

Diplomarbeit

„Master's Thesis“

Verwitterungssimulation an gefestigten Natursteinen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

a. o. Univ. Prof. Mag. Dr. A. ROHATSCH
Institut für Ingenieurgeologie
E203

eingereicht an der
Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von
BLIEWEIS Johannes
9525085
1160 Wien, Römorgasse 59/23

Wien, November 2008



Johannes Blieweis

Zusammenfassung

Bauwerke aus Naturstein unterliegen unter atmosphärischen Bedingungen unweigerlich der fortschreitenden Zerstörung durch Verwitterung. Es ist daher schon lange Ziel der Forschung eine Möglichkeit zu finden diesen Prozess aufzuhalten, um Kunst- und Bauwerke aus Naturstein dauerhaft zu erhalten. Diese Aufgabe ist aber keine einfache, unter anderem weil es schwierig ist, das Verhalten des eingesetzten Gesteinsfestigers im Zusammenspiel mit dem Gesteinsmaterial über einen längeren Zeitraum hinweg zu beobachten. Unter Laborbedingungen wird versucht die für die Verwitterung hauptsächlich verantwortlichen Mechanismen nachzubilden und beschleunigt ablaufen zu lassen.

In dieser Arbeit wurde die Zerstörung durch Verwitterung von gefestigten im Vergleich zu ungefestigten Natursteinen untersucht, um signifikante Unterschiede aufzeigen zu können.

Als Verwitterungsmechanismen wurde die Salzkristallisation mit Hilfe des Magnesiumsulfatetest simuliert und die Frost-Tauwechsel-Beanspruchung mit Hilfe des Frost-Tauwechsel-Versuches angelehnt an die ÖNORM B3123 Teil 2.

Als Gesteinsfestiger kam SANOFIX 2 der Firma SANOTEC zum Einsatz. Es wurden für die Verwitterungssimulation fünf verschieden Gesteine ausgewählt: zwei Vertreter der Kalksandsteine (Zogelsdorfer, Aflenzer), zwei Quarzsandsteine (Flyschsandstein, Wüstenzeller Sandstein) und ein Marmor (Carrara Marmor). Über den Zogelsdorfer Kalksandstein waren schon Erfahrungen im Zusammenhang mit dem Produkt vorhanden. Daher war es von Interesse einen weiteren Vertreter der Kalksandsteine zu untersuchen.

Zur Verifizierung der Veränderung der Proben wurden vor und nach den Versuchen Ultraschall-Laufzeitmessungen durchgeführt, sowie danach einaxiale Würfeldruckversuche und diese mit den Werten der jeweiligen Referenzgruppe verglichen.

Es stellte sich bei den Untersuchungen heraus, dass die Behandlung der Proben mit SANOFIX 2 bei keinem der angeführten Gesteine zu einem positiven Ergebnis führte.

Abstract

Buildings made of natural stone inevitably are subject to proceeding corrosion by weathering at atmospheric terms. Thus for a long time it has been an objective of research to find something to stop this process in order to maintain works of art and civil works. But it is not an easy scope. Amongst others it is difficult to observe the performance of the stone stabilisation product in use in combination with different stones over a longer period. Under laboratory conditions one tries to simulate the mechanisms that are mainly responsible for weathering and accelerate the process.

This master thesis analyses destruction of stabilised and non-stabilised natural stones in order to demonstrate significant differences.

The weathering mechanisms were simulated by crystallisation of salt via magnesium sulphate test and frost-thaw exposure via frost-thaw tests based on ÖNORM B3123 part 2.

SANOFIX 2 by SANOTEC was used as stone stabilisation product. Five different stones were chosen for the weathering simulation: two types of lime sandstone (Zogelsdorfer and Aflenzer), two types of siliceous sandstone (flysch sandstone and Wüstenzeller) and Carrara marble. There haven been prior tests with Zogelsdorfer lime sandstone. Therefore it was of interest to test another lime sand brick.

Prior and after the tests ultrasonic velocity recordings were carried out in order to verify the modification of the test specimens as well as uniaxial compressive strenght after the tests to compare them with the comparison group respectively.

The verification highlighted that SANOFIX 2 did not reach any positive result

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
2. Probenmaterial	6
2.1. Einteilung der Proben	6
2.2. Herstellung der Proben	7
2.3. Zogelsdorfer Kalksandstein	9
2.3.1. Vorkommen	9
2.3.2. Entstehung	9
2.3.3. Petrographie	9
2.3.4. Verwendung	10
2.3.5. Eigenschaften	10
2.3.6. Fotos Proben	10
2.3.7. Verwendungsbeispiele	11
2.4. Flyschsandstein	11
2.4.1. Vorkommen	11
2.4.2. Entstehung	12
2.4.3. Petrographie	12
2.4.4. Verwendung	12
2.4.5. Eigenschaften	12
2.4.6. Fotos Proben	13
2.5. Wüstenzeller Sandstein	13
2.5.1. Vorkommen	13
2.5.2. Entstehung	13
2.5.3. Petrographie	13
2.5.4. Verwendung	14
2.5.5. Eigenschaften	14
2.5.6. Fotos Proben	15
2.5.7. Verwendungsbeispiele	15
2.6. Aflenzer Kalksandstein	16
2.6.1. Vorkommen	16
2.6.2. Entstehung	16
2.6.3. Petrographie	16
2.6.4. Verwendung	16
2.6.5. Fotos Proben	17
2.6.6. Verwendungsbeispiele	18
2.7. Carrara Marmor	18
2.7.1. Vorkommen	18
2.7.2. Entstehung	19
2.7.3. Petrographie	19

2.7.4.	Verwendung	19
2.7.5.	Fotos Proben	20
2.7.6.	Verwendungsbeispiele.....	20
3.	Verwitterung.....	22
3.1.	Verwitterungsmechanismen.....	22
3.1.1.	Salzkristallisation	23
3.1.2.	Einfluss des Porenraumes und der Porenradienverteilung.....	29
3.1.3.	Frost-Tauwechsel-Verwitterung.....	30
3.1.4.	Temperaturverwitterung.....	30
4.	Steinfestiger und ihre Wirkungsweise - Steinkonservierung	31
4.1.	Anforderungen an Steinfestiger	31
4.2.	Gebräuchliche Festigungsmittel.....	32
4.3.	Durchführung der Festigung	32
5.	Versuchsdurchführung.....	35
5.1.	Bestimmung der Rohdichte.....	35
5.2.	Wasseraufnahmeverhalten	36
5.3.	Ultraschall-Laufzeitmessung – Impulsverfahren	38
5.4.	Frost-Tauwechsel (FTW)	40
5.5.	Salzkristallisation	41
5.6.	Einaxiale Würfeldruckfestigkeit.....	45
6.	Auswertung der Ergebnisse.....	48
6.1.	Zogelsdorfer Kalksandstein	48
6.1.1.	Bestimmung der Rohdichte	48
6.1.2.	Wasseraufnahme – Austrocknungsverhalten	49
6.1.3.	Ultraschall-Laufzeitmessung.....	51
6.1.4.	Frost-Tauwechsel	54
6.1.5.	Salzkristallisation	55
6.1.6.	Einaxiale Würfeldruckfestigkeit.....	57
6.1.7.	Zusammenfassung der Ergebnisse	59
6.2.	Flyschsandstein.....	60
6.2.1.	Bestimmung der Rohdichte	60
6.2.2.	Wasseraufnahme – Austrocknungsverhalten	61
6.2.3.	Ultraschall-Laufzeitmessung.....	63
6.2.4.	Frost-Tauwechsel	66

6.2.5.	Salzkristallisation	67
6.2.6.	Einaxiale Würfeldruckfestigkeit.....	69
6.2.7.	Zusammenfassung der Ergebnisse	70
6.3.	Wüstenzeller Sandstein	71
6.3.1.	Bestimmung der Rohdichte	72
6.3.2.	Wasseraufnahme - Austrocknungsverhalten.....	73
6.3.3.	Ultraschall-Laufzeitmessung.....	74
6.3.4.	Frost-Tauwechsel	77
6.3.5.	Salzkristallisation	78
6.3.6.	Druckversuch.....	79
6.3.7.	Zusammenfassung der Ergebnisse	81
6.4.	Aflenzer Kalksandstein	82
6.4.1.	Bestimmung der Rohdichte	82
6.4.2.	Wasseraufnahme - Austrocknungsverhalten.....	83
6.4.3.	Ultraschall-Laufzeitmessung.....	85
6.4.4.	Frost-Tauwechsel	88
6.4.5.	Salzkristallisation	88
6.4.6.	Druckversuch.....	91
6.4.7.	Zusammenfassung der Ergebnisse	92
6.5.	Carrara Marmor	93
6.5.1.	Bestimmung der Rohdichte	93
6.5.2.	Ultraschall-Laufzeitmessung.....	94
6.5.3.	Frost-Tauwechsel	96
6.5.4.	Druckversuch.....	96
6.5.5.	Zusammenfassung der Ergebnisse	97
7.	Zusammenfassung	99
8.	Literaturverzeichnis.....	101

1. Einleitung

Das Ziel dieser Arbeit war die Verwitterungsbeständigkeit von Natursteinen, die mit Steinfestiger behandelt wurden, zu untersuchen. Getestet wurde der Festiger SANOFIX 2 von SANOTEC und seine Verträglichkeit mit folgenden Natursteinen:

Zogelsdorfer Kalksandstein

Flyschsandstein

Wüstenzeller Sandstein

Aflenzer Kalksandstein

Carrara Marmor

Das Gebiet der Steinfestiger ist heutzutage sehr groß und birgt viel Risiko für den Anwender. Die Aufgabe des Steinfestigers die Verwitterungsprozesse, die unter atmosphärischen Bedingungen ablaufen, anzuhalten oder die Schwächung des Gesteins durch die Verwitterung wieder umzukehren ist dabei keine leichte. Die Einflüsse, die auf ein Gestein einwirken sind vielfältig, sie reichen von thermischen Dehnungen über Spannungen im Gestein zufolge Frost-Tauwechsel-Beanspruchungen über Salzkristallisation bis hin zu chemischen Lösungsprozessen im Gestein.

Noch unterschiedlicher als die Einwirkungen auf die Gesteine sind die Gesteine selbst. Ein Produkt, das bei einem bestimmten Naturstein zum Erfolg führt kann bei einem anderen schwere Schäden hervorrufen. Als Beispiel kann an dieser Stelle der Zogelsdorfer Kalksandstein genannt werden, dessen Unverträglichkeit mit dem getesteten Produkt sich schon in früheren Untersuchungen herausgestellt hat. Es war daher von großem Interesse die Palette an Natursteinen im Zusammenspiel mit dem Produkt zu erweitern, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erlangen.

Die in der Natur ablaufenden Verwitterungsprozesse wurden unter Laborbedingungen anhand folgender Versuche simuliert:

Frost-Tauwechsel-Versuch nach ÖNORM B3123 Teil 2

Magnesiumsulfatetest

Die Veränderungen der Gesteinseigenschaften wurden dabei anhand folgender Versuche verifiziert:

Ultraschall-Laufzeitmessung

Einaxialer Würfeldruckversuch

Masseverlust

Weiters wurden das Wasseraufnahme- und das Austrocknungsverhalten der Natursteine untersucht und vor Beginn der Versuche an allen Proben die Rohdichte bestimmt.

2. Probenmaterial

In dieser Arbeit wurden vier verschiedene Sandsteine und ein Vertreter der Marmore untersucht.

Aus der Gruppe der Sandsteine:

- Zogelsdorfer Kalksandstein
- Flyschsandstein
- Wüstenzeller Sandstein
- Aflenzer Kalksandstein

Aus der Gruppe der Marmore:

- Carrara Marmor

2.1. Einteilung der Proben

Es wurden bedingt durch die Anzahl der durchzuführenden Versuche und die von der Norm geforderte Mindestanzahl von 5 Proben je Versuch und Versuchsgruppe von jeder Gesteinsart 45 würfelförmige Proben hergestellt.

Für die Bezeichnung der Würfel wurde folgendes Schema gewählt:

Gestein/Festigung/Probennummer

Beispiel:

ZG/14/8..... Zogelsdorfer, im Verhältnis 1:14 gefestigt, Stein Nummer 8

Bezeichnung des Gesteins:

ZG..... Zogelsdorfer Kalksandstein

FLY..... Flyschsandstein

WZ..... Wüstenzeller Sandstein

AF..... Aflenzer Kalksandstein

CA..... Carrara Marmor

Bezeichnung der Festigung

- Ungefestigte Gruppe
- 14 Festigung mit SANOFIX2/Wasser im Verhältnis 1:14
- 7 Festigung mit SANOFIX2/Wasser im Verhältnis 1:7

Bezeichnung der Proben

- 1 – 15 15 Stück Proben je Gestein und Behandlung mit Festiger

2.2. Herstellung der Proben

Die Proben wurden am Institut für Ingenieurgeologie der Technischen Universität Wien hergestellt. Als Ausgangsmaterial wurden Materialien aus den Beständen des Instituts verwendet. Teilweise waren schon prismenförmige Proben vorhanden, aus denen die Probewürfel hergestellt wurden und teilweise wurden die Würfel aus unbearbeiteten Gesteinsblöcken hergestellt. Zur Herstellung der würfelförmigen Proben stand eine Tischsteinsäge mit permanenter Wasserspülung zur Verfügung. Aus dem vorhandenen Material wurden Würfel hergestellt mit 5cm bzw. 4cm Kantenlänge (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2).

Beim Wüstenzeller Sandstein standen Fassadenplatten mit 4cm Stärke zur Verfügung und beim Zogelsdorfer Kalksandstein Prismen mit quadratischer Grundfläche mit 4cm Seitenlänge. Für diese Gruppen wurden 4cm Würfel als Probenform gewählt.

Für die Versuche an den verbleibenden Gesteinen (Aflenzer Kalksandstein, Flyschsandstein, Carrara Marmor) wurden Würfel mit 5cm Kantenlänge hergestellt.

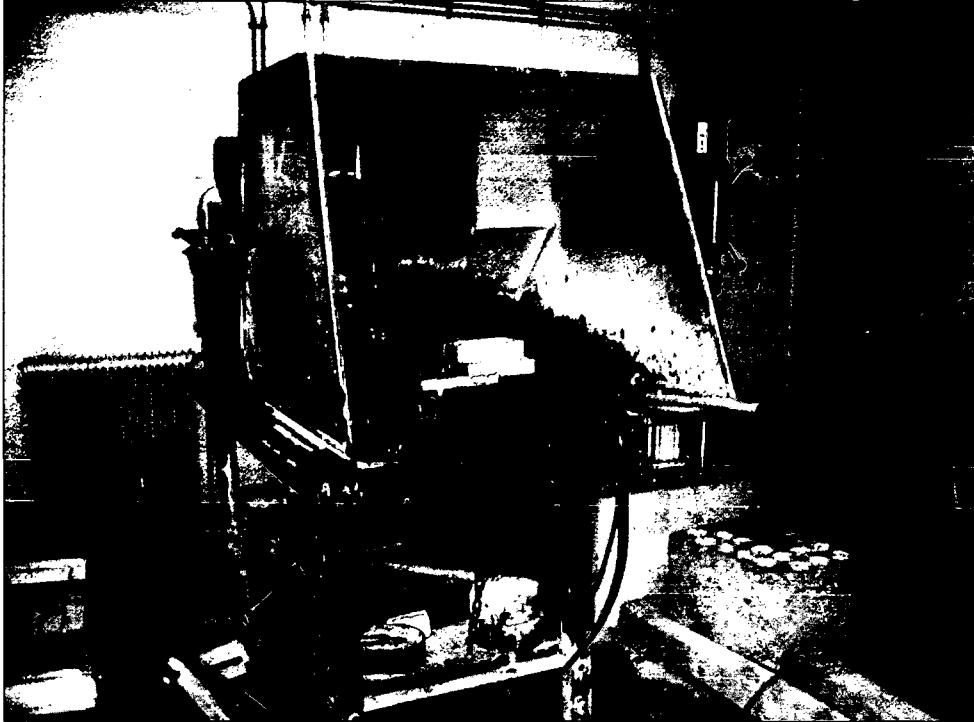


Abbildung 1: Tischsteinsäge mit permanenter Wasserspülung, Institut für Ingenieurgeologie, TU Wien

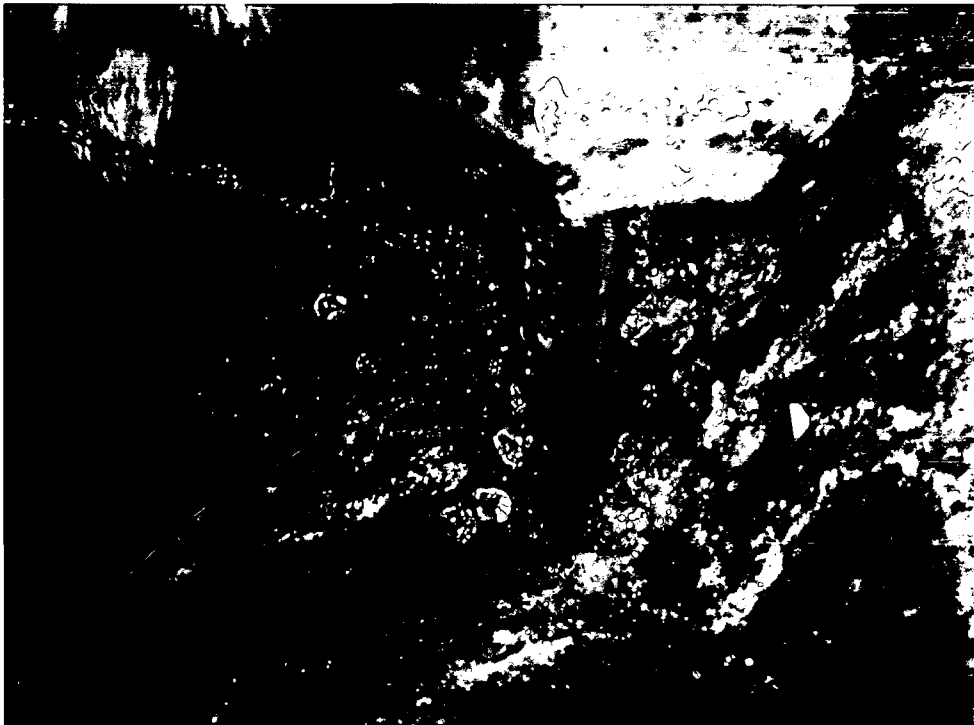


Abbildung 2: Herstellung der Flyschsandsteinproben

2.3. Zogelsdorfer Kalksandstein

2.3.1. Vorkommen

Der Zogelsdorfer Kalksandstein wurde in der Umgebung von Zogelsdorf/ Eggenburg/ Burghschleinitz und Pulkau in Niederösterreich seit dem 12. Jahrhundert abgebaut.

2.3.2. Entstehung

Der Zogelsdorfer Kalksandstein ist vor ca. 18 bis 22 Millionen Jahren entstanden. In der Eggenburger Bucht bildeten sich nach einem Anstieg des Meeresspiegels im Miozän die sehr fossilienreichen Kalksteine und Kalksandsteine der Zogelsdorfer Schichten (Zogelsdorfer Formation) (ROETZL & STEININGER (1991)).

2.3.3. Petrographie

KIESLINGER (1951) beschrieb den Zogelsdorfer bzw. Eggenburger Kalksandstein wie folgt:

„Der Zogelsdorfer Kalksandstein enthält stets eine geringe Menge von Quarzkörnchen, die aber bei der Verarbeitung nicht stören. Besonders bezeichnend ist der große Reichtum an Moostierchen (Bryozoen), kleinen weißen Kalkstöckchen mit feinen nadelstichartigen Löchern. Wie alle Seichtwasserbildungen sind die einzelnen Bänke dieses Sandsteins sehr verschiedenartig ausgebildet, nur einige wenige Bänke liefern den feinkörnigen, besonders wetterbeständigen Figurenstein, häufiger sind etwas gröbere Sandsteine, die sich für Bauquader eignen. [...] Wichtig ist der Umstand, dass infolge der ruhigen ungestörten Lagerung sehr große Blöcke gewonnen werden können.“

Diese von Kieslinger beschriebenen Unterschiede der Sandsteinbänke veranlasste DÖLTL (2006) und GSCHAUER (2002) zu einer Einteilung des Probenmaterials in eine Varietät Typ A und eine Varietät Typ B. Typ A ist grauweiß bis lichtgelb, durch eine inhomogene Struktur mit vielen Einschlüssen und Verdichtungen charakterisiert. Das Erscheinungsbild von Typ B ist homogen und hat nur wenige Muschelsplittereinschlüsse, die Farbe ist hellgelb bis gelbbraun.

Für die Versuche in dieser Arbeit wurde ausschließlich Probenmaterial verwendet, welches der Varietät Typ A zuzuordnen ist.

2.3.4. Verwendung

Der Zogelsdorfer Kalksandstein wurde vor allem im 18. Jahrhundert im Hochbau und für Figuren eingesetzt. Unzählige Pestsäulen, Grabsteine und Nepomuk Standbilder sind heute noch in Niederösterreich und Wien anzutreffen.

In Wien wurde er beispielsweise für Ausbesserungsarbeiten am Stephansdom verwendet (Adlerturm), für die Torhalle des Adlerturms und für den Neubau des Turms der Michaelerkirche (1590). (www.baufachinformation.de (RESTAURATORENBLÄTTER (1979)))

2.3.5. Eigenschaften

Rohdichte 1,91 g/cm³

Ultraschall Laufzeit: 3,3 km/s (2,9 – 3,8)

(ROHATSCH A. (1999))

2.3.6. Fotos Proben

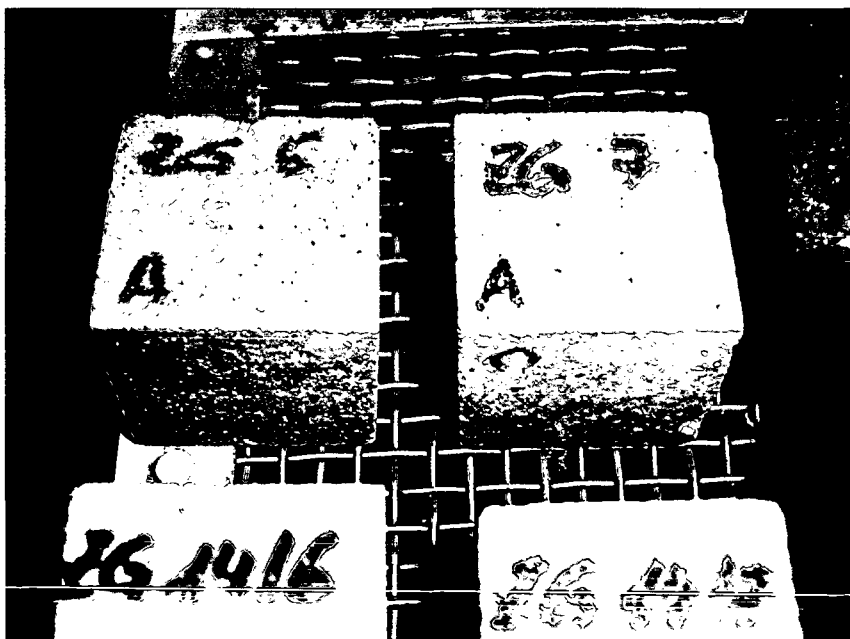


Abbildung 3: Proben Zogelsdorfer Kalksandstein

2.3.7. Verwendungsbeispiele

- **Wernstein, Mariensäule**, ursprünglich 1647 in Wien am Hof errichtet, wurde sie 1667 an ihren heutigen Platz am Ufer des Inn übersiedelt. 1990 wurde sie renoviert.



Abbildung 4: Mariensäule, Wernstein

<http://archiv.bmbwk.gv.at/medienpool/980/21bda2te.pdf>

- **Schloss Greillenstein**, Figuren im Schlossgarten und Elemente der Balustrade
- **St. Pölten - Ochsenburg, Statue des Hl. Johannes Nepomuk**, erb. 1786
<http://members.aon.at/jmichalik/Content/Referenzen/referenzen-dt.html>

2.4. Flyschsandstein

Bei dem Ausgangsmaterial zur Probenherstellung handelte es sich um ein barockes Fenstergewände der Kartause Mauerbach. Der „Wiener Sandstein“ war ein sehr beliebter Baustoff in Wien. Zahlreiche heute stillgelegte Steinbrüche rund um Wien zeugen noch heute vom regen Abbau.

2.4.1. Vorkommen

Flyschsandstein ist vor allem am Nordrand der Alpen anzutreffen. Sein Vorkommen erstreckt sich vom Bisamberg, nördlich von Wien, bis in den äußersten Westen Österreichs.

2.4.2. Entstehung

Der Flyschsandstein wurde in der Kreide- und Eozänzeit gebildet.

2.4.3. Petrographie

Flyschsandstein weist eine starke Wechsellagerung verschiedener Quarzsandsteine auf mit Mergeln und Tonschiefern. Die Bindungsarten variieren stark, für die Baupraxis verwendbar sind allerdings nur die teilweise oder stark kieselig gebundenen Flyschsandsteine wie zum Beispiel der bei Alt Lengbach anzutreffende. Diese sehr widerstandsfähigen Quarzsandsteine werden wegen ihrer Härte auch als „Schleifsteine“ bezeichnet (KIESLINGER (1951)).

2.4.4. Verwendung

Der Flyschsandstein aus dem nördlichen Alpenraum wurde als Baustein für Hochbauten verwendet. Für die Wienfluss Verbauung wurde ebenfalls Flyschsandstein verwendet. Er wurde weiters für Bildstöcke und Säulen verwendet (STINY (1929)).

Aufgrund seiner Härte, bedingt durch den Quarzsand, war der Flyschsandstein ein beliebter Schleifstein.

2.4.5. Eigenschaften

Rohdichte: 2,41 g/cm³

(STINY (1929))

2.4.6. Fotos Proben



Abbildung 5: Proben Flyschsandstein

2.5. *Wüstenzeller Sandstein*

2.5.1. Vorkommen

Der Wüstenzeller Sandstein wird in Deutschland in Wüstenzell in Unterfranken abgebaut. Derzeit wird der Wüstenzeller Sandstein durch die Firma Hoffmann Natursteinwerke abgebaut.

2.5.2. Entstehung

Der Wüstenzeller Sandstein ist zur Zeit des oberen Buntsandsteins entstanden, Mesozoikum, Trias, Skyth (untere Triaszeit).

2.5.3. Petrographie

Der Wüstenzeller Sandstein zählt zu den Buntsandsteinen, sein Mineralbestand setzt sich aus 69% Quarz, 4% Muscovit, 3% Feldspat, 2% opakes Erz (Magnetit und Limonit – färbende Komponenten) und Hornstein zusammen.

Es handelt sich um einen feinsandigen Sandstein mit Tongallen und einem deutlichen Heiligimmergehalt auf den Schicht bzw. Spaltflächen.

(<http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?md=1988017123914>) – 28.8.2008

Bei dem zur Verfügung stehenden Probenmaterial handelt es sich um Fassadenplatten mit einer Stärke von 4cm. Die Sichtfläche wurde mittels Aqua Power Verfahren behandelt. Dabei wurde die Oberfläche der Fassadenplatten mit einem Wasserstrahl mit einem Druck von etwa 2000bar abgestrahlt, um eine raue Oberfläche zu erzeugen. Die Sedimentäre Schichtung war bei den Proben aufgrund ihrer geringen Abmessungen nicht erkennbar.

2.5.4. Verwendung

Heute wird der Wüstenzeller Sandstein gerne als Wand- oder Fassadenelement oder als Gestaltungselement im Außenanlagenbau verwendet. Weiters findet er in der Bildhauerei und der Restaurierung Anwendung

2.5.5. Eigenschaften

Dichte, rein:	2,68	g/ccm.
Dichte, roh:	2,38	g/ccm.
Porosität:	11,05	Vol. %.
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck:	3,08	M. %.
Wasseraufnahme unter Vakuum:	4,64	M. %.
Sättigungsgrad:	0,66	

2.5.6. Fotos Proben

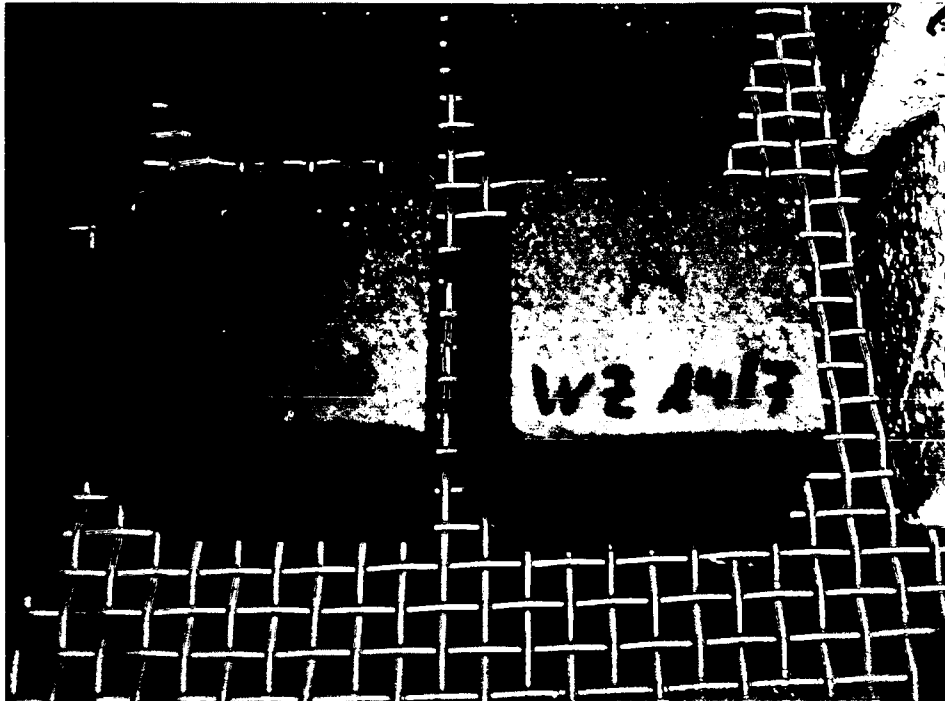


Abbildung 6: Proben Wüstenzeller Sandstein

2.5.7. Verwendungsbeispiele

Wüstenzeller Sandstein wird hauptsächlich im Bauwesen als Fassadenelement, Bodenplatte oder Wandverkleidung eingesetzt.

Beispiele:

- **City Tower**, Wien
- **Winterpalais**, Leningrad
- **Weltausstellungsgebäude**, Brüssel
- und viele Bauten im Umkreis des unteren Maintals.

[http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?m
d=1988017123914](http://www.baufachinformation.de/denkmalpflege.jsp?m
d=1988017123914)

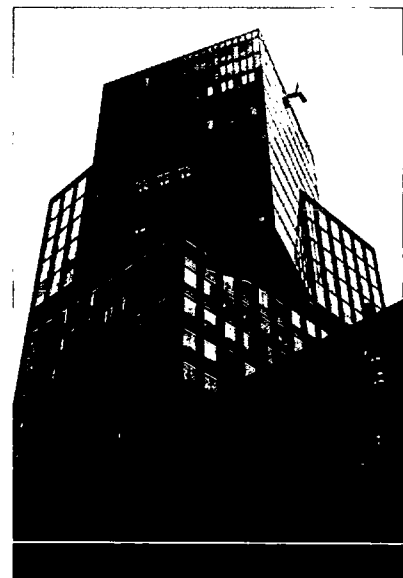


Abbildung 7: City Tower Wien

2.6. Aflenzer Kalksandstein

2.6.1. Vorkommen

Der zu den Leithakalksandsteinen zu zählende Sandstein wird in Aflenz bei Leibnitz in der Steiermark gewonnen. Die Abbaustelle befindet sich untertage und ist eine riesige Steinbrucharanlage römischen Ursprungs.

2.6.2. Entstehung

Der Aflenzer Kalksandstein wurde im Neogen vor ca. 15 – 16 Millionen Jahren gebildet. An den Ufern des Meeres, das damals das Steirische Becken erfüllte, entstand ein breiter Saum von Kalkablagerungen. Die Kalksandsteine bildeten sich aus abgelagertem Muschelkalk und der Kalkalge (Lithothamnium). Die Formen der damals gebildeten Gesteine reichen von dichten Kalksteinen (Algenkalken) über Kalksandsteine bis zu Konglomeraten. Die Kalksandsteine bilden aber die größte Gruppe der damals entstandenen Gesteine.

2.6.3. Petrographie

Aus KIESLINGER (1951):

„Von anderen Leithasandsteinen unterscheidet er sich dadurch, dass bei ihm die Algenbruchstücke kreidig weich sind. Die härtere Sorte liefert einen ausgezeichneten Baustein (sofern nicht besondere Anforderungen an die Druckfestigkeit gestellt werden) und Bildhauerstein.“

2.6.4. Verwendung

(aus www.baufachinformation.de STEINMETZ UND BILDHAUER (1987))

Über die Sanierungsarbeiten der Gewölberippen am Wiener Stephansdom:

„Aflenzer Leichtkalk für die Gewölberippen:

Das im 15. Jahrhundert verwendete Steinmaterial für die Gewölberippen war Leitha-Kalksandstein aus St. Margarethen im Burgenland. 1945 wurde für die Rekonstruktion Aflenzer Leitha-Kalk verwendet. Dieser wird bei Leibnitz in der Steiermark unterirdisch gebrochen. Er ist ein weicher Leitha-Kalk, der gut nachhärtet. Für die Restaurierung von Gewölberippen ist er ausreichend druckfest, für stärker belastete Bautei-

le ist er ungeeignet. Er entspricht in Struktur und Farbe dem Originalstein, ist jedoch weicher und leichter zu bearbeiten. Er sollte nur im Inneren von Gebäuden und nicht im unteren Mauerbereich verwendet werden. Feuchtigkeit kann zu größeren Schäden an diesem Stein führen.“

Weiters wurde der Aflenzer Sandstein unter anderem für Teile der Wiener Hofburg, das Haupttor des Wiener Zentralfriedhofs, die Luegerkirche und für Teile der Gesimse an den Hofmuseen verwendet. In Graz wurden z.B. die Wappentiere am Uhrturm aus Aflenzer Kalksandstein hergestellt.

2.6.5. Fotos Proben



Abbildung 8: Proben Aflenzer Kalksandstein

2.6.6. Verwendungsbeispiele

Graz, Herz Jesu Kirche, Kreuzrosen

<http://www.zottmann.at/info/projekte.htm>



Abbildung 9: Kreuzrosen der Herz Jesu Kirche (Graz)

2.7. Carrara Marmor

2.7.1. Vorkommen

Der weiße Marmor wird in Carrara (Italien, Provinz Carrara-Massa) in den Apuanischen Alpen abgebaut. Unter dem Begriff Carrara Marmor werden ca. 50 verschiedene Marmorsorten zusammengefasst, die in etwa 150 Steinbrüchen rund um Carrara abgebaut werden. Der Carrara Marmor zählt zu den begehrtesten Bildhauersteinen, aufgrund der unzugänglichen Lage der Steinbrüche in den Bergen meist über 1000m Seehöhe konnte bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts der Bedarf kaum gedeckt werden. Mit Fortschreiten der Technisierung konnte der Abbau wesentlich erleichtert werden und so wurde erst gegen 1960 eine Bedarfsdeckung des beliebten Werksteines erreicht (WIKIPEDIA (2008)).

2.7.2. Entstehung

Entstanden ist der Carrara Marmor aus den Kalkablagerungen des Tethys Meeres. Die Kontinentalplatten Afrika und Europa bewegten sich aufeinander zu und es kam zu einer Auffaltung und damit zur Entstehung der Apuanischen Alpen. Der hohe Druck und die Temperatur bei dieser Auffaltung bewirkten die Metamorphose der Kalkablagerungen zu Marmor.

Die Entstehungszeit des Carrara Marmors wird mit ca. 170 Millionen bis 200 Millionen Jahren angegeben (Weblink GEOSAMMLUNG UNI BREMEN (2008), SHEREMETI-KABASHI (2002)).

2.7.3. Petrographie

Feinkörniger, weißer bis grauweißer Marmor, die Textur ist je nach den bei der Bildung vorherrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen mehr oder weniger richtungslos körnig (SHEREMETI-KABASHI (2002)).

2.7.4. Verwendung

Aufgrund seiner feinkörnigen Struktur ist der Carrara Marmor ein beliebter Stein für Bildhauerarbeiten. Insbesondere die Sorte Statuario ist eine der begehrtesten, heute aber schon recht seltenen und dadurch teuersten Form des Carrara Marmor. Die billigeren Sorten werden gerne für exklusive Terrassenplatten, Fensterbänke und Fliesen für den Innenbereich im Hochbau verwendet. Die Preisspanne reicht von EUR 1.500,- bis EUR 10.000,- pro Kubikmeter. Der größte Teil des abgebauten Materials wird exportiert, wovon die arabischen Länder mit etwa 50% den größten Abnehmer darstellen (WIKIPEDIA (2008)).

2.7.5. Fotos Proben

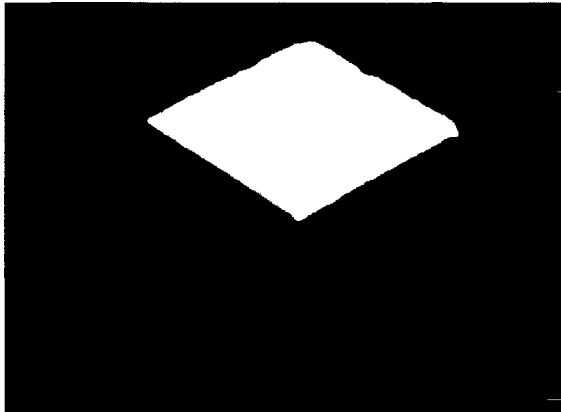


Abbildung 10: Probe Carrara Marmor

2.7.6. Verwendungsbeispiele

Das wohl berühmteste Werk aus Carrara Marmor ist der **David von Michaelangelo** (zwischen 1501 – 1504 entstanden), Michaelangelo verwendete für diese Skulptur den feinkörnigen und gleichzeitig teuersten Vertreter des Carrara Marmors, den Statuario.

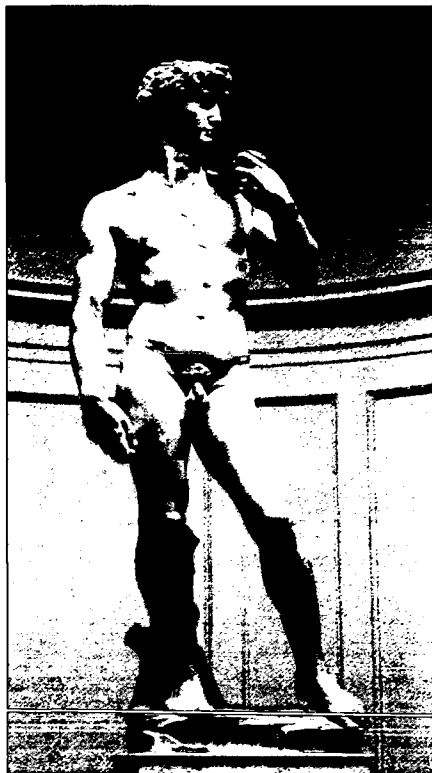


Abbildung 11: David von Michaelangelo

Die **Trajanssäule** (113 n.Chr. entstanden) zu Ehren des römischen Kaisers Trajan ist eines der ältesten heute noch erhaltenen Kunstwerke aus Carrara Marmor. Sie steht noch immer an ihrem ursprünglichen Ort, dem Trajansforum in Rom.

Neben den hochwertigen feinkörnigen Carrara Marmoren werden die zahlreichen weiteren Sorten, die eine gröbere Textur aufweisen gerne in Bauwerken eingesetzt. Als Fassadenplatten, Bodenbeläge oder Wandverkleidungen für feudale Eingangsbereiche oder Badezimmer. Weiters werden Fensterbänke, Tischplatten für Küchen und exquisite Einrichtungsgegenstände aus Carrara Marmor gefertigt. Die Hälfte des gewonnenen Carrara Marmors wird heute in arabische Länder exportiert um für die Gestaltung von Flughäfen oder Moscheen eingesetzt zu werden.

(<http://de.wikipedia.org/wiki/Carrara-Marmor>)- 3.9.2008

3. Verwitterung

3.1. Verwitterungsmechanismen

Die Verwitterung von Gesteinen kann durch physikalische, biologische und chemische Einflüsse vor sich gehen. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Verwitterungsmechanismen gegeben. In dieser Arbeit lag das Hauptaugenmerk bei den physikalischen Verwitterungsformen und im Speziellen auf den Einflüssen durch die Frost-Tauwechselbeanspruchung und die Zerstörung, resultierend aus der Beanspruchung durch Salzkristallisation. Aus diesem Grund wird nur ein kurzer Überblick über die übrigen Verwitterungsmechanismen gegeben und im Weiteren die für diese Arbeit interessanten Mechanismen der Salzkristallisation und der Frost-Tauwechsel-Verwitterung genauer beschrieben.

Übersicht Verwitterungsmechanismen:

Physikalische Verwitterungsformen	Chemische Verwitterungs-formen
Druckentlastung	Lösungsverwitterung
Temperaturwechselbeanspruchung	Kohlensäureverwitterung – Verkarstung
Frost-Tauwechsel Verwitterung	Oxidationsverwitterung
Salzkristallisation & Hydratation	Hydrolytische Verwitterung
Mechanische Zerstörung	Schwefelsäureverwitterung
Physikalisch-biolog. Verwitterung	Chemisch-biolog. Verwitterung
Wurzelsprengung	Stoffwechselprodukte (z.B. organische Säuren)

Tabelle 1: Verwitterungsmechanismen

3.1.1. Salzkristallisation

Die Zerstörung des Gesteinsgefüges durch den Einfluss von Salzen kann unterschiedliche Ursachen haben, der Salzkristall kann dabei durch den Kristallisationsdruck, durch den linearen Wachstumsdruck oder die Hydratation Drücke entwickeln, die das Gesteinsgefüge zerstören. Diese Unterteilung hat CORRENS (1926) formuliert und sie ist bis heute gebräuchlich (DUTTLINGER (1990)).

Kristallisationsdruck

Der Schädigungsmechanismus ist dabei ähnlich dem, der auftritt, wenn Wasser im Porenraum eines Gesteines gefriert und dabei durch seine Volumensvergrößerung Druck auf die Porenwand und damit auf das Gesteinsgefüge ausübt.

Der Kristallisationsdruck entsteht in Poren, in denen übersättigte Salzlösungen vorhanden sind. Die Größe des dabei entstehenden Druckes steht im Zusammenhang mit der bei der Auskristallisierung vorherrschenden Temperatur und mit dem Grad der Übersättigung der Salzlösung.

Anhand folgender Formel nach BREHLER (1951) kann eine Berechnung des Kristallisationsdruckes durchgeführt werden

$$P[\text{N/mm}^2] = (R * T[^\circ\text{K}]) / dv * \ln(c / c_s)$$

P..... Kristallisationsdruck

R Gaskonstante

T..... Temperatur

dv Differenz zwischen Volumen Salz + Lösungsmittel und
der daraus resultierenden Salzlösung

c/c_s Verhältnis der Konzentration der übersättigten Lösung zur
Sättigungskonzentration

Der Kristallisationsdruck wird in dem in dieser Arbeit ausgeführten Versuch der Salzkristallisation durch das Trocknen der Proben im Trockenschrank simuliert. Für diesen Versuch wurde eine 14%ige Lösung von Magnesiumsulfat – 7 – Hydrat verwendet.

Aus WEBER H.(1985) die relevanten Kristallisationsdrücke für den ausgeführten Versuch:

Kristallisationsdrücke in N/mm ²		Kristallisationsdruck			
		$c/c_s = 2$		$c/c_s = 10$	
Bezeichnung	Molvolumen	0°C	50°C	0°C	50°C
MgSO ₄ * 7H ₂ O	147	10,5	12,5	35,0	41,5
MgSO ₄ * 6H ₂ O	130	11,8	14,1	39,5	49,5
MgSO ₄ * 1H ₂ O	57	27,2	32,4	91,0	107,9

Tabelle 2: Kristallisationsdrücke von Magnesiumsulfat in seinen Hydratstufen in [N/mm²]

Wie schon in der Beschreibung des Schadensmechanismus erwähnt, ist für die Auskristallisierung der Salze der Übersättigungsgrad der Lösung verantwortlich. Die Temperatur ist hierbei der maßgebende Parameter, der die Sättigungskonzentration bestimmt. Nachfolgend die Darstellung aus MÜLLER (1988), die den Zusammenhang zwischen der Sättigungskonzentration der Lösung und der Temperatur anhand ausgewählter Salze darstellt.

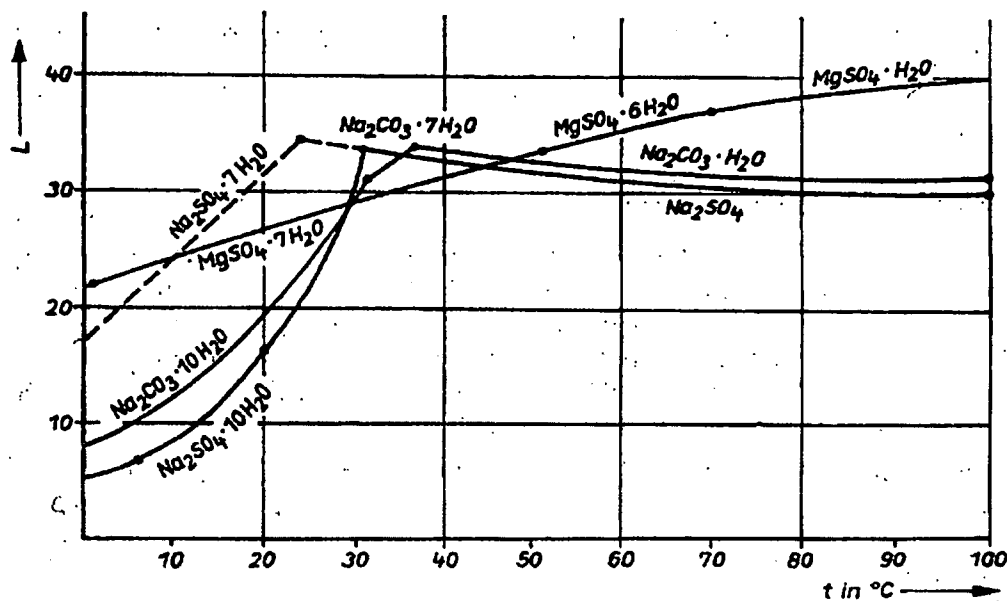


Abbildung 12: Löslichkeit ausgewählter Salze mit Umwandlungspunkten MÜLLER (1988)

Linearer Wachstumsdruck

Der lineare Wachstumsdruck entsteht, wenn in einem Porenraum bereits ein auskristallisiertes Salz vorhanden ist. Der Druck auf die umgebende Porenwand entsteht, wenn dem Salz weitere übersättigte Lösung zugeführt wird und er dadurch sein Wachstum fortführen kann. Nach DUTTLINGER (1990) ist dafür notwendig, dass ein Diffusionsraum zwischen Kristall und Hindernis vorhanden ist, um einen Lösungsfilm auf der Kristalloberfläche entstehen zu lassen. Dieser Lösungsfilm ermöglicht den Nachschub immer höher konzentrierter Lösung, um den immer weiter steigenden Kristallisationsdruck durch das Kristallwachstum zu ermöglichen.

Typische Schadensbilder aus dieser Verwitterungsform sind Abplatzungen an der Oberfläche von Bauwerken, dichte Oberflächenbehandlungen wie Dispersionsanstriche werden dabei von porösen Untergründen wie Putzen abgesprengt. Ein weiteres typisches Schadensbild sind krustenartige Ablösungen von Sandsteinoberflächen.

Hydratationsdruck

Der Hydratationsdruck entsteht, wenn Salze durch ihre hygroskopische Eigenschaft Wasser aufnehmen und dieses in ihr Kristallgitter einlagern. Die Kristalle wechseln dabei zwischen Hydratstufen und erfahren dadurch eine Volumsvergrößerung. Läuft dieser Vorgang bei normalen Temperaturverhältnissen ab ist diese Art der Verwitterung von besonderem Interesse. Der lineare Wachstumsdruck der Kristalle nimmt dann eine untergeordnete Rolle ein.

WEBER (1985) führt einige Salz an, die im niedrigen Temperaturbereich bis zu einer Temperatur von 35°C diesen Wechsel der Hydratationsstufen vollziehen können und im Hinblick auf Schadensbilder an Natursteinen von Interesse sind. Die von WEBER (1985) genannten Salze sind Calciumnitrat, Natriumsulfat, und Natriumcarbonat.

MORTENSEN (1933) liefert eine Formel zur Berechnung des Hydratationsdruck:

$$\Pi = (n * R * T) / (V_{\text{hydrat}} - V_{\text{wasserfr.ph}}) * \ln (P_{\text{luftfeuchte}} / P_{\text{hydrat}})$$

Π	Hydratationsdruck
n	Molzahl der Hydratphase
R	Gaskonstante
T	absolute Temperatur
V_{hydrat}	Volumen Hydratphase
$V_{\text{wasserfr.ph}}$	Volumen wasserfreie Phase
$P_{\text{luftfeuchte}}$	Dampfdruck der Luft
P_{hydrat}	Dampfdruck über hydratisiertem Salz

Aus dieser Beziehung ist ersichtlich, dass der Hydratationsdruck sich proportional zur Molzahl des Wassers verhält und umgekehrt proportional zur Volumendifferenz von Hydratphase und wasserfreier Phase. Weiters hängt der Hydratationsdruck von der Temperatur und vom Verhältnis des Dampfdruckes der Luft und des Dampfdruckes über der Hydratphase ab.

In der Praxis kommen Schäden, die aus dem Hydratationsdruck resultieren eine große Bedeutung zu, da sie bei gemäßigten klimatischen Verhältnissen ablaufen.

Dabei ist nach TORRACA (1986) nicht nur der Wechsel in eine höhere Hydratationsstufe mit einem schädigenden Einfluss auf das umgebende Gesteinsgefüge verbunden sondern auch der Übergang in eine niedrigere Hydratationsstufe.

Ist die Pore verschlossen und vollständig mit dem hydratisierten Kristall ausgefüllt und wechselt der Kristall aufgrund sich ändernder Umgebungsbedingungen seine Hydratationsphase dann entstehen zwei neue Endprodukte, die gemeinsam mehr Volumen beanspruchen als das Ausgangsprodukt (GSCHAIDER (2002)).

Herkunft schädlicher Salze

Salze, die ihre schädliche Wirkung in Bauteilen entfalten, können unterschiedliche Herkunft haben. Primär können Salze schon im Gestein vorhanden sein beziehungsweise in Mörteln oder Putzen vorkommen (TORRACA (1986)).

Sulfate werden meist aus den Luftschadstoffen, die gelöst in Wasser in Form von „saurem Regen“ in das Gestein oder das Bauwerk eindringen gebildet. Nitrate sind in landwirtschaftlich genutzten Gebäuden zu finden, sie werden durch tierische Ausscheidungsprodukte, die mit Bauteilen in Berührung kommen gebildet (WEBER(1984)).

Chloride werden im Straßendienst zur Beseitigung von Straßenglätte im Winterdienst eingesetzt. Gebäudeteile mit einer exponierten, straßenseitigen Lage sind von gelösten Chloriden am meisten betroffen.

Folgende schädliche Salze werden unterschieden (nach WEBER (1985))

Sulfate:

Magnesiumsulfat	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Calciumsulfat	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Natriumsulfat	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

Nitrate:

Magnesiumnitrat	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Calciumnitrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Kalksalpeter	$5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

Chloride:

Calciumchlorid	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Natriumchlorid	NaCl

Carbonate:

Natriumcarbonat	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Kaliumcarbonat	K_2CO_3
Calciumcarbonat	CaCO_3



Abbildung 13: Salzschaen: Kirche Pernegg

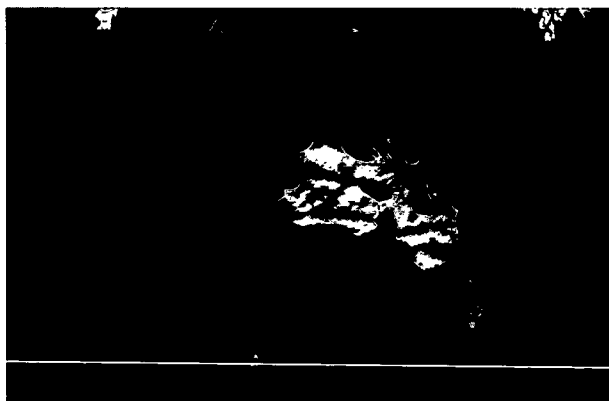


Abbildung 14: Salzschaen: Zentralfriedhof, Torbogen einer Gruft

3.1.2. Einfluss des Porenraumes und der Porenradienverteilung

Damit schädliche Salze in das Gesteinsgefüge eindringen können ist eine der Voraussetzungen, dass Poren im Gestein vorhanden sind. An dieser Stelle ist der Einfluss, den der Porenraum und die Porenradienverteilung auf die kapillare Aufnahme von Wasser und auf den Transport von Feuchtigkeit im Gestein durch Dampfdiffusion hat, dargestellt.

Kapillare Aufnahme von Wasser in porösen Festkörpern

Wasser wird durch Kapillarkräfte in engen Poren ins Innere des Gesteins transportiert. Die Kraft, die dabei wirkt, hängt von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit ab und von der Größe der Poren, in denen die Flüssigkeit transportiert wird. Die Kapillarkraft ist dabei umso größer je kleiner der Porenradius ist. Die Steighöhe, die die Flüssigkeit im Gestein erreichen kann ist dabei vom Gleichgewicht zwischen Flüssigkeitsnachschiebung durch das kapillare Saugen und dem Verdunsten der Flüssigkeit abhängig. Wie DÖLTL (2006) erwähnt kann nicht darauf geschlossen werden, dass in Poren, in denen eine große Kapillarkraft herrscht auch die größte Steighöhe erreicht werden kann

Der Ablauf der kapillaren Aufnahme von Wasser stellt sich schrittweise dar. Zuerst werden die kleinen Poren gefüllt, anschließend kommt es zu einer Benetzung der Porenwände der größeren Poren und schlussendlich zur vollständigen Füllung der großen Poren. Das Austrocknungsverhalten weist eine umgekehrte Reihenfolge auf. Zuerst verdunstet das Wasser aus den großen Poren und dann das Wasser aus den Kapillaren. TORRACA (1986)

Verdunstung und Dampfdiffusion

Die Verdunstung tritt ein wenn die den Gesteinskörper umgebende Luft einen Feuchtegehalt von weniger als 100% relative Luftfeuchtigkeit aufweist. Der Verdunstungsvorgang wird dabei von vorbeiströmender Luft an der Oberfläche des Gesteins beschleunigt. Wie bei der kapillaren Wasseraufnahme beschrieben wird bei der Austrocknung des Gesteins die Feuchtigkeit zuerst in Form von flüssigem Wasser an die Gesteinsoberfläche transportiert. Wenn keine durchgehenden Wassertransportwege

mehr vorhanden sind setzt die Dampfdiffusion in den Poren des Gesteins ein. Dadurch kommt es zu einer deutlichen Verlangsamung der Austrocknungsgeschwindigkeit. GSCHÄIDER (2002) merkt an, dass ein vollständiges austrocknen nur sehr schwer zu erreichen ist.

3.1.3. Frost-Tauwechsel-Verwitterung

Die Frost-Tauwechsel-Verwitterung zählt ebenfalls zu den physikalischen Verwitterungsformen, sie verursacht durch allseitigen Druck auf das Gestein von innen Gefügenderstörungen.

Die Zerstörung wird durch die Volumenzunahme von in den Poren eines Gesteines vorhandenem Wasser verursacht, welches durch Gefrieren bei 0° Celsius von der flüssigen in die feste Phase übergeht. Die Volumenzunahme des gefrierenden Wassers beträgt etwa 9%. Damit die Kräfte durch die Volumenvergrößerung wirken können, müssen die Poren mindestens einen Füllungsgrad von 91% aufweisen. Das in einer vollständig gefüllten Pore vorhandene Wasser kann ohne die Möglichkeit sich anderweitig auszudehnen einen Druck von bis zu 200 N/mm² auf das umgebende Gestein ausüben.

In dieser Arbeit wurde dieser Schädigungsmechanismus mit Hilfe des Frost-Tauwechsel-Versuches simuliert.

3.1.4. Temperaturverwitterung

Die in einem Gestein wirkenden Temperaturunterschiede können natürliche und künstliche Ursachen haben. Die Temperaturunterschiede bedingt durch tageszeitliche Schwankungen der Lufttemperatur können durch die direkte Sonneneinstrahlung auf die Oberfläche eines Objektes noch drastisch verstärkt werden. Spannungen an der Oberfläche von Gesteinskörpern oder Bauwerken durch die unterschiedliche Temperaturverteilung über den Querschnitt bewirken eine Zerstörung des Gesteins oder eine Ablösung von darunter liegenden Bauteilen. Verstärkt wird dieses Verhalten, wenn die angrenzenden Bauteile aus unterschiedlichen Materialien bestehen und einen unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizient aufweisen.

4. Steinfestiger und ihre Wirkungsweise - Steinkonservierung

Ziel der Steinkonservierung ist es den Verwitterungsprozess von Natursteinen zu verlangsamen oder völlig aufzuhalten, um erhaltenswertes Kulturgut vor seiner Zerstörung zu bewahren.

SNETHLAGE R. aus GROBE J. (2001):

„Alle Baustoffe verlieren durch den physikalischen und chemischen Angriff der Atmosphären an Festigkeit. Das eingesetzte Konservierungsmittel soll diesen Verlust ausgleichen und zwar nach Möglichkeit bis zum Wert des unverwitterten Gesteins. Das Ziel ist die Herstellung eines von innen nach außen homogenen Festigkeitsverlaufes.“

Ziel der Festigung muss es dabei sein, ein dem natürlichen Material in seinen Eigenschaften ähnliches Bindemittel zuzuführen, um die Korn-Korn Bindung zu verbessern. Dabei soll gleichzeitig versucht werden die ursprünglichen Gesteinseigenschaften wieder herzustellen und eine bessere Widerstandsfähigkeit der oberflächennahen Schichten gegen Verwitterungsangriffe aus der Atmosphäre zu erzielen.

4.1. Anforderungen an Steinfestiger

Aus der zuvor genannten Zielvorstellung einer idealen Steinfestigung lassen sich die Eigenschaften die ein Festigungsmittel erfüllen soll wie folgt ableiten

- Eindringtiefe bis zur Tiefe des unverwitterten Gesteins
- Keine Bildung von bauschädlichen Nebenprodukten
- Die bauphysikalischen Eigenschaften sollen nicht negativ verändert werden (Wasserdampfdurchlässigkeit, Wärmeausdehnungskoeffizient)
- Keine Farbveränderung des Gesteins durch Festigungsmittel
- Die Wasserdampfdiffusionsfähigkeit des Gesteins sollte nicht herabgesetzt werden

- Homogenes Festigkeitsprofil, keine Krustenbildung
- Vermeidung zusätzlicher Spannungen durch hygri-sche oder thermische Dehnungen
- Das Material muss resistent gegen chemische Angriffe sein
- Das Produkt sollte umweltverträglich sein
- Keine Gesundheitsgefährdung für en Anwender darstellen

aus WEBER H. (1985), SAUDER M. und SCHLOENBACH R. (1995), TORRACA (1986)

4.2. *Gebräuchliche Festigungsmittel*

Die Festigungsmittel können grundsätzlich in organische und anorganische Mittel eingeteilt werden. Heute gelangen im wesentlichen Produkte auf Kieselsäureester-basis für Sandsteine im weiteren Sinne und Acrylharze (z.B. Polymethylmetacrylat, etc.) für Marmore zur Anwendung.

In dieser Arbeit wurde ein Steinfestiger verwendet, über dessen Zusammensetzung keine Details bekannt waren. Die Herstellerfirma SANOTEC war nicht bereit die chemische Zusammensetzung ihres Produktes SANOFIX 2 bekannt zu geben, um die von ihnen gewährten Patentrechte nicht zu gefährden.

Aus diesem Grund wird hier nicht weiter auf die einzelnen Festigungsarten mit ihren Vor- und Nachteilen eingegangen. Es sei an dieser Stelle auf die Arbeiten von DÖLTL A. (2006), FALK GIERLINGER A. (2004), WEBER H. (1985), GROBE J. (2001), SNETHLAGE R. und WENDLER R. (1995) und SAUDER M. und SCHLOENBACH R. (1995) verwiesen.

4.3. *Durchführung der Festigung*

Behandlung der untersuchten Proben

Die Festigung der Proben wurde durch einen Laboranten der Firma SANOTEC im Labor der Firma SANOTEC durchgeführt.

Die Proben wurden wie in Kapitel 2.2 beschrieben im Labor des Institutes für Ingenieurgeologie der TU Wien hergestellt und dann bei einer Temperatur von 20°C für mindestens 4 Wochen gelagert bevor sie der Firma SANOTEC zur weiteren Behandlung übergeben wurden.

Es wurden zwei verschiedene Lösungskonzentrationen des Produkts SANOFIX verwendet. Die erste Serie der Proben (15 Würfel je Gesteinsart) blieb unbehandelt, die zweite Serie (erkennbar an der Bezeichnung 14/XX) wurde mit SANOFIX Steinfestiger behandelt, der im Verhältnis 1:14 mit Wasser verdünnt wurde. Bei der Festigung der dritten Serie wurde der Steinfestiger im Verhältnis 1:7 mit Wasser verdünnt. Die Steine der dritten Serie sind an der Bezeichnung 7/XX erkennbar. Die Verdünnung im Verhältnis 1:7 war die höchste Konzentration die seitens der Firma SANOTEC zur Anwendung freigegeben wurde.

Die Proben wurden einmal für 30 Sekunden in die Lösung mit dem entsprechenden Verhältnis eingetaucht. Anschließend wurden die Proben im Labor bei 14°C für eine Woche gelagert, dann wurden sie für drei Wochen in den Büroräumlichkeiten bei ca 22°C gelagert. Nach dieser Zeitdauer von 28 Tagen wurden die Proben wieder ins Labor der TU Wien gebracht und waren seitens der Firma SANOTEC für die Verwitterungssimulation freigegeben.

Bei DÖLTL (2006) wurde ebenfalls der SANOFIX 2 Festiger der Firma SANOTEC untersucht. Die Behandlung der Proben erfolgte in der Arbeit von DÖLTL (2006) mit einer wesentlich höheren Konzentration. Die Proben wurden drei Tränkungsverfahren unterworfen. Im Ersten Schritt wurden die Proben mit 1:7 verdünnten SANOFIX 2 für ein Minute getränkt, im Zweiten Schritt nach einer Woche mit 1:5 verdünnten Festiger für 30 Sekunden und im Dritten Schritt zwei Tage später dann eine letzte Tränkung mit 1:3 verdünnten Festiger ebenfalls für 30 Sekunden.

Optisches Erscheinungsbild der gefestigten Steine:

Die mit Steinfestiger behandelten Proben wiesen bis auf die Proben des Carrara Marmor einen leichten weißen Schleier auf.

In der Verwendungsempfehlung des Festigungsmittels findet man einen Hinweis darauf diesen Schleier mit einem Gemisch an Festiger und Wasser und einem Schwamm zu entfernen. Die Proben die in dieser Arbeit wurden allerdings nicht weiter behandelt.

Nach längerer Lagerung zeigten die Proben des Carrara Marmor eine leicht gelbliche Färbung.

5. Versuchsdurchführung

5.1. *Bestimmung der Rohdichte*

Die Bestimmung der Rohdichte der Proben wurde analog ÖNORM B3121 durchgeführt. Auf die Anwendung der neueren schon vorliegenden wurde EN 1936 verzichtet. Der geforderte Vakuumkessel, der ein allmähliches Eintauchen der Proben ermöglicht, stand für die Versuche nicht zur Verfügung.

Rohdichte: unter Rohdichte ρ_R versteht man die Trockenmasse der Raumeinheit eines Gesteines einschließlich vorhandener Gesteinshohlräume

Die Rohdichte der Proben wurde nach dem Auftriebsverfahren ermittelt. Die Proben bestanden aus Würfeln mit 4cm bzw. 5cm Kantenlänge.

Die Masse wurde durch Wägen der bis zur Massenkonzanz getrockneten Probenkörper ermittelt. Die Temperatur im Trockenschrank wurde abweichend zur ÖNORM B3121 mit 70°C gewählt, um temperaturbedingte Veränderungen der Proben zu vermeiden. Der Rauminhalt wurde mittels Auftriebsverfahren bestimmt.

Die Rohdichte wurde an allen Proben ermittelt, die in dieser Arbeit behandelt wurden. Pro Gesteinsart und Behandlungsart mit Steinfestiger wurden 15 Proben untersucht.

Durchführung gemäß Auftriebsverfahren:

Nachdem die Trockenmasse durch Wägen bestimmt wurde, wurden die vorbereiteten Proben bei Raumtemperatur (20°C +/- 2°C) in ein Wasserbad mit einer Überdeckung von 20mm +/- 5mm eingelegt und darin 24 Stunden gelagert. Nach der Lagerung wurden die Proben aus dem Wasserbad entnommen, mit einem feuchten Schwamm abgetupft und unmittelbar gewogen. Anschließend wurden die Proben in den Wasserbehälter der hydrostatischen Waage getaucht und gewogen.

Die Prüfliquidität muss dieselben Eigenschaften haben wie die Flüssigkeit, in der die Proben gelagert wurden. In den durchgeführten Versuchen kam sowohl als Prüfliquidität als auch als Flüssigkeit, in der die Proben gelagert wurden, Leitungswas-

ser des Wiener Leitungswassernetzes zum Einsatz, die Temperatur des Wasser entsprach der Raumtemperatur des Labors und wird hier mit 20°C +/-2°C angegeben.

Die Rohdichte wurde anhand folgender Formeln errechnet:

$$\rho_R = m_t / V_R$$

ρ_R Rohdichte [g/cm³]

m_t Masse trocken [g]

$$V_R = (m_f - m_a) / \rho_F$$

m_f Masse wassersatt [g]

m_a Masse unter Auftrieb [g]

ρ_F Dichte der Prüfflüssigkeit [g/cm³]

5.2. Wasseraufnahmeverhalten

Das Wasseraufnahmeverhalten wurde in Anlehnung an die ÖNORM B3122 untersucht. Auf die Anwendung der neuen schon vorliegenden EN 13755 wurde verzichtet. Die Messintervalle wurden abweichend zur Norm – 1. Wägung nach 48h +/- 2h - deutlich kürzer gewählt. Es wurden je Prüfserie zwei Proben ausgewählt. Für die Beurteilung der Eigenschaften des Steinfestigers waren das Wasseraufnahmeverhalten und das Austrocknungsverhalten von besonderem Interesse.

Die Produktbeschreibung des untersuchten Steinfestigers SANOFIX 2 der Firma SANOTEC versprach unter anderem eine hohe Wasserdichte bei gleichzeitiger Wasserdampfdurchlässigkeit.

Wasseraufnahme Langzeitversuch

Die Proben wurden im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. Die Massenkonstanz gilt als erreicht, wenn die Masse der Probe sich nach 24h um nicht mehr als 0,1% ändert. Es wurde analog der Bestimmung der Rohdichte die Temperatur im Trockenschrank mit 70°C gewählt.

Nach der Trocknung wurden die Proben gewogen und die Trockenmasse festgestellt. Die Proben wurden anschließend in ein Wasserbad eingebracht. Bei der Lagerung der Proben wurde darauf geachtet, dass das Wasser ungehindert an alle Seitenflächen der Probe gelangen konnte. Die Würfel wurden auf einem Metallgitter gelagert, dessen Abstand zum Boden etwa 3cm betrug. Der Abstand zwischen den Proben betrug mindestens 2cm, um eine Beeinflussung der Proben untereinander zu vermeiden (siehe Abbildung 15).

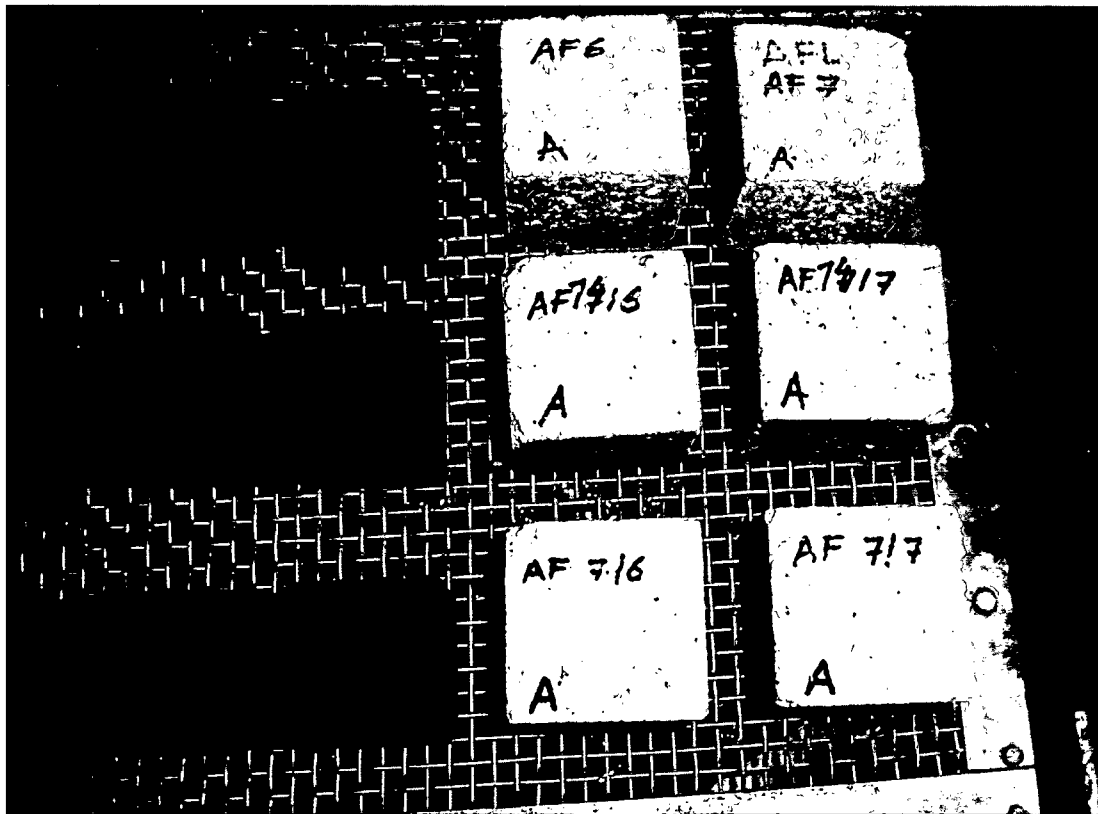


Abbildung 15 Versuchsanordnung Langzeitwasseraufnahme

Die Messintervalle wurden entsprechend den Eigenschaften der untersuchten Natursteine mit 30sek, 1min, 2min, festgelegt, um signifikante Unterschiede im Wasseraufnahmeverhalten der behandelten und unbehandelten Proben aufzeigen zu können.

Nach der Lagerung der Proben im Wasser wurden sie aus dem Wasserbad entnommen und unmittelbar gewogen. Zuvor wurden sie mit einem Baumwolltuch abgetupft, um sie vom oberflächlichen Haftwasser zu befreien und eine matte Oberfläche

zu bekommen. Nach dem Wägen wurden die Proben wieder ins Wasserbad eingebracht. Die Wägung der Proben erfolgte sehr rasch, um zwischenzeitliches Entweichen des in die Poren eingedrungenen Wassers zu vermeiden. Es wurden daher immer nur kleine Prüfserien mit maximal sechs Proben behandelt.

Das Austrocknungsverhalten der Proben wurde analog der Wasseraufnahme durchgeführt. Die Proben wurden, nachdem keine Wasseraufnahme mehr beobachtbar war, dem Wasserbad entnommen und das Haftwasser mit einem Baumwolltuch entfernt. Anschließend wurden sie auf einem Metallgitterrost bei normalem Raumklima ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 50% rel. LF) gelagert und durch Wägen die Masseänderung zufolge Austrocknung gemessen.

5.3. Ultraschall-Laufzeitmessung – Impulsverfahren

Bei der Ultraschall-Laufzeitmessung handelt es sich um ein Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Dies ist vor allem dort gefordert, wo an bestehenden Objekten keine Probenentnahme möglich oder erwünscht ist. Die Methode beruht auf der Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen in festen Medien. Die Geschwindigkeit der Wellenfortpflanzung lässt dabei Rückschlüsse auf die Gefügestruktur des untersuchten Mediums zu.

Beeinflussende Parameter sind die Rohdichte, der Porenanteil, eine eventuelle Wassersättigung der Probe und Gefügestörungen wie z.B. Risse. FLEISCHER [2002] stellte im Zuge seiner Arbeit fest, dass die Messlänge Einfluss auf das Ergebnis hat.

Für die Beurteilung der Proben wurde die Ultraschallgeschwindigkeit als Vergleichsbasis herangezogen.

Formel:

$$V \text{ [km/s]} = d \text{ [mm]} / t \text{ [\mu s]}$$

Begriffe:

$V_{\text{Longitudinal}}$ Ultraschallgeschwindigkeit
 d Distanz der Messköpfe des Ultraschallmessgerätes
 t_{LW} Laufzeit der Longitudinalwelle

Versuchsdurchführung:

Die Ultraschallmessung wurde unmittelbar nach der Rohdichtebestimmung an allen Proben durchgeführt. Die Würfel wurden in allen drei Hauptrichtungen untersucht, um strukturelle Unterschiede festzustellen. Im Zuge der weiteren Arbeit wurden mit Hilfe der Ultraschallmessung nach dem Frost-Tauwechsel und der Salzkristallisation Zerstörungen im Gefüge gemessen.

Die Proben wurden nach unkontrollierter Trocknung bei Raumtemperatur untersucht. Für die Messung stand ein Gerät der Firma LABEK zur Verfügung, das aus folgenden Komponenten besteht:

- EG-Meter Modell DIGI-EG c3
- Stativ Typ US ST2
- Laufzeitengeber Type LG-4US 06, 40kHz
- Laufzeitenaufnehmer Type LA-4 US 06, 40kHz

Die Oberfläche des Laufzeitengebers und des Laufzeitenaufnehmers sind mit einer weichen Gummiauflage versehen, um ein sattes Aufliegen auf der Probe zu gewährleisten.

5.4. Frost-Tauwechsel (FTW)

Die Frost-Tauwechselbeanspruchung wurde gemäß ÖNORM B3123 Teil 2 durchgeführt. Auf die Anwendung der neuen schon vorliegenden EN 12371 wurde verzichtet. Die Durchführung der Frost-Tauwechsel-Versuche analog zur EN 12371 hätte einen zu großen technischen Aufwand bedeutet (Einrichtung zur Kerntemperaturaufzeichnung der Probe während der Versuchsdurchführung). Mit den zur Verfügung stehenden Mitteln wären die Versuche nicht möglich gewesen.

Die Beurteilung der Schäden, die durch die FTW Beanspruchung auftraten, wurde mit Hilfe der Ultraschall-Laufzeitmessung und einer Abnahme der Druckfestigkeit im einaxialen Druckversuch verifiziert. Weiters wurden sichtbare Schäden an den Proben dokumentiert.

Die ÖNORM B3123 Teil 1 legt als zulässigen Grenzwert der Festigkeitsabnahme 20% fest, so es sich um ein Gestein handelt, das Festigkeitsbeanspruchungen ausgesetzt ist.

Versuchsdurchführung:

Die FTW Beanspruchung wurde am wassergelagerten Probenmaterial durchgeführt.

Vor Versuchsbeginn wurden die Rohdichte und die Ultraschall-Laufzeit in allen drei Hauptrichtungen der Probewürfel ermittelt. Die Proben wurden anschließend im Trockenschrank bei 70°C für 72 Stunden getrocknet. Nach der Trocknung wurden die Proben im Labor auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Proben wurden anschließend in ein Wasserbad mit einer Überdeckung von 3cm +/-0,5cm eingebracht.

Die Auflage bildete ein Stahlgitter mit einer Maschenweite von 2-3mm und einem Abstand zum Boden von ca. 3cm. Der Abstand der Proben zueinander betrug mindestens 2cm. Nach der 24-stündigen Wasserlagerung wurden die Proben grob vom Haftwasser befreit und es wurde mit der ersten Befrostung begonnen. Für die Befrostung stand eine Tiefkühltruhe zur Verfügung deren Temperatur -20°C +/- 2°C betrug. Als Auflage der Proben dienten Holzroste, der Abstand zwischen den Proben betrug mindestens 5cm in allen Richtungen.

Im Anschluss an die Befrostung wurden die Proben für vier Stunden im Wasserbad aufgetaut. Die Temperatur des Wasserbades betrug beim Probeneintrag $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Nach dem Auftauen wurden die Proben vom Haftwasser befreit und sichtbare Schäden protokolliert. Danach wurden sie wieder für 20 Stunden befrosten. Die Frost-Tauwechselbeanspruchung wurde 25 Mal wiederholt. Nach dem letzten Belastungszyklus wurden die Proben im Trockenschrank getrocknet und die Trockenmasse m_f bestimmt. Weiters wurde die Rohdichte nach dem Auftriebsverfahren und die Ultraschall-Laufzeit gemessen. Zuletzt wurde noch, soweit die Proben noch eine prüffähige Form aufwiesen, die einaxiale Druckfestigkeit gemäß ÖNORM B 3124 Teil 2 in Richtung der höchsten Ultraschallgeschwindigkeit festgestellt.



Abbildung 16 Beispiel: Zogelsdorfer Sandstein, aus gefestigter Serie (1:7), nach Frost-Tauwechsel

5.5. Salzkristallisation

Die Salzkristallisationsversuche wurden in Anlehnung an die Diplomarbeit von GSCHAIER (2002) am Institut für Ingenieurgeologie der TU Wien durchgeführt.

Da die Ergebnisse der von GSCHAIDER (2002) durchgeführten Versuche mit Natriumsulfatlösung teilweise zu einer vollständigen Zerstörung der Proben führte wurden die hier durchgeführten Versuche ausschließlich mit einer Lösung aus Magnesiumsulfat durchgeführt. Ziel war es, dass die Proben sich nach den in der Norm vorgeschriebenen 15 Belastungszyklen noch in einem Zustand befinden, in dem Gefügeflockerungen mittels Ultraschall-Laufzeitmessung festgestellt werden können. Die Temperatur im Trockenschrank wurde abweichend zu GSCHAIDER (2002) beim Trocknungsvorgang mit 70°C festgelegt.

Versuchsdurchführung:

Als Probenmaterial kamen Würfel mit 40mm und 50mm Seitenlänge zur Verwendung.

Vor Beginn der Versuche wurde an den Proben die Rohdichte bestimmt. Weiters wurde die Ultraschall-Laufzeit an allen drei Hauptrichtungen der Proben ermittelt.

Die Proben wurden anschließend im Trockenschrank des Institutes für Ingenieurgeologie der TU Wien bei 70°C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Nach dem Trocknen wurden die Proben im Labor bei etwa 20°C auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Anschließend wurde die Trockenmasse bestimmt.

Die Proben wurden nun auf Gitterrosten gelagert und in die Magnesiumsulfatlösung eingebracht (siehe Abbildung 17). Der Abstand zum Boden des Gefäßes betrug etwa 3cm, der Abstand der Proben zueinander betrug ca. 10mm. Die Überdeckung der Proben wurde während der Versuchsdurchführung bei 10mm +/- 2mm konstant gehalten. Verluste durch die Verdunstung des Wassers wurden durch das Abdecken der Behälter mit PE Folie so gering wie möglich gehalten, die verbleibenden Verluste durch Verdunstung und durch die Probenmanipulation wurden regelmäßig ausgeglichen.

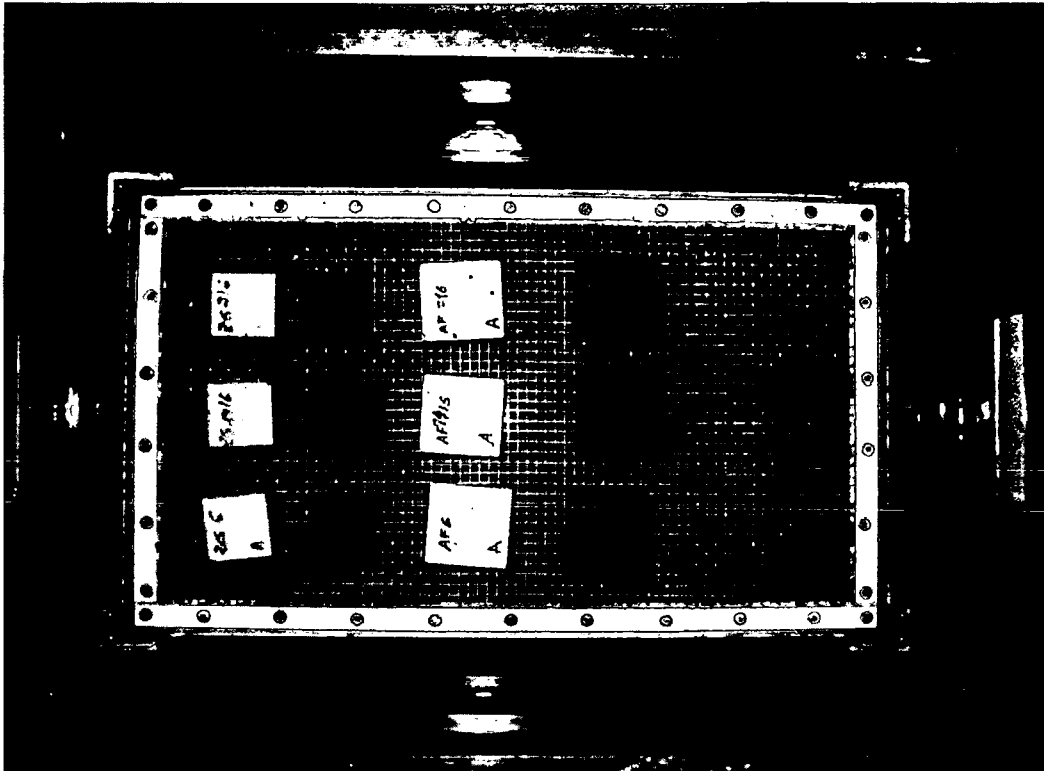


Abbildung 17 Lagerung der Proben in Magnesiumsulfatlösung

Nach zweistündiger Lagerung in der Lösung wurden die Proben herausgenommen und 30 Minuten bei Raumtemperatur gelagert, um die oberflächlich anhaftende Lösung abtropfen zu lassen. Anschließend wurden sie in den Trockenschrank gebracht und dort bei 70°C für mindestens 16 Stunden gelagert.

Im Anschluss an die Trocknung wurden die Proben bei Raumtemperatur für 3 Stunden gelagert, um sie auf Umgebungstemperatur abkühlen zu lassen. Danach wurden die Proben wieder für 2 Stunden in die Magnesiumsulfatlösung eingebracht.

Dieser Beanspruchungszyklus wurde 15-mal wiederholt.

Nach dem letzten Beanspruchungszyklus wurden die Proben aus dem Trockenschrank entnommen, für 3 Stunden bei Raumklima abgekühlt und anschließend für 24 Stunden in Wasser gelagert. Die Proben wurden danach unter fließendem Wasser von lose anhaftenden Teilen mit Hilfe einer Bürste gereinigt. Anschließend wurden die Würfel bis zur Massenkonstanz getrocknet und die Trockenmasse bestimmt. Weiters wurde eine Ultraschall-Laufzeitmessung durchgeführt, um Gefügeauflocke-

rungen durch die Kristallisationsdrücke feststellen zu können. Schlussendlich wurden die Proben noch einem einaxialen Druckversuch unterzogen und mit den Ergebnissen aus den Druckversuchen der Referenzgruppe verglichen.

Gegenüberstellung Normversuch – durchgeführter Versuch

Normversuch		Ausgeführter Versuch
ÖNORM EN 12370		
Würfel 40 +/- 1mm	Proben	Würfel 40mm, 50mm
Trocknen bis zur Massekonstanz bei 105°C +/- 5°C und Bestimmung der Trockenmasse	Trocknen	Trocknen bis zur Massekonstanz bei 70°C und Bestimmung der Trockenmasse
14%ige Lösung von Natriumsulfat – 10- Hydrat	Prüflösung	14%ige Lösung von Magnesiumsulfat – 7 - Hydrat
2h Tauchvorgang bei einer Überdeckung von 8mm +/- 2mm in Prüflösung bei 20°C +/- 0,5°C	Versuchsablauf	2h Tauchvorgang bei einer Überdeckung von 8mm +/- 2mm in Prüflösung bei 20°C +/- 0,5°C, auf Maschengitter gelagert
Trocknen der Proben im Trockenschrank für mind. 16h bei 105 +/- 5°C, Erwärmung innerhalb von 10h – 15h auf o.a. Temperatur, Beigabe eines Gefäßes mit 300 +/- 25ml Wasser je 125l Trockenschrankvolumen		Trocknen der Proben im Trockenschrank für mind. 16h bei 70 +/- 5°C
Abkühlen der Proben bei Raumtemperatur für 2h +/- 0,5h		Abkühlen der Proben bei Raumtemperatur für 2h +/- 0,5h
Einlegen der Proben in frisch angesetzte Prüflösung	15 Beanspruchungszyklen	Einlegen der Proben in bestehende Prüflösung, Ergänzen der Lösung und Kontrolle der Lösungskonzentration
24h Wasserlagerung, anschließend Trocknen bis zur Massenkonzanz, Bestimmung der Trockenmasse Mf		24h Wasserlagerung, anschließend Trocknen bis zur Massenkonzanz, Bestimmung der Trockenmasse Mf

Tabelle 3 Gegenüberstellung Normversuch – durchgeführter Versuch

5.6. Einaxiale Würfeldruckfestigkeit

Die einaxiale Würfeldruckfestigkeit wurde an allen Proben ermittelt. Die Referenzgruppe bildeten die Steine der Serie XX/1-5. An diesen Proben wurden keine Versuche durchgeführt, die eine Veränderung der Gefügestruktur bewirkt haben. Die Druckversuche wurden in Anlehnung an die EN 1926 durchgeführt.

Proben:

Als Proben kamen Würfeln mit Seitenlängen von 40mm und 50mm zum Einsatz. Die Belastungsgeschwindigkeit variierte dabei je nach Gesteinsart und Größe der Proben zwischen 40 N/s und 320 N/s. Entscheidend war bei der Wahl der Belastungsgeschwindigkeit die zu erwartende Bruchkraft, die zum Versuchsabbruch führte. Die Belastungsgeschwindigkeit innerhalb einer Versuchsgruppe wurde nicht variiert, da hier auch ein Einfluss auf die Bruchkraft zu erwarten ist. Innerhalb einer Versuchsgruppe kam jeweils nur eine der beiden Pressen zum Einsatz, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Versuchsdurchführung:

Die Versuche wurden in den Laborräumlichkeiten des Institutes für Ingenieurgeologie der TU Wien durchgeführt. Als Geräte standen zwei hydraulische Pressen zur Verfügung, deren Hydraulik von einem Computer gesteuert werden konnte. Die Software beider Systeme war identisch, so konnten die Versuchsparameter gleich eingestellt werden.

Die Pressen wiesen einen unterschiedlichen Druckkraftbereich auf, das neuere, kleinere Modell (Presse 1) erreicht eine Druckkraft bis 100kN.

Da diese Kraft bei einigen Proben nicht ausreichte, um sie zum Versagen zu bringen, wurden diese Gesteinsgruppen auf dem etwas älteren Modell (Presse 2) geprüft. Diese Presse erreicht eine Druckkraft von 2500 kN. Diese Kraft reichte bei allen Proben aus, um sie zum Versagen zu bringen.

Versuchsauswertung:

Die Bruchspannung wurde abgeleitet aus der Bruchkraft und den Probenabmessungen anhand folgender Formel:

$$\sigma_{DW} \text{ [N/mm}^2\text{]} = F_{\max} \text{ [N]} / A \text{ [mm}^2\text{]}$$

Begriffe:

σ_{DW} Bruchspannung

$F_{\max}$ Bruchkraft

A Querschnittsfläche der Proben

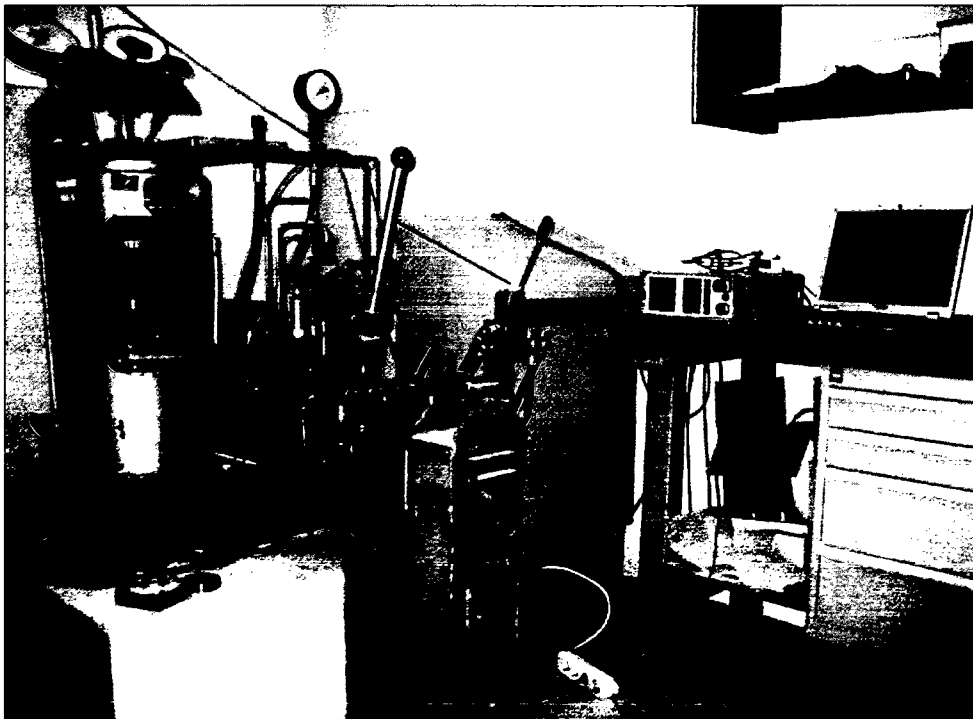


Abbildung 18: Presse 2, 2500 kN, Steuereinheit inkl. Computer

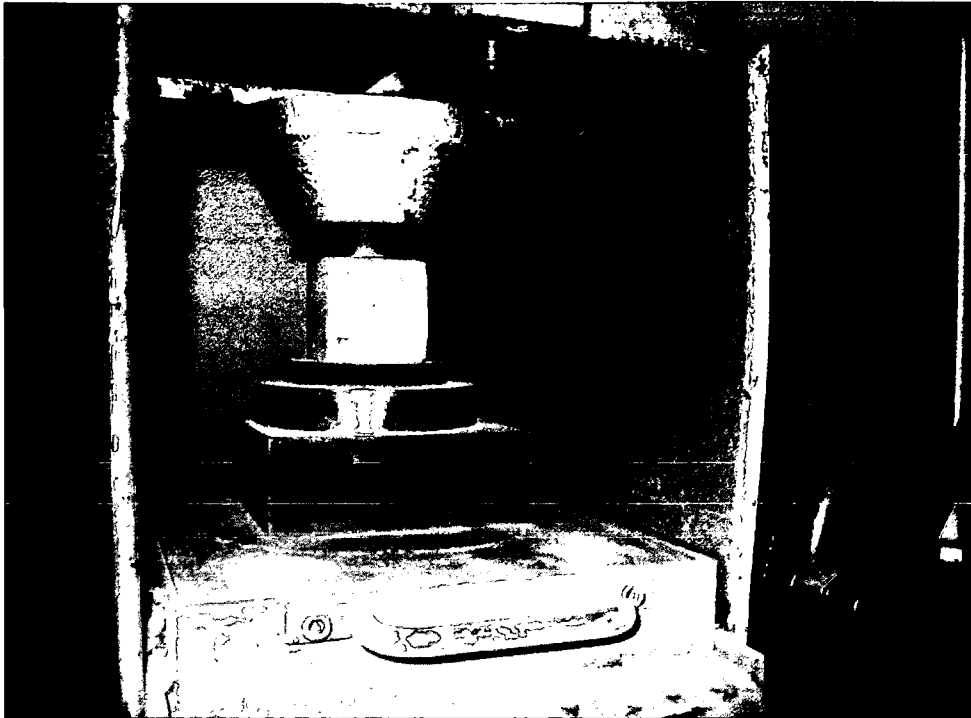


Abbildung 19: Flyschsandstein, 2500kN Presse



Abbildung 20: Versagensbild Wüstenzeller Sandstein – Druckversuch Presse 2

6. Auswertung der Ergebnisse

6.1. Zogelsdorfer Kalksandstein

An den Proben des Zogelsdorfer Kalksandstein wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Bestimmung der Rohdichte
- Wasseraufnahme- / Austrocknungsverhalten
- Ultraschall Laufzeitmessung
- Frost- Tauwechsel
- Salzkristallisation
- Druckversuche

Die Versuche wurden alle an würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 40mm +/- 2mm durchgeführt. Die Proben wurden aus bereits vorbereiteten Prismen mit quadratischer Grundfläche (40mm Seitenkantenlänge) hergestellt.

6.1.1. Bestimmung der Rohdichte

Für die Bestimmung der Rohdichte wurden alle 15 Proben jeder Versuchsgruppe herangezogen.

Die Rohdichte ergab für die Versuchsgruppe der unbehandelten Proben eine Rohdichte von 2,08 g/cm³ für die Varietät A und eine Rohdichte von 1,88 g/cm³ für die Varietät B. DÖLTL A. (2006) gibt die Rohdichte für die Varietät A mit 2,26 g/cm³ und für die Varietät B 1,91 g/cm³ an, FALK – GIERLINGER (2004) führt für die Varietät A 2,04 g/cm³ und für die Varietät B 1,87 g/cm³ an. Weitere Werte aus der Literatur sind in Kapitel 2.3.5 angegeben.

Bei der Betrachtung der Rohdichte der drei Versuchsgruppen fallen keine signifikanten Unterschiede auf. Die Behandlung des Materials mit dem Festigungsmittel hatte kaum Auswirkung auf die Rohdichte.

Veränderung der Rohdichte in %	
1:14	1:7
-0,18 %	-1,06 %

Tabelle 4: Unterschiede der Rohdichte der drei Versuchsgruppen in %, bezogen auf die unbehandelte Referenzgruppe (ZG 1 – ZG 15)

Mittelwert	Maximum	Minimum
1,99	2,32	1,79

Tabelle 5: Rohdichte ZG 1 – ZG 15, unbehandelt

Mittelwert	Maximum	Minimum
1,99	2,31	1,85

Tabelle 6: Rohdichte ZG 14/1 – ZG 14/15, behandelt mit Festiger/Wasser 1:14

Mittelwert	Maximum	Minimum
1,97	2,31	1,79

Tabelle 7: Rohdichte ZG 7/1 – ZG 7/15, behandelt mit Festiger/Wasser 1:7

6.1.2. Wasseraufnahme – Austrocknungsverhalten

Wasseraufnahme - Langzeitversuch

Für die Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens wurden jeweils zwei würfelförmige Proben jeder Serie herangezogen (ZG 6 – 7, ZG 14/6 – 7, ZG 7/6 – 7). Verglichen wurden das unterschiedliche Verhalten der unbehandelten Proben im Vergleich zu den behandelten Proben mit einem Festiger – Wasser Verhältnis von 1:14 sowie 1:7. Weiters wurde nach der Wasseraufnahme, die über einen Zeitraum von drei Wochen beobachtet wurde, das Austrocknungsverhalten der Proben untersucht und ausgewertet.

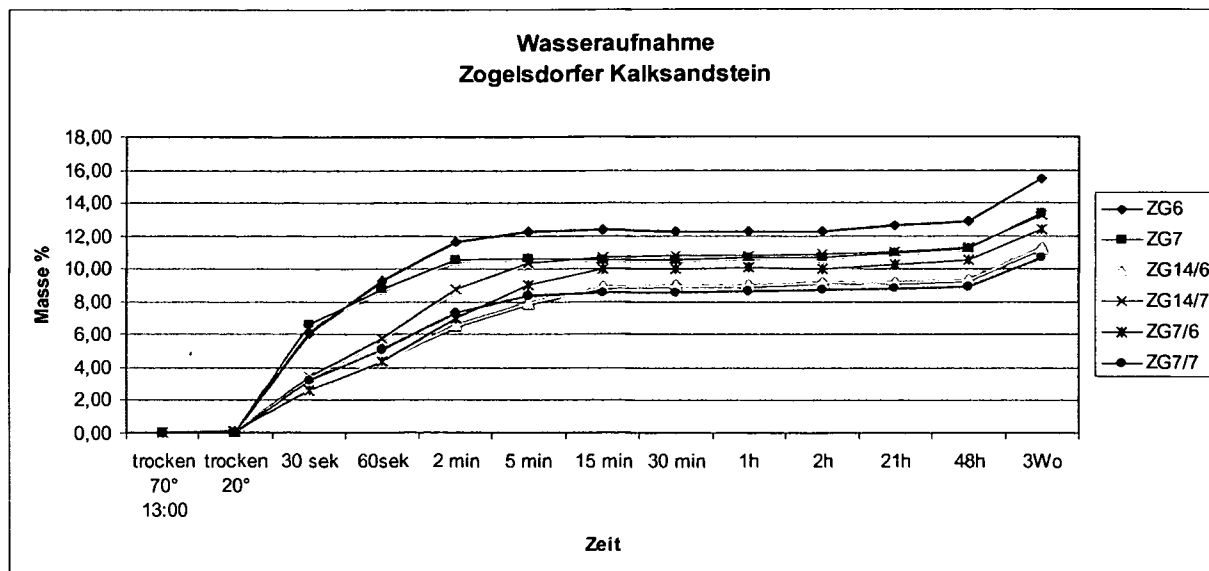


Tabelle 8: Langzeit Wasseraufnahme Zogelsdorfer Kalksandstein

Deutlich ist zu erkennen, dass die unbehandelten Proben in den ersten 15 Minuten wesentlich schneller Wasser aufnehmen als die behandelten Proben. Die behandelten Proben erreichen aber ebenso wie die unbehandelten Proben nach etwa 15 Minuten einen Punkt, an dem die Wasseraufnahme annähernd stoppt.

Das Verhalten der drei Serien ist dann sehr ähnlich. Nach ca. 24 Stunden ist ein neuerlicher Anstieg der Wasseraufnahme zu beobachten und nach Beendigung des Versuches nach drei Wochen zeigt sich noch einmal ein deutlicher Anstieg des Wassergehaltes. FALK GIERLINGER (2004) führte dies auf die hygrische Dehnung der Proben zurück. Es könnte aber auch sein, dass zu diesem Zeitpunkt erst die feinsten Kapillaren erreicht werden.

Austrocknungsverhalten:

Die Proben wurden anschließend an den Wasseraufnahmeversuch nach drei Wochen Wasserlagerung auf ihr Austrocknungsverhalten untersucht. Die Proben wurden bei 20°C Raumtemperatur auf einem Gitterrost gelagert und in regelmäßigen Abständen gewogen.

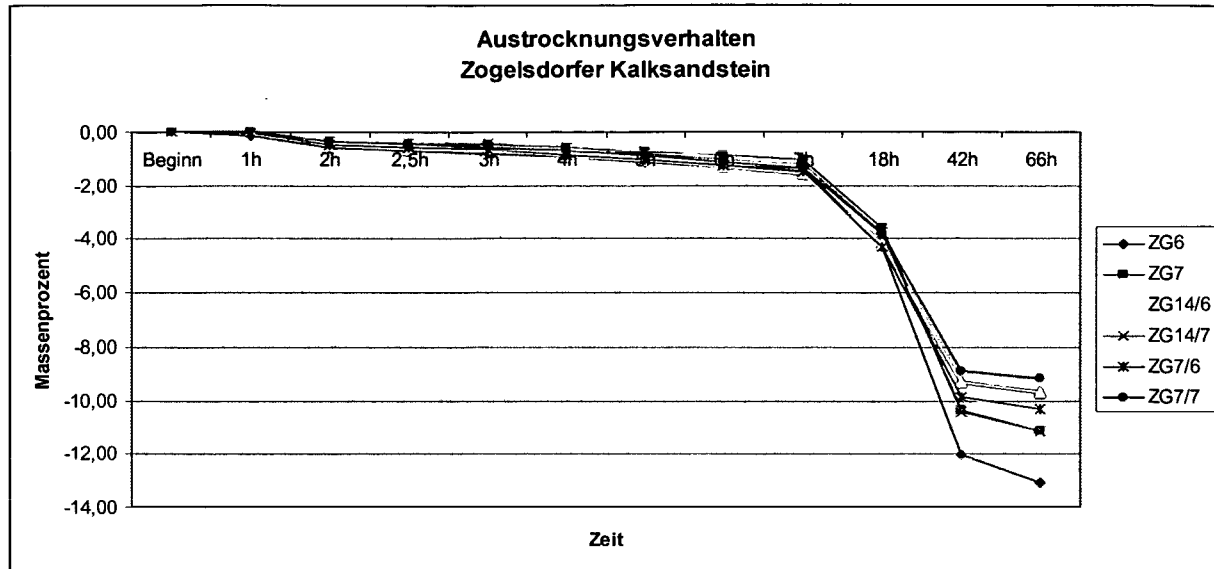


Tabelle 9: Austrocknungsverhalten Zogelsdorfer Kalksandstein

Die Versuchsgruppen zeigen zu Beginn ein ähnliches Verhalten. Die Proben sind in dieser Phase noch durchfeuchtet und die Verdunstung findet an der Oberfläche der Proben statt. Erst als der Feuchtigkeitsgehalt sinkt und die Dampfdiffusion der bestimmende Geschwindigkeitsfaktor wird zeigt sich, dass die mit Steinfestiger behandelten Proben langsamer trocknen als die unbehandelten Proben.

6.1.3. Ultraschall-Laufzeitmessung

Die Ultraschall-Laufzeitmessungen wurden an allen Proben vor Beginn der Versuche durchgeführt. Die Ultraschall Laufzeit wurde dabei in allen drei Richtungen der Würfel gemessen und mit Hilfe der Probenabmessungen in die Ultraschall-Geschwindigkeit umgerechnet. Die Messungen wurden nach Beendigung der Frost Tauwechsel Versuche und des Magnesiumsulfattest wiederholt und mit den Ausgangswerten verglichen.

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	3,35 km/s	3,31 km/s	3,37 km/s	3,36 km/s
Serie 1:14	3,33 km/s	3,23 km/s	3,42 km/s	3,35 km/s
Serie 1:7	3,27 km/s	3,29 km/s	3,29 km/s	3,23 km/s

Tabelle 10: Ultraschall-Geschwindigkeit vor Versuchsbeginn

Die unbehandelte Gruppe des Zogelsdorfer Sandsteins wies die höchste Ultraschall Geschwindigkeit auf mit 3,35 km/s im Mittel. Die zweite Serie der Proben, die mit Festiger im Verhältnis 1:14 verdünnt behandelt wurden, zeigte eine geringere Ultraschall-Geschwindigkeit mit 3,33 km/s. Die dritte Versuchsgruppe, die mit einer doppelten Festigerkonzentration (1:7) behandelt wurden, zeigte eine mittlere Ultraschall Geschwindigkeit von 3,27 km/s. Die Unterschiede sind aber so gering, dass hier keine Rückschlüsse auf die Behandlung der Proben als Ursache der geringeren US-Geschwindigkeit gemacht werden können.

Frost Tauwechsel / Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	3,22 km/s	3,19 km/s	3,22 km/s	3,24 km/s
Serie 1:14	3,51 km/s	3,21 km/s	3,76 km/s	3,55 km/s
Serie 1:7	3,22 km/s	3,26 km/s	3,22 km/s	3,2 km/s

Tabelle 11: Ultraschall-Geschwindigkeiten der Gruppe ZG 1-5, ZG 14/1-5, ZG 7/1-5

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,86 km/s	2,84 km/s	2,85 km/s	2,88 km/s
Serie 1:14	3,04 km/s	2,81 km/s	3,19 km/s	3,12 km/s
Serie 1:7	2,84 km/s	2,87 km/s	2,86 km/s	2,79 km/s

Tabelle 12: Ultraschall-Geschwindigkeiten Gruppe ZG 1-5, ZG 14/1-5, ZG 7/1-5 nach Durchführung des Frost-Tauwechsel-Versuches

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	-11,21 %	-10,97 %	-11,46 %	-11,19 %
Serie 1:14	-13,44 %	-12,68 %	-15,32 %	-12,13 %
Serie 1:7	-11,99 %	-12,09 %	-11,29 %	-12,59 %

Tabelle 13: Veränderung der Geschwindigkeit in %

Durch den Frost-Tauwechsel-Versuch kommt es in der unbehandelten Gruppe zu einer Abnahme der Ultraschall-Geschwindigkeit von 11%, die Gruppe der mit 1:14

verdünntem Festiger behandelten Proben zeigte eine Abnahme der Ultraschall Geschwindigkeit von 13%. Die dritte Serie an Proben (1:7) zeigte wieder einen geringeren Abfall der Ultraschall Geschwindigkeit von 12 %.

Salzkristallisation / Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit

Vor Versuchsbeginn				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	3,37 km/s	3,31 km/s	3,39 km/s	3,4 km/s
Serie 1:14	3,08 km/s	3,09 km/s	3,08 km/s	3,07 km/s
Serie 1:7	3,42 km/s	3,42 km/s	3,5 km/s	3,33 km/s

Tabelle 14: Ultraschall-Geschwindigkeiten der Gruppe ZG 7-10, ZG 14/7-10, ZG 7/7-10

nach 14 Tagen Salzkristallisation				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	3,36 km/s	3,3 km/s	3,38 km/s	3,4 km/s
Serie 1:14	3,39 km/s	3,42 km/s	3,34 km/s	3,41 km/s
Serie 1:7	3,43 km/s	3,36 km/s	3,51 km/s	3,42 km/s

Tabelle 15: Ultraschall-Geschwindigkeiten der Gruppe ZG 7-10, ZG 14/7-10, ZG 7/7-10 nach Durchführung des Salzkristallisationsversuch

Veränderung der Ultraschall-Geschwindigkeit in %				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	-0,13 %	-0,19 %	-0,28 %	0,08 %
Serie 1:14	9,97 %	10,54 %	8,50 %	10,87 %
Serie 1:7	0,35 %	-1,95 %	0,34 %	2,73 %

Tabelle 16: Veränderung der Ultraschall-Geschwindigkeit in %

Die Messwerte der Ultraschall-Geschwindigkeit blieben bei den unbehandelten Proben und den Proben der Serie 1:7 nahezu unverändert. Die Proben der Serie 1:14 zeigten im Mittel in allen Richtungen eine um 8% bis 10% erhöhte Ultraschall-Geschwindigkeit.

6.1.4. Frost-Tauwechsel

Die Proben der Serie ZG 1-5, ZG 14/1-5 und ZG 7/1-5 wurden der Frost-Tauwechsel Beanspruchung ausgesetzt.

	Masseverlust in [M-%]
Serie unbeh.	-0,51
Serie 1:14	-0,31
Serie 1:7	-3,35

Tabelle 17: Masseverlust durch Frost-Tauwechsel Beanspruchung

Die Tabelle zeigt deutlich die verminderte Widerstandskraft des Zogelsdorfer Kalksandsteins nach Behandlung mit dem SANOFIX 2. Während die unbehandelte Serie einen Masserverlust von -0,51 M-% aufweist, beträgt dieser bei der Serie 1:7 bereits -3,35 M-%.

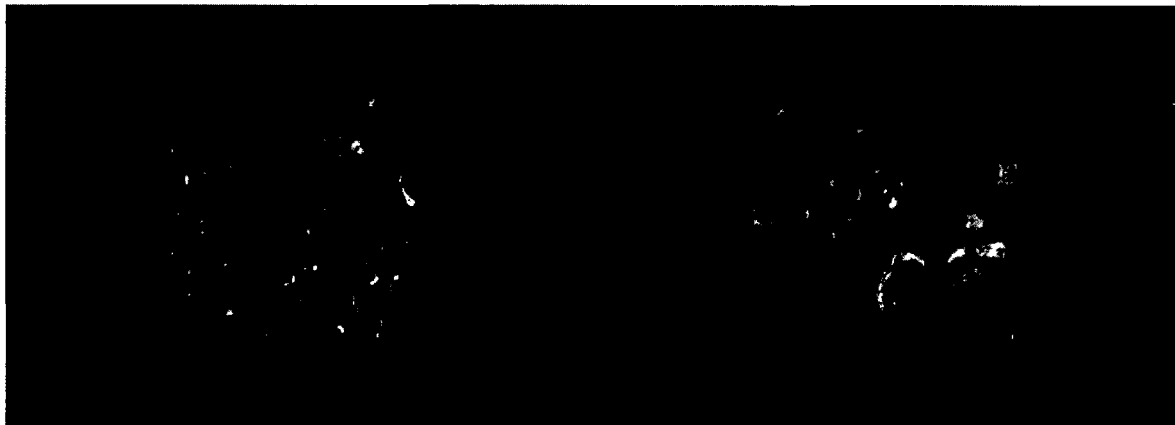


Abbildung 21: links: Vertreter der unbehandelten Serie, rechts: Vertreter der Serie 1:14 nach Durchführung des Frost-Tauwechsel-Versuches



Abbildung 22: Vertreter der Serie 1:7 nach Durchführung der Frost-Tauwechsel-Versuch

Die Abbildung 21 zeigt zwei typische Vertreter der unbehandelten Serie und der Serie 1:14 nach Durchführung der Frost-Tauwechsel Beanspruchung. Die unterschiedliche Schädigung der Proben im Vergleich zu dem in Abbildung 22 zu sehenden Vertreter der Serie 1:7 ist deutlich zu erkennen. Es kam während der Versuchsdurchführung zu einem Zerbröseln der Kantenbereiche des Würfels und in weiterer Folge zu einer Abplatzung der Oberfläche.

6.1.5. Salzkristallisation

Der Magnesiumsulfattest wurde an den Proben ZG 7-10, 14/7-10 und 7/7-10 durchgeführt.

	Mittelwert in [M-%]
Serie unbeh.	-1,90
Serie 1:14	1,50
Serie 1:7	-1,96

Tabelle 18: Masseverlust zufolge Magnesiumsulfattest

Die Ergebnisse wie in Tabelle 17 dargestellt zeigen, dass die Serie der unbehandelten Proben einen Masseverlust von -1,90% im Mittel aufweisen. Die Proben der Serie 1:14 erfuhren einen Massegewinn von 1,50% im Mittel und die Proben der Serie 1:7 wiederum einen Verlust von -1,96%.



Abbildung 23: Vertreter der Serie 1:14 und 1:7 nach 10 Zyklen des Magnesiumsulfatetest

Deutlich sind in dieser Abbildung die blasenartigen Veränderungen der Gesteinsoberfläche erkennbar wie sie auch DÖLTL (2006) in seinen Versuchen festgestellt hat. Diese Veränderungen traten ausschließlich bei den Serien 1:14 und 1:17 auf. Die Blasenbildung verstärkte sich noch mit Fortdauer des Versuches. Die Blasen wurden durch das Abspülen der Proben abgeschwemmt und auf der Oberfläche blieben Ausbrüche wie sie auf den Bildern erkennbar sind zurück.

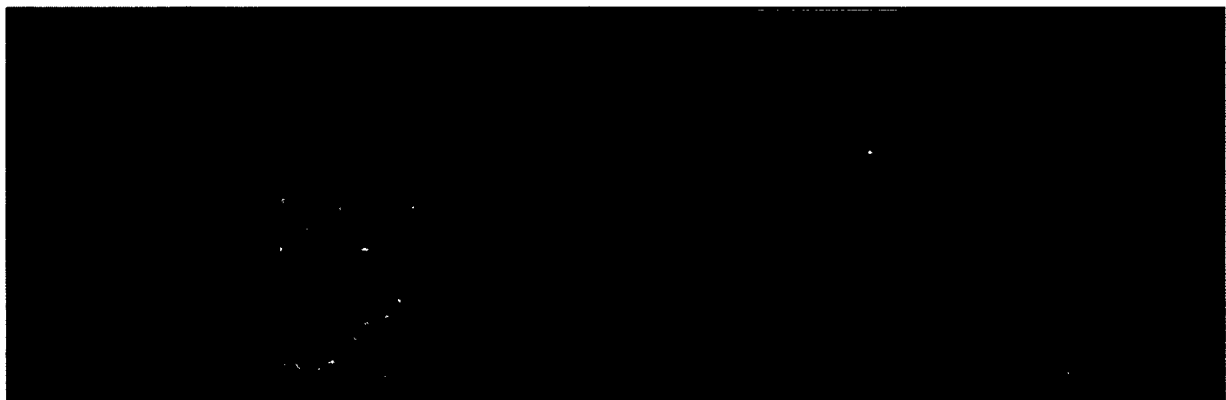


Abbildung 24: Proben der Serien 1:14 und 1:7 des Zogelsdorfer Kalksandstein nach Beendigung des Magnesiumsulfatetest

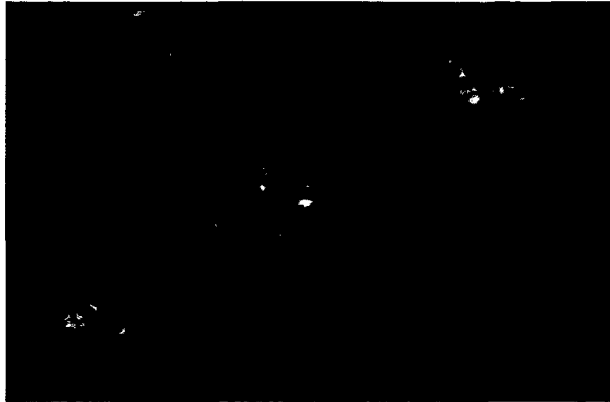


Abbildung 25: Proben der unbehandelten Serie nach Beendigung des Magnesiumsulfattest

Die Proben der unbehandelten Serie zeigen deutlich weniger Schaden nach dem Magnesiumsulfattest als die Proben der gefestigten Serien. Obwohl die Interpretation des Masseverlustes kein einheitliches Bild liefert so ist anhand des Erscheinungsbildes der Serien doch ein deutlicher Trend zu Ungunsten der behandelten Proben erkennbar.

6.1.6. Einaxiale Würfeldruckfestigkeit

Die einaxiale Würfeldruckfestigkeit wurde an einer Referenzgruppe aller drei Serien ermittelt. Weiters wurde die einaxiale Würfeldruckfestigkeit an allen Proben nach den Frost-Tauwechsel-Versuchen und nach den Magnesiumsulfattests ermittelt.

Die Ergebnisse dieser Versuche stellten die Basis dar, um Veränderungen durch den Frost-Tauwechsel und den Magnesiumsulfattest anhand der einaxialen Würfeldruckfestigkeit verifizieren zu können.

Druckversuch	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	27,91 N/mm ²
Serie 1:14	24,00 N/mm ²
Serie 1:7	17,78 N/mm ²

Tabelle 19: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe ZG 11-15, ZG 14/11-15 und ZG 7/11-15

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Abfall der einaxialen Würfeldruckfestigkeit durch die Behandlung mit dem Festigungsmittel. Die Serie 1:14 wies eine um 14%

geringere Druckfestigkeit auf als die unbehandelte Referenzserie. Bei der Serie 1:7 war eine um 36% geringere Druckfestigkeit feststellbar. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Intensität der Behandlung mit dem Festiger in direktem Zusammenhang mit der Abnahme der Druckfestigkeit steht.

Druckversuch nach EN 12390-3	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	16,44 N/mm ²
Serie 1:14	29,26 N/mm ²
Serie 1:7	21,62 N/mm ²

Tabelle 20: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe ZG 1-5, ZG 14/1-5 und ZG 7/1-5 nach Durchführung der Frost-Tauwechsel-Versuche

Die Abnahme der Druckfestigkeit durch den Frost-Tauwechsel-Versuch stellt sich in den einzelnen Prüfserien unterschiedlich dar. Die unbehandelte Serie lieferte mit 16 N/mm² die geringste einaxiale Würfeldruckfestigkeit, während die Serie 1:14 mit 29 N/mm² die höchste Druckfestigkeit lieferte.

Druckversuch nach EN 12390-3	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	17,17 N/mm ²
Serie 1:14	16,82 N/mm ²
Serie 1:7	16,72 N/mm ²

Tabelle 21: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe ZG 7-10, ZG 14/7-10 und ZG 7/7-10 nach Durchführung des Magnesiumsulfattest

Die Ergebnisse der Druckversuche nach dem Magnesiumsulfattest lieferten ein sehr einheitliches Bild. Die Ergebnisse liegen im Bereich von 17 N/mm² für die unbehandelte Serie und 16 N/mm² für die Serie 1:14. Es ist, gemessen an der Referenzgruppe, bei den unbehandelten Proben ein um 38% geringerer Wert für die Druckfestigkeit gemessen worden. Die Werte der Serie 1:14 waren um 29% geringer als die der Referenzgruppe und die Druckfestigkeit der Serie 1:7 lag mit 16 N/mm² nur knapp unter den Ergebnissen der Referenzgruppe (17,78 N/mm²).

6.1.7. Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Zogelsdorfer Kalksandstein zeigte durch die Behandlung mit dem Produkt eine deutliche Veränderung. In erster Linie beeinflusste die Behandlung das optische Erscheinungsbild des Gesteins.

Im Wasseraufnahmeversuch konnte eine verzögerte Wasseraufnahme der behandelten Proben festgestellt werden. Weiters nahmen die Proben der behandelten Serien auch um etwa 2 M-% weniger Wasser auf als die Proben der unbehandelten Serie. Das Produkt verringert die Größe der Kapillaren und der Poren. Deutlich wird dies auch bei der Betrachtung des Austrocknungsverhaltens. Die unbehandelten Proben konnten schneller austrocknen als die Proben der behandelten Serien.

Die Ultraschall-Laufzeitmessungen zeigten ebenfalls, dass die Proben, die behandelt wurden geringere Werte aufwiesen als die Proben der unbehandelten Serie.

Im Frost-Tauwechsel-Versuch waren die Ergebnisse ähnlich. Die Werte der Ultraschall-Laufzeitmessung vor und nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch zeigten in allen drei Serien einen ähnlichen Abfall von etwa 12% auf. Jedoch war der Masseverlust durch den FTW bei den behandelten Serien größer als bei der unbehandelten Serie. Optisch veränderten sich die Proben der behandelten Serien ebenfalls am deutlichsten.

Im Magnesiumsulfattest wurde bei den behandelten Proben eine Blasenbildung an der Gesteinsoberfläche festgestellt, die nach dem Trocknungsvorgang aushärteten. Die Festigkeitsparameter Ultraschall-Laufzeit und Druckversuch zeigten kein einheitliches Bild nach Beendigung des Magnesiumsulfattest. Unter Beachtung der starken Veränderung der Proben der behandelten Serien wie sie in Kapitel 6.1.5 beschrieben wurden ist die Interpretation der Festigkeitsparameter als zweitrangig anzusehen.

Die einaxialen Würfeldruckversuche zeigten, wie die Ultraschall-Laufzeitmessungen eine deutliche Abnahme der Werte mit zunehmender Behandlung der Proben mit dem Produkt von SANOTEC. Die Serie 1:7 wies im Mittel um 36% geringere Werte auf als die Proben der unbehandelten Serie.

Das Produkt von SANOTEC ist daher für eine Festigung des Zogelsdorfer Kalksandsteins völlig ungeeignet.

6.2. Flyschsandstein

An den Proben des Flyschsandsteins wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Bestimmung der Rohdichte
- Wasseraufnahme- / Austrocknungsverhalten
- Ultraschall Laufzeitmessung
- Frost-Tauwechsel
- Salzkristallisation
- Druckversuche

Die Versuche wurden alle an würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 50mm+/- 2mm durchgeführt. Die Probekörper wurden aus einem unregelmäßigen Gesteinsblock aus den Beständen des Institutes für Ingenieurgeologie der TU Wien hergestellt. Die Randzonen des Blockes wiesen deutliche Verwitterungsspuren auf und wurden vor der Herstellung der Proben großzügig entfernt.

6.2.1. Bestimmung der Rohdichte

Für die Bestimmung der Rohdichte wurden alle 15 Proben jeder Versuchsgruppe herangezogen. Die Rohdichte ergab sich dabei zu 2,38 g/cm³ im Mittel. STINY (1929) gibt die Rohdichte mit 2,41 g/cm³ an, DÖLTL A. (2006) kam in seinen Versuchen auf eine mittlere Rohdichte von 2,43 g/cm³.

Die Proben der gefestigten Serien zeigten kaum Abweichungen vom ermittelten Wert der Rohdichte für die Referenzgruppe.

Unterschiede in %	
1:14	1:7
0,32 %	0,20 %

Tabelle 22: Unterschiede der Rohdichte der drei Versuchsgruppen in %, bezogen auf die unbehandelte Referenzgruppe (FLY 1 – FLY 15)

Mittelwert	Maximum	Minimum
2,38 g/cm ³	2,42 g/cm ³	2,26 g/cm ³

Tabelle 23: Rohdichte FLY 1 – FLY 15, unbehandelt

Mittelwert	Maximum	Minimum
2,39 g/cm ³	2,41 g/cm ³	2,36 g/cm ³

Tabelle 24: Rohdichte FLY 14/1 – FLY 14/15, behandelt mit Festiger/Wasser 1:14

Mittelwert	Maximum	Minimum
2,39 g/cm ³	2,41 g/cm ³	2,36 g/cm ³

Tabelle 25: Rohdichte FLY 7/1 – FLY 7/15, behandelt mit Festiger/Wasser 1:7

6.2.2. Wasseraufnahme – Austrocknungsverhalten

Wasseraufnahme - Langzeitversuch

Für die Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens wurden jeweils zwei würfelförmige Proben jeder Serie herangezogen (FLY 6 – 7, FLY 14/6 – 7, FLY 7/6 – 7). Verglichen wurden das unterschiedliche Verhalten der unbehandelten Proben, im Vergleich zu den behandelten Proben mit einem Festiger – Wasser Verhältnis von 1:14 sowie 1:7. Weiters wurde nach der Wasseraufnahme, die über einen Zeitraum von drei Wochen beobachtet wurde, das Austrocknungsverhalten der Proben untersucht und ausgewertet.

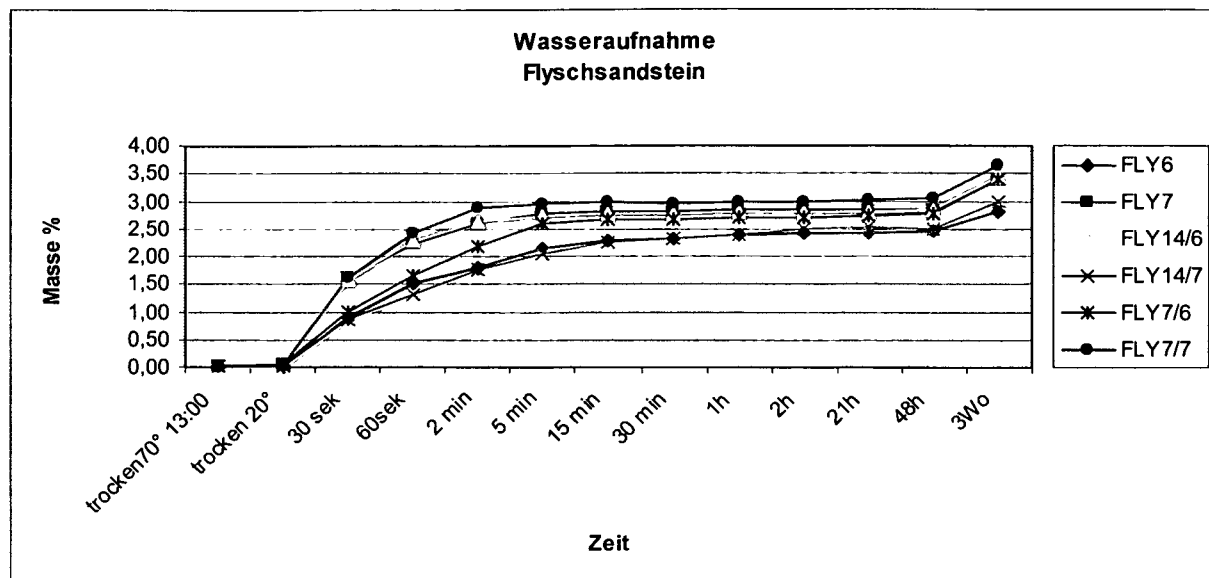


Tabelle 26: Langzeit-Wasseraufnahme Flyschsandstein

Beim Wasseraufnahmeversuch konnten keine signifikanten Unterschiede der Serien beobachtet werden. Die Behandlung mit dem Festigungsmittel hatte somit keine Auswirkung. Wie auch DÖLTL (2006) bemerkte zeigt sich nach etwa 2 Tagen Versuchsdauer ein neuerlicher Anstieg der Wasseraufnahme. Der Wasseraufnahmeversuch wurde nach drei Wochen beendet.

Austrocknungsverhalten:

Die Proben wurden anschließend an den Wasseraufnahmeversuch nach drei Wochen Wasserlagerung auf ihr Austrocknungsverhalten untersucht. Die Proben wurden bei 20°C Raumtemperatur auf einem Gitterrost gelagert und in regelmäßigen Abständen gewogen.

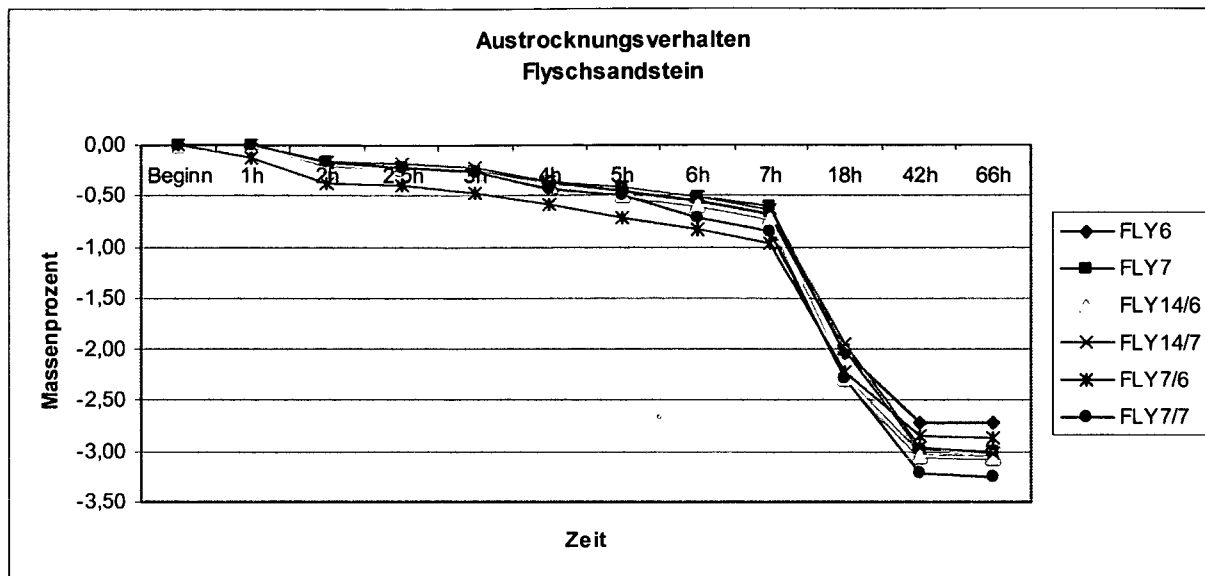


Tabelle 27: Austrocknungsverhalten Flyschsandstein

Beim Austrocknungsverhalten sind ebenso wie beim Wasseraufnahmeverhalten keine Unterschiede der Versuchsgruppen feststellbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Behandlung mit dem Festiger kein Verschließen oder Verengen der Poren an der Gesteinsoberfläche zur Folge hatte.

6.2.3. Ultraschall-Laufzeitmessung

Die Ultraschall-Laufzeitmessungen wurden an allen Proben vor Beginn der Versuche durchgeführt. Die Ultraschall-Laufzeit wurde dabei in allen drei Richtungen der Würfel gemessen und mit Hilfe der Probenabmessungen in die Ultraschall-Geschwindigkeit umgerechnet. Die Messungen wurden nach Beendigung der Frost-Tauwechsel-Versuche und des Magnesiumsulfattest wiederholt und mit den Ausgangswerten verglichen.

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,05 km/s	2,07 km/s	2,05 km/s	2,03 km/s
Serie 1:14	1,93 km/s	1,9 km/s	1,95 km/s	1,95 km/s
Serie 1:7	1,88 km/s	1,87 km/s	1,9 km/s	1,86 km/s

Tabelle 28: Ultraschall-Geschwindigkeit vor Versuchsbeginn aller Proben

Die Werte zeigen deutlich, dass es beim Flyschsandstein durch die Behandlung mit Festiger zu einem Abfall der Ultraschall Geschwindigkeit gekommen ist. Während die Serie der unbehandelten Proben eine mittlere Ultraschall Geschwindigkeit von 2,05 km/s aufweist, ist die Geschwindigkeit der Serie 1:14 mit 1,93 km/s um 6% geringer und die der Serie 1:7 mit 1,88 km/s um 8% geringer.

Frost Tauwechsel / Einfluss auf die Ultraschall Geschwindigkeit

Vor Versuchsbeginn				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,06 km/s	2,06 km/s	2,06 km/s	2,06 km/s
Serie 1:14	2,10 km/s	2,04 km/s	2,14 km/s	2,11 km/s
Serie 1:7	1,96 km/s	1,93 km/s	2,01 km/s	1,94 km/s

Tabelle 29: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe FLY 1-5, FLY 14/1-5, FLY 7/1-5

Nach Versuchsdurchführung				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	1,62 km/s	1,63 km/s	1,62 km/s	1,62 km/s
Serie 1:14	1,70 km/s	1,61 km/s	1,74 km/s	1,74 km/s
Serie 1:7	1,61 km/s	1,63 km/s	1,58 km/s	1,62 km/s

Tabelle 30: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe FLY 1-5, FLY 14/1-5, FLY 7/1-5 nach Durchführung der Frost-Tauwechsel-Versuche

Veränderung der Ultraschall Geschwindigkeit in %				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	-21,12 %	-20,67 %	-21,24 %	-21,43 %
Serie 1:14	-19,16 %	-21,25 %	-18,54 %	-17,75 %
Serie 1:7	-18,04 %	-15,52 %	-21,62 %	-16,83 %

Tabelle 31: Veränderung der Ultraschall-Geschwindigkeit in %

Durch den Frost-Tauwechsel Versuch kommt es in den Versuchsgruppen zu unterschiedlichen Veränderungen. Die unbehandelte Versuchsgruppe zeigt die größte Veränderung mit einer Abnahme der Ultraschall Geschwindigkeit von 21% im Mittel. Die Ultraschall Geschwindigkeit der Proben der Serie 1:14 verringerten sich um 19% und die der Serie 1:7 um 18% im Mittel.

Salzkristallisation / Einfluss auf die Ultraschall-Geschwindigkeit

Ultraschall-Geschwindigkeit vor Versuchsbeginn				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	1,97 km/s	1,92 km/s	1,99 km/s	1,99 km/s
Serie 1:14	1,80 km/s	1,76 km/s	1,76 km/s	1,87 km/s
Serie 1:7	1,84 km/s	1,81 km/s	1,88 km/s	1,83 km/s

Tabelle 32: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe FLY 7-10, FLY 14/7-10, FLY 7/7-10

Ultraschall-Geschwindigkeit nach Versuchsbeginn				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,17 km/s	2,12 km/s	2,21 km/s	2,19 km/s
Serie 1:14	2,01 km/s	2,05 km/s	1,91 km/s	2,06 km/s
Serie 1:7	1,98 km/s	1,94 km/s	2,03 km/s	1,97 km/s

Tabelle 33: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe FLY 7-10, FLY 14/7-10, FLY 7/7-10 nach Durchführung des Salzkristallisationsversuches

Veränderung der Ultraschall-Geschwindigkeit in %				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	10,57 %	10,42 %	10,9 %	10,39 %
Serie 1:14	11,54 %	16,07 %	8,38 %	10,24 %
Serie 1:7	7,46 %	7,07 %	7,8 %	7,48 %

Tabelle 34: Veränderung der Ultraschall-Geschwindigkeit in %

Die Serie der unbehandelten Proben zeigt nach dem Magnesiumsulfatetest eine im Mittel um 10% höhere Ultraschall Geschwindigkeit, die Serie 1:14 wies sogar um 11% höhere Geschwindigkeiten auf. Die Serie 1:7 wies ebenfalls eine Steigerung der Ultraschall Geschwindigkeit auf in der Höhe von 7%.

6.2.4. Frost-Tauwechsel

Die Frost-Tauwechsel-Versuche wurden an den Proben der Serie FLY 1-5, FLY 14/1-5 und FLY 7/1-5 durchgeführt.

	Masseverlust in [M-%]
Serie unbeh.	-1,19
Serie 1:14	-0,98
Serie 1:7	-0,67

Tabelle 35: Masseverlust durch Frost-Tauwechsel Beanspruchung

Die Tabelle zeigt, dass die Serie 1:7 eine deutlich höhere Widerstandsfähigkeit im Frost-Tauwechsel-Versuch aufweist, als die unbehandelte Serie. Der Masseverlust der unbehandelten Serie ist mit 1,19 % fast doppelt so hoch wie der Masseverlust der Serie 1:7.

Die Ergebnisse der Auswertung des Masseverlustes der Proben stehen damit in direktem Zusammenhang mit der Auswertung der Ultraschall Geschwindigkeiten vor und nach der Frost Tauwechsel Beanspruchung. Wie der Tabelle 31 zu entnehmen ist, war die Abnahme der Ultraschall Geschwindigkeit nach Durchführung des Frost Tauwechsel Versuches in der unbehandelten Versuchsgruppe mit -21% am höchsten und in der Serie 1:7 mit -18% am geringsten.

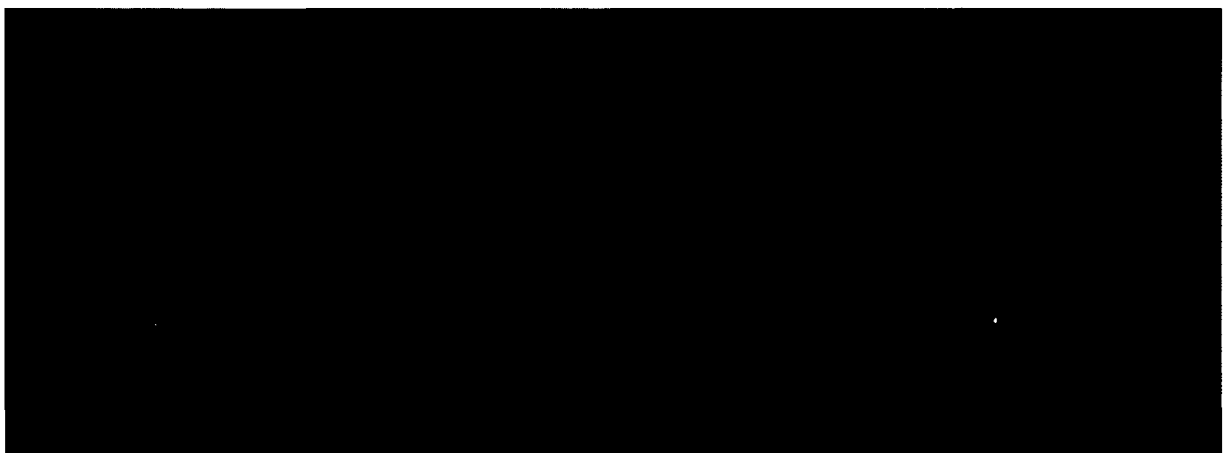


Abbildung 26: links: Vertreter der unbehandelten Serie, rechts: Vertreter der Serie 1:14

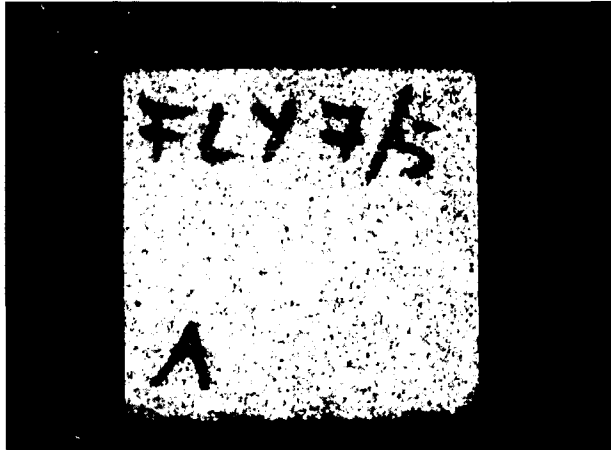


Abbildung 27: Vertreter der Serie 1:7

Die Abbildungen zeigen typische Vertreter der drei Serien. Während des Frost-Tauwechsel-Versuches konnte ein Masseverlust an den Kanten der Probewürfel festgestellt werden. Das Gesteinsmaterial löste sich und bröselte an den Kanten ab. Es waren aber keine auffälligen Schadensbilder erkennbar.

Ausnahme war ein Vertreter der Serie 1:14, der gleich zu Beginn des Versuches eine Klaffung aufwies, die sich mit fortlaufender Versuchsdauer vergrößerte.

6.2.5. Salzkristallisation

Der Magnesiumsulfatetest wurde an den Proben FLY 7-10, FLY 14/7-10 und FLY 7/7-10 durchgeführt.

	Mittelwert in [M-%]
Serie unbeh.	-1,52
Serie 1:14	-7,95
Serie 1:7	-3,12

Tabelle 36: Masseverlust zufolge Magnesiumsulfatetest

Die Interpretation der in Tabelle 35 dargestellten Ergebnisse zeigt einen deutlichen Trend zugunsten der unbehandelten Proben. In der Serie 1:14 ist allerdings ein Probekörper enthalten, der einen Masseverlust von -30 M-% aufweist. Bleibt dieser einzelne Körper unberücksichtigt würde die Serie 1:14 einen durchschnittlichen Masse-

verlust von -0,4 M-% aufweisen. Die Werte der Serie 1:7 streuen ebenfalls sehr deutlich zwischen 0,10 M-% und -7,90 M-%.

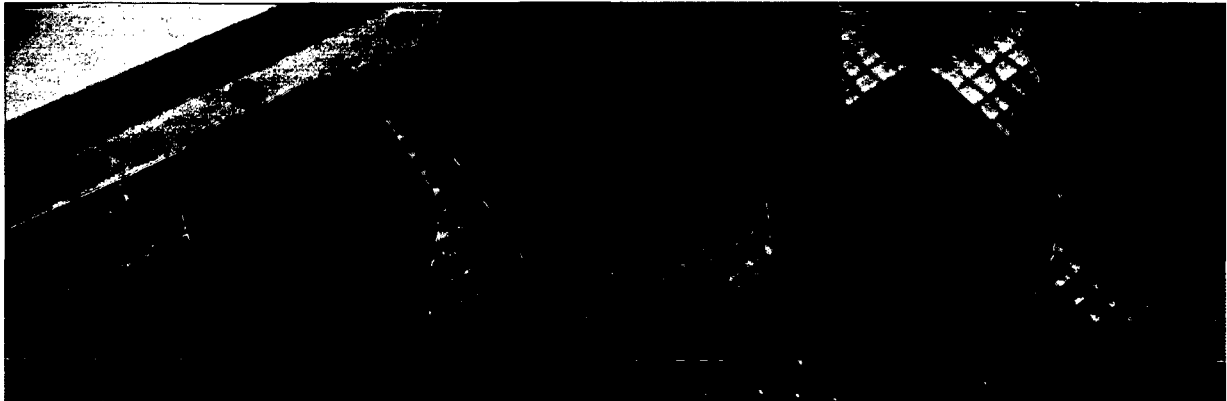


Abbildung 28: Vertreter der unbehandelten Serie und der Serie 1:14 nach Durchführung des Magnesiumsulfatтеста

In der Abbildung 28 ist deutlich die Abrundung der Kanten erkennbar. Im rechten Bild ist ein Teil des Probenkörpers 14/8 erkennbar, der den zuvor angeführten Masseverlust von 30 M-% aufwies.



Abbildung 29: Proben des Flyschsandsteins nach Durchführung des Magnesiumsulfatтеста

6.2.6. Einaxiale Würfeldruckfestigkeit

Die einaxiale Würfeldruckfestigkeit wurde an einer Referenzgruppe aller drei Serien ermittelt. Weiters wurde die einaxiale Würfeldruckfestigkeit an allen Proben nach den Frost-Tauwechsel-Versuchen und nach den Magnesiumsulfattests ermittelt.

Die Ergebnisse dieser Versuche stellten die Basis dar, um Veränderungen durch den Frost Tauwechsel und den Magnesiumsulfattest anhand der einaxialen Würfeldruckfestigkeit verifizieren zu können.

Druckversuch	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	76,03 N/mm ²
Serie 1:14	101,95 N/mm ²
Serie 1:7	80,56 N/mm ²

Tabelle 37: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe FLY 11-15, FLY 14/11-15 und FLY 7/11-15

Anhand der Ergebnisse in Tabelle 37 ist zu erkennen, dass die Behandlung mit dem Festigungsmittel zu deutlich höheren Werten bei der einaxialen Druckfestigkeit führt. Die Serie 1:14 weist mit 102 N/mm² eine um 34% höhere einaxiale Würfeldruckfestigkeit auf als die unbehandelte Serie. Bei der Serie 1:7 ist die Druckfestigkeit mit 80N/mm² um knapp 6% höher als bei der unbehandelten Serie

Druckversuch nach ETM	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	66,47 N/mm ²
Serie 1:14	74,99 N/mm ²
Serie 1:7	75,18 N/mm ²

Tabelle 38: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe FLY 1-5, FLY 14/1-5 und FLY 7/1-5 nach Durchführung des Frost-Tauwechsel-Versuches

Die unbehandelte Serie des Flyschsandstein lieferte nach dem Frost-Tauwechsel eine um 12 % geringere Druckfestigkeit als die Referenzgruppe. Die Serie 1:14 lieferte mit 75 N/mm² einen deutlich besseren Wert als die unbehandelte Gruppe, im Vergleich zur Referenzgruppe war jedoch ein Abfall der Druckfestigkeit um 26% zu beo-

bachten. Die Proben der Serie 1:7 lieferte mit 75 N/mm^2 einen ähnlichen Wert wie die Serie 1:14 und wies einen Abfall der Druckfestigkeit von 7% im Vergleich zur Referenzgruppe auf.

Würfel Druckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	19,03 N/mm ²
Serie 1:14	21,60 N/mm ²
Serie 1:7	25,40 N/mm ²

Tabelle 39: Einaxiale Würfel Druckfestigkeit der Gruppe FLY 7-10, FLY 14/7-10 und FLY 7/7-10 nach Durchführung des Magnesiumsulfattests

Die Ergebnisse der Druckversuche nach dem Magnesiumsulfattest lieferten ebenfalls höhere Werte für die Serien der behandelten Proben. Die Serie 1:14 lag 13% und die Serie 1:7 33% über den Werten für die einaxiale Würfel Druckfestigkeit der unbehandelten Probenserie.

6.2.7. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Proben des Flyschsandstein zeigten nach der Behandlung mit SANOFIX 2 eine leichte Veränderung des optischen Erscheinungsbildes. Die Behandlung hinterließ einen weißen Schleier an der Oberfläche der Proben.

Die Ultraschall-Laufzeitmessungen ergaben geringere Werte für die behandelten Proben im Vergleich zur unbehandelten Referenzgruppe. Der Unterschied der mittleren Laufzeiten zwischen der Serie 1:7 und der unbehandelten Serie betrug etwa 8%.

Bei der Betrachtung des Wasseraufnahme- und Austrocknungsverhalten konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die Probe FLY 7/7 erreichte nicht nur die höchsten Werte der aufgenommenen Wassermenge sondern zeigte auch die größte Wasseraufnahmegeschwindigkeit aller Proben.

Im Frost-Tauwechsel-Versuch zeigte sich bei der unbehandelten Serie der größte Masseverlust und gleichzeitig auch die größte Abnahme der Ultraschall-Laufzeit im Vergleich zu den behandelten Proben. Die Ergebnisse der Druckversuche nach dem

FTW weisen ebenso für die behandelten Serien bessere Werte aus als für die unbehandelte Serie.

Im Magnesiumsulfattest zeigte die Serie 1:14 den größten Masseverlust und die unbehandelte Serie den geringsten. Optisch zeigten die unbehandelten Proben die geringsten Spuren, abgesehen von den gerundeten Würfelkanten, die bei allen Proben zu beobachten waren. Bei der Auswertung der Druckversuche nach dem Magnesiumsulfattest wies allerdings die unbehandelte Serie die geringste Druckfestigkeit auf wogegen die Werte der Serie 1:7 etwa 30% höher ausfielen.

Die Auswertung des einaxialen Würfeldruckversuches zeigte bei der Serie 1:14 eine deutliche Zunahme der Festigkeit um etwa 35%, die jedoch bei der Serie 1:7 wieder um etwa 20% abfiel. An dieser Stelle sei auf die Ergebnisse von DÖRTL (2006) verwiesen, der für die Proben der mit dem selben Produkt behandelten Serie 1 geringere Werte im einaxialen Druckversuch ermittelt hat als für die Proben der unbehandelten Serie. Dabei ist anzumerken, dass die Proben von DÖRTL (2006) noch intensiver mit demselben Produkt von SANOTEC behandelt wurden. Es ist daher wahrscheinlich, dass die Festigkeit mit zunehmender Behandlungsstärke wieder deutlich abnimmt.

Von der Anwendung des SANOTEC Produktes ist beim Flyschsandstein dringend abzuraten.

6.3. Wüstenzeller Sandstein

An den Proben des Wüstenzeller Sandsteins wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Bestimmung der Rohdichte
- Wasseraufnahme- / Austrocknungsverhalten
- Ultraschall-Laufzeitmessung
- Frost-Tauwechsel
- Salzkristallisation
- Druckversuche

Die Versuche wurden alle an würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 40mm +/- 2mm durchgeführt. Die Proben wurden aus 40mm dicken Fassadenplatten hergestellt.

6.3.1. Bestimmung der Rohdichte

Für die Bestimmung der Rohdichte wurden alle 15 Proben jeder Versuchsgruppe herangezogen. Die durchschnittliche Rohdichte betrug in der Referenzgruppe 2,29g/cm³. DÖLTL A. (2006) ermittelte eine Rohdichte von 2,30 g/cm³.

Die Gruppen der behandelten Proben zeigten keine signifikanten Abweichungen der Rohdichte.

Unterschiede in %	
1:14	1:7
0,11 %	-0,35 %

Tabelle 40: Unterschiede der Rohdichte der drei Versuchsgruppen in %, bezogen auf die unbehandelte Referenzgruppe (WZ 1 – WZ 15)

Mittelwert	Maximum	Minimum
2,29 g/cm ³	2,30 g/cm ³	2,28 g/cm ³

Tabelle 41: Rohdichte WZ 1 – WZ 15, unbehandelt

Mittelwert	Maximum	Minimum
2,30 g/cm ³	2,31 g/cm ³	2,29 g/cm ³

Tabelle 42: Rohdichte WZ 14/1 – WZ 14/15, behandelt mit Festiger/Wasser 1:14

Mittelwert	Maximum	Minimum
2,29 g/cm ³	2,29 g/cm ³	2,27 g/cm ³

Tabelle 43: Rohdichte WZ 7/1 – WZ 7/15, behandelt mit Festiger/Wasser 1:7

6.3.2. Wasseraufnahme - Austrocknungsverhalten

Wasseraufnahme - Langzeitversuch

Für die Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens wurden jeweils zwei würfelförmige Proben jeder Serie herangezogen (WZ 6 – 7, WZ 14/6 – 7, WZ 7/6 – 7). Beobachtet wurde das unterschiedliche Verhalten der unbehandelten Proben im Vergleich zu den behandelten Proben mit einem Festiger – Wasser Verhältnis von 1:14 sowie 1:7. Weiters wurde nach der Wasseraufnahme, die über einen Zeitraum von drei Wochen beobachtet wurde, das Austrocknungsverhalten der Proben untersucht und ausgewertet.

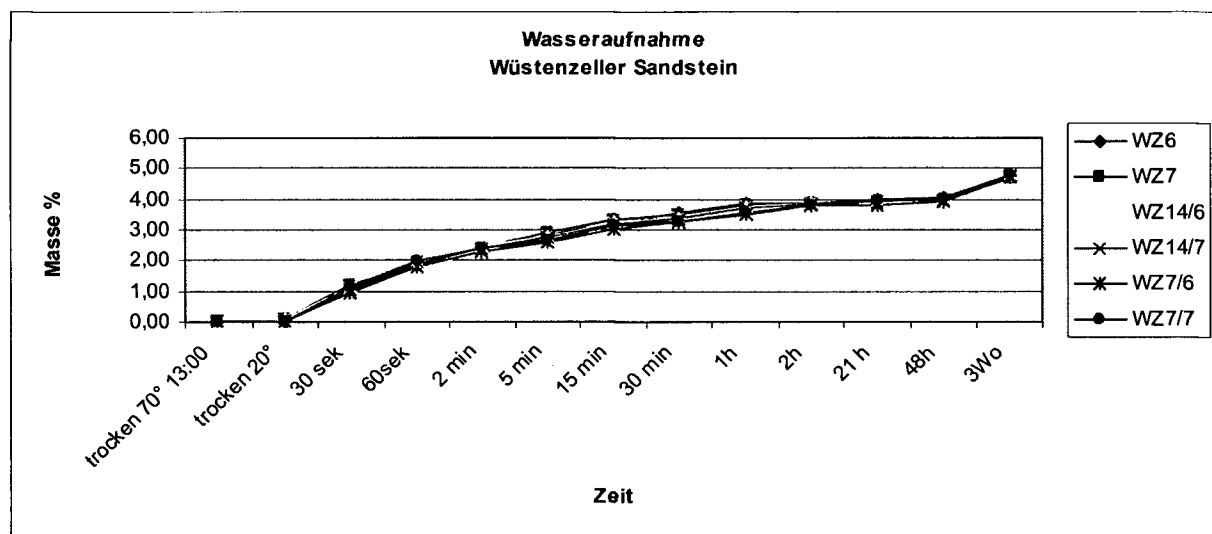


Tabelle 44: Langzeit-Wasseraufnahme Wüstenzeller Sandstein

Der Wüstenzeller Sandstein zeigte ein kontinuierliches Wasseraufnahmeverhalten. Ab einer Versuchsdauer von 48 Stunden konnte wie bei allen Versuchsgruppen ein Anstieg der Wasseraufnahme beobachtet werden.

Zu Versuchsbeginn zeigten alle drei Versuchsgruppen ein ähnliches Verhalten. Ab den ersten 10 Minuten zeigten die unbehandelten Proben eine höhere Wasseraufnahme als die behandelten Proben. Ein Unterschied, der bis zu einer Versuchsdauer von etwa 24 Stunden beobachtbar war. Ab diesem Zeitpunkt bis zur Beendigung des Versuches nach drei Wochen war kein Unterschied zwischen den drei Serien erkennbar.

Austrocknungsverhalten:

Die Proben wurden anschließend an den Wasseraufnahmeversuch nach drei Wochen Wasserlagerung auf ihr Austrocknungsverhalten untersucht. Die Proben wurden bei 20°C Raumtemperatur auf einem Gitterrost gelagert und in regelmäßigen Abständen gewogen.

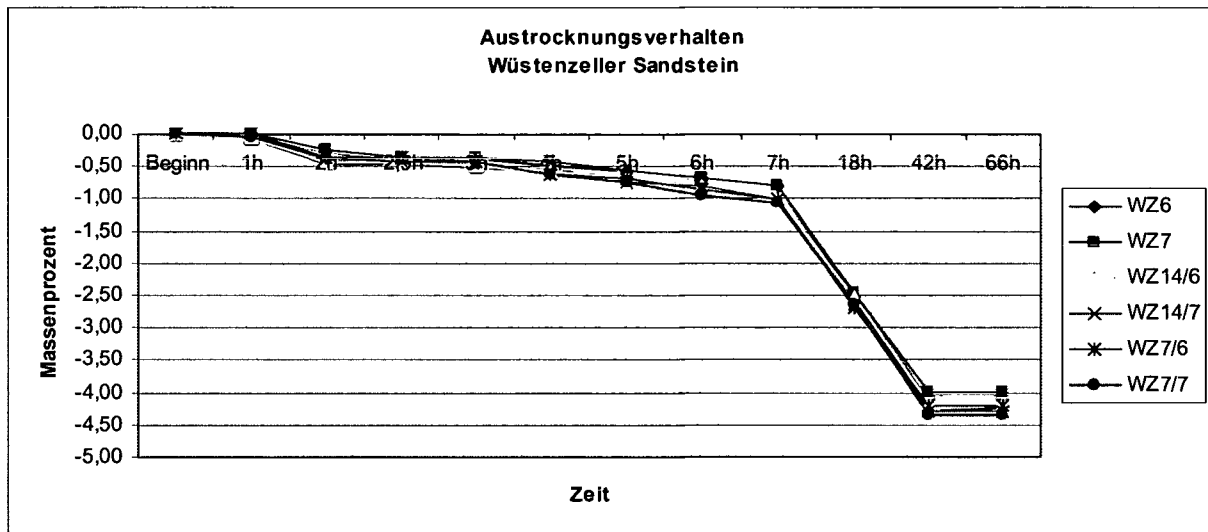


Tabelle 45: Austrocknungsverhalten Wüstenzeller Sandstein

Beim Austrocknungsverhalten konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Die Behandlung mit Steinfestiger hatte offensichtlich keinen Einfluss auf das Dampfdiffusionsverhalten des Wüstenzeller Sandsteins.

6.3.3. Ultraschall-Laufzeitmessung

Die Ultraschall-Laufzeitmessungen wurden an allen Proben vor Beginn der Versuche durchgeführt. Die Ultraschall-Laufzeit wurde dabei in allen drei Richtungen der Würfel gemessen und mit Hilfe der Probenabmessungen in die Ultraschall-Geschwindigkeit umgerechnet. Die Messungen wurden nach Beendigung der Frost-Tauwechsel-Versuche und des Magnesiumsulfat-Test wiederholt und mit den Ausgangswerten verglichen.

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,31 km/s	2,36 km/s	2,42 km/s	2,15 km/s
Serie 1:14	2,34 km/s	2,42 km/s	2,44 km/s	2,16 km/s
Serie 1:7	2,34 km/s	2,43 km/s	2,46 km/s	2,13 km/s

Tabelle 46: Ultraschall-Geschwindigkeit aller Proben vor Versuchsbeginn

Die Behandlung mit dem Festiger hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Messwerte der Ultraschall Geschwindigkeit. Die unbehandelten Proben wiesen mit 2,31 km/s im Mittel einen sehr ähnlichen Wert auf wie die Proben der Serie 1:14 (2,34 km/s) und die Proben der Serie 1:7 (ebenfalls 2,34 km/s).

Frost Tauwechsel / Einfluss auf die Ultraschall-Geschwindigkeit

Vor Versuchsbeginn				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,31 km/s	2,28 km/s	2,43 km/s	2,22 km/s
Serie 1:14	2,33 km/s	2,43 km/s	2,42 km/s	2,14 km/s
Serie 1:7	2,35 km/s	2,45 km/s	2,46 km/s	2,14 km/s

Tabelle 47: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe WZ 1-5, WZ 14/1-5, WZ 7/1-5

Nach Versuchsbeendigung				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,16 km/s	2,14 km/s	2,28 km/s	2,05 km/s
Serie 1:14	2,14 km/s	2,25 km/s	2,24 km/s	1,94 km/s
Serie 1:7	2,15 km/s	2,26 km/s	2,27 km/s	1,91 km/s

Tabelle 48: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe WZ 1-5, WZ 14/1-5, WZ 7/1-5 nach Durchführung der Frost-Tauwechsel-Versuche

Veränderung der Ultraschall Geschwindigkeit in %				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	-6,55 %	-6,32 %	-6,05 %	-7,35 %
Serie 1:14	-7,98 %	-7,49 %	-7,31 %	-9,31 %
Serie 1:7	-8,43 %	-7,47 %	-7,74 %	-10,33 %

Tabelle 49: Veränderung der US-Geschwindigkeit in %

Die Proben des Wüstenzeller Sandsteins zeigten einen Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit durch den Frost-Tauwechsel. Auffallend ist, dass die Proben der unbehandelten Serie den geringsten Abfall mit 6,5% im Mittel und die am stärksten behandelte Serie 1:7 den höchsten Abfall mit 8 % im Mittel aufweist.

Salzkristallisation / Einfluss auf die Ultraschall-Geschwindigkeit

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,29 km/s	2,42 km/s	2,39 km/s	2,06 km/s
Serie 1:14	2,34 km/s	2,38 km/s	2,44 km/s	2,19 km/s
Serie 1:7	2,34 km/s	2,43 km/s	2,47 km/s	2,13 km/s

Tabelle 50: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe WZ 7-10, WZ 14/7-10, WZ 7/7-10

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,71 km/s	2,89 km/s	2,99 km/s	2,25 km/s
Serie 1:14	2,77 km/s	2,89 km/s	2,93 km/s	2,47 km/s
Serie 1:7	2,81 km/s	3,02 km/s	2,99 km/s	2,43 km/s

Tabelle 51: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe WZ 7-10, WZ 14/7-10, WZ 7/7-10 nach Durchführung des Salzkristallisationsversuch

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	18,46 %	19,54 %	24,95 %	9,63 %
Serie 1:14	18,38 %	21,43 %	20,35 %	12,86 %
Serie 1:7	20,11 %	24,25 %	21,11 %	14,24 %

Tabelle 52: Veränderung der Ultraschall-Geschwindigkeit in %

Die Messwerte der Ultraschall-Geschwindigkeit veränderten sich in allen drei Serien stark nach oben. Die Proben der unbehandelten Serie wiesen eine Steigerung der Geschwindigkeit von 18%, die Proben der Serie 1:14 eine ähnliche Steigerung von 18% und die Proben der Serie 1:7 eine Steigerung von 20% auf. Dabei fiel auf, dass die Messwerte im rechten Winkel auf die Schichtung nicht nur die geringsten Aus-

gangswerte lieferten sondern auch die im Verhältnis geringsten Veränderungen der Ultraschall Geschwindigkeit.

6.3.4. Frost-Tauwechsel

Der Frost-Tauwechsel-Versuch wurde an den Proben der Gruppen WZ 1-5, WZ 14/1-5 und WZ 7/1-5 durchgeführt.

	Masseverlust in [M-%]
Serie unbeh.	0,00
Serie 1:14	0,00
Serie 1:7	-0,04

Tabelle 53: Masseverlust durch Frost-Tauwechsel Beanspruchung

Wie in der Tabelle 53 zu erkennen ist kam es bei den Proben es Wüstenzeller Sandsteins praktisch zu keinem Masseverlust. Lediglich die Serie 1:7 weist einen verschwindend geringen mittleren Masseverlust von -0,04 M-% auf. Das Gesteinsmaterial des Wüstenzeller Sandsteins weist schon im unbehandelten Zustand keinen Materialverlust auf. Eine etwaige Verbesserung der Widerstandskraft gegen Frost-Tauwechsel Beanspruchung kann durch den an die Norm angelehnten Versuch wie er in dieser Arbeit durchgeführt wurde nicht festgestellt werden.

Für weitere Untersuchungen ist eine Verlängerung der Versuchsdauer zu empfehlen, um etwaige Unterschiede anhand des Masseverlustes ablesen zu können.

Optisch waren ebenfalls kaum Veränderungen an den Proben feststellbar.

6.3.5. Salzkristallisation

Der Magnesiumsulfatetest wurde an den Proben WZ 7-10, WZ 14/7-10 und WZ 7/7-10 durchgeführt.

	Mittelwert in [M-%]
Serie unbeh.	0,70
Serie 1:14	1,06
Serie 1:7	1,16

Tabelle 54: Masseverlust durch Magnesiumsulfatetest

Wie in Tabelle 54 zu erkennen ist kam es bei allen drei Serien zu einer Massenzunahme. Die unbehandelte Serie weist eine Zunahme der Masse von 0,70% auf. Die Serie 1:14 und die Serie 1:7 weisen eine Zunahme von 1,06% bzw. 1,16% auf.

Die Proben zeigten nach Beendigung des Versuches keine deutlichen Spuren von Materialverlust, jedoch waren während der Einlagerung in Salzlösung am Boden des Lösungsbehälters Spuren von ausgeschwemmtem Gesteinsmaterial erkennbar. Die Massenzunahme der Probewürfel ist daher auf die Einlagerung von Salzen im Gesteinsgefüge zurückzuführen.

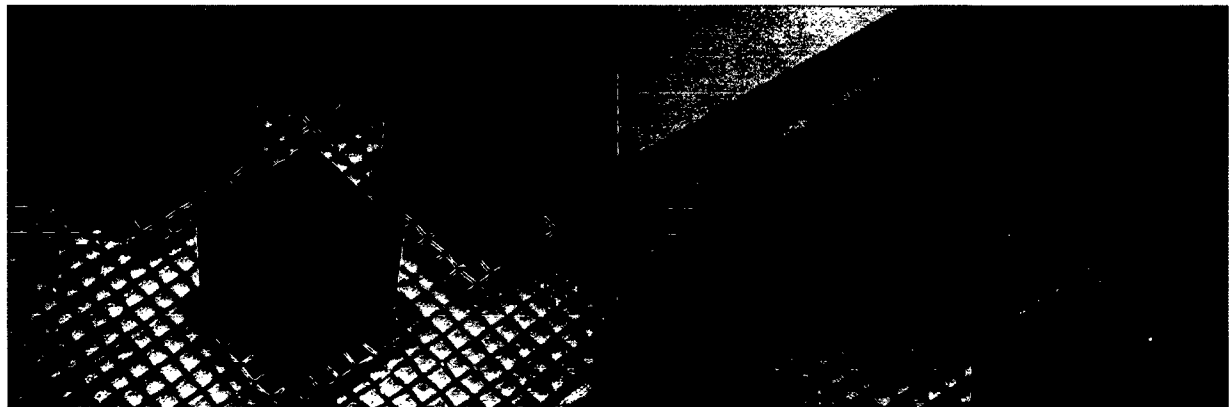


Abbildung 30: Proben der unbehandelten Serie und der Serie 1:7 nach Beendigung des Magnesiumsulfatetest

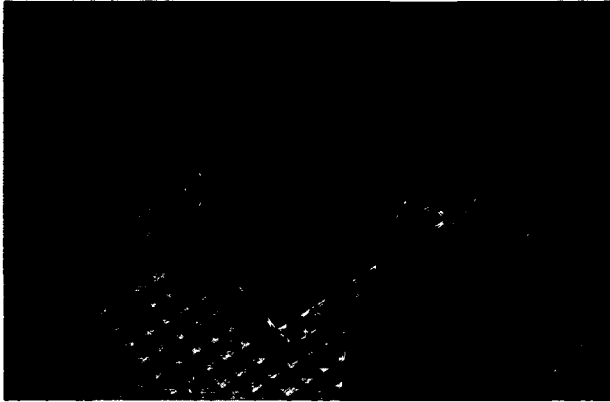


Abbildung 31: Proben der Serie 1:14 nach Beendigung des Magnesiumsulfattests

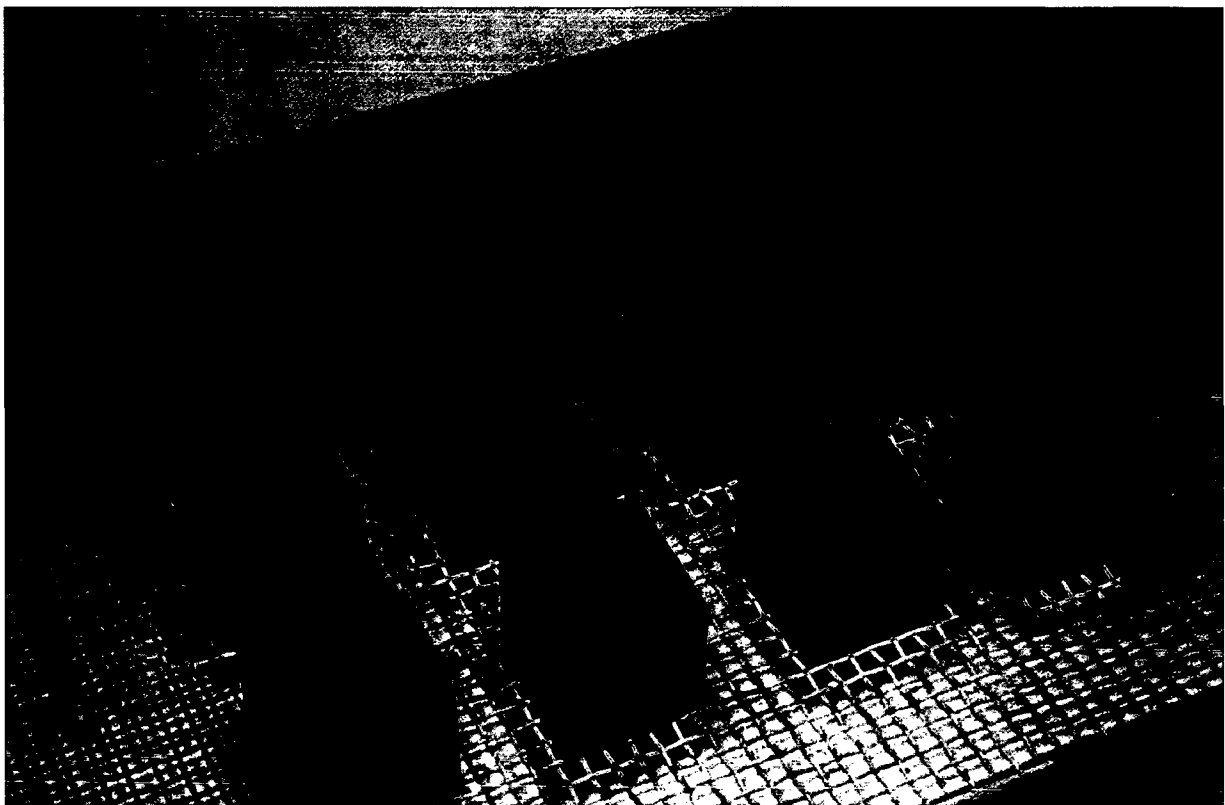


Abbildung 32: Übersicht über alle Proben des Wüstenzeller Sandsteins nach Beendigung des Magnesiumsulfattests

6.3.6. Druckversuch

Die einaxiale Würfeldruckfestigkeit wurde an einer Referenzgruppe aller drei Serien ermittelt. Weiters wurde die einaxiale Würfeldruckfestigkeit an allen Proben nach den Frost-Tauwechsel-Versuchen und nach den Magnesiumsulfattests ermittelt.

Die Ergebnisse dieser Versuche stellten die Basis dar, um Veränderungen durch den Frost-Tauwechsel und den Magnesiumsulfattest anhand der einaxialen Würfeldruckfestigkeit verifizieren zu können.

Druckversuch	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	52,57 N/mm ²
Serie 1:14	79,11 N/mm ²
Serie 1:7	80,03 N/mm ²

Tabelle 55: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe WZ 11-15, WZ 14/11-15 und WZ 7/11-15

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Steigerung der Druckfestigkeiten für die behandelten Probenserien. Die Serie 1:14 lag 50% über den Werten der unbehandelten Serie. Die Serie 1:7 wies ebenfalls um 52% höhere Werte auf als die Proben der unbehandelten Serie.

Druckversuch	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	61,18 N/mm ²
Serie 1:14	59,80 N/mm ²
Serie 1:7	69,34 N/mm ²

Tabelle 56: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe WZ 1-5, WZ 14/1-5 und WZ 7/1-5 nach Durchführung der Frost-Tauwechsel-Versuche

Nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch konnte bei den unbehandelten Proben mit 61N/mm² eine höhere Druckfestigkeit als bei der Referenzgruppe beobachtet werden.

Die Werte der Serien 1:14 lagen mit 59N/mm² ähnlich, wiesen aber im Vergleich zu ihrer Referenzgruppe einen Abfall der Druckfestigkeit um 24% auf. Die Serie 1:7 hatte mit 69N/mm² den höchsten Wert der einaxialen Druckfestigkeit erreicht und zeigte einen geringeren Abfall im Vergleich zur Referenzgruppe von 13%.

Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	42,53 N/mm ²
Serie 1:14	63,70 N/mm ²
Serie 1:7	66,74 N/mm ²

Die Druckversuche sprechen eine deutliche Sprache. Sie ergaben für die Serie 1:7 den besten Mittelwert mit 80 N/mm². Die unbehandelte Serie lag mit 52 N/mm² deutlich darunter.

Generell hat sich durch die Behandlung eine Verbesserung der Festigkeitsparameter ergeben. Anzumerken ist aber, dass der Wüstenzeller Sandstein eine ausgesprochen gute Verwitterungsbeständigkeit aufweist und der Einsatz von Steinfestigern nicht erforderlich sein wird. Eine optische Beeinträchtigung der Proben durch die Behandlung mit SANOFIX 2 war vorhanden, es wurde allerdings nicht versucht diese zu entfernen. Eine Bewertung des optischen Einflusses des Produktes sollte daher auf jeden Fall durchgeführt werden.

6.4. Aflenzer Kalksandstein

An den Proben des Aflenzer Kalksandsteins wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Bestimmung der Rohdichte
- Wasseraufnahme- / Austrocknungsverhalten
- Ultraschall-Laufzeitmessung
- Frost-Tauwechsel
- Salzkristallisation
- Druckversuche

Die Versuche wurden alle an würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 50mm +/- 2mm durchgeführt. Die Proben wurden aus bereits vorbereiteten Prismen mit quadratischer Grundfläche (50mm Seitenkantenlänge) hergestellt.

6.4.1. Bestimmung der Rohdichte

Für die Bestimmung der Rohdichte wurden alle 15 Proben jeder Versuchsgruppe herangezogen.

Die Proben der behandelten Serien zeigten eine deutlich höherer Rohdichte.

Unterschiede der Rohdichte in %	
1:14	1:7
4,61 %	3,56 %

Tabelle 58: Unterschiede der Rohdichte der drei Versuchsgruppen in %, bezogen auf die unbehandelte Referenzgruppe AF 1 – AF 15

Mittelwert	Maximum	Minimum
1,76 g/cm ³	1,96 g/cm ³	1,68 g/cm ³

Tabelle 59: Rohdichte unbehandelt

Mittelwert	Maximum	Minimum
1,84 g/cm ³	1,95 g/cm ³	1,67 g/cm ³

Tabelle 60: Rohdichte 1:14

Mittelwert	Maximum	Minimum
1,82 g/cm ³	1,96 g/cm ³	1,68 g/cm ³

Tabelle 61: Rohdichte 1:7

6.4.2. Wasseraufnahme - Austrocknungsverhalten

Wasseraufnahme - Langzeitversuch

Für die Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens wurden jeweils zwei würfelförmige Proben jeder Serie herangezogen (AF 6 – 7, AF 14/6 – 7, AF 7/6 – 7). Beobachtet wurde das unterschiedliche Verhalten der unbehandelten Proben im Vergleich zu den behandelten Proben mit einem Festiger – Wasser Verhältnis von 1:14 sowie 1:7. Weiters wurde nach der Wasseraufnahme, die über einen Zeitraum von drei Wochen beobachtet wurde, das Austrocknungsverhalten der Proben untersucht und ausgewertet.

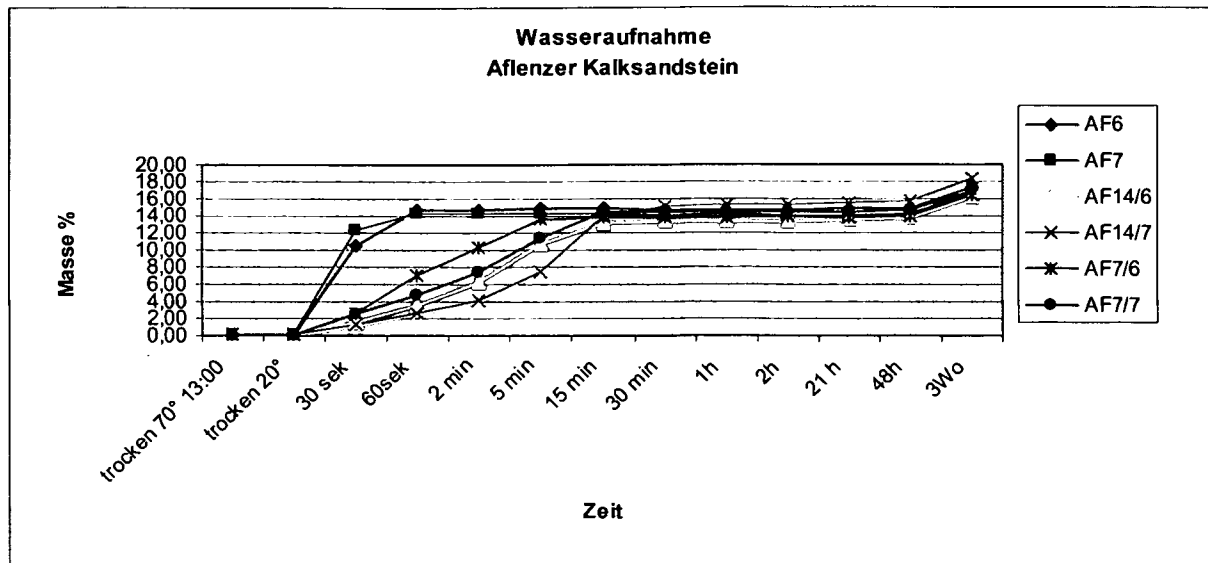


Tabelle 62: Langzeit Wasseraufnahme Aflenzer Kalksandstein

Beim Aflenzer Kalksandstein ist der Einfluss der Gesteinsfestigung deutlich zu erkennen. Die unbehandelten Proben zeigen gleich zu Beginn eine deutlich höhere Wasseraufnahme als die behandelten Proben. Sie erreichten ca. 85 Prozent der endgültigen Wassersättigung zu Versuchende nach etwa 60 Sekunden.

Die behandelten Serien verhalten sich zueinander sehr ähnlich. Es ist also kein Unterschied feststellbar zwischen den stärker (Festiger – Wasser Verhältnis 1:7) und den schwächer behandelten (Festiger – Wasser Verhältnis 1:14) Proben.

Nach einer Versuchsdauer von 15 Minuten konnte beobachtet werden, dass die Proben der behandelten Serien ein ähnliches Niveau der Wassersättigung erreicht hatten wie die unbehandelten Proben. Die Wassersättigung blieb für die nächsten 48 Stunden relativ konstant und zeigte erst dann wieder eine Zunahme bis zur Beendigung des Versuches nach drei Wochen.

Austrocknungsverhalten:

Die Proben wurden anschließend an den Wasseraufnahmeversuch nach drei Wochen Wasserlagerung auf ihr Austrocknungsverhalten untersucht. Die Proben wurden bei 20°C Raumtemperatur auf einem Gitterrost gelagert und in regelmäßigen Abständen gewogen.

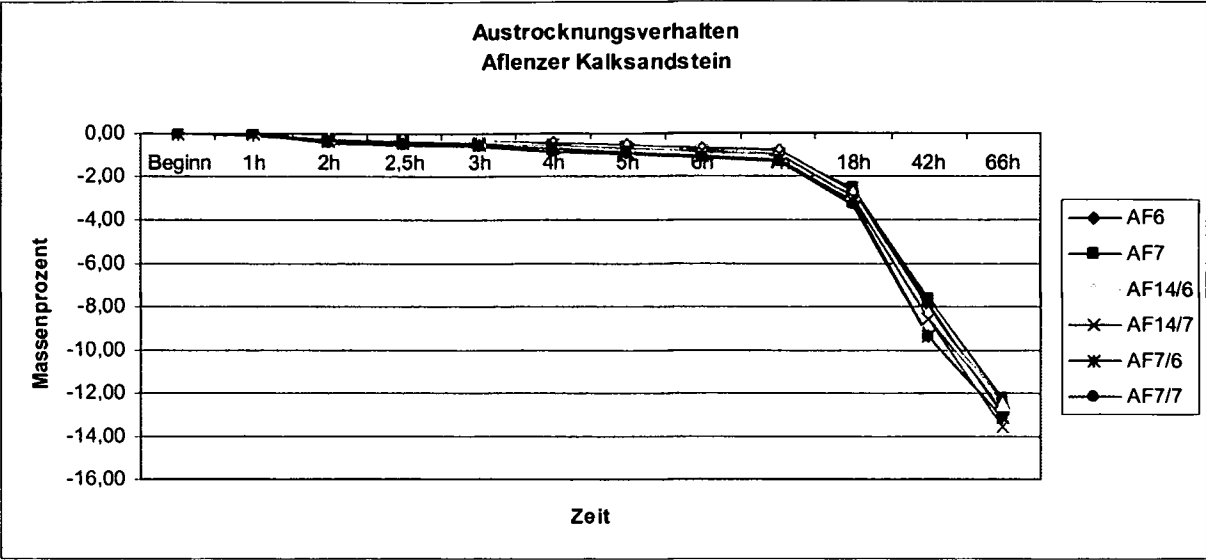


Tabelle 63: Austrocknungsverhalten Aflenzer Kalksandstein

Die Proben zeigten keine signifikanten Unterschiede beim Austrocknungsverhalten. Die stärker gefestigten Proben zeigten eine geringfügig schnellere Austrocknungsgeschwindigkeit als die Proben der Serie 1:14 und der unbehandelten Serie.

6.4.3. **Ultraschall-Laufzeitmessung**

Die Ultraschall Laufzeitmessungen wurden an allen Proben vor Beginn der Versuche durchgeführt. Die Ultraschall Laufzeit wurde dabei in allen drei Richtungen der Würfel gemessen und mit Hilfe der Probenabmessungen in die Ultraschall Geschwindigkeit umgerechnet. Die Messungen wurden nach Beendigung der Frost-Tauwechsel- Versuche und des Magnesiumsulfattest wiederholt und mit den Ausgangswerten verglichen.

	Mittelwert	VA	VB	VC
Serie unbeh.	2,60 km/s	2,64 km/s	2,59 km/s	2,56 km/s
Serie 1:14	2,83 km/s	2,82 km/s	2,85 km/s	2,82 km/s
Serie 1:7	2,77 km/s	2,77 km/s	2,74 km/s	2,79 km/s

Tabelle 64: Ultraschall Geschwindigkeit vor Versuchsbeginn

Die unbehandelte Serie des Aflenzer Kalksandstein wies die geringste Ultraschall Geschwindigkeit mit 2,60 km/s auf. Die Geschwindigkeit der Serie 1:14 lag mit

2,83km/s im Mittel um 9% über der unbehandelten Referenzgruppe. Die Serie 1:7 wies eine mittlere Geschwindigkeit von 2,77 km/s auf und lag damit 6% über dem Wert der Referenzgruppe.

Frost Tauwechsel / Einfluss auf die Ultraschall-Geschwindigkeit

Vor Versuchsbeginn				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,73 km/s	2,80 km/s	2,74 km/s	2,65 km/s
Serie 1:14	2,88 km/s	2,87 km/s	2,91 km/s	2,88 km/s
Serie 1:7	3,00 km/s	3,01 km/s	2,96 km/s	3,04 km/s

Tabelle 65: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe AF 1-5, AF 14/1-5, AF 7/1-5

Nach Versuchsbeginn				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,24 km/s	2,25 km/s	2,21 km/s	2,27 km/s
Serie 1:14	2,58 km/s	2,54 km/s	2,61 km/s	2,59 km/s
Serie 1:7	2,78 km/s	2,80 km/s	2,74 km/s	2,82 km/s

Tabelle 66: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe AF 1-5, AF 14/1-5, AF 7/1-5 nach Durchführung des Frost-Tauwechsel-Versuches

Veränderung der Ultraschall Geschwindigkeit in %				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	-17,89 %	-19,68 %	-19,41 %	-14,57 %
Serie 1:14	-10,55 %	-11,52 %	-10,07 %	-10,07 %
Serie 1:7	-7,29 %	-7,10 %	-7,50 %	-7,28 %

Tabelle 67: Veränderung der Geschwindigkeit in %

Die Tabelle zeigt deutlich die unterschiedliche Veränderung der Ultraschall Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Behandlungsart. An der unbehandelten Referenzgruppe des Aflenzers Kalksandsteins war eine Abnahme der Ultraschall Geschwindigkeit von 18% im Mittel feststellbar, wogegen die Serie 1:14 nur eine Abnahme von 11% zeigte. Die am stärksten behandelte Serie 1:7 wies eine Veränderung der Ultraschall Geschwindigkeit von 7% auf und zeigte damit die deutlich geringste Veränderung der drei Prüfgruppen.

Salzkristallisation / Einfluss auf die Ultraschall-Geschwindigkeit

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,45 km/s	2,50 km/s	2,45 km/s	2,39 km/s
Serie 1:14	2,98 km/s	3,15 km/s	2,90 km/s	2,91 km/s
Serie 1:7	2,63 km/s	2,57 km/s	2,62 km/s	2,69 km/s

Tabelle 68: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe AF 7-10, AF 14/7-10, AF 7/7-10

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	2,43 km/s	2,46 km/s	2,44 km/s	2,38 km/s
Serie 1:14	3,04 km/s	2,95 km/s	2,95 km/s	3,22 km/s
Serie 1:7	2,72 km/s	2,63 km/s	2,73 km/s	2,80 km/s

Tabelle 69: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe AF 7-10, AF 14/7-10, AF 7/7-10 nach Durchführung der Salzkristallisationsversuche

	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	-0,91 %	-1,58 %	-0,47 %	-0,68 %
Serie 1:14	2,09 %	-6,23 %	1,87 %	10,65 %
Serie 1:7	3,66 %	2,37 %	4,18 %	4,42 %

Tabelle 70: Veränderung der Ultraschall-Geschwindigkeit in %

Die Serie der unbehandelten Proben wies einen geringen Abfall der Ultraschall Geschwindigkeit auf.

Die Serie 1:14 lässt keine Interpretation der Messergebnisse zu. Die Ultraschall-Geschwindigkeit nahm zwar im Mittel um 2% zu, jedoch streuen die Messwerte so stark, dass kein Rückschluss gezogen werden kann. Während die Ultraschall Geschwindigkeit in Richtung A um 6% abnahm, steigerte sie sich in Richtung C um 10%.

Die Serie 1:7 zeigte nach der Versuchsdurchführung eine geringe Steigerung der Ultraschall Geschwindigkeit um 4% im Mittel.

6.4.4. Frost-Tauwechsel

Die Frost-Tauwechsel-Versuche wurden an den Proben AF 1-5, AF 14/1-5 und AF 7/1-5 durchgeführt.

	Masseverlust in [M-%]
Serie unbeh.	-0,13
Serie 1:14	-0,17
Serie 1:7	-0,08

Tabelle 71: Masseverlust durch Frost-Tauwechsel Beanspruchung

Anhand der Ergebnisse des Frost-Tauwechsel-Versuches wie sie in Tabelle 71 dargestellt sind kann eine Verbesserung des Widerstandes gegen Frost Tauwechsel im Zusammenhang mit der Behandlung durch den Steinfestiger abgelesen werden.

Die unbehandelte Serie weist mit 0,13% einen geringen Masseverlust auf, der Masseverlust der Serie 1:7 ist mit 0,08% noch deutlich darunter.

Die Ergebnisse der Wägung nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch stehen in direktem Zusammenhang mit den nach der Frost Tauwechsel Beanspruchung durchgeführten Ultraschall Messungen. Die Ergebnisse wurden bereits in Tabelle 67 dargestellt und weisen für die unbehandelte Serie eine Abnahme von 18% der US-Geschwindigkeit aus, während die Serie 1:7 nur mehr eine Abnahme von 7% aufweist.

6.4.5. Salzkristallisation

Der Magnesiumsulfattest wurde an den Proben AF 7-10, AF 14/7-10 und AF 7/7-10 durchgeführt.

	Mittelwert in [M-%]
Serie unbeh.	-2,38
Serie 1:14	-5,68
Serie 1:7	-3,96

Tabelle 72: Masseverlust durch Salzkristallisationstest

Die Tabelle zeigt, dass die Proben der unbehandelten Serie mit -2,38 M-% den geringsten Masseverlust aufweisen. Den größten Masseverlust mit -5,68 M-% zeigte die Serie 1:14.



Abbildung 33: Übersicht über die Proben nach Durchführung des Magnesiumsulfattests

Die Proben wiesen nach Durchführung des Magnesiumsulfattests deutliche Abplatzungen im Randbereich auf. Gemessen an dem Grad der Schädigung sind die unbehandelten Proben in einem besseren Zustand als die mit Steinfestiger behandelten Proben. Diese Unterschiede des Verwitterungsgrades können anhand der folgenden Abbildungen deutlich nachvollzogen werden.

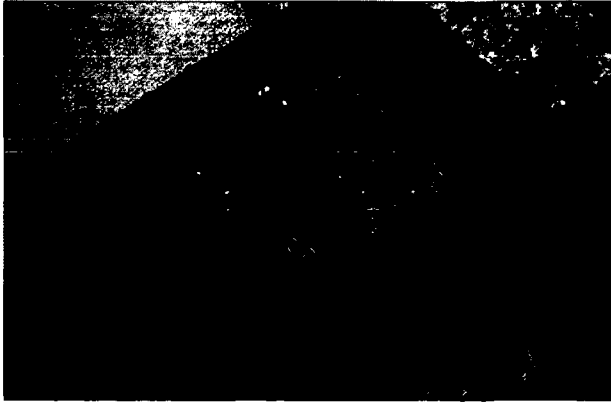


Abbildung 34: Vertreter der unbehandelten Serie des Aflenzer Kalksandsteins nach Beendigung des Magnesiumsulfattest



Abbildung 35: Vertreter der Serie 1:14 nach Beendigung des Magnesiumsulfattest

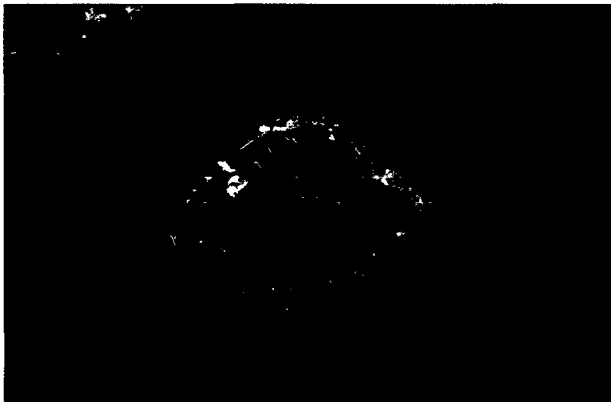


Abbildung 36: Vertreter der Serie 1:7 nach Beendigung des Magnesiumsulfattest

6.4.6. Druckversuch

Die einaxiale Würfeldruckfestigkeit wurde an einer Referenzgruppe aller drei Serien ermittelt. Weiters wurde die einaxiale Würfeldruckfestigkeit an allen Proben nach den Frost-Tauwechsel-Versuchen und nach den Magnesiumsulfattests ermittelt.

Die Ergebnisse dieser Versuche stellten die Basis dar, um Veränderungen durch den Frost-Tauwechsel und den Magnesiumsulfattest anhand der einaxialen Würfeldruckfestigkeit verifizieren zu können.

Druckversuch	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	10,36 N/mm ²
Serie 1:14	11,85 N/mm ²
Serie 1:7	11,53 N/mm ²

Tabelle 73: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe AF 11-15, AF 14/11-15 und AF 7/11-15

Die Probenserien lieferten - unabhängig davon, ob sie behandelt wurden oder nicht - ein sehr einheitliches Bild bei der Ermittlung der einaxialen Würfeldruckfestigkeit. Die ermittelten Werte lagen für die unbehandelte Serie bei 10,36N/mm², die der Serie 1:14 mit 11,85N/mm² und die Werte der Serie 1:7 mit 11,53N/mm², nur knapp darüber.

Druckversuch nach FTW	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	10,02 N/mm ²
Serie 1:14	14,17 N/mm ²
Serie 1:7	14,54 N/mm ²

Tabelle 74: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe AF 1-5, AF 14/1-5 und AF 7/1-5 nach Durchführung der Frost-Tauwechsel-Versuche

Nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch war bei der unbehandelten Serie mit 10N/mm² kaum ein Verlust an Festigkeit feststellbar. Die Serie 1:14 und die Serie 1:7 wiesen nach dem Frost-Tauwechsel sogar höhere Druckfestigkeiten auf als die Referenz-

gruppe. Sie lagen mit 14N/mm^2 für die Serie 1:14 und $14,5\text{N/mm}^2$ etwa jeweils 40% über dem Wert der unbehandelten Serie nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch.

Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	$6,09\text{ N/mm}^2$
Serie 1:14	$16,75\text{ N/mm}^2$
Serie 1:7	$8,42\text{ N/mm}^2$

Tabelle 75: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe AF 7-10, AF 14/7-10 und AF 7/7-10 nach Durchführung des Magnesiumsulfattests

Die Ergebnisse der Druckversuche nach dem Salzkristallisationstest zeigten eine deutliche Abnahme der Werte der unbehandelten Serie und der Serie 1:7, während die Serie 1:14 mit $16,75\text{ N/mm}^2$ einen um 41% höheren Wert lieferte als die Referenzgruppe.

6.4.7. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Proben des Aflenzer Sandsteins zeigten durch die Festigung eine Veränderung der Rohdichte von etwa 4%.

Die Wasseraufnahme wurde ebenfalls durch die Behandlung beeinflusst. Die behandelten Serien nahmen das Wasser mit deutlicher Verzögerung auf, erreichten aber ähnliche Werte bei der aufgenommenen Wassermenge. Beim Austrocknungsverhalten war der Verlauf der drei Serien sehr ähnlich. Die Verengung der Kapillaren hatte also keinen negativen Einfluss auf das Austrocknungsverhalten.

Der Frost-Tauwechsel-Versuch zeigte bei den gemessenen US-Geschwindigkeiten eine mehr als doppelt so große Abnahme der unbehandelten Serie im Vergleich zur Serie 1:7. Der Masseverlust war bei der unbehandelten Serie ebenfalls höher als bei den behandelten Serien. Die Ergebnisse der Druckversuche nach dem Frost-Tauwechsel fügen sich in das Bild ein. Sie lieferten für die Serie 1:7 etwa um 40% bessere Werte als für die unbehandelte Serie.

Bei der Salzkristallisation treten die Festigkeitsparameter aufgrund der deutlichen Verschlechterung des Erscheinungsbildes der behandelten Serien in den Hinter-

grund. Der Masseverlust war bei der unbehandelten Serie am geringsten, jedoch zeigten die Messungen der US-Geschwindigkeiten nach dem Magnesiumsulfatetest bessere Ergebnisse für die behandelten Serien. Die Druckfestigkeiten nach dem Versuch weisen für die Serie 1:14 sehr hohe Werte aus, die Werte der Serie 1:7 und der unbehandelten Serie liegen erwartungsgemäß unter den Werten der Referenzgruppen.

Die Druckfestigkeiten liegen für die behandelten Serien etwa gleich und sind ca. 10% höher als die Werte der unbehandelten Serie.

Generell kann von der Verwendung des SANOTEC Produktes abgeraten werden. Die Ergebnisse des Magnesiumsulfatetest zeigen eine deutlich höhere Schädigung der behandelten Serien.

6.5. Carrara Marmor

An den Proben des Carrara Marmors wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Bestimmung der Rohdichte
- Ultraschall Laufzeitmessung
- Frost- Tauwechsel
- Druckversuche

Die Versuche wurden alle an würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 50mm +/- 2mm durchgeführt. Die Proben wurden aus einem Gesteinsblock mit unregelmäßigen Abmessungen aus den Beständen des Institutes für Ingenieurgeologie hergestellt.

6.5.1. Bestimmung der Rohdichte

Für die Bestimmung der Rohdichte wurden 15 Proben jeder Versuchsgruppe herangezogen, ausgenommen der unbehandelten Referenzgruppe, diese bestand aus 5 Proben. Die drei Serien zeigten keine Unterschiede in ihrer Rohdichte auf. Die Festigung hatte also keinen Einfluss auf die Rohdichte.

Unterschiede der Rohdichte in %	
1:14	1:7
-0,06 %	-0,17 %

Tabelle 76: Unterschiede der Rohdichte der drei Versuchsgruppen in % bezogen auf die unbehandelte Referenzgruppe CA 1 – CA 5

Mittelwert	Maximum	Minimum
2,71 g/cm ³	2,71 g/cm ³	2,70 g/cm ³

Tabelle 77: Rohdichte unbehandelt

Mittelwert	Maximum	Minimum
2,70 g/cm ³	2,71 g/cm ³	2,70 g/cm ³

Tabelle 78: Rohdichte 1:14

Mittelwert	Maximum	Minimum
2,70 g/cm ³	2,71 g/cm ³	2,70 g/cm ³

Tabelle 79: Rohdichte 1:7

6.5.2. Ultraschall-Laufzeitmessung

Die Ultraschall-Laufzeitmessungen wurden an allen Proben vor Beginn der Versuche durchgeführt. Die Ultraschall-Laufzeit wurde dabei in allen drei Richtungen der Würfel gemessen und mit Hilfe der Probenabmessungen in die Ultraschall-Geschwindigkeit umgerechnet. Die Messungen wurden nach Beendigung der Frost-Tauwechsel-Versuche wiederholt und mit den Ausgangswerten verglichen.

	Mittelwert	v _A	v _B	v _C
Serie unbeh.	4,61 km/s	4,56 km/s	4,66 km/s	4,61 km/s
Serie 1:14	4,59 km/s	4,60 km/s	4,60 km/s	4,59 km/s
Serie 1:7	4,60 km/s	4,59 km/s	4,58 km/s	4,64 km/s

Tabelle 80: Ultraschall-Geschwindigkeit vor Versuchsbeginn

Die drei Prüfserien weisen nahezu identische Messwerte der Ultraschall-Geschwindigkeit auf unabhängig davon, ob sie mit dem Festigungsmittel behandelt wurden oder nicht.

Frost Tauwechsel / Einfluss auf die Ultraschall-Geschwindigkeit

Vor Versuchsbeginn				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	4,61 km/s	4,56 km/s	4,66 km/s	4,61 km/s
Serie 1:14	4,50 km/s	4,53 km/s	4,48 km/s	4,45 km/s
Serie 1:7	4,75 km/s	4,75 km/s	4,75 km/s	4,77 km/s

Tabelle 81: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe CA 1-5, CA 14/1-5, CA 7/1-5

Nach Versuchsdurchführung				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	4,28 km/s	4,25 km/s	4,32 km/s	4,33 km/s
Serie 1:14	4,29 km/s	4,32 km/s	4,27 km/s	4,29 km/s
Serie 1:7	4,59 km/s	4,60 km/s	4,57 km/s	4,56 km/s

Tabelle 82: Ultraschall-Geschwindigkeit der Gruppe CA 1-5, CA 14/1-5, CA 7/1-5 nach Durchführung des Frost Tauwechsel Versuches

Veränderung der Ultraschall-Geschwindigkeit in %				
	Mittelwert	V _A	V _B	V _C
Serie unbeh.	-6,83 %	-6,94 %	-7,37 %	-6,18 %
Serie 1:14	-4,32 %	-4,66 %	-4,74 %	-3,55 %
Serie 1:7	-3,71 %	-3,10 %	-3,69 %	-4,34 %

Tabelle 83: Veränderung der Ultraschall-Geschwindigkeit in %

Die Tabelle zeigt, dass die unbehandelte Serie mit 7% den stärksten Abfall der Ultraschall-Geschwindigkeit aufweist. Die Serie 1:14 zeigt eine geringere Veränderung mit 4% im Mittel. Die am stärksten behandelte Serie 1:7 weist die geringste Veränderung auf. Die Messwerte der Serie verringerten sich lediglich um 3,7% im Mittel im Vergleich zum Ausgangswert.

6.5.3. Frost-Tauwechsel

Die Frost-Tauwechsel-Versuche wurden an den Proben CA 1-5, CA 14/1-5 und CA 7/1-5 durchgeführt.

	Masseverlust in [M-%]
Serie unbeh.	0,00
Serie 1:14	0,00
Serie 1:7	0,00

Tabelle 84: Masseverlust durch Frost-Tauwechsel-Beanspruchung

Wie in der Tabelle 84 zu erkennen, trat bei keiner der drei Prüfserien ein Masseverlust durch die durchgeführten Frost Tauwechsel Beanspruchungen auf.

Da jedoch wie in Tabelle 83 dargestellt bei der Ultraschall-Laufzeitmessung unterschiedliche Veränderungen der Ultraschall Geschwindigkeit festgestellt werden konnten ist eine Verlängerung der Versuchsdauer für weitere Untersuchungen sinnvoll. Es könnten dadurch Unterschiede des Verhaltens durch die Temperaturwechselbeanspruchung auch anhand des Masseverlustes sichtbar gemacht werden.

Optisch haben die Proben der drei Serien ebenfalls keine Veränderungen durch die Beanspruchung gezeigt.

6.5.4. Druckversuch

Die einaxialen Würfeldruckversuche wurden an der Referenzgruppe CA XX/11-15 durchgeführt. Für die unbehandelte Gruppe standen keine Proben einer identischen Qualität des Carrara Marmors mehr zur Verfügung. Aus diesem Grund fehlen die entsprechenden Werte in Tabelle 85 für die unbehandelte Serie.

Nach der Durchführung des Frost-Tauwechsel-Versuches wurden ebenfalls Druckversuche durchgeführt und mit den Werten der Referenzgruppe verglichen.

Druckversuch	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	-
Serie 1:14	81,13 N/mm ²
Serie 1:7	79,33 N/mm ²

Tabelle 85: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppen CA 14/11-15 und CA 7/11-15

Druckversuch nach ETM	
Würfeldruckfestigkeit	σ_{DW}
Serie unbeh.	86,35 N/mm ²
Serie 1:14	75,69 N/mm ²
Serie 1:7	95,31 N/mm ²

Tabelle 86: Einaxiale Würfeldruckfestigkeit der Gruppe CA 1-5, CA 14/1-5 und CA 7/1-5 nach Durchführung des Frost Tauwechsel Versuches

Die Ergebnisse liefern kein einheitliches Bild. Die Proben der Serie 1:14 weisen nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch eine geringere Druckfestigkeit auf als ihre Referenzgruppe, wogegen die Serie 1:7 nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch eine um fast 20% höhere Druckfestigkeit aufweist als die Referenzgruppe.

6.5.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Behandlung der Proben zeigte keine Auswirkung auf die Rohdichte der Proben.

Die Betrachtung der Ergebnisse der Ultraschall Laufzeitmessung zeigte ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Serien.

Beim Frost-Tauwechsel zeigten alle drei Serien keinen Masseverlust. Lediglich die Ultraschall-Laufzeitmessungen zeigten bei allen drei Serien einen Abfall, wobei dieser bei der unbehandelten Serie am höchsten und bei der Serie 1:7 am geringsten war.

Von der Anwendung des SANOFIX 2 Festigers ist beim Carrara Marmor unbedingt abzuraten. Die aufgetretenen gelblichen Verfärbungen würden einen starken optischen Schaden darstellen.

Beim Carrara Marmor der vorliegenden Güte ist ohnedies ein Steinfestiger, wie an den Ergebnissen des Frost-Tauwechsel-Versuches abzulesen ist, nicht erforderlich.

7. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen führen zu dem Schluss, dass der Steinfestiger SANOFIX 2 von SANOTEC nicht für die Behandlung von Natursteinen zu empfehlen ist.

Das optische Erscheinungsbild aller geprüften Gesteine zeigte durch die Behandlung mit dem Produkt eine Verschlechterung. Es handelt sich bei den beobachteten Veränderungen um eine wichtigste Anforderung an Produkte für die Gesteinsfestigung.

Generell wurde bei der Behandlung der Kalksandsteine mit SANOFIX 2 eine Abnahme der Festigkeit festgestellt. Der Zogelsdorfer Kalksandstein zeigte beim Magnesiumsulfattest und beim Frost-Tauwechsel-Versuch gravierende Schäden, die bei den behandelten Proben deutlich stärker waren, als bei den unbehandelten Serien.

Die gesteinslösenden Prozesse bei den Kalksandsteinen hat schon DÖRTL (2006) beim Magnesiumsulfattest festgestellt. Die von ihm beobachteten Schäden waren erheblich stärker, jedoch waren die damals untersuchten Proben intensiver mit SANOFIX 2 behandelt. Beim Aflenzer Kalksandstein war neben der optischen Verschlechterung eine Verzögerung der Austrocknungsgeschwindigkeit feststellbar. Einzig beim Frost-Tauwechsel-Versuch zeigten die behandelten Proben einen geringeren Abfall der Festigkeit. Beim Magnesiumsulfattest waren an den Proben der behandelten Serien deutlich mehr Schäden aufgetreten, als an den Proben der unbehandelten Serie.

Bei der Untersuchung des Flyschsandsteins wurde eine Verbesserung des Frost-Tauwechsel-Verhaltens festgestellt, die auch mit den US-Laufzeitmessungen und den Druckversuchen bestätigt werden konnte. Beim Magnesiumsulfattest jedoch zeigte die unbehandelte Serie die geringsten optischen Schäden und den geringsten Masseverlust, die Serie 1:7 wies dagegen die höchste Druckfestigkeit auf. Im einaxialen Würfeldruckversuch konnte bei der Serie 1:14 ein Anstieg der Druckfestigkeit festgestellt werden, der allerdings bei der Serie 1:7 wieder stark abfiel.

Bei der Behandlung von Quarzsandstein, dem Wüstenzeller Sandstein, konnte durchgehend eine Verbesserung der Festigkeit festgestellt werden. Die Behandlung

wirkte sich nicht auf das Austrocknungsverhalten aus. Nach dem Frost-Tauwechsel-Versuch konnte bei der Serie 1:7 die höchste Druckfestigkeit festgestellt werden. Ebenso verhielt es sich nach dem Magnesiumsulfattest, hier waren bei der Serie 1:7 die höchste einaxiale Würfeldruckfestigkeit feststellbar. Die einaxialen Würfeldruckversuche lieferten die deutlichste Verbesserung durch die Behandlung. Einzig die optische Veränderung der Probenoberfläche durch die Behandlung verhindert die Eignung des Produktes für die Behandlung von Wüstenzeller Sandsteins.

Beim Carrara Marmor konnte keine eindeutige Veränderung der Festigkeit festgestellt werden. Die unansehnliche Gelbfärbung des Gesteins nach mehrmonatiger Lagerung lässt an dieser Stelle dringend von der Anwendung des Produktes abraten.

Die durchgeführten Versuche verdeutlichen, dass SANOFIX 2 von SANOTEC in der von SANOTEC gewählten Konzentration und Behandlungsart der Proben bei keiner der getesteten Natursteine zu einem positiven Ergebnis geführt hat. Die Veränderungen wie sie zu Beispiel am Zogelsdorfer Kalksandstein aufgetreten sind, können nicht erklärt werden, da über die chemische Zusammensetzung des Produktes keine Details bekannt waren. Wie schon erwähnt hat die Herstellerfirma aus patentrechtlichen Befürchtungen die chemische Zusammensetzung ihres Produktes geheim gehalten.

8. Literaturverzeichnis

BREHLER, B. [1951]: Über das Verhalten gepresster Kristalle in ihrer Lösung. - Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte 1951, 110 – 131.

DÖLTL, A. [2006]: Änderung der gesteinsphysikalischen Eigenschaften durch den Einsatz von Steinfestigungsprodukten. – Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie, TU Wien.

DUTTLINGER, W. [1990]: Die Zerstörung von Naturwerksteinen durch Salze. - Dissertation, Freiburg (Breisgau).

FALK GIERLINGER, A. [2004]: strukturelle Festigung von Zogelsdorfer Kalksandstein und Lindabrunner Konglomerat und ihre Auswirkung auf die gesteinsphysikalischen Eigenschaften. – Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie der TU Wien.

FLEISCHER, G.[2001]: Strukturelle Festigung von St. Margarethener Kalksandstein (Burgenland) und deren Auswirkung auf die gesteinsphysikalischen Eigenschaften. – Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. TU Wien.

FLEISCHER, G. [2002]: Beurteilung von Ultraschallmessungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege. - Dissertation am Institut für Ingenieurgeologie der TU Wien.

GROBE, J. [2001]: Natursteinkonservierung – Grundlagen, Entwicklung und Anwendungen. – WTA-Schriftenreihe Heft 23; AEDIFICATIO Verlag, Freiburg.

GSCHAIDER, F. [2002]: Laboruntersuchungen zur Salzkristallisation an Festgesteinen. – Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie der TU Wien.

KIESLINGER, A. [1951]: Gesteinskunde für Hochbau und Plastik. – Schriftenreihe des Wirtschaftsförderungsinstit. der Kammer der gew. Wirtschaft für Wien. Österreichischer Gewerbeverlag, Wien.

MORTENSEN, H. [1933]: Die „Salzsprenzung“ und ihre Bedeutung für die regional-klimatische Gliederung der Wüsten. – Petermanns Mitteilungen aus Justus Perthes geographischer Anstalt 79, 130 – 135.

MÜLLER, G.O. [1988]: Lehrbuch der angewandten Chemie, Band II: Chemisch-mathematische Übungen. 3., durchges. Auflage. S. Hirzel Verlag Leipzig.

ÖNORM B3121 [1978]: Prüfung von Naturstein: Reindichte, Rohdichte, Schüttdichte.

ÖNORM B3122 [1988]: Prüfung von Naturstein: Wassergehalt und Wasseraufnahme.

ÖNORM B3123 Teil 1 [1990]: Prüfung von Naturstein: Verwitterungsbeständigkeit – Beurteilungsgrundlagen.

ÖNORM B 3124 Teil 2 [1981]: Prüfung von Naturstein: Mechanische Gesteinseigenschaften – Einaxiale Würfeldruckfestigkeit.

ÖNORM EN 12370 [1990]: Prüfverfahren für Naturstein: Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen.

ÖNORM EN 14579 [2002]: Prüfverfahren für Naturstein: Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung.

ROETZL, R. UND STEININGER, F. [1991] Die tertiären Ablagerungen im weiteren Raum von Eggenburg – [in:] Katalog zur Sonderausstellung des Krahuletz Museums „Eggenburg am Meer – Eintauchen in die Erdgeschichte“

ROHATSCH, A. [1999]: Die Bau- und Dekorsteine der Kartause Mauerbach. - Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege, LIII 1999 Heft 2/3/4 Österreichisches Bundesdenkmalamt. Verlag Anton Schroll & Co, Wien.

SAUDER, M. und SCHLOENBACH, R. [1995]: Schäden am Außenmauerwerk aus Naturstein. – Schriftenreihe schadensfreies Bauen. Zimmermann G. IRB Verlag, Stuttgart.

SHEREMETI-KABASHI, F. [2002]: Untersuchung der Gefügeanisotropie von Carrara Marmor und deren Einfluss auf die Verwitterung. – Dissertation an der Fakultät für Geowissenschaften an der Ludwig-Maximilians-Universität München.

SNETHLAGE, R. und WENDLER, R. [1995]: Methoden der Steinkonservierung - Anforderungen und Bewertungskriterien. – Natursteinkonservierung I. Verlag Ernst Sohn, Berlin – München.

STINY, J. [1929]: Technische Gesteinskunde, 2.Auflage. Springer Verlag, Wien.

TORRACA, G. [1986]: Poröse Baustoffe: Eine Materialkunde für die Denkmalpflege. – Übers., bearb. u. erg. von Johannes WEBER. Verlag der Apfel, Wien.

WEBER, H. [1984]: Mauerfeuchtigkeit: Ursachen und Gegenmaßnahmen. Kontakt und Studium, Band 137: Bauwesen. Expert Verlag, Grafenau, Württemberg.

WEBER, H. [1985]: Steinkonservierung: der Leitfaden zur Konservierung und Restaurierung von Natursteinen. Kontakt und Studium, Band 59: Bauwesen. Expert Verlag, Sindelfingen