtet. Die anderen Produkte haben keine optische Beeinträchtigung bewirkt.

Auch wenn der Salzgehalt nicht bekannt ist, wird davon ausgegangen, dass alle Kerne in etwa gleich stark versalzen und daher die Ergebnisse grob vergleichbar sind. Die Ultraschallmessungen belegen dies durch vergleichbare Profile.

Der Entsalzungserfolg war bei KSE 100 und KSE 300 am besten, KSE 300 HV schnitt durchschnittlich ab, und Paraloid B 72 und M Finish X 20 am schlechtesten (Tabelle im Anhang).

Während der Entsalzung haben jedoch alle Kerne einen sehr großen Materialverlust gezeigt. Die unteren Zentimeter sind bei allen Kernen verloren gegangen. Bei den Kernen, die mit KSE gefestigt wurden, zeigt sich noch immer ein starkes Abgrusen.

Der Großteil der Kerne wurde vor der Festigung entsalzt. Jetzt zeigte sich anhand der Ultraschallbilder, dass sehr viel mehr Festiger eingebracht wurde. Zum Teil lässt sich auch nachweisen, dass daraufhin eine gute Entsalzung stattgefunden hat. Aber auch diesmal zeigen alle mit KSE gefestigten Kerne einen Verlust an Material und ein Abgrusen nach der Entnahme aus dem Entsalzungsbad, sowie Materialverlust. Obwohl die gemessenen Ultraschallwerte eine gute Festigung suggerierten, zeigten diese Kernen ein starkes Abgrusen. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass das Kieselgel ohne

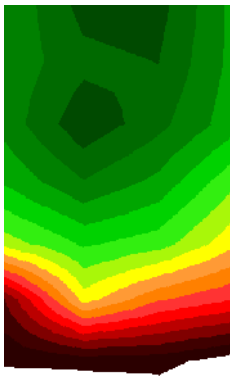
Anbindung an den Stein im Porengefüge vorliegt. Die Entsalzung war bei diesen Kernen dagegen günstiger. Bei KSE 300 HV konnte dieser Aspekt nicht bewertet werden, da die Ergebnisse sehr widersprüchlich waren. Zum Teil sah es jedoch so aus, als ob die Entsalzung sehr erfolgreich war.

Unerwarteterweise schienen sich auch die mit M Finish X 20 gefestigten Kerne gut entsalzen zu lassen. Dies zeigen zumindest die Ultraschall-Grafiken.

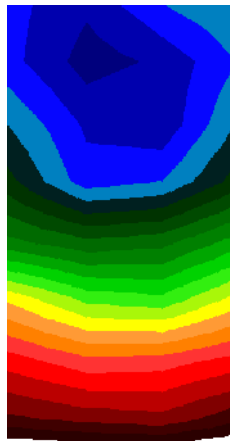
Paraloid B 72 hat die günstigste Festigkeit bewirkt, jedoch auch die schlechtesten Ergebnisse bei der Entsalzung.

Bohrkern 11

nach der 1.
Entsalzung



nach der Festigung
mit M Finish X 20



nach der 2.
Entsalzung

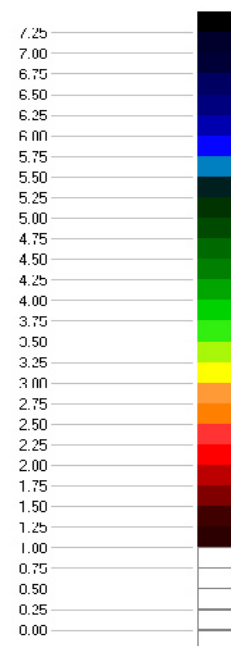
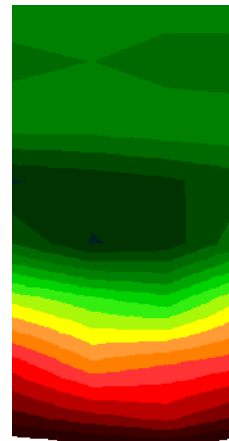
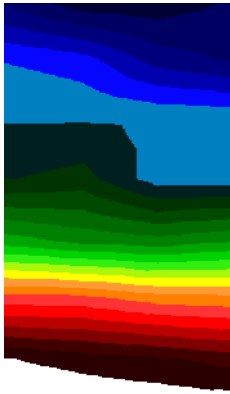
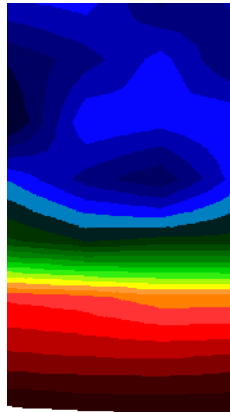
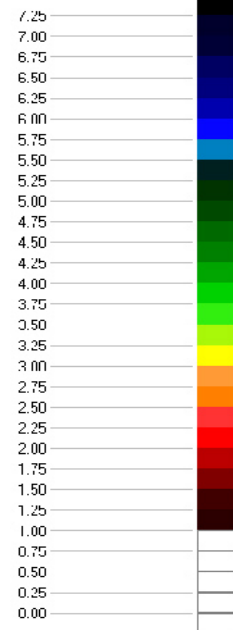
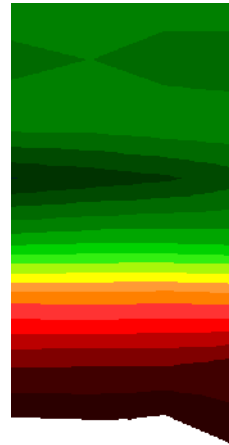


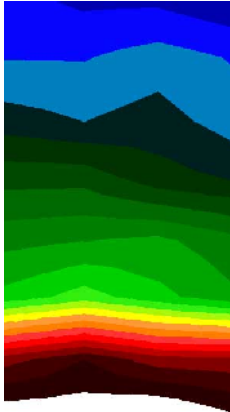
Abbildung 38: Abbildungen der Ultraschallmessungen, dargestellt mit der Software MoistAnalyze: Deutlich zu erkennen ist die Zunahme der Festigkeit durch die Tränkung mit M Finish X 20, sowie die Abnahme des Salzgehaltes im oberen Bereich. (Skala in km/s).

Bohrkern 13**nach der 1.
Entsalzung****nach der Festigung
mit KSE 300 HV****nach der 2.
Entsalzung**

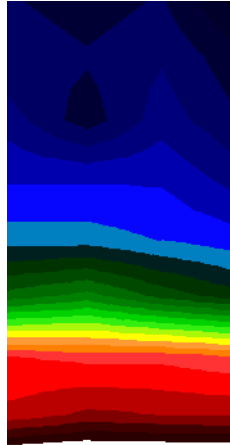
**Abbildung 39: Abbildungen der Ultraschallmessungen, dargestellt mit der Software MoistAnalyze:
Durch die Tränkung mit KSE 300 HV wurde nur eine leichte Zunahme der Festigung bewirkt, es
ist aber zu erkennen, dass eine Entsalzung im oberen Bereich stattgefunden hat. (Skala in km/s).**

Bohrkern 6

nach der 1.
Entsalzung



nach der Festigung
mit Paraloid B 72



nach der 2.
Entsalzung

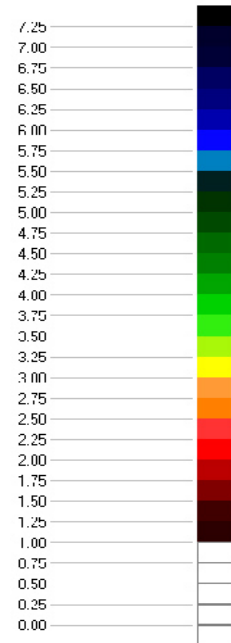
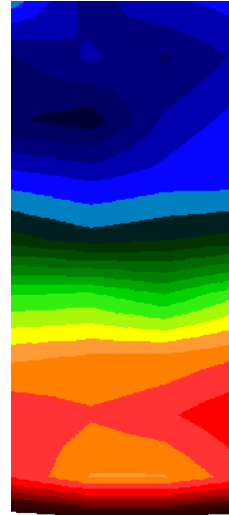


Abbildung 40: Abbildungen der Ultraschallmessungen, dargestellt mit der Software MoistAnalyze: Deutlich zu erkennen ist die Zunahme der Festigkeit durch die Tränkung mit Paraloid B 72. Jedoch ist nur eine leichte Abnahme des Salzgehaltes zu beobachten. Die Entsalzung hat eine Zunahme der Festigkeit im unteren Bereich bewirkt (Skala in km/s).

5.5.4 *Prismen*

Bei den künstlich verwitterten Bohrkernen war der Salzgehalt im Gefüge nicht bekannt, so dass keine Aussagen zur Effizienz der Entsalzung getroffen werden konnten. Daher wurde ein weiterer Versuch an unverwittertem Material durchgeführt, bei dem eine definierte Salzmenge in das Gestein eingebracht wurde. Ohne gefügezerstörende Maßnahmen ist es jedoch unmöglich, Salze (bzw. eine Salzlösung) in das Gefüge einzubringen.

Vorgehensweise

Aus bruchfrischem Laaser Marmor wurden Prismen mit den Maßen 4x4x10 cm gesägt. Sie wurden dreimal auf einer Herdplatte erhitzt und jeweils in kaltem Wasser abgekühlt. Auf diese Weise sollte der Porenraum ausreichend geweitet werden, damit die Wasseraufnahme steigt.

Anschließend wurde eine Salzlösung auf die belastete Seite der Prismen appliziert. Das wurde zehnmal wiederholt, so dass die Prismen am Ende mit 0,6g Salz belastet wurden. Die getrockneten Prismen wurden mit den verschiedenen Festigern behandelt. Aufgrund der noch immer geringen Wasseraufnahme konnten nur kleine Mengen Festiger eingebracht werden. Daher wurden die äußeren Seitenflächen ebenfalls mit behandelt, damit auf diese Weise die Durchlässigkeit getestet werden kann. Nach einem Monat wurden die Prismen in ein Entsalzungsbad mit je 800 ml Wasser gegeben. Drei Prismen wurden ohne Festigungsmittel entsalzt.

Da die Zeiträume bei einer Entsalzung im Bad sehr lange dauern, wurde die elektrische Leitfähigkeit wöchentlich gemessen.

Ergebnisse

Die mittels elektrischer Leitfähigkeit gemessenen Entsalzungsergebnisse waren im Allgemeinen sehr gut. Als einziges Produkt hat M Finish X 20 eine Entsalzung behindert. Rechnerisch hat sich herausgestellt, dass die übrigen Produkte eine fast vollständige Entsalzung möglich gemacht haben. (Werte im Anhang)

5.6 Bewertung der Versuche

Die durchgeführten Versuche konnten nur annähernd die Situation der Flechtwerksteine mit ihrer über eintausendjährigen Geschichte und zahlreichen Einflüssen nachstellen. Die Oberflächenbeschaffenheit der Marmorkörner ist sicherlich eine andere, als die der bruchfrischen und künstlich verwitterten Steine. Doch durch die Kombination aus Lockermaterial und künstlicher Verwitterung lassen sich Aussagen treffen, die auf das vorliegende Schadensbild anwendbar sind.

5.6.1 Schwierigkeiten bei der Auswertung

Die Versuchsreihen waren schwierig zu bewerten. Salzverteilungen konnten interessanterweise zunächst mit dem Ultraschall bewertet werden. Nach der Festigung der Bohrkerne war dies jedoch nicht mehr möglich. Die elektrische Leitfähigkeit gibt ausschließlich Auskunft über die Menge der Ionen im Wasser. Es wurde versucht, rechnerisch an das Problem der Quantität der Entsalzung heranzugehen. Dies ist jedoch mit Ungenauigkeiten verbunden und hat den Nachteil, dass nur ein Salz eingesetzt werden konnte. Das Verhalten der Festigungsmittel in Verbindung mit Salzgemischen

und anderen Salzen somit nicht untersucht werden. Ein weiterer Nachteil ist die kurze Dauer der Entsalzung. Bei den Flechtwerksteinen würde eine Entsalzungsmaßnahme im Bad sehr viel länger dauern, da größere Strecken zu überwinden sind. Es ist von mehreren Monaten auszugehen. Bei den Prismen und Bohrkernen, die einen Durchmesser von wenigen Zentimetern haben, dauert dieser Vorgang nicht so lange. Aufgrund des begrenzten Zeitraumes der Diplomarbeit konnte daher nicht ermittelt werden, ob die eingesetzten Festigungsmittel über einen solch langen Zeitraum im Wasserbad zur Sicherung geeignet sind.¹⁹⁴

Die Prismen liefern nur begrenzt Aussagen über den Entsalzungserfolg in Abhängigkeit von Festigungsmittel, da nur sehr wenig Festigungsmittel eingebracht werden konnte.

5.6.2 *Erfolge bei der Auswertung*

Die Versuche haben jedoch, trotz der Grenzen, die einer Versuchsreihe mit künstlich verwitterten Steinen gesetzt sind, auch interessante Resultate gebracht. So konnte belegt werden, dass sich die Salze im gesamte Gefüge verteilen und sich nicht im unteren Bereich konzentrieren. Aber auch über das Verhalten von Festigungsmitteln in Kombination mit Salzen konnten einige wichtige Fakten herausgestellt werden.

5.7 **Empfehlungen**

Die betroffenen Flechtwerksteine sind im Wasserbad zu entsalzen. Die Entsalzung ist solange durchzuführen, bis ein deutlicher Rückgang der elektrischen Leitfähigkeit zu verzeichnen ist. Da die Entsalzung im Wasserbad ein sehr langsamer Prozess ist, sollte die Leitfähigkeit wöchentlich gemessen werden. Das Wasserbad sollte mit Calciumionen gesättigt sein, um ein Auflösen von Marmorbestandteilen zu verhindern. Von einem Ionenaustauscher sollte ebenfalls abgesehen werden, da das fließende Wasser ebenfalls eine Gefahr für die Steine bedeutet.

Die Wahl des Festigungsmittels für die temporäre Sicherung des Steinmaterials sollte je nach Zustand abgewogen werden. Die KSE-Produkte ermöglichen eine schnellere Entsalzung, die den Werten einer Entsalzung ohne Festiger ähnelt. Sie schaffen jedoch keine ausreichende Festigung. Bei sekundären Oberflächen, die bereits einen mehrere

¹⁹⁴Ein Teil dieser Festiger hat jedoch bereits im Zeitraum von einem Monat im Entsalzungsbad keine ausreichende Festigung bewirkt. Mit den übrigen Bohrkernen sollten Langzeitversuche durchgeführt werden.

Zentimeter tiefreichenden Gesteinsverlust zeigen, ist zu erwägen, das Risiko weiteren Verlustes zugunsten einer dauerhaften und effizienten Entsalzung in Kauf zu nehmen. Das muss jedoch im Einzelfall diskutiert werden. Bei wichtigen Oberflächen kann dies jedoch nicht riskiert werden. Eine partielle Festigung mit Paraloid B 72 dürfte eine Entsalzung nicht schwerwiegend behindern. Zum einen gibt es für die Salze die Möglichkeit, auf anderem Weg durch das Gestein auszuwandern. Zum anderen ist auch der Paraloid-Film nicht vollständig undurchlässig.

6 Lagerung, Transport und Präsentation

Für den langfristigen Erhalt der Steine sind, unabhängig von den konservierenden Eingriffen, weitere Maßnahmen zu treffen. Dies betrifft Fragen des Klimas und der Aufbewahrung. Aber auch im Fall einer Präsentation sind bestimmte Vorgaben einzuhalten. Daher sollen an dieser Stelle einige Empfehlungen zu diesen Fragen geliefert werden.

6.1 Kurzfristige Maßnahmen

Da die Steine archäologisch und kunsthistorisch untersucht werden, ist es nicht zu umgehen, die Steine auch zu wenden. Da die Steine derzeit auf teilweise gelb gestrichenen Schalungsbrettern gelagert werden, haben sie an den Rückseiten gelbe Verfärbungen sowie Kratzspuren. Um eine kurzfristige Verbesserung der Lagerbedingungen zu schaffen, müssen die Steine auf Unterlagen gelegt werden. Diese dürfen unter den Steinen nicht durchgedrückt werden, nicht abfärben und auch nicht leicht kaputt gehen und dürfen die Steine nicht zerkratzen.

Es wurden drei verschiedene Materialien zur Verfügung gestellt und mit Probesteinen getestet.¹⁹⁵ Der PE-Schaum FT/PZ29 Flexathen (Plastazole) hat sich als am günstigsten herausgestellt. (Versuche im Anhang)

Außerdem wird empfohlen, die Steine nur mit weißen Baumwollhandschuhen zu berühren. Häufig berührte Steine erhalten durch Körperfett einen Glanz, der ihr ursprüngliches Erscheinungsbild verändert.

6.2 Klima

Das Klima im Raum wird durch Temperatur und relative Luftfeuchte bestimmt. Geringe Schwankungen sind dabei akzeptabel und auch unvermeidbar. Extreme Werte führen jedoch zu Schäden an den Objekten. Marmor reagiert sehr intensiv auf steigende Temperaturen sowie variierende Luftfeuchte. Das Raumklima muss daher streng überwacht und gegebenenfalls beeinflusst werden. Klimaschwankungen können durch Raumtemperierung und Luftbe- und Entfeuchtung ausgeglichen werden.

Es gibt derzeit noch keine Festlegung hinsichtlich Stabilitätsbeziehungen bei

¹⁹⁵Bereitgestellt von Martina Nicca.

Salzgemischen. Es kann daher nicht exakt angegeben werden, welches Klima bei welchen Salzen und Salzgemischen eingehalten werden müssen. Es muss jedoch vermieden werden, dass verbliebene Salze Hydratstufen bilden können.¹⁹⁶ Andererseits verhindert eine geringe relative Luftfeuchte die weitere Mobilisierung von Eisen- und Metallverbindungen, die zu Verfärbungen des weißen Marmors führt.

Trotzdem sollte die relative Luftfeuchte im Depot über das Jahr 40% nicht unterschreiten und 65% nicht überschreiten. Die Temperaturen sollten nicht unter 4°C absinken und nicht über 25°C ansteigen. Am wichtigsten ist, dass der Taupunkt nicht überschritten wird. Werte von 50-65% relativer Luftfeuchte und Temperaturen zwischen 18°C und 20°C werden in klimatisierten Museen angestrebt werden und sollten auch in Mústair nach Möglichkeit eingehalten werden.¹⁹⁷ Das Klima ist mit einem Thermohygrographen zu überwachen.

Da es im Kulturgüterschutzraum keine Fenster gibt, sind Maßnahmen zum Lichtschutz erst bei Umsetzung in eine Ausstellung oder ein Museum zu beachten. Eine direkte Sonneneinstrahlung ist zu vermeiden, um Gefügeschäden durch thermische Dehnung zu verhindern.

6.3 Beschriftung

Die Inventarnummer dient als Bindeglied zwischen dem Kunstobjekt und dem wissenschaftlichen Inventar und muss direkt auf das Kunstobjekt aufgebracht werden. Ältere Inventarnummern dürfen nicht entfernt werden, da sie einen wichtigen Bestandteil der Objektgeschichte darstellen und Teil seiner Dokumentation sind. Die neu aufgebrachten Inventarnummern müssen jedoch wieder entfernbar sein, und dürfen das Kunstobjekt weder beschädigen noch in seiner ästhetischen Präsentationsmöglichkeit beeinträchtigen. Die derzeitige Lösung, die Nummer auf einen Paraloidfilm mit einem Tintenschreiber aufzubringen, kann, da sie eine sehr dezente und reversible Methode ist, als gut geeignet angesehen werden.¹⁹⁸ Zusätzliche

¹⁹⁶Auras, Michael; Siedel, Heiner; Weber, Helmut: Reinigung und Steinkonservierung (1997), Seite 700.

¹⁹⁷Axer, Peter; Pelludat, Inga: Kunst und Antiquitäten - Empfehlungen zur Handhabung, Reinigung und Aufbewahrung (2004), Seite 11, 12.

¹⁹⁸Freundliche mündliche Mitteilung von Martina Nicca (September 2008). Sie hat diese Maßnahme durchgeführt.

Informationen, wie die Zuordnung zu Bauelementen, müssen auf anderem Wege notiert werden. Klebebänder wie Tesaband oder Kreppband besitzen schlechte Alterungseigenschaften. Der Klebefilm wandert mit der Zeit ins Objekt und vergilbt, versprödet und verursacht irreparable Schäden. Sie dürfen daher nie direkt auf die Oberfläche von Kunstobjekten aufgebracht werden.¹⁹⁹

¹⁹⁹Axer, Peter; Pelludat, Inga (2004), Seite 60.

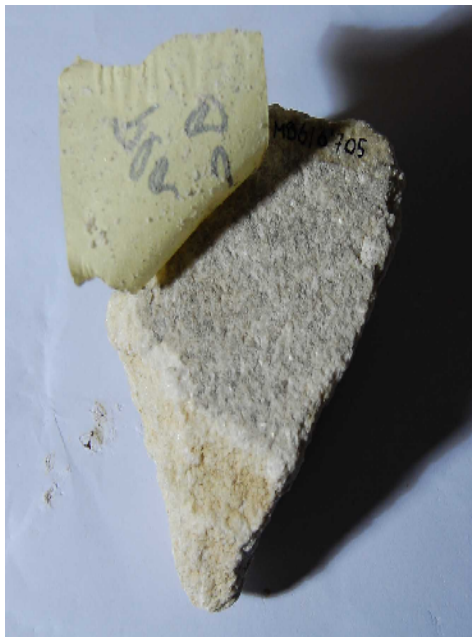


Abbildung 41: Gesteinsverlust durch die Verwendung von Klebeband zur Kennzeichnung, Inv.:M86/6'705.

Abbildung 42: Ältere Inventarnummer mit schwarzem Stift direkt auf den Stein geschrieben, Inv.: M95/17'309.

6.4 Kartierung

Von jedem Stein sollte eine ausführliche Kartierung angefertigt werden. Diese dient der Dokumentation des derzeitigen Zustandes. Sie dient außerdem dazu, die jeweiligen notwendigen Konservierungsmaßnahmen zu ermitteln und gefährdete Bereiche aufzuzeigen. Auch für eine Versendung der Objekte ist eine ausführliche Zustandsdokumentation notwendig. Im Teil 3.3 wurde das Thema bereits besprochen.

6.5 Bestandsblatt

Für die fortlaufende Arbeit mit und an den Flechtwerksteinen, sowie für die Verschickung der Steine zu Ausstellungen oder zur Bearbeitung der Steine außerhalb des Kulturgüterschutzraumes, sollte jedes Fragment ein Bestandsblatt erhalten, das vor allem Informationen über konservatorischen Zustand und notwendige Handhabung enthält.²⁰⁰ Diese sollten ausgedruckt in zweifacher Ausführung vorliegen, zum einen in

²⁰⁰Die Bestandsblätter, die momentan existieren, geben keine Auskunft über konservatorische Aspekte.

einem Ordner, der im Schutzkeller vorliegt und jederzeit zur Hand genommen werden kann. Eine weitere Ausführung sollte mit dem ausgeliehenen Stein mitgegeben werden und sowohl zur Übergabe als auch zur Gebrauchsinformation dienen. Folgende Informationen sollten zwingend vorliegen:

- Die Inventarnummer, die Zuordnung zum Bauelement
 - Größe und Material
 - besondere Kennzeichen, wie Krusten, alte Inventarnummern, Fassungsreste, Bearbeitungsspuren
 - frühere Maßnahmen
 - Schäden an Objektvorderseite auf die besondere Rücksicht zu nehmen ist (Brüche, Risse, mechanische Verluste, Oberflächenzustand)
 - Schäden der Objektrückseite (Feuchtigkeit, Salzbelastungen, sonstiges)
- Konservierungsbedarf mit geschätztem Aufwand²⁰¹
- Dazu sollten Lage- und Zustandsfotos der Steine vorliegen.

6.6 Verpackung für Lagerung und Transport

Für eine sichere Aufbewahrung während der Transporte von dreidimensionalen Objekten gibt es bereits bewährte Verpackungssysteme, die durch das Fraunhofer-Institut getestet wurden und den Ansprüchen für Kunsttransporte genügen. Da die Flechtwerksteine von Form und Material her sehr kompakt sind, müssen keine besonders aufwendigen Systeme und Spezialverpackungen entwickelt werden. Wichtig ist jedoch, dass die verwendeten Materialien chemisch unbedenklich und stabil sind.

Am sinnvollsten wäre es wohl, wenn das ausgewählte System sowohl für die Lagerung als auch für Transporte angewendet werden kann. Für Transporte sind außerdem Klimakisten zu erwägen.

Es stehen mehrere Systeme und Materialien zur Wahl. Die folgenden Systeme werden von der Firma Hasenkamp eingesetzt:²⁰²

²⁰¹ Koller, Manfred; Wedenig, Klaus: Petersfriedhof in Salzburg, Konservierung der Marmorepitaphe (1996), Seite 165.

²⁰²Das Hasenkamp-Verpackungssystem für Kunst: https://www.hasenkamp.com/tp/verpackung_de.pdf (18.11.2008, 17 Uhr).

Es gibt eine preiswerte Variante, die jedoch an Transportbedingungen, sowie die klimatischen Bedingungen angepasst ist. Die Objekte werden in Seidenpapier oder Spezialpapiere verpackt, um die Oberflächen vor Reibung zu schützen. Zum Schutz vor mechanischen Belastungen werden Wulste aus Schaumstoffstreifen, die in Seidenpapier gehüllt sind, um das Objekt gelegt. Als hoher Schutz vor mechanischen Beschädigungen und als Stoßreduktionsschutz werden auch Schaumstoffblöcke eingesetzt. Die Objekte werden in Kartons verpackt.²⁰³

Viele kleine Objekte werden zu einer großen Verpackungseinheit zusammengefasst. In einen großen Spezialkarton werden kleinere Kartons eingelegt, die mehrfach in den großen Karton hinein passen. Damit wird zum einen die Gefahr des Verlustes reduziert, zum anderen aber auch die der Beschädigung, da keine einzelnen Kartons herunterfallen können.

Die Kartons entsprechen der DIN 47110815 und sind aus chemisch stabilen Materialien hergestellt. Jeder Karton kann zusätzlich mit mehrlagigem Schaumstoff²⁰⁴ ausgefüllt werden. Aus den Schaumstoffen können Negativformen der Objekte ausgeschnitten und die Objekte darin eingebettet werden.

Die Spezialkartons mit beliebig vielen Innenkartons können auch in klimatisierte Objektkisten verpackt werden.²⁰⁵

²⁰³Das Softpacksystem: Basisverpackung für dreidimensionale Objekte und Skulpturen.

²⁰⁴Unter anderem werden die Schaumstoffe RG 20 und RG 40 angeboten. RG ist das Raumgewicht und die Zahl hat die Einheit kg/cm³. Als weich gelten 20 - 30 cm³ pro kg.

²⁰⁵Das Kartonage-System.



Abbildung 43: (links) Das Kartonage-System der Firma Hasenkamp

Abbildung 44: (rechts) Das 3D-Objektkistensystem der Firma Hasenkamp

Die 3D Objektkisten der Firma Hasenkamp bieten Schutz gegen Stöße, Vibrationen und mechanische Schäden. Sie sind in verschiedenen Materialvarianten (Holz, Karton und Aluminium) sowie Ausstattungsvarianten erhältlich. Um das Ein- und Auspacken zu erleichtern, sind sowohl Kistendeckel, als auch die Front abnehmbar. Die Kisten aus Karton und Aluminium sind wesentlich leichter als die Holzvariante. Die Kistendeckel und die Front der Aluminiumvariante werden hierbei mit Überlaufverschlüssen (Butterflyverschlüssen) verschlossen.²⁰⁶

Diese oder vergleichbare Verpackungssysteme sollten erwogen werden.

6.7 Scannen

Zur Dokumentation bzw. zur Präsentation wird empfohlen, die Fragmente zu scannen. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten sind sehr zahlreich. Mit einer geeigneten Software lassen sich die gescannten Objekte visualisieren und gegebenenfalls am Monitor, das bedeutet berührungsfrei für die Originale, zusammensetzen. Rekonstruktionen können getestet werden, und die gescannten Fragmente können nach Bedarf betrachtet und sortiert werden. Die Originale können hingegen geschützt und unberührt gelagert werden.

Des Weiteren bieten genaue Scans die Möglichkeit zur Herstellung von anpassenden Teilen für beispielsweise Ergänzungen, schützende Verpackungen sowie von Kopien.

²⁰⁶Das 3D - Objektkistensystem.

Zum exakten Scannen gibt es mittlerweile mehrere aktuelle Lösungen, die wesentlich genauer arbeiten als Laserscanner. Dazu gehören die Streifenlichtscanner (auch Lichtschnittscanner) und die Infrarotscanner. Bestimmte Geräte sind speziell zur Dokumentation von Kleinobjekten entwickelt worden und erreichen Genauigkeiten im Submillimeterbereich.²⁰⁷ Bei einem Schnittlichtscanner wird mit einem Beamer ein Netz von Streifen auf das Objekt geworfen, dessen Krümmungen gescannt werden.

Die erhaltenen Daten werden mit spezieller Software aufbereitet.²⁰⁸

Mit den erhaltenen Daten lassen sich Kopien oder anpassende Teile auf drei verschiedenen Wegen herstellen:

1. Fräsen: zum Beispiel zum Herstellen von anpassenden Ergänzungsstücken, auch aus Marmor
2. Drucken (3D-Plotten, Rapid Prototyping): zum Beispiel zur Herstellung von verkleinerten Modellen aus verschiedenen Kunststoffen
3. Gießen: zum Beispiel zur Herstellung von Negativformen für Ergänzungen

6.8 Präsentation bzw. Aufstellung

Falls die Flechtwerksteine für Ausstellungen vorbereitet werden sollten, muss ein individuelles Konzept zur Präsentation ausgearbeitet werden. Es sollen an dieser Stelle jedoch einige Vorgaben gemacht werden, da es sich um archäologische Objekte handelt.

Die Konstruktion muss statisch vollkommen sicher sein, wobei kraftschlüssige Klebeverbindungen nicht direkt an den Fragmenten durchgeführt werden dürfen. Es dürfen keinerlei Dübellöcher hinzugefügt werden. Eine möglichst berührungsfreie Konstruktion ohne direkten Kontakt mit der Oberfläche sollte angestrebt werden. Die Konstruktion sollte eine dauerhafte Lösung darstellen, die sich wiederverwenden lässt. Sie muss daher auf- und abbaubar sein, daher sollte vor allem mit Schraubsystemen anstelle von Klebungen gearbeitet werden. Die verwendeten Materialien müssen

²⁰⁷<http://www.arctron.de/3D-Vermessung/3D->

Laserscanning/Beispiele/Kunstdenkmaler___Objektscans.php (03.01.2009, 16 Uhr).

²⁰⁸Eine preiswerte Option ist die Firma TRIGONART in Berlin (Mark Praus und Thomas Bauer), die sehr gute Referenzen aufweisen und die ausführlich bei einem persönlichen Gespräch die Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt haben. Das umfangreiche Material, das mir zur Verfügung gestellt wurden, wurde an dieser Stelle nicht in die Arbeit mit eingearbeitet, da dies ein eigenes Thema darstellt.

chemisch stabil sein, das bedeutet unter anderem den Einsatz von V4A - oder vergleichbarem Edelstahl.

Die Konstruktion muss vollständig reversibel sein. Das erforderliche Klima muss während der Transporte und der Präsentation gewährleistet bleiben.

Die konstruktiven Elemente sollten in den Hintergrund treten und nicht das Gesamterscheinungsbild beeinträchtigen. Sie müssen als moderne Materialien zu erkennen sein.

7 Zusammenfassung und Resümee

Die vorliegende Diplomarbeit stellt den Versuch dar, sich an eine sehr komplexe Sammlung verschiedener Objekte heranzuarbeiten und ein Konservierungskonzept zu erarbeiten.

Dazu wurde zunächst eine umfangreiche Bestandsaufnahme durchgeführt, bei der zum Teil exemplarisch Untersuchungen durchgeführt wurden. Es wurde ein Überblick geschaffen, der dazu diente, die Objekte und ihre Geschichte kennen zu lernen, ihren Zustand und den entsprechenden Konservierungsbedarf zu erkennen und Vorschläge zur Erhaltung zu liefern.

Bei einem solch umfangreichen Bestand ist es nicht möglich, sämtliche Fragen im Rahmen einer Diplomarbeit zu klären. Daher wurde zunächst ein allgemeines Konservierungskonzept präsentiert, das die notwendigen Maßnahmen beschreibt. Schwerpunkt bei der Erarbeitung des Konservierungskonzeptes wurde ein sehr akutes Problem, das mit voranschreitendem Materialverlust einhergeht: Der Umgang mit salzbelasteten Steinen, die ein stark entfestigtes Gefüge aufweisen. Diesem Thema wurde ein ausführliches Kapitel gewidmet.

Zum Schluss wurden weitere Empfehlungen zum Umgang mit den Flechtwerksteinen in Hinsicht auf Lagerung und Transporte gegeben.

Die Bestandsaufnahme verlief vom allgemeinen Dokumentieren aller vorliegenden Fragmente, auch in Hinsicht auf Polychromie und Bearbeitungstechnik, bis hin zur Untersuchung und Kartierung ausgewählter Objekte.

Während bei der Bearbeitung große Unterschiede in Qualität und Technik festgestellt wurden, konnte die Frage nach einer Fassung der Flechtwerksteine nicht abschließend geklärt werden. In der Untersuchung einer Probe ließ sich nicht eindeutig feststellen, ob es sich um eine Farbveränderung durch eisenhaltige Bestandteile oder um Fassungsreste handelt.

In Hinsicht auf den Erhaltungszustand konnten die Ursachen von Schäden zum Teil geklärt werden, so wie auch Zusammenhänge zwischen Oberflächenveränderungen und Geschichte der Fragmente aufgezeigt wurden. Unterstützt wurde die Untersuchung durch gezielte Probennahmen. Als interessantestes Ergebnis sei hier eine

Phosphatkruste zu nennen, die auf Marmor sehr selten vorliegt und auf die Lagerung der Steine unterhalb eines Abortes zurückzuführen ist. Auch die Salze, die im Gefüge eines Steines nachgewiesen wurden, waren auf menschlichen Urin zurückzuführen. Helle Krusten, bei denen zunächst von Salzen ausgegangen wurde, stellten sich als ungefährliche Calciumcarbonat-Beläge heraus. Es konnte auch vereinzelt nachgewiesen werden, dass früher schon Konservierungsmaßnahmen mit organischen Materialien durchgeführt wurden.

Als weiterer Schritt sollte das Problem der Entsalzung von stark entfestigtem Gestein behandelt werden. In verschiedenen Versuchsreihen sollte geklärt werden, welche der handelsüblichen Mittel aus der Konservierung für eine Vorfestigung geeignet sind. Getestet wurden die Kieselsäureester-basierten Produkte KSE 100, KSE 300 und KSE 300 HV, sowie Paraloid B 72 und M Finish X 20.

Die Versuche wurden mit Lockermaterial und künstlich verwitterten Bohrkernen durchgeführt. Alle Schritte der künstlichen Verwitterung bis zur Festigung und Entsalzung wurden mit dem Ultraschallgerät dokumentiert. So konnten zusätzlich Aussagen zur Verwitterung von Marmor getroffen werden.

Keines der getesteten Produkte wurde den Anforderungen in jeder Hinsicht gerecht, sodass keine eindeutige Empfehlung gegeben werden konnte. Die KSE-Produkte erreichten nicht die erforderliche Festigkeit der Steine, während der Entsalzungserfolg sehr gut war. Paraloid B 72 hingegen war in Hinsicht auf die Festigung als sehr gut, bezüglich der Entsalzung hingegen als eher mittelmäßig zu bewerten. M Finish X hatte die schlechtesten Entsalzungswerte und führte zu einer Glanzbildung. Das KSE 300 HV hat eine leichte Bräunung auf dem Marmor bewirkt.

8 Ausblick

Nach den vorliegenden Untersuchungen und Erkenntnissen können nun gezielt weitere Untersuchungen durchgeführt werden. In der Arbeit wurden zahlreiche Anregungen zum weiteren Verfahren im Umgang mit den Steinen gegeben.

An erster Stelle sei die Frage der Polychromie genannt. Es sollte geklärt werden, ob Farbschatten und Reliefs, wie sie bei antiken Skulpturen nachgewiesen wurden, mit technischen Hilfsmitteln, wie dem extremen Streifenlicht, zu entdecken sind.

Eine Untersuchung in Hinsicht auf die genannten Unterschiede bei der Bearbeitung der Steine und dem Material selbst könnten möglicherweise Hinweise für eine weitere Zuordnung der Steine liefern.

Empfehlenswert wäre auch, Mörtelanalysen durchzuführen. Dabei sollte auch geklärt werden, ob durch Mörtelreste mögliche Schadsalze in die Steine eingebracht werden. Dies würde weitere Argumente für oder gegen die Entfernung von den Oberflächen bieten.

Für die Entwicklung eines gesamten Konservierungskonzeptes sind weitere Untersuchungen, vor allem aber Diskussionen notwendig. Einige Vorschläge zu einem allgemeinen Konservierungskonzept wurden gemacht. Es gibt jedoch stets eine Vielzahl möglicher und auch richtiger Entscheidungen, beispielsweise bei der Wahl der Steinersatzstoffes oder der Frage nach einer Reinigung.

9 Quellennachweis

- Amoroso, G.G.; Fassina, V. (2006): Amoroso, G.G.; Fassina, V.: Stone decay and conservation -atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection., Elsevier, Amsterdam, 1983.
- Arnold, A.; Zehnder, K.; Küng, A.; Emmenegger, O. (1991): Arnold, A.; Zehnder, K.; Küng, A.; Emmenegger, O.: Wandmalereizerfall, Salze und Raumklima in der Klosterkirche von Müstair. Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 2/1991, Worms, 1991, Seite 171 - 200.
- Auras, Michael; Siedel, Heiner; Weber, Helmut (1997): Auras, Michael; Siedel, Heiner; Weber, Helmut: Reinigung und Steinkonservierung, in: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Ulm, 1997, Seite 683-716.
- Axer, Peter; Pelludat, Inga (2004): Axer, Peter; Pelludat, Inga: Kunst und Antiquitäten - Empfehlungen zur Handhabung, Reinigung und Aufbewahrung, Regensburg, 2004 .
- Banik, Gerhard; Krist, Gabriela [Hrsg.] (1984): Banik, Gerhard; Krist, Gabriela [Hrsg.]: Lösungsmittel in der Restaurierung, Wien, 1984.
- Bartl, Anna; Krekel, Christoph; Lautenschlager, Manfred; Oltrogge, Doris (2005): Bartl, Anna; Krekel, Christoph; Lautenschlager, Manfred; Oltrogge, Doris: Der "Liber illuministarum" aus Kloster Tegernsee - Edition, Übersetzung und Kommentar der kunsttechnologischen Rezepte, Stuttgart, 2005,.
- Bernhard, Frieder; Jakob, Sepp; Kögler, Reinhard; Kopf, Georg; Leicher, Donatus M.; Ludwig, Ernst; Peitz, Adolf; Pfeiler, Johann; Wibbelhoff; Heinz; Wihr, Rolf: Der Steinmetz und Steinbildhauer - Ausbildung und Praxis, München, 1996.

- Berry, Janet; Price, A. Clifford (1994): Berry, Janet; Price, A. Clifford: The movement of salts in consolidated stone, in: Proceedings of the 3th International Symposium Venezia 1994 - The conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Venedig, 1994, Seite 845- 848.
- Bläuer Böhm, Christine (1994): Bläuer Böhm, Christine: Salzuntersuchungen an Baudenkmälern, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Heft 1, Jahrgang 8/1994, Worms, 1994, Seite 86-104.
- Bläuer-Böhm, Christine (2002): Bläuer-Böhm, Christine: Ableiten von Konservierungsmaßnahmen aus dem Verwitterungsgeschehen, in: Mauersalze und Architekturoberfläche – Tagungsberichte Hochschule für Bildende Künste Dresden 1. bis 3. Februar 2002 Dresden, 2002, Seite 84-89.
- Bläuer-Böhm, Christine (2003): Bläuer-Böhm, Christine: Restaurierung der Westmauer - Salzprobleme - Brienz/Brinzauls, GR, Burgruine - Bericht [unveröffentlicht], 2003, Zürich.
- Bläuer-Böhm, Christine (1996): Bläuer-Böhm, Christine: Assessment of quantitative salt analysis by the water extraction method on lime mortars, in: Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of stone, Berlin, 1996, Seite 1505-1519.
- Bläuer-Böhm, Christine (2004): Bläuer-Böhm, Christine: Techniques and Tools for Conservation Investigations, in: 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, June 27-July 2 ICOMOS Sweden, Stockholm, 2004 , Seite 549-560 .
- Boos, M.; Sattler, Ludwig.: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung unterschiedlicher Steinfestiger auf Basis Kieselsäureester, in: Natursteinkonservierung - Grundlagen, Entwicklung und Anwendungen, in:

WTA-Schriftenreihe Heft 23, Freiburg, 2001, Seite 33-42.

- Brinkmann, Vinzent: Die Polychromie der archaischen und frühklassischen Skulptur, München, 2003.
- Cariati, Franco; Rampazzi, Laura; Toniolo, Lucia; Pozzi, Andrea: Calcium oxalate films on stone surfaces: experimental assessment of the chemical formation, in: Studies in conservation, Vol. 45, Number 3, London, 2000, Seite 180-188.
- Charola, A.E.; Rossi-Manaresi, R.; Koestler, R.J.; Wheeler, G.E.; Tucci, A.: SEM Examination of limestones treated with silanes or prepolymerized silicone resin in solution, in: Adhesives and consolidants, Reprints of the Contributions to the IIC Congress, Paris, 1984, Seite 182-184.
- Dannheimer, Hermann (1980): Dannheimer, Hermann: Steinmetzarbeiten der Karolingerzeit - Neufunde aus den altbayerischen Klöstern 1953-1979 , München, 1980.
- Dürrast, H.; Siegesmund, S.; Prasad, M. (1999): Dürrast, H.; Siegesmund, S.; Prasad, M.: Die Schadensanalyse von Naturwerksteinen mittels Ultraschall Diagnostik: Möglichkeiten und Grenzen, in: Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Band 150, Teil 2, Stuttgart, 1999, Seite 359-374.
- Egloffstein, Petra (1998): Egloffstein, Petra: Vulkanische Tuffsteine als Werksteine an historischen Bauwerken in Ungarn und Deutschland – Verwitterungsverhalten und Konservierungskonzepte, Dissertation, Karlsruhe, 1998.
- Emmenegger, Oskar (2001): Emmenegger, Oskar: Karolingische und romanische Wandmalerei in der Klosterkirche: Technik, Restaurierungsprobleme, Massnahmen, in: Die mittelalterlichen Wandmalereien

im Kloster Münstair - Grundlagen zur Konservierung und Pflege, hrsg. Wyss, Alfred; Rutishäuser, Hans E.; Nay, Marc Antoni., Zürich, 2001, Seite 77-140.

- Ettl, Hans; Pfanner, Michael: Die Marmorreliefs des Münchner Siegestors – Konstruktion und Konservierung, in: Stein – Zerfall und Konservierung, Leipzig, 2005, Seite 182 – 187.
- Fimmel, Romana; Weber, Johannes; Bayer, Karol; Mirwald, Peter W. (1995): Fimmel, Romana; Weber, Johannes; Bayer, Karol; Mirwald, Peter W.: Preliminary results after a short term exposure of marble samples from Laas and Sterzing (Alps, N-Italy), in: Eurocare - Euromarble, Proceedings of the 5. Workshop, Innsbruck 1994, Forschungsbericht, München, 1995, Seite 1-7 .
- Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W. (1996): Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W.: Experimentelle Untersuchungen zum Verwitterungsverhalten des Laaser Marmors in alpiner Umgebung, in: Restauratorenblätter 17 – 20 Jahre Steinkonservierung 1976 – 1996 Bilanz und Perspektiven, Kloster Neuburg und Wien, 1996, Seite 67 – 71.
- Fitzner, Bernd; Heinrichs, Kurt; Kownatzki, Ralf: Klassifizierung und Kartierung, in: Denkmalpflege und Naturwissenschaft - Natursteinkonservierung I, Berlin, 1995, Seite 41-88.
- Fitzner, Bernd; Heinrichs, Kurt: Bauwerkskartierung – ein Verfahren zur quantitativen Bewertung der Verwitterungsschäden an Natursteinbauwerken, in Stein - Zerfall und Konservierung, Leipzig, 2005, Seite 56 - 60.
- Geller, Birgit; Hiby, Gudrun: Flüchtige Bindemittel in der Papierrestaurierung sowie Gemälde- und Skulpturenrestaurierung, Kölner Beiträge zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut, Band 10, München, Siegl, 2000.

- Goll, Jürg: Müstair, Ausgrabung und Bauuntersuchung im Kloster St. Johann, in: Jahresberichte 2005 - Archäologischer Dienst Graubünden - Denkmalpflege Graubünden, Chur, 2005, Seite 51-63.
- Goll, Jürg: Müstair, Ausgrabung und Bauuntersuchung im Kloster St. Johann, in: Jahresberichte 2006 - Archäologischer Dienst Graubünden - Denkmalpflege Graubünden, Chur, 2006, Seite 23-36.
- Goll, Jürg: Bau und Gestalt der Heiligkreuzkapelle, in: Die mittelalterlichen Wandmalereien im Kloster Müstair - Grundlagen zu Konservierung und Pflege, Zürich, 2002, Seite 169-174.
- Gómez-Heras, Miguel; Varas, Maria José; Álvarez de Buergo, Mónica: Characterization of changes in matrix of sandstones affected by historical fires, in: 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, June 27-July 2 ICOMOS Sweden, Stockholm, 2004, Seite 561-568.
- Goretzki, Lothar (Hrsg.): Verfahren zum Entsalzen von Naturstein, Mauerwerk und Putz - WTA-Schriftenreihe, Heft 8, Freiburg und Unterengstringen, 1996.
- Grasegger-Schön, Gabriele: Neues Merkblatt: WTA-Merkblatt 3-13-01/D „Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen“, in: Mauersalze und Architekturoberfläche – Tagungsberichte Hochschule für Bildende Künste Dresden 1. bis 3. Februar 2002, Dresden, 2002, Seite 154-156.
- Grimm, Corinna: Kalksteinkonservierung – Vergleichende Untersuchungen ausgewählter Festigungsmittel zur Festigung des Halberstädter Muschelkalks, Diplomarbeit, Potsdam, 2001.
- Grimm, Wolf-Dieter: Beobachtungen und Überlegungen zur Verformung von Marmorobjekten durch Gefügeflockung, in: Zeitschrift der Deutschen

Geologischen Gesellschaft, Band 150, Teil 2, Stuttgart, 1999, Seite 195-235.

- Grobe, J. [Hrsg.]: Natursteinkonservierung - Grundlagen, Entwicklung und Anwendungen, in: WTA-Schriftenreihe Heft 23, Freiburg, 2001.
- Grobe, J.; Boos, M.; Wolke, A.; Zeine, Ch.: Schutz von Steinoberflächen durch Applikation elastischer Kieselsäure-Ester - Bilanz eines DBU-Projektes, in: Natursteinkonservierung - Grundlagen, Entwicklung und Anwendungen, WTA-Schriftenreihe Heft 23, Freiburg, 2001, Seite 9-32.
- Grüner, F.; Grasegger, G.: Der Einfluß der Kompressentrocknung auf den Entsalzungseffekt, in: Verfahren zum Entsalzen von Naturstein, Mauerwerk und Putz - WTA-Schriftenreihe, Hrsg.: Lothar Goretzki, Heft 8, Freiburg und Unterengstringen, 1996, Seite 42-57.
- Hansen, Eric F.; Griswold, John; Harrison, Leslie; Ginell, William S.: Deteriorated Stone: A Preliminary Evaluation of Preconsolidants, in: 11th Triennial Meeting Edinburgh 1-6 September 1996, ICOM Committee for Conservation (), Preprints, London, 1996, Seite 798-804.
- Herm, C.; Klemm, D.D.; Snethlage, R.: Untersuchung zur Verwitterung von Farbfassung auf Naturstein, in: Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung, Berlin, 1993, Seite 53-62.
- Henning, Otto; Knöfel, Dietbert: Baustoffchemie - Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten, Berlin, 1997.
- Hilbert, G.: Filmbildung aus unterschiedlichen Kieselsäureestern im REM-Bild, in: Natursteinkonservierung - Grundlagen, Entwicklung und Anwendungen, in: WTA-Schriftenreihe Heft 23, Freiburg, 2001, Seite 43-53.
- Hoferick, Frank: Entsalzung von Skulpturen aus Elbsandstein im

Wasserbadverfahren, Diplomarbeit, Potsdam, 2005.

- Jacobsen, Helen: Marmorkonservierung – Vergleich ausgewählter Festigungsmittel zur Konservierung von Großkuzendorfer Marmor, Diplomarbeit, Potsdam, 2006.
- Johansson-Meery, Barbara: Karolingerzeitliche Flechtwerksteine aus dem Herzogtum Baiern und aus Bayerisch-Schwaben, München, 1993.
- Kalisch, Uwe: Der Einfluss von Raumklimaschwankungen auf Ausstattungs- und Raumbooberflächen, in: Salze im historischen Natursteinmauerwerk, IFS-Tagung 2002, Bericht Nr. 14 - 2002, Mainz, 2002, Seite 75-80.
- Karpf, Kurt: Frühmittelalterliche Flechtwerksteine in Karantanien – Marmorne Kirchengestaltungen aus tassilonisch-karolingischer Zeit, Innsbruck, 2001.
- Koblischek, Peter J.: In-situ strengthening of morbid marble monuments, in: Euromarble Eurocare, Proceedings of the 9th Workshop Munich, October 8-10, 1998, Forschungsbericht 17/1999, München, 1999, Seite 109-120.
- Koblischek, Peter J.: Polymers in the renovation of buildings constructed of natural stone in the Mediterranean Basin, in: proceedings of the 3rd International Symposium Venezia 1994 - The conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Venedig, 1994, Seite 849-854.
- Köhler, W.; Simon, S.: The monument to Gustav II Adolf in Göteborg - Ultrasonic Investigations on the Carrara Marble Base, in: Eurocare-Euromarble EU 496, Proceedings of the Third Workshop Göteborg, September 30-October 3 1992, Forschungsbericht 11/1993, Göteborg, 1993, Seite 117-122.
- Koller, Manfred; Nimmrichter, Johann: Die Reinigung von Steinoberflächen als Restaurierproblem, in: Restauratorenblätter 17 – 20 Jahre Steinkonservierung

- 1976 – 1996 Bilanz und Perspektiven, Kloster Neuburg und Wien, 1996, Seite 117-125.
- Koller, Manfred; Wedenig, Klaus: Petersfriedhof in Salzburg, Konservierung der Marmorepitaphe, in: Restauratorenblätter 17 – 20 Jahre Steinkonservierung 1976 – 1996 Bilanz und Perspektiven, Kloster Neuburg und Wien, 1996, Seite 163-168.
 - Koller, M.; Paschinger, H.; Richard, H.; Prandtstetten, R.: Die Wiener Pestsäule, in: Restauratorenblätter, Wien, 1982.
 - Kraus, Karin: Umwelteinflüsse auf Natursteinoberflächen, in: Umwelteinflüsse auf Oberflächen – Belastungs- und Abbaumechanismen in Abhängigkeit von Umwelt- und Klimaeinflüssen, Ostfildern / Nellingen, 1988, Seite 64-80.
 - Laue, Steffen: Verwitterung von Naturstein durch lösliche Salze an wechselfeuchter Luft, in: Salze im historischen Natursteinmauerwerk, IFS-Tagung 2002, Bericht Nr. 14 - 2002, Mainz, 2002, Seite 19-30.
 - Littmann, K.; Riecken, B., Sasse, H.R.: Steinschutzstoffe nach dem Aachener Konzept, in: Denkmalpflege und Naturwissenschaft – Natursteinkonservierung II, Stuttgart, 1998, Seite 207 – 228.
 - Lukaszewicz, Jadwiga W.: The influence of pre-consolidation with ethyl-silicate on soluble salts removal, in: 8th International congress on deterioration and conservation of stone – proceedings Volume 3, Berlin, 1996, Seite 1203 bis 1208 .
 - Mac Crone: Microscopy for Art Conservators, research institute, 1982, Seite 107-206.
 - Matteini, Mauro: Mineralische Festigungsmittel zur Konservierung von

- Objekten aus porösem Material aus dem Bereich der Kunst und Archäologie, in: Mauersalze und Architekturoberfläche – Tagungsberichte Hochschule für Bildende Künste Dresden 1. bis 3. Februar 2002, Dresden, 2002, Seite 173 - 184.
- Müller, Friedrich: Gesteinskunde – Lehrbuch und Nachschlagewerk über Gesteine für Hochbau, Innenarchitektur, Kunst und Restauration, Ulm, 1994.
 - Mutschmann, Johann; Stimmelmayer, Fritz: Taschenbuch der Wasserversorgung, Wiesbaden, 2007.
 - Nicca, Martina: Restaurierungsbericht – Kleben von Marmorfragmenten, Müstair, 2007.
 - Ondrasina, J.; Kirchner, D.; Siegesmund, S.: Freeze-thaw cycles and their influence on marble deterioration: a long-term experiment, in: Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies, Geological Society Special Publication No. 205, London, 2002, Seite 9-18.
 - Pérez, J.L.; Villegas, R.; Vale, J.F.; Bello, M.A.; Alcalde, M.: Effects of consolidants and water repellent treatments on the porosity and pore size distribution of limestones, in: : Methods of evaluation products for the conservation of porous building materials in monuments, International Colloquium Rome 19/21 June 1995, Rom, 1995 , Seite 203-211.
 - Pietsch, Annik: Lösemittel - Ein Leitfaden für die restauratorische Praxis, in: VDR Schriftenreihe zur Restaurierung, Band 7. Stuttgart, 2002.
 - Poschlod, Klaus: Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung, Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen - Allgemeine und Angewandte Geologie, Reihe B, München, 1990.

- Pung, Olaf: Methylmethacrylat (MMA) - Reaktionsharz für reversible Klebungen in der Steinrestaurierung, in: Biuletyn Informacyjny Konservatorów Dziel Sztuki, 16. Jg. Nr. 1, Łodz, 2005, Seite 72-78.
- Revez, Maria João: Of Ultrasounds and Funerary Sculptures - An Internship in Stone Conservation, Internship Report, Lissabon, 2006.
- Richard, Helmut W.: Chemische und physikalische Grundlagen zur Praxis der Steinkonservierung, in: Restauratorenblätter 17 – 20 Jahre Steinkonservierung 1976 – 1996 Bilanz und Perspektiven, Kloster Neuburg und Wien, 1996, Seite 103 – 110.
- Roth-Rubi, Katrin; Sennhauser, Hans Rudolf: Karolingische Flechtwerkskultur - Kataloge der Stücke aus Münstair, Schänis und aus dem Tessin, Stand März 2007.
- Rüdrieh, Jörg Michael: Gefügekонтроllierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore; Dissertation, Göttingen, 2003.
- Rutishauser, Hans; Wyss, Alfred: Einleitung, in: Die mittelalterlichen Wandmalereien im Kloster Münstair - Grundlagen zu Konservierung und Pflege, Zürich, 2002, Seite 12 - 14.
- Sakka, Sumio: Handbook of Sol-gel Science and Technology - Processing Characterization and Application, in: Application of Sol-gel technology, Volume III, Boston, 2005.
- Sattler, Ludwig: Steinfestigung an salzbelasteten Gesteinen, in Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung, Berlin, 1992, Seite 165-168.
- Schmeikal, Katja: Sandsteinkonservierung – Vergleich ausgewählter

Festigungsmittel zur Festigung des Loderslebener Sandsteins, Diplomarbeit, Potsdam, 2002.

- Selwitz, Charles: Epoxy Resins in Stone Conservation - Research in Conservation 7, California, 1992.
- Sennhauser, Hans Rudolf: Baugeschichte und Bedeutung des Klosters St. Johann, in: Die mittelalterlichen Wandmalereien im Kloster Müstair - Grundlagen zu Konservierung und Pflege, 2002, Zürich, Seite 17-30.
- Sennhauser, Hans Rudolf: Müstair, Ausgrabung und Bauuntersuchung im Kloster St. Johann, in: Jahresberichte 1998 - Archäologischer Dienst Graubünden-Denkmalpflege Graubünden, Chur, 1998, Seite 6-13.
- Sennhauser, Hans Rudolf; und Mitarbeiter: Müstair, Ausgrabung und Bauuntersuchung im Kloster St. Johann, in: Jahresberichte 2003 - Archäologischer Dienst Graubünden-Denkmalpflege Graubünden, 2003, Chur, 2003, Seite 34-56.
- Siedel, H.: Zum Erfolg von Kompressenentsalzung an Naturstein in der restauratorischen Praxis, in: Verfahren zum Entsalzen von Naturstein, Mauerwerk und Putz - WTA-Schriftenreihe, Hrsg.: Lothar Goretzki, Heft 8, Freiburg und Unterengstringen, 1996, Seite 58-73 .
- Sheremeti-Kabashi, Flurije: Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Carrara-Marmor und deren Einfluss auf die Verwitterung, Dissertation, München, 2002.
- Simon, Stefan: Zur Verwitterung und Konservierung kristallinen Marmors - Untersuchungen zu physiko-mechanischen Gesteinskennwerten von Calcit und zur Anpassung und Überprüfung von Gesteinsschutzmitteln, Dissertation, Schweinfurt, 2001.

- Skoulikidis, Theodore: The application and the limits of the intensification of the conditions by artificial weathering of stones, in: Methods of evaluation products for the conservation of porous building materials in monuments, International Colloquium Rome 19/21 June 1995, Rom, 1995, Seite 461-473.
- Snethlage, Rolf: Leitfaden Steinkonservierung – Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein, Stuttgart, 1997.
- Snethlage, Rolf: Methoden der Steinkonservierung - Anforderungen und Bewertungskriterien, in: Denkmalpflege und Naturwissenschaft - Natursteinkonservierung I, Berlin, 1995, Seite 3-40.
- Snethlage, Rolf; Ettl, Hans; Sattler, Ludwig: Ultraschallmessungen an PMMA-getränkten Marmorskulpturen, in: Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Band 150, Teil 2, Stuttgart, 1999, Seite 387-396.
- Stevenson Goins, Elizabeth; Wheeler, George Segan; Fleming, Sandra A.: The influence of reaction parameters on the effectiveness of tetraethoxysilane-based stone consolidants: solvent effects, in: Methods of evaluation products for the conservation of porous building materials in monuments, International Colloquium Rome 19/21 June 1995, Rom, 1995, Seite 459-274.
- Steiger, Michael; Behlen, Andreas; Wiese, Lutz: Immissionsbelastung durch salzbildende Stoffe und Wirkung auf mineralische Baustoffe, in: Salze im historischen Natursteinmauerwerk, IFS-Tagung 2002, Bericht Nr. 14 - 2002, Mainz, 2002, Seite 1-10.
- Studer, Walter: Ranke, Gitter, Kapitell: Eine Ecke des Paradieses aus Disentis/Mustér, Kloster St. Martin, in: Jahresberichte 2001 - Archäologischer Dienst Graubünden-Denkmalpflege Graubünden, Chur, 2005, Seite 65-89.
- Taberner, José Diaz: Die Fundmünzen aus dem Kloster St. Johann in Müstair,

- in: Müstair, Kloster St. Johann – 2 Münzen und Medaillen, Zürich, 1996, Seite 11 - 154.
- Trümpy, Rudolf: Zur Geologie des Münstertals, in: Müstair- Kloster St. Johann: Naturwissenschaftliche und technische Beiträge, Zürich, 2008, Seite 11 - 22.
 - Weber, Johannes: Grenzen der Aussagekraft von Salzanalysen, in: Mauersalze und Architekturoberfläche – Tagungsberichte Hochschule für Bildende Künste Dresden 1. bis 3. Februar 2002, Dresden, 2002, Seite 36-40 .
 - Weber, Johannes: Laas Marble, Sterzing Marble and Baumberg Sandstone on outdoor exposure: Preliminary report on colour measurements (Seite 1-3), in: Eurocare - Euomarble, Proceedings of the 5. Workshop, Innsbruck 1994, Forschungsbericht, München, 1995.
 - Welthe, Kurt: Werkstoffe und Techniken der Malerei, Stuttgart, 2005.
 - Wendler, Eberhard: Festigung von "Problemgesteinen", in: Stein - Zerfall und Konservierung, Leipzig, 2005, Seite 109-114.
 - Wilke, Verena: Marmorkonservierung Möglichkeiten der Marmorkonsolidierung mit kolloidalem Calciumhydroxidsol und KSE mit Haftvermittlern – Bachelor-Thesis, Hildesheim, 2007.
 - Wittmann, F.H.: Transportmechanismen bei der Entfernung von Salzen aus porösem Naturstein, in: Natursteinkonservierung - Grundlagen, Entwicklung und Anwendungen, WTA-Schriftenreihe, Heft 23, Freiburg, 2001, Seite 97-112.
 - Wulfert, Stefan: Der Blick ins Bild - Lichtmikroskopische Methoden zur Untersuchung von Bildaufbau, Fasern und Pigmenten, Ravensburg, 1999.
 - Wyss, Alfred; Rutishäuser, Hans E.; Nay, Marc Antoni: Die mittelalterlichen

Wandmalereien im Kloster Münstair - Grundlagen zur Konservierung und Pflege, Zürich, 2001.

- Zoller, Heinrich: Über die naturräumlichen Voraussetzungen im Umkreis des Klosters St. Johann in Münstair, in: Münstair- Kloster St. Johann: Naturwissenschaftliche und technische Beiträge, Zürich, 2008, Seite 23 – 31.

Normen:

DIN 52 102 (August 1988), in: Verkehrswegebauten VOB/StLB/STLK (Seite 600-609), 1997, Berlin, Wien, Zürich.

DIN 52 103 (Oktober 1988), in: Verkehrswegebauten VOB/StLB/STLK (Seite 610-613), 1997, Berlin, Wien, Zürich.

DIN 52 104 (November 1982), in: Verkehrswegebauten VOB/StLB/STLK (Seite 614-621), 1997, Berlin, Wien, Zürich.

DIN 52 111 Salzsprengtest (November 1982), in: Verkehrswegebauten VOB/StLB/STLK (Seite), 1997, Berlin, Wien, Zürich.

DIN 52 104 (November 1982), in: Verkehrswegebauten VOB/StLB/STLK (Seite 614-621), 1997, Berlin, Wien, Zürich.

WTA-Merkblatt E 3-13-01/D

Sonstiges:

Datenbank der Bauhütte in Münstair des Archäologischen Dienst Graubünden.

Internetseiten:

Universität Marburg

[http://www.uni-marburg.de/fb15/ag-](http://www.uni-marburg.de/fb15/ag-seubert/lehre/folien/Praktikum_der_Ionenchromatographie_12.pdf)

[seubert/lehre/folien/Praktikum_der_Ionenchromatographie_12.pdf](http://www.uni-marburg.de/fb15/ag-seubert/lehre/folien/Praktikum_der_Ionenchromatographie_12.pdf) (31.10.2008, 21 Uhr)

Claudia Eith, Prof. Dr. Maximilian Kolb, Prof. Dr. Andreas Seubert, Dr. Kai Henning

Viehweger (Hrsg.): Praktikum der Ionenchromatographie, 2000.

Romeo Restauratoren-Netzwerk

<http://www.romoe.net/>

<http://www.romoe.net/servlets/sfs;jsessionid=248B85A32C6BF9CCDC9DBB55B2DA1EC4?>

t=/ romoe/docu&e=UTF
8&i=1126125415128&l=1&s=9N4DevTmJC3cfJoMo&action=view1&docu_ID=107831075
6798

Katrin Haug: Aphrodite und Eros, SK 34 Antikensammlung, Zusammenfassung der
Diplomarbeit.

Hasenkamp

<http://www.hasenkamp.com/>

Das Hasenkamp-Verpackungssystem für Kunst

https://www.hasenkamp.com/tp/verpackung_de.pdf

GTZ-Partner für Perspektiven. Weltweit

<http://www.gtz.de>

<http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/de-urinausfaellung-2004.pdf> (30.12.2008, 18
Uhr).

Udert, K.M.; Högger, R.; Larsen, T.A., Gujer, W.: Urinausfällungen in Urinalen und NoMix-
Toiletten.

<http://online-media.uni->

[marburg.de/chemie/bioorganic/stereo/kapitel4.html?/chemie/bioorganic/stereo/k4-03.html](http://online-media.uni-marburg.de/chemie/bioorganic/stereo/kapitel4.html?/chemie/bioorganic/stereo/k4-03.html)
(12.01. 2009, 12 Uhr)

<http://www.uni-mainz.de/FB/Geo/Geologie/archaeo/Lehre/PolMik/Interferenzfarbe.html>
(12.01.2009, 13 Uhr).

Tim Padfield

www.padfield.org

10 Glossar

equigranular	gleichmäßig körnig
granoblastisch	überwiegend isometrisch
idiomorph	ist eine Bezeichnung für ein Mineral, welches seine Eigengestalt voll entwickelt hat, da es räumlich nicht eingeschränkt wurde
hypidiomorph	bezeichnet die Form eingewachsener Mineralkörner in Tiefengesteinen, sie sind nur zum Teil eigengestaltig und nur an manchen Stellen daran gehindert, in ihrer eigenen Form zu wachsen
kavernös	mit vielen Hohlräumen
Kontinente	aus mindestens 2 Fragmenten zusammengefügte Partien ²⁰⁹
Konvektion	Strömung der Ionenlösung im Porenraumgefüge
xenomorph	Eigenschaft von Mineralen, die nicht in ihrer kristallographisch bedingten Eigengestalt vorliegen, da sie bei der Entstehung räumlich eingeschränkt wurden

²⁰⁹Studer, Walter: Ranke, Gitter, Kapitell: Eine Ecke des Paradies aus Disentis / Mustér, Kloster St. Martin (2001, Seite 65).

11 Verzeichnis der Abkürzungen

EDX: Energiedispersive Röntgenspektroskopie

EDTA : Komplexbildner Äthylendiamintetraessigsäure, Wirkstoff chemischer Paste

FTIR: Fourier-Transformation IR-Spektroskopie

IR-Spektroskopie: Infrarot-Spektroskopie

KSE : Kieselsäureester (exakt: Kieselsäureethylester)

MMA: Methylmethacrylat

PMMA: Polymethylmethacrylat

US: Ultraschall

XRD: Röntgendiffraktometrie (=Röntgenbeugung)

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Archäologischer Übersichtsplan des Kloster Müstair.	10
Nachweis: Sennhauser (2002), Seite 18	
Abbildung 2: rechte Abbildung: Split in Dalmatien: karolingische Trabesschranke in der Kapelle St. Martin	14
Nachweis: Dannheimer (1980), Seite 31	
Abbildung 3: linke Abbildung: Grado in Oberitalien: Wiedererrichtete frühbyzantinische Trabesschranke in der Basilika S. Maria delle Grazie.	14
Nachweis: Dannheimer (1980), Seite 29	
Abbildung 4: karolingischer Flechtwerkstein aus Müstair, Balken (Ba 21).....	15
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 5: karolinische Flechtwerksteine aus Müstair	16
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 6: karolinische Flechtwerksteine aus Müstair.....	16
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 7: Ungeborgene Flechtwerksteine im romanischen Mauerwerk.....	20
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 8: Dünnschliff aus Laaser Marmor unter dem Polarisationsmikroskop	28
Nachweis: Poschlod, Klaus (1990), Seite 16	
Abbildung 9: Aufbau der Hydrathüllen	29
Nachweis: Poschlod, Klaus (1990), Seite 28	
Abbildung 10: Entstehung des Zeta-Potentials am Beispiel eines Kolloidteilchens	30
Nachweis: Poschlod, Klaus (1990), Seite 30	
Abbildung 11: Veranschaulichung der Anisotropie anhand von Kugel und Ellipse	31
Nachweis: Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W. (1995) Seite 4	
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Druckwirkung	32
Nachweis: Fimmel, Romana; Mirwald, Peter W. (1995) Seite 4	
Abbildung 13: Abgrusender Bereich.....	43
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 14: Kruste aus Calciumphosphat.....	43
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 15: Dübelloch mit Ausbruch.	45
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 16: Lockermaterial für die Ionenchromatographie	47
Nachweis: Aufnahme der Autorin	

Abbildung 17: Gehalt der Ionen in der Probe Pla 24	48
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 18: Lockermaterial für die Ionenchromatographie	49
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 19: Gehalt der Ionen in der Probe Mo1b	50
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 20: Darstellung der Zusammensetzung eines 24-Stundenharns	50
Nachweis: Quelle: Bläuer, Christine (2003), Seite 11	
Abbildung 21: Rückstand nach dem Auflösen des Partikels in Salzsäure.....	51
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 22: Helle Schicht im Mikroskop	53
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 23: Türkisfarbener Farbreist auf einem Fragment.....	60
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 24: Die Anzahl der Bänder variiert von drei zu zwei.....	64
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 25: Die Grate und Stege sind ungleichmäßig gearbeitet.	64
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 26: Marmorplatte aus dem Bodemuseum in Berlin, die Fehlstellenergänzungen.....	70
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 27: Leitfähigkeitswerte in Abhängigkeit von Natriumsulfat in 100ml Wasser	91
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 28: Diagramm: Leitfähigkeit von Natriumsulfat pro Salzmenge auf 100 ml.....	91
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 29: Messung mit dem Ultraschallmessgerät.....	94
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 30: Messung mit dem Ultraschallgerät	94
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 31: Herstellung von Ringen aus Lockermaterial.....	96
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 32: Ringe aus Lockermaterial 3 Wochen nach dem Tropfentest.....	97
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 33: Klebeversuche auf einer gesägte Platte aus Laaser Marmor.....	99
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 34: Grafiken der Ultraschallwerte nach dem Erhitzen des Bohrkerns 12	102
Nachweis: Darstellung Autorin	

Abbildung 35: Bohrkerne in Salzlösung.....	103
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 36: Bohrkern nach 10 Salzsprengtestzyklen	104
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 37: Bohrkern nach der erzwungenen Versalzung.	104
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 38: Gesteinsverlust durch die Verwendung von Klebeband zur Kennzeichnung.....	113
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 39: Grafiken der Ultraschallmessungen.....	106
Nachweis: Darstellung Autorin	
Abbildung 40: Grafiken der Ultraschallmessungen.....	107
Nachweis: Darstellung Autorin	
Abbildung 41: G der Ultraschallmessungen.....	108
Nachweis: Darstellung Autorin	
Abbildung 42: Ältere Inventarnummer mit schwarzem Stift direkt auf den Stein geschrieben.....	113
Nachweis: Aufnahme der Autorin	
Abbildung 43: (links) Das Kartonage-System der Firma Hasenkamp	116
Nachweis: https://www.hasenkamp.com/tp/verpackung_de.pdf	
Abbildung 44: (rechts) Das 3D-Objektkistensystem der Firma Hasenkamp	116
Nachweis: https://www.hasenkamp.com/tp/verpackung_de.pdf	

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Archäologische Übersicht des Kloster Müstair.....	11
Nachweis: Taberner (1996), Seite 15	
Tabelle 2: Die Nebengemengteile des Laaser Marmor, ihre chemische Zusammensetzung und ihre Farbigkeit.....	37
Tabelle 3: Akzessorische Bestandteile des Laaser Marmors, ihre chemische Zusammensetzung und Farbigkeit.....	37
Tabelle 4: In der Klosterkirche und der Heiligkreuz-Kapelle nachgewiesene Pigmente.....	58
Tabelle 5: Qualitätsprüfungen für Steinersatzstoffe, entnommen Snethlage, Leitfaden Steinkonservierung, ergänzt durch die bekannten Eigenschaften von Laaser Marmor nach Poschlod.....	71
Tabelle 6: Wasseraufnahme nach jedem Erwärmungsvorgang.....	101