

Diploma Thesis

**Atmospheric long-term weathering
A first state record of five important building and ornamental
stones after 14 years of exposition**

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

**Freiluftlangzeitverwitterung
Eine erste Zustandserfassung fünf wichtiger Bau- und
Dekorgesteine nach 14-jähriger Exposition**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Martin Ortbauer

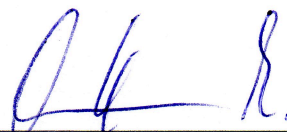
Matr.Nr.: 00925543

unter der Anleitung von

Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Andreas Rohatsch

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Ingenieurgeologie
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Wien, im November 2017



Kurzfassung

In dieser Arbeit wird das Freiluftlangzeitverwitterungsverhalten fünf wichtiger Natursteine behandelt. Die Marmore aus „Carrara“ und „Laas“ wurden ebenso untersucht wie der Lindabrunner Konglomerat und die Kalksandsteine aus St. Margarethen und Aflenz. Ihre Verwendung in historischer Architektur, sei es als Bau- oder Dekormaterial, ist im mitteleuropäischen Raum weit verbreitet. Im Herbst 2003 wurden die Natursteine in einem Hof der Kartause Mauerbach aufgestellt um die Verwitterungsprozesse und die Entwicklung von Schadensbildern an exponierten Objekten zu untersuchen.

Die vorliegende Diplomarbeit liefert die Ergebnisse einer ersten Zustandserhebung 14 Jahre nach der Aufstellung der Steinobjekte und zeigt die Verwitterungsfortschritte der Steine, deren Zusammensetzung unterschiedliche Expositionsbedingungen an Bauwerken simulieren.

Folgende Methoden kamen bei der Untersuchung zur Anwendung:

- Zerstörungsfreie Methoden:
 1. Ultraschalllaufzeitmessungen
 2. Elektrische Leitfähigkeitsmessungen
 3. Oberflächentemperaturmessungen

- Invasive Methoden:
 1. (Thermo-)Gravimetrische Feuchtemessung

Neben einer ausführlichen Diskussion der Ergebnisse wird auch auf die Problematik der zerstörungsfreien Zustandserfassung eingegangen. Ein Vergleich der relativen Leitfähigkeitsmessung mit dem gravimetrischen Feuchtemessverfahren, zu unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen, soll Aufschlüsse über die Brauchbarkeit der Daten liefern. Außerdem wird auf mögliche Einflussfaktoren bei der Ultraschalllaufzeitmessung hingewiesen.

Die Ultraschallmessergebnisse zeigen, dass eine deutliche Gefügauflockerung in jedem der exponierten Natursteine gegeben ist. Dabei ist eine klare Abhängigkeit des Auflockerungsgrades von der nanoklimatischen Situation am jeweiligen Lithotypen zu erkennen.

Im Zuge der Ultraschalluntersuchungen konnten interessante Rückschlüsse auf einflussnehmende Randbedingungen geschlossen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Anstoß für weiterführende Untersuchungen im Bereich der Messmethodik dienen.

Der Vergleich relativer und absoluter Feuchtemesswerte veranschaulicht die immer noch vorhandene Unsicherheit der elektrischen Leitfähigkeitsmessung.

Abstract

In this thesis, the long-term weathering behaviour of five important natural stone varieties under atmospheric conditions is examined. Besides "Carrara" and "Laaser" marble, the Lindabrunner conglomerate as well as the limestones from St. Margarethen and Aflenz were studied. Their use in historical architecture, whether as building stones or ornamental stones, is widespread in the Central European region. In the autumn of 2003, the natural stones were placed in a courtyard of the "Mauerbach" monastery to investigate their weathering phenomena under exposed conditions. This thesis provides the results of a first state record 14 years after installation and shows the weathering progress of the stones whose composition simulate different exposure conditions, that could be found on most structures. The following methods were used in the investigation:

- Nondestructive methods:
 1. Ultrasonic velocity testing
 2. Electrical conductivity measurements
 3. Surface temperature measurements

- Invasive methods:
 1. (Thermo-) gravimetric moisture testing

In addition to a detailed discussion of the results, the problem of nondestructive in-situ testing is also highlighted. Comparison of the relative conductivity measurement with the more precise gravimetric moisture testing, with different climatic boundary conditions, is intended to provide information about the usability of the data. Furthermore, references are made to possible influencing factors in the ultrasonic velocity testing.

The results of the ultrasonic measurements show that there is a clear disaggregation of the microstructure in each of the exposed natural stones. A clear dependence of the disaggregation rate on the nanoclimatic situation on the respective lithotypes is evident.

In the course of the ultrasonic testing, interesting conclusions were drawn on the influence of the boundary conditions. Results should serve as an impulse for further studies in the area of measurement methods.

The comparison of relative and absolute moisture values illustrates the uncertain nature of electrical conductivity measurements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Entstehung und Eigenschaften der Gesteine	6
2.1	Mineralogische Grundlagen	6
2.2	St. Margarethener Kalksandstein	7
2.3	Lindabrunner Konglomerat	9
2.4	Aflenzer Kalksandstein	10
2.5	Carrara Marmor	11
2.6	Laaser Marmor	13
3	Verwitterungsprozesse	14
3.1	Chemische Verwitterung	14
3.2	Physikalische Verwitterung	16
3.3	Biogene Verwitterung	16
4	Verwitterungsfaktoren	17
4.1	Gesteinseigenschaften	17
4.1.1	Zusammensetzung	17
4.1.2	Korngröße, Korngrößenverteilung, Kornform, Kornorientierung	18
4.1.3	Porosität, Porenraumstruktur	18
4.2	Klimatische Randbedingungen	19
4.2.1	Regionalklimatische Bedingungen	20
4.2.2	Nanoklimatische Situationen	20
5	Methodik	21
5.1	Ultraschallmessung zur Bewertung der Gefügauflockerung	22
5.1.1	Prinzip der Ultraschallmessung	22
5.1.2	Varianten von Ultraschallmessung	24
5.1.2.1	Direkte Messung	24
5.1.2.2	Indirekte Messung	24
5.1.2.3	Halbdirekte Messung	24
5.1.3	Bestimmung der Gefügauflockerung	25
5.1.4	Messunsicherheiten und wie man sie minimieren kann	26
5.2	Feuchtebestimmung	28
5.2.1	Grundlagen der Feuchtemessung	28
5.2.2	(Thermo-)Gravimetrische Feuchtebestimmung	28
5.2.3	Leitfähigkeitsmessverfahren	29
5.3	Oberflächentemperatur	30
6	Ergebnisse der In-Situ Ultraschallmessungen	31
6.1	Gefügauflockerung der verwitterten Probekörper	33
6.1.1	Marmore	33
6.1.1.1	Carrara Marmor	33
6.1.1.2	Laaser Marmor	35
6.1.2	Kalksteine	38
6.1.2.1	St. Margarethener Kalksandstein	38
6.1.2.2	Aflenzer Kalksandstein	40
6.1.2.3	Lindabrunner Konglomerat	42
6.2	Interpretation der Ultraschallmessergebnisse	45
6.3	Analyse der Geschwindigkeiten	47
6.3.1	Einfluss der Kristallausrichtung	48
6.3.2	Messdistanzabhängigkeit bei Geschwindigkeitsmessungen	49
6.3.2.1	Distanzabhängigkeit bei Sedimentgesteinen	49
6.3.2.2	Distanzabhängigkeit bei Marmoren	50

6.3.3	Auswirkung der Distanzabhängigkeit auf die ideale Geschwindigkeit	53
6.3.4	Abhängigkeit der Messergebnisse von der Auflegeart der Messköpfe.....	54
6.3.4.1	Winkelabhängigkeit	55
6.3.4.2	Abhängigkeit von der Oberflächenverwitterung.....	58
7	Ergebnisse der Feuchtemessungen.....	61
7.1	Feuchtetransport im Naturstein.....	61
7.2	Dokumentation absoluter und relativer Feuchtemesswerte	62
7.2.1	Carrara Marmor	65
7.2.2	Laaser Marmor	69
7.2.3	St. Margarethener Kalksandstein	72
7.2.4	Aflenzer Kalksandstein	76
7.2.5	Lindabrunner Konglomerat	80
7.3	Interpretation der Feuchtigkeitsmessergebnisse.....	83
7.3.1	Interpretation der absoluten Feuchtigkeitsmessergebnisse.....	83
7.3.2	Interpretation der relativen Feuchtigkeitsmessergebnisse.....	84
7.3.3	Zusammenhang Feuchtegehalt (MC) und Oberflächentemperatur.....	85
8	Schlussfolgerung	85
8.1	Aussagekraft der relativen Feuchtigkeitsmesswerte	85
8.2	Integration der Klimadaten – Schadensursachen und Verwitterungsgeschwindigkeit .	86
8.3	Verwitterungsfortschritt der exponierten Natursteine.....	90
8.3.1	Carrara Marmor	90
8.3.2	Laaser Marmor	91
8.3.3	St. Margarethener Kalksandstein	93
8.3.4	Aflenzer Kalksandstein	94
8.3.5	Lindabrunner Konglomerat	96
8.3.6	Zusammenhang zwischen US- und MC- Ergebnissen	96
9	Ausblick	97
10	Literaturverzeichnis	99

1 Einleitung

Die Stadt Wien ist reich an historischen Bauwerken, die durch mehrere Epochen geprägt wurden. 2001 wurde die Wiener Innenstadt zum Weltkulturerbe erklärt. Wien spielte eine wichtige Rolle als führendes europäisches Kunst- und Kulturzentrum, das bedeutende Persönlichkeiten im Laufe der Jahrhunderte beherbergte. Insbesondere die Wiener Klassik und Romantik haben den Ruf Wiens als musikalische Hauptstadt Europas gefestigt. (Kaiser 2006, S.90f)

Dem Klassizismus der Wiener Gründerzeit und Ringstraßenzeit ist es auch zu „verdanken“, dass sich die Architektur des 19. Jahrhunderts häufig durch Materialsichtigkeit auszeichnet (Nimmrichter 2005, S.87). Der Wunsch nach einer materialsichtigen Oberfläche ist aber gleichbedeutend mit dem ungeschützten Aussetzen der Natursteinoberflächen gegenüber den zahlreichen aggressiven Wechselwirkungen unterschiedlicher chemischer und physikalischer Verwitterungsprozesse. Diese Tatsache stellt die Restauratoren vor große Herausforderungen. Das Gestein ist durch die Exposition natürlicher Verwitterung ausgesetzt, die durch anthropogenen Einfluss noch verstärkt wird. Um die richtigen restauratorischen Maßnahmen zu treffen, ist einerseits eine exakte Dokumentation des Zustandes und andererseits die Erfassung von schadensbildenden Faktoren sehr wichtig.

In dieser Arbeit wurde das Freiluftlangzeitverwitterungsverhalten fünf Bau- und Dekorgesteine behandelt, die auch das Wiener Stadtbild prägen. Sie wurden zu diesem Zweck in einem Hof der Kartause Mauerbach aufgestellt. Zu den exponierten Objekten zählen die italienischen Carrara und Laaser Marmore, sowie die österreichischen St. Margarethener Kalksandstein, Aflenzer Kalksandstein und Lindabrunner Konglomerat. Die Gliederung der großformatigen Steinobjekte in eine Sockelzone mit einem darüber angeordneten Gesimse und einer aufgesetzten, keilförmigen Spitze sollen unterschiedliche nanoklimatische Bedingungen schaffen, wie sie an einem komplexen Bauwerk häufig anzutreffen sind.

Zur Beurteilung der klimatischen Situation konnten die Daten der, von der Gemeinde Wien unmittelbar daneben installierten Klimastation, herangezogen werden. Eine kontinuierliche Dokumentation des Niederschlags, der relativen Luftfeuchte und der Temperatur wurde hiermit gewährleistet (Abb. 1).¹



Abb. 1 Fünf historisch bedeutsame Bau- und Dekorgesteine zur Freiluftlangzeitverwitterung in exponierter Lage in einem Hof der Kartause Mauerbach. Rechts im Bild sieht man die installierte Wetterstation der Gemeinde Wien

¹ Besonderer Dank gilt dem ZAMG für die Zurverfügungstellung der Klimadaten, sowie allen Mitarbeitern des Bundesdenkmalamtes in Mauerbach, die für Rat und Tat jederzeit zur Verfügung standen.

Neben den Klimadaten wurde auch von Ultraschallmessergebnissen aus dem Jahr 2003 bzw. 2004, den ersten Jahren nach der Ausstellung der Steinobjekte, Gebrauch gemacht, um eine erste Zustandserfassung der Gesteine nach jahrelanger Exposition durchzuführen und Rückschlüsse auf die maßgeblichen klimatischen Verwitterungsfaktoren zu ziehen. Die erarbeiteten Teilerkenntnisse sollen als Basis für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen dienen.

2 Entstehung und Eigenschaften der Gesteine

2.1 Mineralogische Grundlagen

Ein wesentlicher Bestandteil der in dieser Arbeit untersuchten Natursteine ist das Mineral Calcit, der sowohl in den Kalksteinen, Marmoren und Konglomeraten in gesteinsbildender Häufigkeit vorkommt. Die Bildung und das Lösen des Kalksteins lassen sich durch den natürlichen Kalkkreislauf beschreiben (Gl.[I]). Kohlenstoffdioxid (CO_2) reagiert zu einem geringen Teil mit Wasser (H_2O) und bildet die Kohlensäure (H_2CO_3). Sie ist mehr oder weniger ständig in der Atmosphäre vorhanden und bildet mit dessen Salzen, den Karbonaten, ein stetiges, von Druck und Temperatur abhängiges Gleichgewicht. (Sharma 2010, S.62)

Das kalkbildende Carbonatmineral heißt Calciumcarbonat ($CaCO_3$) und ist wichtigstes gesteinsbildendes Mineral von Sedimentgesteinen. Werden Gesteinsablagerungen durch jüngere Sedimente überlagert, sind sie mit fortschreitender Dauer zunehmenden Drücken und Temperaturen ausgesetzt. Es kommt zuerst zur Kompaktion und später zur Zementation, bei welcher der verbliebene Porenraum zu einem unbestimmten Grad mit wässriger Calciumcarbonatlösung ausgefüllt wird. Das Kalziumkarbonat kristallisiert abhängig von Druck und Temperatur zu Calcit, Aragonit oder Vaterit, hält so das Korngefüge zusätzlich zusammen und bildet ein Festgestein auf Kalkbasis. Je nach Korngröße der diagenetisch verfestigten Lockersedimente spricht man von Kalksandstein (Sand) und Konglomerat (Kies) bzw. Brekzie (Schutt).

Weiters unterscheidet man Sedimentgesteine durch die Herkunft der Sedimente. Sind sie durch mechanische Zertrümmerung entstanden, werden sie klastische Sedimente genannt. Biogene Sedimente stammen vorwiegend von Organismen und deren Reste ab. (Press und Siever 1995, S.52f, S.118ff)

Das wichtigste kalksteinbildende Mineral ist der **Calcit**. Er unterscheidet sich von Aragonit und Vaterit durch seine Kristallstruktur. Durch Brausen bei Salzsäurezugabe ist er leicht bestimmbar. Es ist ein relativ weiches Mineral, befindet sich auf der Härteskala nach Mohs auf 3 und ist in drei Ebenen vollkommen spaltbar. Calcit ist in reiner Form durchsichtig bzw. weiß, können durch Einschlüsse von Fremdionen aber verfärbt werden.

Calcitkristalle besitzen die Eigenschaft einer anisotropen Wärmeausdehnung. Sie dehnen sich in Längsrichtung aus und ziehen sich in Querrichtung zusammen. Dieses Phänomen kann man bei vielen Marmorplatten beobachten, die sich aufgrund thermischer Beanspruchung zu biegen beginnen. (Moshammer 2005; Siegesmund et. al 2009; Koch 2005)

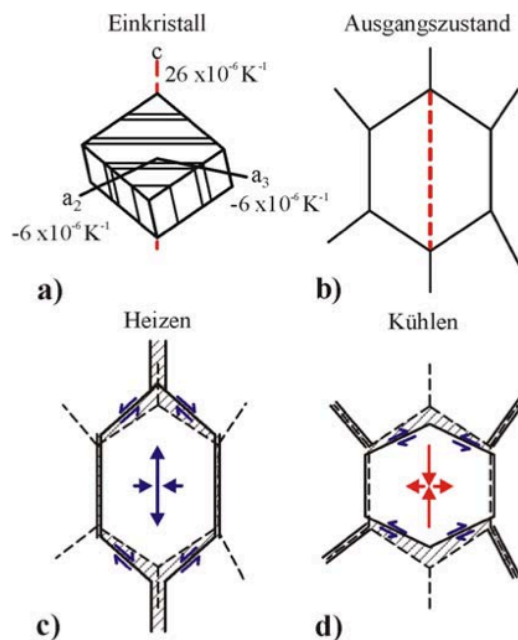


Abb. 2 Thermische Dilatation von Calcit a) Wärmeausdehnungskoeffizienten bezüglich kristallographischer Achsen; b) Schematische Darstellung eines Calcitkristalls im Ausgangszustand; c) Formänderung bei Erwärmung und d) Abkühlung (Rüdrich 2003, S.69)

2.2 St. Margarethener Kalksandstein

Der Steinbruch von St. Margarethen befindet sich in den südlichen Ausläufen des Leithagebirges. Der dort abgebaute Kalksandstein geht geologisch gesehen auf das Neogen, genauer das Badenium zurück und ist somit rund 12 – 14 Millionen Jahre alt. Zu jener Zeit war das Wiener Becken noch ein Meer und das Leithagebirge eine von diesem Meer umschlossene Insel. In zahlreichen Flachwassergebieten, vorwiegend Randgebieten dieses Meeres kam es zur Ablagerung der Kalkschalen abgestorbener Organismen. Hauptbestandteil der Organismen waren in diesem Gebiet Skelette von Kalkrotalgen der Familie der Corallinaceae. Diese bildeten den wichtigsten Gesteinsbildner für den sogenannten Leithakalk. Die 30 bis 300 cm dicken und vorwiegend flach gelagerte Kalksteinschichten sind häufig durch Mergelschichten voneinander getrennt, was die Steingewinnung erleichtert. Der relativ einfach zu bewerkstellende Abbau und die leichte Bearbeitbarkeit dieses Gesteins führten zur sehr häufigen Verwendung dieses Vorkommens von der Römerzeit bis ins 20. Jahrhundert. (Fleischer 2001, S.7ff; Rohatsch et al. 2015, S.255ff)

Je nach Zerreibungsgrad können die Algenkalke fein- bis grobkörnig vorkommen und bilden so verschiedene Leithakalkvarianten. Im Dünnschliff des St. Margarethener Kalksandsteins zeigt sich eine relativ hohe Porosität, was auf eine frühdiagenetische Zementation durch Kalzit hindeutet. Die gelbbraune Färbung erhält der Kalksandstein durch fein verteilte Eisenhydroxide (Limonit)(Abb. 3). Gewonnen wurden und werden die Werksteinblöcke vorwiegend mit der Schrägtechnik. Die gesteintechnischen Eigenschaften sind in Tab. 1 zusammengefasst.



Abb. 3 *St. Margarethener Kalksandstein (links: zu Expositionsbeginn 2003; rechts: nach knapp 14 Jahren freier Exposition)*

Als Baumaterial fand der Leithakalk bereits im ersten nachchristlichen Jahrhundert beispielsweise in römischen Scarbantia (Sopron) Verwendung. Der St. Margarethener Kalksandstein gewann aber vor allem gegen Ende des 17. Jahrhunderts an Bedeutung. Nach der Türkenbelagerung 1683 konnte sich der Barock auch in Wien voll entfalten (URL1 2017). Dieser sogenannte Hochbarock kennzeichnet sich durch zahlreiche Prunkbauten. Auch gegen Ende des 19. Jahrhunderts nahm der Bedarf an Baumaterial nochmals enorm zu, als während der sogenannten „Wiener Gründerzeit“ erneut viel in sakrale Bauwerke und infrastrukturelle Verbesserungen investiert wurde. Die Wiener Dombauhütte bezieht den bei Sanierungsmaßnahmen des Wiener Stephansdoms notwendigen Kalksandstein ebenfalls aus dem sogenannten Römersteinbruch von St. Margarethen. Andere Verwendungsbeispiele sind das Wiener Rathaus, die Dominikanerkirche in Wien, die Franziskanerkirche in Wien, Teile der Schlossarchitektur von Schönbrunn, der Musikverein oder die Wiener Börse.

Der St. Margarethener Steinbruch, ist einer der wichtigsten historischen Steinbruchreviere der neogenen Gesteinsformation. Etwas östlich von St. Margarethen im Burgenland gelegen, ist der heute weitestgehend stillgelegte Steinbruch vor allem aus kultureller Sicht ein wichtiger Anlaufpunkt. Neben einem jährlichen Bildhauersymposium finden auch Passionsspiele und Freiluftopern hier statt. (Rohatsch 2005b, S.9-30)

Die gesteintechnischen Eigenschaften sind in Tab. 1 zusammengefasst:

<i>Einaxiale Druckfestigkeit:</i>	49,0 N/mm ² (42,6-56,1) (trocken) bzw. 38,2 N/mm ² (30-47,1) (wassersatt)
<i>Biegezugfestigkeit Prisma:</i>	7-10 N/mm ²
<i>Spaltzugfestigkeit:</i>	1,7 N/mm ² (0,8-2,9)
<i>Rohdichte:</i>	2,08 g/cm ³ (1,97-2,26)
<i>Reindichte:</i>	2,7-2,71 g/cm ³
<i>Dichtigkeitsgrad:</i>	0,81 (0,75-0,86)
<i>Gesteinshohlraum:</i>	19 R.% (16-25)
<i>Wasseraufnahme:</i>	7,9 M.% (3,6-10,2)
<i>Ultraschallgeschwindigkeit:</i>	3,5 km/s (2,9-3,8)

Tab. 1 Gesteinstechnische Kennwerte des St. Margarethener Kalksandteins (Rohatsch 2005b, S.29)

2.3 Lindabrunner Konglomerat

In die gleiche geologische Zeit (Neogen, Badenium) fällt auch die Bildung des Lindabrunner Konglomerats. Neben Feinsedimenten lagerte sich im damaligen Meer des Wiener Beckens auch Geröll ab, das vorwiegend auf dem Flussweg aus kalkalpinen Regionen eingeschwemmt wurde. Beim Konglomeratvorkommen von Lindabrunn handelt es sich jedoch um Strandablagerungen im ehemaligen Küstenbereich des Alpenostrandes. Im Zuge der Diagenese stand Calcit als Bindemittel zur Verfügung. (Falk-Gierlinger 2004, S.17)



Abb. 4 Lindabrunner Konglomerat (links: zu Expositionsbeginn 2003; rechts: nach knapp 14 Jahren freier Exposition)

Überregionale Bedeutung erlangte er erst im 19. Jahrhundert mit der Erbauung der 1. Wiener Hochquellwasserleitung und der Erweiterung des Wiener U-Bahnnetzes, dessen

U-Bahnstationen zum Teil mit Konglomeratplatten verkleidet sind. Ebenfalls Verwendung fand er bei der Restaurierung des Wiener Neustädter Doms 1996. (Rohatsch 2005b, S.36)

Seine gesteintechnischen Eigenschaften sind in Tab. 2 zusammengefasst:

<i>Druckfestigkeit:</i>	65 N/mm^2
<i>Biegezugfestigkeit Prisma:</i>	$7,2 \text{ N/mm}^2$
<i>Spaltzugfestigkeit:</i>	$3,7 \text{ N/mm}^2$
<i>Rohdichte:</i>	$2,58 \text{ g/cm}^3$
<i>Wasseraufnahme:</i>	2 M.%
<i>Ultraschallgeschwindigkeit</i>	4,2 km/s (4-4,7)

Tab. 2 Gesteinstechnische Kennwerte des Lindabrunner Konglomerats (Rohatsch 2005b, S.36)

2.4 Aflenzer Kalksandstein

Ebenfalls zu den Leithakalken des Badenium wird der Aflenzer Kalksandstein gezählt. Hauptbestandteile sind wie beim St. Margarethener Organismenreste, sogenannte Algenkalke (v.a. Kalkrotalgen). Zur selben Zeit wie das Wiener Becken, war nämlich auch das Leibnitzer Feld im Süden der Steiermark vom Meer (Paratethys). So kommt es, dass man heute an den früheren Küsten dieses Meeres, bzw. den ehemaligen Flachwasserbereichen den hellgelb bis gelbbraunen Aflenzer Kalksandstein findet.



Abb. 5 Aflenzer Kalksandstein (links: zu Expositionsbeginn 2003; rechts: nach knapp 14 Jahren freier Exposition)

Wegen der sehr leichten Bearbeitung des relativ weichen Kalksandsteins (Tab. 3) machten bereits die Römer vor etwa 2000 Jahren als Baumaterial davon Gebrauch. Der Sandstein wurde dabei untertags abgebaut. So kam der heute älteste noch im Betrieb befindliche Bergbau Österreichs zu seinem Namen: „Die Römerhöhlen“. (Hubmann und Moser 2016, S.137; Rohatsch et al. 2015, S.255ff)

Als begehrter Baustoff ab dem 12. Jahrhundert findet der „Aflenzer“ heute immer noch Verwendung, vor allem im Gebiet der Restaurierung von Kirchen und Schlössern. Zumindest teilweise wurde bei der Erbauung des Stephansdom und der Grazer Burg auf den Aflenzer Kalksandstein zurückgegriffen.

	<i>Varietät A</i>	<i>Varietät B</i>
<i>Einaxiale Würfeldruckfestigkeit:</i>	8,8-16,4 N/mm ²	7,8-10,2 N/mm ²
<i>Biegezugfestigkeit:</i>	5-5,2 N/mm ²	2,1-2,5 N/mm ²
<i>Rohdichte:</i>	1,95-1,96 g/cm ³	1,74-1,75 g/cm ³
<i>Reindichte:</i>	2,7-2,71 g/cm ³	
<i>Dichtigkeitsgrad:</i>	72-64 %	
<i>Gesteinshohlraum:</i>	35-28 %	
<i>Korngröße:</i>	< 2,0 mm	
<i>Wasseraufnahme (24h):</i>	10,4-12 M. %	13,9-16,3 M. %
<i>Ultraschallgeschwindigkeit</i>	2,8-3,1 km/s	2,2-2,4 km/s

Tab. 3 *Gesteinstechnische Kennwerte des Aflenzer Kalksandsteins (Rulofs 2009, S.10)*

2.5 Carrara Marmor

Marmor bezeichnet einen durch eine Metamorphose veränderten Kalkstein. Bei Drücken von 4-5 Kilobar und Temperaturen bis zu 600 Grad Celsius wird das Gesteinsgefüge umgeprägt und die physikalischen Eigenschaften verändert. Festigkeiten von Marmoren liegen weit über jenen der Sedimentgesteine, dafür sind sie auch schwieriger zu bearbeiten. (Weiss 2001, S.2; Press und Siever 1995, S.54, 174)



Abb. 6 Carrara Marmor (links: zu Expositionsbeginn 2003; rechts: nach knapp 14 Jahren freier Exposition)

Im Fall des Carrara Marmors fand diese Metamorphose im Zuge der alpidischen Orogenese statt. Diese begann mit dem Zueinanderdriften der afrikanischen und europäischen Platte im Paläogen vor ca. 60 Millionen Jahren. Auf diese Weise wurden auch die apuanischen Alpen aufgeschoben, deren Bildung vor ca. 30 Millionen Jahren endete. Sie sind Herkunftsgebiet des Carrara-Marmors. (URL2 2017; Poschlod 1990, S.16)

Carrara ist der Name der am westlichen Fuß dieser Alpen liegenden Stadt. Hier wurde bereits im 1. Jahrhundert v. Chr. Marmor entdeckt und von den Römern für Bautätigkeiten verwendet. Mit dem Aufstieg der Stadt-Staaten im 11. Jahrhundert gewann der polierfähige Marmor weiter an Bedeutung. Aus dieser Zeit stammt eines der bekanntesten Denkmäler aus Carrara Marmor, der schiefe Turm von Pisa. An dieser Stelle sei auch auf eines der schönsten Denkmäler aus Carrara Marmor, der Trajansäule in Rom, hingewiesen. Große Bedeutung hatte der Stein auch in der Bildhauerei. Vorallem im Klassizismus erfreute er sich großer Beliebtheit unter den Künstlern. So lassen sich neben den berühmten italienischen Denkmälern, wie Michelangelos David und Werken von Antonio Canova auch im österreichischen Raum Statuen aus Carrara Marmor finden. (Kieslinger 1972, S.71, 1951, S.165; Herbeck 1953, S.126)

Noch heute werden jährlich um die 500.000 Tonnen Carrara-Marmor mittels Seilsägen oder Schrämen gewonnen und findet in verschiedensten Bereichen Anwendung. (Weiss 2001, S.4ff)

Die gesteintechnischen Eigenschaften sind in Tab. 4 zusammengefasst:

	<i>bruchfrisch</i>	<i>natürlich verwittert</i>
<i>Einaxiale Druckfestigkeit:</i>	<i>110-130 N/mm²</i>	<i>49-52 N/mm²</i>
<i>Spaltzugfestigkeit:</i>	<i>10-14 N/mm²</i>	<i>3,1-5,6 N/mm²</i>
<i>Rohdichte:</i>	<i>2,08 g/cm³ (1,97-2,26)</i>	
<i>Reindichte:</i>	<i>2,71-2,72 g/cm³</i>	<i>2,7-2,71 g/cm³</i>
<i>Wasseraufnahme:</i>	<i>0,1-0,25 M.%</i>	<i>0,1-0,23 M.%</i>
<i>Ultraschallgeschwindigkeit</i>	<i>4-5 km/s</i>	<i>1,3 -2,0 km/s</i>

Tab. 4 *Gesteinstechnische Kennwerte des Carrara Marmor (Weiss 2001, S.8f)*

2.6 Laaser Marmor

Während die bisher diskutierten Gesteine ein eher junges geologisches Alter (Känozoikum) aufweisen, geht die Entstehung des Laaser Marmors auf die variszische Orogenese zurück. Sie fand vor etwa 400 Millionen Jahren statt und gilt als wichtiger Schritt zur Bildung des Superkontinenten Pangea im Paläozoikum.

Ursprünglich in Nordafrika abgelagerter reiner Kalkstein wurde so umgeprägt und in der jetzigen nordöstlichen Bereich des Campo-Kristallins, im Vintschgau abgelagert. (Poschlod 1990, S.16; URL3 2017)



Abb. 7 *Laaser Marmor (links: zu Expositionsbeginn 2003; rechts: nach knapp 14 Jahren freier Exposition)*

Wie Carrara Marmor ist er Laaser Marmor in rein weißen Varietäten vorhanden. Aufgrund der etwas größeren mittleren Korngröße sagt man dem Laaser Marmor eine besseres Durscheinen der Kristalle und damit eine bessere optische Wirkung gegenüber dem Carrara Marmor nach. Deshalb erfreut er sich in der Bildhauerei großer Beliebtheit. Der wirtschaftliche Abbau nahm erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts Fahrt auf, aber im

Laufe der Zeit löste er den Carrara Marmor wegen angeblich besserer Verwitterungsbeständigkeit im Baubereich ab. (Kieslinger 1951, S.163f; Rüdrieh 2003)

Seine gesteintechnischen Eigenschaften sind in Tab. 5 zusammengefasst:

	<i>bruchfrisch</i>	<i>natürlich verwittert</i>
<i>Einaxiale Druckfestigkeit:</i>		61,4- 81,6 N/mm ²
<i>Spaltzugfestigkeit:</i>		4,17-5,90 N/mm ²
<i>Gesteinshohlraum:</i>	0,33 R.%	0,44 R.%
<i>Reindichte:</i>		2,7-2,71 g/cm ³
<i>Wasseraufnahme:</i>		0,13 M.%
<i>Ultraschallgeschwindigkeit</i>	5,03–5,68 km/s	2,4–3,1 km/s

Tab. 5 Gesteintechnische Kennwerte des Laaser Marmor (Rüdrieh 2003, S.49,55; Gegendorfer 2003)

Das aufgestellte Exemplar stammt von einem Objekt vom Zentralfriedhof und ist insgesamt schon rund 80 Jahre der Verwitterung ausgesetzt gewesen.

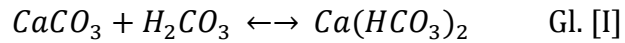
3 Verwitterungsprozesse

Die Verwitterung nimmt einen Teil des Gesteinskreislaufs ein. Sie beschreibt die Zersetzung des Gesteins an der nahen Erdoberfläche. Dieser sehr komplexe Vorgang lässt sich durch physikalische, chemische und biologische Prozesse beschreiben, wobei der Übergang zwischen chemischer und physikalischer Erosion fließend ist. Eine biologische Besiedelung führt in weiterer Folge meist zu physikalischen bzw. chemischen Prozessen und kann somit in ihrer Auswirkung einer dieser Gruppen zugeordnet werden. Nachfolgend sind jene Prozesse und darauf folgende Schadensbilder erklärt, die besonders in der gemäßigt-feuchten Klimazone vorkommen. (Stahr 2016, S.25; Ahnert 2015, S.59)

3.1 Chemische Verwitterung

Chemische Verwitterungsprozesse beinhalten immer einen Lösungsvorgang. Als Lösungsmittel dient dabei meistens Wasser. Das kann zum einen ionisiert über die Atmosphäre als Regen oder aus dem Boden aufgenommen werden und zum anderen destilliert als Kondensationswasser auftreten.

Wasser kommt normalerweise nicht in Form von reinem H_2O vor, weil es aufgrund verschiedener Einflüsse in seiner chemischen Zusammensetzung verändert ist. Eine Nitratbelastung der Bodenwässer kann zum Beispiel durch landwirtschaftliche Intensivnutzung hervorgerufen werden. Die Schwefelbelastung führte in Europa vor allem Mitte des 20. Jahrhunderts zu Problemen und sauren Regen. Heute hat die Bevölkerung mit erhöhtem Kohlenstoffdioxidgehalt in der Atmosphäre zu kämpfen. Ein Bruchteil der CO_2 -Moleküle geht mit H_2O in Lösung und bildet die Kohlensäure. Diese ist somit zunehmend im Regenwasser enthalten und integraler Bestandteil des Lösungsprozesses von Kalk. Kalk, als Salz der Kohlensäure, ist dem pH-Wert der Atmosphäre unterworfen. In einem sauren Milieu herrscht ein Überschuss an CO_2 und Kalk wird in das leicht wasserlösliche Calciumhydrogencarbonat umgewandelt (Gl.[I]; (Sharma 2010, S.62)). Verringert sich der CO_2 - Gehalt unter den Sättigungsgrad, wird daraus Kalk gefällt:



Calcit + Kohlensäure ↔ Calciumhydrogencarbonat

Diese Wechselwirkung tritt auch als Teilschritt von Verwitterungsprozessen an vielen anderen Mineralen auf. Besonders an der Grenzfläche zwischen Atmosphäre und Lithosphäre kann die Carbonatisierung zum Bindemittelverlust an Oberflächen und zum **Absanden** führen. (Ahnert 2015, S.73ff)

Sie bildet auch die Grundlage von **Krusten- und Schalenbildungen** an Bauwerken aus Naturstein. Nach der Lösung von Kalk durch die angesäuerte Feuchtigkeit im Porenraum kann er an die Oberfläche transportiert und beim Verdunstungsvorgang wieder gefällt werden. Ist das Lösungsmittel mit Kohlensäure angereichert, kommt es zur Bildung einer Kalkkruste. In Gebieten mit hoher Schwefeldioxid-Belastung bestehen die Krusten meist aus Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Diese Schalen haben eine abdichtende Wirkung. Sie verzögern den Trocknungsprozess hinter der Kruste und sorgen für ein andauernd feuchtes Milieu, in dem chemische Lösungsprozesse weiter fortschreiten können. Das führt zu einer scheinbaren Festigkeitszunahme an der Oberfläche, aber zu einem tatsächlichen Bindemittel- und Festigkeitsverlust des Natursteins.

Unter Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Kruste schneller als der dahinter liegende Bereich. Es kommt zu Scherspannungen und einer weiteren Gefügebeanspruchung. Dieses Beispiel zeigt, dass chemische und physikalische Verwitterungsvorgänge oft voneinander abhängen bzw. gleichzeitig ablaufen. (Rohatsch 2005a, S.78ff)

Ein weiterer chemisch-physikalischer Verwitterungsmechanismus ist die **Hydratation**. Durch die Anlagerung von Wassermolekülen in das Ionengitter von im Stein vorkommenden Salzen wird der Hydratationsdruck verursacht. Die verursachten Spannungen wirken auf das Korngefüge und können zu dessen Auflockerung führen. (Ahnert 2015, S.73)

Neben den bereits erwähnten Sulfaten (Salze der Schwefelsäure) und den Nitraten sind Chloride als wichtige bauschädliche Salze zu nennen. (Sie deuten in unseren Regionen auf den Einsatz von Streusalz hin.) Sie werden durch Wasser gelöst und über die Poren durch den Stein transportiert. Sie kristallisieren dort aus, wo das Wasser verdunstet, werden aber bei erneutem Wasserzutritt wieder gelöst. Diese Salzausblühungen sind an der Steinoberfläche als weiße Ränder leicht zu erkennen. Zur **Salzkristallisation** reicht auch eine übersättigte Lösung in einer Pore aus. Bei der Kristallbildung kommt es zu einer Volumszunahme. Das Kristallwachstum übt Druck auf die Porenwände aus und reduziert die Kornbindungsfestigkeit. Je höher die Übersättigung und Temperatur des Porenwassers, desto größer ist das Schädigungspotential. (Stahr 2016, S.27ff; Ahnert 2015, S.63)

Metamorphe und magmatische Gesteine sind reich an Silikatmineralen und somit dem chemischen Verwitterungsprozess der **Hydrolyse** unterworfen. Dabei ersetzen H⁺-Ionen der Lösung Kationen des Ionengitters was mit fortschreitender Dauer zum Zerfall des Kristalls führt. (Ahnert 2015, S.74f)

3.2 Physikalische Verwitterung

Physikalische Verwitterung kann oberflächlich zu einer mechanischen Schädigung des Gesteins durch wind-, wasser-, und eisbedingte Erosion führen, oder durch Volumsänderungen zur tiefergreifenden Gefügeflockung beitragen.

Eine **thermische Beanspruchung** ergibt sich aus der Expansion und Kontraktion des Gesteins durch Temperaturänderungen. Zum Beispiel kann die Erwärmung von Gesteinen durch Sonnenlicht oder Brände die Ausdehnung ihrer Minerale verursachen. Das anisotrope Ausdehnungsverhalten der meisten Minerale führt zu Spannungen im Gefüge und Verlust von Kornbindungsfestigkeit.

Gesteine sind schlechte Wärmeleiter, deshalb wird die Wärme nur sehr langsam ins Innere geleitet. Die Temperaturdifferenz zwischen der oberflächennahen und der darunter liegenden Schicht erzeugt Scherspannungen, die Ursache oberflächenparalleler Risse oder sogar Abplatzungen sein kann. Dabei gilt, je poröser der Stein ist, desto weniger Schäden weist er nach thermischer Beanspruchung auf. Der Porenraum wirkt hier als Puffer, der auftretende Bewegungen bis zu einem gewissen Grad aufnehmen kann. (Ahnert 2015, S.61; Rohatsch 2005a, S.78)

In ihrem Verwitterungsverhalten besonders empfindlich auf thermische Beanspruchungen reagieren Marmore. Der Hauptbestandteil des Marmors, der Calcit, hat ein ausgesprochen anisotropes Ausdehnungsverhalten. Bei Erwärmung dehnt er sich in Längsrichtung aus und zieht sich in Querrichtung zusammen. Dieses Phänomen führt bei zunehmender Wechselbeanspruchung zu einer starken Gefügeflockung des Marmors. Plötzliche Erwärmungen und Abkühlungen verstärken den Effekt. (Wihr 1986, S.39; Siegesmund et. al 2009; Koch 2005; Tschegg et. al 2000)

Frostsprengungen treten vor allem in feuchten Umgebungen auf, die häufigen Temperaturschwankungen unter den Gefrierpunkt unterworfen sind. Das trifft besonders auf alpine Bereiche zu. Während die meisten Marmore als frostbeständig gelten, sind Kalksteine bei bestimmter Porenradienverteilung anfällig für Frostauswirkungen. Die vielen Porenräume erlauben die Aufnahme von Wasser und das Wachstum von Eiskristallen. Beim Gefrieren erfährt Wasser eine Volumszunahme von 9,87%. Dabei entstehen Drücke, die zur Überschreitung der Gesteinsfestigkeit führen können und Risse bilden. Der Druck des gefrierenden Wassers nimmt mit abnehmender Temperatur zu, bis er bei -22°C mit 211,5 MPa sein Maximum erreicht. Wenn das Eis auftaut, kann es als Wasser weiter in den Fels vordringen. Sich wiederholende Frost-Tau-Zyklen führen zu einer Gefügeflockung des Gesteins. (Ahnert 2015, S.62; Wihr 1986, S.46)

Zur physikalischen Verwitterung zählt außerdem die **hygrisch induzierte Dehnung**. Sie tritt bereits nach Wasserdampfdiffusion bei hoher relativer Luftfeuchte auf und führt mit zunehmender Sättigung zu Dehnungen im Zehntel mm/m Bereich (vgl. (Rohatsch 2005a, S.80; Mirwald et. al 2004, S.397ff).

Egal ob thermisch oder hygrisch induziert, erzeugen die Dehnungen Verformungen und somit Spannungen im Korngefüge des Natursteins. Dieses wird mit zunehmender Anzahl der Wechselwirkungen bzw. unterschiedlicher Beanspruchung weiter aufgelockert und das Gefüge vor allem oberflächennah geschädigt. (Wihr 1986, S.39f)

3.3 Biogene Verwitterung

Als biogene Verwitterung werden jene Prozesse bezeichnet, die aus Stoffwechselprodukte von Tieren und Pflanzen resultieren. Oft ist eine chemische oder physikalische

Verwitterung und die daraus folgende Bildung von Hohlräumen Wegbereiter für eine biologische Besiedelung. Ein feucht-warmes Milieu ist für das Pflanzenwachstum von Vorteil. Umgekehrt können Pflanzen und Tiere durch Freisetzen von sauren Verbindungen eine chemische Verwitterung oder durch Wurzeldrücke Sprengwirkungen verursachen. Mineralverwitterung kann auch durch Bodenmikroorganismen initiiert und/oder beschleunigt werden. (Wihr 1986, S.50f; Maggi und Tang 2017; Burford et. al 2005)

4 Verwitterungsfaktoren

Die Geschwindigkeit der in Kapitel 3 genannten Verwitterungsprozesse hängt nach (Stahr 2016, S.22) neben den klimatischen Randbedingungen vor allem von den petrologischen und gesteinsphysikalischen Eigenschaften ab: *„Unter Werksteinveränderung an der Oberfläche kann im Sinne der Verwitterung naturwissenschaftlich ganzheitlich betrachtet ein Stoff- und Energieaustausch an den Grenzen zwischen den beiden thermodynamisch offenen heterogenen Systemen Lithosphäre (Naturwerkstein) und Atmosphäre (Atmosphärien) verstanden werden. Beide thermodynamischen Systeme können durch die Zustandsgrößen Temperatur, Volumen, Druck und Stoffmengenanteil beschrieben werden.“*

In diesem Kapitel wird auf jene Gesteinseigenschaften und klimatischen Randbedingung hingewiesen, welche die Prozessgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Verwitterungsphänomene bestimmen. Auf die Wichtigsten wird etwas näher eingegangen.

4.1 Gesteinseigenschaften

Gewicht und Struktur	Dichte – Korngrößenanteile – Porosität
Mechanische Festigkeit	Druckfestigkeit – Biegezugfestigkeit – Stoßfestigkeit – Ausbruchsfestigkeit – Abriebfestigkeit – Oberflächenfestigkeit
Zusammensetzung	Mineralgehalt – Salz-/Alkaligehalt – säurelösliche Bestandteile – wasserlösliche Salze, Bindemittel
Feuchteverhalten	Feuchtegehalt – Wasseraufnahme – Wasserdurchgang – Dampfdurchlässigkeit – hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte
Temperaturverhalten	Wärmeleitfähigkeit – Rauchgasbeständigkeit – Frostbeständigkeit

Tab. 6 *Wichtige Eigenschaften von Natursteinen in Hinblick auf mögliche Schädigungen (Stahr 2016, S.43)*

Viele Gesteinseigenschaften spielen eine Rolle zur Bestimmung der Verwitterungsgeschwindigkeit. Neben der mineralogisch-chemischen Zusammensetzung sind vor allem Dichte, Volumen, die mechanische Festigkeit, Struktur und Porenradienverteilung wichtige Charakteristika, welche die thermischen und hygrischen Eigenschaften beeinflussen. Auf die bedeutendsten Parameter aus Tab. 6 wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

4.1.1 Zusammensetzung

Wichtig für die Verwitterungsbeständigkeit des Steins sind neben den vorhandenen Mineralien, die Art der Kornbindung und die Widerstandsfähigkeit des Bindemittels.

Bestimmte Silikate können nach ihrer Verwitterung Tonminerale wie Montmorillonit bilden, die bei Wasseraufnahme zum Quellen beginnen und dadurch die Kornbindung gefährden. (Ahnert 2015, S.74ff)

4.1.2 Korngröße, Korngrößenverteilung, Kornform, Kornorientierung

Besonderen Einfluss auf das Korngefüge nimmt die Temperatur (vgl. Kap. 3.2). Durch Erwärmung hervorgerufene Dehnungen müssen vom Stein ebenso aufgenommen werden wie temporäre Stauchungen zufolge Abkühlung. Entstehende Verformungen führen zu Spannungen und in weiterer Folge zur Auflockerung des Gefüges. Unter einer Gefügeauflockerung ist der Kornbindungsverlust und sich eine dadurch erhöhende Porosität zu verstehen. Das erleichtert wiederum chemische und biologische Verwitterungsprozesse an der inneren Oberfläche des Gesteins. (Rüdrich 2003, S.138ff)

Umgekehrt hat das Korngefüge Einfluss auf die Intensität der Schädigung durch Temperaturveränderungen. Sedimentgesteine können, aufgrund ihrer Porosität, thermische Wechselbeanspruchung besser aufnehmen als metamorphe Gesteine, wie Marmor, deren primäre Schädigung auf thermisch induzierte Verformungen zurückzuführen ist. Die resultierenden, vergleichsweise hohen Spannungen sind dem anisotropen Ausdehnungsverhalten des Kalzits geschuldet. Der Calcitkristall dehnt sich bei Erwärmung in Längsrichtung aus und zieht sich gleichzeitig in Querrichtung zusammen. Vorhandene Feuchtigkeit verstärkt die zurückbleibenden, durch die Gefügespannungen hervorgerufenen Verformungen zusätzlich. (vgl. Kap.3.2)

Die Prozessgeschwindigkeit der Gefügeauflockerung ist somit von der Orientierung der Calcitkristalle abhängig. Bei gleichsinniger Orientierung ist der schädigende Effekt der anisotropen Dehnung größer als bei regelloser Orientierung der Calcitkristalle. (Auras et al. 2011, S.26)

„Die Kornformregelung bestimmt die bevorzugte Orientierung von Korngrenzen und ist somit bei Marmoren (...) eine gerichtete Vorzeichnung von Schwachstellen. Diese können während der thermischen Beanspruchung aktiviert werden, womit sich ein gerichtetes Rissystem ausbildet“ (Rüdrich 2003, S.140).

Ebenfalls Einfluss auf die Widerstandsfähigkeit von Naturstein hat die Korngröße. Mit Zunahme der Korngröße verringert sich, bezogen auf ein bestimmtes Volumen, die Gesamtfläche der Korngrenzen. Deshalb sind feinkörnigere Marmore tendenziell anfälliger für thermisch induzierte Beanspruchungen.

Der höhere Metamorphosegrad des Laaser Marmors gegenüber dem Carrara Marmors resultiert in einer größeren durchschnittlichen Korngröße (1,0 mm > 0,4 mm) und einer besseren Kornbindung. Aus diesem Grund wird dem Laaser Marmor auch eine bessere Verwitterungsbeständigkeit nachgesagt. (Poschlod 1990, S.16)

4.1.3 Porosität, Porenraumstruktur

Die Porosität spielt neben der Aufnahme von thermisch induzierten Verformungen auch eine wichtige Rolle für das Migrationsverhalten von Wasser im Naturstein. Die meisten Verwitterungsmechanismen haben gemeinsam, dass sie unter Anwesenheit von Feuchtigkeit ablaufen. Sie dringt in den Porenraum ein und wirkt von dort aus auf das Gesteinsgefüge. Die Porenradialverteilung ist dabei der entscheidende Parameter, der

die Eindringtiefe sowie Aufnahmevermögen von Wasser bestimmt. (Auras et. al 2011, S.30; Poschlod 1990; Rüdlich 2003, S.48ff; McAllister et. al 2016, S.145)

Für Sandsteine, deren Hauptporenanteil im kapillaren Bereich liegt, gilt, dass sie ein besseres Wasseraufnahme und -abgabeverhalten aufweisen, je grobporiger ihr Gefüge ist. Es kann mehr Wasser in vergleichsweise weniger Zeit aufgenommen werden, welches tiefer in den Stein eindringt. Der Sättigungsgrad ist bei feinporigen Varianten naturgemäß höher, allerdings nicht so hoch, dass eine Gefährdung durch Frostschäden entstehen würde. (Kownatzki 1997; Mirwald und Franzen 2004)

Besonders anfällig auf Frostschäden sind Natursteine mit Porenmaxima im Mikro- als auch Makroporenbereich. Die spezifischen Oberflächenkräfte in kleinen Poren resultieren in einem niedrigeren Gefrierpunkt. Aus diesem Grund können bereits gebildete Eiskristalle in den Makroporen durch Diffusion mit Flüssigkeit aus den Mikroporen versorgt werden. Der Druck auf die Porenwand wird durch die Volumszunahme des Eiskristalls erhöht. Das ermöglicht Frostschäden selbst unterhalb der Wassersättigung.

Die Variationsbreite was die Poreneigenschaften der Kalksandsteine betrifft ist sehr hoch. Die als Werkstein Verwendung gefundenen Sandsteine sind meistens sehr dicht, haben eine geringe Porosität und die Verwitterung begrenzt sich anfänglich nur auf die oberflächennahe Schicht. (Auras et. al 2011, S.30ff; Köhler 1991, S.52; Kownatzki 1997)

Marmore sind in bruchfrischen Zustand sehr dicht. Ihre Porosität beschränkt sich auf 0,1 – 0,5 Vol-%. Die meisten Poren befinden sich im Größenbereich von Mikrometer und werden bereits durch Kondensation von Wasserdampf wassergesättigt. Mit zunehmender Verwitterung ändern sich die Porengrößen bzw. die Rissbreiten und die Porosität kann auf 2 – 3 Vol-% anwachsen. Damit verbunden ist eine Änderung des Wassertransports (vgl. Kap. 7.1). Über kapillaren Weg kann Wasser effektiver aufgenommen werden, was chemische Lösungsprozesse stark begünstigt. (Rüdlich 2003, S.48, S.139f; Auras et al. 2011, S.26) Rüdlich (2003, S.51ff) wies auf die etwas bessere Wasseraufnahme von Carrara Marmor gegenüber Laaser Marmor hin. Das liegt, bei ähnlicher Porosität (Poschlod 1990, S.19), vermutlich an einer günstigeren Porenradienverteilung zur Wasseraufnahme.

4.2 Klimatische Randbedingungen

Neben den gesteinskundlichen Eigenschaften ist vor allem die Exposition der Steine für Verwitterungsmechanismen von großer Bedeutung. Das Klima beeinflusst in großen Maß Prozesse die an der Natursteinoberfläche ablaufen. Klimatologisch wird zwischen Makro-, Meso- und Mikroklima unterschieden. Während das Makroklima globalen Einfluss hat, betont das Mesoklima regionalklimatische Eigenschaften. Da selbst das Mikroklima in diesem Zusammenhang oft räumliche Dimensionen von bis zu 100 m aufweist, wird für Verhältnisse an Objekten und Bauwerken der Begriff „Nanoklima“ eingeführt. (Weischet und Endlicher 2008, S.19f)

4.2.1 Regionalklimatische Bedingungen

Prinzipiell ist der Übergang zwischen den Skalen der Klimatologie fließend. Ein Mesoklima ist meistens dadurch gekennzeichnet, dass es sich durch lokale Eigenschaften von der Umgebung unterscheidet. Demnach sind folgende Klimaelemente für ein Mesoklima charakteristisch:

- Niederschlag
- Temperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Wind
- Sonneneinstrahlung

Genauso wie die sogenannten Klimafaktoren (z.B.: geografische Breite, Höhenlage) das Klima beeinflussen, steuern Klimaelemente die Art und Intensität der chemischen, physikalischen und biologischen Verwitterungsprozesse, die zum Verfall und zur Modifizierung von Naturstein beitragen. (Weischet und Endlicher 2008, S.18f; McAllister et. al 2016)

Nach Press und Siever (1995, S.118) beeinflusst das Klima die chemische Verwitterung in starkem Maße: „Hohe Temperaturen und hohe Niederschläge verstärken die chemische Verwitterung, Kälte und Trockenheit verzögern sie. Die physikalische Verwitterung, die ebenfalls vom Wasser unterstützt wird, kann im kalten oder ariden Klima nennenswerte Ausmaße erreichen, wenn auch die chemische Verwitterung dort sehr langsam abläuft.“ Generell herrscht ein kontinuierlicher Stoff- und Energieaustausch an den Oberflächen offener Systeme wie es exponierte Natursteine darstellen. Neben andauernden Temperatur- und Feuchtewechsel ist auch der anthropogene Einfluss auf die Umweltbedingungen mitzubersichtigen. (McAllister et. al 2016, S.145f; Weischet und Endlicher 2008, S.286)

In Kapitel 8.2 wird auf die gesammelten Klimadaten (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlag) der Wetterstation in Mauerbach eingegangen.

4.2.2 Nanoklimatische Situationen

Je nach Exposition ergeben sich neben den übergeordneten regional-klimatischen auch nanoklimatische Bedingungen an den Natursteinen. Durch das Zusammenspiel der Klimaelemente und den Gesteinseigenschaften resultieren Bedingungen im cm- bis m-Bereich, die bei der Beurteilung von Schadensprozessen explizit zu betrachten sind.

Deshalb wurden die ca. 160 cm hohen Steinobjekte in einen Sockel-, Platten- und Spitzbereich unterteilt. Das Gesimse, Bohrungen und der keilförmig auslaufende Spitz sollen unterschiedliche Expositionsbedingungen an Bauwerken simulieren (vgl. Kap. 1). (Rohatsch 2005a, S.84)

Die Objektflächen sind je nach Orientierung bezüglich der Himmelsrichtungen den Klimaelementen mehr oder weniger stark ausgesetzt. Es ergeben sich Unterschiede bezüglich der Dauer und Intensität der Sonneneinstrahlung und demzufolge auch der Temperatur. Außerdem variiert die Anzahl der Benetzungsereignisse. Die Zunahme der

Feuchtigkeit ist von der Schwere und Dauer des Regenereignisses abhängig. Bei Orientierung in Richtung einer Wetterfront kann die Feuchtemigration im Stein durch vorhandenen Wind und zusätzlich hoher relativer Luftfeuchte verstärkt werden. (McAllister et. al 2016, S.140ff)

Prinzipiell sind an den Spitzen und an der Platte mit starker Verwitterung zu rechnen. Dünne feingliedrige Teile weisen eine stärkere Verwitterungsanfälligkeit auf als gedrungene solide Teile, weil sie aufgrund der größeren Oberfläche mehr Angriffsfläche bieten. Außerdem übersteigt die Anzahl der thermischen als auch hygryischen Wechselbeanspruchungen des Gesimses und der Spitze jene des Sockels, der durch die Gesimse größtenteils von Regen und im oberen Bereich von der Sonne geschützt ist. Das Gesimse und zu einem gewissen Maß das Granitfundament, das vor aufsteigender Feuchtigkeit schützen soll, bieten Raum für anfallendes Stauwasser. Das kann zum einen über Gravitation in tiefere Bereiche der Platte eindringen und zum anderen über Kapillarkräfte vom Sockel bzw. der Spitze aufgenommen werden. Das feuchte Milieu auf der Platte und an der Spitze ist zudem attraktiv für biologische Aktivitäten, die weitere Verwitterungsmechanismen verursachen.

5 Methodik

Bei Freiluft-Langzeit-Verwitterungsversuchen spielen sehr viele Faktoren eine Rolle und viele davon sind voneinander abhängig oder beeinflussen sich gegenseitig. Alle diese Parameter kontinuierlich zu quantifizieren und umgehend Maßnahmen gegen die Verwitterung zu setzen ist unmöglich. Es bleibt bis dato nur die Möglichkeit den Verwitterungszustand festzustellen und auf eine Schädigung des Gesteins mit Gegenmaßnahmen zu reagieren. Zur Beurteilung des Verwitterungsfortschritts werden in der Praxis verschiedene Methoden herangezogen. Dabei wird oft zwischen invasiven und zerstörungsfreien Methoden unterschieden:

An Naturstein werden neben dem Einsatz der menschlichen Sinne gerne folgende zerstörungsfreien naturwissenschaftlichen Untersuchungsmethoden verwendet:

- Ultraschallmessungen
- Feuchtigkeitsmessungen

Häufig durchgeführte invasive Untersuchungsmethoden sind:

- Dichtebestimmung
- Wasseraufnahme und -abgabe
- Zug- und Druckfestigkeit
- Frost- Tauwechselbeständigkeit
- Feuchtigkeitsbestimmung
- Bohrwiderstandsbestimmung
- Mikroskopische Untersuchungen
- Untersuchung der Porenradienverteilung

Im Zuge dieser Versuche werden die physikalischen Eigenschaften der Steine untersucht und können dann, falls vorhanden, mit den ursprünglichen Werten des Ausgangs- bzw. Einbauzustands verglichen werden. Die Ergebnisse der Schadenszustandsbewertung bilden die Grundlage etwaiger Restaurierungsmaßnahmen. (Fleischer et al. 2006, S.79f; Rohatsch 2010, S.151ff)

Bei den meisten invasiven Untersuchungsmethoden werden Labormessgeräte benötigt, deshalb sind Probeentnahmen eine notwendige Voraussetzung. Objekte, die in Hinblick auf Freiluftlangzeitverwitterung untersucht werden, sind grundsätzlich als immobile Objekte zu bewerten und erlauben im Normalfall keine Probenentnahme. Oft handelt es sich um Denkmäler, an denen eine invasive Untersuchung und damit eine Beschädigung des Kulturguts nicht zu rechtfertigen ist. In diesem Sinne wurde auch bei der Zustandserfassung der exponierten Steinmänner in Mauerbach als erster Schritt von den invasiven Untersuchungen abgesehen und von zerstörungsfreien Methoden Gebrauch gemacht. Dabei handelt es sich um Ultraschall- und die Feuchtigkeitsmessungen.

5.1 Ultraschallmessung zur Bewertung der Gefügeflockerung

Dieses Kapitel orientiert sich nach Fleischer (2002). Prinzipiell ist eine Feststellung nicht-oberflächlicher Schäden ohne invasive Methoden sehr schwierig. Die Ultraschalluntersuchung bietet eine zerstörungsfreie Alternative, die sich aufgrund dessen zur Beurteilung der Gefügeflockerung von Natursteinen etabliert hat. Im folgenden Abschnitt wird das Prinzip der Ultraschallmessung erklärt und auf ihre Anwendung zur Bestimmung der Gefügeschädigung eingegangen.

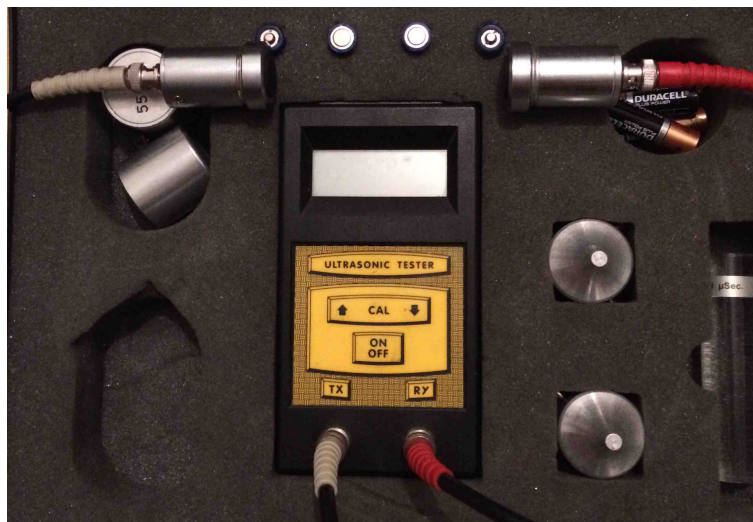


Abb. 8 Ultraschallmessgerät mit angeschlossenen Messköpfen

5.1.1 Prinzip der Ultraschallmessung

Im Bereich der Technik finden unterschiedliche Ultraschallverfahren Anwendung.

Das **Resonanzverfahren** ermöglicht das Errechnen verschiedener Materialparameter durch unterschiedliche Schwingungsanregung. Das **Intensitätsverfahren** schließt aus der Änderung des Schalldrucks auf den Materialzustand. Bei den durchgeführten Ultraschalluntersuchungen im Zuge dieser Diplomarbeit wurde das **Laufzeitverfahren** verwendet, weil es den Vorteil einer relativ einfachen Anwendung hat. Jedoch spielen viele Gefügeeigenschaften des untersuchten Materials eine Rolle, die bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten sind.

Prinzip des Laufzeitverfahrens:

Vom Messgerät wird über den Sendekopf ein Impuls an das Werkstück abgegeben und an einer anderen Stelle von einem Empfänger wieder aufgenommen. Der Impuls durchdringt dabei eine klar definierte Länge (l) in der gemessenen Zeit (t). Mit der Gleichung (Gl.[II])

$$v = l/t \quad \text{Gl.[II]}$$

lässt sich die Geschwindigkeit der Ultraschallausbreitung durch den Werkstoff bestimmen.

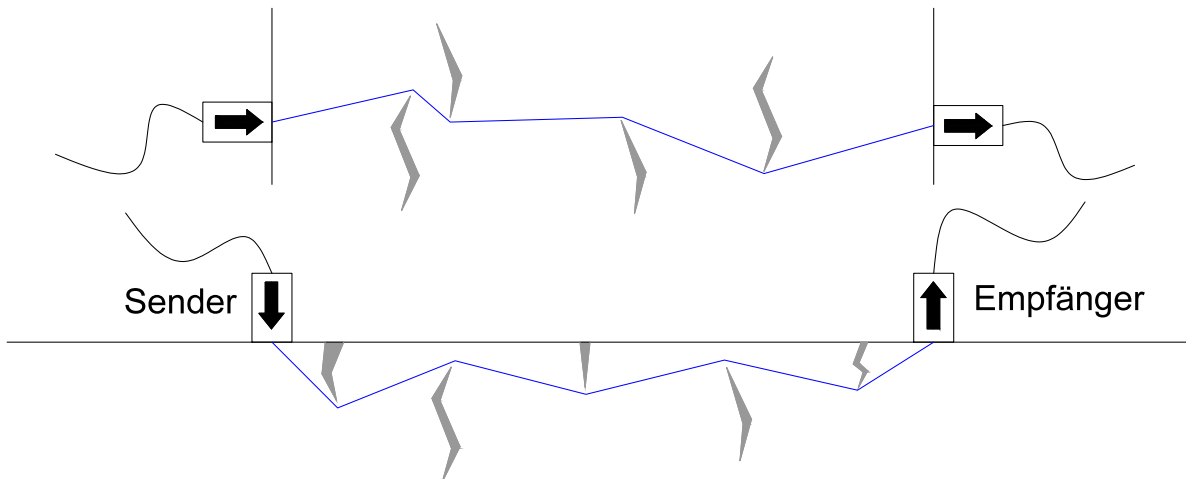


Abb. 9 Schalldurchgang beim Durchschallungs- (oben) und Auflegeverfahren (unten);
Grafik: Ortbauer

Bei einem homogenen Werkstück kann diese Methode einerseits zur Dickenbestimmung und andererseits zur Lokalisierung von Störungen (Risse, Hohlräume, etc.) angewendet werden. Inhomogene Objekte wie Natursteine weisen sehr unterschiedliche Gefügeeigenschaften auf. Korngrößenverteilung, Porosität, Rohdichte, Wassergehalt oder kristallographische Vorzugsorientierung sind alles Gesteinseigenschaften, die die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Ultraschalls beeinflussen. So gibt es mittlerweile in der Literatur für zahlreiche Gesteinstypen Geschwindigkeitswerte, die als Kennwerte für den Gefügezustand in Hinblick auf die Porosität dienen (vgl. Kap. 2). Der Verwitterungsvorgang verändert die Durchgangsgeschwindigkeit insofern, dass durch die physikalische, chemische oder biologische Beanspruchung neue Risse und Porenräume entstehen. Wie der Name schon sagt, breitet sich der Körperschall nur über Festkörper, im Fall von Natursteinen also von Korn-zu-Korn weiter aus. Während er in homogenen Werkstücken direkt vom Sender zum Empfänger vordringt, muss der Schall in inhomogenen Werkstücken den Hohlräumen ausweichen (Abb. 9). Er sucht sich den schnellsten Weg, den das Korngefüge mittel Festkörperkontakten bietet. Mit Zunahme der Gefügauflockerung oder bei Vorhandensein von Störungen nimmt bei gleichbleibender Messdistanz die Laufzeit des Ultraschalls zwischen den fixierten Messköpfen zu und somit die Geschwindigkeit ab.

5.1.2 Varianten von Ultraschallmessung

Je nach Anordnung der Messköpfe unterscheidet man 3 Varianten der Ultraschallmessung. Vergleiche ÖNORM EN 14579 (Stand: 2005; S.7) und (Fleischer 2002, S.10ff).

5.1.2.1 Direkte Messung

Sie wird auch Transmissionsmessung oder Durchschallungsverfahren genannt. Die Messköpfe liegen an genau gegenüberliegenden Punkten auf dem untersuchten Stein auf (Abb. 10, links). In-situ ist diese Form der Messung aufgrund der Notwendigkeit der beidseitigen Zugänglichkeit oft nicht möglich. Der vom Messkopf abgegebene Impuls wird über Druck- und Zugkräfte übertragen. Das entspricht der Wellenausbreitung mittels Primärwelle.

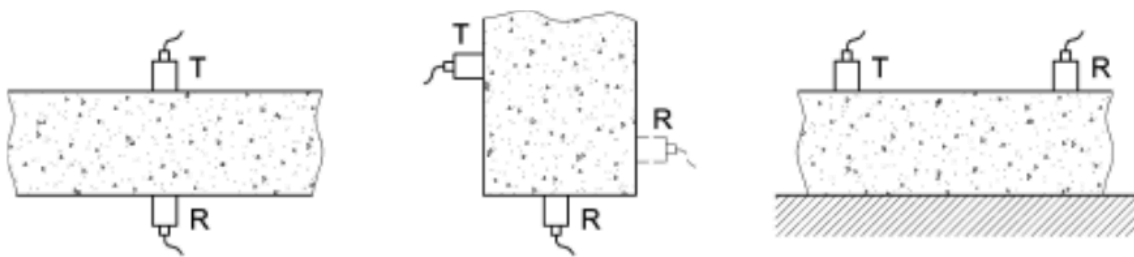


Abb. 10 Anordnungsmöglichkeiten der Messköpfe (ÖNORM EN 14579 2005, S.7)

5.1.2.2 Indirekte Messung

Neben der Primärwelle durchdringen noch andere Wellen ausgehend vom Sendekopf den Naturstein. Sie sind nicht auf eine Ebene (senkrecht zur Oberfläche des Sendekopfes) beschränkt, sondern breiten sich auch in andere Richtungen aus. Zwar sind diese weniger intensiv als Primärwellen, trotzdem ermöglicht dieses Phänomen weitere Anordnungsmöglichkeiten der Messköpfe (Abb. 10, rechts). Im Fall von indirekten Messungen wird der Impuls in erster Linie durch Oberflächenwellen, sogenannte Rayleighwellen, zum Aufnehmer übertragen.

„Die Anordnung für die indirekte Übertragung ist die unempfindlichste und sollte nur für In-situ-Messungen angewendet werden, wenn nur eine einzelne Oberfläche des Natursteins zugänglich ist oder wenn es von größerer Wichtigkeit ist, die Festigkeit der oberflächennahen Schicht als die der Gesteinsmasse selbst zu bestimmen“ (ÖNORM EN 14579 2005, S.7).

5.1.2.3 Halbdirekte Messung

Bei halbdirekten Messungen bzw. Eckmessungen (Abb. 10, mittig) ist die Impulsübertragung neben Primär- und Oberflächenwellen außerdem von Transversalwellen möglich. Der Schall wird dabei über Schub- und Scherkräfte zwischen den Körnern übertragen.

„Die Empfindlichkeit der Anordnung für die halbdirekte Übertragung liegt zwischen denen der beiden anderen Anordnungen und sollte nur angewendet werden, wenn die direkte Anordnung nicht anwendbar ist“ (ÖNORM EN 14579 2005, S.7).

5.1.3 Bestimmung der Gefügauflockerung

Die Gefügauflockerung eines Natursteins infolge Verwitterung versuchte Fleischer (2002, S.52ff) mittels eines mathematischen Ansatzes zu beschreiben:

„Die Zeit, die der Schall zum Durchgang durch die Probe benötigt ist linear abhängig von der Länge der Probe. Dies entspricht einer Geraden“ (Fleischer 2002, S.62).

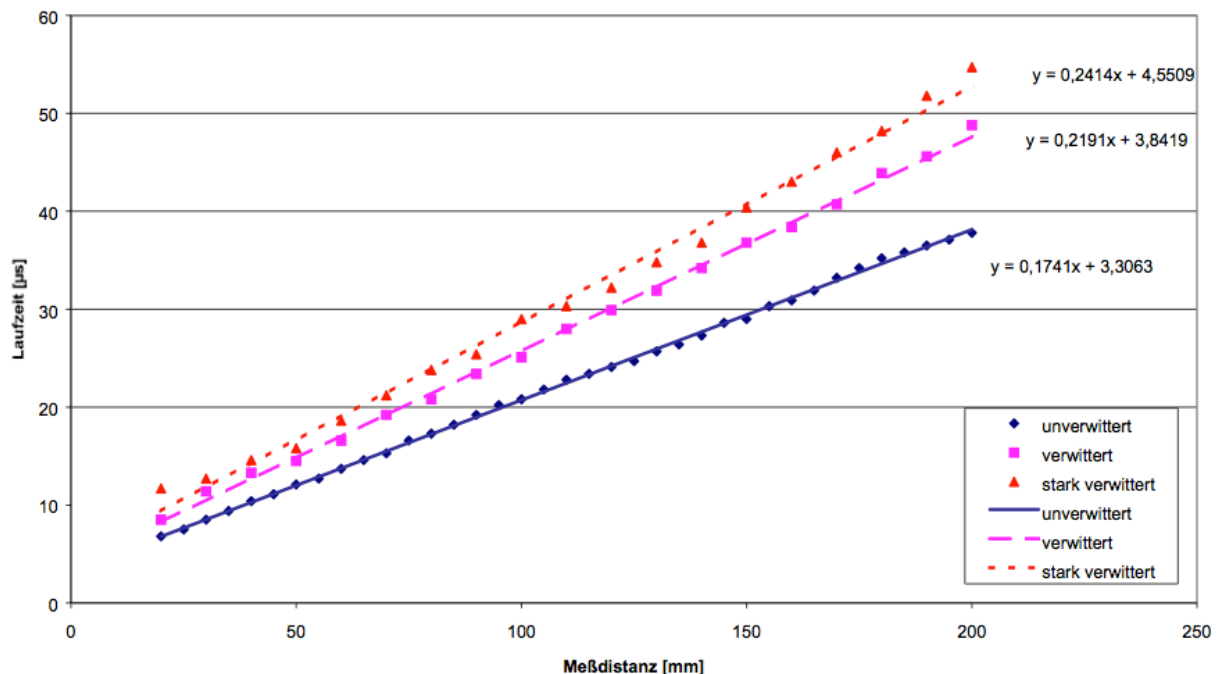


Abb. 11 Veränderung der k -Werte durch Verwitterung an einem Carrara Marmor (Fleischer 2002, S.74)

Stellt man die Laufzeiten den dazugehörigen Distanzen in einem Diagramm gegenüber, erkennt man deutlich einen linearen Zusammenhang (Abb. 11). Je mehr Messungen über unterschiedliche Distanzen zur Datenreihe beitragen, desto aussagekräftiger wird das Diagramm. Die sich ergebende Gerade kann mit der Gleichung [III]

$$y = k * x + d \quad \text{Gl. [III]}$$

- d ... Kopplungsverlust (μs)
- k ... Verzögerungskoeffizient ($\mu\text{s}/\text{mm}$)

angegeben werden. Der Kopplungsverlust „d“ beinhaltet Impulsverzögerungen, die bei der Kopplung von Messkopf und Naturstein entstehen können. Dessen Einflussfaktoren reichen von Oberflächenbeschaffenheit der Probe über Kopplungsmaterial bis Anpressdruck. Er ist also messdistanzunabhängig. Die Steigung „k“ ist ein Indikator für die Gefügeschädigung, die durch verwitterungsbedingte Rissbildungen die Schallübertragung zwischen Sender und Empfänger erschwert. Sie beschreibt die Störungshäufigkeit innerhalb der Probe und äußert sich durch das Ansteigen der Geraden bei fortschreitender Gefügauflockerung. Um eine Geradengleichung und damit den Grad der Auflocke-

nung bestimmen zu können sind mindestens zwei Messungen über unterschiedliche Distanzen notwendig.

Im Zuge dieser Arbeit wurden mehrere Messungen über unterschiedliche Distanzen vorgenommen. Anschließend wurden die Ergebnisse in einem Laufzeit-Weg-Diagramm gesammelt, durch eine Gerade angenähert und somit gleichzeitig gemittelt.

Setzt man Gleichung [III] nun als Ausdruck der Laufzeit in die Gleichung [II] für die Geschwindigkeit ein, ergibt sich folgender Ausdruck:

$$v = \frac{l}{k \cdot l + d} \quad \text{Gl.[IV]}$$

Wie bereits erwähnt ist „d“ distanzunabhängig und kann hier, außer als Indikator für die Oberflächenbeschaffenheit, unberücksichtigt bleiben. Folglich kann der Kehrwert des Verzögerungskoeffizienten „k“ auch als Geschwindigkeit (*km/sek*) angegeben werden. Sie wird als ideale Geschwindigkeit bezeichnet und durch die Nichtberücksichtigung von „d“ ebenfalls messdistanzunabhängig. Sie eignet sich somit als Kennwert für die Gefügebrauflockerung von Natursteinen (Tab. 7).

$$v_{ideell} = \frac{1}{k} \quad \text{Gl.[V]}$$

Gestein	k-Wert [μs/mm]	d-Wert [μs]	V _{ideell} [km/s]
Carrara Marmor verwittert	0,2815	3,2344	3,55
St. Margarethener KS unverwittert	0,194	2,9254	5,15
St. Margarethener KS verwittert	0,3474	2,5044	2,88
Schremser Granit	0,2446	2,9561	4,09
Sterzinger Marmor verwittert	0,3465	2,5103	2,89
Untersberger Kalkstein	0,1723	2,8519	5,8
Lindabrunner Konglomerat	0,424	0,893	2,36
Zentralgneis parallel zur Schieferung	0,4098	3,3772	2,44

Tab. 7 Kennwerte für v_{ideell} verschiedener Natursteine (Fleischer 2002, S.73)

In den folgenden Kapiteln dient dieser mathematische Ansatz als Grundlage für die Beurteilung des Verwitterungsfortschritts bei Natursteinen. Besonderem Augenmerk wird dabei auf die Gefügebrauflockerung gelegt, die durch eine Zunahme des Auflockerungskoeffizienten „k“ und gleichzeitiger Abnahme der ideellen Geschwindigkeit „ v_{ideell} “ gekennzeichnet ist.

Eine Gefügebrauflockerung lässt sich demnach grafisch durch ein Ansteigen der Geraden wie in Abb. 11 sehr gut erkennen.

5.1.4 Messunsicherheiten und wie man sie minimieren kann

Vergleiche Fleischer (2005; S.55ff).

Die Zustandserfassung von Natursteinen ist im Vergleich zu industriell produzierten Werkstoffen schwierig. Aufgrund ihres natürlichen Zustandes ist mit Inhomogenitäten im Korngefüge zu rechnen, die bereits an sich eine Streuung der Messergebnisse verursachen. Zusätzlich muss bei den Messungen auf verschiedene Randbedingungen geachtet werden, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten:

- Messgerät
- Kopplungsmedium
- Temperatur des Kopplungsmediums
- Oberflächenbeschaffenheit
- Anpressdruck

Diese Parameter fließen in den Kopplungsverlust „d“ ein. Bei einer idealen Messung, ohne Zeitverlust durch ein Zusammenspiel der Randbedingungen, wäre $d=0$. Dieser Umstand ist selbst im Labor nicht hundertprozentig herzustellen. Deshalb schneidet die Trendlinie einer Messreihe beim Durchschallungsverfahren normalerweise die y-Achse (=Laufzeitachse) im positiven Bereich. Der Zeitverlust lässt sich minimieren indem man das Kopplungsmedium, zum Beispiel durch Gummiaufsätze, anpasst oder den Anpressdruck erhöht.

Bei einer Serie von Messungen, bei der Kopplungsverlust „d“ und Verzögerungskoeffizient „k“ gemittelt werden, kann „d“ als Qualitätsmerkmal der Messreihe verstanden werden.

Beim Auflegeverfahren kann es sogar zu einem scheinbaren Zeitgewinn kommen und der Schnittpunkt von Trendlinie und y-Achse rutscht ins Negative. Der Grund dafür liegt darin, dass Start- und Endpunkt des Impulses aufgrund der relativ großen Messkopfoberfläche nicht eindeutig bestimmt werden können (Abb. 12). Es ist praktisch eine kürzere als theoretisch angenommene Distanz möglich.

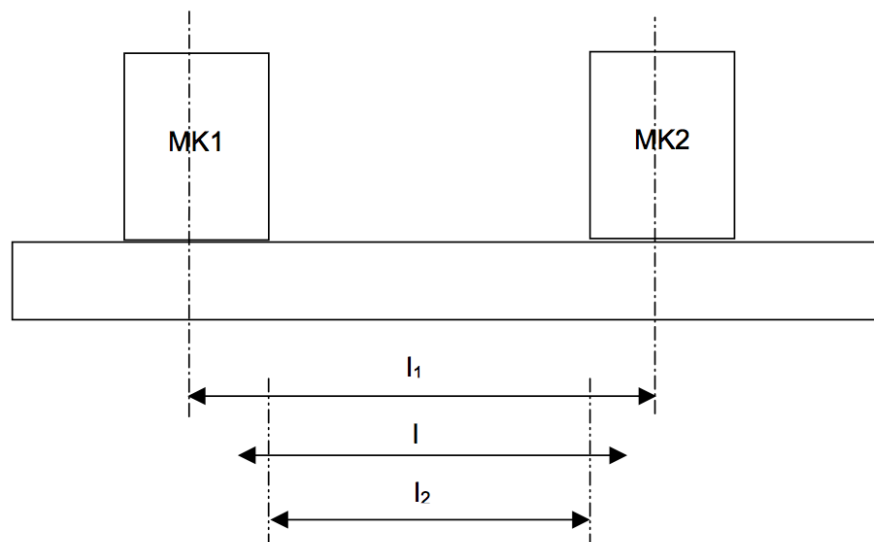


Abb. 12 Messdistanzbandbreite bei Auflegemessungen (Fleischer 2002, S.69)

In Gleichung [IV] finden diese Randbedingungen noch Berücksichtigung und beeinflussen das Ergebnis. Gleichung [V] ist vom Kopplungsverlust bereinigt. Sie streicht die Steigung „k“ als entscheidenden Faktor für die Bewertung der Gefügauflockerung hervor.

Besonders beim Monitoring von Langzeitverwitterungen, wo das Konstanthalten der Randbedingungen quasi unmöglich ist, muss auf irreführende Faktoren besonders geachtet werden.

Beispielsweise kann die Verwendung unterschiedlicher Messgeräte zwischen den Messreihen 2003/04 bzw. 2017 eine deutliche Veränderung des Kopplungsverlustes bedeuten. Auf den gesuchten Verzögerungskoeffizienten „k“ sollte das jedoch keinen Einfluss nehmen.

5.2 Feuchtebestimmung

5.2.1 Grundlagen der Feuchtemessung

Der Feuchtegehalt eines Stoffes kann auf 2 Arten festgestellt werden. Entweder durch eine absolute Methode, die meistens mit dem Trennen von Wasser und Feststoff verbunden ist, oder durch das Ausnützen bestimmter Eigenschaften des Wassers, sogenannten relativen Methoden. Während bei absoluten Methoden, auch direktes Verfahren genannt, der Feuchtegehalt sehr genau bestimmt wird, haben relative Methoden mit sehr vielen Störfaktoren zu kämpfen. Das absolute dient dem relativen Verfahren als Bezugsgröße, um eine Kalibrierung und somit eine Bereinigung der Störfaktoren zu ermöglichen. Der große Nachteil direkter Messverfahren ist, dass sie die Bausubstanz angreifen, also zu den sogenannten invasiven Verfahren zählen. Zur Beurteilung des Feuchtegehalts wird deshalb bei In-Situ Untersuchungen in den letzten Jahren vermehrt auf handliche Messgeräte zurückgegriffen. Nach dem Prinzip der elektrischen Leitfähigkeit von ionisiertem Wasser kann man mit solchen Geräten, durch Auflegen von Anode und Katode sehr schnell an Feuchtigkeitsmesswerte im Naturstein gelangen. (Kupfer 1997, S.20; ÖNORM EN 16682 2017, S.15f)

Ob die dadurch gelieferten Ergebnisse repräsentativ sind, den tatsächlichen Werten durch Kalibrierfunktionen angepasst werden müssen, oder gänzlich unbrauchbar sind, wird in weiterer Folge untersucht. Deshalb wurde im Zuge dieser wissenschaftlichen Arbeit je eine absolute und eine relative Messmethode angewendet. Dabei soll die absolute gravimetrische Feuchtebestimmung der relativen elektrischen Leitfähigkeitsmessung als Referenzmethode dienen.

In den folgenden Kapiteln werden diese beiden Verfahren erklärt und es wird darauf eingegangen, worauf bei der Durchführung der Messungen zu achten ist.

5.2.2 (Thermo-)Gravimetrische Feuchtebestimmung

Vergleiche Kupfer (1997; S.46ff) und ÖNORM EN 16682 (S.13ff).

Bei diesem Verfahren wird der Feuchtegehalt abhängig von Temperatur und Zeit bestimmt. Es wird auch Trockenschrankverfahren oder Darr-Methode genannt. Die Probe wird so lange getrocknet bis das darin vorhandene Porenwasser vollständig entwichen ist. Durch Gegenüberstellung der Feucht- und Trockenmasse lässt sich der Feuchtegehalt (MC) in Masseprozent (M%), bezogen auf die Trockenmasse, ermitteln (Gl.[VI]):

$$MC = \frac{m_w}{m_{tr}} * 100 = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}} * 100 \quad \text{Gl.[VI]}$$

m_{tr} ... Trockenmasse

m_f ...	Feuchtmasse
m_w ...	Masse des vorhandenen Wassers

Die Materialprobe sollte unmittelbar nach der Entnahme gewogen und in den Trockenschrank gegeben bzw. bis zur Trocknung luftdicht verschlossen werden. Ist dies nicht der Fall, kann es durch eine Änderung der Luftfeuchtigkeit zu einer Abgabe bzw. Aufnahme von Feuchtigkeit in der Probe und damit zu einer Verfälschung der Ergebnisse kommen. Im Trockenschrank muss die Luftfeuchtigkeit durch Konvektion sehr niedrig gehalten werden, damit keine Restfeuchte im Material verbleibt. Die Trocknungstemperatur wird so gewählt, dass das physikalisch gebundene Wasser verdampft, aber keine chemischen Verbindungen zerstört werden. Sie liegt bei $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Die Dauer der Trocknung ist materialspezifisch. Für gewöhnlich reicht es die Probe über Nacht im Schrank zu lassen. Eine konstante Trockenmasse m_{tr} ist auf jeden Fall erreicht, wenn sich die Probenmasse nach einer vierstündigen Trocknung nicht um mehr als 0,5% verändert. Nach dem Trocknen muss die Probe sofort gewogen werden, damit eine Aufnahme von Wasserdampf verhindert wird. Um repräsentative Werte zu erlangen, sind mehrere Messungen notwendig. Das Verfahren ist hinsichtlich der Stoffe universell einsetzbar, setzt jedoch eine Homogenität der Probe voraus.

Bei der Verwendung von Bohrmehl ist folgendes zu beachten:

- aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche neigt die Probe zu einem schnelleren Feuchteaustausch mit der Umgebung
- bei der Entnahme entsteht (Reibungs-)wärme, die zur Verdunstung von Feuchtigkeit führt; dieser Effekt nimmt mit der Gesteinsfestigkeit bzw. Gesteins Härte zu)
- grobe, nicht probenrepräsentative Körner werden gemahlen und führen zu einer minimalen Verfälschung der Ergebnisse
- vorhandene Salze können Wasser binden

5.2.3 Leitfähigkeitsmessverfahren

Vergleiche Kupfer (1997; S.69ff).

Dieses Messverfahren beruht auf der besseren Leitfähigkeit von Wasser gegenüber dem Korngefüge des Natursteins. Der Naturstein wäre im trockenen Zustand quasi nicht leitfähig. Mit Zunahme von Feuchtigkeit steigt die Leitfähigkeit an.

Die Messung basiert auf der Bestimmung des Ohm'schen Widerstands. Er wird mit zunehmender Anzahl beweglicher Ladungsträger, das können freie Elektronen oder Ionen sein, geringer. Der Widerstand wird somit von vielen Faktoren bestimmt:

- Konzentration
(spez. Leitfähigkeit steigt proportional zur Konzentration der Ladungsträger)
- Temperatur
(spez. Leitfähigkeit steigt mit zunehmender Temperatur, aufgrund erhöhter Ionenbewegung)
- Unterschiedliche Dichte
- Inhomogene Feuchteverteilung
- Körnung
- Textur

Relative Messgeräte können deshalb nicht wie absolute Messungen den Feuchtegehalt in SI-Einheiten angeben, sondern müssen durch Kalibrierung mittels eines Referenzma-

terials in Massenanteil in M% überführt werden. Dies geschieht zum Beispiel durch den Vergleich mit dem gravimetrischen Verfahren.

Im Bereich der Bauzustandsanalyse werden die mobilen Leitfähigkeitsmessgeräte dennoch zur Beurteilung des Feuchtegehalts herangezogen. Die Unterscheidung des Feuchtegehalts von gelösten Salzen stellt dabei eine große Schwierigkeit dar. Die vorhandene Menge an Wasser und Salzen im heterogenen Steingefüge ist im Vorhinein unbekannt. Ein geringer Feuchtegehalt bei hohem Salzgehalt kann bei elektrischen Leitfähigkeitsmessungen zu selben Ergebnissen führen wie ein hoher Feuchtegehalt mit geringer Salzkonzentration.

Ihr Vorteil ist ihre sehr einfache Anwendung. Sie liefern schnelle Ergebnisse und ermöglichen das Monitoring räumlicher und zeitlicher Feuchtigkeitsänderungen. (Rohatsch 2010, S.158)

Humid-Check

Humid Check ist ein mobiles Leitfähigkeitsmessgerät der Firma TFA-Dostmann (Abb. 13). Es wurde für Natursteine kalibriert und zeigt an dessen Monitor bereits den Feuchtegehalt in Masseprozent an.

HumidCheck eignet sich zur Feuchtebestimmung von Holz sowie mineralischen Stoffen. Der Messbereich für Holz liegt zwischen 6 – 44 %, bei Baustoffen zwischen 0.2 – 2.0 %. Die Messergebnisse werden über eine LCD als Bargraph angezeigt. Es sind die Elektroden mit ausreichend Druck an das Material anzubringen. Wiederholungen erhöhen die Zuverlässigkeit von Messungen. (URL4 2017)



Abb. 13 Leitfähigkeitsmessgerät „HumidCheck“

5.3 Oberflächentemperatur

Gleichzeitig zu den Ultraschall- und Feuchtemessungen wurde die Oberflächentemperatur an den unterschiedlich ausgerichteten Flächen dokumentiert. Sie sollten zeigen, ob

ein Zusammenhang zwischen der US-Geschwindigkeit und der Oberflächentemperatur bzw. des Feuchtegehalts und der Oberflächentemperatur besteht.

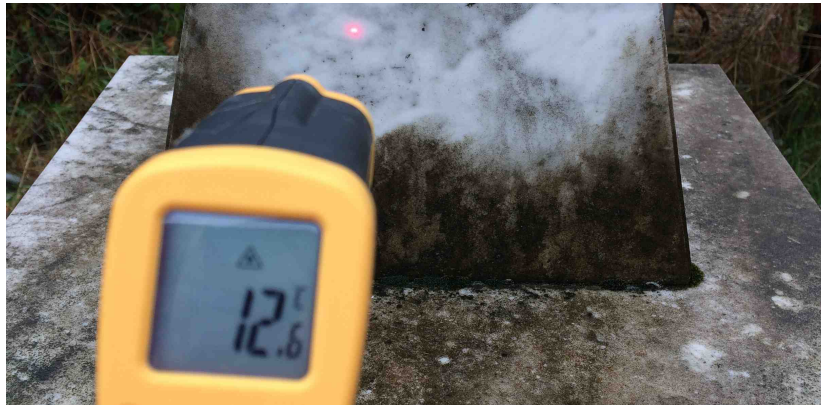


Abb. 14 Verwendung des Oberflächentemperaturmessgerät am Carrara Marmor (Gerätetyp: Lasergrip774 von Etekcity ; 20.09.2017)

6 Ergebnisse der In-Situ Ultraschallmessungen

Zur Bestimmung der fortschreitenden Gefügauflockerung der Natursteine wurden Ultraschallmessungen an den jeweils unterschiedlich exponierten Oberflächen durchgeführt. An der Spitze lassen sich aufgrund ihrer Geometrie direkte (Transmissions)-Messungen durchführen. Platte und Sockel weisen für Transmissionsmessungen zu große Distanzen auf, deshalb wurde hier auf halbdirekte Messungen über Ecken zurückgegriffen (Abb. 15).

Zur Bestimmung des Grads der Gefügauflockerung wurden die Laufzeiten den jeweiligen Messdistanzen gegenübergestellt. Je nach Anzahl der Messungen erhält man eine Punktwolke, die sich durch eine Gerade annähern lässt. Diese Trendlinie hilft die Entwicklung der Durchschnittsgeschwindigkeiten der Ultraschallmessungen besser begreifbar zu machen. Führt man also mindestens zwei Messungen über unterschiedliche Distanzen an einem Stein durch, kann man eine Geradengleichung ($y = k * x + d$) aufstellen. In dieser Gleichung beschreibt „d“ den Kopplungsverlust. Er wird durch mehrere Randbedingungen bestimmt. Der Verzögerungskoeffizient „k“ beschreibt den Zeitverlust bei der Schallübertragung, der aufgrund der Gefügauflockerung entsteht. Die abgeleitete ideale Geschwindigkeit kann als Kennwert für die Gefügeschädigung herangezogen werden. (vgl. Kap. 5.1)

6.1 Gefügebrauflockerung der verwitterten Probekörper

In dieser Arbeit wurden Ultraschallmessungen von 2003, 2004 und 2017 anhand der Vorgehensweise von Kapitel 5.1.3 ausgewertet und in einem Lauzeit-Weg-Diagramm gegenübergestellt, um auf die Gefügeschädigung schließen zu können. Dabei ist zu beachten, dass die Werte d , k , v gesteinsunabhängig sind und deshalb nicht gegenübergestellt werden dürfen!

Zur Bestimmung der verwitterungsbedingten Gefügebrauflockerung sollten laut Fleischer (2002, S.71f) Messungen, die zu sehr vom Geradenverlauf abweichen und auf Messfehler oder eine stärkere Schädigung hinweisen, gefiltert werden. In den folgenden Diagrammen wurden dennoch sämtliche Messwerte dargestellt. Risse und andere größere Schädigungen sind ebenfalls Teil einer gesamten Gefügebrauflockerung im Gestein und sollten deshalb mitberücksichtigt werden. Auf sogenannte „Ausreißer“ in den Diagrammen wird explizit hingewiesen.

6.1.1 Marmore

Marmore werden primär physikalisch durch thermisch bedingte Spannungen im Gesteinsgefüge geschädigt. Diese Spannungen sind dem anisotropen Ausdehnungsverhalten des Calcits geschuldet (vgl. Kap. 4.1.2). Die Marmore sind durch ihre Exposition lediglich morgens vor etwaiger Sonneneinstrahlung geschützt. Das Gesimse und die Spitze werfen je nach Sonnenstand nur einen kleinen Schatten auf den darunterliegenden Sockel.

Durch die thermische und intensive Bewässerung durch Niederschläge sind Platte und Spitze stärker beansprucht. Im Marmor ist aufgrund seiner Porenradienverteilung eine große Steighöhe des Stauwassers im Sockel möglich. Von den sehr kleinen Poren kann aber kaum Wasser, das zur chemischen Verwitterung führen könnte, aufgenommen werden. Zu Gefriersprengungen kommt es wegen der kleinen Porenradien nur bei hoher Gesteinsfeuchte und gleichzeitig sehr niedrigen Temperaturen.

Gemäß Rüdrieh (2003) weisen der Carrara und Laaser Marmor ein annähernd identes Korngefüge auf. Dementsprechend sind übereinstimmende Schadensphänomene zu erwarten.

6.1.1.1 Carrara Marmor

Nach 14 jähriger Exposition zeigen alle exponierten Natursteine erkennbare Veränderungen im makroskopischen Bereich. Abb. 6 lässt eine leichte gelbliche Verfärbung des Carrara Marmors erkennen. Sie erhöht den Kontrast und lässt die Textur noch stärker in den Vordergrund treten. Im Bereich der Platte sowie an den Füßen des Sockels und der Spitze geht die Textursichtigkeit durch mikrobiologischen Bewuchs verloren (Abb. 14). An den Kanten ist eine minimale Rückverwitterung erkennbar.

Die in Abb. 6 außerdem ersichtlichen Ausbrüche sind auf Probeentnahmen zurückzuführen.

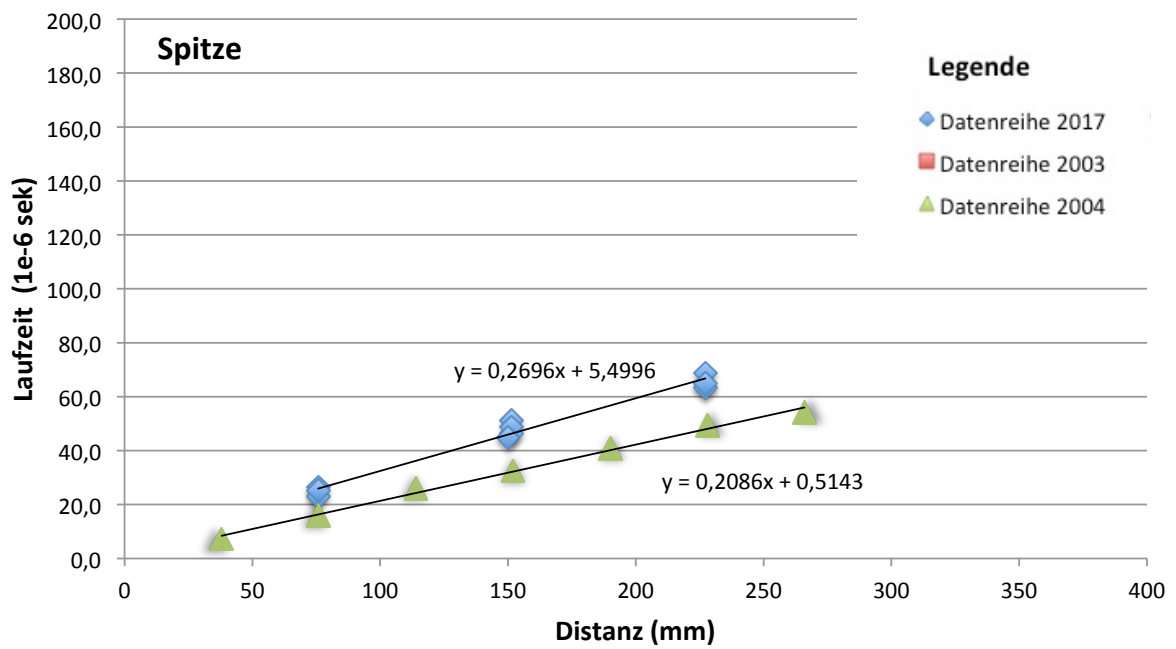


Abb. 16 Gefügeauflockerung – Spitze des Carrara Marmor

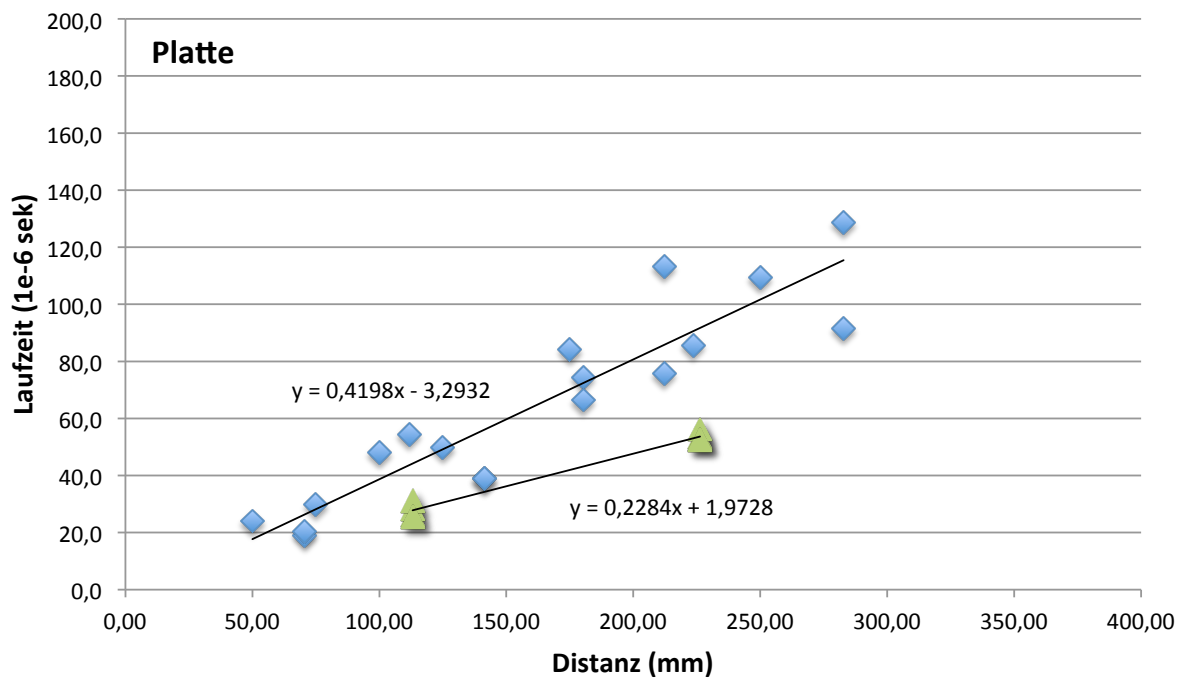


Abb. 17 Gefügeauflockerung – Platte des Carrara Marmor

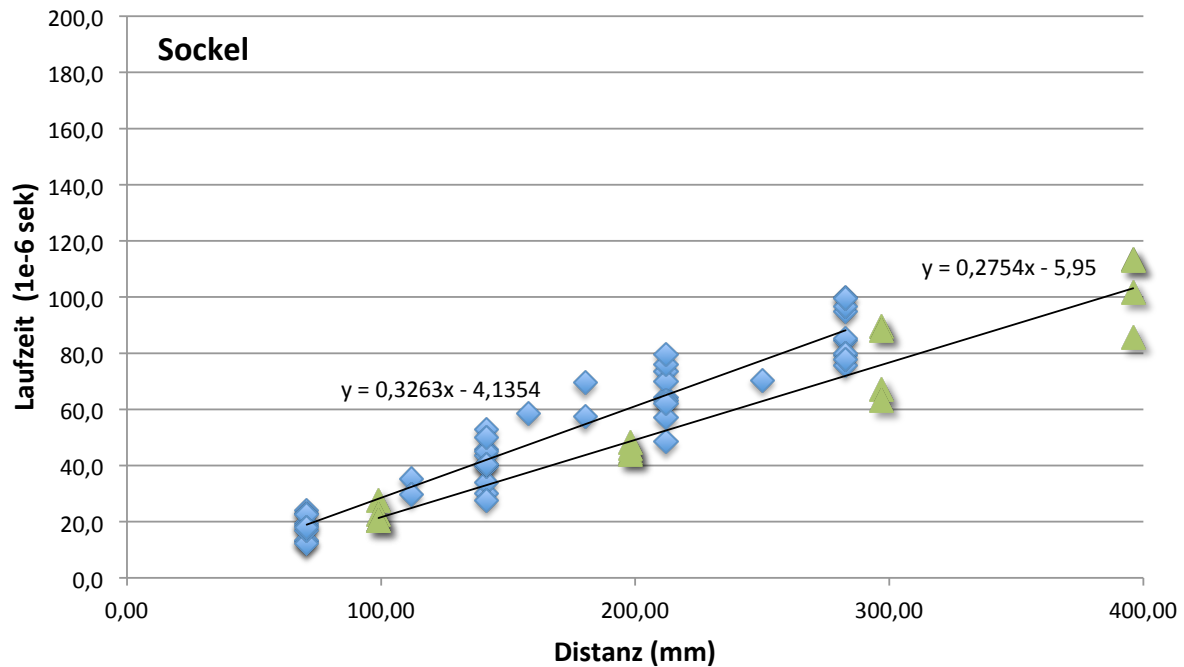


Abb. 18 Gefügeauflockerung – Sockel des Carrara Marmor

Vom Carrara Marmor standen nur Daten von Ultraschallmessungen aus dem Jahr 2004 zur Verfügung. Dennoch lässt sich sagen, dass dieser Stein einer guten, verwitterungsbeständigen Varietät entstammt. Die Spitze weist bei durchschnittlicher Verwitterung eine Gefügeauflockerungen von 23 % auf. Am stärksten geschädigt ist die Platte, bei der es zu einer Erhöhung des Auflockerungskoeffizienten von 46% gegenüber 2004 kommt. Das lässt sich sehr gut an der zunehmenden Steigung des Geradenverlaufs beobachten. Ultraschallgeschwindigkeiten haben über die Jahre in sämtlichen Teilen erkennbar abgenommen. Der Sockel lässt hingegen eine relativ geringe Veränderung des Auflockerungskoeffizienten und der Impulsgeschwindigkeiten erkennen. Er ist durch die überlagerte Platte zwar von Regenwasser geschützt und nimmt kaum Wasser über kapillaren Weg auf, dennoch war mit einer größeren Schädigung durch thermische Beanspruchung zu rechnen.

6.1.1.2 Laaser Marmor

Wie beim Carrara Marmor tritt die Textur mit der Zeit besser in Erscheinung. Die biologische Besiedelung ist in den gleichen Bereichen anzutreffen, wobei der Sockel weniger stark, die Platte und die Spitze (hier vorallem die Kanten) hingegen stärker von mikrobiologischen Bewuchs befallen scheint (vgl. Abb. 7). Um genauere Rückschlüsse auf die biologische Verwitterung zu gewinnen, sind zusätzliche Untersuchungen notwendig. Mit diesem Hintergrund wurden bereits Proben im Plattenbereich entnommen, wie Ausbrüche in Abb. 7 hinweisen.

Eine minimale Rückverwitterung an den Kanten ist auch beim Laaser Marmor zu erkennen.

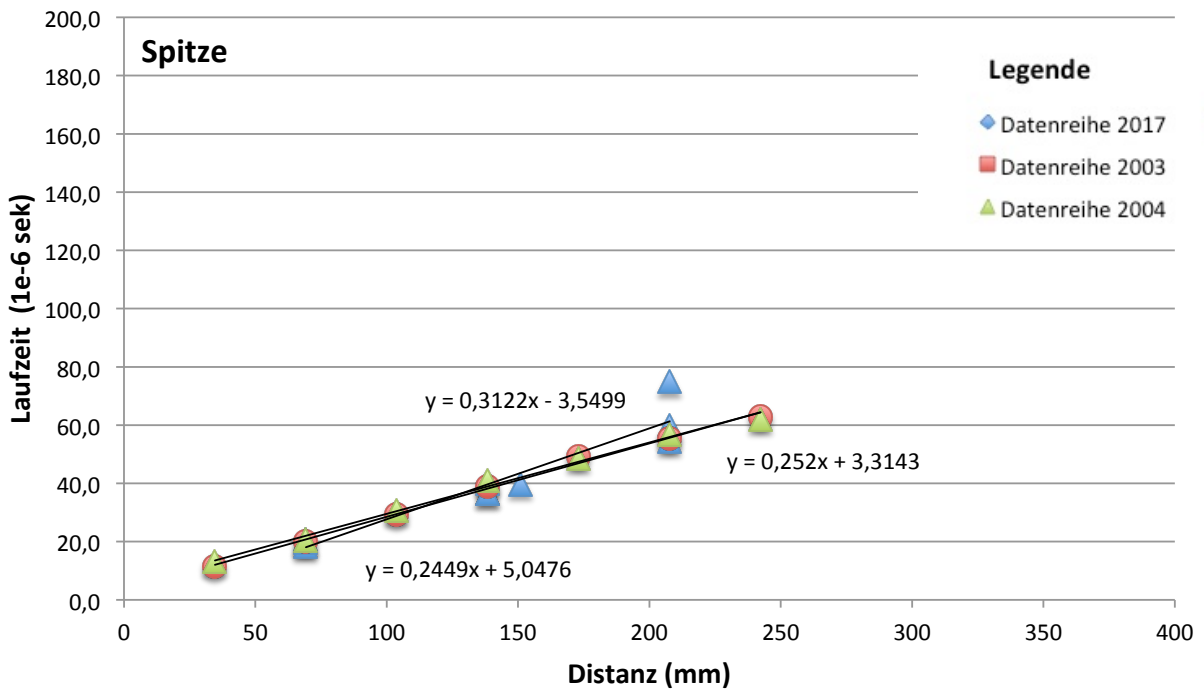


Abb. 19 Gefügebrauflockerung – Spitze des Laaser Marmor

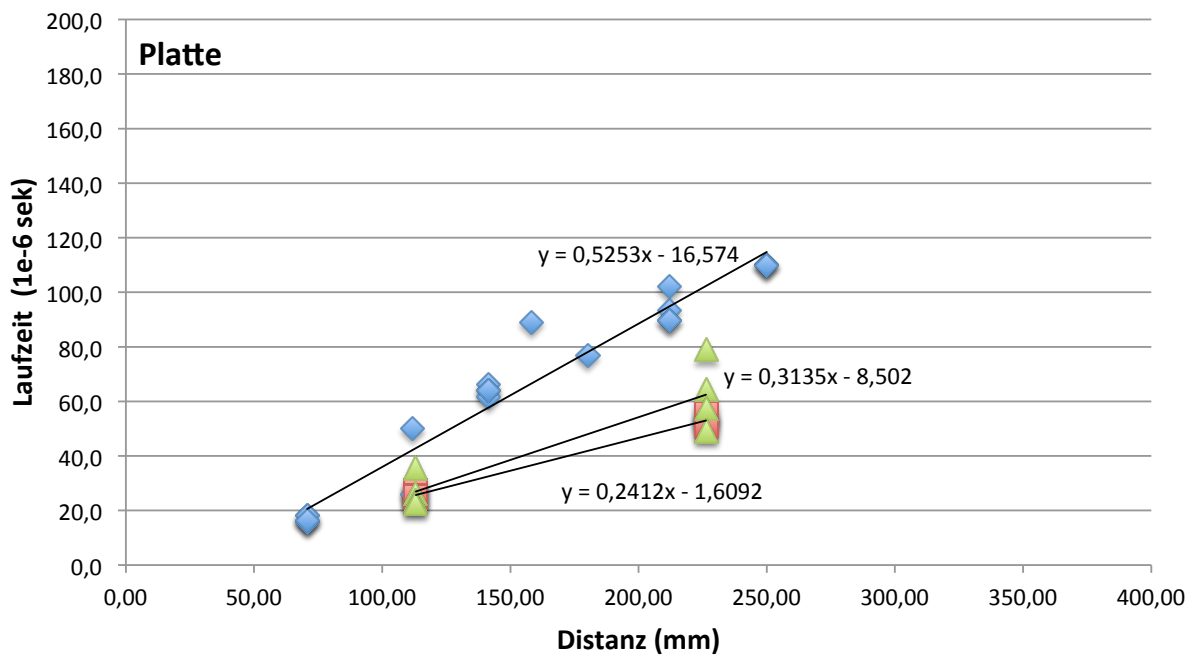


Abb. 20 Gefügebrauflockerung – Platte des Laaser Marmor

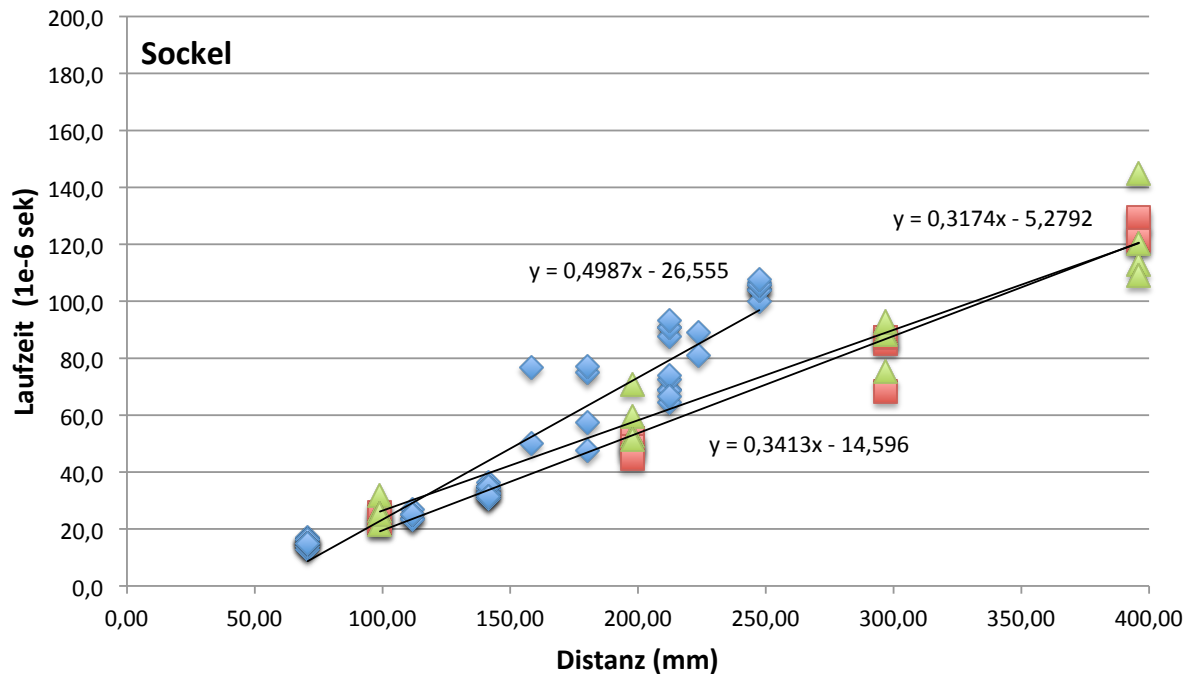


Abb. 21 Gefügeflockung – Sockel des Laaser Marmor

An der Spitze ist keine sichtbare Änderung der Geschwindigkeiten über die Jahre festzustellen (Abb. 19). Das kann auch durch die Verwendung eines anderen Messgerätes resultieren (vgl. Kap. 5.1.4). Über die Distanz von 200 mm ist eine Messung mit außerordentlich hoher Laufzeit zu erkennen (Abb. 19). Sie deutet auf eine grobe Schädigung, wie einen Riss, im Inneren hin. Das Anpassen einer Trendlinie lässt eine Gefügeflockung erkennen. Den gesammelten Daten zufolge beträgt sie nach 14 Jahren 19%.

An der Platte ist wie beim Carrara Marmor eine starke Gefügeschädigung von bis zu 50% zu erkennen (Abb. 20). Bereits nach einem Jahr (2004) betrug die Auflockerung 17%. Die Geschwindigkeiten sind stetig gesunken. Lässt man die deutlich erkennbare Distanzabhängigkeit der Eckmessungen im Sockel unberücksichtigt (vgl. Kap. 6.3.2.2), ergibt sich eine Gefügeflockung von 31% (Abb. 21). Die Platte beim Laaser Marmor bietet dem Sockel kaum Schutz vor Regen und Sonne.

Bei den Ultraschallmessungen war leider eine deutliche Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Messdistanz festzustellen. Mit zunehmenden Distanzen nimmt die Impulsgeschwindigkeit rapide ab (vgl. Kap. 6.3.2.2). Im Laufzeit-Weg-Diagramm äußert sich das durch ein Ansteigen der Trendlinie und somit einen erhöhten Auflockerungskoeffizienten „k“. Bei Messungen aus 2017 prägt sich diese Abhängigkeit viel stärker aus, als bei früheren Messungen. Das kann entweder das Zeichen einer fortgeschrittenen Gefügeschädigung sein, oder zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen. Der Auflockerungskoeffizient würde gegenüber den tatsächlichen Bedingungen einen zu hohen Auflockerungsgrad wiedergeben. Erkenntnisse aus Kapitel 6.3.2.2 lassen eher auf Zweites schließen.

Angenommen die Geschwindigkeiten bewegen sich in jenem Bereich von 2003, sind vor allem im Sockel keine besonderen Gefügeschädigungen festzustellen. In diesem Fall muss es sich um eine besonders verwitterungsbeständige Varität des Laaser Marmors handeln.

6.1.2 Kalksteine

Aufgrund ihrer Porosität und Porenradienverteilung haben Kalksandsteine eine höhere Wasseraufnahmefähigkeit als Marmore. Generell sind Sedimentgesteine anfälliger für chemisch-physikalische Verwitterungsmechanismen. Die meisten Prozesse laufen dabei unter Anwesenheit von Wasser ab. Abwechselndes Feuchtwerden und Austrocknen setzen dem Stein durch verschiedene Verwitterungsmechanismen (siehe Kap. 3) zu. Die Verwitterungsgeschwindigkeit hängt dabei sehr stark von der Porenradienverteilung ab. Einerseits bestimmt sie die Trocknungsgeschwindigkeit durch die Diffusionseigenschaft und andererseits hat sie entscheidenden Einfluss auf die Frostbeständigkeit. Besonders anfällig auf Frostschäden sind Sandsteine mit Porenmaxima im Mikro- als auch Makroporenbereich.

Die Porositätseigenschaften der Kalksandsteine lassen eine kapillare Aufnahme des Stauwassers im Sockelbereich vermuten. Dieser kann bei entsprechender Porenradienverteilung verstärkt durch Frost angegriffen sein.

Gegenüber den Sandsteinen ist am Lindabrunner Konglomerat eine geringere kapillare Wasseraufnahme zu erwarten.

Volumsveränderungen durch thermische Beanspruchung können, im Vergleich zum Marmor, leichter über die Porenräume abgeleitet werden und verursachen geringere Spannungen im Gesteinsgefüge.

6.1.2.1 St. Margarethener Kalksandstein

Im Vergleich zu den Marmoren ging beim St. Margarethener Kalksandstein die belbbraune Färbung mit der Zeit verloren (Abb. 3). Das deutet auf ein Herauslösen von farbbgebenden Mineralen wie Limonit hin (Burford et. al 2005, S.203). Im Plattenbereich wäre eine mineralische Farbveränderung ohnehin nicht festzustellen. Dieser ist großflächig mit Moos bewachsen. Auch die Spitze weist eine Verdunkelung durch mikrobiologischen Bewuchs auf. Die Reliefbildung an den Kanten zeigt sich im Vergleich zu den Marmoren verstärkt. Sie tritt, wie beim Lindabrunner Konglomerat (Abb.29), an der Spitze am deutlichsten in Erscheinung. An manchen Stellen sind die eingeschlossenen Rhodoliten (Rotalgenkalke) noch erkennbar (Abb. 22).

Die in Abb. 3 ersichtlichen Ausbrüche sind wieder auf Probeentnahmen zurückzuführen.



Abb. 22 *Grob-poröser Bereich (eingeschlossene Algenkolonie) beim St. Margarethener Kalksandstein*

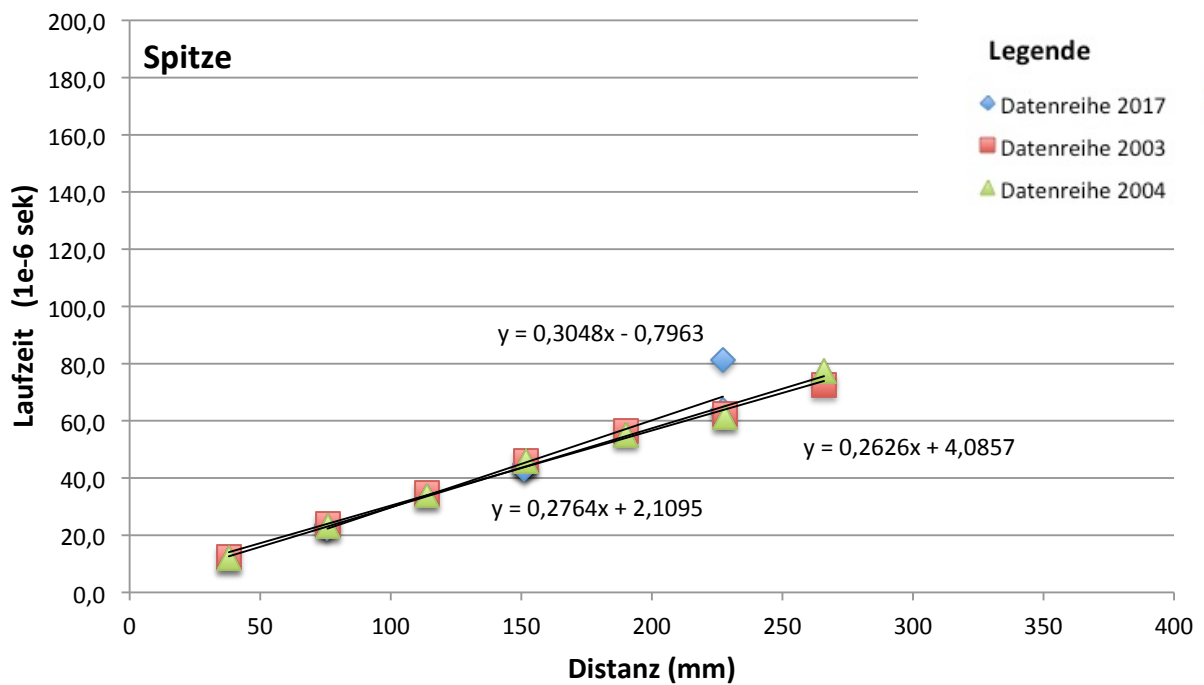


Abb. 23 Gefügeflockung – Spitze des St. Margarethener Kalksandsteins

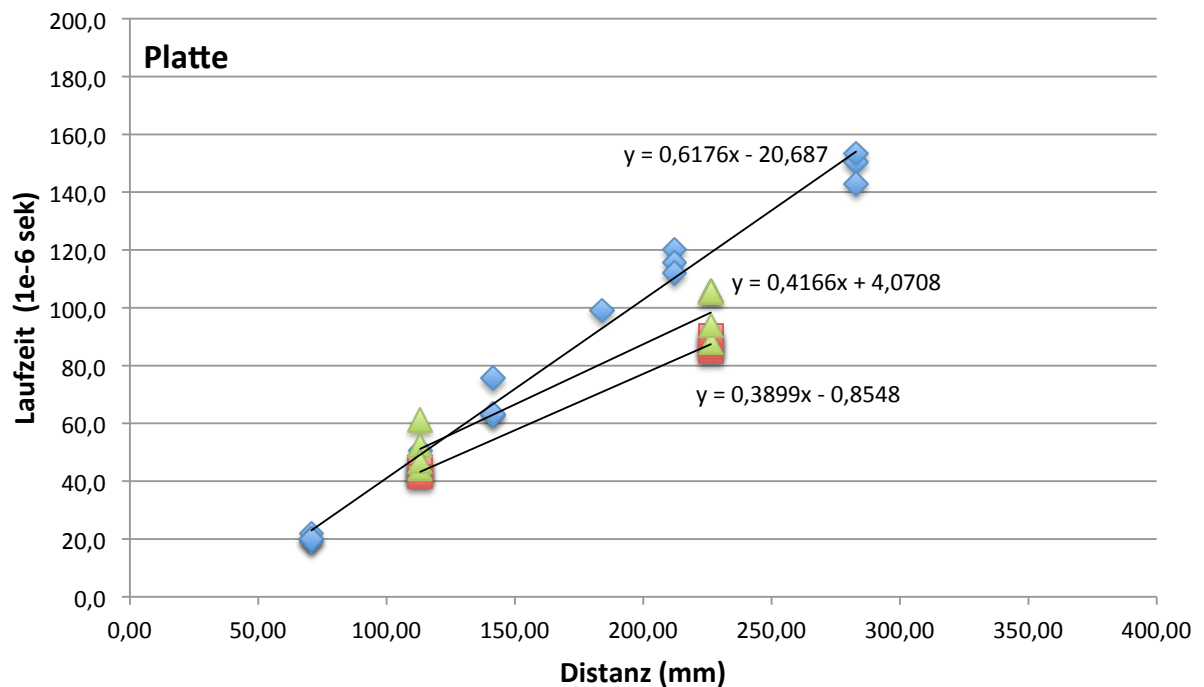


Abb. 24 Gefügeflockung – Platte des St. Margarethener Kalksandsteins

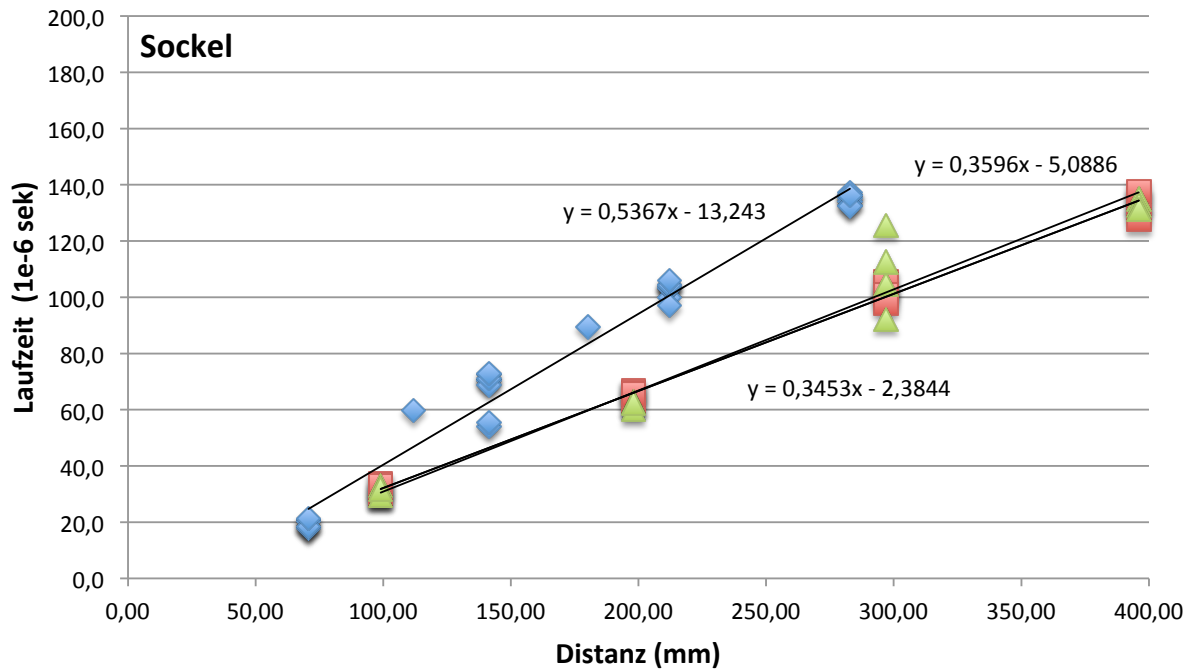


Abb. 25 Gefügauflockerung – Sockel des St. Margarethener Kalksandsteins

An der Spitze sind überraschenderweise keine verwitterungsbedingten Änderungen zu erkennen (Abb. 23). Platte und Sockel weisen einen stetigen Verwitterungszustand auf, der sich im ersten Jahr gering, aber in Summe stark ausgeprägt hat (Abb. 25). An Beiden ergibt sich nach 14 Jahren ein Auflockerungskoeffizient von ca. 36%.

Die aufgezeichneten Daten an der Platte zeigen eine relativ hohe Geschwindigkeitsreduktion über das erste Jahr (Abb. 24). Diesbezügliche Schwankungen können durch geänderte Randbedingungen wie zum Beispiel den Sättigungsgrad oder unterschiedliche Messgeräte auftreten. Solange während einer Messreihe die Randbedingungen konstant gehalten werden, üben sie keinen Einfluss auf den ausgewerteten Auflockerungskoeffizienten aus (vgl. Kap. 5.1.3).

6.1.2.2 Aflenzer Kalksandstein

Der Sockel des Aflenzer Kalksandstein weist optisch keine großen Veränderungen im makroskopischen Bereich auf. Die Verdunkelung des unteren Bereichs lässt die kapillare Steighöhe des Stauwassers gut erkennen (Abb. 5). Ansonsten zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim St. Margarethener Kalksandstein. Eine Verfärbung zufolge biologischer Besiedelung weist sowohl Platte als auch Spitze auf. Moos hat sich auf der horizontalen Plattenfläche ausgebreitet. Eine fortschreitende Reliefbildung ist an den Kanten greifbar. Die größeren Ausbrüche (Abb. 5) sind Zeichen einer Probeentnahme.

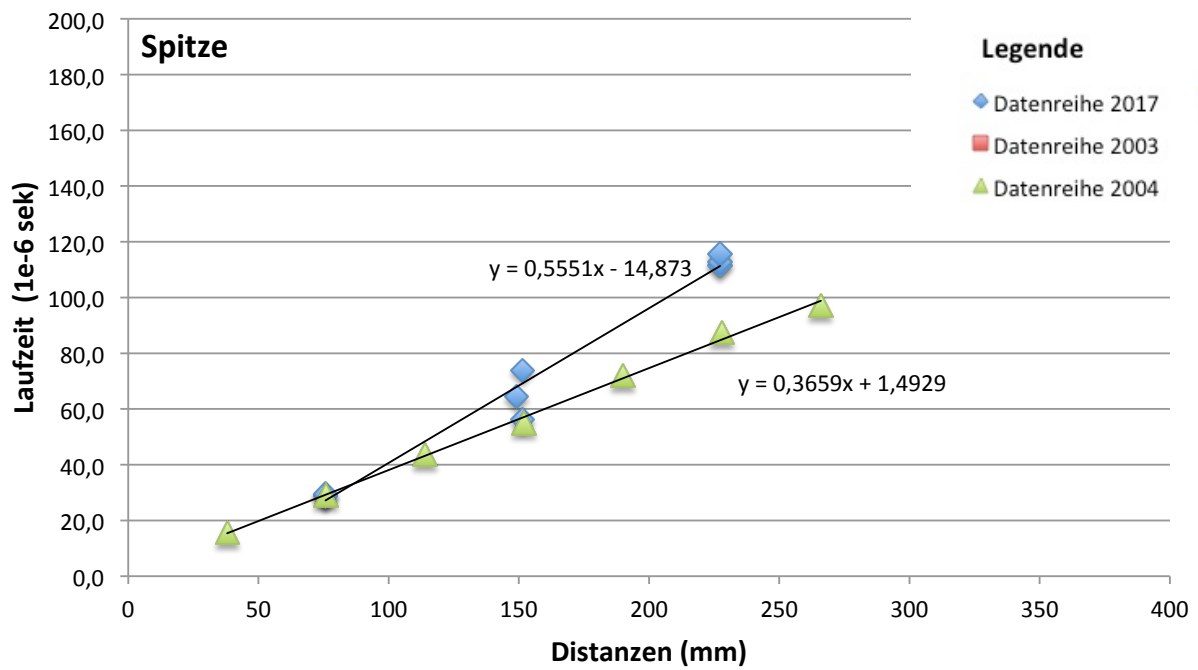


Abb. 26 Gefügebrauflockerung – Spitze des Aflenzer Kalksandsteins

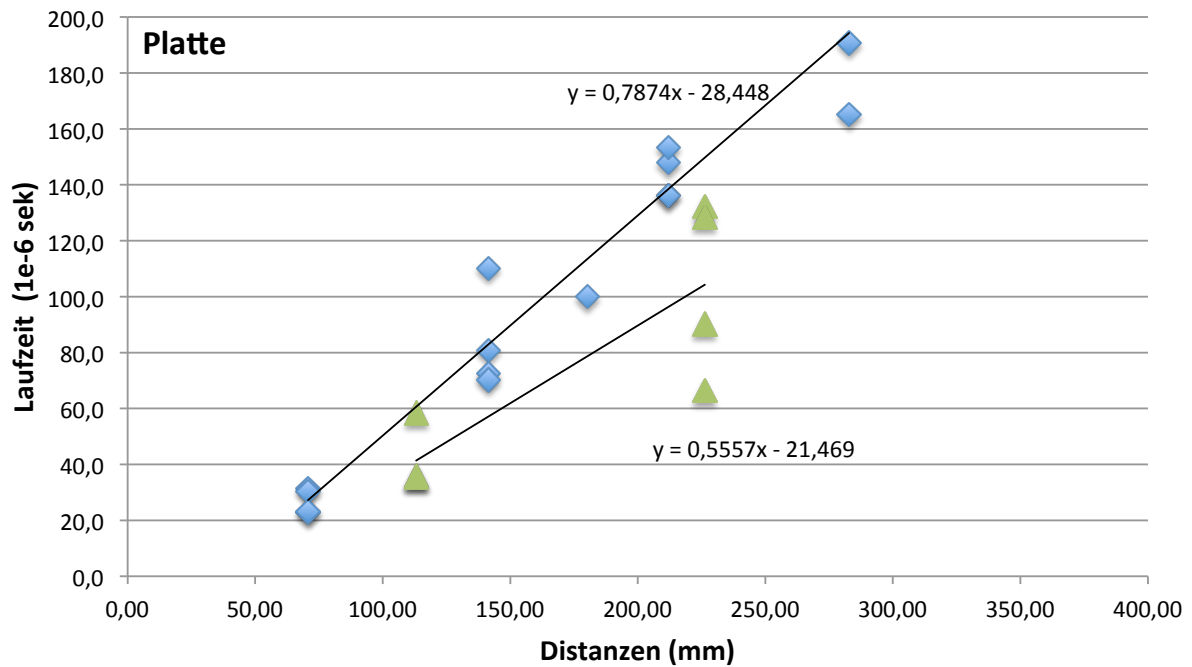


Abb. 27 Gefügebrauflockerung – Platte des Aflenzer Kalksandsteins

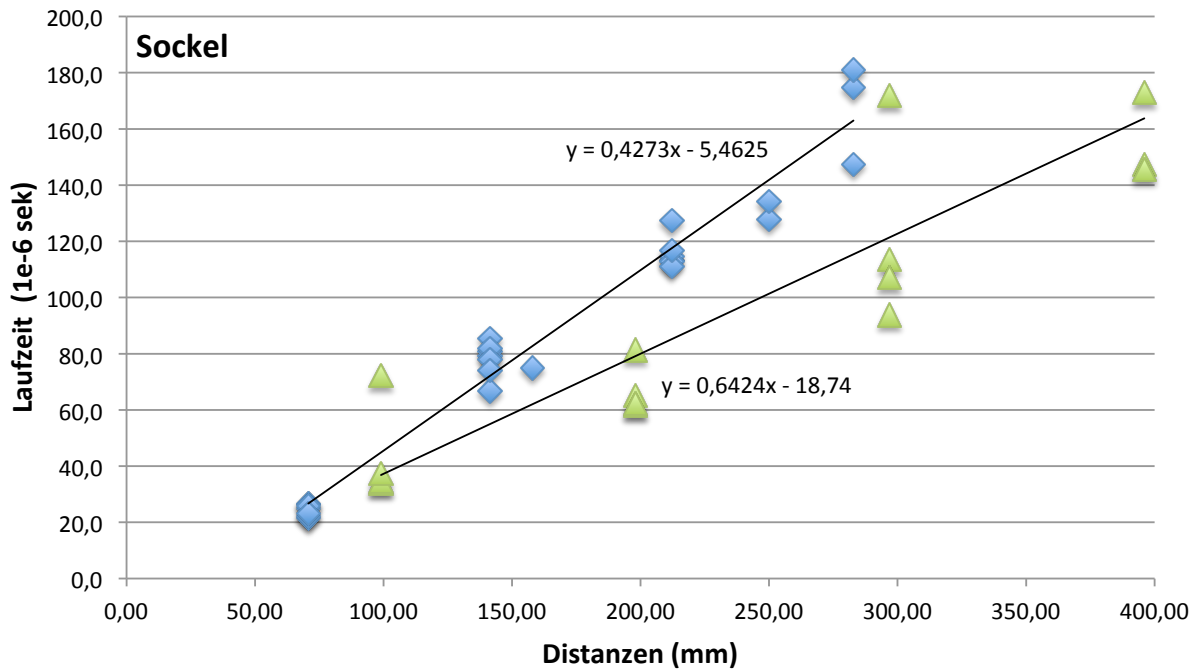


Abb. 28 Gefügauflockerung – Sockel des Aflenzer Kalksandsteins

Die Abbildungen Abb. 26, Abb. 27 und Abb. 28 zeigen sehr schön die entstandenen Gefügauflockerungen der verschiedenen Steine des Aflenzer Kalksandstein. Sie beträgt expositionsunabhängig ca. 30% und bewegt sich damit im Bereich vom St. Margarether Kalksandstein. Die Geschwindigkeitswerte aus dem Jahr 2004 streuen relativ stark. Einige reißen nach unten hin aus (Abb. 28). Sie sind normalerweise Anzeichen tiefergelegener Störungen wie zum Beispiel Risse. Da diese „Ausreißer“ aber im Sockel über eine ganze Messreihe hindurch, also über kurze als auch lange Distanzen, auftreten, lässt das auf eine Einlagerung einer poröseren Schicht, vergleichbar mit dem St. Margarether (Abb. 22), schließen.

6.1.2.3 Lindabrunner Konglomerat

Neben Verdunkelungen im unteren Bereich des Sockels sowie an der Platte und Spitze, weist der Stein auch Ausbrüche auf, die zum Zeitpunkt der Aufstellung noch nicht vorhanden waren (vgl. Abb. 4, Abb. 33). Sie sind, bis auf den noch frischen Ausbruch (Abb. 4, rechts), nicht auf Probeentnahmen zurückzuführen. Eine Reliefbildung ist an allen Kanten feststellbar und an der Spitze am deutlichsten erkennbar (Abb. 29)



Abb. 29 Reliefbildung an der Spitze des Lindabrunner Konglomerat

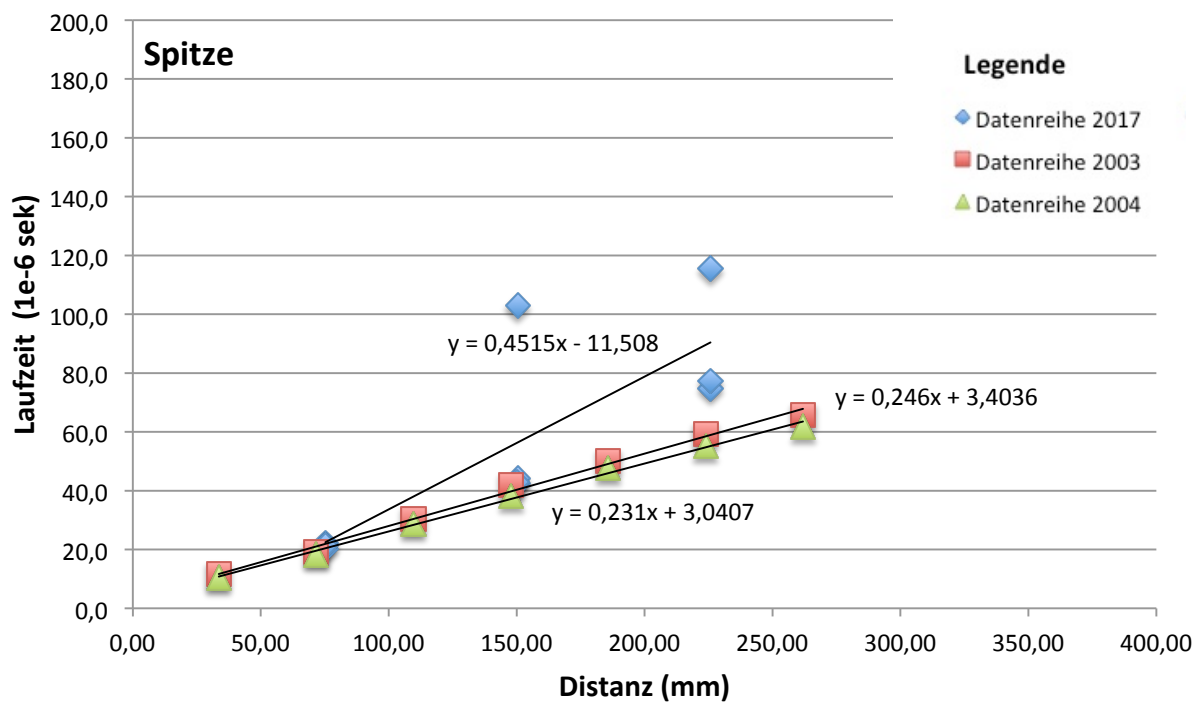


Abb. 30 Gefügeauflockerung – Spitze des Lindabrunner Konglomerats

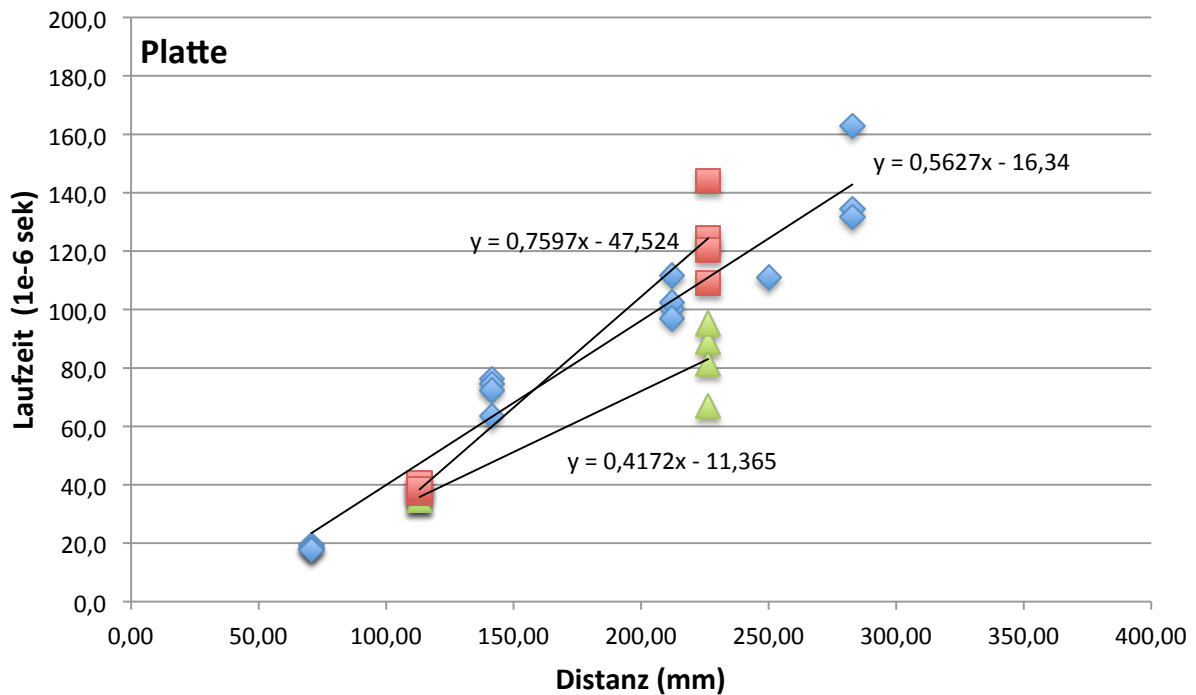


Abb. 31 Gefügeauflockerung – Platte des Lindabrunner Konglomerats

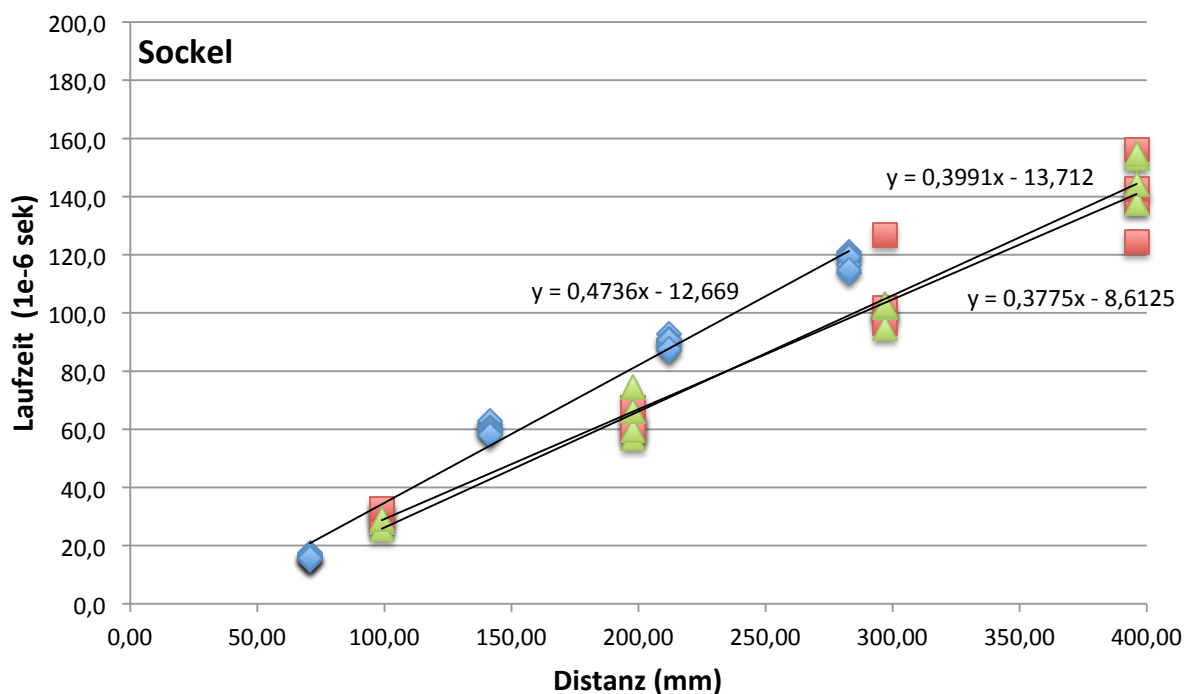


Abb. 32 Gefügeauflockerung – Sockel des Lindabrunner Konglomerats

Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen am Konglomerat entsprechen nicht unbedingt dem Trend der Verwitterung an den anderen Lithotypen. Die Spitze des Konglomerats scheint am stärksten verwittert (Abb. 30). Ihr Auflockerungsgrad liegt bei 36%, während Ultraschallmessungen an der Platte und am Sockel schwächere Veränderungen als bei den übrigen Sedimentgesteinen belegen (Abb. 31, Abb. 32).

Auffällig sind außerdem mehrere „Ausreißer“ bei den Messungen am Konglomerat, die auf stärkere Schädigungen vor allem im Bereich der Spitze hinweisen (Abb. 30). Es sind auch optisch bereits mehrere Ausbrüche von kieselgroßen Steinen aus dem Konglomerat zu erkennen (Abb. 33). Mit fortschreitender Verwitterung geht die Kornbindungsfestigkeit zunehmend verloren und erleichtert das Ausbrechen einzelner Steine aus dem Konglomerat.



Abb. 33 Ausbrüche beim Lindabrunner Konglomerat

Die Platte zeigt in Abb. 31 eine theoretisch viel höhere Gefügauflockerung für das Jahr 2003 als für 2017. Das lässt eigentlich die Vermutung zu, dass der Stein bereits beim Einbau gröbere Gefügeschädigungen aufwies. Beim Lindabrunner Konglomerat gibt es auch im unverwitterten Zustand größere Löcher, durch in geologischen Zeiträumen verwitterten Geröllen. Insgesamt ist die Bewertung des Verwitterungszustandes bei Konglomeraten daher eher schwierig. Eine kleine Verschiebung der Messpunkte reicht bereits aus, um völlig andere – auch konträre – Werte zu liefern. (mündliche Mitteilung Rohatsch 2017)

Sieht man von den Ausbrüchen, die in der Spitze aufgrund ihrer feineren Form bevorzugt auftreten können, ab, erweist sich der Konglomerat als ausgesprochen verwitterungsbeständig. Ausgehend von der Datenreihe aus 2004 zeigte die Platte nach 13-jähriger Exposition eine Gefügauflockerung von nur 26% und der Sockel von lediglich 16%.

6.2 Interpretation der Ultraschallmessergebnisse

Die ideellen Geschwindigkeiten der Natursteine sind in Tab. 8 zusammengefasst:

	Carrara			Laaser		
	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>
	v_ideell (km/sek)			v_ideell (km/sek)		
	2003	2004	2017	2003	2004	2017
Spitze	n.v.	4,79	3,71	3,96	4,08	3,20
Platte	n.v.	4,38	2,38	4,15	3,19	1,90
Sockel	n.v.	3,63	3,06	2,93	3,15	2,01

	St. Margarethener			Aflenzer			Lindabrunner		
	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>
	v_ideell (km/sek)			v_ideell (km/sek)			v_ideell (km/sek)		
	2003	2004	2017	2003	2004	2017	2003	2004	2017
Spitze	3,81	3,62	3,28	n.v.	2,73	1,80	4,06	4,33	2,79
Platte	2,56	2,40	1,62	n.v.	1,80	1,27	1,32	2,40	1,77
Sockel	2,90	2,78	1,86	n.v.	2,34	1,56	2,65	2,51	2,11

Tab. 8 Die zusammengefassten ermittelten ideellen Geschwindigkeiten der exponierten Natursteine

Nach 14 jähriger Exposition der Natursteine und damit einhergehender Verwitterung, lässt sich an allen Steinen eine Gefügauflockerung erkennen. Der durch die Ultraschallmessungen bestimmte Verzögerungskoeffizient ist bei dem einen oder anderen Stein weniger stark als erwartet. So sind an der St. Margarethener Spitze und am Lindabrunner Sockel nur sehr geringe Auflockerungen zu erkennen. Das Lindabrunner Konglomerat weist ein generell ausgesprochen geringes Maß an Verwitterung auf. Die relativ hohen ideellen Geschwindigkeiten zum Aufstellungszeitpunkt trotz vorangegangener 80 jähriger Verwitterung, deutet die Verwitterungsbeständigkeit des Laaser Marmors an. Erstaunlich ist dann aber die viel geringere Schädigung des Carrara Sockels gegenüber dem Laaser Sockels (Tab. 9), die eventuell gerade auf die Verwitterungsgeschichte des Laaser zurückzuführen ist (vgl. Kap. 8.3.2).

	Carrara			Laaser		
	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>
	Gefügauflockerung (%)			Gefügauflockerung (%)		
	2003	2004	2017	2003	2004	2017
Spitze	n.v.	0%	23%	0%	-3%	19%
Platte	n.v.	0%	46%	0%	23%	54%
Sockel	n.v.	0%	16%	0%	-8%	31%

	St. Margarethener			Aflenzer			Lindabrunner		
	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>	<i>unverwittert</i>	≥	<i>verwittert</i>
	Gefügauflockerung (%)			Gefügauflockerung (%)			Gefügauflockerung (%)		
	2003	2004	2017	2003	2004	2017	2003	2004	2017
Spitze	0%	5%	14%	n.v.	0%	34%	-	0%	36%
Platte	0%	6%	37%	n.v.	0%	29%	-	0%	26%
Sockel	0%	4%	36%	n.v.	0%	33%	-	0%	16%

Tab. 9 Grad der Gefügauflockerung der Natursteine (%)

Die **Spitzen** der jeweiligen Steine weisen eine Auflockerung von 10 – 30% auf. Sie sind von keiner Seite vor Wind, Regen oder Sonne geschützt und somit thermischer als auch hygrischer Wechselbeanspruchung ausgesetzt, die in einer Synthese (Frost-Tau-Wechsel) erhöhtes Verwitterungspotential bergen (Ahnert 2015, S.60f). Sich auf der Platte sammelndes Stauwasser kann ebenfalls kapillar aufgenommen werden. Verschmutzungen im unteren Bereich der Spitze deuten darauf hin, dass es aufgrund erhöh-

ter Feuchtigkeit bereits zur biologischen Besiedelung durch Pilze, Bakterien, Algen oder Flechten gekommen ist (Abb. 3-Abb. 7).

In Anbetracht dieser intensiven Beanspruchung der Spitze bewegen sich die prozentualen Werte der Gefügeschädigung, abgesehen vom Aflenzer Kalksandstein, in einem überraschend niedrigen Bereich (Tab. 9). Für eine genaue Interpretation sind weitere Untersuchungen in diesem Bereich notwendig.

Abplatzungen am Lindabrunner Konglomerat und Ausbrüche an der spitzen Kante belegen die stärkere Verwitterungsanfälligkeit feinteiliger Objekte.

Wie erwartet zeigen die **Platten** den am weitesten fortgeschrittenen Auflockerungsgrad. Sie bieten eine relativ große horizontale Fläche zur Aufnahme von Regenwasser. Zusätzlich wird das Wasser von der Spitze über deren schrägen Flächen B und D auf die Platte abgeleitet. Dieses „Abflusswasser“ kann während dem Abrinnen an der Oberfläche kristallisierte Salze lösen und auf die Platte transportieren. Da die Expositionsflächen stetig hygri-scher und thermischer Wechselbeanspruchung ausgesetzt sind, kristallisieren die Salze früher oder später nahe der Oberfläche aus. Neben einer Verwitterung durch chemisch-physikalische Beanspruchungen tragen diese Bereiche das Potential einer erhöhten Schädigung durch winterliche Frost-Tau-Wechsel. Außerdem bieten diese Umstände exzellenten Nährboden für biologische Besiedelung, wie es Fotoaufnahmen aus 2017 (Abb. 33) belegen. Sie verursachen eine biogene Verwitterung.

Sich an der Unterseite der Platte sammelndes Wasser kann als Stauwasser an den Sockel abgegeben werden. Die zurückbleibende Feuchtigkeit verdunstet nur sehr langsam, weil dieser Bereich ständig im Schatten liegt. Dieses feuchte Milieu begünstigt eine chemische Verwitterung.

Signifikant hoch ist der Auflockerungskoeffizient der Marmorplatten. Sonneneinstrahlung belastet die Gesimse thermisch und sorgt für eine erste Anwitterung und Gefügauflockerung. Der dadurch erhöhte Porenraum beschleunigt die Verwitterung durch physikalische Prozesse, besonders Frost-Tau-Wechsel. Dieser Verwitterungsmechanismus könnte die Auflockerung von ca. 50% erklären. (Köhler 1991, S.50)

Der **Sockel** ist durch das Gesimse von Regenwasser weitestgehend geschützt. Feuchtigkeit kann über kapillaren Weg von unten oder als Tropf- bzw. Stauwasser von oben aufgenommen werden. Die Sockelbereiche der Natursteine sind biologisch kaum besiedelt aber weisen trotz optisch ansprechenden Zustandes teilweise Auflockerungskoeffizienten im selben Bereich wie die Spitzen auf. Bei den Marmoren ist die Auflockerung hauptsächlich auf die thermische Beanspruchung zurückzuführen. An den Kalksteinen sind durch die kapillare Wasseraufnahme physikalische als auch chemische Verwitterungsprozesse ausschlaggebend.

6.3 Analyse der Geschwindigkeiten

Nach der Ermittlung von v_{ideell} zur Beurteilung der Gefügauflockerung folgt eine genauere Auseinandersetzung mit den Durchschnittsgeschwindigkeiten der Ultraschallmessungen.

Auf einen ersten Blick korrelieren die Werte mit jenen der ideellen Geschwindigkeit. Mit Zunahme der Gefügauflockerung vergrößert sich die innere Oberfläche durch einen Kornbindungsverlust und entstehende Risse. Die Ultraschallwelle kann nur über Festkörper übertragen werden und muss mit zunehmender Gefügeschädigung längere Wege

gehen. Das äußert sich in den Messwerten durch eine niedrigere Geschwindigkeit. (Auras, Meinhardt, und Snethlage 2011, S.49)

Die Veränderung der Geschwindigkeit über die Jahre ist in Tab. 10 dargestellt. Weil die verschiedenen Variationen der unverwitterten Natursteine unterschiedliche Werte aufweisen, sind die Kennwerte der Ultraschallgeschwindigkeiten als Bandbreiten angegeben.

	Carrara Marmor (km/sek)	Laaser Marmor (km/sek)	St. Margarethener KS (km/sek)	Aflenzer KS (km/sek)	Lindabrunner KG (km/sek)
<i>Kennwerte (unverwittert)</i>	4,0-5,0	5,3-5,7	2,9-3,8	2,2-3,1	4,0-4,7
Spitze					
2003	-	3,56	3,30	-	3,57
2004	4,83	3,67	3,37	2,72	3,49
2017	3,28	3,66	3,42	2,28	3,21
Platte					
2003	-	4,37	2,61	-	2,39
2004	4,16	4,39	2,66	2,60	3,06
2017	2,66	2,77	2,38	1,85	2,49
Sockel					
2003	-	3,82	3,02	-	3,46
2004	4,14	3,68	3,01	2,60	3,17
2017	3,52	3,36	2,49	2,12	2,88

Tab. 10 Mittelwerte der Ultraschallgeschwindigkeiten der Natursteine

Die Geschwindigkeitsmesswerte der Sedimentgesteine der Platten von 2003 und 2004 liegen überwiegend unter jenen aus dem Bereich der Spitzen oder der Sockeln. Geht man davon aus, dass Steine gleicher Variation und gleichen Verwitterungsfortschritts eingebaut wurden, ist diese Tatsache unverständlich. Eine Abhängigkeit von der Einbaurichtung und damit der Kristallausrichtung sollte bei den Sedimentgesteinen keinen Einfluss auf die Geschwindigkeitsmessung nehmen. Eine solche Korrelation konnte bei den Messungen lediglich am Carrara Marmor festgestellt werden.

Auffällig ist auch, dass sich beim Laaser Marmor und beim St. Margarethener Kalksandstein die Geschwindigkeit im Spitzenbereich zu erhöhen scheint. Generell sind die Messwerte aus 2017 in diesem Bereich im Vergleich zum Verwitterungsgrad sehr hoch. Da an der Spitze wegen ihrer Geometrie die Messungen nur über relativ kurze Distanzen erfolgen, lässt das eine Abhängigkeit der Geschwindigkeiten von der Messdistanz vermuten.

6.3.1 Einfluss der Kristallausrichtung

Der Carrara Marmor weist in Spitze und Platte Geschwindigkeitsreduktionen im Bereich von 1,5 km/s auf. Wie bereits in Abb. 18 ersichtlich, treten am Sockel kaum Veränderungen auf. Eine Abhängigkeit der Messergebnisse ergibt sich hier von der Faltung des Marmors. Die Anisotropie des Kalzits erlaubt eine schnellere Übertragung des Schalls in Längsrichtung als in Querrichtung (Fleischer 2002, S.54). Bei näherer Betrachtung der Daten treten diese hohen Geschwindigkeiten nur in den parallelen Richtungen

A-B bzw. C-D auf. Das deutet auf eine gleichgesinnte Ausrichtung der Kalzitkristalle des Marmors in Nord-Süd-Richtung hin (Tab. 11).

<i>Messrichtung</i>	<i>Nord-Süd</i>	<i>Ost-West</i>
Platte	2,91 (km/sek)	2,50 (km/sek)
Sockel	3,72 (km/sek)	3,30 (km/sek)

Tab. 11 US-Geschwindigkeiten des Carrara Marmor in Abhängigkeit der Himmelsrichtungen

An den übrigen Natursteinen sind keine signifikanten bereichsabhängigen Geschwindigkeitsveränderungen festzustellen.

6.3.2 Messdistanzabhängigkeit bei Geschwindigkeitsmessungen

Wie bereits in Kapitel 6.2 hingewiesen, deuten die Ultraschallmessungen von 2017 auf eine Abnahme der Geschwindigkeit mit Zunahme der Messdistanz hin. Diese Feststellung widerspricht Aussagen von Fleischer (2002, S.61), wonach bei Transmissionsmessungen die Geschwindigkeit mit der Messdistanz tendenziell zunimmt. Bei unverwitterten Proben begründet Fleischer diese Distanzabhängigkeit mathematisch mit einem wegunabhängigen Zeitverlust, der sich mit zunehmender Messdistanz schwächer äußert. Faktoren die zu einem Zeitverlust führen können, sind Anpressdruck der Messköpfe, Oberflächenrauigkeit des Gesteins oder sonstige Unregelmäßigkeiten bei der Kopplung (vgl. Kap. 5.1.4). Auch bei verwitterten Proben lässt sich theoretisch eine größere Gefügearauflockerung in den Randbereichen vermuten, was zu einer Abnahme der Geschwindigkeit über kurze Distanzen bedeuten würde.

Bei indirekten, sogenannten Auflegemessungen, sind wegunabhängige Zeitgewinne möglich. Wegen der im Vergleich zur Messdistanz großen Kontaktfläche zwischen Wandler und Steinoberfläche entsteht eine gewisse Unsicherheit bezüglich der genauen Distanz der Schallübertragung (Abb. 12). Ein wegunabhängiger Zeitgewinn bedeutet eine erhöhte Messgeschwindigkeit, die sich über kurze Distanzen deutlicher ausdrückt als über lange Distanzen. Um Unsicherheiten zu minimieren, werden mehrere Messungen über unterschiedliche Distanzen empfohlen. (Fleischer 2002, S.57f)

6.3.2.1 Distanzabhängigkeit bei Sedimentgesteinen

Bei den Sedimentgesteinen belegen die Messungen aber eine deutlich höhere Ultraschallgeschwindigkeit über kurze Distanzen. 2017 wurden an den Steinobjekten mehrere Messungen über 70,7mm, 141,4mm, 212,1mm und 282,8mm durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen außergewöhnlich hohe Geschwindigkeiten über die Messdistanz von 70,7 mm. Sie ist zum Teil doppelt so hoch als bei den übrigen Distanzen (Abb. 34). Lässt man die Messungen über die kurze Distanz außer Acht, lassen die Ergebnisse einen klaren Trend erkennen. Die Geschwindigkeiten bewegen sich konstant in jenem Bereich, den die jeweiligen Natursteine nach 13 Jahren Verwitterung vermuten lassen.

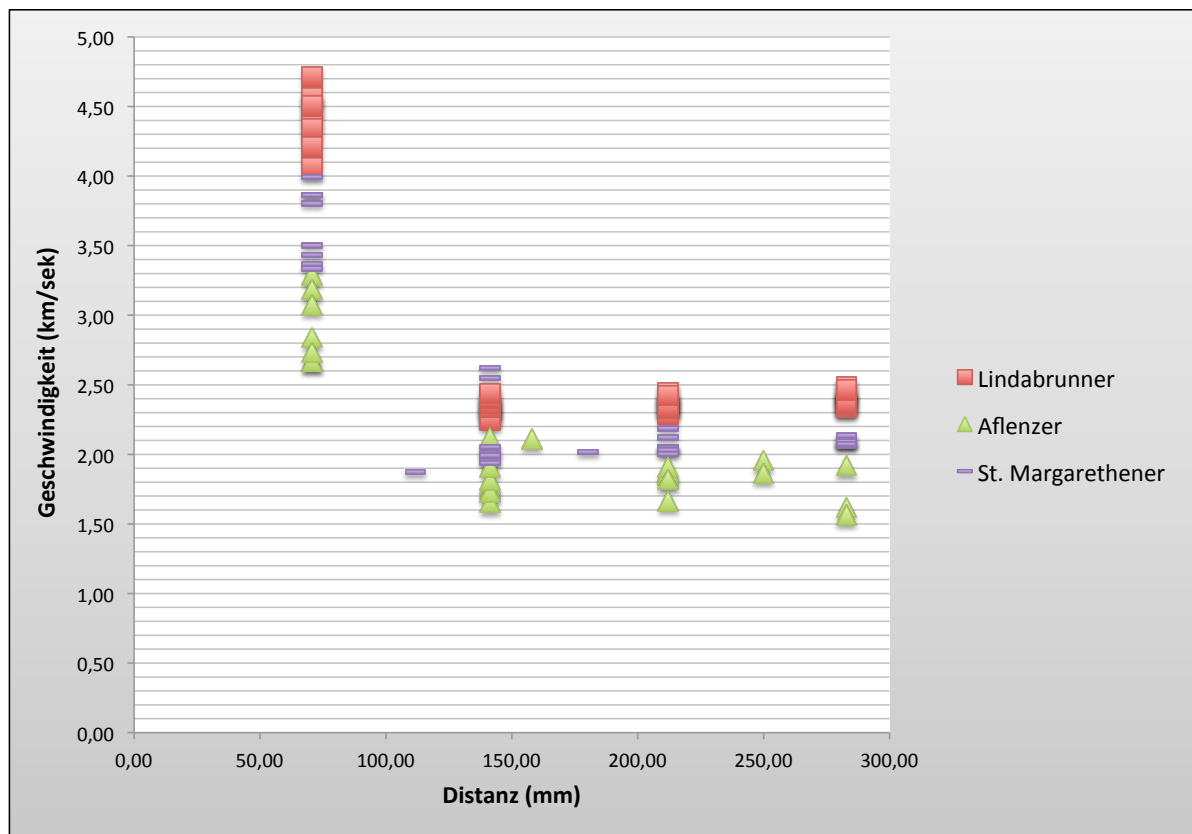


Abb. 34 *Abhängigkeit der Geschwindigkeitsmessungen von der Messdistanz bei Sedimentgesteinen*

In Abb. 34 sind die Ultraschallmesswerte von den Sockeln der Kalksteine abgebildet. Dabei handelt es sich um 45°-Eckmessungen. Laut ÖNORM EN 16682 entspricht das einer halbdirekten Messmethode. Wie bei den indirekten Auflagemessungen sind zwar auch bei den halbdirekten Eckmessungen wegunabhängige Zeitgewinne möglich, aber nicht in dem Ausmaß, wie es sich in Abb. 34 vermuten lässt. Außerdem widerlegen Auflagemessungen vom 11.05.2017 (Abb. 38) große Geschwindigkeitszunahmen durch kopplungsbedingte Zeitgewinne.

Eine Sättigung der Steine im Randbereich, die eine Reduzierung der Impulslaufzeit bedeuten könnte (Rüdrich 2003, S.57f), kann durch die vorhandenen Klimadaten und Feuchtigkeitsmessungen zum Zeitpunkt der Messungen ausgeschlossen werden. Eine mögliche Erklärung wäre die Verdichtung der oberflächlichen Bereiche durch unterschiedliche Prozesse. Derartige Verfestigungen durch eine sekundäre Mineralisation konnten an Aflenzer Kalksandsteinen bereits nachgewiesen werden (Sterflinger und Sert 2005, S.98). Die wahrscheinlichste Ursache ist eine systematische Messabweichung. Sie kann durch unterschiedliche Fehlerquellen im Bereich der Justierung oder dem Messgerät selbst verursacht werden.

6.3.2.2 Distanzabhängigkeit bei Marmoren

Eine klare Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Messdistanz zeigen auch die Werte des Laaser Marmors. Die Geschwindigkeiten ändern sich beim Marmorsockel aber nicht abrupt nach einer gewissen Distanz, sondern folgen eher dem Verlauf einer Kurve. Bereits bei den gemessenen Werten von 2003 war eine Distanzabhängigkeit der Messungen festzustellen (Abb. 35). Ergibt sich dadurch (eventuell unter Verwendung

eines anderen Ultraschallmessgerätes) noch eine schwach ausgeprägte Kurve, zeigen die Messwerte von 2017 einen viel deutlicheren Abfall der Geschwindigkeiten mit Distanzzunahme (Abb. 35). Messungen über 250 mm weisen nur mehr ca. die Hälfte der Geschwindigkeit der Messungen über 70 mm auf.

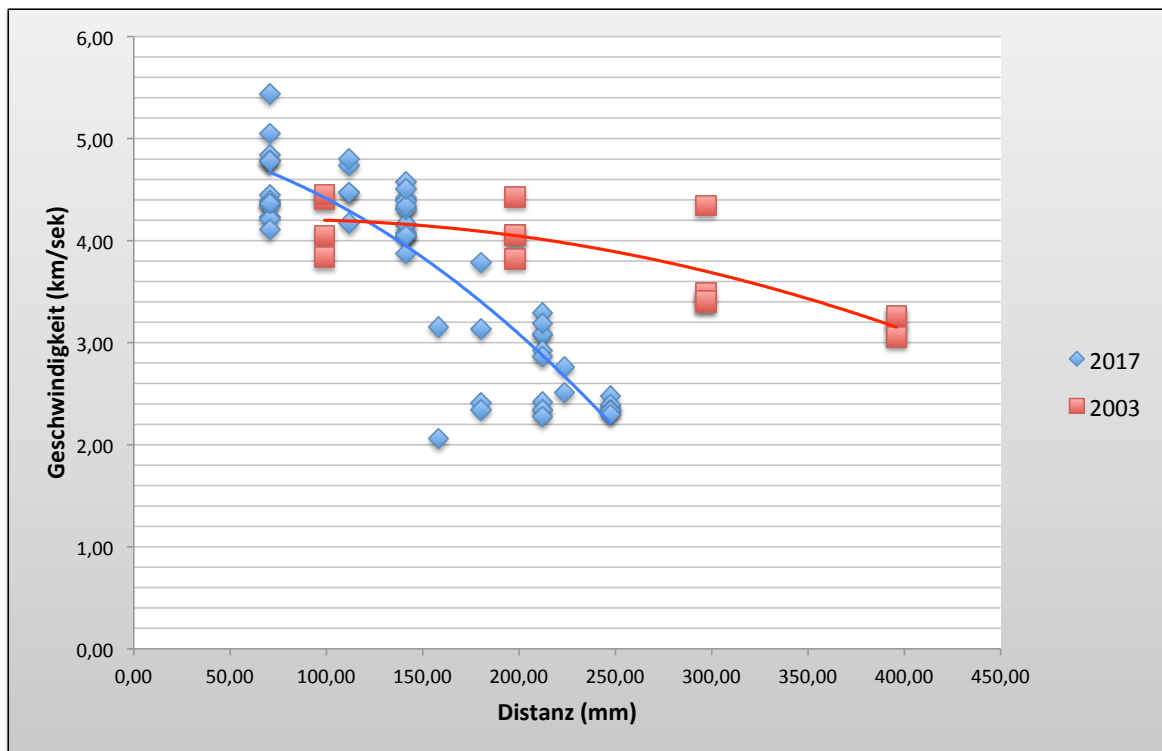


Abb. 35 Messdistanzabhängigkeit der Geschwindigkeit beim Laaser Sockel

Die Platte des Laaser Marmor zeigt wieder die gleiche Tendenz was die Abhängigkeit der Geschwindigkeit betrifft wie die Kalksandsteine und der Konglomerat. Nur die Messungen über 70mm weisen sehr hohe Geschwindigkeiten auf (Abb. 36). Sie sind doppelt so hoch wie jene über 141,4mm bzw. 212,1mm. Eventuell sind auch hier zusätzliche Messungen notwendig um eine bessere Einschätzung der Abhängigkeit anzugeben. Eine Krusten- und Schalenbildung aus Kalk und/oder biologischen Material kann, wie bereits oben erwähnt, zu einer scheinbaren Festigkeits- und einer realen Geschwindigkeitszunahme führen.

Eine andere Erklärung führte Rüdrieh (2003; S.57f) aus. Er stellte fest, dass sich der Grad an wassergesättigten Poren auf die Ultraschalldiagnostik auswirkt. So können Marmore in gesättigten Zustand um 2 km/Sek. höhere Geschwindigkeiten aufweisen.

Allerdings darf davon ausgegangen werden, dass zu den Zeitpunkten der hier angeführten Ultraschallmessungen keine Sättigung der Randbereiche infolge Niederschlags stattgefunden hat.

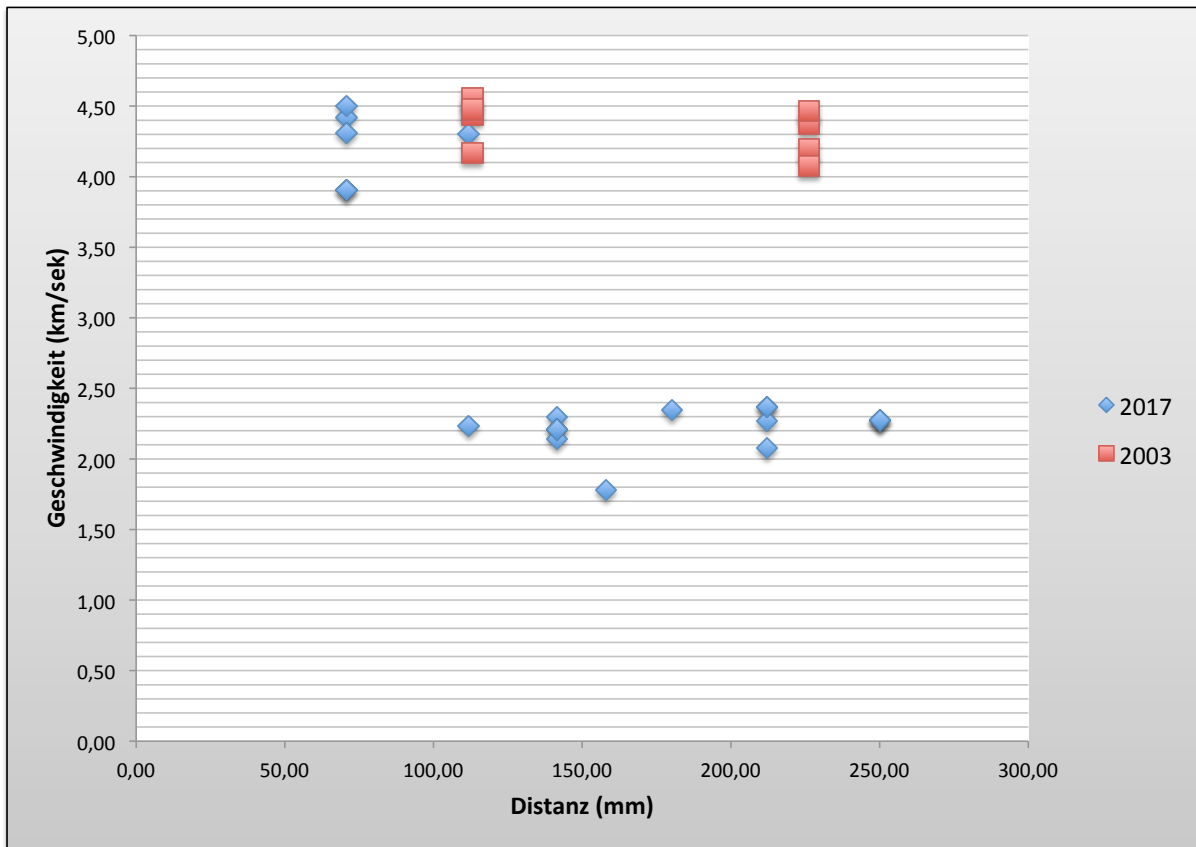


Abb. 36 Messdistanzabhängigkeit der Geschwindigkeit bei der Laaser Platte

Betrachtet man aber Abb. 37, liegt eine andere Erklärung näher. Während bei den Kalksandsteinen bzw. beim Konglomerat die Messwerte über die etwas längeren Distanzen die „wahren“ Geschwindigkeiten des Steins repräsentieren, scheint beim Marmor das Gegenteil der Fall zu sein.

Bis zu einer Distanz von 150 – 180 mm korrelieren die Daten der Messungen aus 2003 und 2017 sehr gut (Abb. 37). Nach dem Anpassen einer Trendlinie an diese Messwerte und anschließendem Auswerten des Auflockerungskoeffizienten lässt sich die ideelle Geschwindigkeit ermitteln. Sie beträgt, unter Nichtberücksichtigung aller Messungen über Distanzen länger als 200 mm, 4,0 km/sek. Die Geschwindigkeiten der relevanten Messungen liegen zwischen 4,0 – 5,0 km/sek, ein Bereich, der für einen Laaser Marmor plausibel erscheint. Zwar würde das auch bedeuten, dass am Laaser Sockel keine Gefügauflockerung festzustellen ist, was aber wiederum die hohe Verwitterungsbeständigkeit der beiden exponierten Marmorvarianten bestätigen würde (vgl. Tab. 9). Der Laaser Marmor gilt als noch verwitterungsbeständiger als der Carrara Marmor.

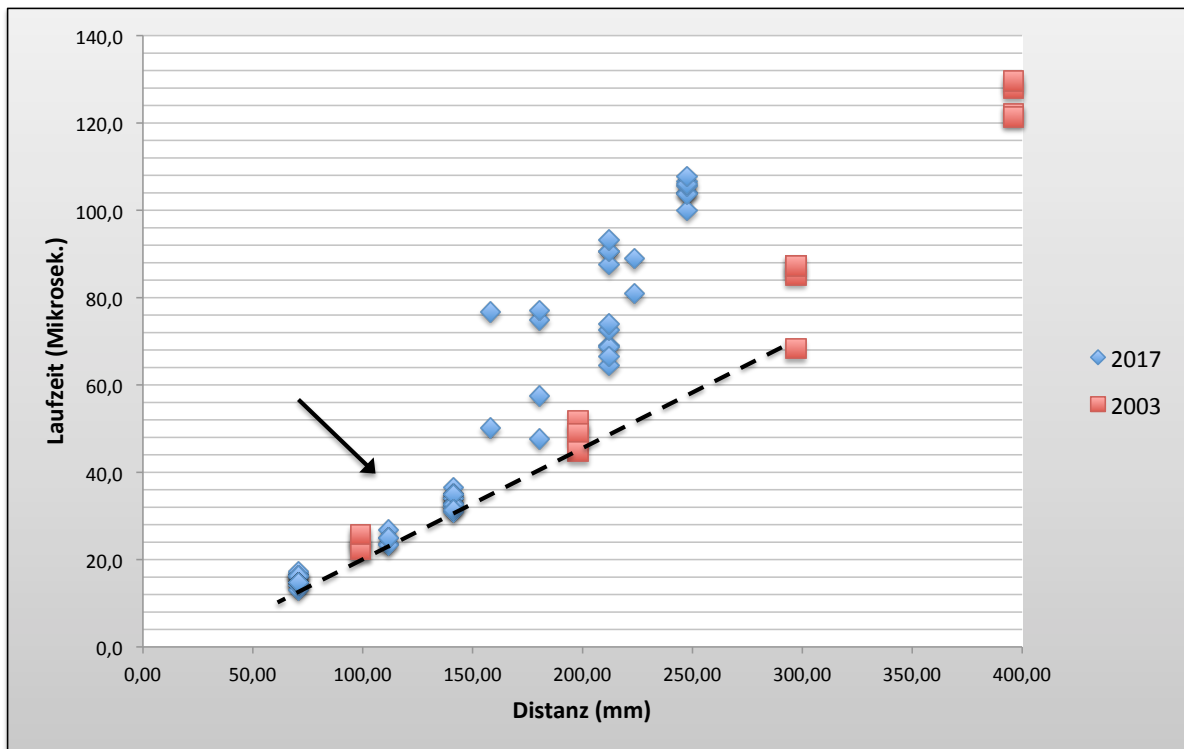


Abb. 37 Distanz-Laufzeit Diagramm – Laaser Sockel

Die Erfahrung, die bei zahlreichen durchgeführten Ultraschallmessungen an den exponierten Natursteinexemplaren gemacht wurde, bestätigt die oben ausgeführte Annahme. Während das Messgerät über die kürzeren Distanzen sofort einen Wert anzeigte, schwankten die Werte über längere Distanzen oft stark. Dieselbe Erfahrung machte ich bei den ersten Transmissionsmessungen bei den Marmoren über 400 mm. Nach der Auswertung dieser ersten Datenreihe habe ich festgestellt, dass die Messdistanzen für das vorhandene Ultraschallmessgerät wahrscheinlich zu groß sind.

Um eine systematische Messabweichung zu verhindern, sollten zuerst Probemessungen durchgeführt werden, um so mögliche Grenzwerte der Messdistanz für das Ultraschallmessgerät zu bestimmen.

6.3.3 Auswirkung der Distanzabhängigkeit auf die ideelle Geschwindigkeit

Wie in Kapitel 6.3.2 gezeigt wird, liefern die Ultraschallmessungen bei Sedimentgesteinen über kurze Distanzen außergewöhnlich hohe Geschwindigkeitsresultate. Marmore zeigen ebenfalls eine klare Distanzabhängigkeit der Messergebnisse. Mit zunehmender Messdistanz fallen die Geschwindigkeiten rapide ab. Die Distanzabhängigkeit der Geschwindigkeiten hat einen beträchtlichen Einfluss auf die Ermittlung des Auflockerungskoeffizienten. Geht man davon aus, dass die auffälligen Messwerte eine Verfälschung des Ergebnisses darstellen, müssten sie demzufolge gefiltert werden. Für die Sedimentgesteine würden sich, durch Nichtberücksichtigung der höheren Geschwindigkeiten über kurze Distanzen, zwar niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeiten, aber höhere ideelle Geschwindigkeiten für 2017 als in Tab. 9 ergeben. Das würde eine geringere verwitterungsbedingte Auflockerung bedeuten. Beim Laaser Marmor würden die Messwerte über größere Distanzen gefiltert werden. Sie weisen überdurchschnittlich hohe Geschwindigkeiten auf. Das Resultat wäre eine beträchtliche Erhöhung der ideel-

len Geschwindigkeit von 2017 in den Bereich der Werte von 2003 bzw. 2004. Das würde bedeuten der Laaser Marmor zeigt im Sockelbereich keine erkennbaren Verwitterungsfortschritte.

6.3.4 Abhängigkeit der Messergebnisse von der Auflegeart der Messköpfe

Im Laufe dieser Diplomarbeit wurden also verschiedene Ultraschallmessmethoden durchgeführt. Neben direkten und sogenannten halb-direkten Transmissionsmessungen liegen auch Ergebnisse von indirekten Auflegemessungen vor. Trotz gleichen Verwitterungsfortschritts, liefern die Messungen sehr unterschiedliche Resultate. (Als Resultate sind in den folgenden Ausführungen die gemittelten Ergebnisse von Geschwindigkeitsmessungen zu verstehen.) Die Geschwindigkeiten der Auflegemessungen stimmen in sich zwar sehr gut überein (Abb. 38), sind im Vergleich zu den (halb-)direkten Messungen und den in der Literatur angegebenen Werten jedoch sehr niedrig (Tab. 12). Geht man davon aus, dass die Steine in einem unverwitterten Zustand eingebaut wurden, bzw. die Verwitterung steinabhängig gleich weit fortgeschritten ist, müssten die Spitze, Platte sowie Sockel die in etwa gleichen Geschwindigkeiten aufweisen. Betrachtet man jedoch die Messwerte aus Tab. 10 (der Laaser Marmor bildet dabei eine Ausnahme), dann erkennt man, dass die Geschwindigkeiten der quasi direkten Spitzenmessungen jene der (halb-)direkten Sockel- und Plattenmessungen deutlich übertreffen. Diese Resultate legen eine Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit von der Messmethode nahe!

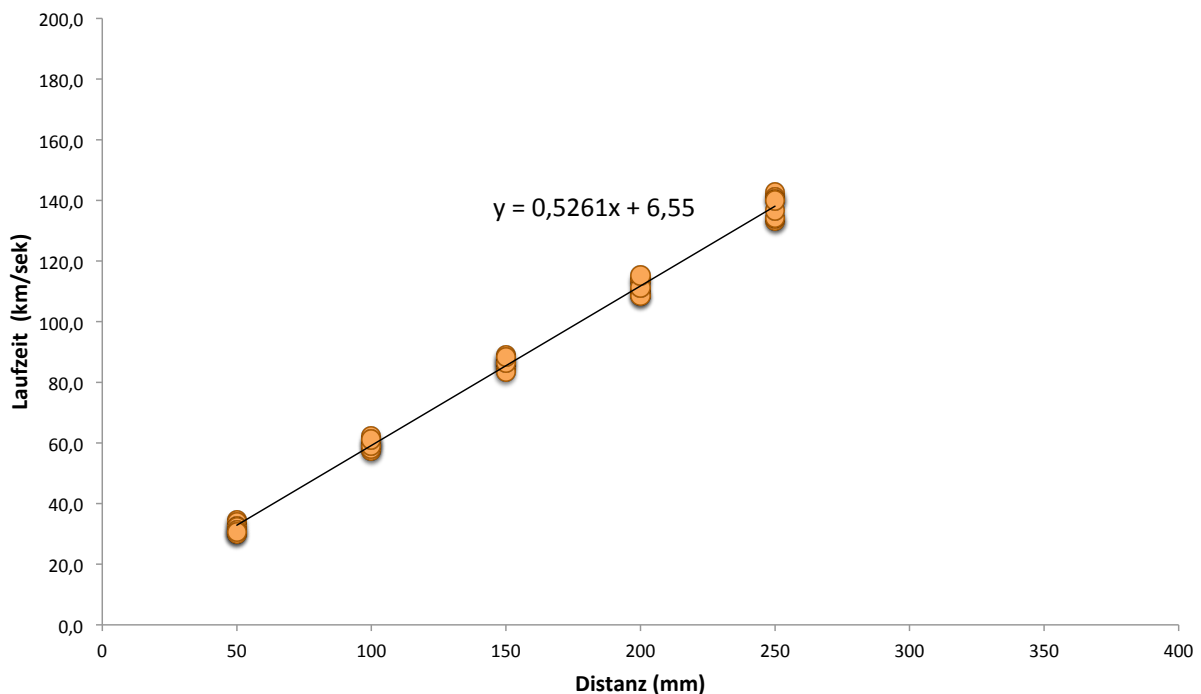


Abb. 38 Auflegemessungen am Sockel des St. Margarethener Kalksandstein

	Carrara		Laaser	
	⊙ v_ideell (km/sek)		⊙ v_ideell (km/sek)	
Sockel	1,74	1,92	2,06	2,16
Platte	1,92	1,90	1,94	2,17

	St. Margrethener		Aflenzer		Lindabrunner	
	⊙ v_ideell (km/sek)		⊙ v_ideell (km/sek)		⊙ v_ideell (km/sek)	
Sockel	1,72	1,90	1,57	1,70	2,23	2,32
Platte	1,69	1,80	1,34	1,49	2,15	2,00

⊙ ... Durchschnittsgeschwindigkeit

Tab. 12 US-Auflegemesswerte vom 11.05.2017

6.3.4.1 Winkelabhängigkeit

Indirekte Messungen tendieren zu niedrigeren Geschwindigkeiten als halbdirekte Messungen. Gleichzeitig tendieren direkte Messungen zu höheren Resultaten als halbdirekte Messungen. Demzufolge könnte die ermittelte Ultraschallgeschwindigkeit vom Winkel, den die Auflagerflächen des Senders und Empfängers einschließen, abhängen. Mit Abnahme des eingeschlossenen Winkels steigen die Geschwindigkeiten an.

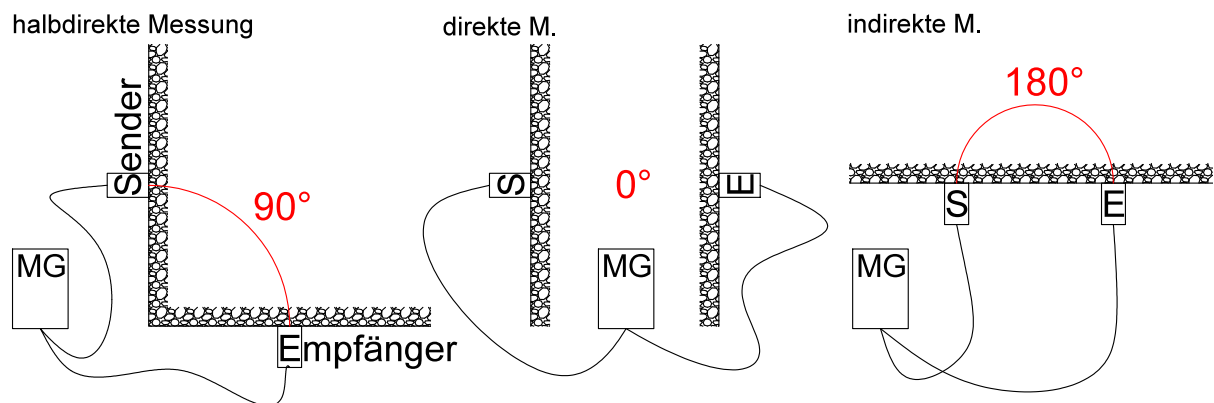


Abb. 39 Winkelmessung zwischen den Messköpfen

Ausgehend von den gemittelten Geschwindigkeiten der Messreihe aus 2017, wird diese Theorie im folgenden Abschnitt genauer untersucht. Platten und Sockel werden dabei getrennt voneinander betrachtet, da diese im Laufe der Zeit aufgrund ihrer Exposition unterschiedliche Verwitterungsfortschritte aufweisen.

Bei Auflegermessungen liegen die Kopplungsflächen von Sender und Empfänger in einer Ebene. Sie schließen also einen Winkel von 180° ein. Neben den Auflegermessungen wurde im Platten- und Sockelbereich hauptsächlich auf Eckmessungen zurückgegriffen. Im Fall dieser halbdirekten Messmethode wird vom Geber und Aufnehmer des Ultraschallmessgerätes ein Winkel von 90° eingeschlossen. Beim Durchschallungsverfahren liegen Sender und Empfänger direkt gegenüber. Sie schließen also keinen Winkel ein (Abb. 39).

Direkte Transmissionsmessungen sind aufgrund der Geometrie (die Quader der Sockel sind für Transmissionsmessungen zu breit) nur am Rand der Gesimse möglich. Um die Datenreihe der Sockel- und Plattenmessungen um einen Winkel zu erweitern, wurden die Ultraschallmessergebnisse der Spitze in B-D-Richtung inkludiert. Die Auflegerflächen des Senders und Empfängers stehen hier in einem Winkel von $28,5^\circ$ gegenüber. Die gemittelten Geschwindigkeiten der Spitzenmessungen aus 2003 bzw. 2004 wurden mit dem Faktor v_{2017}/v_{2003} , ermittelt aus den Durchschnittsgeschwindigkeiten der Sockel- bzw. Plattenmessungen, multipliziert, um sie an dessen Verwitterungsfortschritt anzupassen. Die Platten weisen über die Jahre eine größere Auflockerung als die Sockel der Natursteine auf (Tab. 9), dementsprechend ist der Faktor $v_{2017}^{Platte}/v_{2003}^{Platte}$ tendenziell kleiner als der Faktor $v_{2017}^{Sockel}/v_{2003}^{Sockel}$.

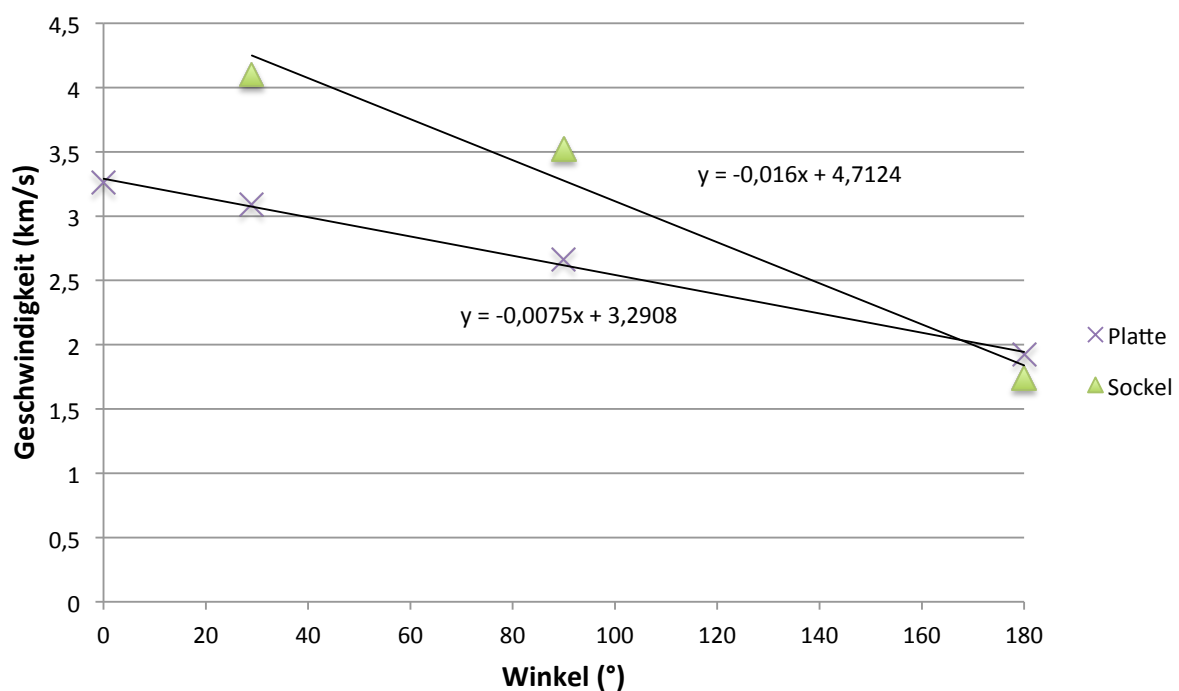


Abb. 40 Winkelabhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit – Carrara Marmor

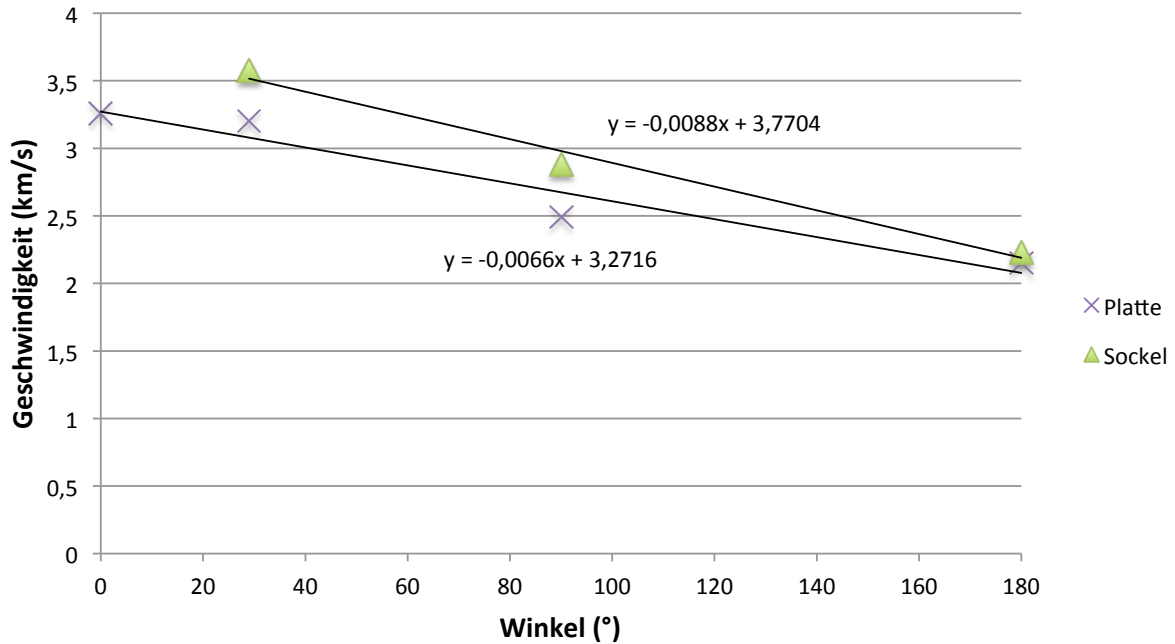


Abb. 41 Winkelabhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit – Lindabrunner Konglomerat

Am deutlichsten ist ein linearer Zusammenhang zwischen Auflegewinkel und Durchschnittsgeschwindigkeit beim Carrara Marmor (Abb. 40) und Lindabrunner Konglomerat (Abb. 41) zu erkennen. Eine gewisse Unschärfe bezüglich der Geschwindigkeitswerte bei 28,5° muss natürlich mitberücksichtigt werden, da sie nur über Faktoren (siehe oben) angenähert sind.

Keine wirklich aussagekräftigen Ergebnisse liefert der Laaser Marmor. Zum einen war an diesem Stein keine direkte Messung möglich, zum anderen sind die Ultraschallgeschwindigkeiten der Platte von 2003 bzw. 2004 so außerordentlich hoch, dass die errechneten Werte für den Winkel von 28,5° keine repräsentativen Ergebnisse lieferten. Zwar zeigen Auflegermessungen auch hier die niedrigsten Geschwindigkeiten, aber ein linearer Zusammenhang ist nicht wirklich zu erkennen.

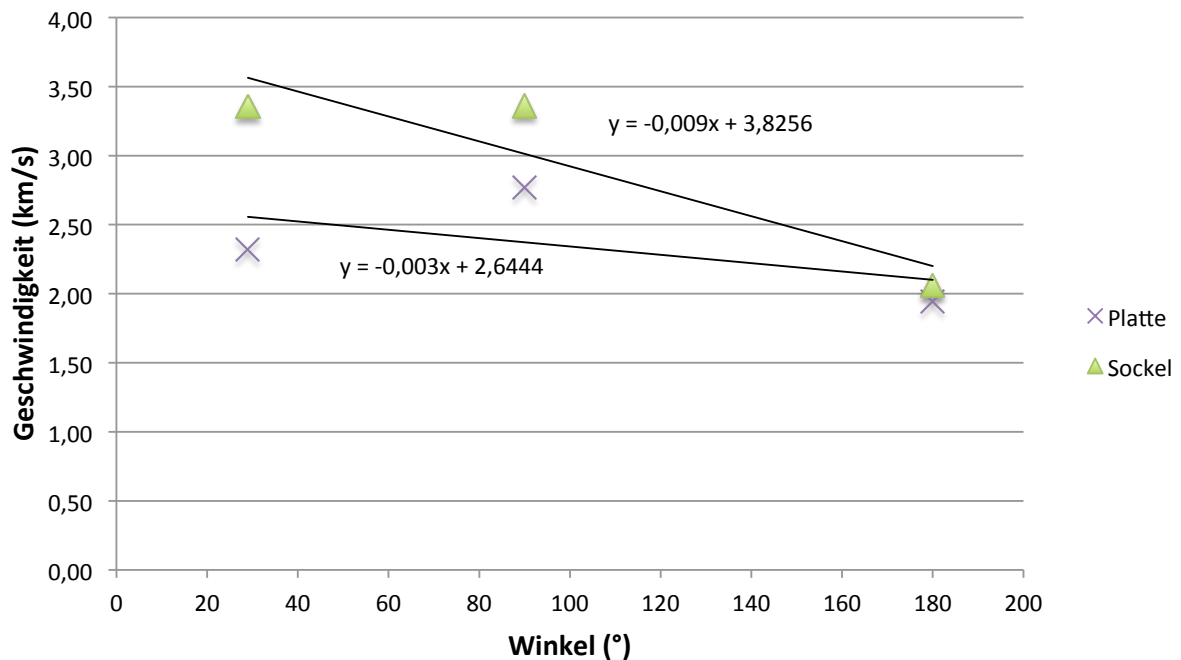


Abb. 42 Winkelabhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit – Laaser Marmor

Dennoch deuten die Resultate darauf hin, dass sich diesbezüglich eine weiterführende Auseinandersetzung mit der Ultraschallmessmethodik des Laufzeitverfahrens anbietet. Um diese These genauer zu untersuchen, müssten Natursteine gleicher Variation und Verwitterungsfortschritts so angefertigt werden, dass mehrere Ultraschallmessungen über unterschiedliche Winkel durchgeführt werden können. Ein Stein in Form eines zylindrischen Oktaeders oder Dodekaeders würde sich diesbezüglich anbieten.

6.3.4.2 Abhängigkeit von der Oberflächenverwitterung

Eine andere Erklärung wäre durch die Abnahme der Gefügeschädigung mit zunehmenden Abstand zur freien Oberfläche gegeben.

Die Oberfläche eines porösen Steins ist die Schwelle für die Aktivierung von Verwitterungsprozessen wie biologischen Aktivitäten, Auslaugung und mechanischen Abriebs. Daraus resultiert eine weitaus aufgelockerter oberflächennahe Schicht gegenüber einem dichten Kern (Abb. 43). Das bedeutet auch, dass die Ultraschallgeschwindigkeit mit zunehmender Tiefe zunimmt. Für die resultierende Dichtefunktion, die das Korngefüge des Natursteins repräsentieren soll, ist ausgehend von der Oberfläche ein degressiver Verlauf wahrscheinlich.

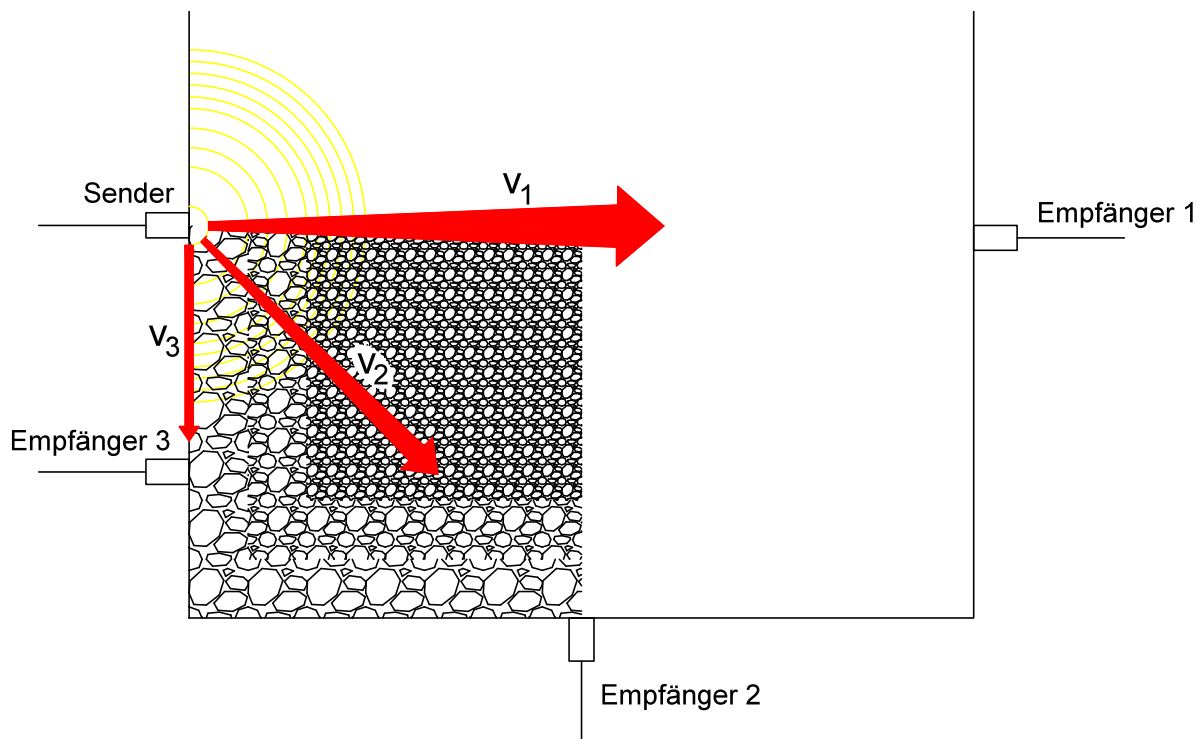


Abb. 43 Schallausbreitung der unterschiedlichen Messmethoden (Grafik: Ortbauer)

Entsprechend dieser These müssten die gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten aus dem Auflegeverfahren, bis auf eine kleine Ungenauigkeit über kurze Distanzen (vgl. Kap. 5.1.4), wegunabhängig sein (Abb. 44).

Das halbdirekte Verfahren würde nicht nur von der Messdistanz, sondern auch vom Winkel zwischen der Oberfläche und der Verbindungslinie zwischen den Messköpfen abhängen (Abb. 43). Je nach Winkel und Dichtefunktion sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten wegen der Durchschallung dichteren Korngefüges höher als beim Auflegeverfahren. Die höchsten Durchschnittsgeschwindigkeiten weisen direkte Transmissionsmessungen vor. Sie nehmen mit der Messdistanz gegenüber den Werten der anderen Verfahren zu (Abb. 44).

Laufzeitdifferenzen, die aufgrund von Messdistanzabhängigkeit entstehen (Fleischer 2002, S.61), sind nicht so ausschlaggebend, als dass sie Geschwindigkeitsunterschiede entsprechend Tab. 10 resultieren würden.

Um eine genauere Aussage treffen zu können, müsste man eine gesonderte Messreihe durchführen. Für das halbdirekte Verfahren sind folgende Geschwindigkeitsergebnisse gegenüberzustellen: Der schallabgebende Messkopf ist an einer Oberfläche zu fixieren, während der schallaufnehmende Messkopf für jede Messung, beginnend am Rand der zweiten Oberfläche, etwas weiter in das Zentrum derselben rückt und so den Winkel zwischen Oberfläche und Verbindungslinie der Messköpfe kontinuierlich verändert. Eine mehrfache Durchführung der Messungen erhöht die Genauigkeit der Ergebnisse. Außerdem sollte zur Feststellung des Korngefüges und dessen Dichte eine invasive Methode zur Plausibilisierung der Ultraschallmessungen in Betracht gezogen werden.

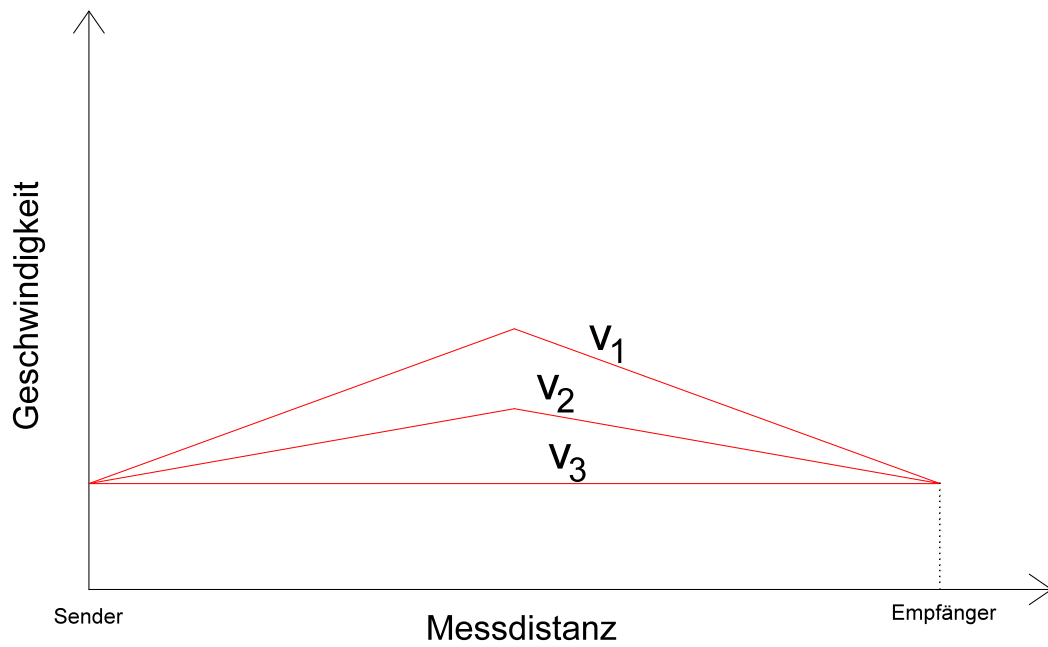


Abb. 44 Geschwindigkeitszu- und -abnahme mit der Messdistanz unter Annahme einer linearen Dichtefunktion (Grafik: Ortbauer)

7 Ergebnisse der Feuchtemessungen

Zur Beurteilung des Feuchtegehalts wird bei In-Situ Untersuchungen in den letzten Jahren vermehrt auf handliche Messgeräte wie „HumidCheck“ zurückgegriffen. Nach dem Prinzip der elektrischen Leitfähigkeit von ionisiertem Wasser (*hängt also auch von den vorhandene, gelösten Mineralien im Stein ab!*), kann man mit solchen Geräten sehr schnell an Feuchtigkeitswerte im Naturstein gelangen (vgl. Kap. 5.2.3).

Man sollte sich aber nicht blind auf diese Werte verlassen, sondern das Gerät an dem zu untersuchenden Stein kalibrieren um die erhobenen Werte sinnvoll in Kontext zu setzen. In diesem Sinne wurden im Zuge dieser Forschungsarbeit neben zahlreichen elektrischen Leitfähigkeitsmessungen Bohrungen an den Natursteinen vorgenommen und gegenübergestellt. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

7.1 Feuchtetransport im Naturstein

Wasser spielt eine dominante Rolle bei der Verwitterung von Natursteinen. Fast jeder Verwitterungsprozess, physikalisch, chemisch oder biologisch, hängt von der Anwesenheit von Wasser ab (vergl. Franzen & Mirwald (2004; S.391ff)). Die Menge an Wasser in einem Baustein, seine tatsächliche Materialfeuchte (MC), ist eine Funktion von mehreren Parametern. Sie können in Eigenschaften eingeteilt werden, die dem Material innewohnen, und jene, die sich auf äußere Bedingungen beziehen. Unter den intrinsischen Materialeigenschaften spielen die Porencharakteristika eine wesentliche Rolle, wobei Porenvolumen, Porengrößenverteilung, Porengeometrie und Hohlraumkonnektivität die wesentlichen Parameter sind (vgl. Kap. 4.1.3). Einen Schlüsselparameter nimmt zudem die spezifische innere Oberfläche ein. Sie stellt die Grenzfläche für jeden Prozess zwischen der Atmosphäre und dem festen Material dar.

Hauptquellen zur Wasseraufnahme sind:

- kapillar-aufsteigendes Wasser vom Untergrund,
- Niederschlag,
- windgetriebenes Wasser
- Ablaufwasser

Offene Systeme, wie es exponierte Natursteine darstellen, sind durch die schwankenden Luftbedingungen der Umgebung mehr oder weniger ständigen Sorptions- und Desorptionsphasen unterworfen. Die relative Luftfeuchtigkeit gibt, abhängig von der Temperatur an, zu welchem Grad die Luft mit Wasser gesättigt ist und kann als Puffer betrachtet werden, der den Feuchtetransport zwischen Atmosphäre und Baustoff bestimmt. Erster Schritt der Wasseraufnahme ist die Benetzung der Oberfläche mit Wassermolekülen, die durch Diffusion in den Stein transportiert werden. Mit zunehmender Filmdicke tritt die Oberflächenströmung als sekundärer und effizienterer Transportmechanismus auf. Darüber hinaus kommt es ab einem bestimmten Wassergehalt in den kleinen Poren zur Sättigung durch Kapillarkondensation, die bis zu 10^{-7} m Porenradius wirksam ist. Bei einer Erhöhung des Wassergehaltes im System beginnen Kapillarkräfte, die in Porenradien zwischen etwa 10^{-7} bis 10^{-3} m aktiv sind, den internen Fluss zu regeln. Schließlich, wenn das Material vollständig mit Wasser gefüllt ist, tritt ein Sättigungsfluss ein (Abb. 45).

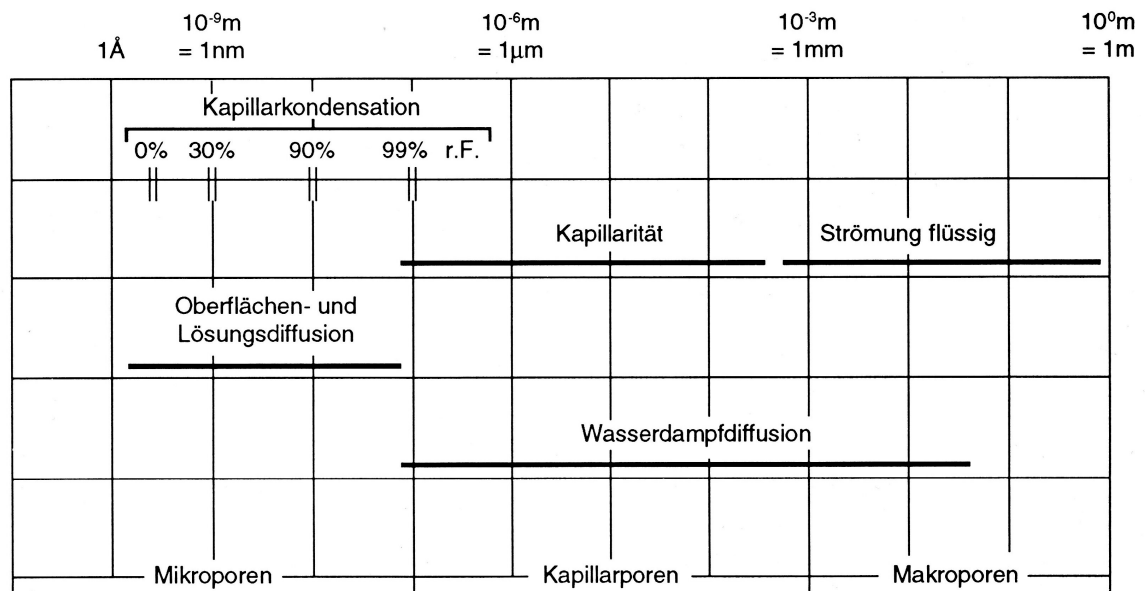


Abb. 45 Feuchtetransportmechanismen im Naturstein (Poschlod 1991, S.21)

Ähnlich, aber in umgekehrter Reihenfolge verlaufen die Prozesse, wenn ein wassergesättigtes Material der Trocknung unterworfen wird. Die Entfernung von Wasser stoppt, wenn die Desorption aus dem Material und die Adsorption durch die Luftfeuchtigkeit ein Gleichgewicht erreichen.

Die Bindung von Haftwasser in festen Stoffen kommt in diesen Formen vor (Kupfer 1997, S.7):

- **Adsorptionswasser**
Anlagerung von Wassermolekülen an der Kornoberfläche aufgrund ihrer bipolaren Eigenschaft. Mit zunehmenden anhaftenden Wasserfilmen nimmt die Bindungsenergie für Adsorptionswasser ab. Sie werden zunehmend von Adhäsionswasserfilmen abgelöst.
- **Kapillarwasser**
Die Sorptionsfähigkeit und Wasserbindungsfähigkeit von Kapillarwasser sind von der Kornstruktur und Porenverteilung abhängig. Von kapillarporösen Stoffen wird gesprochen, wenn Wasser entgegen der Schwerkraft gehalten werden kann. Die Wasseraufnahme des „freien Wassers“ kann sorptiv durch die Luft oder durch direkte Benetzung geschehen.

7.2 Dokumentation absoluter und relativer Feuchtemesswerte

An der Oberfläche „A“ wurden am 18. Mai 2017, nach einer etwas trockeneren Periode, erste Messungen durchgeführt. An festgelegten Bohrpunkten (Abb. 47) und deren unmittelbaren Umgebung wurden zuerst mit „HumidCheck“ Leitfähigkeitswerte ermittelt. Im Anschluss wurden an denselben Stellen 15 cm tiefe Bohrungen zur Gewinnung von Mehlproben vorgenommen, wobei diese für alle 5 cm separat verpackt wurden, um eine tiefenabhängige Beurteilung des Feuchtegehalts vornehmen zu können. Unmittelbar nach der Gewinnung jeder Probe wurde sie luftdicht verschweißt aufbewahrt, bis sie

im Trockenschrank bei 105° bis zur Massenkonstanz getrocknet wurde. Diese Art der Feuchteermittlung wird auch Trockenschrankverfahren oder DARR-Methode genannt. Mit ihr lässt sich der Feuchtegehalt eines Natursteins sehr genau bestimmen. Der gleiche Prozess wurde auch nach einer etwas regnerischen Wetterperiode (20. September 2017) durchgeführt (Abb. 46). Die Ergebnisse der beiden Verfahren sowie Messungen werden im Anschluss verglichen und es wird versucht Schlussfolgerungen zur Plausibilität der Leitfähigkeitsmessungen zu ziehen und das Wasseraufnahmeverhalten der unterschiedlichen Lithotypen zu interpretieren.

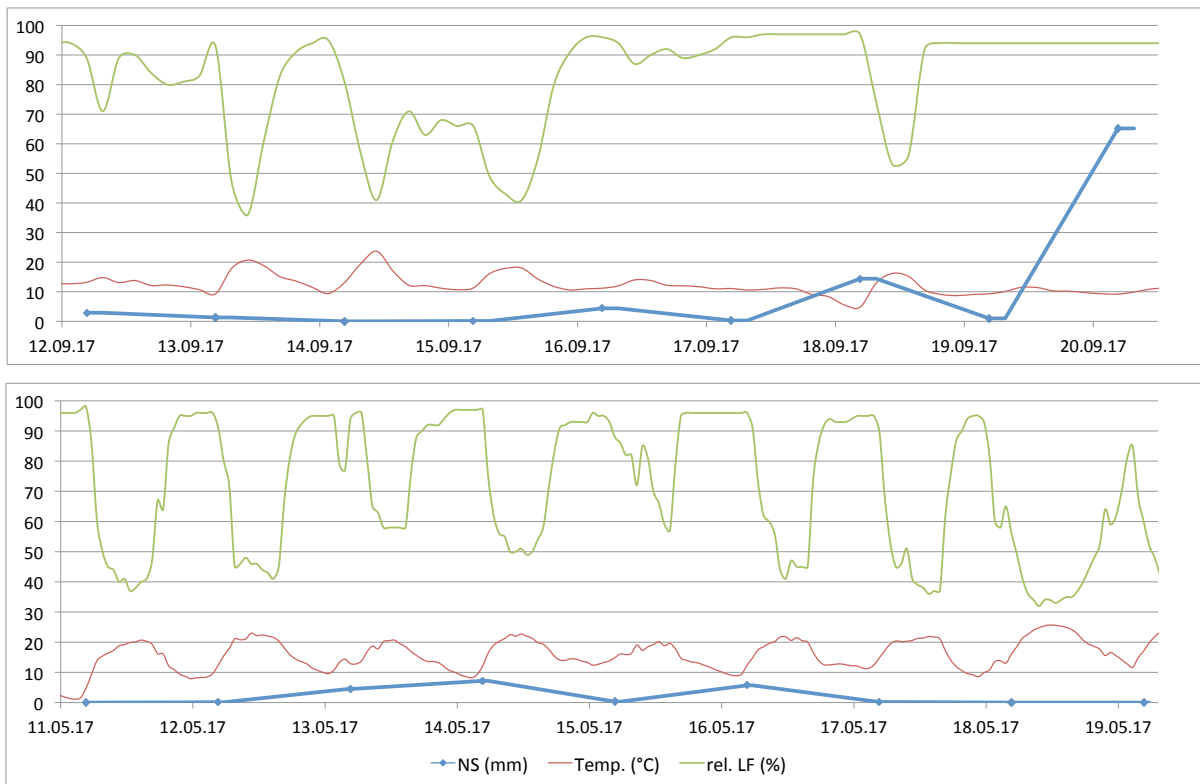
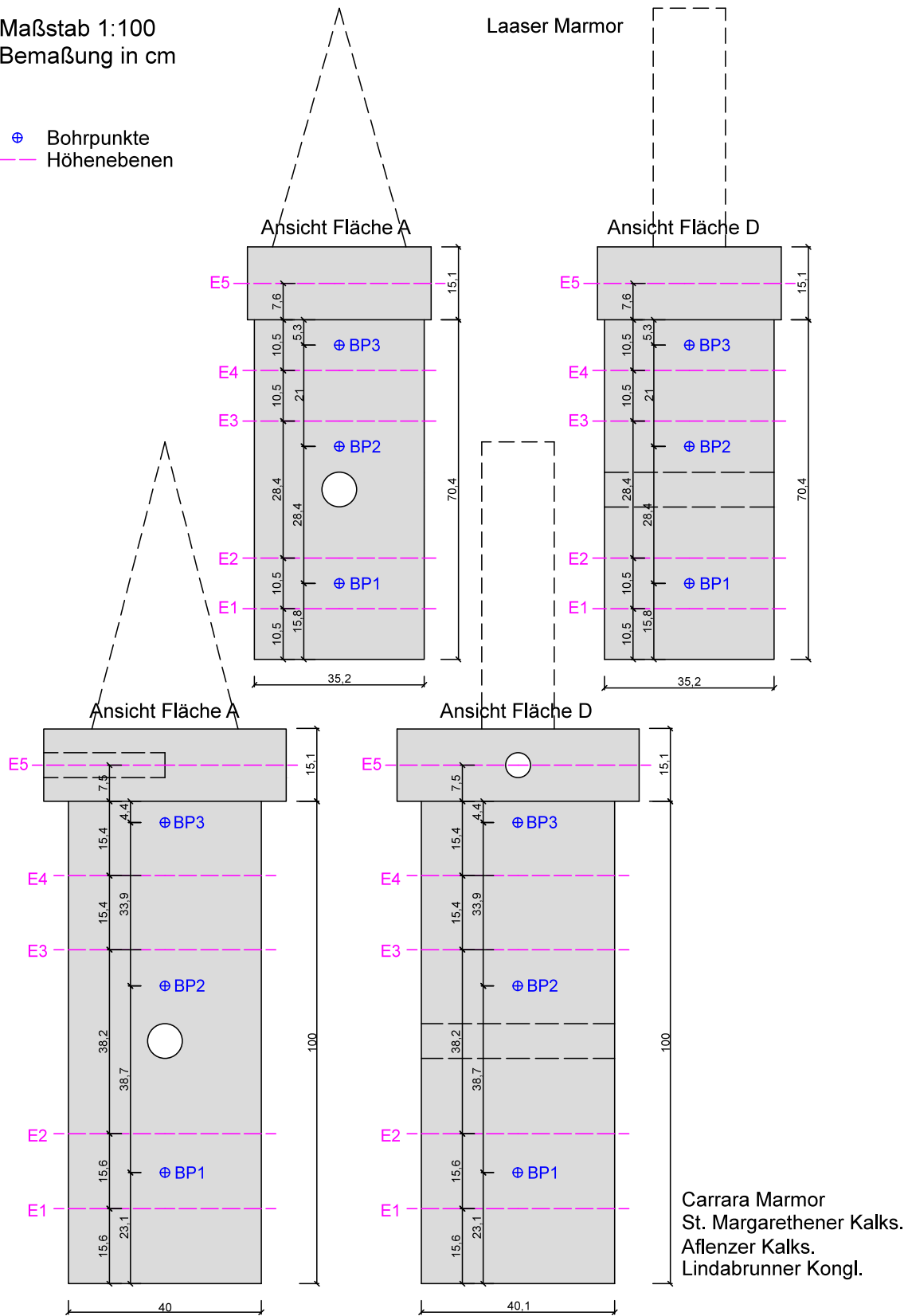


Abb. 46 Klimatische Bedingungen (Niederschlag, Temperatur, relative Luftfeuchte) in der Woche vor den Feuchtigkeitsmessungen. Oben: Klimadaten des Regenereignisses; Unten: Klimadaten der Trockenperiode

Maßstab 1:100
Bemaßung in cm

⊕ Bohrpunkte
- - - Höhenebenen

Laaser Marmor



Carrara Marmor
St. Margarether Kalks.
Aflenzer Kalks.
Lindabrunner Kongl.

Abb. 47 Bohrplan für die Darr-Methode (Grafik: Ortbauer)

7.2.1 Carrara Marmor

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Veränderung der Feuchtemesswerte nach einem Regenereignis gegenüber einer Trockenperiode:

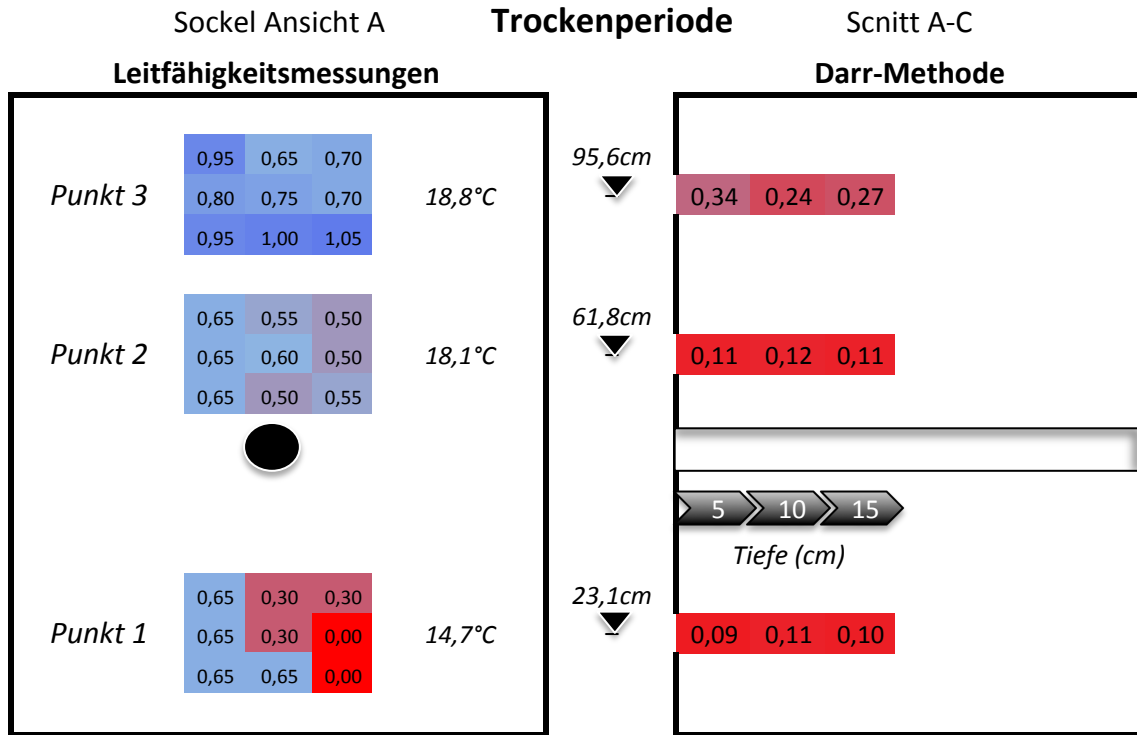


Abb. 48 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Carrara Sockel nach einer trockeneren Periode

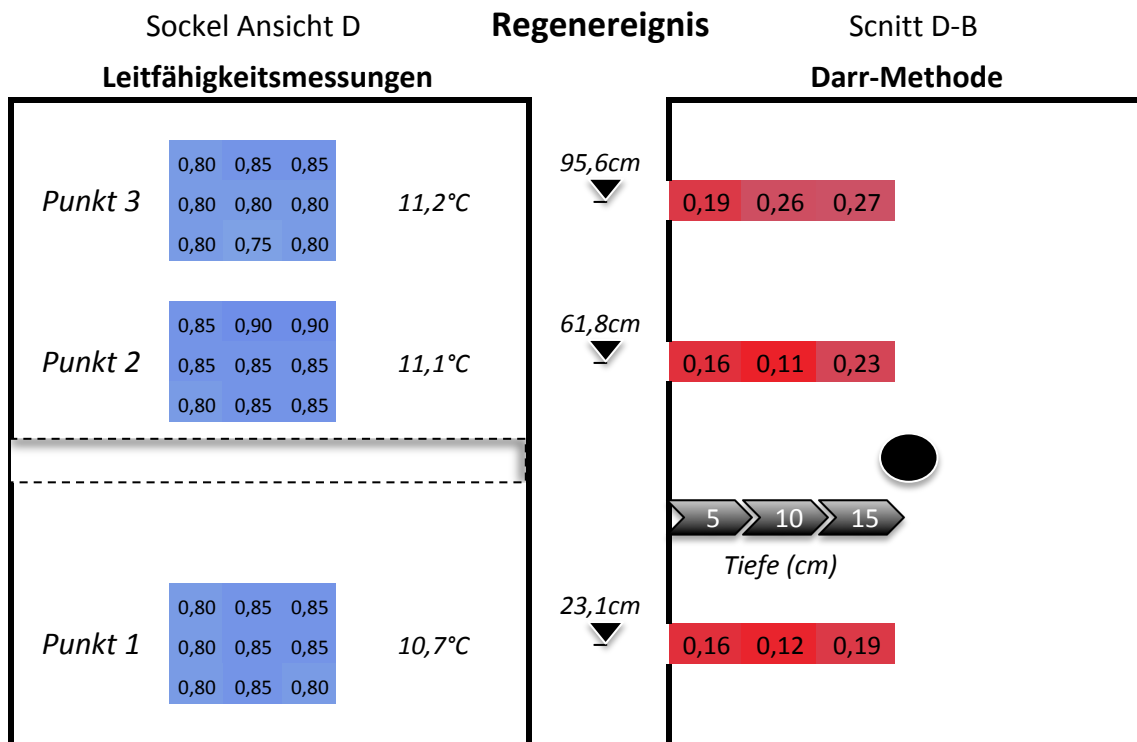


Abb. 49 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Carrara Sockel nach einem Regenereignis

Auf den ersten Blick lässt sich erkennen, dass die EL-Messwerte deutlich über jenen der gravimetrischen Feuchtemessung liegen (Abb. 48). Da sie nach einer eher trockeneren Wetterperiode durchgeführt wurden und die maximale Wasseraufnahme von Carrara Marmor normalerweise im Bereich von etwa 0,3 M% liegt, kommt eine gewisse Skepsis gegenüber den EL-Ergebnissen auf. In Anbetracht dessen, erscheinen aber auch die absoluten Feuchtemesswerte im oberen Bereich des Sockels (Abb. 48, Punkt 3) sehr hoch. Sie deuten auf eine hohe Aufnahme von Stauwasser unmittelbar unter dem Gesimse hin. Über die Tiefe bleibt die Feuchtigkeit für Marmore konstant hoch (Abb. 48). Bei feinporigen Natursteinen erschweren die kleinen Poren und Kapillaren den Transport von Wasser und verzögern den Trocknungsprozess. (Poschlod 1990, S.33)

Der Feuchtegehalt nimmt deutlich mit der Sockelhöhe zu (Abb. 50). Das bestätigen sowohl absolute als auch relative Messwerte. Die absoluten Messwerte müssten aber mit dem Faktor 4 multipliziert werden um jenen der EL-Messungen zu entsprechen. Selbst nach Abb. 50 ist eine Kalibrierung der Messwerte von HumidCheck an den Gesteinskörpern mittels Faktorisierung ohne eine gewissen Unschärfe (v.a. Punkt 2) nicht möglich. Beachtet man zudem die große Streuung der EL-Werte in einem relativ kleinen Bereich von ca. 100 cm² (Abb. 48), fällt es schwer einen plausiblen Zusammenhang zwischen den beiden Methoden zu erkennen.

Die in Abb. 50 dargestellten EL-Messwerte vom 18.05 sind Mittelwerte der in Abb. 48 angeführten EL-Messwerte der Punkte 1, 2 und 3. Sie entsprechen zwar dem Trend der absoluten Feuchtemessung, können aber dennoch nur einen Hinweis darauf geben, ob in einem Bereich im Vergleich zu einem anderen mehr oder weniger Feuchtigkeit vorherrscht. Die EL-Messungen vom 30.03 und 11.05 liegen im selben Bereich wie jene vom 18.05. Das schließt Messfehler aus und lässt eine gewisse Konsistenz der Leitfähigkeitsmessungen erkennen.

Die zweitägige Regenperiode hinterlässt Spuren in Form erhöhter Feuchtemesswerte (Abb. 49). Eine MC-Zunahme ist sowohl bei den absoluten als auch bei den relativen Daten zu erkennen. Die Diskrepanz der Ergebnisse der beiden Methoden ist nach wie vor vorhanden. Es zeigt sich außerdem eine gewisse Homogenisierung der EL-Messwerte im Nahbereich der Bohrpunkte. Zum Zeitpunkt der Messung (20.09.) war die gesamte Sockeloberfläche durch den Schlagregen mit einem Wasserfilm bedeckt. Das konnte man optisch und haptisch feststellen.

Die absoluten Messwerte zeigen demgegenüber nur eine sehr leichte Erhöhung des Feuchtegehalts. Hier fällt der Gehalt des Wasserfilms nicht so schwer ins Gewicht, da die Probe über die ersten 5 cm homogenisiert wird. Der darunter liegende Bereich (5-10cm) lässt gegenüber der Trockenperiode kaum eine Feuchteveränderung erkennen. Der MC nimmt erst mit zunehmender Tiefe (10-15cm) wieder zu (Abb. 51).

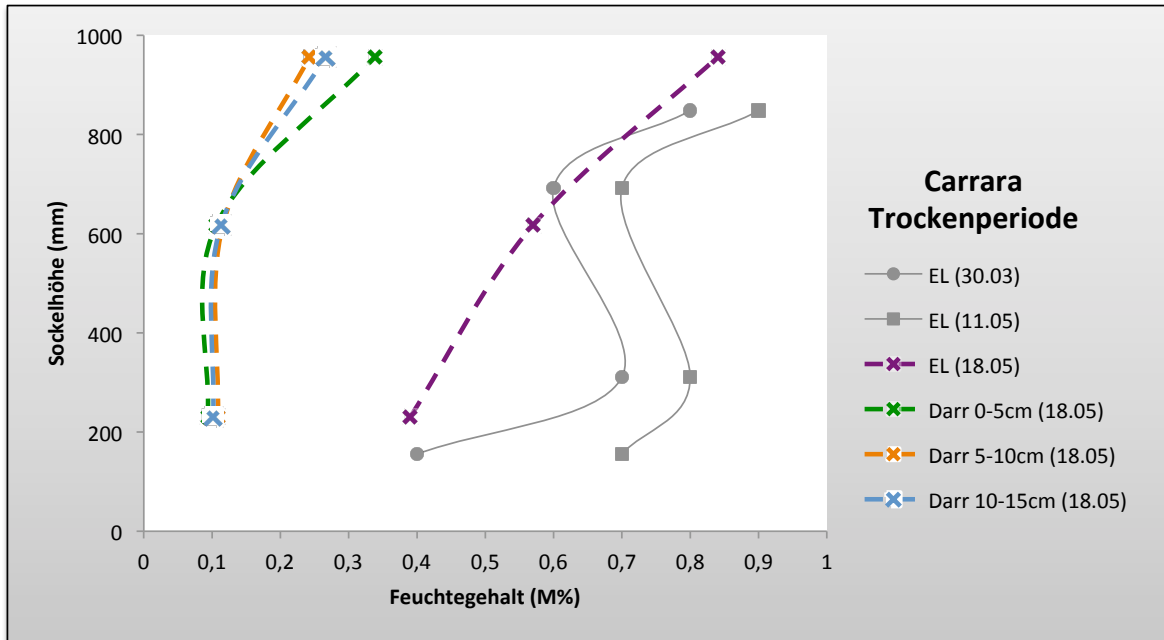


Abb. 50 MC (M%) Carrara Marmor in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach Trockenperiode

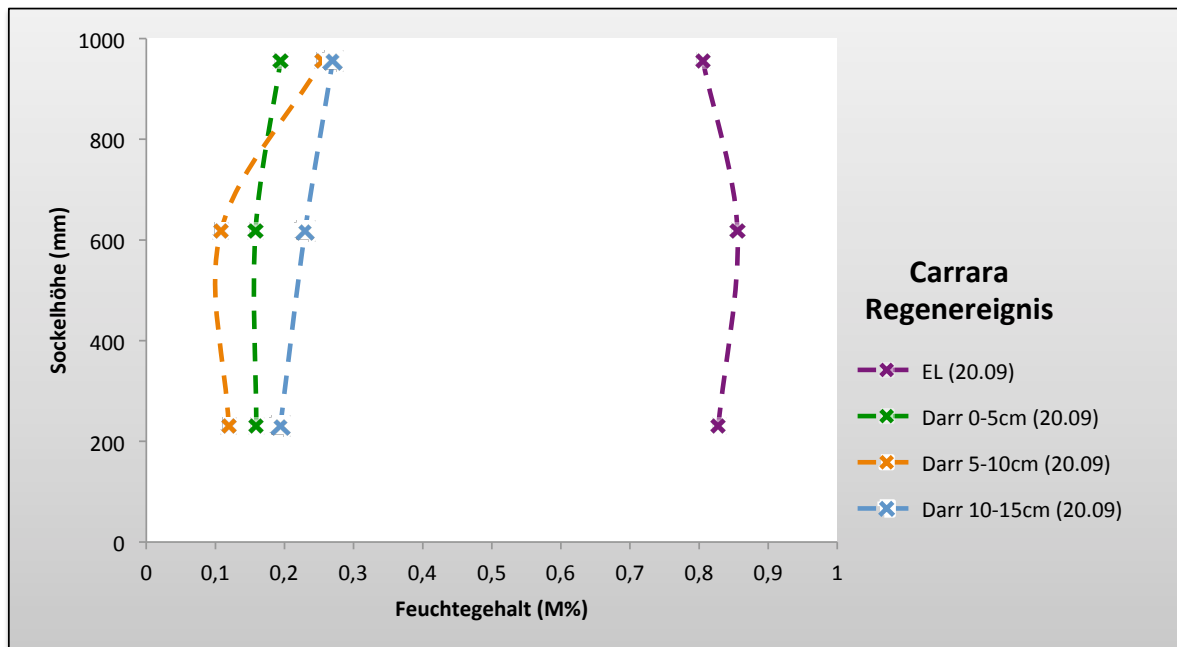


Abb. 51 MC (M%) Carrara Marmor in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach einem Regenereignis

Korrelation der Feuchtwerte zur Oberflächentemperatur können im Sockelbereich keine festgestellt werden (Abb. 48). Lediglich im Plattenbereich sind erhöhte Temperaturen festgestellt worden (bis 22°C im vgl. zu 17°C). Laut HumidCheck herrscht in diesen Bereichen auch keine Feuchtigkeit vor (Tab. 13). Die Seiten A und D gelten als vom Wetter geschützte Seiten. Eine Korrelation diesbezüglich lässt sich nicht feststellen.

EL-Messreihe 11.05.2017		
<i>Seite</i>	a(c)	b(d)
Ebene 1	0,70	0,70
	0,60	0,30
Ebene 2	0,80	0,60
	0,50	0,60
Ebene 3	0,70	0,60
	0,50	0,70
Ebene 4	0,90	0,70
	0,60	0,60
Ebene 5	0,00	0,50
	0,00	0,00

Oberflächentemperatur(°C)		
Sockel	16,8	17,4
	18,7	17,0
Platte	21,0	24,5
	24,5	22,2

Tab. 13 Temperaturabhängigkeit der EL-Messwerte
(Carrara Marmor)

7.2.2 Laaser Marmor

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Veränderung der Feuchtemesswerte nach einem Regenereignis gegenüber einer Trockenperiode:

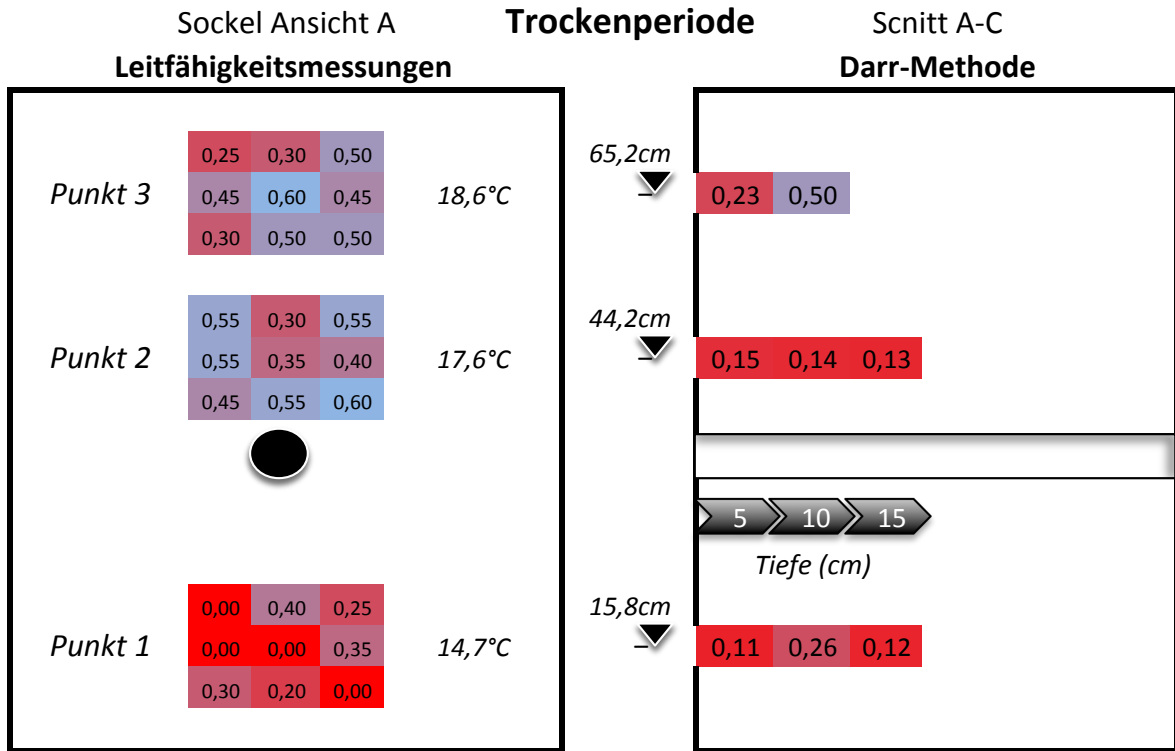


Abb. 52 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Laaser Sockel nach einer Trockenperiode

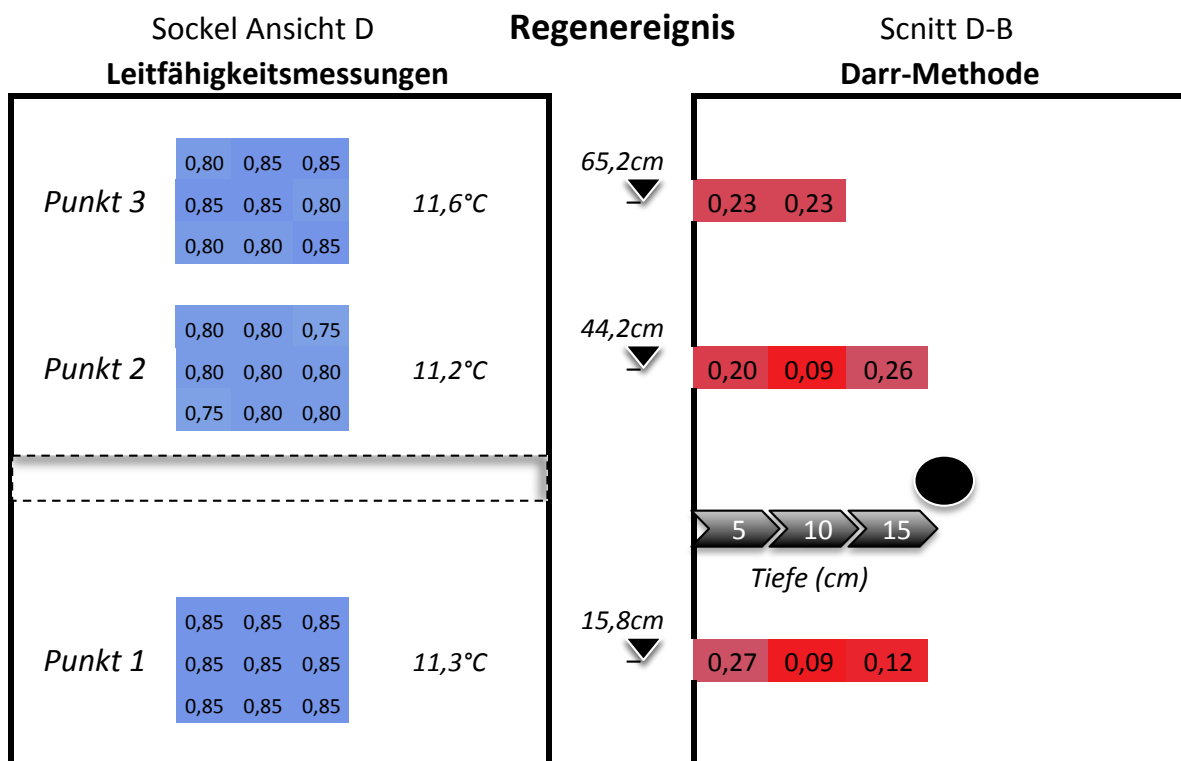


Abb. 53 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Laaser Sockel nach einem Regenereignis

Wie der Carrara Marmor nimmt der Laaser Marmor nur wenig Feuchtigkeit auf. Nach einer kurzen Trockenperiode mit durchschnittlichen Temperaturen (vgl. Abb. 46) hat der Bereich der äußeren 5 cm bereits die meiste Feuchtigkeit wieder abgegeben. Im Tiefenbereich von 5-10 cm herrscht noch etwas mehr Feuchtigkeit vor. Vor allem Punkt 3 weist einen überraschend hohen Wert auf (Abb. 52). Dies kann auf den langsamen Trocknungsprozess im Marmor zurückgeführt werden und verstärkt den Verdacht hoher Stauwasseraufnahme im obersten Sockelbereich. Im Tiefenbereich 10-15 cm ist kaum Feuchtigkeit vorhanden. Hier finden Feuchte- bzw. Trocknungsprozesse kaum oder nur mit starker Verzögerung statt.

Wie für den Carrara Marmor gilt auch beim Laaser Marmor, dass die mittels Humid-Check ermittelten Feuchtwerte unrealistisch hoch sind (Abb. 54). Sie können jedoch nicht, wie beim Carrara Marmor, faktorisiert werden, um sie an die absoluten Messwerte anzugleichen. Lediglich eine Zunahme der Feuchtigkeit mit steigender Sockelhöhe lassen beide Methoden erkennen. Das bestätigen auch die EL-Messungen von 30.03 und 11.05, wobei dieses Mal die Werte etwas mehr streuen. Messungenauigkeiten von 0,05% sind laut HumidCheck aber zu berücksichtigen.

Quasi identisch mit den Ergebnissen des Carrara Marmors sind die Ergebnisse der EL-Messungen nach dem Regenereignis (Abb. 53). Das verstärkt den Verdacht, dass der Wasserfilm an den Marmoren zur Homogenisierung der relativen Daten führt!

Die absoluten Feuchtemesswerte zeigen einen ähnlichen tiefenabhängigen Verlauf wie beim Carrara Marmor (Abb. 55). Erstaunlicherweise ist der Feuchtegehalt des Laaser Marmor etwas höher. Das widerspricht den in der Literatur gefundenen Erkenntnissen (vgl. Kap. 4.1.3) und könnte auf eine stärkere Verwitterung gegenüber dem Carrara Marmor hindeuten.

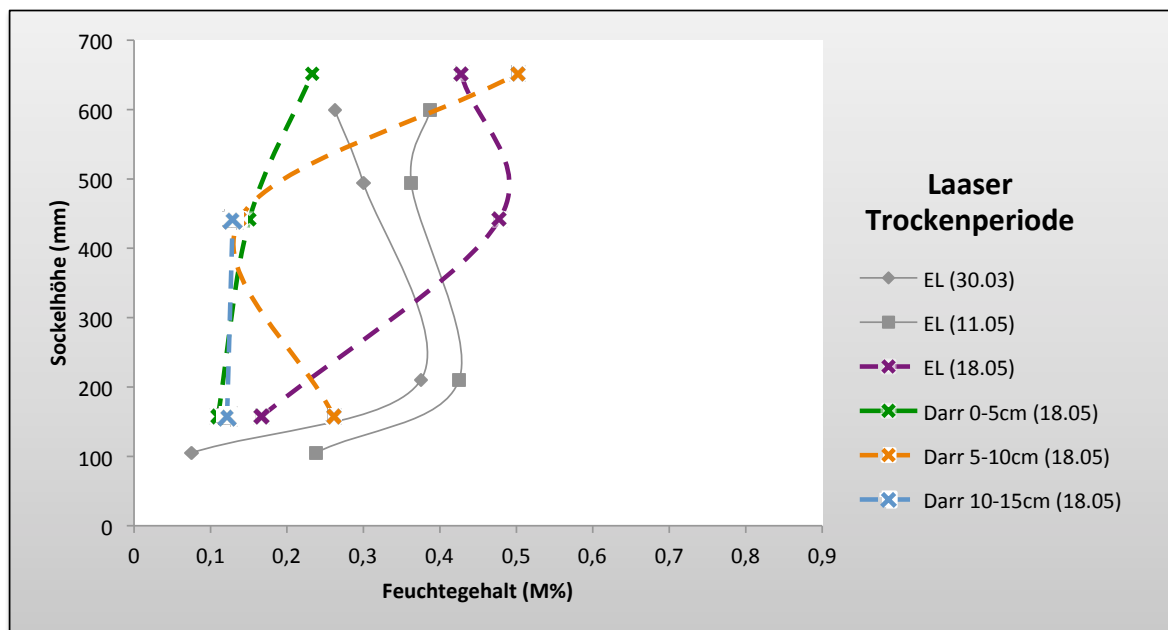


Abb. 54 MC (M%) Laaser Marmor in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach einer Trockenperiode

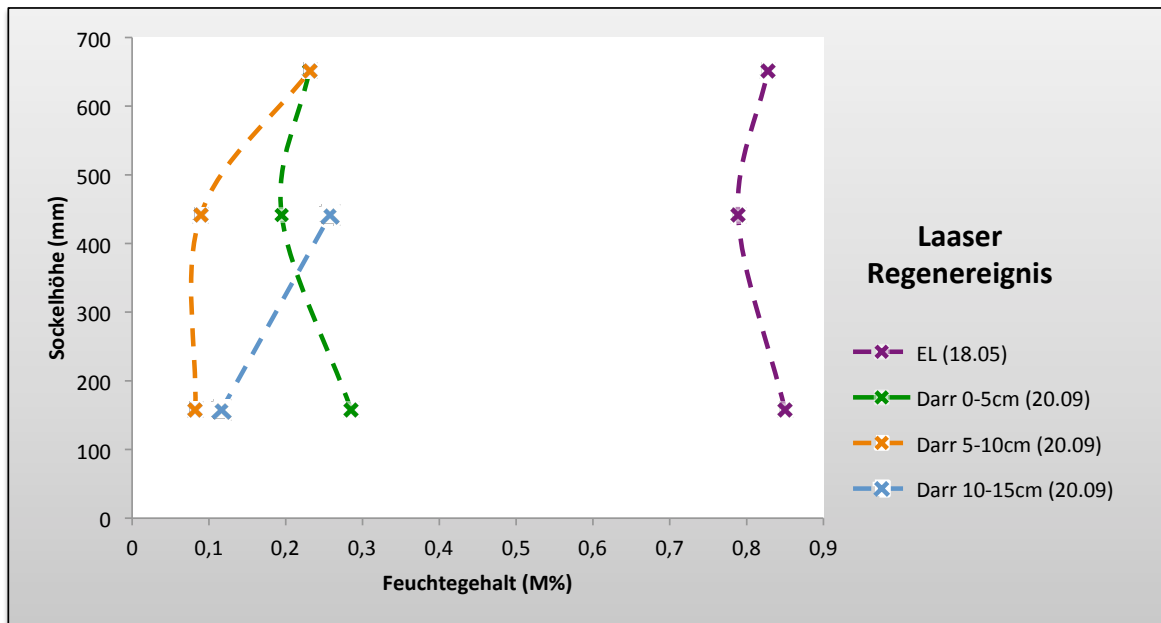


Abb. 55 MC (M%) Laaser Marmor in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach einem Regenereignis

Korrelationen der Feuchtwerte zur Oberflächentemperatur können im Sockelbereich nicht festgestellt werden (Abb. 52). Lediglich im Plattenbereich sind erhöhte Temperaturen gemessen worden (22° im vgl. zu 17°). Laut HumidCheck herrscht in diesen Bereichen auch keine Feuchtigkeit vor. Die Seiten A und D gelten als vom Wetter geschützte Seiten. Eine Korrelation diesbezüglich lässt sich auf Seite A nicht feststellen. Seite D liefert zu keinem Messzeitpunkt Feuchtigkeitswerte. Wichtig ist hier auch anzuführen, dass die obere Hälfte der Oberfläche auf Seiten B und D bereits zu einem früheren Zeitpunkt mit hydrophobierenden Maßnahmen modifiziert wurden (vgl. Tab. 14). Eine Bohrmehlentnahme und Untersuchung dieses Bereichs nach einer Feuchtperiode lassen keine diesbezüglichen Veränderungen erkennen (vgl. Abb. 53).

EL-Messreihe 11.05.2017		
Seite	a(c)	b(d)
Ebene 1	0,20	0,20
	0,55	0,00
Ebene 2	0,55	0,60
	0,55	0,00
Ebene 3	0,60	0,00
	0,65	0,20
Ebene 4	0,65	0,00
	0,70	0,20
Ebene 5	0,00	0,00
	0,00	0,00

Oberflächentemperatur(°C)		
Sockel	16,2	16,8
	17,8	16,0
Platte	19,5	22,6
	24,2	20,0

Tab. 14 Temperaturabhängigkeit der EL-Messwerte (Laaser Marmor). Gelb hinterlegte Werte liegen im hydrophobierten Bereich.

7.2.3 St. Margarethener Kalksandstein

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Veränderung der Feuchtemesswerte nach einem Regenereignis gegenüber einer Trockenperiode:

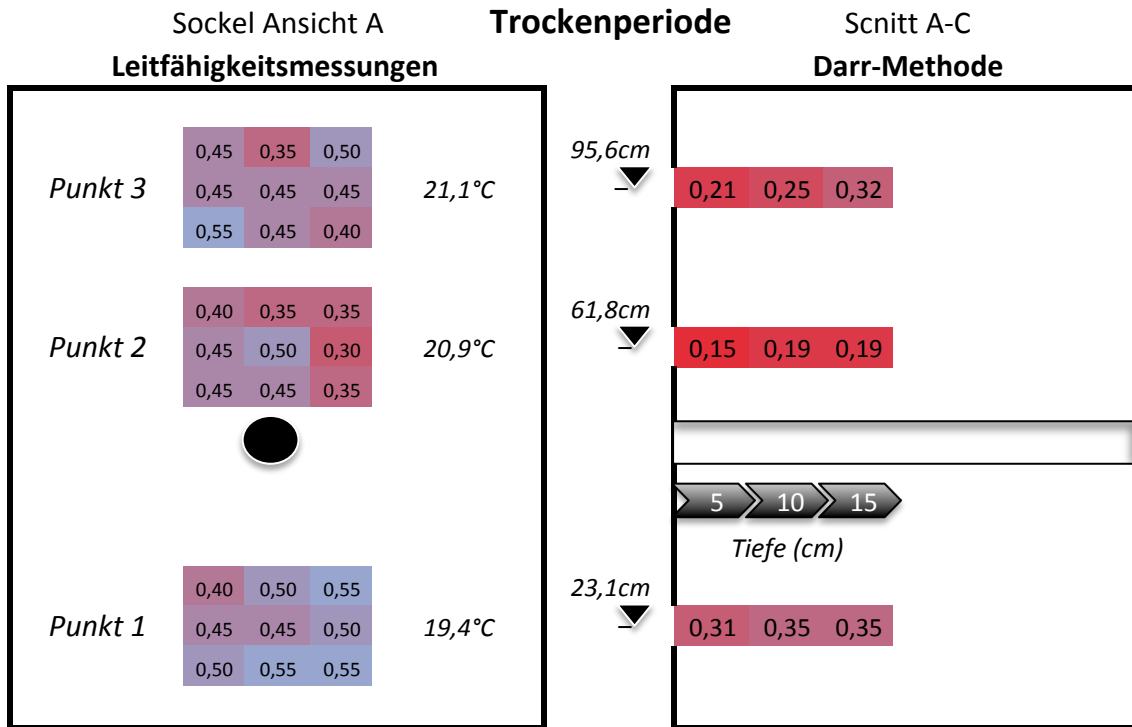


Abb. 56 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den St. Margarethener Sockel nach einer Trockenperiode

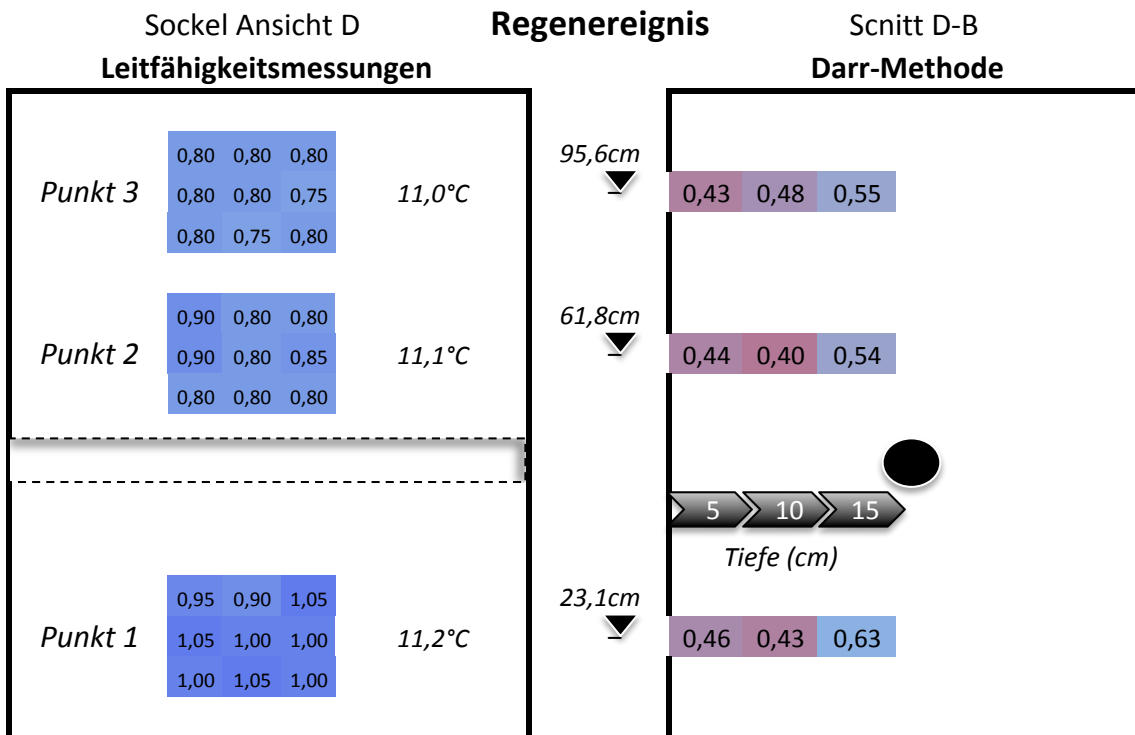


Abb. 57 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den St. Margarethener Sockel nach einem Regenereignis

Gegenüber Marmor nimmt Kalksandstein mehr Feuchtigkeit auf. Anhand der absoluten Messwerte ist eine geringe Feuchtigkeitszunahme mit der Tiefe beim St. Margarethener zu erkennen (Abb. 56). Dass im Tiefenbereich von 5-15 cm noch mehr Feuchtigkeit vorherrscht, liegt an der guten Wasseraufnahme verbunden mit größerem Porenvolumen der Sandsteine gegenüber den Marmoren. und daran dass auf die moderaten Temperaturen niedrige Trocknungsgeschwindigkeiten folgen.

Zu erkennen ist auch, dass der St. Margarethener die meiste Feuchtigkeit in Höhe von Punkt 1, also im unteren Sockelbereich aufweist (Abb. 58). (Im Vergleich dazu der Marmor im Bereich von Punkt 3). Begründen lässt sich diese Tatsache durch die gute kapillare Wasseraufnahme, trotz großen Gesteinshohlraums (bis 19%) gegenüber den Marmoren. Das Stauwasser, das sich am Fuß des Sockels sammelt wird über kapillaren Weg aufgenommen und bis in die Höhe von Ebene 2 transportiert.

Die EL-Messwerte vom 18.05. weisen im Nahbereich der Bohrpunkte eine geringe Streuung auf. Sie zeigen sich außerdem mit denen vom 30.03 und 11.05 konsistent, sind aber im Vergleich zu den absoluten Messwerten wieder zu hoch. Nach Abb. 58 könnten die Messwerte von HumidCheck nach einer Eichung an den Naturstein mittels Faktorisierung als vertrauenswürdige Daten interpretiert werden. Es lässt sich der höhenabhängige Feuchteverlauf mit der Darr-Methode, als auch mit Leitfähigkeitsmessungen erkennen.

Der Niederschlag zeigt sich beim St. Margarethener Kalksandstein in einer durchgängigen Erhöhung der MC-Werte gegenüber der Trockenperiode (Abb. 57). Die starke Diskrepanz der Ergebnisse zwischen den Leitfähigkeitsmessungen und der Darr-Methode ist weiterhin gegeben. Wie bei den Marmoren ist auch beim St. Margarethener zu erkennen, dass der Tiefenbereich von 5 bis 10cm im Vergleich zu den anderen Bereichen vergleichsweise wenig Feuchtigkeit aufgenommen hat (Abb. 59). Das könnte einem bestimmten Wassertransportprozess geschuldet sein, bedarf aber für eine genauere Interpretation weiterer Untersuchungen. Zeitlich zurückliegende hydrophobierende Maßnahmen zeigen im oberen Sockelbereich keinerlei Einfluss auf die Wasseraufnahmefähigkeit des St. Margarethener Kalksandsteins.

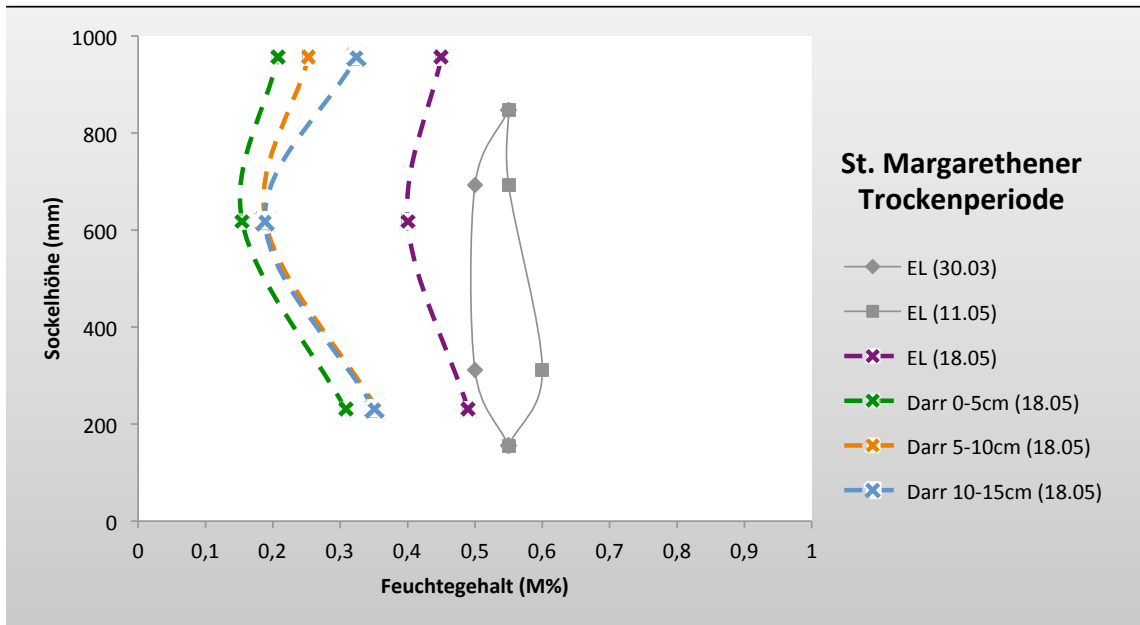


Abb. 58 MC (M%) St. Margarethener Kalksandstein in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach einer Trockenperiode

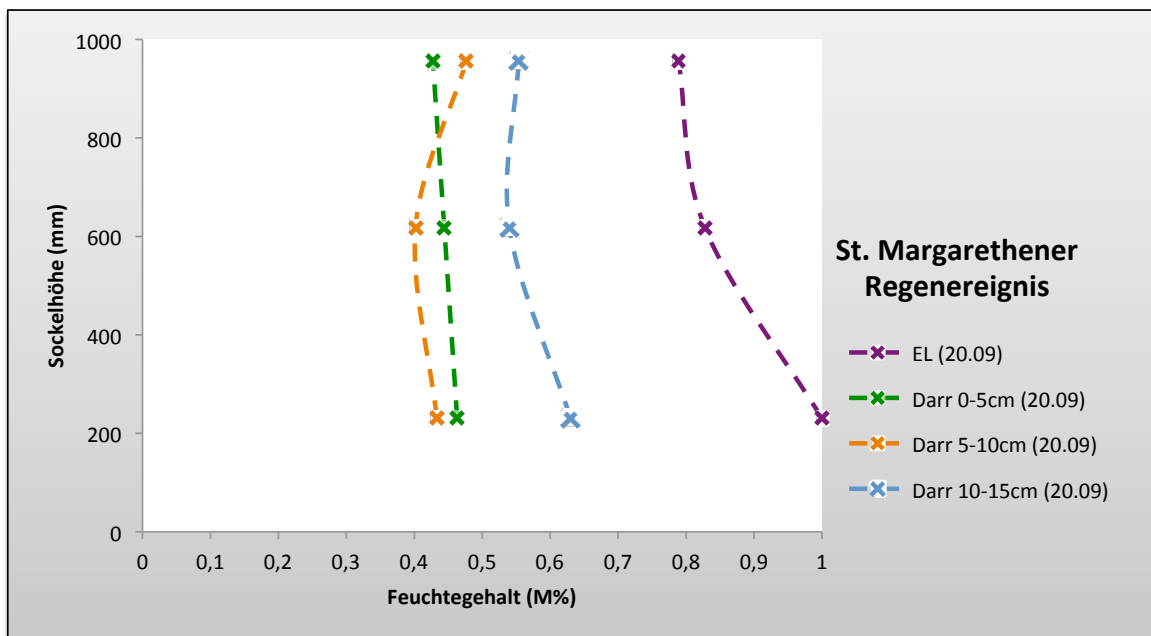


Abb. 59 MC (M%) St. Margarethener Kalksandstein in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach einem Regenereignis

Korrelation der Feuchtwerte zur Oberflächentemperatur kann insofern festgestellt werden, dass die Oberflächentemperaturen der Platte im Bereich jener des Sockels liegen (sogar etwas niedriger) und dementsprechend höhere Feuchtwerte (EL-Messungen) als im Sockel gemessen wurden.

Unterschiede zwischen den Seiten A/D bzw. B/C sind keine zu erkennen, somit ist auch keine Aussage zu wettergeschützten Flächen möglich.

Hydrophobierende Maßnahmen auf den Flächen B und D scheint wieder in niedrigeren EL-Messwerten zu resultieren (Tab. 15).

EL-Messreihe 11.05.2017		
<i>Seite</i>	a(c)	b(d)
Ebene 1	0,55	0,40
	0,60	0,40
Ebene 2	0,60	0,50
	0,60	0,60
Ebene 3	0,55	0,30
	0,60	0,30
Ebene 4	0,55	0,45
	0,65	0,30
Ebene 5	0,75	0,75
	0,70	0,75

Oberflächentemperatur(°C)		
Sockel	17,0	15,0
	13,6	14,5
Platte	15,5	14,0
	13,1	13,4

Tab. 15 Temperaturabhängigkeit der EL-Messwerte (St. Margarethener Kalksandstein)

7.2.4 Aflenzer Kalksandstein

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Veränderung der Feuchtemesswerte nach einem Regenereignis gegenüber einer Trockenperiode:

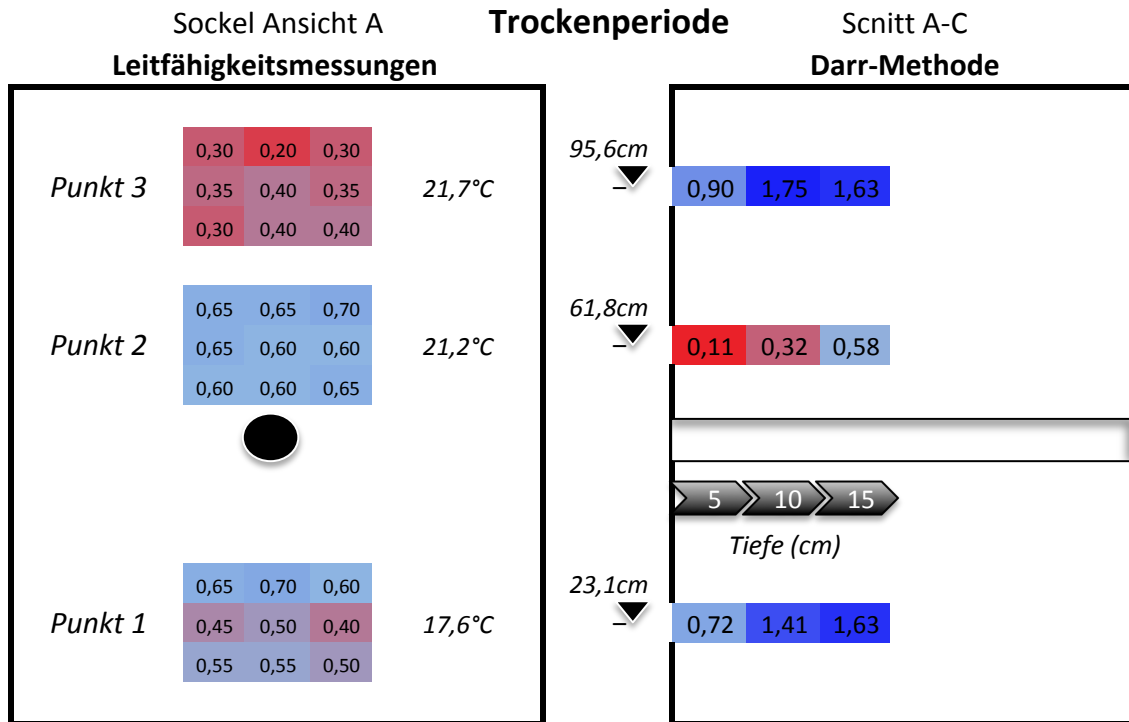


Abb. 60 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Aflenzer Sockel nach einer Trockenperiode

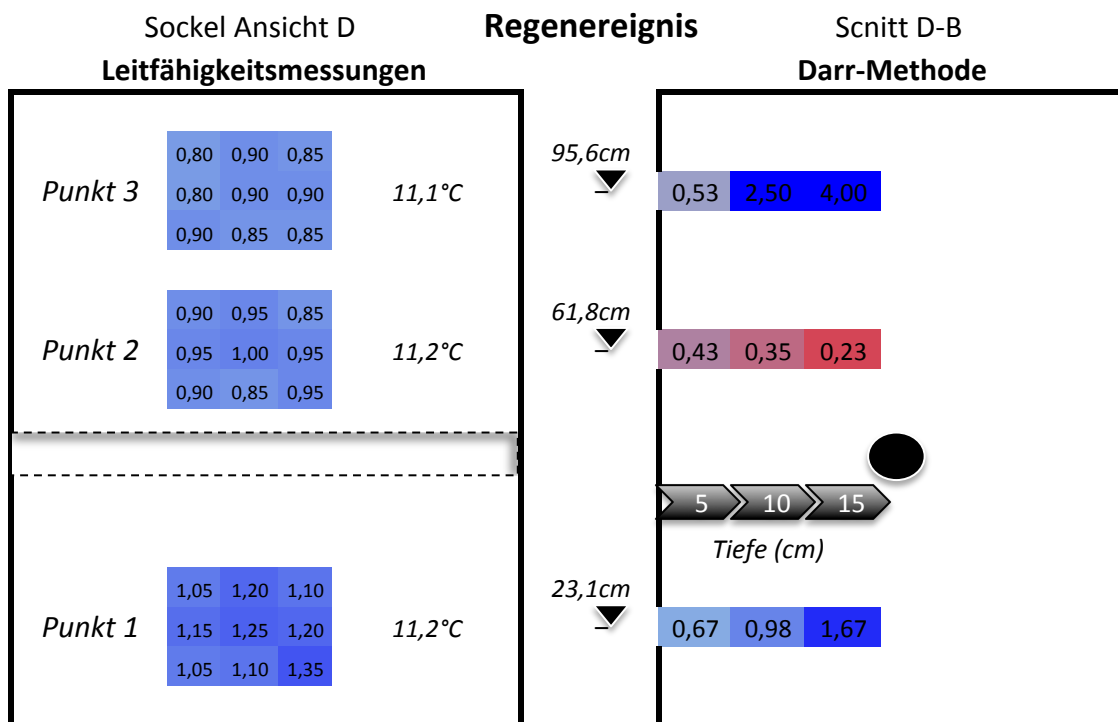


Abb. 61 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Aflenzer Sockel nach einem Regenereignis

Nach Trocknung der Bohrmehlproben erkennt man relativ hohe Feuchtwerte im unteren und oberen Sockelbereich des Aflenzer Kalksandstein (Abb. 60). Im mittleren Bereich sind die Feuchtwerte erstaunlich niedrig. Der Stein hat in etwa dieselbe Feuchteverteilung wie der St. Margarethener Kalksandstein, jedoch liegen die Werte beim Aflenzer deutlich höher. Das ist auf den größeren Hohlraumanteil und die bessere Wasseraufnahme zurückzuführen. Der Randbereich ist deutlich trockener als die tieferliegende Zone. Sandsteine weisen zu Beginn eines Trocknungsprozesses einen konstanten Trocknungsverlauf auf. Dieser hält an, solange Wasser durch kapillaren Transport vom Steininneren an die Oberfläche gelangt. Je weiter sich die Verdunstungsoberfläche in den Stein zurückzieht, desto mehr nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit ab. Am Beispiel des Aflenzer Kalksandsteins dürfte sich diese Verdunstungszone während der Probeentnahme im Bereich der ersten 5cm befunden haben. (Mirwald und Franzen 2004, S.396) Dass im Bereich von 5cm – 15cm Tiefe noch erheblich mehr Feuchtigkeit vorherrscht, könnte daran liegen, dass auf die moderaten Temperaturen niedrige Trocknungsgeschwindigkeiten folgten.

Die EL-Messungen stimmen zwar untereinander datumsunabhängig überein, liefern jedoch nicht annähernd die erhofften Ergebnisse. Sie haben eher irreführenden Charakter. Sie legen einen genau umgekehrten Feuchteverlauf als die absoluten Messwerte nahe (Abb. 62). Selbst über den oberflächennahen MC lässt sich mit den EL-Werten der äußeren 5 cm keine Korrelation erkennen. Es herrscht in keinem Bereich eine Übereinstimmung zwischen den Messwerten der EL- und Darr-Methode. Wie bei den Steinen davor streuen die EL-Werte nach einem Regenereignis kaum. Anhand diese relativen Ergebnisse ist es unmöglich, selbst zwischen Marmoren und porösen Kalksteinen zu unterscheiden.

Etwas erstaunlich sind die Ergebnisse des Darr-Verfahrens nach dem Regenereignis (Abb. 61). In Punkt 1 hat der Feuchtegehalt oberflächennah gegenüber der Trockenperiode sogar etwas abgenommen. In Punkt zwei hat sich der tiefenabhängige Feuchteverlauf umgekehrt. Sie nimmt jetzt von außen nach innen ab, wobei sich die Feuchtwerte kaum verändert haben. Die äußeren 5cm von Punkt 3 sind recht trocken, vor allem wenn man die starke Zunahme des MC mit der Tiefe berücksichtigt. So weist der Aflenzer teilweise einen Feuchtegehalt von über 4 M% auf (Abb. 63).

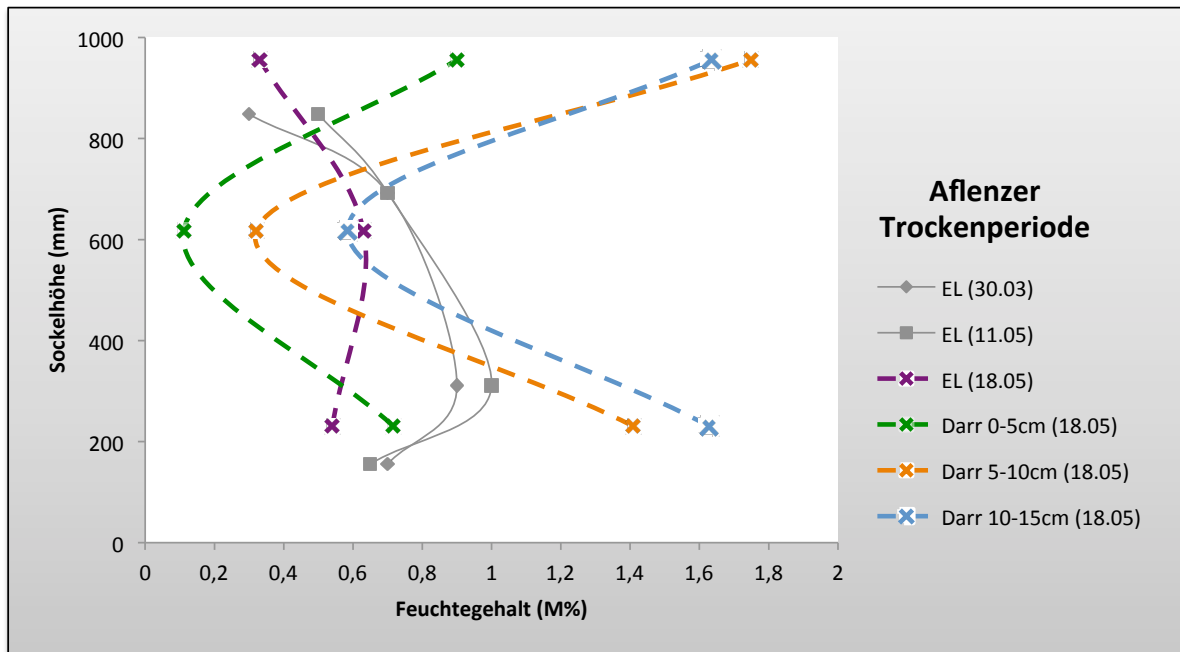


Abb. 62 MC (M%) Aflezer Kalksandstein in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach einer Trockenperiode

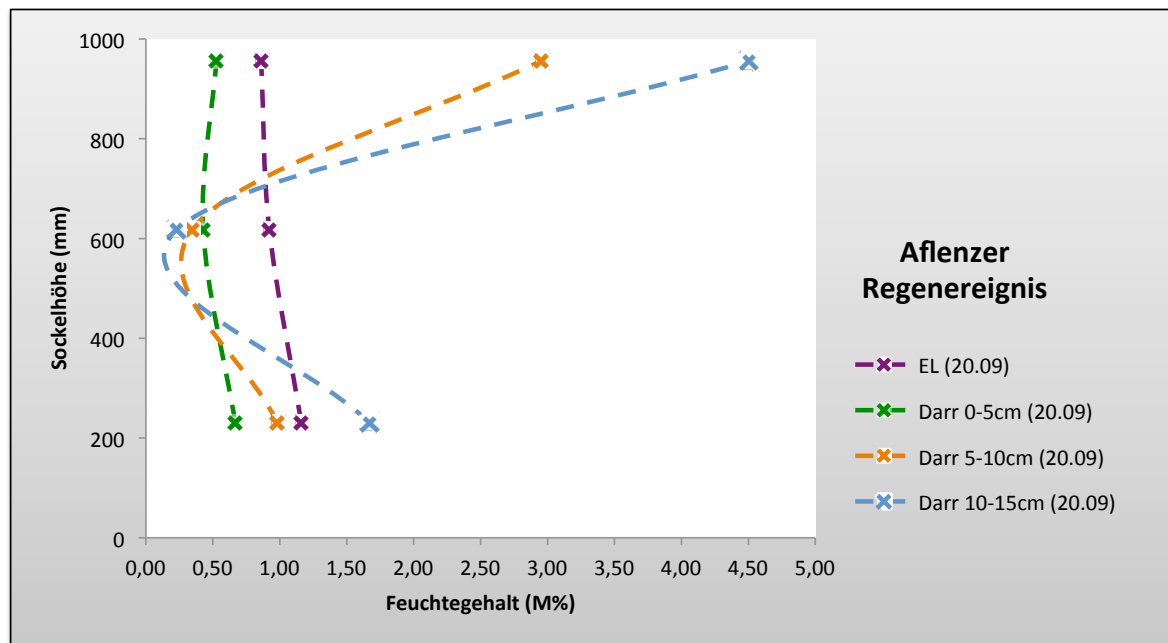


Abb. 63 MC (M%) Aflezer Kalksandstein in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach einem Regenereignis

Unterschiede zwischen den Seiten A/D bzw. B/C sind keine zu erkennen, somit auch keine Abhängigkeit des MC zu wettergeschützten Flächen. Die Oberflächentemperaturen der Platte liegen im Bereich derer des Sockels. Dementsprechend deuten EL-Messungen auf Feuchtigkeit im Größenbereich des Sockels im Plattenbereich hin (Tab. 16).

EL-Messreihe 11.05.2017		
<i>Seite</i>	a(c)	b(d)
Ebene 1	0,65	0,60
	0,65	0,60
Ebene 2	1,00	0,80
	0,80	0,90
Ebene 3	0,70	0,65
	0,65	0,70
Ebene 4	0,50	0,70
	0,70	0,70
Ebene 5	0,60	0,60
	0,70	0,50

Oberflächentemperatur(°C)		
Sockel	16,0	15,5
	13,8	13,4
Platte	17,2	16,7
	17,0	16,6

Tab. 16 Temperaturabhängigkeit der EL-Messwerte
(Aflenzer Kalksandstein)

7.2.5 Lindabrunner Konglomerat

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Veränderung der Feuchtemesswerte nach einem Regenereignis gegenüber einer Trockenperiode:

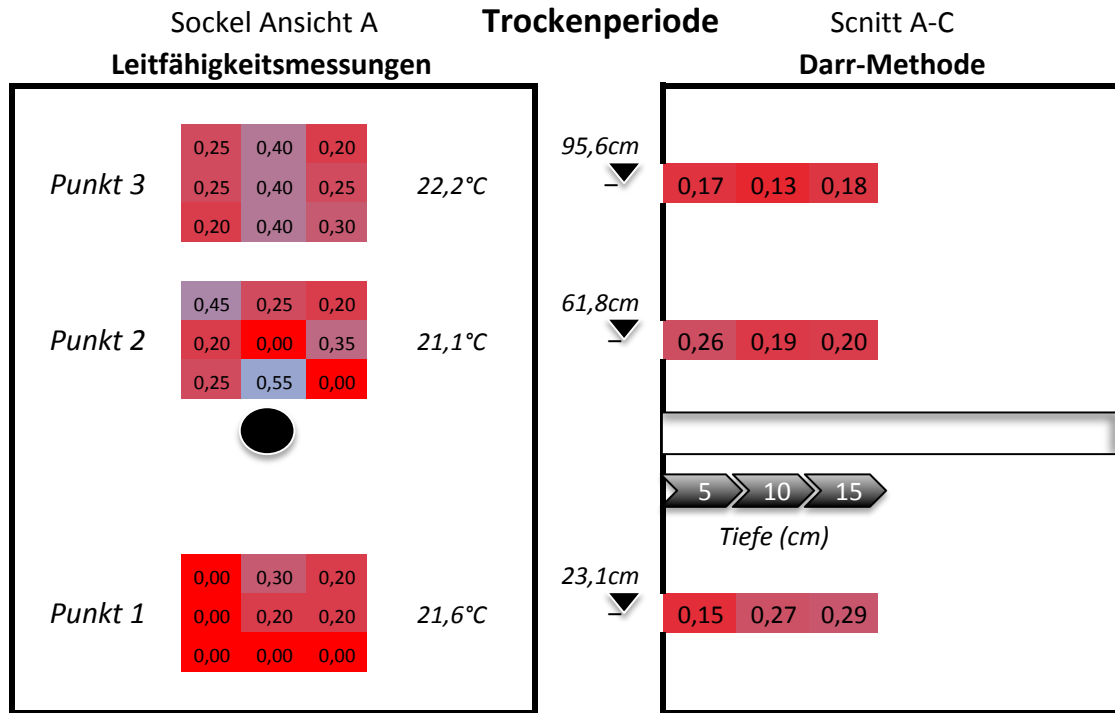


Abb. 64 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Lindabrunner Sockel nach einer Trockenperiode

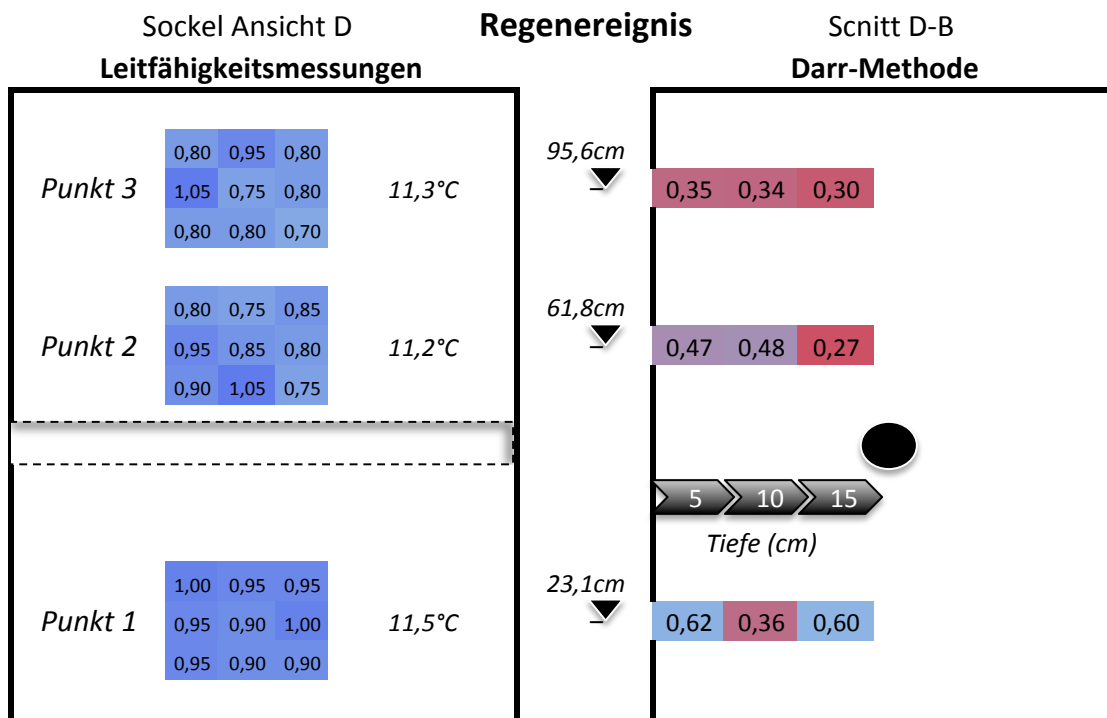


Abb. 65 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Lindabrunner Sockel nach einem Regenereignis

Lindabrunner Konglomerat hat im Vergleich zu den Kalksandsteinen eine geringere Porosität und Wasseraufnahmefähigkeit (ca. 2%). In Abb. 64 lässt sich, wie bei den Kalksandsteinen, ein erhöhter Feuchtegehalt durch die kapillare Aufnahme von Stauwasser im unteren Sockelbereich erkennen. Der Wassergehalt im Konglomerat ist allerdings geringer als bei den Kalksandsteinen. EL-Messungen liefern erneut widersprüchliche Ergebnisse. Zwar liegen die Werte dieses Mal im selben Größenbereich wie jene der Darr-Methode, lassen aber eine Feuchtigkeitszunahme mit der Höhe vermuten (Abb. 66). Generell sind die Werte der EL-Messungen hier mit besonderer Vorsicht zu genießen. Die Werte schwanken sehr stark. Sie sind abhängig davon, ob mit den Elektroden des Messapparates in Poren eingedrungen wird oder nicht. Das zeigen auch die unterschiedlichen EL-Werte zu den unterschiedlichen Zeitpunkten (Abb. 66). Während sich bei den anderen Steinen die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen zeitunabhängig im etwa selben Wertebereich befinden, zeigen die Daten für das Konglomerat keine Konsistenz.

Keine Überraschungen liefern die Ergebnisse nach einer Regenperiode. Die relativen Messwerte zeigen, der Porosität des Steins geschuldet, eine stärkere Streuung als die restlichen Steine (Abb. 65). Eine Abnahme des Feuchtegehalts mit der Höhe ist aber erkennbar (Abb. 67). Dieser Verlauf wird durch die absoluten Messwerte bestätigt, wobei die 5-10cm Schicht im unteren Bereich erstaunlich trocken ist. Die erhöhten MC-Werte im unteren Bereich ergeben sich grundsätzlich durch die kapillare Aufnahme des Stauwassers. Gegenüber der Trockenperiode hat der Stein in jedem Bereich an Feuchtigkeit dazugewonnen.

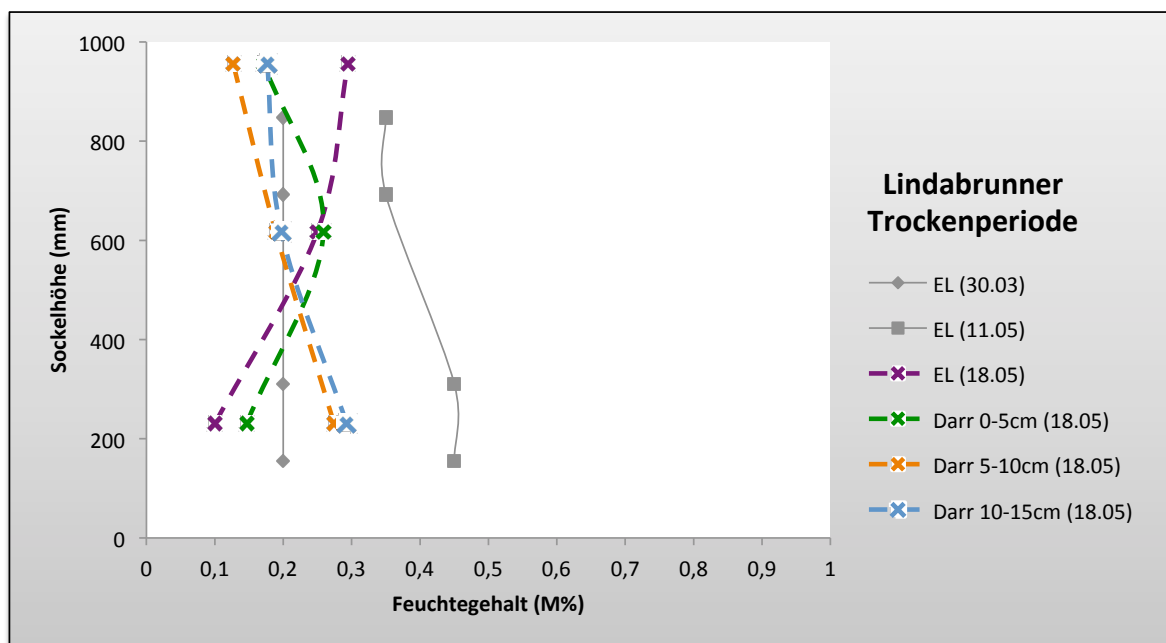


Abb. 66 MC (M%) Lindabrunner Konglomerat in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach einer Trockenperiode

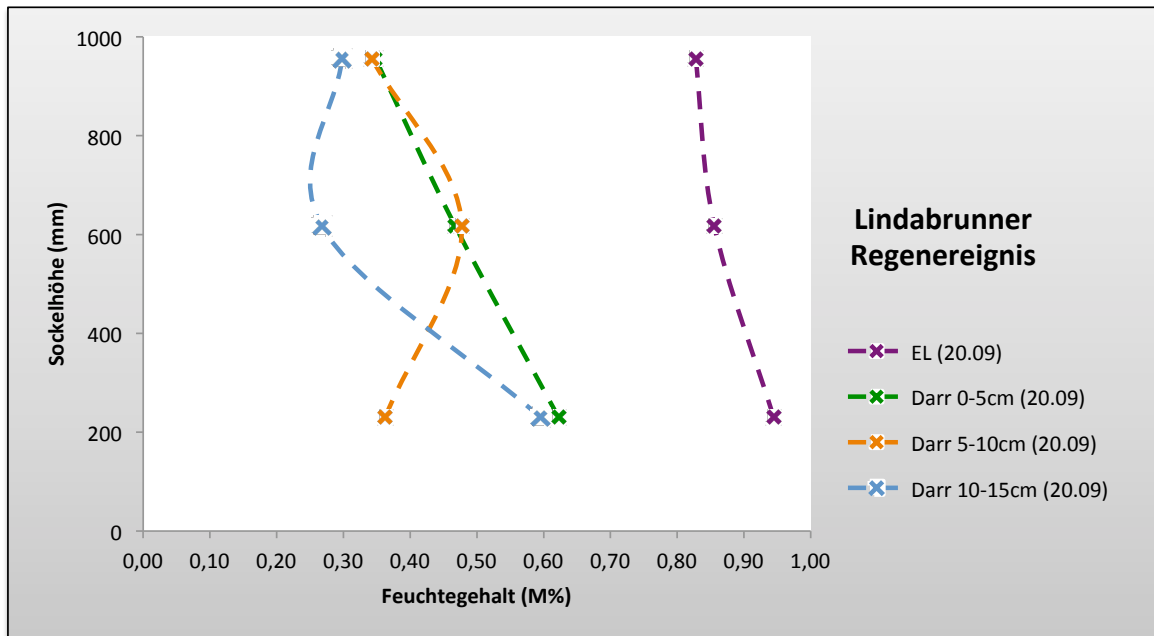


Abb. 67 MC (M%) Lindabrunner Konglomerat in Abhängigkeit von der Sockelhöhe nach einem Regenereignis

Nanotechnologische Hydrophobierungsmaßnahmen zeigen wie beim Laaser Marmor und dem St. Margaretherer Kalksandstein keine Beeinflussung des Feuchtegehalts. Die niedrigeren Werte von Punkt 3 sind eher auf die geringe kapillare Steighöhe des Konglomerats zurückzuführen.

Korrelationen der Feuchtwerte zur Oberflächentemperatur können im Sockelbereich keine festgestellt werden (Abb. 64). Lediglich im Plattenbereich sind erhöhte Temperaturen bis 22°C gemessen worden (Tab. 17). Lt. HumidCheck herrscht in diesen Bereichen auch keine Feuchtigkeit vor. Unterschiede zwischen den Seiten A/D bzw. B/C sind keine zu erkennen, somit ist auch keine Aussage bezüglich wettergeschützter Flächen möglich.

EL-Messreihe 11.05.2017		
Seite	a(c)	b(d)
Ebene 1	0,45	0,50
	0,55	0,60
Ebene 2	0,45	0,60
	0,65	0,20
Ebene 3	0,35	0,50
	0,50	0,20
Ebene 4	0,35	0,50
	0,65	0,35
Ebene 5	0,00	0,00
	0,00	0,00

Oberflächentemperatur(°C)		
Sockel	16,5	16,0
	21,7	15,6
Platte	18,2	18,0
	22,0	21,3

Tab. 17 Temperaturabhängigkeit der EL-Messwerte (Lindabrunner Konglomerat).

7.3 Interpretation der Feuchtigkeitsmessergebnisse

7.3.1 Interpretation der absoluten Feuchtigkeitsmessergebnisse

Die Ergebnisse aus Kapitel 7.2 lassen das Wasseraufnahmeverhalten der Natursteine sehr gut nachvollziehen. Sowohl die Daten nach der Trockenperiode als auch jene nach der Regenperiode zeigen die Relevanz von vorhandenem Stauwasser. Dieses kann zum einen über kapillare Kräfte vom Untergrund und zum anderen gravimetrisch von überlagerten Objekten von den Steinen aufgenommen werden. Die Marmore liefern besonders für Punkt 3, der sich 5cm unter dem Gesimse befindet, hohe MC-Werte. Dafür sind mehrere Faktoren verantwortlich. Die Lage direkt unter der Platte führt dazu, dass der Messpunkt einen Großteil der Tageszeit im Schatten liegt und so vor verstärkter Austrocknung durch Sonneneinstrahlung geschützt ist. Außerdem kann die Porenraumverteilung einiger Marmore die kapillare Steighöhe in diesen Bereich ermöglichen. Die Poren werden zusätzlich von im Gesimse vorhandenem Stauwasser gespeist, was den erhöhten Feuchtegehalt in Punkt 3 erklären könnte.

Gleiches gilt für die Punkte 3 von den Kalksandsteinen. Auch sie zeigen hohe MC-Werte in diesem Bereich. Hinzukommt, dass sie aufgrund ihrer Kornstruktur und Porosität mehr Wasser aufnehmen können. Das zeigt sich einerseits an den erhöhten MC-Werten in Punkt 1, weil bis in Ebene 2 sichtbar mehr Stauwasser über kapillare Kräfte aufgenommen wurde, andererseits an den prinzipiell höheren Feuchtegehalt gegenüber den Marmoren. Der Aflenzer nimmt dabei sehr viel mehr Wasser auf als der St. Margarethener Kalksandstein. Sein Feuchtegehalt ist zudem höhenabhängiger als bei anderen Steinen.

Das Lindabrunner Konglomerat zeigt einen relativ geringen Feuchtegehalt in Punkt 3. An diesem Stein scheint die Aufnahme des Stauwassers vom Untergrund stärker zu sein, als vom überlagerten Gesimse. Im Vergleich zu den Marmoren nimmt er mehr und im Vergleich zu den Kalksandsteinen weniger Wasser auf.

Einige Ergebnisse, besonders vom Marmor, erlauben das Interpretieren des Verwitterungsfortschritts. So ist anhand der Ergebnisse zu erkennen, dass der Laaser Marmor entgegen den Erwartungen tendenziell mehr Wasser aufnimmt als der Carrara Marmor. Zwar ist der Überhang des Gesimses vom Laaser geringer und der Schlagregenanteil dadurch vermutlich höher, dennoch deuten die höheren Feuchtigkeitswerte auf eine stärkere Verwitterung gegenüber dem Carrara Marmor hin.

Die absoluten Werte der zweiten Messreihe, also jene nach der Regenperiode, belegen einen erhöhten Feuchtegehalt im Tiefenbereich von 10 – 15cm. Dieses Resultat ist etwas erstaunlich, sollte doch eine Gefügearauflockerung in diesem Bereich kaum stattgefunden haben und die Porosität noch sehr gering sein. Poschlod (1990; S.49) wies bereits auf das hohe Porenradialmaximum der beiden Marmore bei 45 μm hin. Ihr relativ ungünstiges Verhältnis von kleinen zu großen Poren ermöglicht den Transport von Wasser in tiefere Zonen des Steins.

7.3.2 Interpretation der relativen Feuchtigkeitsmessergebnisse

Im Zuge zweier Messreihen wurden absolute sowie relative Feuchtwerte an insgesamt 30 Messpunkten dokumentiert. Infolgedessen konnten die Daten auf Korrelation der Messmethoden untersucht und Rückschlüsse auf die Qualität der relativen Messwerte gezogen werden. Es zeigt sich, dass die Genauigkeit der Leitfähigkeitsmessungen völlig unzureichend ist!

Manche MC-Verläufe (Abb. 51; Abb. 58) lassen einen Zusammenhang zwischen den relativen und absoluten Messwerten vermuten. Das verwendete Leitfähigkeitsmessgerät „HumidCheck“ soll aber laut Beschreibung den tatsächlichen Feuchtegehalt in M% wiedergeben, was gegen eine Anpassung an die absoluten Werte durch Faktorisierung spricht. Die Diskrepanz der Ergebnisse ist sehr stark. Relative sind im Schnitt deutlich höher als absolute Messwerte, unabhängig von der betrachteten Messreihe. Egal ob nach einer Trocken- oder Regenperiode täuscht die elektrische Leitfähigkeitsmessmethode einen unnatürlich hohen Feuchtegehalt vor (vgl. Kap. 7.2). Ein weiterer Kritikpunkt ist die unzureichende Tiefenprofilierung der relativen Methode. Nach Snethlage (2005; S.67f) hängt die Tiefe des untersuchten Bereichs vom Abstand der Messsonden ab. Der geringe Abstand der Elektroden von EL-Messgeräten lässt darauf schließen, dass nur der oberflächennahe Bereich untersucht wird. Demzufolge dürfen Rückschlüsse auf Feuchtegehalte in tieferliegenden Bereichen erst gar nicht in Betracht gezogen werden. Das bestätigen auch Messungen am Aflenzer Kalksandstein, der mit zunehmender Tiefe mehr Feuchtigkeit gespeichert hat. EL-Messungen können diesbezüglich keine Aufschlüsse geben (Abb. 62).

Auf die Problematik der erhöhten Leitfähigkeit durch gelöste Salze wurde bereits in Kapitel 5.2.3 hingewiesen. Dabei ist zu beachten, dass manche Salze schneller in Lösung gehen als andere. Das zeigt auch der Vergleich zwischen EL-Messungen nach einer Trocken- und Regenperiode. Messungen vom 18.05 weisen eine relativ große Streuung der Ergebnisse in unmittelbarer Nähe der Messpunkte auf (Abb. 48, Abb. 52, Abb. 56, Abb. 60, Abb. 64). In Anbetracht der einigermaßen trockenen Bedingungen zu dieser Zeit, kann das auf die Anwesenheit einiger leicht löslicher Salze hindeuten, welche die Leitfähigkeit im untersuchten Bereich zwischen den Elektroden erhöht. Die Messergebnisse vom 20.09, nach einem zweitägigen Regenereignis, streuen wesentlich weniger als jene vom 18.05. Mit zunehmenden Niederschlag und einhergehender Feuchteaufnahme kön-

nen mehr Salze gelöst werden. Das könnte den Anstieg der EL-Messwerte im Nahbereich eines Messpunktes erklären (Abb. 49, Abb. 53, Abb. 57, Abb. 61, Abb. 65).

Die Homogenisierung der EL-Messwerte nach der Regenperiode ist höchstwahrscheinlich dem durch den Schlagregen gebildeten Wasserfilm an der Oberfläche geschuldet.

7.3.3 Zusammenhang Feuchtegehalt (MC) und Oberflächentemperatur

Korrelation der Feuchtwerte zur Oberflächentemperatur können, rein auf den Sockelbereich bezogen, keine festgestellt werden. Die Werte während der Messungen vom 20.09 sind im Vergleich zu jenen vom 18.05 aufgrund der niedrigeren Umgebungstemperaturen naturgemäß niedriger. (vgl. Kap. 7.2)

Bei den Marmoren und dem Konglomerat treten Temperaturdifferenzen zwischen Sockel und Platte von bis zu 8°C auf. Das scheint Auswirkungen auf die EL-Messergebnisse zu haben. Während im Sockelbereich noch MC-Werte von bis zu 1% gemessen wurden, weist die Platte laut HumidCheck keine Feuchte mehr auf. Sie dürfte zufolge der höheren Temperatur verdunstet sein. Die Temperaturen an den Sockeln und Platten der Kalksandsteine zeigen keine Unterschiede. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, können sie aufgrund der höheren Porosität die thermische Beanspruchung besser über den Porenraum abbauen. Der Stein erwärmt sich demzufolge langsamer und die vorhandene Feuchtigkeit verdunstet später. Mithinberücksichtigt werden muss die Ungenauigkeit der relativen Feuchtemesswerte. Kapitel 7.3.2 und 8.1 weisen auf die unterschiedlichen Störfaktoren und daraus resultierenden Abweichungen zu absoluten Messwerten hin. Die vorhandenen Ergebnisse zeigen auf jeden Fall eine Abhängigkeit des Feuchtegehalts von der Oberflächentemperatur. Sie belegen auch die Bedeutsamkeit der Oberflächentemperaturdokumentation, will man die Schadensursachen von Freiluft-Langzeit-Verwitterung untersuchen. Zusammen mit der relativen Luftfeuchte kann man auf die Anzahl der Taupunktunterschreitungen und die hygrische Wechselbeanspruchung schließen (Kap. 8.2).

8 Schlussfolgerung

8.1 Aussagekraft der relativen Feuchtigkeitsmesswerte

Wie bereits in Kapitel 7.3.2 hingewiesen, ist die Genauigkeit der Messwerte der elektrischen Leitfähigkeitsmethode völlig unzureichend. Es kann nur gerätselt werden welcher Tiefenbereich untersucht wird und selbst wenn diese bekannt ist, werden die Ergebnisse noch von vielen weiteren Randbedingungen beeinflusst.

Auf den ersten Blick erkennbare Störfaktoren sind:

- Oberflächen bedeckender Wasserfilm (vorallem bei Marmoren zu beobachten), der den gemessenen Weg und gleichzeitig den Widerstand zwischen den Elektroden herabsetzt.
- Das Ansetzen des Messgerätes kann, vorallem bei Sandsteinen, in der Tiefe variieren. Dringen die Elektroden in an die Oberfläche angeschlossene Poren ein, liefert das divergente Messwerte.

Selbst wenn diese angeführten Parameter die Messung dem Gefühl nach nicht beeinflussen, ist die Wirkung folgender Störfaktoren nicht zu quantifizieren:

- Ionisierung des Wassers
In Lösung gehende Salze stellen die wohl größte und am schwersten in den Griff zu kriegende Verfälschung des Feuchtegehalts dar.
- Verteilung der Feuchte über die Tiefe

In Anbetracht der Ergebnisse muss man festhalten, dass elektrische Leitfähigkeitsmessungen zur Feuchtebestimmung an heterogenen Objekten wie Natursteinen nicht zur Anwendung kommen sollten.

8.2 Integration der Klimadaten - Schadensursachen und Verwitterungsgeschwindigkeit

Im folgenden Kapitel wird, ausgehend von den gesammelten Klimadaten, auf mögliche Schadensursachen hingewiesen und versucht die Prozessgeschwindigkeiten zu interpretieren. Aufgrund des stichprobenartigen Erfassens des Gesteinszustandes, der hauptsächlich durch instationäre thermo-hygrische Prozesse bestimmt wird, kann keine Gewichtung der einflussnehmenden Faktoren bezüglich des Verwitterungsfortschritts vorgenommen werden. Es werden lediglich regional-klimatische Phänomene und deren Schadenspotenzial hervorgehoben.

Neben dem Niederschlag stellen vor allem Luftfeuchtigkeit und Temperatur die wesentlichen Umwelteinflüsse eines Objekts dar. Mit ihrer Überwachung können nicht nur sichtbare Feuchteschäden besser interpretiert werden. In weiterer Folge dienen sie als Voraussetzung für die Entwicklung von Konservierungsstrategien. (Snethlage 2005, S.82)

Nach Snethlage (2005; S.82) lassen häufige Taupunktwechsel auf erhöhte Kondensatbildung und schnelle Feucht-Trockenwechsel auf bevorzugte Schalenbildung schließen, während Absanden in Bereichen der Dauerfeuchte öfter zu beobachten ist. Zur Feststellung der Taupunktunterschreitung ist neben der relativen Luftfeuchte die kontinuierliche Aufnahme der Oberflächentemperatur notwendig. Von diesen 2 Parametern kann auf die Wahrscheinlichkeit der Kondensatbildung an der Steinoberfläche geschlossen werden (Riccabona & Bednar 2010, S.237ff).

Mit den vorhandenen Klimadaten konnte jedoch nur die Anzahl der Nullpunktunterschreitungen festgestellt werden. Seit Beginn der Aufzeichnungen in Mauerbach wanderte die Temperatur 1160 mal, also durchschnittlich 89,27 mal pro Jahr, in den negativen Bereich. Zwar ändert sich der Gefrierpunkt des im Stein vorhandenen Wassers mit den gegebenen Druckverhältnissen, dennoch zeigt es die Häufigkeit der thermischen Wechselbeanspruchung während den Wintermonate (Abb.70).

Es kann, basierend auf den vorhandenen Daten, natürlich nicht gesagt werden in wie weit die Frost-Tauwechsel zur Gefügebrauchung beigetragen haben. Zu vermuten ist aber, dass ihr Einfluss mit fortschreitender Verwitterung zugenommen haben dürfte. Bereits Köhler (1991) wies darauf hin, dass die Gefügerstörung beim Marmor durch

Frost-Tauwechsel durch eine vorhergehende thermische Schädigung sehr begünstigt wird.

Thermische und hygrische Veränderungen gehen Hand in Hand. Abb. 69 zeigt wie die relative Luftfeuchte von der Temperatur beeinflusst wird. Steigen die Temperaturen, kann die Luft mehr Wasser aufnehmen und die relative Luftfeuchte sinkt. Kapitel 7.1 weist darauf hin, dass der Stein dadurch ständigen Sorptions- und Desorptionsprozessen ausgesetzt ist, was gleichzeitig eine kontinuierliche sich abwechselnde hygrische Dehn- und Stauchbeanspruchung bedeutet. Mirwald (2004; S.400) bewies, dass der Verlauf der Masseänderung streng jenem der relativen Luftfeuchte folgt (Abb. 68). Einen noch größeren Einfluss auf die Volumsänderung als Wasser hat die Temperatur. Die stärkste Ausdehnung erfahren die Steine bei Kombination beider Dilatationseffekte. Ein solches Szenario ist bei starker Sonneneinstrahlung nach einem ergiebigen Niederschlagsereignis, wie es in Sommermonaten oft vorkommt, gegeben. (Poschlod 1990, S.41)

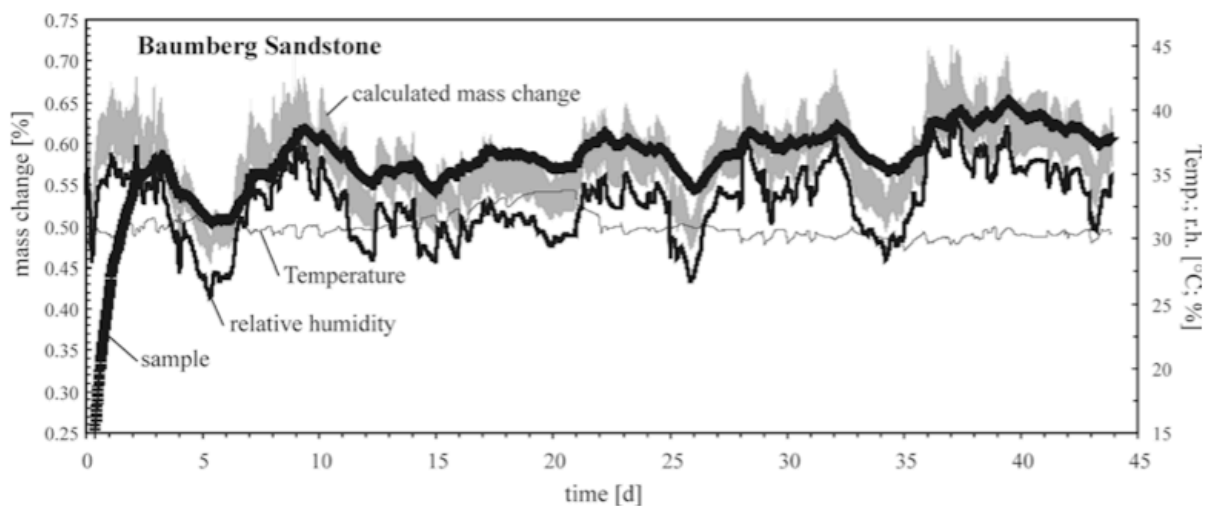


Abb. 68 Aufzeichnung von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Masseänderung (graues Band) eines Baumberg-Sandsteins über 43 Tage (Mirwald und Franzen 2004, S.400)

Die relativ schnellen Wechselbeanspruchungen sind dem mitteleuropäischen Klima geschuldet. Besonders bei Kalksteinen hat es wegen deren Löslichkeit wesentlichen Einfluss auf die Verwitterungsgeschwindigkeit. Zum Masseverlust durch Lösungsprozesse trägt zum Großteil natürlich der Niederschlag bei, solange sich der Stein in nasser (nicht überdachter) Exposition befindet. (Mirwald und Brüggerhoff 1995, S.214f) 2016 betrug die Summe des Niederschlags für Wien 733mm (URL5 2017).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die sehr wechselhaften Bedingungen ausschlaggebend für die Verwitterungsprozesse sind. Folgende klimatischen Eigenschaften sind hervorzuheben:

- Häufige Temperatur- und Feuchteschwankungen (Abb. 69)
- Häufige Taupunktunterschreitungen
- Häufige Gefrierpunktunterschreitungen im Winter (Abb.70)

- Häufige Insolationswechsel
- Starke Niederschlagsereignisse gefolgt von hohen Temperaturen

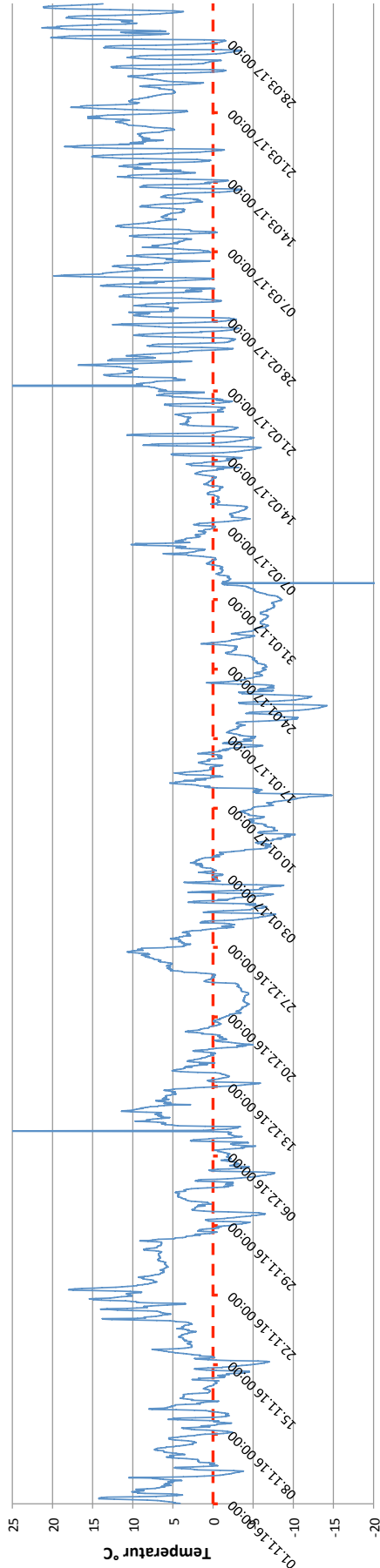


Abb.70 Temperaturaufzeichnungen Winter 2017 in Mauerbach

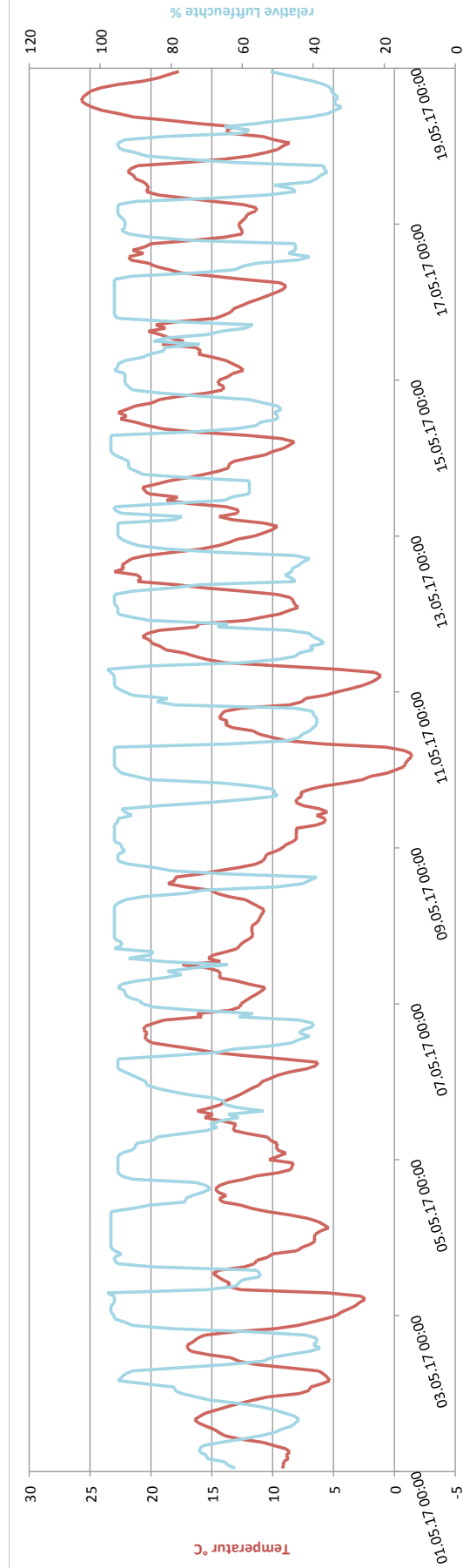


Abb. 69 Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Zeitraum vor der ersten Bohrmehlentnahme

8.3 Verwitterungsfortschritt der exponierten Natursteine

Im folgenden Kapitel werden die Schadensbilder jedes Lithotypen interpretiert. Dazu werden neben den Ultraschall- und Feuchtemessergebnissen auch Fotoaufnahmen und am Objekt tastbare Modifikationen herangezogen. Für genauere Interpretationen sind weiterführende Untersuchungen unbedingt notwendig. Verweise auf in der Literatur festgehaltene und möglicherweise zutreffende Verwitterungsphänomene und Schadensursachen sollen einen Anstoß zu tiefergreifenden Analysen darstellen. Eine Auflistung üblicher in der Praxis verwendeter Untersuchungsmethoden ist in Kap. 5 angeführt.

8.3.1 Carrara Marmor

Köhler (1991) versuchte den Schadensprozess des Carrara Marmors in drei Phasen einzuteilen. In der ersten Phase bildet sich ein Mikrorisssystem durch intergranuläre Dekohäsion. Dieser Vorgang beginnt bereits beim Abbau und gleichzeitigen Aufbau von Spannungen durch Entlastung. Durch thermische Beanspruchung schreitet die Dekohäsion weiter fort (Phase 2). Die Verwitterungsgeschwindigkeit wird hauptsächlich durch die Anzahl der Temperaturschwankungen geprägt und ist von dieser quasi linear abhängig. Unter Voraussetzung eines ausgedehnten Mikro- und durchgehenden Makroporensystems kann es bei niedrigen Temperaturen und hoher Feuchte zu Gefriersprengungen kommen (Phase 3). Ab diesem Zustand schreitet die Verwitterung mit exponentieller Geschwindigkeit fort, weil Frostschäden Porenraumvergrößerung begünstigen und umgekehrt.

Gesunder Marmor	4,5-6,6 km/s
Erste Phase: Dekohäsion	3,0-4,5 km/s
Zweite Phase: Porenraumvergrößerung	2,0-3,0 km/s
Dritte Phase: Gefriersprengung, Abbruchgefahr	1,0-2,0 km/s
Endphase: Vollständige Dekonstruktion	0,6-1,0 km/s

Tab. 18 Beurteilung des Verwitterungsfortschritts mittels US-Geschwindigkeitsmessungen (Köhler 1991, S.53)

Nach Tab. 18 befinden sich Spitze und Sockel des Carraras noch in der ersten Phase der Verwitterung. Sie weisen Durchschnittsgeschwindigkeiten von 3,28 bzw. 3,52 km/s auf (vgl. S.47). Die absoluten Feuchtemessungen deuten aber bereits darauf hin, dass sich das Porensystem erweitert hat. Sie verstärken den Transport von Wasser in Tiefen von 10-15 cm (vgl. Kap. 7.2). Die US-Geschwindigkeitsmessungen am Gesimse des Carrara Marmors lassen auf eine fortschreitende Porenraumvergrößerung durch eine erhöhte Anzahl an Temperaturwechsel in diesem Bereich schließen (Tab. 18). Wie bereits in 6.2 erwähnt, kommt es hier zu einer Vielzahl an schädigenden Prozessen. Die biologische Besiedelung (Abb. 6) zeigt außerdem, dass hier mit erhöhten Feuchtwerten zu rechnen ist und dadurch ein erhöhtes Schädigungspotenzial durch Gefriersprengung besteht.

Geht man, wie Köhler (1991) davon aus, dass die Verwitterungsgeschwindigkeit während den Phasen 1 und 2 konstant bleibt, erreicht der Sockel die Porenvergrößerungsphase in knapp 13 Jahren und Phase 3 in ca. 35 Jahren. Nach dieser Hypothese erreicht die Platte das Stadium, in dem Gefriersprengungen möglich sind, bereits nach nicht ein-

mal 8 Jahren. Hier wären nach Tab. 19 bereits Restaurierungsmaßnahmen in Form von Festigung und Hydrophobierung unbedingt notwendig. Phase 3 wird von der Spitze in etwa 12 Jahren erreicht.

Eine Einteilung zur Notwendigkeit von Restaurierungsmaßnahmen nahm Rohatsch (1999, S.132) vor:

Zustand	US [km/s]	Festigung	Hydrophobierung
Sehr gut	>4,4	nicht notwendig	nicht notwendig
Gut	3,7-4,4	nicht notwendig	empfehlenswert
Ausreichend	2,9-3,7	notwendig	unbedingt notwendig
Schlecht	2-2,9	unbedingt notwendig	unbedingt notwendig
Sehr schlecht	<2	unbedingt notwendig	unbedingt notwendig

Tab. 19 Einteilung der Restaurierungsmaßnahmen von verwitterten Marmor anhand von US-Geschwindigkeiten (Fleischer 2002, S.53)

Häufig äußert sich die Verwitterung des Carrara Marmors durch Absanden bzw. Abbröckeln einzelner Körner und Kornteile (Poschlod 1990, S.42). Von einer derartigen „Zuckerbildung“ ist jedoch weder optisch noch haptisch etwas am exponierten Exemplar zu erkennen. In Tab. 20 sind die gesammelten Kennwerte für den unverwitterten sowie verwitterten Carrara Marmor zusammengefasst:

Carrara Marmor	Messart	k -Wert ($\mu\text{s}/\text{mm}$)	d -Wert (μs)	v_{ideell} (km/sek)
Spitze unverwittert	Halbdirekt - direkt	0,209	0,514	4,79
Spitze verwittert	Halbdirekt - direkt	0,270	5,500	3,71
Platte unverwittert	Halbdirekt	0,228	1,973	4,38
Platte verwittert	Halbdirekt	0,420	-3,293	2,38
Platte verwittert	Indirekt	0,530	1,500	1,90
Sockel unverwittert	Halbdirekt	0,275	-5,950	3,63
Sockel verwittert	Halbdirekt	0,326	-4,135	3,06
Sockel verwittert	Indirekt	0,520	7,780	1,92

Tab. 20 Zusammenstellung der Kennwerte (k -Wert, d -Wert, v_{ideell}) für den untersuchten Carrara Marmor in unverwitterten und verwitterten (13 Jahre Exposition) Zustand

8.3.2 Laaser Marmor

Es kann davon ausgegangen werden, dass beim Laaser dieselben Faktoren für die Verwitterung ausschlaggebend sind wie beim Carrara Marmor. Unter den selben klimatischen Bedingungen führen primär physikalische Verwitterungsprozesse zur Gesteinszerkleinerung (Press und Siever 1995, S.128f). Das sind hauptsächlich Dehn- und Schrumpfvorgänge zufolge thermischer oder hygrischer Beanspruchung. Bei Marmoren spielt die thermische Dilatation die wesentlichere Rolle. (Poschlod 1990, S.39ff) Dennoch tragen auch sich wiederholende Wasseraufnahme- und -abgabezyklen ihren Teil dazu bei. Bei Versuchen von Poschlod (1990; S.32) stellte sich heraus, dass Laaser Mar-

mor im Vergleich zu Carrara Marmor viel schneller trocknet, demzufolge also bei gleichen Umweltbedingungen viel häufiger Feucht-Trockenwechsel eintreten können.

Neben der Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit über die Jahre (Tab. 10), zeigt sich die Verwitterung auch an den absoluten Feuchtigkeitswerten, die nach der DARR-Methode ermittelt wurden (vgl. Kap. 7.2.2). Die Porenradienverteilung ermöglicht den schnellen Wassertransport in Tiefen größer als 10cm, was dort die Haftungskräfte der Körner stört und zur Auflockerung führt (Abb. 71). (Poschlod 1990, S.49)

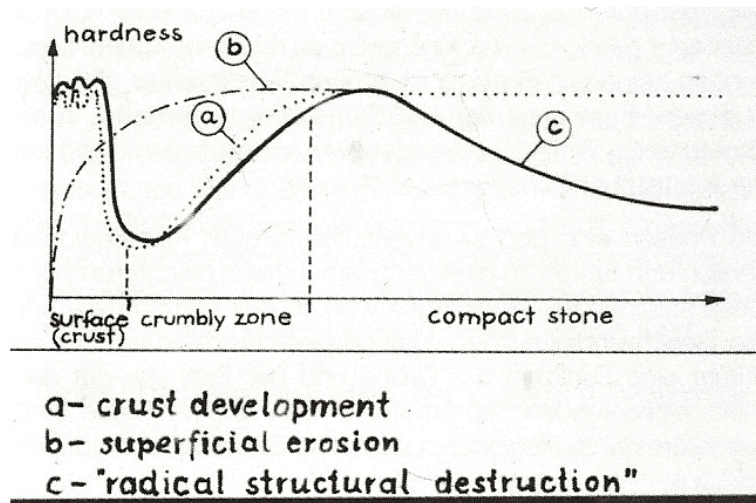


Abb. 71 Typische Verwitterungsform an Marmoren; (a) Erosion, (b) Krustenbildung, (c) Gefügeveränderung (Köhler 1991, S.51)

Gut ersichtlich ist auch, dass das Gesimse weitaus stärker verwittert ist als der Rest des Steins (Tab. 9). Grund dafür dürften die feuchteren Bedingungen im Bereich möglicher Sonneneinstrahlung sein, die eine biologische Besiedelung ermöglichen. Umgekehrt verstärken diese die thermische Beanspruchung: „Abgestorbene Flechten hinterlassen eine dunkle Färbung auf vorher hellen Felsflächen, erhöhen damit die Adsorption der Sonnenstrahlung und fördern die thermische Verwitterung“ (Ahnert 2015, S.63).

Beim Laaser Marmor läuft die Verwitterung meist hinter einer sich gebildeten Schale ab. Dadurch ist der Verwitterungsfortschritt ohne technische Hilfsmittel oft schwer zu erkennen. Erst mit dem Abplatzen der Schale oder Bildung von Rissen äußert sich der geschädigte Zustand. (Poschlod 1990, S.45f) Beim exponierten Exemplar sind, wie beim Carrara Marmor, bis auf den biologischen Bewuchs, noch keine Veränderungen optisch oder haptisch zu erkennen. In Tab. 21 sind die gesammelten Kennwerte für den unverwitterten sowie verwitterten Laaser Marmor zusammengefasst:

Laaser Marmor	Messart	k -Wert ($\mu\text{s}/\text{mm}$)	d -Wert (μs)	v_{ideell} (km/sek)
Spitze unverwittert	Halbdirekt - direkt	0,252	3,314	4,08
Spitze verwittert	Halbdirekt - direkt	0,312	-3,550	3,20
Platte unverwittert	Halbdirekt	0,314	-8,502	3,19
Platte verwittert	Halbdirekt	0,525	-16,574	1,90
Platte verwittert	Indirekt	0,460	5,630	2,17
Sockel unverwittert	Halbdirekt	0,317	-5,279	3,15

Sockel verwittert	Halbdirekt	0,499	-26,555	2,01
Sockel verwittert	indirekt	0,465	2,357	2,15

Tab. 21 Zusammenstellung der Kennwerte (k -Wert, d -Wert, v_{ideell}) für den untersuchten Laaser Marmor in unverwitterten und verwitterten (13 Jahre Exposition) Zustand

8.3.3 St. Margarethener Kalksandstein

Bei der Verwitterung des St. Magarethener spielen, wie bei den anderen Kalksteinen, chemisch-lösende Prozesse eine ebenso wichtige Rolle wie die Physikalischen. Diesbezüglich spielt auch das Vorhandensein bestimmter Salze eine Rolle. Im städtischen Bereich ist oft eine schwarze Gipskruste mit einer dahinterliegenden mürben Zone anzutreffen. In vorstädtischen Mauerbach ist eine dunkle Verfärbung eher den Pigmenten von Mikroorganismen geschuldet. (Sterflinger und Sert 2005, S.98f) Betrachtet man Abb. 72 lässt sich bereits eine klare Verfärbung durch den Bewuchs von Algen, Pilzen, Bakterien oder Flechten erkennen. Sie tragen prinzipiell unter anderem durch ihre Stoffwechselprodukte zur Gesteinszerstörung bei. (Rohatsch 2005a, S.83)

Abb. 72 fortgeschrittene biologische Besiedelung am St. Margarethener Kalksandstein



Sehr gut zu erkennen ist in Abb. 72 auch die nasse Exposition der Platte. An ihrer Oberfläche sammelt sich Regen- und Abtropfwasser und dringt durch die Schwerkraft ins Innere des Gesteins. Zwar ha-

ben sich noch keine höheren Pflanzen, die eine Gefahr durch Wurzelsprengung bergen, gebildet, aber der sichtbare Moosbewuchs belegt das feuchte Milieu. Das aufgenommene Regenwasser ist mit Schadstoffen versetzt, wirkt als leichte Säure und löst mit fortschreitender Dauer den Stein.

Die neogenen Kalksandsteine bieten den Mikroorganismen durch ihre Wasseraufnahmekapazität und Porosität sehr gute Lebensbedingungen. Sie verstärken in exponierter Lage die chemischen und physikalischen Verwitterungsmechanismen. (Sterflinger und Sert 2005, S.97)

Ein weiterer Katalysator ist das wechselhafte Klima. Neben der Frostempfindlichkeit, die bei Steinen mit kapillaren Wasserrückhaltevermögen eine wichtige Rolle spielt, werden vorallem Dehn- und Stauchprozesse dadurch aktiviert (Nimmrichter 2005,

S.80ff). Dementsprechend erklärt sich die Abnahme der ideellen Geschwindigkeit, wie sie in **Tab. 22** ersichtlich ist.

St. Margarethener Kalksandstein	Messart	<i>k</i> -Wert ($\mu\text{s}/\text{mm}$)	<i>d</i> -Wert (μs)	v_{ideell} (km/sek)
Spitze unverwittert	Halbdirekt - direkt	0,263	4,086	3,81
Spitze verwittert	Halbdirekt - direkt	0,305	-0,796	3,28
Platte unverwittert	Halbdirekt	0,390	-0,855	2,56
Platte verwittert	Halbdirekt	0,618	-20,69	1,62
Platte verwittert	Indirekt	0,560	4,010	1,80
Sockel unverwittert	Halbdirekt	0,345	-2,384	2,90
Sockel verwittert	Halbdirekt	0,537	-13,243	1,86
Sockel verwittert	Indirekt	0,530	6,550	1,90

Tab. 22 Zusammenstellung der Kennwerte (*k*-Wert, *d*-Wert, v_{ideell}) für den untersuchten St. Margarethener Kalksandstein in unverwitterten und verwitterten (14 jährige Exposition) Zustand

Auffallend sind die hohen Ultraschallgeschwindigkeiten der Natursteinspitzen (Tab. 10), obwohl sie eigentlich ungünstigen Nanoklimata ausgesetzt sind. Eine mögliche Erklärung wäre die Verdichtung durch eine sekundäre Mineralisierung, die am Aflenzer Kalksandstein schon mehrmals beobachtet werden konnte. Dabei bildet sich unter bestimmten Bedingungen eine fest geschlossene Oberflächenhaut. (Sterflinger und Sert 2005, S.98)

8.3.4 Aflenzer Kalksandstein

Für den Aflenzer Kalksandstein sind höchstwahrscheinlich die gleichen Mechanismen für die Verwitterung ausschlaggebend wie beim St. Margarethener Kalksandstein. Die wechselhaften Klimabedingungen begünstigen chemisch-lösende genauso wie physikalische Prozesse: Neben hygrisch induzierten Volumsänderungen kann es bei einem bestimmten Sättigungsgrad auch zu Gefriersprengungen kommen.

Diesbezüglich ist die bessere Wasseraufnahmefähigkeit des Aflenzer gegenüber dem St. Margarethener Kalksandstein hervorzuheben. Hohlraumanteile von bis zu 35% sind bei einigen Varietäten bereits festgestellt worden (Rulofs 2009, S.10). Die absoluten Feuchtemessergebnisse zeigen sehr hohe Werte im unteren bzw. oberen Sockelbereich. Diese Zonen werden bei den Kalksandsteinen durch Stauwasser aus der Platte bzw. dem Untergrund gespeist. Eine entsprechende Durchfeuchtung lässt sich in Abb. 72 und Abb. 5 durch eine etwas dunklere Verfärbung erkennen. Abb. 73 zeigt eine noch dunklere Verfärbung des Gesimses und der Spitze gegenüber dem St. Margarethener, was die außerordentliche Feuchtigkeit zusätzlich belegt.



Abb. 73 fortgeschrittene biologische Besiedelung am Aflenzer Kalksandstein

Tab. 23 zeigt wie sich die ideellen Geschwindigkeiten expositionsabhängig verwitterungsbedingt reduzieren. So ist an allen Teilen (Spitze, Platte, Sockel) eine deutliche Abnahme zu erkennen. Sie liegt prozentuell im selben Bereich wie beim St. Margarethener (Tab. 9). Durch das Lösen des Bindemittels kommt es in den meisten Fällen zu einem baldigen Absanden oberflächennaher Körner (Rulofs 2009, S.12). Dieses Phänomen kann am exponierten Exemplar sowohl optisch, durch die sichtbare Reliefbildung an den Gesteinskanten, als auch haptisch, durch eine fühlbare Aufrauung der Oberfläche, festgestellt werden.

Aflenzer Kalksandstein	Messart	<i>k</i> -Wert ($\mu\text{s}/\text{mm}$)	<i>d</i> -Wert (μs)	v_{ideell} (km/sek)
Spitze unverwittert	Halbdirekt - direkt	0,366	1,493	2,73
Spitze verwittert	Halbdirekt - direkt	0,555	-14,873	1,80
Platte unverwittert	Halbdirekt	0,556	-21,469	1,80
Platte verwittert	Halbdirekt	0,787	-28,448	1,27
Platte verwittert	Indirekt	0,670	5,410	1,49
Sockel unverwittert	Halbdirekt	0,642	-18,740	2,34
Sockel verwittert	Halbdirekt	0,427	-5,463	1,56
Sockel verwittert	Indirekt	0,589	5,288	1,70

Tab. 23 Zusammenstellung der Kennwerte (*k*-Wert, *d*-Wert, v_{ideell}) für den untersuchten Aflenzer Kalksandstein in unverwitterten und verwitterten (13 jährige Exposition) Zustand

8.3.5 Lindabrunner Konglomerat

Eigentlich gilt das Lindabrunner Konglomerat als frost- und gut verwitterungsbeständig, doch an ihm sind die Verwitterungsschäden optisch am deutlichsten zu erkennen. Eine klare Reliefbildung an den Kanten ist ebenso ersichtlich wie der Bewuchs durch Mikroorganismen. Am auffälligsten ist aber das Fehlen einzelner herausgelöster Steine (Abb. 74).



Das ist einem durch die chemischen Verwitterungsprozesse verursachten Bindemittelverlust geschuldet. Gefriersprengungen können aber vorallem mit fortschreitender Dauer nicht ausgeschlossen werden. Während sich der Sockel relativ verwitterungsbeständig zeigt, lassen die Platte und die Spitze durch die starke Abnahme der ideellen Geschwindigkeiten fortgeschrittene Gefügeschädigungen erkennen (Tab. 24).

Abb. 74 Schadensbild am Lindabrunner Konglomerat

Lindabrunner Konglomerat	Messart	k -Wert ($\mu\text{s}/\text{mm}$)	d -Wert (μs)	v_{ideell} (km/sek)
Spitze unverwittert	Halbdirekt - direkt	0,231	3,041	4,33
Spitze verwittert	Halbdirekt - direkt	0,452	-11,508	2,79
Platte unverwittert	Halbdirekt	0,417	-11,365	2,40
Platte verwittert	Halbdirekt	0,563	-16,340	1,77
Platte verwittert	Indirekt	0,500	1,790	2,00
Sockel unverwittert	Halbdirekt	0,399	-13,712	2,51
Sockel verwittert	Halbdirekt	0,474	-12,669	2,11
Sockel verwittert	Indirekt	0,430	6,640	2,32

Tab. 24 Zusammenstellung der Kennwerte (k -Wert, d -Wert, v_{ideell}) für den untersuchten Lindabrunner Konglomerat in unverwitterten und verwitterten (13 jährige Exposition) Zustand

8.3.6 Zusammenhang zwischen US- und MC- Ergebnissen

Ausgehend von der Feuchteverteilung an den Natursteinen lassen sich Vermutungen, basierend auf der Löslichkeit der Kalksteine, bezüglich des bereichsabhängigen Verwitterungsfortschritts anstellen. So ist in den feuchteren Zonen mit einer stärkeren Schädigung und demzufolge niedrigeren Ultraschallgeschwindigkeiten zu rechnen.

Während am Aflenzer Kalksandstein und Lindabrunner Konglomerat keine Abhängigkeiten zwischen US- und MC- Ergebnissen zu erkennen sind, weisen die Marmore und der St. Margarethener Kalksandstein in den Bereichen mit tendenziell höherer Feuchtigkeit erhöhte Ultraschallgeschwindigkeiten auf.

Das zeigt wiederum die Komplexität der umfassenden Verwitterungsfaktoren und dass sich nicht so einfach ein Zusammenhang zwischen US- und MC- Messungen erstellen lässt. Vielmehr ist eine ganzheitliche Betrachtung der Umstände notwendig. Dazu zählt die Integration der Klimadaten in die Interpretation der Verwitterung.

9 Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurden für die Zustandserhebung der Natursteine von Objektmessungen (Feuchte- und Ultraschallmessungen) Gebrauch gemacht. Objektmessungen können trotz ihres zeitintensiven und teils invasiven Charakters nur stichprobenartig den Verwitterungsfortschritt feststellen. Für die Interpretation von Schadensbildern und Entwicklung von Konservierungsstrategien ist eine weiterführende Analyse, meist invasiven Charakters, notwendig (vgl. Kap. 5). Mit derartigen Methoden kann aber auf sehr wichtige Mechanismen rückgeschlossen werden. Mit Bohrhärtewiderstandsmessungen können nahezu zerstörungsfrei Festigkeitsreduktionen festgestellt werden.

Noch genauere Erkenntnisse erlangt man aber nach der Entnahme von Gesteinsproben. Diese können im Labor unter vorher festgelegten Bedingungen untersucht werden. Eine genaue Analyse bestimmter Schadsalze ist dadurch ebenso möglich, wie die Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens der Natursteine. (Nimmrichter 2005, S.89ff)

An entnommenen Bohrkernen könnten noch genauere Ultraschalluntersuchungen folgen.

Um die Substanz der oft historischen Gebäude bzw. Objekte zu schützen, wird immer mehr versucht invasive Untersuchungsmethoden zu vermeiden. Dazu ist eine permanente Dokumentation der thermischen und hygri-schen Prozesse wünschenswert. Mit den wichtigsten klimatischen und gesteinskundlichen Daten als Bedingung sind im Laufe der Zeit Berechnungsverfahren erstellt worden, welche die zeitabhängige Feuchteverteilung bestimmen sollten. Einen Ansatz dieser Art lieferten bereits Künzel & Krus (1995). Aufbauend auf den zuvor bestimmten wesentlichen thermischen und hygri-schen Stoffkennwerten erstellte er ein Berechnungsverfahren, das auf gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportansätzen basiert. Begleitende Freilandmessungen bestätigten die Verwendbarkeit der Ergebnisse mittels rechnerischen Ansatzes.

Feuchtigkeit spielt eine Schlüsselrolle bei der Steinverwitterung, daher ist ein detailliertes Verständnis der hygri-schen Prozesse erforderlich. Dafür ist die Kenntnis der intrinsischen Materialeigenschaften der Natursteine wichtig (vgl. Kap. 4.1). Sind diese bekannt, kann ihre Reaktion auf externe Parameter experimentell untersucht werden. Das Ergebnis sind an die Natursteine genormte Sorptionsisothermen, welche die Feuchteaufnahme im hygroskopischen Bereich in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit wiedergeben. Anhand dieser Isothermen konnte Mirwald (2004) die Masseänderung der exponierten Steine über die Zeit dokumentieren. Ihre Studie hat gezeigt, dass poröse natürliche Baustoffe sofort auf klimatische Veränderungen reagieren und mit atmosphärischer Feuchtigkeit in Wechselwirkung treten. Der Austausch im äußeren Teil des Steinmaterials erfolgt dabei bereits bei sehr geringen Veränderungen der Luftfeuchtigkeit.

Dies belegt die permanente Belastung durch hygri-sche Eigenschaften, die zur Verschlechterung des Natursteins beitragen. Alle diese Prozesse wirken in erster Linie in

den Oberflächenzonen. Innere Reaktionen wirken bei anhaltenden Bedingungen zeitlich verzögert.

In den letzten Jahren hat sich die Komplexität der thermisch- hygrischen Transport- und Speichermodelle gesteigert. Grund dafür sind numerische Modelle, die schnelle Lösungen komplexer Differentialgleichungen ermöglichen. Als Grundlage dient dabei die Methode der Finiten Elemente. Die auf numerischen Weg simulierte Feuchteverteilung dient zur Beurteilung des Verwitterungsrisikos. Mit ihrer Hilfe kann festgestellt werden, wo und wann die Voraussetzungen für die unterschiedlichen Verwitterungsmechanismen gegeben sind.

Derartige Prognosemodelle entwickeln sich in die Richtung, dass auf Basis der klimatischen und geologischen Randbedingungen auf die mechanische Beanspruchung geschlossen werden kann. *„Numerische Berechnungsmodelle stellen ein ausgezeichnetes Werkzeug zur Analyse thermischer, hygrischer und mechanischer Beanspruchung von Natursteinen dar. Sie erlauben gleichermaßen eine Abschätzung der zu erwartenden Beanspruchungshöhen infolge natürlicher klimatischer Einflüsse als auch die quantitative Erfassung der jahreszeitlich auftretenden Beanspruchungswechsel, die ebenso relevant für die gesteinschädigenden Ermüdungseffekte sind“ (Kotan 2011, S.50).*

Aufgrund der vorhandenen Wetterstation in der Kartause Mauerbach, welche die wichtigsten klimatischen Daten aufzeichnet, würde sich hier die Möglichkeit bieten, zusätzliche Forschung in diesen Bereich anzustellen.

10 Literaturverzeichnis

- Ahnert Frank. *Einführung in die Geomorphologie*. 5. Auflage. Stuttgart, 2015.
- Auras Michael, Meinhardt Jeannine und Snelthage Rolf. Leitfaden Naturstein-Monitoring: Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Stuttgart, 2011.
- Blieweis Johannes. „Verwitterungssimulation an gefestigten Natursteinen“. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, November 2008.
- Burford Euan P., Fomina Marina und Gadd Geoffrey M., „Fungal roles and function in rock, mineral and soil transformations“. In *Micro-organisms and Earth Systems - advances in geomicrobiology*. Cambridge University Press, 2005.
- Falk-Gierlinger Alexandra. „Strukturelle Festigung von Zogelsdorfer Kalksandstein und Lindabrunner Konglomerat und ihre Auswirkung auf die gesteinsphysikalischen Eigenschaften“. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, November 2004.
- Fleischer Günther. „Strukturelle Festigung von St. Margarethener Kalksandstein und deren Auswirkung auf die gesteinsphysikalischen Eigenschaften“. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, Jänner 2001.
- Fleischer Günther. „Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege“. Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, 2002.
- Fleischer Günther, Nimmrichter Johannes und Rohatsch Andreas. „Konservierung von Natursteinobjekten in der Denkmalpflege mit begleitenden Untersuchungen anhand von Fallbeispielen“. In *Europäischer Sanierungskalender 2006 für Holz-, Bautenschutz und Denkmalpflege*. Berlin, 2006.
- Fogarassy Alfred. *Die Straße zwischen den Zeiten*. Bd. Die Wiener Ringstraße, 2014.
- Gegendorfer Valentin. „Das Migrationsverhalten von Flüssigkeiten im Laaser Marmor“. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, Juni 2003.
- Herbeck Anton. *Der Marmor: Entstehung, Arten, Gewinnung, Vorkommen*. München, 1953.
- Hubmann Bernhard und Moser Bernd. „Der Bausteinbestand der Burgruine Gösting (Graz, Steiermark)“. In *Joannea Geol. Paläont.* 12, S. 128-140, 2016.
- Kaiser Michael. *Die Schätze Europas: die herrlichsten Kultur- und Naturmonumente des „Alten Kontinents“*. München: Kunth, 2006.
- Kieslinger Alois. *Gesteinskunde für Hochbau und Plastik*, 1951.
- Kieslinger Alois. *Die Steine der Wiener Ringstrasse*, 1972.
- Koch Andreas. „Deformation von Fassadenplatten aus Marmor: Schadenskartierungen und gesteintechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden“. Georg-August-Universität zu Göttingen, 2005.
- Köhler Wolfram. „Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara Marmor in Potsdam Sanssouci“. In *Steinschäden - Steinkonservierung; Kolloquium im Rahmen des Kulturabkommens zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der DDR, Dresden, 2.-6. Oktober 1989*. Hannover, 1991.
- Kotan Engin. „Ein Prognosemodell für die Verwitterung von Sandstein“. Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
- Kownatzki R. *Verwitterungszustandserfassung von Natursteinbauwerken unter besonderer Berücksichtigung phänomenologischer Verfahren*, 1997.

- Künzel Hartwig M. und Krus Martin. „Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden“. In *Restoration of Buildings and Monuments Vol.1(1)*, 1995.
- Kupfer Klaus. *Materialfeuchtemessung: Grundlagen, Meßverfahren, Applikationen, Normen; mit 19 Tabellen*, 1997.
- Maggi Federico, und Tang Fiona H. M.. „Living microorganisms change the information (Shannon) content of a geophysical system“, 2017.
- McAllister Daniel, Warke Patricia und McCabe Stephen. „Stone temperature and moisture variability under temperate environmental conditions: Implications for sandstone weathering“. In *Geomorphologie*, 2016.
- Mirwald Peter W. und Brüggerhoff Stefan. „Verwitterungsvorgänge an Kalkstein unter mitteleuropäischen Klima- und Immissionsbedingungen. Ergebnisse aus Freiland-Expositionsversuchen“. In *Festschrift zum 60. Geburtstag von Helfried Mostl*, 1995.
- Mirwald Peter W. und Franzen Christian. „Moisture content of natural stone: static and dynamic equilibrium with atmospheric humidity“. In *Environmental Geology*, 2004.
- Moshammer Beatrix. „Entstehung und Klassifizierung von Kalkstein“. In *B. Schwaighofer; W. Eppensteiner (Hg.): „Junge“ Kalke, Sandsteine und Konglomerate – Neogen*. Wien, 2005.
- Nimmrichter Johann. „Zur Konservierung und Restaurierung von porösen Kalksandsteinen - ein Überblick“. In *B. Schwaighofer; W. Eppensteiner (Hg.): „Junge“ Kalke, Sandsteine und Konglomerate – Neogen*, S.77-86. Wien, 2005.
- ÖNORM EN 14579. *Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung*, 2005.
- ÖNORM EN 16682. *Erhaltung des kulturellen Erbes - Verfahren zur Bestimmung des Feuchte- bzw. Wassergehalts in Materialien des unbeweglichen kulturellen Erbes*, 2017.
- Poschlod Klaus. „Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung“. In *Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen; Reihe B*. München, 1990.
- Press Frank und Siever Raymond. *Allgemeine Geologie*, 1995.
- Riccabona, Christof, und Thomas Bednar. *Baukonstruktionslehre 4*. Wien, 2010.
- Rohatsch Andreas. „Aktuelle Probleme der Marmorrestaurierung“. In *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Österr.*, 42, S. 129-138. Wien, 1999.
- Rohatsch Andreas. „Neogene Bau- und Dekorgesteine - charakteristische Schadensbilder und Schadensursachen“. In *B. Schwaighofer; W. Eppensteiner (Hg.): „Junge“ Kalke, Sandsteine und Konglomerate – Neogen*, 2005.
- Rohatsch Andreas. „Neogene Bau- und Dekorgesteine Niederösterreichs und des Burgenlands“. In *B. Schwaighofer; W. Eppensteiner (Hg.): „Junge“ Kalke, Sandsteine und Konglomerate – Neogen*. Wien, 2005.
- Rohatsch Andreas. „Zerstörungsfreie und zerstörungsarme Untersuchungsmethoden zur Qualitätskontrolle von Restaurierungsmaßnahmen an Bauwerken aus Naturstein“. In *Oberflächentechnologien und Bautenschutz*. 21. Hanseatische Sanierungstage. Rostock, 2010.
- Rohatsch Andreas, Moshammer Beatrix, Uhlir Christian und Unterwurzacher Michael. „Adnet ‚Marble‘, Untersberg ‚Marble‘ and Leitha Limestone - best examples expressing Austria’s physical cultural heritage“. In *Engineering geology for society and territory Volume 5*, 2015.
- Rüdrich Jörg M. „Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore“. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Georg-August-Universität zu Göttingen, 2003.

- Rulofs Ingrid. „Strukturelle Festigung von Aflenzer Kalksandstein durch Biomineralisation“. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, April 2009.
- Sharma Vijay Kumar. *Introduction to process geomorphology*, 2010.
- Siegesmund Siegfried, Koch Andreas und Rüdrieh Jörg. „Fassadenplatten aus Marmor: Verwitterungsdynamik und Verbiegungspotentiale“ Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Volume 158, Number 3 (September 2009).
- Snethlage Rolf. *Leitfaden Steinkonservierung. Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein*. 2. Auflage., 2005.
- Stahr Michael. *Sanierung von Natursteinen: Erfassen-Sanieren-Recht*. Wiesbaden, 2016.
- Sterflinger Katja und Sert Hacer. „Die Mikroflora neogener Gesteine an Ringstraßenbauten“. In *B. Schwaighofer; W. Eppensteiner (Hg.): „Junge“ Kalke, Sandsteine und Konglomerate – Neogen*, S.97-104. Wien, 2005.
- Tschegg E. K., Weiss T. und Siegesmund S.. „Control of marble weathering by thermal expansion and rock fabrics“. In *9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice 19-24*, 2000.
- URL1. „Stadt Wien“. <https://www.wien.gv.at/wiki/index.php?title=Barock>, November 2017.
- URL2. „Marmi Rossi S.p.A.“
<http://www.marmirossi.com/de/news/materialfokus/carrara-marmor-ein-weisser-marmor-mit-geschichte#>, 18. Oktober 2017.
- URL3. „Lasa Marmo GmbH“. <http://www.lasamarmo.it/de/tradition/vorkommen.html>, 18. Oktober 2017.
- URL4. „TFA Dostmann“. <http://tfa-dostmann.de/index.php?id=83>, Oktober 2017.
- URL5. „Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)“.
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/jahresrueckblick>, Oktober 2017.
- Weisheit Wolfgang und Endlicher Wilfried. *Einführung in die Allgemeine Klimatologie*. 7. Auflage., 2008.
- Weiss Markus. „Strukturelle Festigung von Carrara-Marmor und deren Auswirkung auf die gesteinsphysikalischen Eigenschaften“. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, 2001.
- Wihr Rolf. *Restaurierung von Steindenkmälern. Ein Handbuch für Restauratoren, Steinbildhauer, Architekten und Denkmalpfleger*. München, 1986.

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1 FÜNF HISTORISCH BEDEUTSAME BAU- UND DEKORGESTEINE ZUR FREILUFTLANGZEITVERWITTERUNG IN EXPONIERTER LAGE IN EINEM HOF DER KARTAUSE MAUERBACH. RECHTS IM BILD SIEHT MAN DIE INSTALLIERTE WETTERSTATION DER GEMEINDE WIEN	5
ABB. 2 THERMISCHE DILATATION VON CALCIT A) WÄRMEAUSSDEHNUNGSKOEFFIZIENTEN BEZÜGLICH KRISTALLOGRAPHISCHER ACHSEN; B) SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES CALCITKRISTALLS IM AUSGANGSZUSTAND; C) FORMÄNDERUNG BEI ERWÄRMUNG UND D) ABKÜHLUNG (RÜDRICH 2003, S.69)	7
ABB. 3 ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEIN (LINKS: ZU EXPOSITIONSBEGINN 2003; RECHTS: NACH KNAPP 14 JAHREN FREIER EXPOSITION)	8
ABB. 4 LINDABRUNNER KONGLOMERAT (LINKS: ZU EXPOSITIONSBEGINN 2003; RECHTS: NACH KNAPP 14 JAHREN FREIER EXPOSITION)	9
ABB. 5 AFLENZER KALKSANDSTEIN (LINKS: ZU EXPOSITIONSBEGINN 2003; RECHTS: NACH KNAPP 14 JAHREN FREIER EXPOSITION) ..	10
ABB. 6 CARRARA MARMOR (LINKS: ZU EXPOSITIONSBEGINN 2003; RECHTS: NACH KNAPP 14 JAHREN FREIER EXPOSITION)	12
ABB. 7 LAASER MARMOR (LINKS: ZU EXPOSITIONSBEGINN 2003; RECHTS: NACH KNAPP 14 JAHREN FREIER EXPOSITION)	13
ABB. 8 ULTRASCHALLMESSGERÄT MIT ANGESCHLOSSENEN MESSKÖPFEN	22
ABB. 9 SCHALLDURCHGANG BEIM DURCHSCHALLUNGS- (OBEN) UND AUFLEGEVERFAHREN (UNTEN); GRAFIK: ORTBAUER	23
ABB. 10 ANORDNUNGSMÖGLICHKEITEN DER MESSKÖPFE (ÖNORM EN 14579 2005, S.7)	24
ABB. 11 VERÄNDERUNG DER K-WERTE DURCH VERWITTERUNG AN EINEM CARRARA MARMOR (FLEISCHER 2002, S.74)	25
ABB. 12 MESSDISTANZBANDBREITE BEI AUFLEGMESSUNGEN (FLEISCHER 2002, S.69)	27
ABB. 13 LEITFÄHIGKEITSMESSGERÄT „HUMIDCHECK“	30
ABB. 14 VERWENDUNG DES OBERFLÄCHENTEMPERATURMESSGERÄT AM CARRARA MARMOR (GERÄTETYP: LASERGRIP774 VON ETEKCITY ; 20.09.2017)	31
ABB. 15 SCHEMA DER ULTRASCHALLLAUFZEITMESSUNG	32
ABB. 16 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SPITZE DES CARRARA MARMOR	34
ABB. 17 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – PLATTE DES CARRARA MARMOR	34
ABB. 18 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SOCKEL DES CARRARA MARMOR	35
ABB. 19 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SPITZE DES LAASER MARMOR	36
ABB. 20 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – PLATTE DES LAASER MARMOR	36
ABB. 21 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SOCKEL DES LAASER MARMOR	37
ABB. 22 GROB-PORÖSER BEREICH (EINGESCHLOSSENE ALGENKOLONIE) BEIM ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEIN	38
ABB. 23 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SPITZE DES ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEINS	39
ABB. 24 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – PLATTE DES ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEINS	39
ABB. 25 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SOCKEL DES ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEINS	40
ABB. 26 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SPITZE DES AFLENZER KALKSANDSTEINS	41
ABB. 27 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – PLATTE DES AFLENZER KALKSANDSTEINS	41
ABB. 28 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SOCKEL DES AFLENZER KALKSANDSTEINS	42
ABB. 29 RELIEFBILDUNG AN DER SPITZE DES LINDABRUNNER KONGLOMERAT	43
ABB. 30 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SPITZE DES LINDABRUNNER KONGLOMERATS	43
ABB. 31 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – PLATTE DES LINDABRUNNER KONGLOMERATS	44
ABB. 32 GEFÜGEAUFLOCKERUNG – SOCKEL DES LINDABRUNNER KONGLOMERATS	44
ABB. 33 AUSBRÜCHE BEIM LINDABRUNNER KONGLOMERAT	45
ABB. 34 ABHÄNGIGKEIT DER GESCHWINDIGKEITSMESSUNGEN VON DER MESSDISTANZ BEI SEDIMENTGESTEINEN	50
ABB. 35 MESSDISTANZABHÄNGIGKEIT DER GESCHWINDIGKEIT BEIM LAASER SOCKEL	51
ABB. 36 MESSDISTANZABHÄNGIGKEIT DER GESCHWINDIGKEIT BEI DER LAASER PLATTE	52
ABB. 37 DISTANZ-LAUFZEIT DIAGRAMM – LAASER SOCKEL	53
ABB. 38 AUFLEGMESSUNGEN AM SOCKEL DES ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEIN	54
ABB. 39 WINKELMESSUNG ZWISCHEN DEN MESSKÖPFEN	55
ABB. 40 WINKELABHÄNGIGKEIT DER DURCHSCHNITTSGESCHWINDIGKEIT – CARRARA MARMOR	56
ABB. 41 WINKELABHÄNGIGKEIT DER DURCHSCHNITTSGESCHWINDIGKEIT – LINDABRUNNER KONGLOMERAT	57
ABB. 42 WINKELABHÄNGIGKEIT DER DURCHSCHNITTSGESCHWINDIGKEIT – LAASER MARMOR	58
ABB. 43 SCHALLAUSBREITUNG DER UNTERSCHIEDLICHEN MESSMETHODEN (GRAFIK: ORTBAUER)	59
ABB. 44 GESCHWINDIGKEITZU- UND -ABNAHME MIT DER MESSDISTANZ UNTER ANNAHME EINER LINEAREN DICHTEFUNKTION (GRAFIK: ORTBAUER)	60
ABB. 45 FEUCHTETRANSPORTMECHANISMEN IM NATURSTEIN	62
ABB. 46 KLIMATISCHE BEDINGUNGEN (NIEDERSCHLAG, TEMPERATUR, RELATIVE LUFTFEUCHTE) IN DER WOCHE VOR DEN FEUCHTIGKEITSMESSUNGEN. OBEN: KLIMADATEN DES REGENEREIGNISSES; UNTEN: KLIMADATEN DER TROCKENPERIODE	63
ABB. 47 BOHRPLAN FÜR DIE DARR-METHODE	64
ABB. 48 KARTIERUNG DER FEUCHTEMESSWERTE (M%) FÜR DEN CARRARA SOCKEL NACH EINER TROCKENEREN PERIODE	65

ABB. 49 KARTIERUNG DER FEUCHTEMESSWERTE (M%) FÜR DEN CARRARA SOCKEL NACH EINEM REGENEREIGNIS.....	65
ABB. 50 MC (M%) CARRARA MARMOR IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH TROCKENPERIODE	67
ABB. 51 MC (M%) CARRARA MARMOR IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH EINEM REGENEREIGNIS.....	67
ABB. 52 KARTIERUNG DER FEUCHTEMESSWERTE (M%) FÜR DEN LAASER SOCKEL NACH EINER TROCKENPERIODE	69
ABB. 53 KARTIERUNG DER FEUCHTEMESSWERTE (M%) FÜR DEN LAASER SOCKEL NACH EINEM REGENEREIGNIS	69
ABB. 54 MC (M%) LAASER MARMOR IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH EINER TROCKENPERIODE	70
ABB. 55 MC (M%) LAASER MARMOR IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH EINEM REGENEREIGNIS.....	71
ABB. 56 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den St. Margarethener Sockel nach einer Trockenperiode	72
ABB. 57 KARTIERUNG DER FEUCHTEMESSWERTE (M%) FÜR DEN ST. MARGARETHENER SOCKEL NACH EINEM REGENEREIGNIS.....	72
ABB. 58 MC (M%) ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEIN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH EINER TROCKENPERIODE	74
ABB. 59 MC (M%) ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEIN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH EINEM REGENEREIGNIS	74
ABB. 60 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Aflenzer Sockel nach einer Trockenperiode	76
ABB. 61 KARTIERUNG DER FEUCHTEMESSWERTE (M%) FÜR DEN AFLENZER SOCKEL NACH EINEM REGENEREIGNIS.....	76
ABB. 62 MC (M%) AFLENZER KALKSANDSTEIN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH EINER TOCKENPERIODE	78
ABB. 63 MC (M%) AFLENZER KALKSANDSTEIN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH EINEM REGENEREIGNIS	78
ABB. 64 Kartierung der Feuchtemesswerte (M%) für den Lindabrunner Sockel nach einer Trockenperiode	80
ABB. 65 KARTIERUNG DER FEUCHTEMESSWERTE (M%) FÜR DEN LINDABRUNNER SOCKEL NACH EINEM REGENEREIGNIS	80
ABB. 66 MC (M%) LINDABRUNNER KONGLOMERAT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH EINER TROCKENPERIODE	81
ABB. 67 MC (M%) LINDABRUNNER KONGLOMERAT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER SOCKELHÖHE NACH EINEM REGENEREIGNIS.....	82
ABB. 68 AUFZEICHNUNG VON TEMPERATUR, RELATIVER LUFTFEUCHTE UND MASSEÄNDERUNG (GRAUES BAND) EINES BAUMBERG-SANDSTEINS ÜBER 43 TAGE (MIRWALD UND FRANZEN 2004, S.400).....	87
ABB. 69 VERLAUF DER TEMPERATUR UND RELATIVEN LUFTFEUCHTE IM ZEITRAUM VOR DER ERSTEN BOHRMEHLENTNAHME	89
ABB. 70 TEMPERATURAUFZEICHNUNGEN WINTER 2017 IN MAUERBACH	89
ABB. 71 TYPISCHE VERWITTERUNGSFORM AN MARMOREN; (A)EROSION, (B)KRUSTENBILDUNG, (C)GEFÜGEVERÄNDERUNG (KÖHLER 1991, S.51)	92
ABB. 72 FORTGESCHRITTENE BIOLOGISCHE BESIEDELUNG AM ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEIN	93
ABB. 73 FORTGESCHRITTENE BIOLOGISCHE BESIEDELUNG AM AFLENZER KALKSANDSTEIN	95
ABB. 74 SCHADENSBIID AM LINDABRUNNER KONGLOMERAT.....	96

Tabellenverzeichnis

TAB. 1	GESTEINSTECHNISCHE KENNWERTE DES ST. MARGARETHENER KALKSANDTEINS (ROHATSCH 2005B, S.29).....	9
TAB. 2	GESTEINSTECHNISCHE KENNWERTE DES LINDABRUNNER KONGLOMERATS (ROHATSCH 2005B, S.36)	10
TAB. 3	GESTEINSTECHNISCHE KENNWERTE DES AFLENZER KALKSANDSTEINS (RULOFS 2009, S.10)	11
TAB. 4	GESTEINSTECHNISCHE KENNWERTE DES CARRARA MARMOR (WEISS 2001, S.8F).....	13
TAB. 5	GESTEINSTECHNISCHE KENNWERTE DES LAASER MARMOR (RÜDRICH 2003, S.49, 55; GEGENDORFER 2003)	14
TAB. 6	WICHTIGE EIGENSCHAFTEN VON NATURSTEINEN IN HINBLICK AUF MÖGLICHE SCHÄDIGUNGEN (STAHR 2016, S.43)	17
TAB. 7	KENNWERTE FÜR VIDEELL VERSCHIEDENER NATURSTEINE (FLEISCHER 2002, S.73).....	26
TAB. 8	DIE ZUSAMMENGEFASSTEN ERMITTELTEN IDEELLEN GESCHWINDIGKEITEN DER EXPONierten NATURSTEINE	46
TAB. 9	GRAD DER GEFÜGEAUFLÖCKERUNG DER NATURSTEINE (%).....	46
TAB. 10	MITTELWERTE DER ULTRASCHALLGESCHWINDIGKEITEN DER NATURSTEINE.....	48
TAB. 11	US-GESCHWINDIGKEITEN DES CARRARA MARMOR IN ABHÄNGIGKEIT DER HIMMELSRICHTUNGEN	49
TAB. 12	US-AUFLEGMESSEWERTE VOM 11.05.2017	55
TAB. 13	TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER EL-MESSWERTE.....	68
TAB. 14	TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER EL-MESSWERTE.....	71
TAB. 15	TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER EL-MESSWERTE	75
TAB. 16	TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER EL-MESSWERTE	79
TAB. 17	TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER EL-MESSWERTE	83
TAB. 18	BEURTEILUNG DES VERWITTERUNGSFortsCHRITTS MITTELS US-GESCHWINDIGKEITSMESSUNGEN (KÖHLER 1991, S.53)...	90
TAB. 19	EINTEILUNG DER RESTAURIERUNGSMAßNAHMEN VON VERWITTERTEN MARMOR ANHAND VON US-GESCHWINDIGKEITEN (FLEISCHER 2002, S.53).....	91
TAB. 20	ZUSAMMENSTELLUNG DER KENNWERTE (K-WERT, D-WERT, VIDEELL) FÜR DEN UNTERSUCHTEN CARRARA MARMOR IN UNVERWITTERTEN UND VERWITTERTEN (13 JAHRE EXPOSITION) ZUSTAND	91
TAB. 21	ZUSAMMENSTELLUNG DER KENNWERTE (K-WERT, D-WERT, VIDEELL) FÜR DEN UNTERSUCHTEN LAASER MARMOR IN UNVERWITTERTEN UND VERWITTERTEN (13 JAHRE EXPOSITION) ZUSTAND	93
TAB. 22	ZUSAMMENSTELLUNG DER KENNWERTE (K-WERT, D-WERT, VIDEELL) FÜR DEN UNTERSUCHTEN ST. MARGARETHENER KALKSANDSTEIN IN UNVERWITTERTEN UND VERWITTERTEN (14 JÄHRIGE EXPOSITION) ZUSTAND.....	94
TAB. 23	ZUSAMMENSTELLUNG DER KENNWERTE (K-WERT, D-WERT, VIDEELL) FÜR DEN UNTERSUCHTEN AFLENZER KALKSANDSTEIN IN UNVERWITTERTEN UND VERWITTERTEN (13 JÄHRIGE EXPOSITION) ZUSTAND	95
TAB. 24	ZUSAMMENSTELLUNG DER KENNWERTE (K-WERT, D-WERT, VIDEELL) FÜR DEN UNTERSUCHTEN LINDABRUNNER KONGLOMERAT IN UNVERWITTERTEN UND VERWITTERTEN (13 JÄHRIGE EXPOSITION) ZUSTAND	96