

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Waldviertler Marmor

**Bestimmung der gesteinsphysikalischen
Eigenschaften und des Verwitterungsverhaltens.**

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

a.o. Univ. Prof. Mag. rer. nat. Dr. nat. tech. Rohatsch Andreas
Institut für Geotechnik

Vorstand: o. Univ. Prof. Dr. phil. Tentschert Ewald-Hans

eingereicht an der Technischen Universität Wien,
Fakultät für Bauingenieurwesen,

von:

Rosemarie Wiesinger

E 610 / 95 25 929

A – 1140 Wien, Hernstorferstraße 3/8

Wien, Juni 2010

Unterschrift:

KURZFASSUNG

Thema dieser Diplomarbeit ist das Verwitterungsverhalten von graphitgrauem Marmor aus dem Waldviertel. Er wird häufig für Denkmäler, Dekormaterialien, Boden- oder Fassadenplatten verwendet. Die Bau- und Kunstwerke unterliegen aufgrund der klimatischen Bedingungen der fortschreitenden Zerstörung durch Verwitterung. Für die Konservierung und Restaurierung des Marmors ist die Bestimmung des Verwitterungsfortschrittes wesentlich.

In der vorliegenden Arbeit werden die gesteinsphysikalischen Eigenschaften und das Verwitterungsverhalten von Waldviertler Marmor bestimmt. Das Grundkonzept basiert auf dem Vergleich der Gesteinseigenschaften in sechs verschiedenen Zuständen:

- bruchfrisch
- nach 25 Frost-Tauversuchen
- nach 50 Frost-Tauversuchen
- nach zehnmaliger Temperaturbeanspruchung von 200 °C
- nach zehnmaliger Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 Frost-Tauversuchen
- maximal verwittert (natürlich verwittertes Material)

Die Charakterisierung der Gesteinszustände erfolgt mittels verwitterungssensibler petrophysikalischer Parameter:

- Rohdichte
- Massenbezogene Wasseraufnahme
- Ultraschallgeschwindigkeit
- Wasseraufnahme- und Wasserabgabe
- Spaltzugfestigkeit
- Einaxiale Druckfestigkeit

Durch Ermittlung und Vergleich der gesteinsphysikalischen Parameter soll die Spannbreite der Parameter aufgezeigt werden, die Marmor im Laufe seiner Lebensdauer aufweist.

Es kann gezeigt werden, dass 25 bzw. 50 Frost-Tauwechsel keine erkennbaren Gefügauflockerungen bewirken. In einem zweiten Versuch wurden bruchfrische Prüfkörper zuerst zehnmalig unter einer Temperatur von 200 °C und anschließend einem zehnfachen Frost-Tauwechsel unterzogen. Durch Vergleich der Ultraschalllaufzeiten in Abhängigkeit zur Messdistanz kann gezeigt werden, dass die zehn Frost-Tauwechsel eine Schädigung des Materials bewirkten. Daraus lässt sich schließen, dass einer Gefügezerstörung durch Frost-Tauwechsel einer vorhergehenden thermischen Beanspruchung bedarf.

ABSTRACT

Often the graphite grey marble from the Waldviertel in Lower Austria is used for monuments, decorative materials, floor and facade panels. These buildings and works of art are governed by the climatic conditions of the progressive destruction by weathering. For the preservation and restoration it is essential to determine the weathering progress.

In this thesis the petrophysical properties and weathering behaviour were determined for the marble from Waldviertel. The basic concept is based on the comparison of rock properties for six different states:

- Non-weathered
- After 25 frost-thaw tests
- After 50 frost-thaw tests
- Ten times exposed to a temperature of 200 °C
- Ten times exposed to a temperature of 200 °C and 10 frost-thaw tests
- Weathered maximum

The characterization of the rock conditions was performed by petrophysical parameters, which are sensitive to the weathering process:

- Apparent density
- Water absorption bases on the bulk
- Ultrasonic velocity
- Water absorption and water delivery
- Splitting tensile strength
- Uniaxial compressive strength

By identifying and comparing these petrophysical parameters, the range of parameters is identified which the marble has throughout his life.

After 25 and 50 frost-thaw tests respectively no recognizable structure loosening has been observed.

In a second experiment, the non-weathered specimens were exposed to a temperature of 200 °C ten times before ten frost-thaw tests were performed. By comparing the ultrasonic running time, depending on the measured distance, it was shown that the ten frost-thaw tests causes damage of the material. That means that any structural damage due to frost-thaw testing requires a previous thermal stress.

DANKSAGUNG

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Mutter, Gertrude Wiesinger, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg stets unterstützt hat und mir die Ausbildung mit viel Geduld und Ausdauer ermöglicht hat.

Meinen Großeltern, Maria und Johann† Wiesinger, aus der Rosmühle im Waldviertel danke ich für die Unterstützung, die mir den nötigen Rückhalt für das Studium gegeben hat.

Meinem lieben Onkel Alfons Wiesinger danke ich, da er schon früh mein Interesse für die Technik, den Hausbau u.v.m. geweckt und gefördert hat und somit maßgeblich an meiner Studienwahl beteiligt war. Danke dass du stets für mich da bist und immer an mich glaubst.

Meinem lieben Freund Thomas Niederkofler danke ich für die jahrelange Unterstützung, Freundschaft und Liebe. Danke für deine Hilfsbereitschaft, dein Verständnis und deinen Optimismus. Du bist der beste und zuverlässigste Lebenspartner den man sich wünschen kann.

Ein großer Dank geht an Marianne und Richard Niederkofler nach Vorarlberg. Danke, dass ihr immer so positiv, optimistisch und warmherzig seid und dass ihr mich stets unterstützt.

Weiters möchte ich mich bei meinen Studienkollegen und mittlerweile langjährigen Freunden für ihren Beistand und Zuspruch bedanken. Die Gründung der „Chicken“ von Barbara Gagliano, Susanne Haidinger, Samantha Ogris und Nasanin Entezari war eine unserer besten Ideen. Bei Johannes Blieweis, Michael Fister, Peter Haas, Jürgen Haberl, Jan Höbart, Robert Schweinzer, Markus Unterreiter und Alexander Winkler bedanke ich mich herzlichst für ihre tiefe Freundschaft. Danke für die gute und angenehme Zusammenarbeit, die durchstandenen Lernabende und Prüfungsvorbereitungen, die Mitschriften und die zusammen verbrachte Zeit. Ihr alle habt mir eine einzigartig tolle Studentenzeit beschert und seid an meinem Erfolg maßgeblich beteiligt.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Freundinnen Susanne Gulz, Christina Schachinger und Katarzyna Szymura. Ihr wart immer eine große Stütze und hattet für mich stets ein offenes Ohr. Bei Julia Kleindienst, Babsi und Susi möchte ich mich für die Lesekorrekturen bedanken.

Besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer a.o. Univ. Prof. Mag. rer. nat. Dr. nat. tech. Rohatsch Andreas für seine Geduld und Unterstützung bedanken. Weiters möchte ich mich bei Christine Cerny, der guten Seele des Instituts für Geotechnik und der „Perle“ der Technischen Universität für ihre Freundschaft und Hilfsbereitschaft bedanken. Allen Institutsangehörigen danke ich für das gute Arbeitsklima und bei Christoph Hauser bedanke ich mich für seine Hilfe im Labor.

Danke an die Universität in Frankreich „Institut national des Sciences Appliquées de Strasbourg“, die mir eine große Last von den Schultern genommen hat.

VORWORT

ANTWORT

Zu den Steinen
hat einer gesagt:
seid menschlich

Die Steine haben gesagt:
wir sind noch nicht
hart genug

Erich Fried

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung.....	9
2.	Geographische und geologische Übersicht.....	11
2.1.	Böhmische Masse	13
2.1.1.	Entstehung des Waldviertelkristallins.....	13
2.1.2.	Marmor im Moldanubikum	14
2.1.2.1.	Chemische Analyse.....	15
2.1.2.2.	Mineralogische Analyse	15
2.1.3.	Marmor im Moravikum	17
2.2.	Geschichte der Marmorverwendung in Niederösterreich.....	18
2.3.	Steinbrüche in Kalkgrub	19
3.	Methodischer Ansatz.....	21
3.1.1.	Allgemeines	21
3.1.2.	Bestimmung der Rohdichte	21
3.1.2.1.	Allgemeines	21
3.1.2.2.	Verwendetes Messgerät.....	22
3.1.2.3.	Messdurchführung	22
3.1.3.	Messung der Ultraschallgeschwindigkeit.....	23
3.1.3.1.	Allgemeines	23
3.1.3.2.	Verwendetes Messgerät.....	24
3.1.3.3.	Messdurchführung	25
3.1.4.	Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten	25
3.1.4.1.	Allgemeines	25
3.1.4.2.	Verwendetes Messgerät.....	27
3.1.4.3.	Messdurchführung	27
3.1.5.	Frost-Tauversuch	29
3.1.5.1.	Allgemeines	29
3.1.5.2.	Verwendetes Messgerät.....	30
3.1.5.3.	Messdurchführung	30
3.1.6.	Temperaturbeanspruchung	31
3.1.6.1.	Allgemeines	31
3.1.6.2.	Verwendetes Messgerät.....	32
3.1.6.3.	Messdurchführung	32
3.1.7.	Spaltzugfestigkeit.....	33

3.1.7.1.	Allgemeines	33
3.1.7.2.	Verwendetes Messgerät.....	35
3.1.7.3.	Messdurchführung	35
3.1.8.	Einaxiale Druckfestigkeit.....	37
3.1.8.1.	Allgemeines	37
3.1.8.2.	Verwendetes Messgerät.....	38
3.1.8.3.	Messdurchführung	38
4.	Ergebnisse der Laborversuche	40
4.1.	Unverwitterte Probekörper	40
4.1.1.	Allgemeines	40
4.1.1.1.	Probenherstellung	40
4.1.1.2.	Einteilung und Bezeichnung der Proben	40
4.1.2.	Rohdichte	40
4.1.3.	Messung der Ultraschallgeschwindigkeit	42
4.1.4.	Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten	44
4.1.5.	Spaltzugfestigkeit	45
4.1.6.	Einaxiale Druckfestigkeit	45
4.2.	Frost-Tauwechsel	46
4.2.1.	Allgemeines	46
4.2.2.	Rohdichte	46
4.2.3.	Messung der Ultraschallgeschwindigkeit	48
4.2.4.	Spaltzugfestigkeit	49
4.2.5.	Einaxiale Druckfestigkeit	49
4.3.	Temperaturbeanspruchung	50
4.3.1.	Allgemeines	50
4.3.2.	Rohdichte	50
4.3.3.	Messung der Ultraschallgeschwindigkeit	52
4.3.4.	Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten	54
4.3.5.	Spaltzugfestigkeit	55
4.3.6.	Einaxiale Druckfestigkeit	55
4.4.	Verwitterte Probekörper	56
4.4.1.	Allgemeines	56
4.4.1.1.	Probenherstellung	56
4.4.1.2.	Einteilung und Bezeichnung der Proben	58
4.4.2.	Rohdichte	59

4.4.3.	Messung der Ultraschallgeschwindigkeit	60
4.4.4.	Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten	63
4.4.5.	Spaltzugfestigkeit	63
4.4.6.	Einaxiale Druckfestigkeit	64
5.	Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse	65
5.1.	Rohdichte	65
5.2.	Massenbezogene Wasseraufnahme	65
5.3.	Ultraschallgeschwindigkeit	66
5.4.	Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten	69
5.5.	Spaltzugfestigkeit	70
5.6.	Einaxiale Druckfestigkeit	71
6.	Zusammenfassung und Ausblick	75
6.1.	Motivation	75
6.2.	Schlussfolgerungen	75
6.3.	Ausblick	76
	Literaturverzeichnis	77
	Abbildungsverzeichnis	80
	Tabellenverzeichnis	86
	Anhang	87

1. EINLEITUNG

Vergleiche (Press und Siever 1995, Seite 166).

In der Antike wurde jeder schöne Denkmal- und Dekorstein Marmor genannt, wenn er polierfähig war. Vor allem in romanischen Ländern wird diese Bezeichnung noch heute oft fälschlich verwendet.

Marmor ist ein metamorphes Gestein welches auch Metamorphit oder Umwandlungsgestein genannt wird. Der Begriff stammt aus dem griechischen *metamorphóo* und bedeutet Umgestaltung, Umformung oder Umbildung. Bei der Entstehung von Marmor wird Gestein (Sedimentgestein, Magmatit oder bereits metamorphes Gestein) durch unterschiedliche Mechanismen in die Tiefe gezogen. Durch Änderung der Druck- und Temperaturverhältnisse finden Umwandlungsprozesse statt. Die so entstandenen Metamorphite unterscheiden sich von ihrem Ausgangsmaterial durch den Mineralbestand, der Struktur und/oder der chemischen Zusammensetzung.

Unter dem Begriff Marmor wird im Allgemeinen kristalliner Kalk verstanden. Ausgangsmaterialien sind karbonatische Locker- und/oder Festgesteine, welche metamorph geprägt wurden.

In (Matthes 2001, Seite 370) wird Marmor folgendermaßen beschrieben:

„Mittel- bis grobkörniges Metakarbonatgestein mit Gehalt an Karbonaten >80 %, durch Regional- wie durch Kontaktmetamorphose gebildet. Am häufigsten Calcitmarmor, etwas seltener Dolomitmarmor, oft monomineralisch ausgebildet. Häufiger Nebengemengteil Graphit oder Phlogopit. Ausgangsprodukte: ziemlich reine Karbonatgesteine. Technische Verwendung als Ornament- und Monumentalstein in der Außen- und Innenarchitektur, v.a. für Repräsentativbauten, als Statuenmarmor, für Wand- und Bodenplatten. (Berühmte Vorkommen: Carrara, Italien; Paros, Griechenland.)“

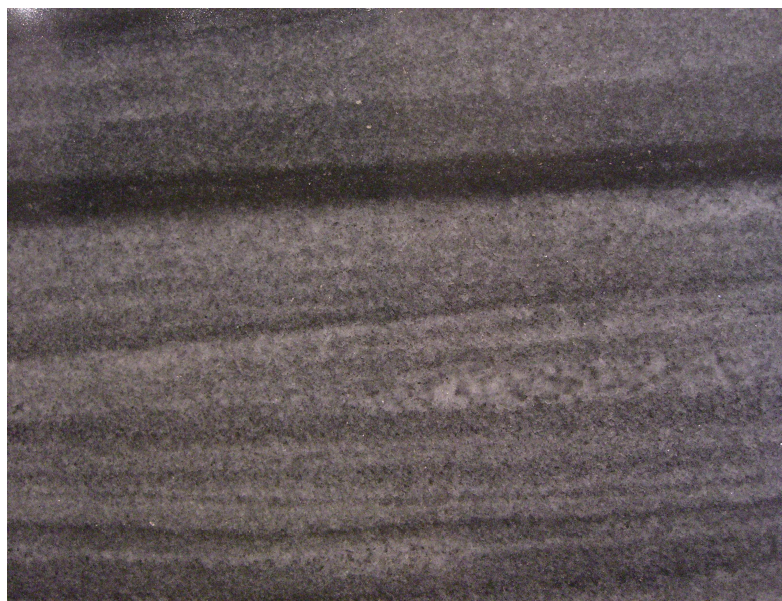


Abb. 1: Polierte Platte eines Wachauer Marmors aus Mühlendorf.

Naturstein ist einer der ältesten Baumaterialien. Die Pyramiden von Gizeh in Ägypten (2620 bis 2500 v. Chr.) oder Stonehenge in England (vermutlich 2300 v. Chr.) gehören zu den ältesten und bekanntesten Bau- und Kulturdenkmälern der Menschheit. Historische Relikte aus Stein zählen zu unserem kulturellen Erbe und helfen uns bei der Identifikation mit der eigenen Geschichte.

Stein zählt zu den dauerhaftesten Baumaterialien, dennoch ist er durch klimatische Einflüsse und mechanische Beanspruchungen einem permanenten Zerstörungsprozess ausgesetzt. Ziel der Restaurierung und Konservierung ist es, die Verwitterung zu verlangsamen, aufzuhalten oder sogar rückgängig zu machen. Um wirksame Maßnahmen zur Gesteinsrestauration zu finden, ist ein hohes Maß an Materialverständnis und Kenntnis der entfestigenden Prozesse notwendig.

In der vorliegenden Arbeit werden die gesteinsphysikalischen Eigenschaften des Waldviertler Marmors in unterschiedlichen Verwitterungsstadien bestimmt. Es werden die gewählten methodischen Ansätze erläutert und die Ergebnisse der Laborversuche einander gegenübergestellt sowie auf die Vor- und Nachteile der angewendeten Messmethoden eingegangen.

Gestaltungsmöglichkeiten:



Abb. 2: Denkmal anlässlich der Fussball-EM aus Wachauer Marmor in A-1020 Wien. Quelle: www.wachauermarmor.at



Abb. 3: Pfarrkirche Stattersdorf in NÖ. Boden und Stufen aus geschliffenem Wachauer Marmor. Quelle: www.wachauermarmor.at

2. GEOGRAPHISCHE UND GEOLOGISCHE ÜBERSICHT

Im folgenden Kapitel wird das Werk von Godfrid Wessely als Literaturquelle herangezogen, da es die geologischen Verhältnisse von Niederösterreich hervorragend beschreibt.

Vergleiche (Wessely 2006, Seite 9-13).

Der geologische Aufbau von Österreich ist generell durch die Auffaltung der Alpen außergewöhnlich. Vor allem in Niederösterreich sind die unterschiedlichsten geologischen Einheiten vertreten. Im Nordwesten von Niederösterreich kommt das älteste Massiv, die Böhmisches Masse, zum Vorschein. Der Gebirgsrumpf erstreckt sich von Deutschland über Österreich bis in die Tschechische Republik. Die Alpen und Karpaten bilden ein Gebirgsband, welches sich durch ganz Europa zieht. Ihren Anfang nehmen die Alpen in Frankreich, in Nizza und erstrecken sich über die Schweiz und Italien bis nach Wien. Weiter setzt sich das Gebirgsband in der Slowakei fort, wo es bis nach Polen und in die Ukraine reicht, um schließlich in Rumänien, in den Südkarpaten, zu enden. Begleitet werden die Alpen und Karpaten von einer geologisch jüngeren Formation, der Molassezone. Durch Niederösterreich zieht die Molassezone von Westen nach Osten und ab der Donau zieht sie nordostwärts. In den Gebirgszug, den die Alpen und Karpaten bilden, hat sich das Wiener Becken eingesenkt, woran im Südosten das Pannonische Becken grenzt.

Abb. 4 und Abb. 5 zeigen das Bauschema Niederösterreichs. Das Kristallin der Böhmisches Masse bildet die Basis des geologischen Aufbaues und ist ein im Wesentlichen bis auf die magmatische und metamorphe Wurzelzone erodiertes Gebirge. Süd- bis südöstlich der Böhmisches Masse wird der Sockel von einer jungpaläozoisch-mesozoischen Sedimentschicht überlagert, die überwiegend aus Verwitterungsmaterial der Böhmisches Masse besteht. Die Molassezone ist in Abb. 5 als gelbes, dünnes Band dargestellt, die in Richtung Süden allmählich absinkt und bis unter die Alpen reicht. Dadurch zeigt sich das gewaltige Ausmaß der Alpenüberschiebungen. Einen Beleg dafür bilden die Bohrungen Berndorf 1 (siehe Abb. 4 und Abb. 5). In gleicher Weise wird die Molassezone im Süden von der Flysch- und Klippenzonen überlagert und diese geologischen Großeinheiten werden weiter südlich von den Kalkalpen überlagert. Östlich des Alpenkörpers liegen das Korneuburger und das Wiener Becken. Da in diesem Bereich Niederösterreichs noch tektonische Kräfte aktiv sind, kommt es periodisch zu spürbaren Erdbeben.

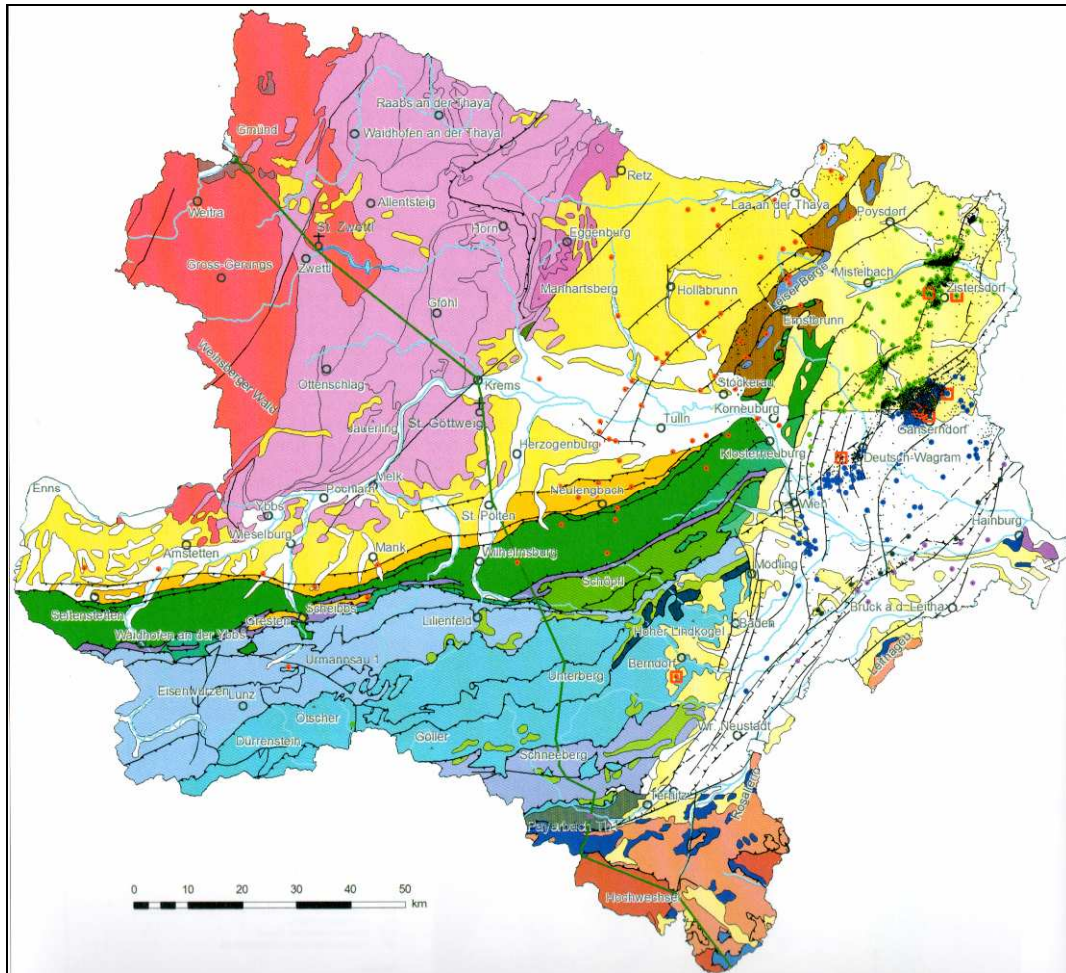


Abb. 4: Übersicht der Geologie Niederösterreichs (mit Bohrdichte und Lage des Überschnittes), Legende siehe Abb. 5. Quelle: Wessely 2006, Seite 12.

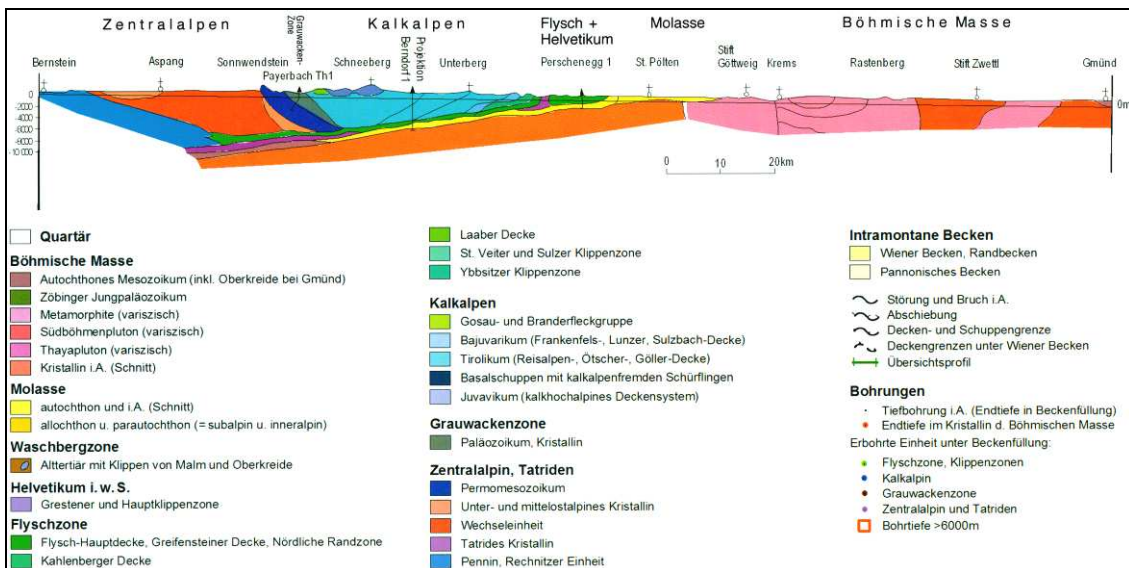


Abb. 5: Schematischer Schnitt durch die geologische Einheit des Bundeslandes Niederösterreich. Quelle: Wessely 2006, Seite 13.

2.1. Böhmisches Masse

Vergleiche (Wessely 2006, Seite 15).

Die geographische Region des Waldviertels liegt zur Gänze in der Böhmisches Masse. Hauptsächlich besteht es aus einem hoch gelegenen, leicht welligen Berg- und Hügelland. Der höchste Berg ist der Große Peilstein, im Ostrong-Massiv westlich von Pöggstall, mit einer Höhe von 1061 m. Die östliche Grenze des Waldviertels bildet der Manhartsberg, der an das Weinviertel grenzt. Der Dunkelsteinerwald, das Amstettener Bergland und die Wachau, die südlich der Donau liegen, gehören geologisch betrachtet ebenfalls zum Waldviertel.

Das Klima ist durch die Hochlage eher als rau zu beschreiben und die Böden sind für die Landwirtschaft nur begrenzt nutzbar. Das Waldviertel ist ein strukturschwaches Landwirtschaftsgebiet. Hauptsächlich wird in dieser Region Forstwirtschaft betrieben. Der östliche bis südliche Rand des kristallinen Körpers ist tiefer gelegen als das restliche Massiv. Diese Senken und Buchten wurden einst vom Molassemeer überflutet.

Es wird angenommen, dass die Böhmisches Masse der Überrest eines alten Gebirges ist. Im Paläozoikum dürfte dieses Gebirge einige tausend Meter hoch gewesen sein. In den letzten 300 Millionen Jahren haben Erosion und Verwitterung die Gebirgswurzel, den untersten Bereich des alten Gebirges, freigelegt. Heute besteht das Landschaftsbild aus weichen und abgeflachten Formen mit zahlreichen Mooren und Wasserflächen. Das Waldviertel ist für seine Wackelsteine in den Granitarenalen berühmt. Diese Restlinge entstanden durch „Wollsackverwitterung“, eine Form von tiefgreifender Verwitterung durch Hydrolyse der Feldspat- und Glimmerkomponenten unter subtropischen bis tropischen Klimabedingungen. Entlang von Klüften konnte die Erosion fortschreiten, wodurch die Gesteinsbrocken freigelegt wurden.

2.1.1. Entstehung des Waldviertelkristallins

Vergleiche (Steininger 1999, Seite 1-2).

Die Böhmisches Masse ist, mit einem Alter von 1 bis 2 Milliarden Jahren, die älteste geologische Einheit Österreichs. Die kristallinen Gesteine entstanden im Proterozoikum (2,5 Milliarden Jahre bis 570 Millionen Jahre vor heute) und im Paläozoikum (570 bis 248 Millionen Jahre vor heute) und bilden die unterste Schicht des Waldviertelkristallins. Darüber liegen Sediment- oder Absatzgesteine aus dem Mesozoikum (248 bis 65 Millionen Jahre vor heute) und dem Känozoikum (65 Millionen Jahre vor heute), die durch Erosion entstanden sind. Die so genannte Molasse bedeckt das Waldviertelkristallin der Böhmisches Masse. Wie in Abb. 5 deutlich zu sehen ist, liegen diese zwei Schichten, die in ihrem Alter und ihrer Zusammensetzung völlig unterschiedlich sind, wie zwei Stockwerke übereinander.

Die letzte gebirgsbildende Phase im Waldviertel wird auch die variszische Gebirgsbildungsphase genannt. Durch Kollision mehrerer Platten vor 340 bis 300 Millionen Jahren wurden die zwei dominierenden geologischen Einheiten des Waldviertelkristallins geformt. Das Moravikum liegt östlich. Das Moldanubikum schließt westlich an und wurde auf das Moravikum aufgeschoben. Der Unterschied der beiden Einheiten liegt einerseits im Grad der Metamorphose und andererseits im Gesteinsbestand.

2.1.2. Marmor im Moldanubikum

Vergleiche (Högelsberger 1989, Seite 213-228).

Die größten Marmorvorkommen sind in der Drosendorf-Einheit zu finden und sind meist in Paragneise der „Bunten Serie“ eingebettet. Die Mächtigkeit der Vorkommen kann von einigen Metern bis an die hundert Meter reichen. In der Landschaft sind die Marmorzüge als auffallende Härtlingsrippen zu sehen, da sie widerstandsfähiger gegenüber Verwitterung sind als das übrige Gelände. Oftmals ist der Marmor nahe der Oberfläche durch chemische Verwitterung beansprucht. Karst- und Höhlenbildungen, wie z.B. im Kremstal, können vorkommen.

Für die Marmore der Bunten Serie waren Gesteine, die mindestens 800 bis 900 Millionen Jahre alt waren, Ausgangsmaterial. Diese karbonatreichen Gesteine waren Sedimente eines flachen Epikontinentalmeeres. Das Massiv des Moldanubikums wurde zweimal metamorph geprägt. Die erste Metamorphose erreichte eine Temperatur von 700–770 °C und einen Druck von ca. 7 kbar. Es wird vermutet, dass die zweite Metamorphose durch die tektonischen Verschiebungen der variszischen Gebirgsbildungsphase stattfand. Entlang der Überschiebungslinie wurde das Moldanubikum stark metamorph geprägt. Teilweise wurden Mineralien umgewandelt (wie Pyroxene in Amphibole) oder neu gebildet (wie Muskovit, Zoisit, Albit, Talk und Prehnit). Daraus lässt sich schließen, dass mindestens Temperaturen von 500 °C geherrscht haben müssen.

In (Högelsberger 1989, Seite 213-228) werden die Marmore des moldanubischen Gneisgebirges in die Monotone Serie, die Bunte Serie und die Gföhler-Einheit unterteilt und folgendermaßen beschrieben:

Bunte Serie (=“Drosendorfer Einheit“):

In diesem Bereich herrscht eine große Gesteinsvielfalt, deswegen wird die Zone auch „Bunte Serie“ genannt. Das am häufigsten vorkommende Gestein dieser Zone ist der Paragneis. Weiters können Kalksilikatgesteine, Graphitschiefer, Amphibolite, Quarzite oder Granodioritgneise vorkommen. Marmor stellt das Leitgestein der Bunten Serie dar. Die Gesteine sind fein- bis mittelkörnig und der Hauptbestandteil ist Kalzit. Das Vorkommen von Dolomitmarmor ist sehr gering. Die Farbe dieser Marmore ist je nach Beimengung weiß, hell- bis dunkelgrau, bläulich grünlich, manchmal auch gelblich bis bräunlich. Die graue bis schwarze Farbe entsteht durch Graphiteinlagerungen. Als besonderes Merkmal der Marmore der Bunten Serie gilt ihre schöne Bänderung, die mehr oder weniger stark ausgebildet sein kann. Reinweiße oder einfarbige Marmore kommen kaum vor. Besonders schöne und auffällige Marmore weisen große, stängelige und durch Graphit dunkelgrau gefärbte Tremoliteinschlüsse auf. Weiters gibt es in diesem Bereich auch Marmore, die durch Glimmereinschlüsse besonders glänzen und schimmern. Als Ausnahme gelten die Hartensteiner Marmore, welche in einer orangefarbenen bis rosaroten Farbe auftreten können.

Besonders in Randzonen zum Nachbargestein haben diese Marmore einen stark unterschiedlichen Gehalt an silikatischen Beimengungen, wie Tremolit, Salit, Diopsid oder Glimmerminerale. Das Silikat Skapolith kommt ausschließlich in den Marmoren des Moldanubikums vor und kann somit als Indikator zur Gesteinsbestimmung herangezogen werden.

Weiters können in den Marmoren der Bunten Serie diverse Silikate wie z.B. Klinopyroxen oder Quarz, Plagioklas, Kalifeldspat, Granat, Amphibole, Glimmer (Biotit, Phlogopit und Muskovit) etc. vorkommen. Die Erzminerale können mit Pyrit, Pyrrhotin und Chalkopyrit etc. vertreten sein.

2.1.2.1. Chemische Analyse

Die chemische Untersuchung der Gesteinsproben des Abbaufeldes „Wunsch I“ der „Wachauer Marmor GmbH“ erfolgte mit Hilfe der Röntgenfluoreszenz (XRF) und zusätzlich wurde die Glühverlustbestimmung durchgeführt.

chem. Element:	Verhältnisformel	Probe 1: Masse - %	Probe 2: Masse - %
Siliciumdioxid	SiO ₂	0,98	1,04
Titan (IV)-oxid	TiO ₂	0,03	0,03
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃	0,57	0,62
Eisen (III)-oxid	Fe ₂ O ₃	0,23	0,22
Magnesiumoxid	MgO	1,51	1,47
Mangan (II)-oxid	MnO	0,05	0,06
Calciumoxid	CaO	52,16	52,06
Natriumoxid	Na ₂ O	0,09	0,09
Kaliumoxid	K ₂ O	0,14	0,17
Phosphorpentoxid	P ₂ O ₅	0,04	0,04
Glühverlust	GV	43,01	42,55
	Summe:	98,81	98,35

Tabelle 1: Chemische Analyse von Kalkstein, Abbaufeld „Wunsch I“. Nach: Kurzweil 1996, Seite 12 und 13.

2.1.2.2. Mineralogische Analyse

Die mineralogische Untersuchung der Gesteinsproben des Abbaufeldes „Wunsch I“ der „Wachauer Marmor GmbH“ erfolgte mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie (XRD).

Mineralbestand	Probe 1: Masse - %	Probe 2: Masse - %
Calcit	90-100 (99)	90-100 (98)
Quarz	< 5 (1)	< 5 (2)

Tabelle 2: Mineralogische Analyse von Kalkstein, Abbaufeld „Wunsch I“. Nach: Kurzweil 1996, Seite 13.

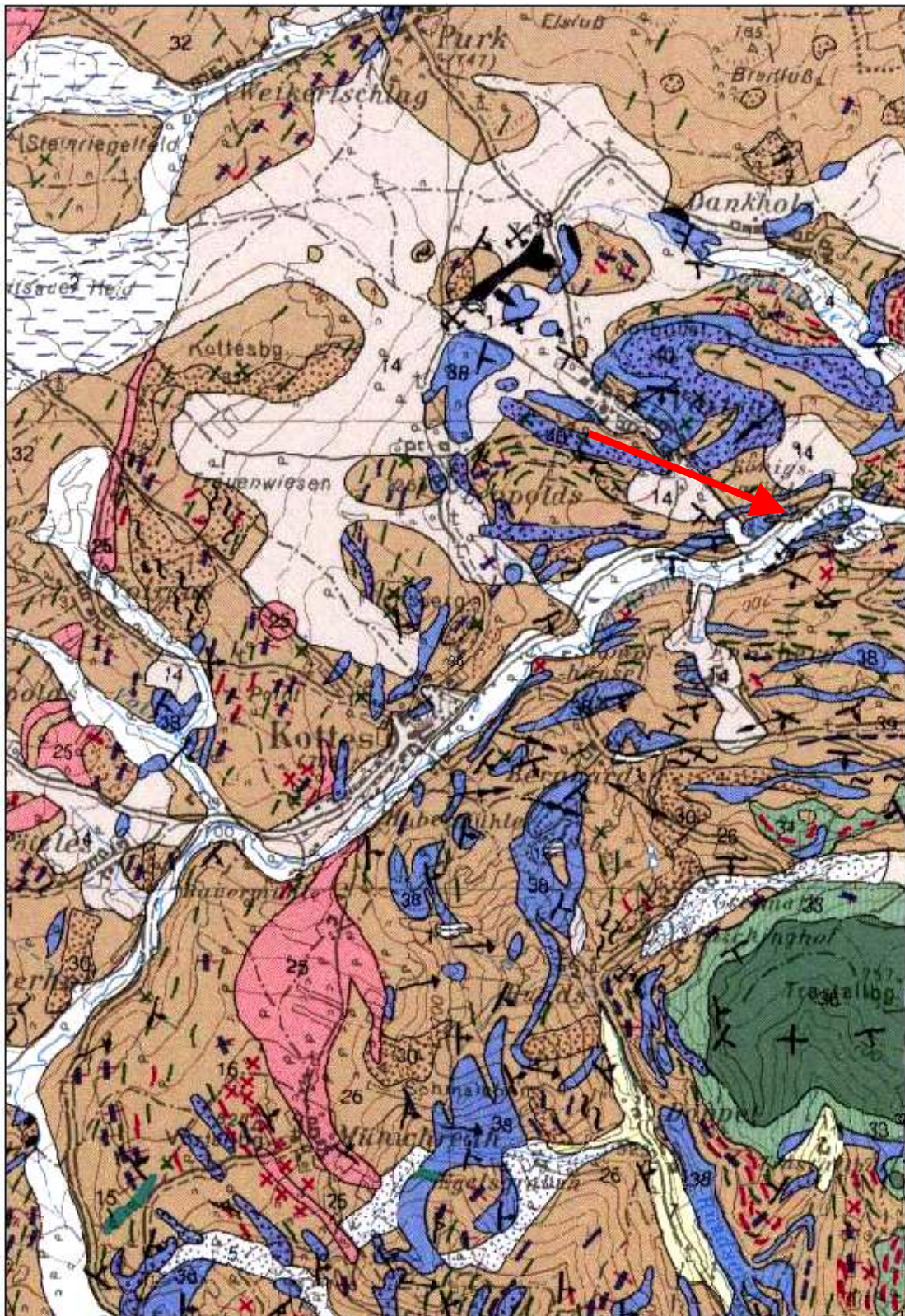


Abb. 6: Geologische Karte der Republik Österreich der Region Kottles, im Bezirk Zwettl, Niederösterreich. Der rote Pfeil markiert die Lage des Steinbruches „Wachauer Marmor GmbH“. Herausgegeben von der Geologischen Bundesanstalt Wien.

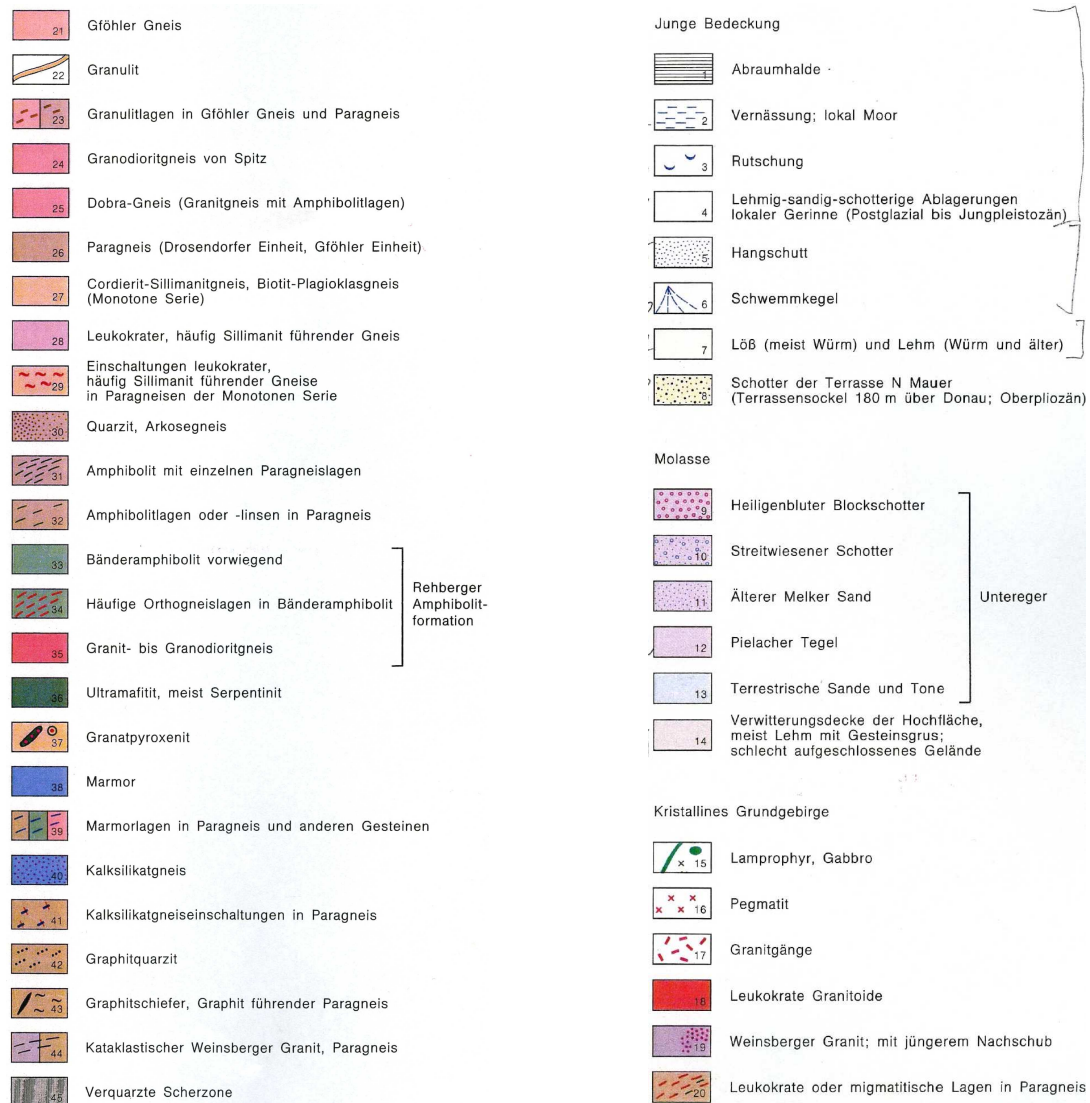


Abb. 7: Legende der geologischen Karte der Republik Österreich der Region Kottles, im Bezirk Zwettl, Niederösterreich. Herausgegeben von der Geologischen Bundesanstalt Wien

2.1.3. Marmor im Moravikum

Vergleiche (Wessely 2006, Seite 28).

In der Literatur werden diese Marmore häufig „Moravische Kalke“ genannt. Sie sind meist feinkörnig und haben ein straff geregeltes bis schiefriges Gefüge. Ihre Farbe reicht von dunkelgrau, violett, blau bis zu braun. Es können Muskovit, Biotit, Chlorit, Klinozoisit, sowie Pyrit enthalten sein. Das vollständige Fehlen von Skapolith ist typisch für Marmore aus dem Moravikum.

Hauptsächlich besteht diese Zone aus Gneis, Quarzit-Glimmerschiefer, Granit, Granodiorit, Tonalit, Diorit und Kalksilikatschiefer. Diese moravischen Marmorvorkommen werden nicht für die Herstellung von Dekorsteinen in der Steinmetzindustrie, oder im Straßenbau verwendet. Die Abbauprodukte der wenigen moravischen Steinbrüche wurden hauptsächlich von Bauern für den Hausbau oder zum Kalkbrennen genutzt.

2.2. Geschichte der Marmorverwendung in Niederösterreich

Vergleiche (Thinschmidt 1995, Seite 11-14).

Bereits die Römer dürften den Häuslinger Marmor aus dem Dunkelsteiner Wald abgebaut und verwendet haben. Aus dieser Region existieren mehrere Skulpturen und Grabsteine, die auf diese Zeitepoche schließen lassen. Es wird vermutet, dass ab der planmäßige Landnahme des Waldviertels im 11. Jhd., der Rohstoff Marmor abgebaut und verarbeitet wurde. Die erste urkundliche Erwähnung der Stadt Kalkgrub im Jahre 1096, damals „Chalchgrubi“, im Gemeindegebiet Kottes, belegt diese Vermutung. Ab dem 15. Jhd. kann man von einer kontinuierlichen Nutzung sprechen. In der romanischen Architektur wurde Marmor aus Niederösterreich als Baugestein, als architektonisches Dekorelement, als Grabstein oder in Form eines Taufbeckens verwendet. Beispiele hierfür finden sich in der Pfarrkirche von Alt- und Neupölla, in der Burgkirche von Buchberg/Kamp und in der Krypta von Oberranna.

Der aus den Steinbrüchen gewonnene Rohstoff wurde auch zum Kalkbrennen verwendet. Kalköfen gab es laut Literatur bereits 1425 in Weitra, oder 1465 in Pernegg, um nur zwei Beispiele anzuführen. Die zum Kalkbrennen benötigten Steinbrüche wurden hauptsächlich von Bauern betrieben und waren sehr klein. Der Brennkalk wurde im Hausbau zur Mörtelherstellung, oder als Wandtünche (sog. „Weißen“) verwendet. In der Landwirtschaft wurde der saure Boden des Waldviertels mit gebranntem Kalk gedüngt. Weiters setzte man den Brennkalk in der Gerberei, der Seifensiederei, der Zuckerraffinerie, der Glasindustrie und bei der Eisenverhüttung ein.

Zu Zeiten der großen Pestepidemien im Mittelalter wurden Tote mit gebranntem, aber nicht gelöschtem Kalk bedeckt. 1784 gab es von Kaiser Joseph II diesbezüglich ein kaiserliches Hofdekret, welches die Bestreuung mit ungelöschtem Kalk bei Beerdigungen vorschrieb.

1824 wurde von Ranna ein großer Marmorblock unter erheblichen Anstrengungen bis nach Wien gebracht. Erst ab diesem Zeitpunkt gewann die Suche nach Dekormaterialien an Bedeutung, da die Kalkbrennerei bis dahin die dominierende Nutzungsart war. Ab 1850 wurden Grabsteine, Grabmonumente, Denkmäler, Säulen, Stiegenstufen, Wandverkleidungen u.v.m. hergestellt.

Ende des 19. Jhdts. war die Hochblüte der Marmorindustrie im Waldviertel. Durch die schlechte Auftragslage der 1930er-Jahre und während des Zweiten Weltkriegs mussten viele Steinbruchbetreiber ihre Betriebe schließen. Während des Zweiten Weltkrieges wurden viele Steinbrüche von der Deutschen Wehrmacht betrieben, die in den darauf folgenden Jahren Material für den Ausbau der Bundesstraße von Horn nach Gmünd lieferten.

Die Nachfrage nach heimischen Dekormaterialien ist jedoch sehr stark gesunken. Exotische Dekorsteine wurden und werden aus Niedriglohnländern wie z.B. China, Indien, Brasilien etc. importiert. Einerseits litt das Waldviertel unter seiner ungünstigen Verkehrslage, und andererseits unter den höheren Preisen gegenüber dem Ausland.

2.3. Steinbrüche in Kalkgrub

Nach mündlichem Bericht von Steinmetzmeister Rudolf Wunsch, der „Wachauer Marmor GmbH“, A-3623 Kottes, Voitsau.

Gegründet wurde der Steinmetzbetrieb in Kottes, Voitsau 2 im Jahre 1880, von Anton Pfitzner. Damals waren im Abbau und in der Verarbeitung 120 Personen beschäftigt. Bis in die 1960er-Jahre wurden die Marmorblöcke mit Pferdefuhrwerken zur Bahn- oder Schiffsverladestelle transportiert. Im Jahre 1993 wurde der Steinmetzbetrieb von der Familie Wunsch erworben. Durch den Einsatz moderner Technik können die 10 Mitarbeiter heute das Gleiche leisten wie in der Gründungszeit. Die zwei Steinbrüche haben eine Fläche von 4,5 ha. Die Marmorvorkommen liegen in Nord-Süd Richtung mit einer Länge von 250 m, einer Breite von 50 bis 100 m, und einer geschätzten Tiefe von 200 m. Das Vorkommen befindet sich in der Bunten Serie des Moldanubikums, siehe Kapitel 2.1.2, und liegt eingebettet zwischen Lehm und Gneis. (Siehe Abb. 8 und Abb. 9).

Seit dem Jahr 2000 wird die Marmorart „Smaragd“ abgebaut. Dieser Stein wurde nach der höchsten Qualitätsstufe des Wachauer Weins benannt und ist in seiner Textur besonders lebhaft.

Im Steinbruch der „Wachauer Marmor GmbH“ werden zwei unterschiedliche Abbautechniken verwendet:

- Methode „**Loch neben Loch**“ (siehe Abb. 9): Mit Pressluftschlämmern werden Löcher in einem Abstand von 8 bis 10 cm gebohrt. Anschließend werden Federkeile eingetrieben, mit deren Hilfe die Blöcke gespalten werden.
- Beim „**Seilsägeverfahren**“ werden die Gesteinsblöcke mit einer Seilsäge aus dem Massiv geschnitten. Bei dieser Methode werden zwei bis drei Tiefbohrungen gesetzt, die sich in einem Punkt treffen. Anschließend wird die Seilsäge eingefädelt und als erstes der Sohlschnitt durchgeführt. Im Steinbruch werden Blöcke mit einer Länge von 10 m, einer Höhe von 3 m und einer Stärke von 1 m geschnitten. Die gewonnenen Gesteinsscheiben haben ein Gewicht von rund 90 Tonnen und müssen vom anstehenden Gestein gelöst werden. In die vertikale, 1 cm breite Fuge wird ein „Aquabag“ eingelegt. Das „Aquabag“ besteht aus einem Kissen mit Stahlplatten, das durch Wasserdruck von 2 mm auf 40 cm aufgeblasen werden kann. Der entstehende Druck kann bis zu 350 Tonnen bewegen. Anschließend werden Steine in den entstandenen Zwischenraum eingebracht. Durch einen Hydraulikstempel wird der Block schließlich umgelegt, wobei er auf einen aufgeschütteten Erdhügel fällt.

Im nächsten Schritt werden die gewonnenen Blöcke auf Fehler oder Risse überprüft. Danach werden die Blöcke mit der Seilsäge, oder durch Bohren von Keillöchern und Spalten mit Federkeilen, geteilt. Im Werk befindet sich eine Gattersäge und eine Steinkreissäge (siehe Abb. 10), mit welchen die Blöcke weiter bearbeitet werden.

Arbeiten des Steinmetzbetriebes „Wachauer Marmor GmbH“ sind unter anderem: die Fassade des Wiener Dianabades, das Foyer der Bezirkshauptmannschaft Zwettl, das Innere der Pfarrkirche Stattersdorf, der Dorfbrunnen in Loiwein, das Denkmal in St. Anton am Arlberg, das Denkmal Flüe in Wien anlässlich der Fußball-EM, oder die 250 m² gebürsteten Bodenplatten in der Kirche am Truppenübungsplatz in Allensteig. Vergleiche (Zeitschrift Wachau Magazin 2009, Seite 27).

Die Photos (Abb. 8 bis Abb. 11) wurden im Steinmetzbetrieb von Rudolf Wunsch, der „Wachauer Marmor GmbH“, A-3623 Kottes, Voitsau 2, am 24.07.2009 aufgenommen. Der Steinmetz- und Bundesinnungsmeister hat einerseits die Probekörper zur Verfügung gestellt, und andererseits hat er eine Führung durch seinen Betrieb gemacht, wofür ich mich an dieser Stelle herzlich bedanke.



Abb. 8: Im Seilsägeverfahren hergestellte Abbauwand.



Abb. 9: Abbautechnik „Loch neben Loch“ mit Pressluftschlägern.



Abb. 10: Gesteinskreissäge zur Herstellung massiver Werkstücke.



Abb. 11: Verwitterter Marmorblock.

3. METHODISCHER ANSATZ

3.1.1. Allgemeines

Das Grundkonzept der vorliegenden Arbeit besteht darin, bruchfrische Marmorproben, die einer Verwitterungssimulation im Labor unterzogen werden, mit natürlich verwitterten Gesteinsproben zu vergleichen. Die unterschiedlichen Verwitterungszustände werden an Hand sensibler petrophysikalischer Parameter charakterisiert. Ermittelt werden Rohdichte, Ultraschallgeschwindigkeit, Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten, Frost- Tauwechsel, Temperaturbeanspruchung, Spaltzugfestigkeit und einaxiale Druckfestigkeit.

Durch Ermittlung und Vergleich der gesteinsphysikalischen Parameter soll einerseits die Spannbreite der Parameter aufgezeigt werden, die Marmor im Laufe der Verwitterung durchlebt, andererseits kann der Verwitterungsfortschritt oder die verbleibende Lebensdauer einer Gesteinsprobe bestimmt werden.

3.1.2. Bestimmung der Rohdichte

3.1.2.1. Allgemeines

Jedes Gestein besitzt kleine Hohlräume, die zwischen oder in den Mineralkomponenten liegen können. Die Summe aller Hohlräume wird als Porenraum bzw. Porenvolumen bezeichnet. Die Porosität ist das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen des Gesteins. Der Porenraum zählt zu den wichtigsten Indikatoren der gesteinsphysikalischen Eigenschaften. Er hat Einfluss auf die mechanischen, physikalischen und chemischen Materialeigenschaften, sowie auf die elasto-plastischen Eigenschaften und auf die Wärmeleitfähigkeit. Die Porosität bei Marmoren kann in die intergranulare (= Porosität zwischen den Mineralkörnern) und die intragranulare Porosität (= Porosität entlang von Spaltrissen und Zwillinglamellen des Kornes) eingeteilt werden. Vergleiche (Gegendorfer 2003, Seite 29).

Im Porenraum können Wasser bzw. Wasserdampf und darin gelöste Stoffe transportiert werden. Dies ist somit für die Verwitterung von großer Bedeutung. Die Porenradialverteilung ist ebenfalls ein wichtiger Faktor, da sie die Wassertransportmechanismen innerhalb des Gesteins kontrolliert. Im Allgemeinen gilt: je größer die Porosität eines Gesteins ist, desto höher ist der Anteil an Porenwasser und desto größer ist der verwitterungsbedingte Zerstörungsprozess.

Die Verwitterung von Marmoren bringt Änderungen der Gesteinseigenschaften mit sich. Ein wesentlicher Parameter, der das Voranschreiten der verwitterungsbedingten Zerstörungsprozesse beschreibt, ist die Zunahme des Porenraums eines Gesteins. Zur Charakterisierung der entfestigenden Veränderungen wurden im vorliegenden Fall die Rohdichte und die Ultraschallgeschwindigkeit ermittelt.

In (Gegendorfer 2003, Seite 52) sind folgende Rohdichten, welche nach ÖNORM B 3121 ermittelt wurden, für natürlich verwitterte Marmore angegeben:

- Laaser Marmor: 2,703 bis 2,707 g/cm³ (Mittelwert: 2,704 g/cm³)
- Carrara Marmor: 2,698 bis 2,702 g/cm³ (Mittelwert: 2,701 g/cm³)

3.1.2.2. Verwendetes Messgerät

Das Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien verfügt im Labor der Ingenieurgeologie über eine Waage mit Durchhang zur Massebestimmung unter Auftrieb. Siehe dazu Abb. 12.



Abb. 12: Waage mit Durchhang zur Massebestimmung unter Auftrieb

Bestandteile:

- Mettler-Waage Modell: P 2010 N, mit Durchhang
- Wasserbehälter, in dem der Probekörper vollkommen und ohne seitliche Behinderung eingetaucht werden kann.

3.1.2.3. Messdurchführung

Die Messung wurde gemäß (ÖNORM B 3121 1978, Seite 1-11) nach dem Auftriebsverfahren ohne Umhüllung durchgeführt.

Die Probekörper wurden im ersten Schritt im Trockenschrank bei 70 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Massekonstanz ist erreicht, wenn sich die Masse innerhalb von 24 Stunden nicht mehr als um 0,1 % ändert. Nach dem Auskühlen auf Raumtemperatur wurden die Probekörper gewogen, wodurch die Trockenmasse ermittelt werden konnte. Im zweiten Schritt wurden die Probekörper mehrere Tage im Wasserbad gelagert. Die Lagerung erfolgte bei einer Raumtemperatur von 20 °C in Leitungswasser. Nach der Lagerung im Wasserbad wurden die Massen unter Auftrieb mit der hydrostatischen Waage gemessen. Die Lagerung der Proben während der Tauchwägung erfolgte ebenfalls in normalem Leitungswasser, welches eine Temperatur von 20 °C aufwies. Im Anschluss daran wurde durch Trockentupfen, mit einem leicht feuchten Tuch das Oberflächenhaftwasser entfernt. Die Körper wurden abgewogen, wodurch die Masse wassersatt bestimmt werden konnte.

Definition nach ÖNORM B 3121 1978, Kap. 5.1.4.1:

Die Rohdichte (ρ_R) ist die Trockenmasse der Raumeinheit eines Gesteins einschließlich etwa vorhandener Gesteinshohlräume.

Die Bestimmung der ρ_R erfolgt mit dem Auftriebsverfahren ohne Umhüllung.

$$\rho_R = \frac{m_t}{V_R} \quad [\text{g/cm}^3]$$

$$V_R = \frac{m_f - m_a}{\rho_F} \quad [\text{g/cm}^3]$$

m_t ... Masse trocken, in [g]

m_f ... Masse wassersatt, in [g]

m_a ... Masse unter Auftrieb, in [g]

ρ_F ... Dichte der Prüfflüssigkeit, in [g/cm³]

V_R ... Rauminhalt der Probe einschließlich ihrer unzugänglichen Hohlräume, in [cm³]

3.1.3. Messung der Ultraschallgeschwindigkeit

3.1.3.1. Allgemeines

Vergleiche (Fleischer 2001, Seite 64-66) und (Fleischer und Rohatsch 2003, 8 S.).

Bei der Restaurierung von Naturstein ist die rechtzeitige Schadensermittlung ohne zerstörende Probenentnahme eine große Schwierigkeit. Die Ultraschallmessung ist ein zerstörungsfreies akustisches Prüfverfahren. Man kann zwischen zwei Verfahren unterscheiden:

- Resonanzfrequenzverfahren
- Impuls-Laufzeitverfahren

Die Messapparaturen der Ultraschall-Laufzeitmessung sind sehr einfach aufgebaut und können somit leicht im Gelände verwendet werden. Die Prüfung dient zur Feststellung von Gefügeschäden innerhalb des Probekörpers. Es können Materialauflockerungen, die z.B. durch Frost- und Tauwechsel entstanden sind, festgestellt werden. Weiters können Risse und offene Klüfte gefunden und deren Lage bestimmt werden. Der Verwitterungsgrad kann durch Vergleich der Ultraschallgeschwindigkeiten von bruchfrischen mit verwitterten Gesteinen ermittelt werden.

Die Ultraschallgeschwindigkeit in Gesteinen ist abhängig von der Rohdichte, der Porosität, dem Wassergehalt, der Wegstrecke, der Form und der Größe des Probekörpers und dem „allgemeinen Zustand“ des Gesteins. Somit kann der Erhaltungszustand des Gesteins gut beurteilt werden.

Vergleiche (www.labor-koeher.de).

Bei der Ultraschallmethode breiten sich mikromechanische Schwingungen wellenförmig im Probekörper aus. Prinzipiell kann man zwei Hauptgruppen von Wellen definieren, die sich durch ihre Bewegungsform unterscheiden:

- Stoßwellen (Longitudinalwellen oder Primärwellen)
- Scherwellen (Transversalwellen oder Sekundärwellen)

Die Messfrequenz beginnt bei 20 kHz und kann bei Naturstein bis zu 1 MHz reichen. Beim Impuls-Laufzeitverfahren wird von einem Sendemesskopf ein Impuls durch den Prüfkörper geschickt, der je nach Beschaffenheit des Mediums abgeschwächt und verändert wird. Gemessen wird die benötigte Zeit, die der Schall zur Durchquerung der Messstrecke benötigt. Das Labor Koehler gibt zur Beurteilung des allgemeinen Erhaltungszustandes von Carrara-Marmor folgende Richtwerte für die US-Geschwindigkeiten an:

bruchfrisch:	5,4 bis 6,7 km/s
stark verwittert:	3,0 bis 4,0 km/s
abbruchgefährdet:	2,0 bis 3,0 km/s
vollständig zerstört:	1,0 bis 2,0 km/s
Zuckermarmor:	unter 1,0 km/s

3.1.3.2. Verwendetes Messgerät

In Abb. 13 ist das Gerät zur Messung der Ultraschall-Laufzeit mit Druckluftstativ und einer eingespannten Probe abgebildet. Am Ultrasonic-Tester ist eine Ultraschalllaufzeit von 38,0 μ s abzulesen.



Abb. 13: Druckluftstativ mit Ultrasonic-Tester und einer eingespannten Probe.

Bestandteile:

- Stativ: Typ US St 2, Nr. 0299

Hersteller: Firma LABEK, Labor- und Betriebselektronik GmbH. Eine Gummilage auf den Messköpfen gewährleistet ein sattes Aufliegen an den Probekörpern.

- Ultrasonic-Tester zum Ablesen der Impulslaufzeiten mit Laufzeitgeber Type LG-4 US 06, 40 kHz, und Laufzeitaufnehmer LA-4 US 06, 40 kHz.

3.1.3.3. Messdurchführung

Die Messung wurde gemäß (DIN EN 14579 2004, Seite 1-13) durchgeführt.

Mit einem Druckluftschlauch wird das Stativ mit einem Kompressor verbunden. Im ersten Schritt wird das Messgerät mit einem Kalibriermessstab aus Kunststoff kalibriert. Dann wird der Prüfkörper im Stativ zwischen Geber- und Aufnehmerkopf eingespannt. Der obere bewegliche Teil wird dabei mittels Druckluft bewegt und presst sich mit einem Druck von 7 bar auf die Probe. Am Ultrasonic-Tester kann dann die Impulslaufzeit abgelesen werden.

Die Verwendung des luftdruckbetriebenen Stativs hat den Vorteil, dass der Anpressdruck während der gesamten Messdauer konstant gehalten werden kann. Der Nachteil liegt darin, dass ausschließlich im Durchschallungsverfahren gemessen werden kann.

Die Messung der Wegstrecke wurde mittels Messschieber durchgeführt.

Definition nach DIN EN 14579 2004, Seite 8:

Die Impulsgeschwindigkeit (V) ist jene Geschwindigkeit mit der eine Welle ein Objekt durchdringt.

$$V = \frac{L}{T} \quad [\text{km/s}]$$

L ... Wegstrecke (Abstand der Messköpfe), in [mm]

T ... die Zeit, die der Impuls benötigt die Strecke zurückzulegen, in [μs]

3.1.4. Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten**3.1.4.1. Allgemeines**

Vergleiche (Fimmel 1996, Seite 50-61).

Je nach Porengröße gibt es unterschiedliche hygrische Untersuchungen um die Transportmechanismen der Wasserauf- bzw. Wasserabnahme zu bestimmen.

Porenklassifikation:

- Mikroporen: $< 10^{-7}$ m

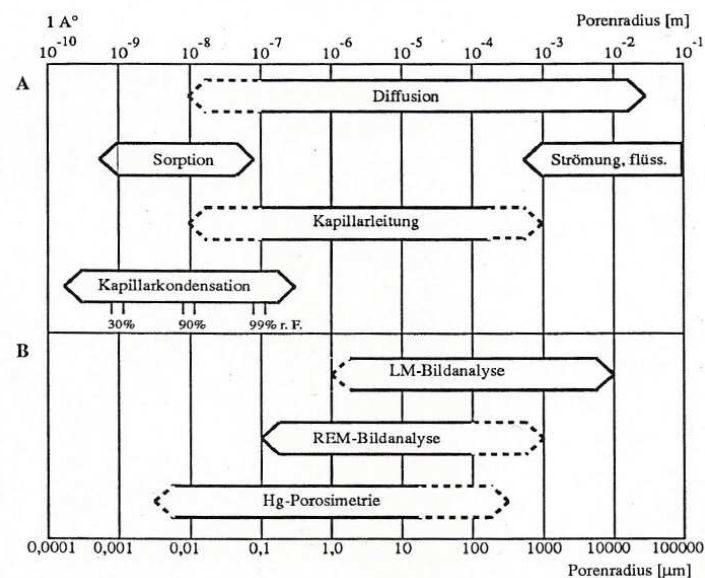
Die Poren füllen sich entweder durch Sorption (Wasseraufnahme durch Bildung eines Oberflächenfilms an der Porenwand) oder durch Kapillarkondensation (bei hoher Luftfeuchtigkeit kondensiert der Wasserdampf in den Poren). Der Anteil an Mikroporen kann durch Ermittlung der Wasserdampfsorptionsisothermen in Hygrostaten bestimmt werden. In Abb. 14 ist für die Kapillarkondensation die relative Luftfeuchtigkeit (r. F. in %) gegeben, bei welcher die Poren wassergefüllt sind.

- Mesoporen: 10^{-7} bis 10^{-3} m

Die Poren füllen sich entweder durch Wasserdampfdiffusion oder durch Kapillarleitungen bzw. Kapillarkräfte. Um auf den Mesoporenanteil zu schließen, wird die kapillare Saugfähigkeit eines Gesteins bestimmt.

- Makroporen: $> 10^{-3}$ m

Hier finden die Wassertransportmechanismen durch flüssig umströmendes Wasser statt. Durch Bestimmung des Wasseraufnahme- bzw. Wasserabgabeverhaltens wird der Anteil an Makroporen ermittelt. Bei dieser Messung sind alle oben genannten Wasseraufnahmemechanismen inkludiert.



**Abb. 14: Porenradienbereiche. A: wirksame Feuchtetransportmechanismen
B: Messbereiche verschiedener Verfahren. (Snethlage 1992 aus Fimmel 1996, Seite 36)**

In (Gegendorfer 2003, Seite 69) ist das folgende Ergebnis des Wasseraufnahmeversuches, welches ebenfalls nach ÖNORM B 3122 ermittelt wurde, für den natürlich verwitterten Marmor angegeben:

- Laaser Marmor: 0,12 bis 0,14 (Wasseraufnahme in % der Masse)

3.1.4.2. Verwendetes Messgerät

In Abb. 15 ist die Waage zur Massebestimmung mit einer feuchten Gesteinsprobe, samt verwendeter Stoppuhr, abgebildet. Hier wurde das Wasserabgabeverhalten in Abhängigkeit der Zeit bestimmt.



Abb. 15: Waage zur Massebestimmung mit Gesteinsprobe und Stoppuhr.

Bestandteile:

- Mettler-Waage Modell: P 2010 N
- Stoppuhr

3.1.4.3. Messdurchführung

Die Messungen wurden gemäß (ÖNORM B 3122 1988, Seite 1-10) durchgeführt.

- **Wasseraufnahmeversuch:**

Für die Ermittlung von m_t , der Trockenmasse, wurden die Proben im Trockenschrank bei einer Temperatur von 70 °C bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend auf 0,1 g genau gewogen. Danach wurden die Proben in einem zuvor gewählten Zeitintervall in ein Wasserbad gestellt und zur Sicherstellung eines allseitigen Wasserzutrittes auf einem mit Drahtgitter bespannten Rahmen platziert. Zur einheitlichen Darstellung der Massenzunahme wurde eine gleich bleibende Wasserbadperiode zwischen den Abwägungen gewählt: (1 Min., 5 Min., 10 Min, 15 Min., 20 Min., 25 Min, 30 Min., 45 Min., 60 Min, danach stündlich). Nach dem Herausnehmen aus dem Wasserbad wurden die Probekörper mit einem geeigneten feuchten Tuch trocken getupft, also vom Oberflächenhaftwasser befreit, und abgewogen. Die Raumtemperatur betrug bei der Messung 20 °C, die relative Luftfeuchtigkeit ca. 55 % und die Wassertemperatur 17,4 °C.

Definition nach ÖNORM B 3122 1988, Seite 2:

Die massenbezogene Wasseraufnahme (w_m) ist die auf die Trockenmasse (m_t) bezogene Differenz der Feuchtmasse (m_f) und der Trockenmasse (m_t).

$$w_m = \frac{m_f - m_t}{m_t} * 100$$

w_m ... massenbezogene Wasseraufnahme, in (% der Masse)

m_f ... Masse wassersatt

m_t ... Masse trocken

- **Wasserabgabeversuch:**

Beim Wasserabgabeversuch wurden wassersatte Proben, welche mehrere Tage im Wasserbad gelagert wurden, untersucht. Die Überdeckung der Proben mit Wasser betrug mindestens 5 cm. An allen Gesteinsoberflächen hatte das Wasser ungehinderten Zutritt. Nach dem Herausnehmen aus dem Wasserbad wurden die Probekörper mit einem geeigneten, feuchten Tuch abgetupft, also vom Oberflächenhaftwasser befreit und anschließend abgewogen. Danach wurden sie zur Sicherstellung eines allseitigen Luftzutrittes auf einen mit Drahtgitter bespannten Rahmen gestellt. Die Massenabnahme zufolge Wasserabgabe wurde durch Wägung auf 0,1 g genau bestimmt. Hauptsächlich hängt die Geschwindigkeit der Wasserabnahme von den klimatischen Gegebenheiten ab. Im Versuchsraum betrug die Raumtemperatur 20 °C, die relative Luftfeuchtigkeit ca. 55 % und die Wassertemperatur 17,4 °C.

Für die Ermittlung von m_t wurden die Proben im Trockenschrank, bei einer Temperatur von 70 °C bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend auf 0,1 g genau gewogen. Aus der gemessenen Masse, bezogen auf die Trockenmasse, wurde die zeitabhängige Wasserabgabe in Massenprozent ermittelt. Zur einheitlichen Darstellung der Massenabnahme wurde eine gleich bleibende Trocknungsperiode zwischen den Abwägungen gewählt: (1 Min., 5 Min., 10 Min, 15 Min., 20 Min., 25 Min, 30 Min., 45 Min., 60 Min, danach stündlich).

Definition nach ÖNORM B 3122 1988, Seite 2:

Die massenbezogene Wasserabgabe (w_m) jedes Prüfkörpers errechnet sich nach ÖNORM B 3122 wie folgt:

$$w_m = \frac{m_f - m_t}{m_t} * 100$$

w_m ... massenbezogene Wasserabgabe, in (% der Masse)

m_f ... Masse wassersatt

m_t ... Masse trocken

3.1.5. Frost-Tauversuch

3.1.5.1. Allgemeines

Vergleiche (Press und Siever, Seite 128-130).

Die Frostsprengung zählt zu den physikalischen Verwitterungsmechanismen. Das sich in Hohlräumen, Poren und Klüften befindende Wasser gefriert und erfährt eine Volumszunahme von 9 %. Theoretisch entwickelt sich beim Gefrieren von reinem Wasser und einer Temperatur von -22 °C ein Druck von 210 MPa. Jedoch findet diese Druckentwicklung ausschließlich in geschlossenen Poren statt, die vollkommen mit Wasser gefüllt sind. In der Natur kommen diese Verhältnisse allerdings nicht vor, da die Hohlräume offen sein müssen, damit Wasser eintreten kann. Beim Vorhandensein kleiner Porenöffnungen kann das Eis beim Gefrieren entweichen, wodurch sich der Druck reduziert. Ein weiterer Mechanismus, der für den Druckanstieg beim Frieren verantwortlich ist, ist das Anwachsen der Eiskristalle normal zur Frosteinwirkungsfläche, wodurch Druck entsteht. Dadurch kommt es zu vertikalen Hebungen im Gesteinsgefüge.

Im Allgemeinen gefriert das Wasser zuerst an der Gesteinsoberfläche und es entsteht eine dünne Eisschicht. Diese Eishaut verhindert bei anhaltendem Frost, dass Wasser entweichen kann und im Inneren des Steins entwickelt sich Druck. Diese Wirkung hängt vom Ausmaß der Wassersättigung, der Porosität, der Abkühlgeschwindigkeit, der Anzahl der Frost-Tauwechsel, der Festigkeit und der Elastizität des Gesteins ab. Allgemein gilt, dass kapillarporöse Gesteine frostempfindlicher sind als grobporöse. Der entstehende Schaden kann sich durch Rissbildungen, Absprengungen, Absanden bis hin zum totalen Zerfall der Gesteine zeigen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass für die Frostsprengkraft das Vorhandensein von Wasser notwendig ist. In sehr trockenen und kalten Regionen, wie z.B. in Nordgrönland, ist die Frostsprengung geringer als in klimatisch feuchten Gebieten, wie z.B. in Österreich.

In Tabelle 3 wurden die durchschnittlichen Frost-Wechseltage dreier österreichischer Städte während eines Jahres ermittelt. Stift Zwettl in Niederösterreich gilt als Kältepol Österreichs und weist um 325 % mehr Frost-Wechseltage auf als Wien – Innere Stadt. Durch Simulation der Frost- und Taubeanspruchung im Labor bis zur Gefügezerstörung, und bei Kenntnis der Frost-Wechseltage der jeweiligen Region, kann man auf die zu erwartende Lebensdauer eines Gesteins rückschließen.

Stadt in Österreich:	Seehöhe [m]	Frosttage	Eistage	Frost-Wechseltage
Bregenz, Vorarlberg	424	64,6	17,3	47,3
Wien - Innere Stadt	171	50,4	18,6	31,8
Zwettl - Stift, NÖ	505	140,9	36,8	104,1

Tabelle 3: Ermittlung der durchschnittlichen Frost-Wechseltage eines Jahres, Nach: Wikipedia, Frosttag.

Begriffsdefinitionen (vergleiche Wikipedia, Frosttag):

Frosttage: Das Tagesminimum der Lufttemperatur liegt unter Null Grad Celsius.

Eistage: Das Tagesmaximum der Lufttemperatur liegt unter Null Grad Celsius.

Frost-Wechsellage: Bilden die Differenz aus Frost- und Eistagen. Die Temperaturkurve wechselt von Minus- zu Plus-temperatur, oder umgekehrt, und dient zur Charakterisierung des Klimas.

Ziel des Frost-Tauversuches ist es die Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber einer wechselnden Temperatureinwirkung zu prüfen und dessen Frostbeständigkeit zu bestimmen. Der Unterschied zwischen Frostsicherheit und Frostbeständigkeit besteht darin, dass sich die Frostsicherheit auf das Korngemisch, und die Frostbeständigkeit sich auf das Einzelkorn bezieht. Im vorliegenden Fall wurde der Frost-Tauwechsel mit 25 und 50 Zyklen durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse wurden mit frischen Gesteinsproben verglichen.

Nach (ÖNORM B 3123 Teil 1 1990, Seite 10) ist die Frostbeständigkeit folgendermaßen definiert: „*Ein Gestein gilt als frostbeständig, wenn der Abfall des geprüften Festigkeitskennwertes kleiner als 20 % ist, wobei mit Hilfe einschlägiger statistischer Methoden diese Festigkeitsminderungen auf Basis einer statischen Sicherheit von 95 % gegeben sein muß.*“

Folgende Versuche wurden durchgeführt, um die Änderung der gesteinsphysikalischen Parameter durch die Frost-Tauwechselbelastung festzustellen:

- Rohdichte
- Massenbezogene Wasseraufnahme
- Messung der Ultraschallgeschwindigkeit
- Spaltzugfestigkeit
- Einaxiale Druckfestigkeit

3.1.5.2. Verwendetes Messgerät

Das Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien verfügt im Labor der Ingenieurgeologie über folgende Messinstrumente:

- Kälteschrank
- Wasserbecken zur Wasserlagerung

3.1.5.3. Messdurchführung

Nach Bestimmung der Trockenmasse, der Masse wassersatt und der Rohdichte (siehe 3.1.2.3) wurde der Frost-Tauwechsel-Versuch nach (ÖNORM B 3123 1990 Teil 1 und 2) durchgeführt. Da gemäß (ÖNORM EN 12371 2001, Seite 1-13) für die Versuchsdurchführung die Einrichtung einer Kerntemperaturaufzeichnung gefordert wird, wurde im vorliegenden Fall die ältere Norm herangezogen. Der Versuch wäre mit den im Labor zur Verfügung stehenden Mitteln nicht durchzuführen gewesen.

Im ersten Schritt wurden die Probekörper in einem Wasserbad für mehrere Tage bis zur Massekonstanz gelagert. Massekonstanz ist erreicht, wenn sich die Masse innerhalb von 24 Stunden nicht mehr als um 0,1 % ändert. Die Lagerung erfolgte bei einer Raumtemperatur von 20 °C in Leitungswasser. Zur Sicherstellung eines

allseitigen Wasserzutrittes wurden sie auf einen mit Drahtgitter (Maschenweite von 2 bis 3 cm) bespannten Rahmen platziert. Die Überdeckung mit Wasser betrug mindestens 5 cm. Der Abstand zum Boden betrug ca. 3 cm und der Abstand der Probekörper untereinander betrug mindestens 5 cm.

Nach einer Wasserlagerung von 12 Stunden wurden die Probekörper aus dem Wasserbad entnommen und mit einem geeigneten, feuchten Tuch abgetupft, also vom Oberflächenhaftwasser befreit.

Im zweiten Schritt wurde mit der Befrostung begonnen. Das Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien verfügt im Labor der Ingenieurgeologie über eine Gefriertruhe mit einer Temperatur von $-20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Die Proben wurden auf einem Holzrost platziert, wobei der Abstand der Proben untereinander in alle Richtungen ca. 5 cm betrug. Der Gefrierzyklus dauerte ebenfalls 12 Stunden.

Nach dem Frieren wurden die Probekörper aus der Gefriertruhe gehoben, um anschließend im Wasserbecken platziert zu werden. Beim Probeneintrag betrug die Wassertemperatur ca. 20 °C . Der Auftauzyklus dauerte wiederum 12 Stunden. Nach dem Auftauen wurden die Proben vom Oberflächenhaftwasser befreit und auf sichtbare Schäden kontrolliert. Danach folgte wieder der Gefrierzyklus. Die Frost-Tauwechselbeanspruchung wurde für einen Teil der Proben 25 und für einen anderen Teil 50 Mal wiederholt.

3.1.6. Temperaturbeanspruchung

3.1.6.1. Allgemeines

Vergleiche (Press und Siever, Seite 128-130) und (Rohatsch 2004, Seite 33-36):

Die Verwitterung durch Temperaturbeanspruchung zählt, wie die Frostverwitterung, zur Gruppe der physikalischen Verwitterung. Gesteine sind im Allgemeinen schlechte Wärmeleiter mit anisotropen Eigenschaften. Wenn Gestein, z.B. durch Sonneneinstrahlung, erwärmt wird, kann es zu Spannungen kommen, da die obersten 1-5 cm stärker erwärmt werden, als die darunter liegende Schicht. Die täglichen Temperaturschwankungen können vor allem in Wüstenregionen bis zu 60 °C betragen. Durch das Fehlen von Vegetation ist hier der Effekt der Temperaturverwitterung am größten. Der Temperaturunterschied zwischen Gesteinsoberfläche und dem Inneren bewirkt eine unterschiedliche Dehnung der Schichten. Die entstehenden Zug- und Druckspannungen können zwischen den einzelnen Materialkomponenten bis zu 500 bar betragen und Zwängungen bewirken, sodass die Gesteinsoberfläche abplatzt. Die Temperatursprengung kann durch die Anwesenheit von gefährlichen Salzen noch verstärkt werden. Die Verwitterungsintensität hängt von der Expositionsrichtung, der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins, des Dehnungsverhaltens, der Oberflächenbeschaffenheit, der Gesteinsfarbe, der klimatischen Region und deren Höhe, der Temperaturwechselzahl und deren Geschwindigkeit ab.

Die Auswirkungen der Temperaturverwitterung verstärken sich beim Einwirken von Feuer, oder beim plötzlichen Abkühlen wie z.B. durch Löscharbeiten oder Regen. Die Schäden können in Form von Kernsprüngen, schalenförmigen Ablösungen oder Abgrusungen der Gesteinsoberfläche auftreten.

In (ÖNORM B 3123 Teil 1 1990, Seite 9) wird definiert:

„ Unter Temperaturwechselbeständigkeit wird die Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturwechsel durch Sonnenstrahlung und Heizungseinflüsse verstanden, nicht aber gegen Schadensfeuer oder gegen im Zuge technischer Erhitzung, wie Schweißarbeiten, Durchgang durch Trockentrommeln von Heizmischanlagen u.a. bewirkte Hochtemperaturen.“

Vergleiche (ÖNORM B 3123 Teil1 1990, Seite 9) und (Widhalm, Eppensteiner und Tschegg, Seite 275-281):

Kristalline Marmore haben eine ausgesprochen starke Temperaturanisotropie. Durch das Einwirken von Temperatur dehnen sich die Calcitkristalle in Richtung einer Achse, wogegen sie in Richtung der anderen Achse schrumpfen. Vor allem Platten reagieren durch diesen Mechanismus mit Deformationen, Biegungen und Rissbildungen. Wenn die seitlichen Dehnungen der Platten durch Einspannungen, wie z.B. durch Befestigungsmittel, behindert sind, reagieren die Marmorplatten mit Wölbungen. Hauptsächlich sind Platten, Prismen, dünne Säulen, sowie Abdeckungen von Heizungen oder Fußbodenheizungen mit einseitiger Wärmestrahlung von diesem Phänomen betroffen.

Folgende Versuche wurden durchgeführt, um die Änderung der gesteinsphysikalischen Parameter durch die Temperaturbelastung festzustellen:

- 10 Frost-Tauwechsel-Versuche
- Rohdichte
- Massenbezogene Wasseraufnahme
- Messung der Ultraschallgeschwindigkeit
- Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten
- Spaltzugfestigkeit
- Einaxiale Druckfestigkeit

3.1.6.2. Verwendetes Messgerät

Das Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien verfügt im Labor der Ingenieurgeologie über folgendes Messinstrument:

- Umluftofen mit einer Temperatur von 200 °C

3.1.6.3. Messdurchführung

Die Messung wurde abweichend der (ÖNORM EN 14066 2003, Seite 1-8) durchgeführt. Für die Temperatur im Umluftofen wurden 200 °C statt der in ÖNORM geforderten 105 +/- 5 °C gewählt.

Im ersten Schritt wurde die Trockenmasse, die Masse wassersatt und die Rohdichte (siehe 3.1.2.3) bestimmt. Anschließend wurden die Proben im Trockenschrank bei einer Temperatur von 70 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Danach wurde die Ultraschallgeschwindigkeit (siehe 3.1.3.3) gemessen.

Im zweiten Schritt wurden die Probekörper im Umluftofen bei einer Temperatur von 200 °C auf einem Metallgitter platziert. Der Abstand der Proben untereinander betrug in alle Richtungen mindestens 5 cm. Die ersten neun Hitzezyklen dauerten jeweils 12 Stunden. Der zehnte Hitzezyklus wurde mit einer Dauer von 72 Stunden durchgeführt.

Nach einer Auskühlzeit von jeweils 1,5 Stunden wurde die Ultraschallgeschwindigkeit (siehe 3.1.3.3) gemessen und die Hitzebeanspruchung wurde wiederholt.

Zur Darstellung der gesteinsphysikalischen Änderung wurde das Wasserauf- und Wasserabgabeverhalten (siehe 3.1.4.3), die Trockenmasse, die Masse wassersatt und die Rohdichte (siehe 3.1.2.3) an Hand zweier Prüfkörper ermittelt. Um die einwirkende Belastung noch zu erhöhen, wurden zusätzlich zwei Proben mit 10 Frost-Tauwechsel (siehe 3.1.5.3) belastet. Danach wurde die Ultraschallgeschwindigkeit (siehe 3.1.3.3) gemessen und die Ergebnisse wurden mit den zuvor ermittelten Messungen verglichen.

3.1.7. Spaltzugfestigkeit

3.1.7.1. Allgemeines

An Hand des Spaltzugversuches, oder auch Brazilian-Test genannt, wird die Zugfestigkeit eines Baustoffes indirekt ermittelt. Die zylindrischen Prüfkörper werden quer zu den Grundflächen durch Streifenlasten bis zum Bruch belastet (siehe Abb. 17 und Abb. 18). In Abb. 16 ist die Spannungsverteilung unter einer einwirkenden Kraft F im Inneren eines belasteten Prüfkörpers bei Gültigkeit des linearen Elastizitätsgesetzes dargestellt. Im Lasteinleitungsbereich kommt es zu hohen Druckspannungen. Im Probeninneren kommt es zu Zugspannungen, welche senkrecht zur Belastungsebene wirken. Generell sind die aufnehmbaren Druckspannungen bei Beton oder Stein größer als die aufnehmbaren Zugspannungen. Aus diesem Grund versagen die Gesteinsproben auf Zug. In ÖNORM B 3124 Teil 4 wird gefordert, dass der Prüfkörper mit einem Riss versagen muss. Allgemein gilt: Die Gesteinsprobe geht zu Bruch, wenn die Zugspannung den Wert der Spaltzugfestigkeit (σ_{SZ}) des Gesteins erreicht.

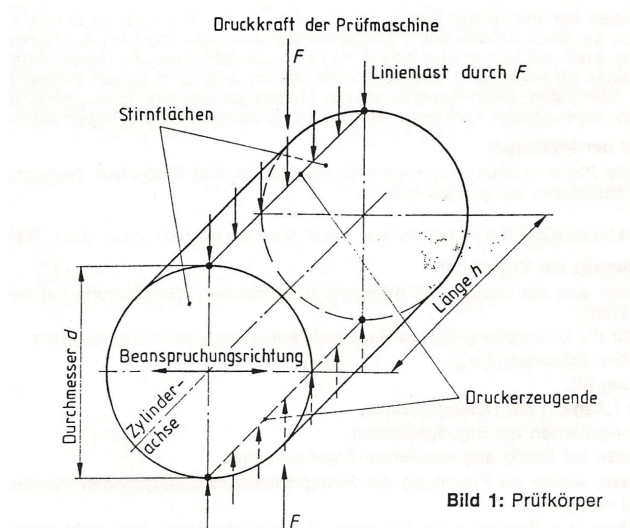


Abb. 17: Begriffsbestimmung der Spaltzugfestigkeit. Quelle: ÖNORM B 3124 Teil 4, Seite 1.

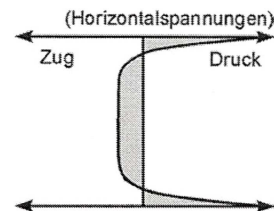


Abb. 16: Spannungsverteilung einer belasteten Probe aus: Rüdrieh 2003, Seite 21.

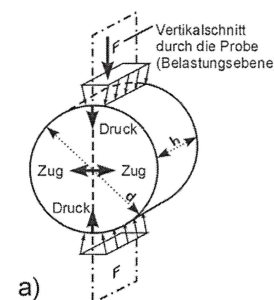


Abb. 18: Probengeometrie und Versuchsanordnung aus: Rüdrieh 2003, Seite 21.

In Abb. 19 sind drei Hauptgruppen unterschiedlicher Versuchsanordnungen von anisotropen (geschichteten oder geschieferten) Gesteinen dargestellt. Die Versuchsanordnungen unterscheiden sich durch ihre unterschiedliche Lage der Trennflächenebenen bezüglich der Belastungsrichtung. Vergleiche (Thuro und Plinninger 1998, Seite 37-39).

Definition:

- P... Prüfkörperachse
 B... Belastungsrichtung
 sf... Trennflächenebene
 α ... Winkel zwischen Prüfkörperachse und Trennflächenebene
 β ... Winkel in Stirnflächenebene zwischen Belastungsebene und Trennflächenebene

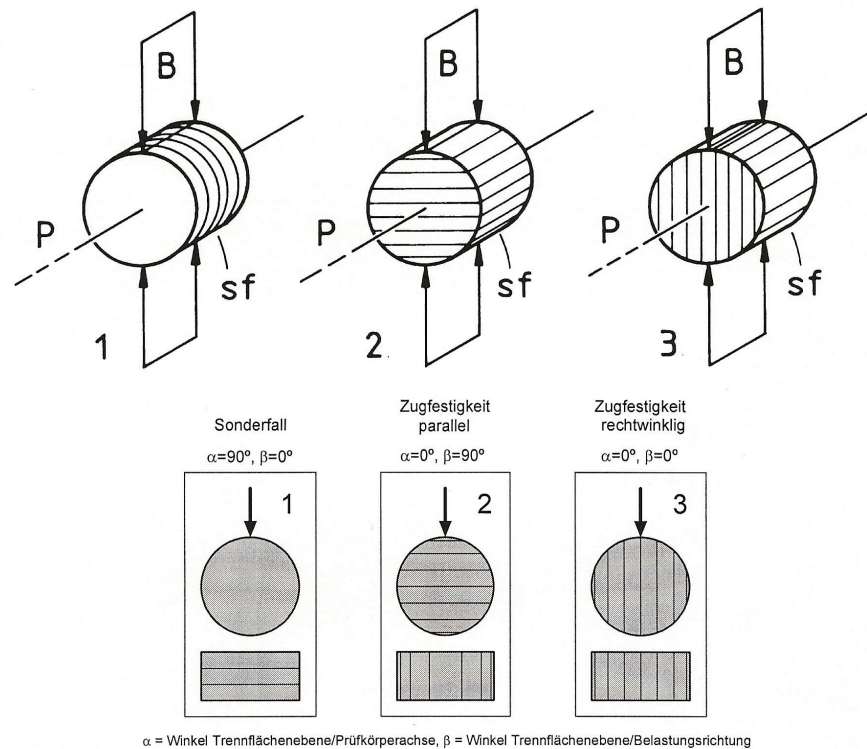


Abb. 19: Prinzip dreier unterschiedlicher Versuchsanordnungen beim Spaltzugversuch. Aus: Thuro und Plinninger 1998, Seite 38.

- **Fall 1:** $\alpha= 90^\circ$, $\beta= 0^\circ$. Der Wert der Zugfestigkeit liegt zwischen Fall 2 und 3.
- **Fall 2:** $\alpha= 0^\circ$, $\beta= 90^\circ$. Die Zugfestigkeit wird parallel zur Trennflächenebene ermittelt. Der ermittelte Wert ist am höchsten (100 %).
- **Fall 3:** $\alpha= 0^\circ$, $\beta= 0^\circ$. Die Zugfestigkeit wird rechtwinklig zur Trennflächenebene ermittelt und der ermittelte Wert ist am niedrigsten (20–50 %).

In der folgenden Laborarbeit wurde die Spaltzugfestigkeit ausschließlich nach Fall 1 ermittelt.

3.1.7.2. Verwendetes Messgerät

Das Institut für Geotechnik verfügt über eine computergesteuerte Presse, die zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit herangezogen wurde. Abb. 20 zeigt die verwendete Prüfmaschine der Firma „Quick Test Prüfpartner GmbH“ mit einer eingespannten und beanspruchten Probe. Die Presse erreicht eine maximale Druckkraft von 100 kN.



Abb. 20: Computergesteuerte Presse zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit mit einer eingespannten Probe.

3.1.7.3. Messdurchführung

Die Messdurchführung und Probenherstellung wurde gemäß (ÖNORM B 3124 Teil 4 1981, Seite 1-4) durchgeführt. Nach dem Schneiden der Prüfkörper mit der Steinkreissäge wurden die Proben im Trockenschrank bei einer Temperatur von 70 °C für 24 Stunden getrocknet. Die Prüfkörperlänge wurde mit einem Messschieber mit einer Genauigkeit von 0,1 mm gemessen. Nach einer Auskühlzeit von 0,5 Stunden wurde zuerst die Ultraschalllaufzeit (siehe 3.1.3.3) gemessen und im Anschluss wurde die einaxiale Zugfestigkeit ermittelt.

Prüfkörpergeometrie:

Vergleiche (Thuro und Plinninger 1998, Seite 37).

Gestalt und Größe der Gesteinsscheiben beeinflussen die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeit erheblich. Das Längen-Durchmesser-Verhältnis L:D zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit kann 0,5:1 bis 1:1 betragen. Im vorliegenden Fall wurden die Prüfkörper im Verhältnis L:D \approx 0,5:1 hergestellt.

Einstellungen der computergesteuerten Presse:

Bis zu einer Vorspannung von 10 N erfolgte die Steuerung der Prüfpresse mit 0,1 mm/min weggesteuert. Danach wurde auf Kraftsteuerung umgestellt, wobei die Laststeigerung 1 N/s betrug.

Die Probekörper wurden in die Presse eingespannt und der Versuch wurde gestartet. Ein angeschlossener Computer zeichnete die Kraft-Weg-Diagramme automatisch auf (siehe Anhang).

Definition nach ÖNORM B 3124 Teil 4 1981, Kap. 2.5.:

Die Spaltzugfestigkeit (σ_{SZ}) ist ein Kennwert für die Zugfestigkeit eines Gesteins und errechnet sich aus der Bruchlast und den Hauptabmessungen des Prüfkörpers (siehe Abb. 17) wie folgt:

$$\sigma_{SZ} = \frac{2 \cdot F_{SZ \max}}{d \cdot \pi \cdot h} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$F_{SZ \max}$ Die Bruchlast ist die höchste angezeigte Kraft beim durchgeführten Belastungsvorgang, in [N].

d ... Arithmetischer Mittelwert der beiden an den Stirnflächen gemessenen Abstände der Druckerzeugenden, in [mm].

h ... Arithmetischer Mittelwert der Längen der Druckerzeugenden, in [mm].



Abb. 21: Bruchflächenausbildung nach dem Brazilian-Test der bruchfrischen und im Labor beanspruchten Gesteinsproben.



Abb. 22: Nach dem Brazilian-Test der maximal verwitterten Gesteinsproben bildete sich keine Bruchfläche aus.

3.1.8. Einaxiale Druckfestigkeit

3.1.8.1. Allgemeines

Mit dem einaxialen Druckversuch wird die Druckfestigkeit eines Baustoffes ermittelt. Die zylindrischen Prüfkörper werden in Richtung der Zylinderachse mit unbehinderter Seitendehnung ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) bis zum Bruch belastet (siehe Abb. 23 und Abb. 24).

Im vorliegenden Fall wurde die Belastungsrichtung ausschließlich rechtwinkelig zur Schichtung gewählt.

Allgemein gilt: Die Gesteinsprobe geht zu Bruch, wenn die Bruchspannung (σ_1) den Wert der einaxialen Druckfestigkeit (σ_{DZ}) erreicht.

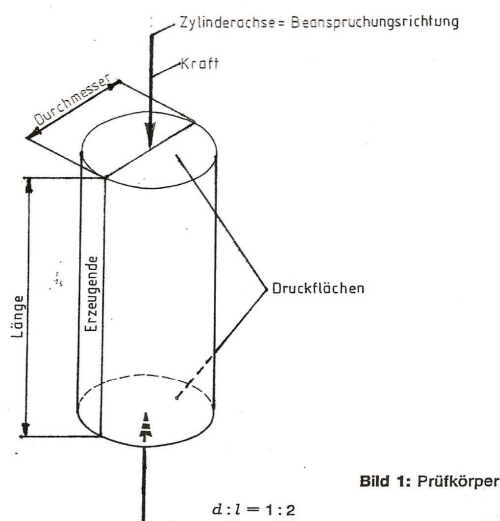


Bild 1: Prüfkörper

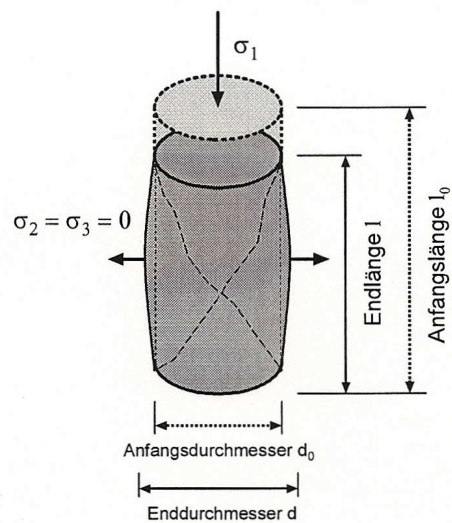


Abb. 23: Begriffsbestimmung für Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit. Quelle: ÖNORM B 3124 Teil 1 1981, Seite 2.

Abb. 24: Einaxialer Druckversuch mit gestrichelt dargestellter Bruchfigur. Aus: Thuro und Plinninger 1998, Seite 3.

In Abb. 25 sind drei mögliche Bruchfiguren beim einaxialen Druckversuch dargestellt (vergleiche Thuro und Plinninger 1998, Seite 30):

- **Bild 1:** Durch Ausbrüche, Einkerbungen oder durch nicht parallele und/oder raue Endflächen kann das Messergebnis der einaxialen Druckfestigkeit verfälscht werden. Die einwirkende Kraft wirkt nicht flächig, sondern punktuell auf die Randflächen des Probekörpers und es entsteht eine Kantenlast. In diesem Fall sind die Versuchsergebnisse zu verwerfen.
- **Bild 2:** Der Probekörper zerbricht entlang vorhandener Riss- oder Trennflächen, die in Richtung der Prüfkörperachse verlaufen, in zwei Teile.
- **Bild 3:** Durch das Entstehen von konjugierenden Scherflächenpaaren entsteht bei Bestimmung der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit die ideale Bruchfigur, die einer Sanduhr ähnelt. Es kann vorkommen, dass eine der beiden Scherflächen dominiert, siehe dazu Abb. 27.

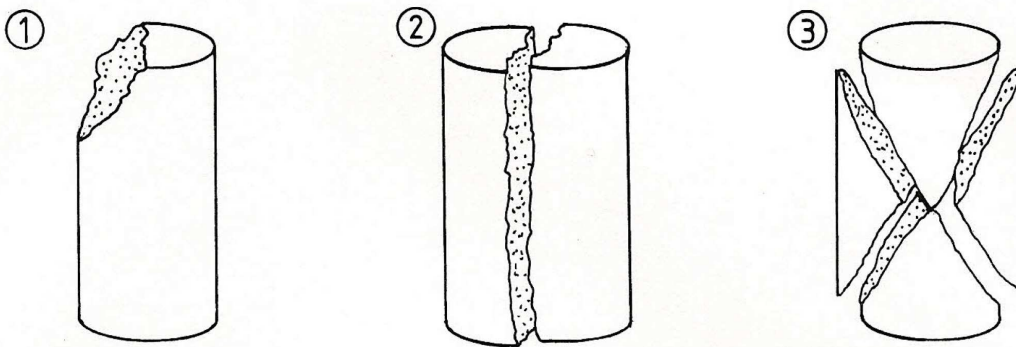


Abb. 25: Mögliche Bruchfiguren bei Ermittlung der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit. Bei Entstehung der Bruchfigur nach Bild 1 sind die Messergebnisse als ungültig zu werten. Aus: Thuro und Plinninger 1998, Seite 30.

3.1.8.2. Verwendetes Messgerät

Abb. 26 zeigt die verwendete computergesteuerte Druckpresse, die zur Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit verwendet wurde. Die Prüfmaschine der Firma „Quick Test Prüfpartner GmbH“ kann eine Maximalkraft von 100 kN auf den Prüfkörper aufbringen.



Abb. 26: Computergesteuerte Presse zur Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit mit einer eingespannten Probe.

3.1.8.3. Messdurchführung

Die Messdurchführung wurde gemäß (ÖNORM B 3124 Teil1 1981) durchgeführt. Nachdem die Prüfkörper mit der Steinkreissäge auf eine Länge von ca. 10 cm geschnitten wurden, wurden die Proben im Trockenschrank bei einer Temperatur von 70 °C für 24 Stunden getrocknet. Die Prüfkörperlänge wurde mit einem Messschieber mit einer Genauigkeit von 0,1 mm gemessen. Nach einer Auskühlzeit von 1,5 Stunden

wurde zuerst die Ultraschalllaufzeit (siehe 3.1.3.3) gemessen und im Anschluss die einaxiale Zylinderdruckfestigkeit ermittelt.

Prüfkörpergeometrie:

In ÖNORM B 3124 Teil 1 1981, Seite 2 wird gefordert, dass die Prüfkörper die Form eines geraden Zylinders mit einem Durchmesser von (50 +/- 5 mm) und einer Länge gleich dem doppelten Durchmesser (+/- 10 %) aufweisen sollen. Beim Schneiden der Proben wurde besonders darauf geachtet, dass die Grundflächen möglichst eben und parallel sind und senkrecht zu den Zylindererzeugenden stehen.

Einstellungen der computergesteuerten Presse:

Die Steuerung der Druckprüfmaschine erfolgte bis zu einer Vorspannung von 10 N mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/min weggesteuert. Nach Erreichen der Vorspannung wurde auf Kraftsteuerung mit einer Laststeigerung von 1 N/s umgestellt. Die Belastungsgeschwindigkeit aller durchgeführten Druckversuche wurde nicht variiert. Nach Programmierung der Presse wurden die Gesteinsprüfkörper eingespannt und der Versuch wurde gestartet. Während des Versuchablaufes zeichnete ein Computer die Kraft-Weg-Diagramme automatisch auf (siehe Anhang).

Definition nach ÖNORM B 3124 Teil 1 1981, Kap.2.6.:

Die einaxiale Druckfestigkeit (σ_{DZ}) ist ein Kennwert für die Druckfestigkeit eines Gesteins und errechnet sich aus Bruchlast pro Querschnittsfläche wie folgt:

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

$F_{DZ \max}$ Die Bruchlast ist die höchste angezeigte Kraft beim durchgeführten Belastungsvorgang, in [N].

A ... Arithmetischer Mittelwert der Flächeninhalte der beiden Druckflächen des Zylinders, in [mm²].



Abb. 27: Nach den einaxialen Druckversuchen stellte sich häufig dieses Bruchbild ein.



Abb. 28: Bruchbild einer maximal verwitterten Gesteinsprobe.

4. ERGEBNISSE DER LABORVERSUCHE

4.1. Unverwitterte Probekörper

4.1.1. Allgemeines

Im ersten Schritt wurden die gesteinsphysikalischen Parameter von bruchfrischen Gesteinsproben bestimmt. Anschließend wurden die Probekörper durch Frost-Tauwechsel (FTW) und/oder durch Temperatureinwirkungen beansprucht. Danach wurden die ermittelten Ergebnisse mit den Ausgangswerten verglichen.

4.1.1.1. Probenherstellung

Das Ausgangsmaterial wurde von Steinmetzmeister Rudolf Wunsch („Wachauer Marmor GmbH“, A-3623 Kottes, Voitsau) zur Verfügung gestellt. Die Probekörper wurden am Institut für Geotechnik der Technischen Universität Wien hergestellt.

4.1.1.2. Einteilung und Bezeichnung der Proben

Bei allen Prüfkörpern (Bohrkerne) handelt es sich um Wachauer Marmor. Sie wurden aus einem Gesteinsblock in zwei unterschiedlichen Längen hergestellt. Die zwölf Probekörper mit einer Länge von ca. 10 cm wurden mit A01 bis A12 bezeichnet und in den Diagrammen des Kapitels 4.1 in roter Farbe dargestellt. Die fünfzehn Probekörper mit einer Länge von ca. 20 cm wurden mit B01 bis B15 bezeichnet und in Kapitel 4.1 mit blauer Farbe dargestellt.

4.1.2. Rohdichte

Die Bestimmung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme erfolgte gemäß ÖNORM B 3121 (siehe Kapitel 3.1.2.3).

In Abb. 29 werden die ermittelten Rohdichten der unverwitterten Probekörper dargestellt.

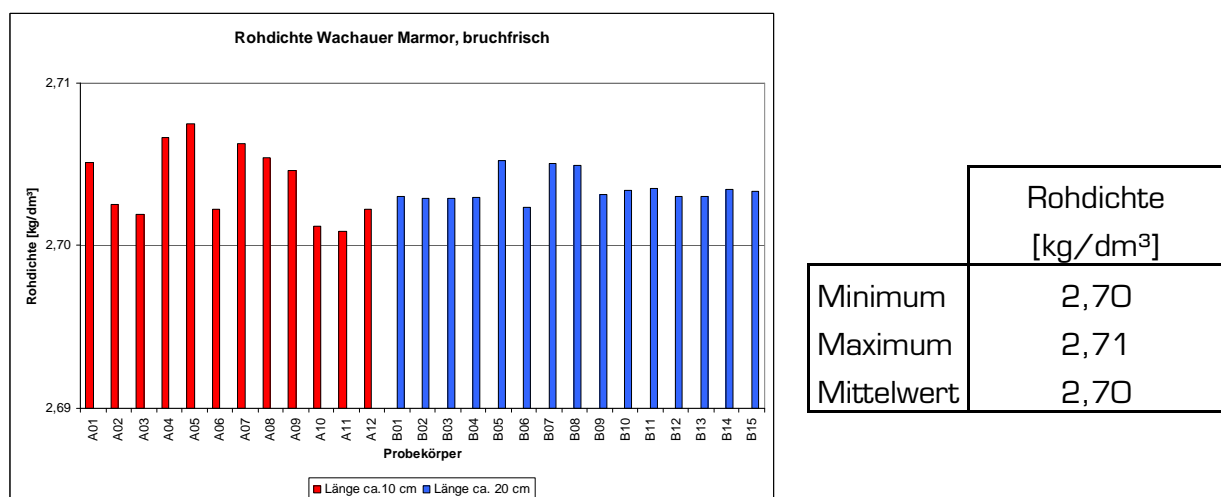


Abb. 29: Rohdichte der bruchfrischen Probekörper.

In Abb. 30 wird die massenbezogene Wasseraufnahme aller unverwitterten Gesteinsproben abgebildet, wobei der Mittelwert der Probekörper A01 bis A12 (rot) bei 0,132 % der Masse und jener der Prüfkörper B01 bis B15 (blau) bei 0,104 % der Masse liegt.

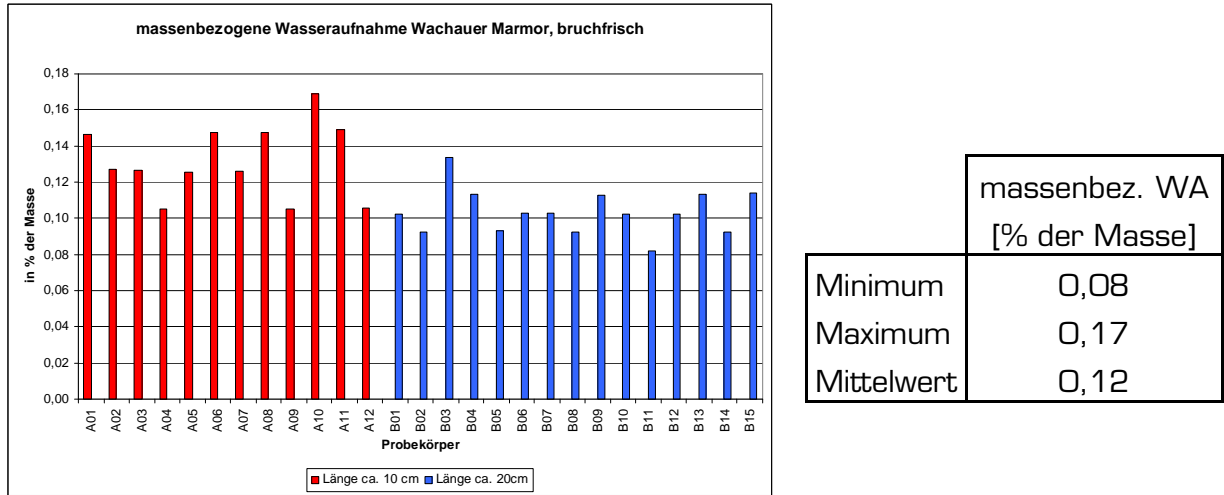


Abb. 30: Massenbezogene Wasseraufnahme der bruchfrischen Probekörper.

In Abb. 31 wird die Korrelation zwischen Rohdichte und massenbezogener Wasseraufnahme dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Werte der Probekörper mit einer Länge von ca. 20 cm (blau) enger beieinander liegen, als jene mit einer Probekörperlänge von ca. 10 cm (rot). Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass der Einfluss des Oberflächenhaftwassers bei den kürzeren Prüfkörpern eine größere Streuung der Ergebnisse bewirkt, als bei den längeren Probekörpern.

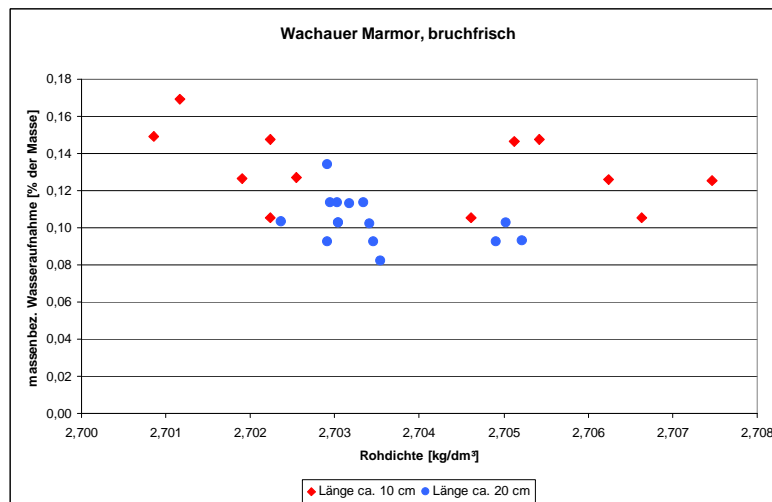
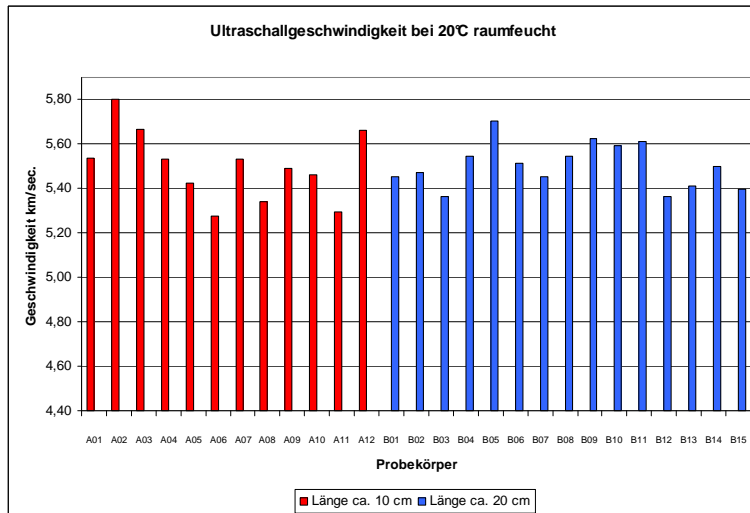


Abb. 31: Abhängigkeit der massenbezogenen Wasseraufnahme von der Rohdichte.

Die vergleichsweise wenig streuenden Parameter der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme belegen einen relativ gleichwertigen und homogenen Gefügestand.

4.1.3. Messung der Ultraschallgeschwindigkeit

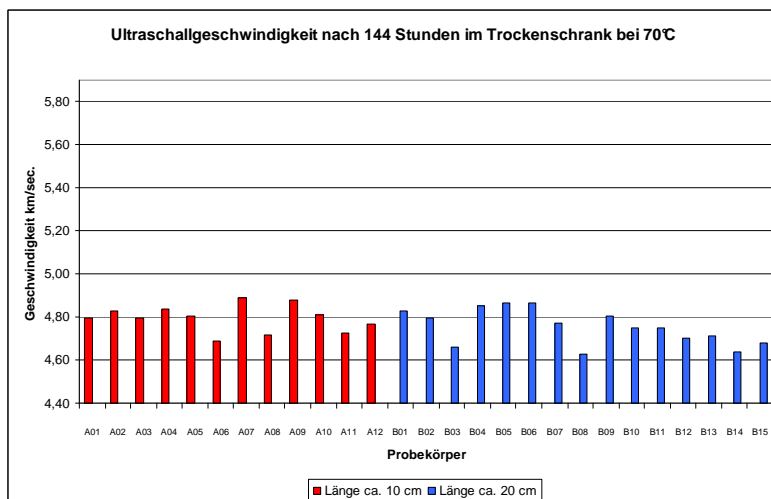
Die Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeit wurde wie in Kapitel 3.1.3.3 beschrieben, durchgeführt. Die Messung der 27 Probekörper erfolgte bei drei unterschiedlichen Feuchtigkeitsgraden der Proben (siehe dazu Abb. 32 bis Abb. 34). Alle Gesteinsproben wurden in Längsrichtung, senkrecht zur Gesteinsschichtung, gemessen. In Abb. 32 ist die Ultraschallgeschwindigkeit der bruchfrischen Probekörper dargestellt, die unter einer Raumtemperatur von 20 °C raumfeucht gelagert wurden.



	Ultraschallgesch. [km/s]
Minimum	5,28
Maximum	5,80
Mittelwert	5,50

Abb. 32: Ultraschallgeschwindigkeit der bruchfrischen Probekörper bei 20 °C raumfeucht.

Anschließend wurden die Probekörper im Trockenschrank bei einer Temperatur von 70 °C für 144 Stunden getrocknet und danach wurde die Ultraschallgeschwindigkeit gemessen (siehe Abb. 33).



	Ultraschallgesch. [km/s]
Minimum	4,63
Maximum	4,89
Mittelwert	4,77

Abb. 33: Ultraschallgeschwindigkeit der Probekörper nach 144 h bei 70 °C im Trockenschrank.

Im nächsten Schritt wurden alle Probekörper, wie in 3.1.2.3 beschrieben, im Wasserbad für mehrere Tage bis zur vollständigen Sättigung gelagert. Danach wurde die Ultraschallgeschwindigkeit an den wassergesättigten Gesteinsproben ermittelt (Abb. 34).

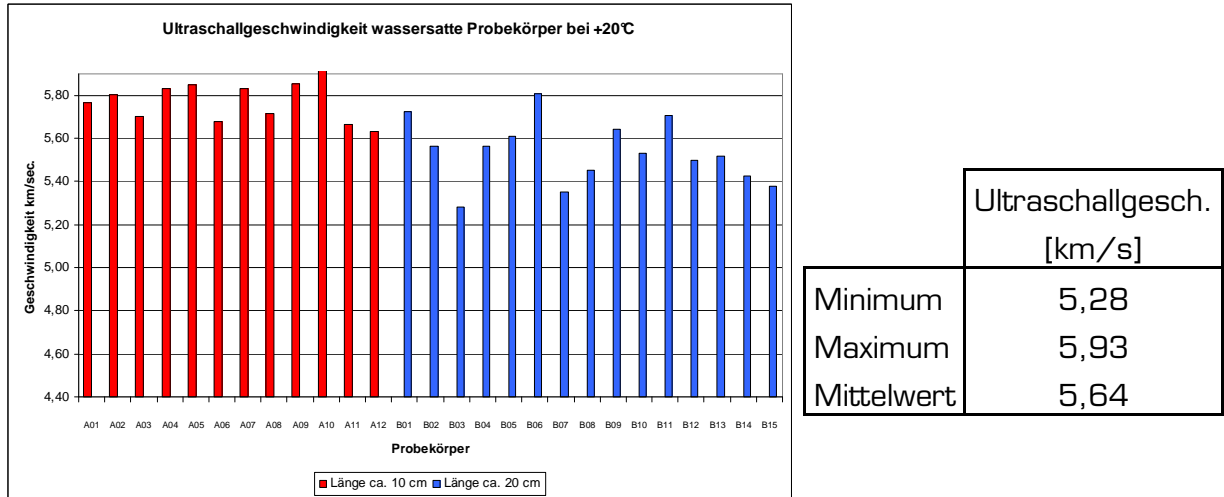


Abb. 34: Ultraschallgeschwindigkeit der Probekörper bei 20 °C wassersatt.

In Abb. 35 werden die Ultraschalllaufzeiten, in Abhängigkeit von der jeweiligen Messdistanz aufgetragen und die dazugehörigen Regressionsgeraden dargestellt.

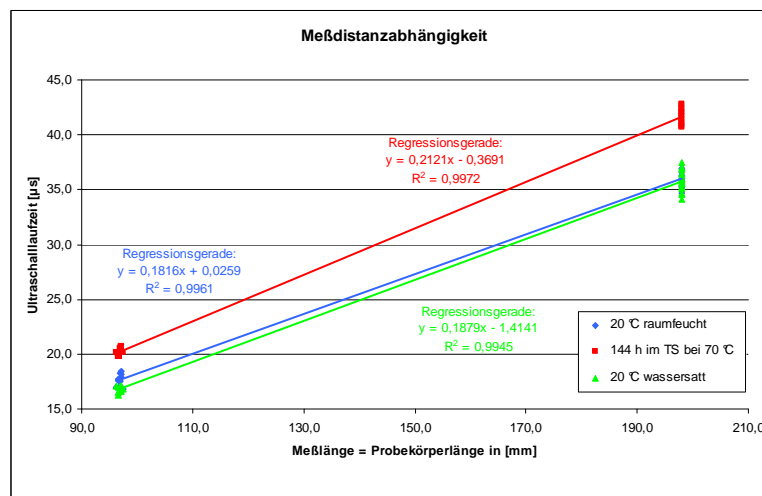


Abb. 35: Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit der Messdistanz der Probekörper bei 20 °C raumfeucht, 20 °C wassersatt und nach 144 h bei 70 °C im Trockenschrank.

Deutlich erkennbar ist einerseits der Einfluss des Wassergehaltes auf die Ultraschallgeschwindigkeit und andererseits eine geringfügige Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit bei nur einmaliger Trocknung der Proben bei 70 °C.

4.1.4. Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten

Die Durchführung dieser Versuche erfolgte wie in Kapitel 3.1.4.3 beschrieben. Die gesamte Messzeit zur Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens betrug 120 Stunden. Da Marmor nur ein geringes Wasseraufnahmevermögen hat und der Hauptanteil innerhalb der ersten 45 Minuten aufgenommen wird, werden nur die ersten 250 Minuten dargestellt. In Abb. 36 und Abb. 37 wird der Wassergehalt von drei Probekörpern als Funktion der Zeit dargestellt.

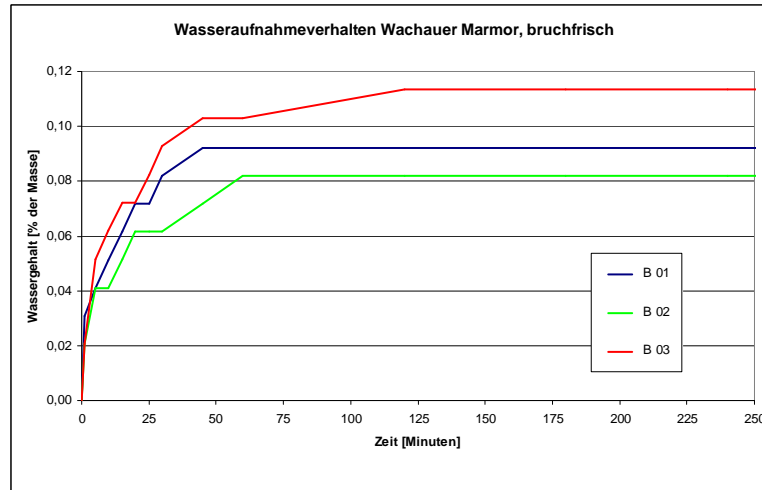


Abb. 36: Wasseraufnahmeverhalten von 3 bruchfrischen Probekörpern (B01 bis B03).

Nach Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens wurden die wassergesättigten Probekörper zur Bestimmung des Wasserabgabeverhaltens herangezogen. Hauptsächlich hängt die Geschwindigkeit der Austrocknung von den klimatischen Gegebenheiten ab. Im Versuchsraum betrug die Raumtemperatur 20 °C, die relative Luftfeuchtigkeit ca. 55 % und die Wassertemperatur 17 °C. Nach einer Messzeit von 73 Stunden wiesen die Probekörper wieder ihre Ursprungsmasse auf. Der Großteil der Wasserabgabe erfolgte innerhalb der ersten 4 Stunden, deswegen wird in Abb. 37 nicht die gesamte Messzeit, sondern nur die ersten 400 Minuten dargestellt.

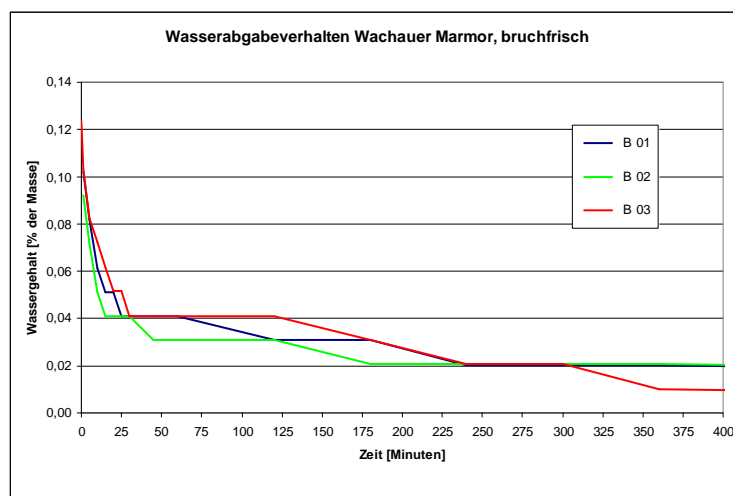


Abb. 37: Wasserabgabeverhalten von 3 bruchfrischen Probekörpern (B01 bis B03).

4.1.5. Spaltzugfestigkeit

Die Bestimmung der einaxialen Zugfestigkeit erfolgte gemäß ÖNORM B 3124 Teil 4 1981 (siehe Kapitel 3.1.7.3). In Abb. 38 sind die Spaltzugfestigkeiten von zwanzig unverwitterten Prüfkörpern dargestellt. Die Proben wurden aus drei Bohrkernen (B10, B11 und B15) mit einer Ausgangslänge von 20 cm geschnitten. Die Belastungsrichtung erfolgte, wie in Kapitel 3.1.7.1 beschrieben, stets senkrecht zur Schichtflächenebene. Der Winkel zwischen Prüfkörperachse und Schichtflächenebene beträgt bei allen Prüfkörpern ca. 90 °.

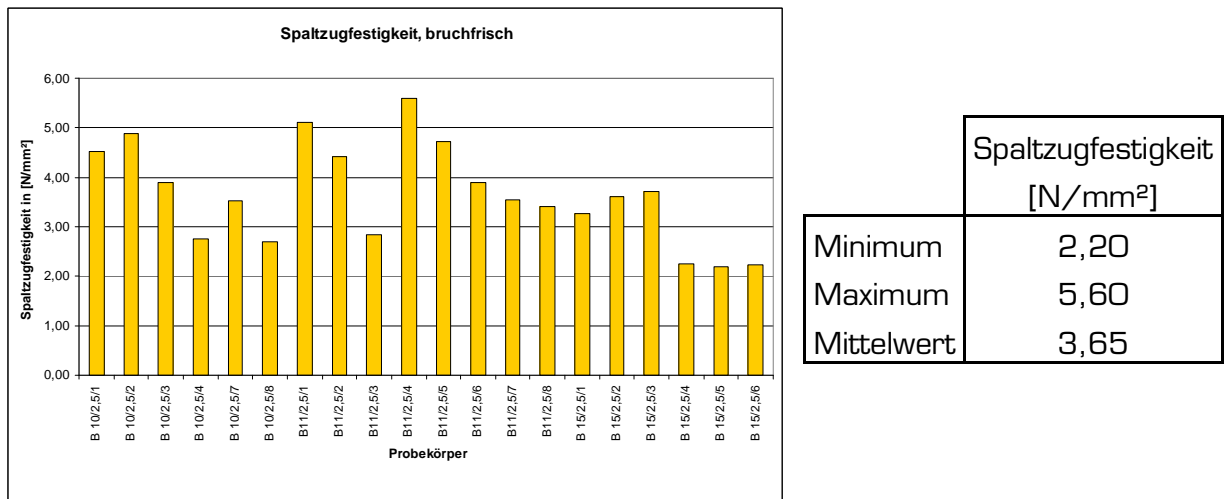


Abb. 38: Spaltzugfestigkeit der bruchfrischen Prüfkörper.

4.1.6. Einaxiale Druckfestigkeit

Die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit wurde wie in Kapitel 3.1.8.3 beschrieben durchgeführt. In Abb. 39 sind die ermittelten einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten von sieben Prüfkörpern dargestellt. Die Belastungsrichtung wurde, wie in Kapitel 3.1.8 beschrieben, ausschließlich rechtwinklig zur Gesteinsschichtung gewählt.

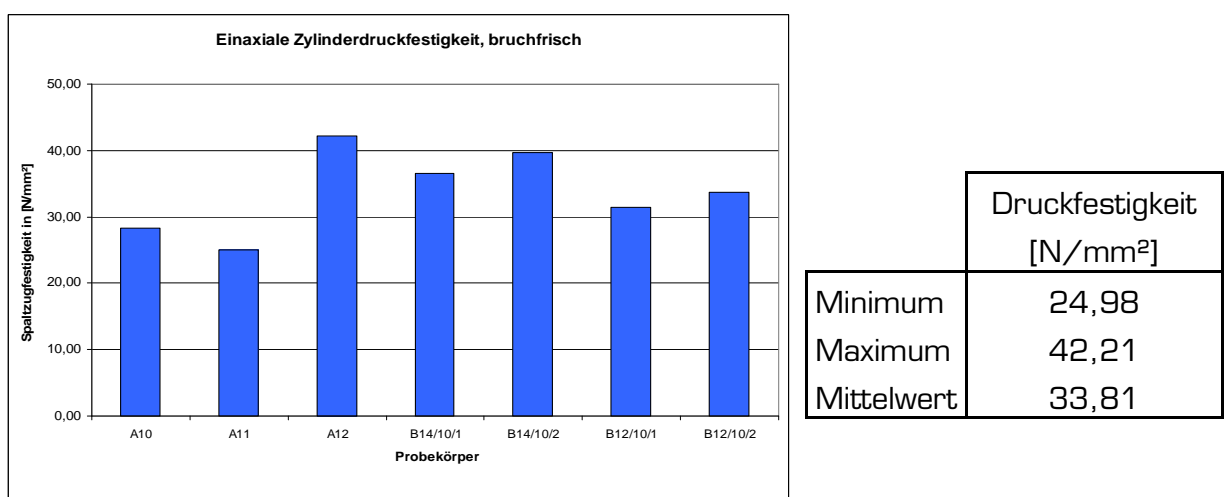


Abb. 39: Einaxiale Druckfestigkeit der bruchfrischen Prüfkörper.

4.2. Frost-Tauwechsel

4.2.1. Allgemeines

Nach Ermittlung der Ausgangswerte der bruchfrischen Prüfkörper (siehe Kapitel 4.1) wurden im zweiten Schritt die Probekörper durch 25 bzw. 50 Frost-Tauwechsel (FTW) beansprucht. Die Bestimmung der gesteinsphysikalischen Parameter erfolgte nach den jeweiligen Beanspruchungszyklen analog zu Kapitel 3.1.5. Zur besseren graphischen Darstellung wurden in den folgenden Diagrammen des Kapitels 4.2 die 25 FTW rot, und die 50 FTW blau, dargestellt.

4.2.2. Rohdichte

Jeweils sieben Probekörper wurden zur Bestimmung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme herangezogen.

In Abb. 40 ist die ermittelte Rohdichte nach 25 bzw. 50 FTW mit ihren Extrem- und Mittelwerten angegeben.

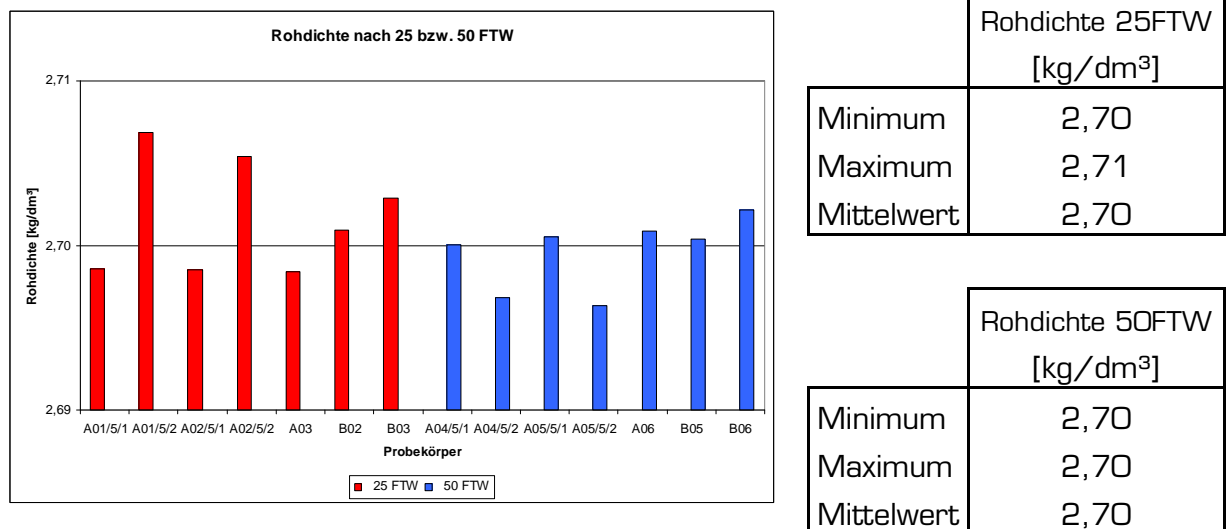


Abb. 40: Rohdichte nach 25 bzw. 50 FTW.

In Abb. 41 ist die massenbezogene Wasseraufnahme nach 25 bzw. 50 FTW mit ihren Extrem- und Mittelwerten dargestellt.

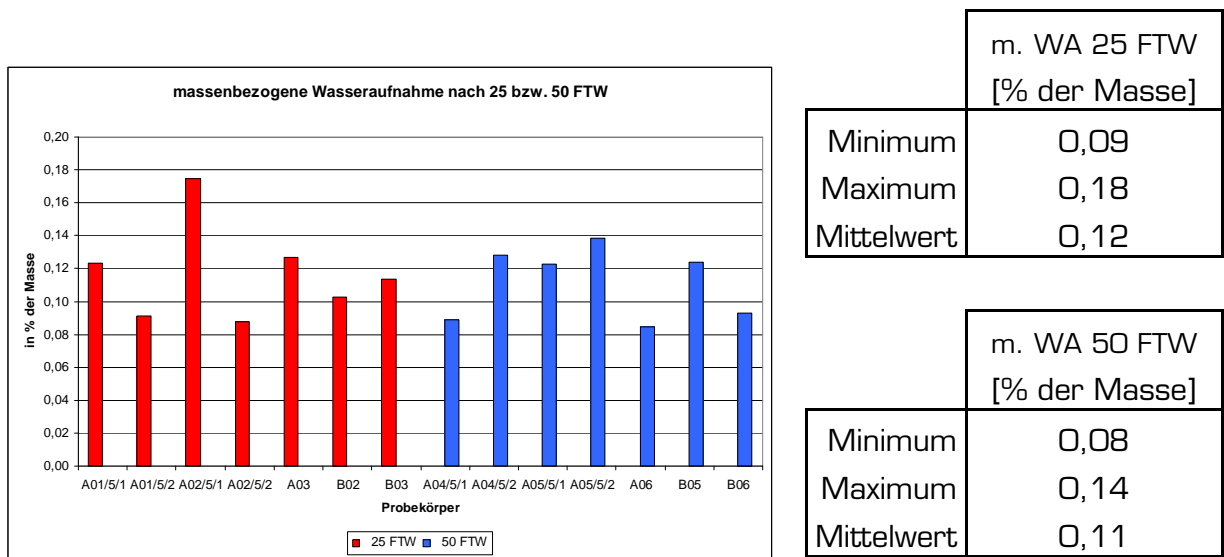


Abb. 41: Massenbezogenen Wasseraufnahme nach 25 bzw. 50 FTW.

In Abb. 42 wird die massenbezogene Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Rohdichte beider unterschiedlich beanspruchter Probekörper dargestellt.

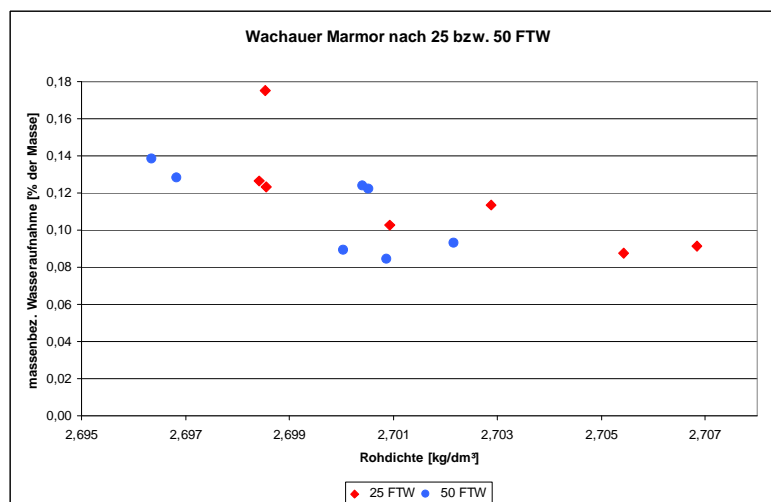
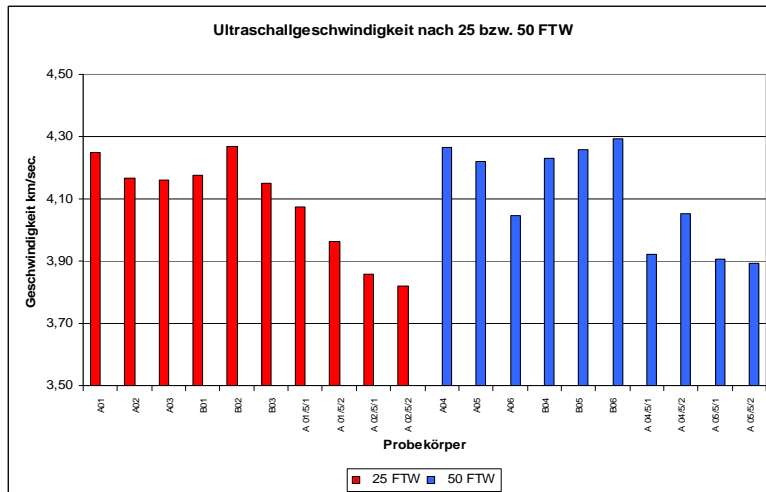


Abb. 42: Abhängigkeit der massenbezogenen Wasseraufnahme von der Rohdichte nach 25 bzw. 50 FTW.

Deutlich erkennbar ist einerseits, dass die einzelnen Messergebnisse der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme der Prüfkörper mit 25 FTW stärker streuen, als jene mit 50 FTW und andererseits, dass kein Unterschied zwischen den Mittelwerten nach 25 und 50 FTW besteht.

4.2.3. Messung der Ultraschallgeschwindigkeit

Nach Bestimmung der massenbezogenen Wasseraufnahme wurden die Probekörper für 24 Stunden im Trockenschrank bei einer Temperatur von 70 °C bis zur Massekonstanz getrocknet, um anschließend die Ultraschallgeschwindigkeit zu messen (siehe dazu Abb. 43).



USG 25 FTW [km/s]	
Minimum	3,82
Maximum	4,27
Mittelwert	3,95

USG 50 FTW [km/s]	
Minimum	3,89
Maximum	4,30
Mittelwert	4,00

Abb. 43: Ultraschallgeschwindigkeit nach 25 bzw. 50 FTW.

In Abb. 44 werden die Ultraschalllaufzeiten in Abhängigkeit von der jeweiligen Messdistanz mit den dazugehörigen Regressionsgeraden dargestellt.

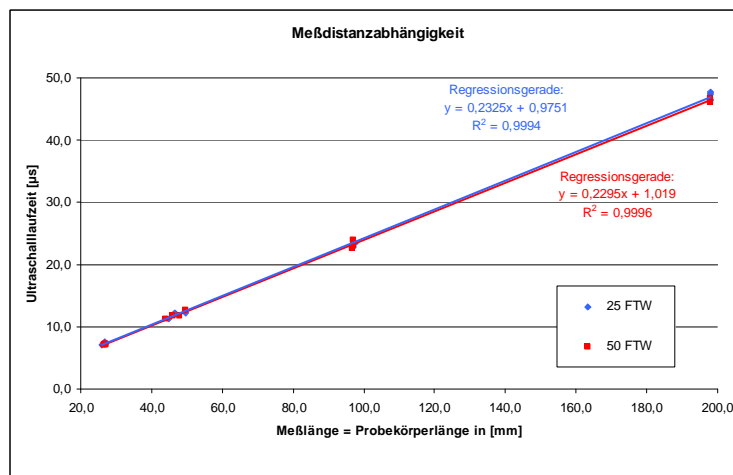


Abb. 44: Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit der Messdistanz nach 25 bzw. 50 FTW.

Wie in Abb. 44 deutlich zu sehen ist, besteht zwischen 25 und 50 FTW kein Unterschied in den Messergebnissen. Im Zuge der Laborarbeit fanden nach Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der wassergesättigten Probekörper (siehe Kapitel 4.1.3) zweimal Trocknungszyklen statt. Da kein Unterschied zwischen 25 und 50 FTW festzustellen ist, wird für die erkennbare Gefügeflockung nicht die Frost-Tauwechselbeanspruchung, sondern die zweimalige Trocknung bei 70 °C verantwortlich gemacht.

4.2.4. Spaltzugfestigkeit

In Abb. 45 sind die Spaltzugfestigkeiten (SZF) nach 25 bzw. 50 FTW abgebildet. Es standen sieben Prüfkörper mit 25 FTW und sechs Prüfkörper mit 50 FTW zur Verfügung.

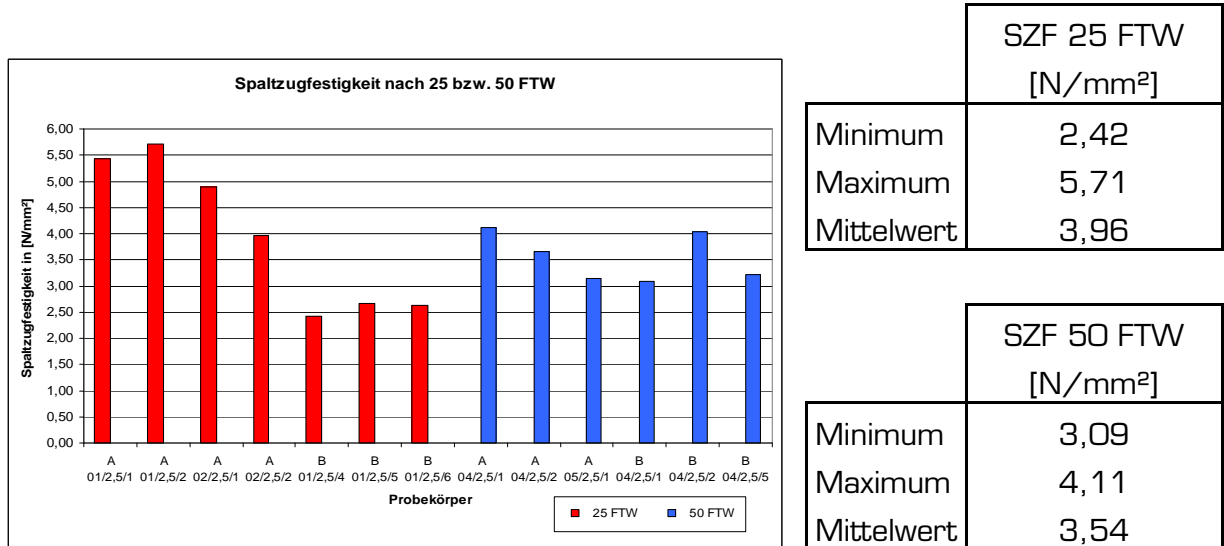


Abb. 45: Spaltzugfestigkeit nach 25 bzw. 50 FTW.

4.2.5. Einaxiale Druckfestigkeit

In Abb. 46 sind die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeiten (DF) nach 25 bzw. 50 FTW dargestellt. Es standen fünf Prüfkörper mit 25 FTW und vier Prüfkörper mit 50 FTW zur Verfügung.

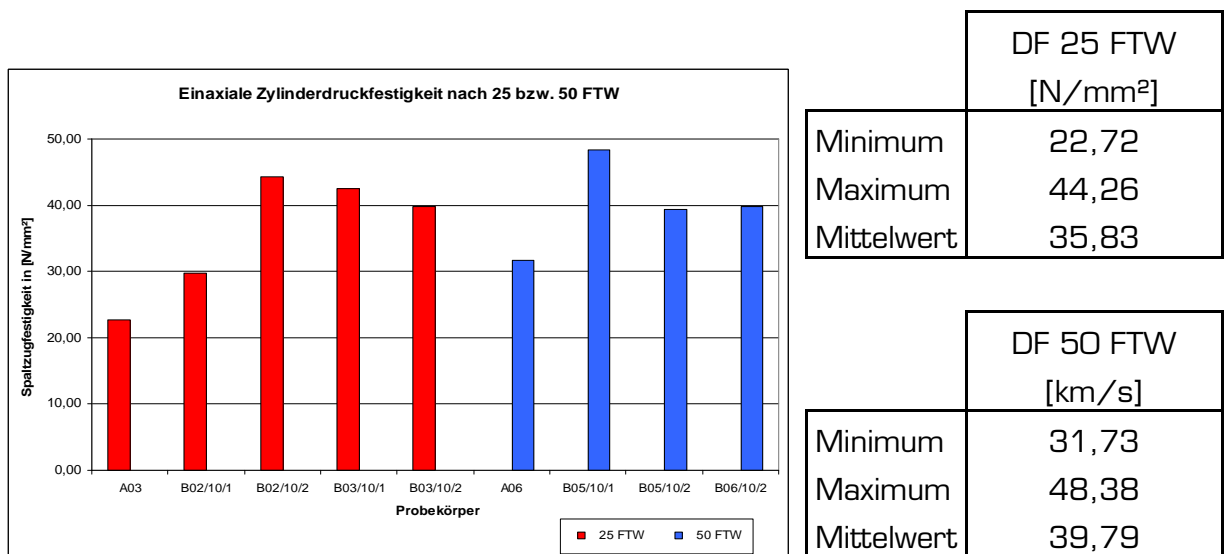


Abb. 46: Einaxiale Druckfestigkeit nach 25 bzw. 50 FTW.

4.3. Temperaturbeanspruchung

4.3.1. Allgemeines

Sechs unverwitterte Gesteinsproben wurden mit einer Temperatur von 200 °C zehnmalig beansprucht. Anschließend wurden zwei dieser sechs Probekörper einem weiteren zehnmaligen Frost-Tauwechsel (FTW) unterzogen. Die Temperaturbeanspruchung wurde wie in Kapitel 3.1.6.3 beschrieben durchgeführt. Die gesteinsphysikalischen Parameter wurden wiederum (wie in Kapitel 4.1 und 4.2) bestimmt, um danach verglichen werden zu können. Die Probekörper, die ausschließlich einer Wechselbeanspruchung bei 200 °C unterzogen wurden, werden in den folgenden Diagrammen des Kapitels 4.3 rot und jene mit zusätzlichen zehn FTW werden blau dargestellt.

4.3.2. Rohdichte

In Abb. 47 werden die ermittelten Werte der Rohdichtebestimmung angegeben.

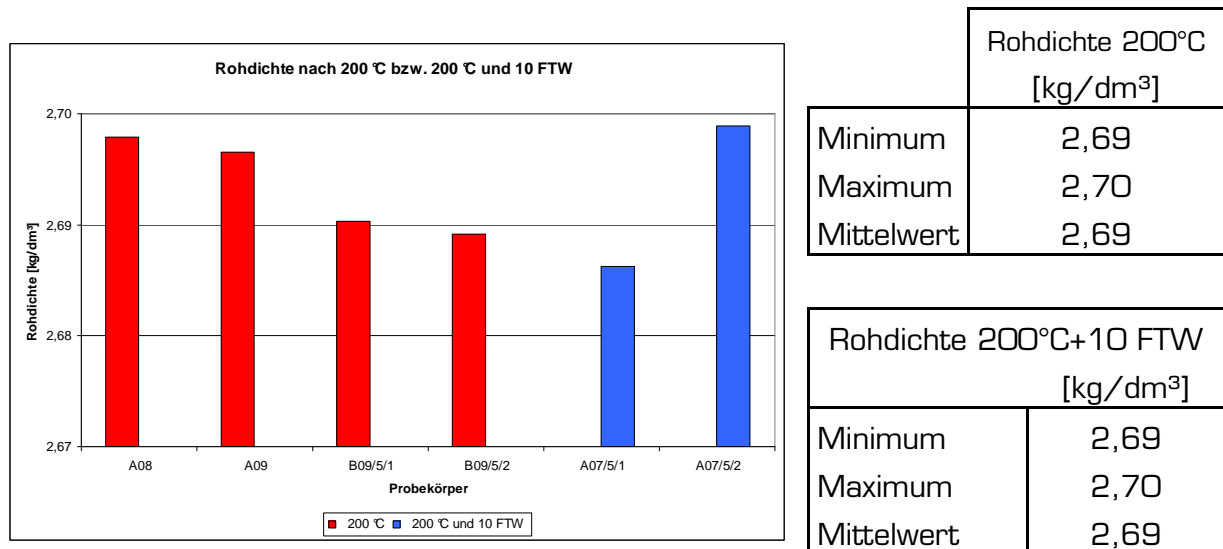


Abb. 47: Rohdichte nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.

In Abb. 48 wird die massenbezogene Wasseraufnahme der untersuchten Gesteinsproben mit ihren Extrem- und Mittelwerten abgebildet.

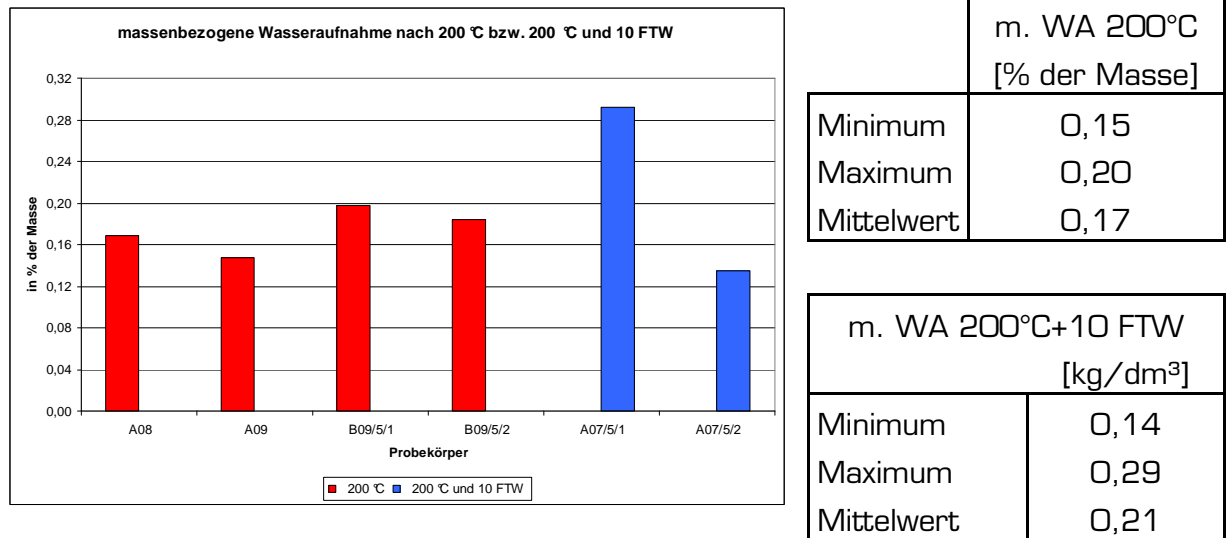


Abb. 48: Massenbezogenen Wasseraufnahme nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.

In nachstehender Abb. 49 wird die Korrelation zwischen Rohdichte und massenbezogener Wasseraufnahme beider unterschiedlich beanspruchter Proben dargestellt.

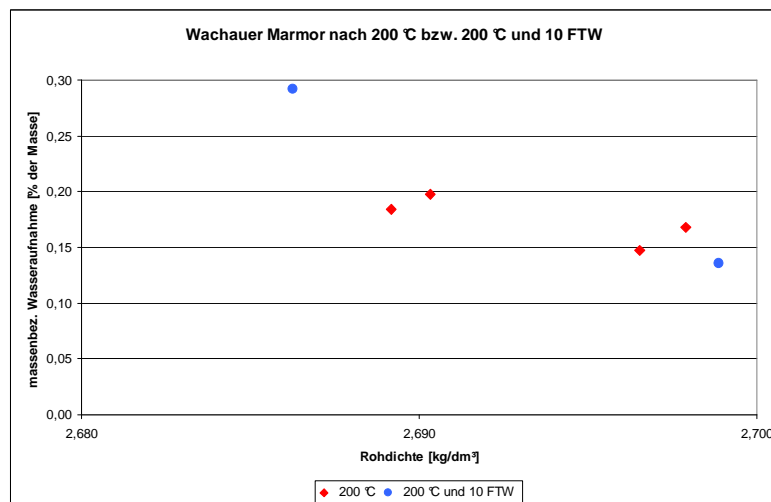


Abb. 49: Abhängigkeit der massenbezogenen Wasseraufnahme von der Rohdichte nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Rohdichte der temperaturbeanspruchten Proben nach den zehnfachen FTW nicht geändert hat. Die massenbezogene Wasseraufnahme hat nach den zehnfachen FTW geringfügig zugenommen. Im Vergleich zu den in Kapitel 4.1 ermittelten Werte der unverwitterten Prüfkörper ist eine Abnahme der Rohdichte und eine Zunahme der massenbezogenen Wasseraufnahme der temperaturbeanspruchten Proben feststellbar.

4.3.3. Messung der Ultraschallgeschwindigkeit

In Abb. 50 wird der Verlauf der Ultraschallgeschwindigkeit von allen sechs Probekörpern bei Temperaturbeanspruchung dargestellt. Die Gesteinsproben wurden die ersten neun Mal für jeweils 12 Stunden im Umluftofen bei einer Temperatur von 200 °C gelagert. Nach einer konstanten Auskühlzeit von 1,5 Stunden wurde die Ultraschallgeschwindigkeit gemessen. Die letzte Temperaturbeanspruchung wurde mit einer Dauer von 72 Stunden angesetzt. Die Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit beträgt nach der ersten Beanspruchung rund 38 %. Vom zweiten bis zum fünften Hitzezyklus liegt die Abnahme konstant bei ca. 2,6 %. Wie in Abb. 50 zu sehen ist, findet nach der fünften Temperaturbelastung kaum mehr eine Reduktion der Ultraschallgeschwindigkeit statt.

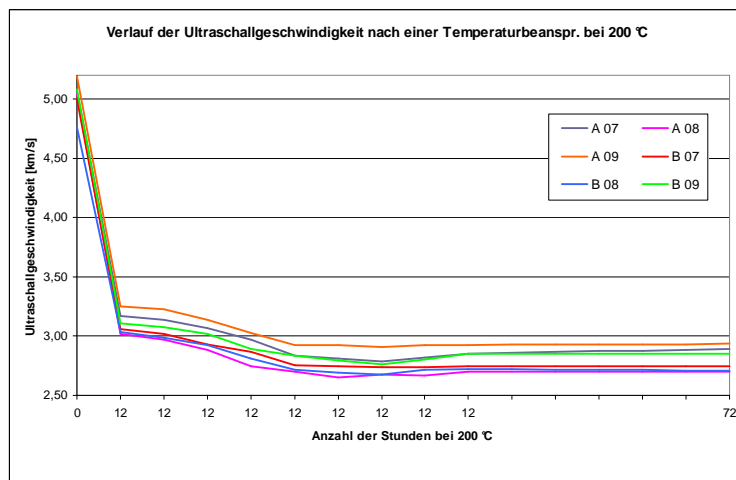
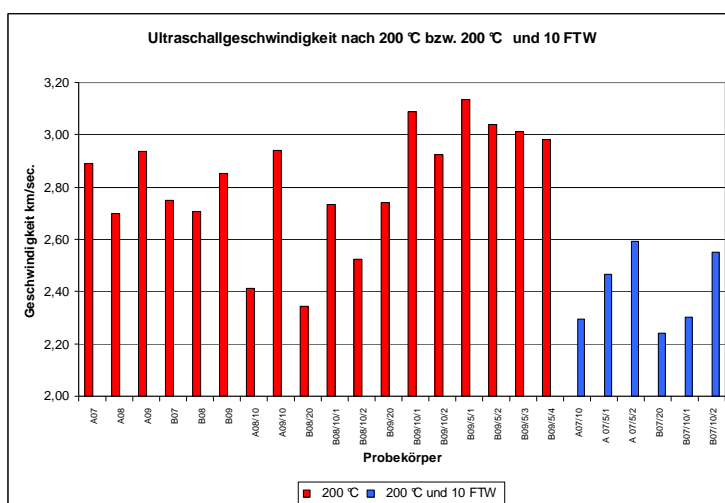


Abb. 50: Verlauf der Ultraschallgeschwindigkeit nach einer Temperaturbeanspruchung von jeweils 200 °C.

Die Ultraschallgeschwindigkeiten werden in Abb. 51 nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW dargestellt.



USG 200 °C [km/s]	
Minimum	2,34
Maximum	3,13
Mittelwert	2,82

USG 200°C+10 FTW [km/s]	
Minimum	2,24
Maximum	2,59
Mittelwert	2,50

Abb. 51: Ultraschallgeschwindigkeit nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.

In Abb. 52 wird die Abhängigkeit der gemessenen Ultraschalllaufzeit von der jeweiligen Messdistanz mit den zugehörigen Regressionsgeraden abgebildet. Um eine längere und genauere Trendlinie zu erhalten, wurden einige Probekörper der Länge nach mit einer Steinkreissäge mit permanenter Wasserspülung geschnitten. Nach dem Trocknen im Trockenschrank bei 70 °C für 24 Stunden wurde wiederum die Ultraschallgeschwindigkeit gemessen.

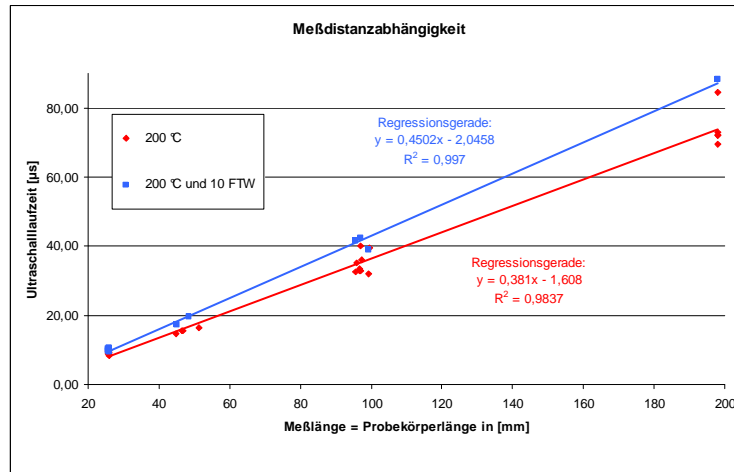


Abb. 52: Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit der Messdistanz nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.

In Abb. 50 bis Abb. 52 ist deutlich zu sehen, dass sich im Vergleich zu den Ausgangswerten der bruchfrischen Prüfkörper die Ultraschallgeschwindigkeiten nach mehrmaliger Temperaturbeanspruchung stark reduzierten. Die zusätzlich durchgeführten zehn FTW reduzierten die Ultraschallgeschwindigkeiten abermals. Lediglich zehn FTW führten zu einer deutlichen Zunahme der Steigung der Regressionsgeraden (Abb. 52). Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass um Schäden durch FTW zu initiieren, vorab eine temperaturbedingte Gefügezerstörung notwendig ist, damit die FTW wirken können.

4.3.4. Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten

In Abb. 53 wird das Wasseraufnahmeverhalten zweier Probekörper dargestellt, die zehn Mal einer Temperatureinwirkung von 200 °C ausgesetzt waren. Die gesamte Messzeit betrug 17 Stunden. Der Hauptanteil der Wasseraufnahme passierte innerhalb der ersten 5 Minuten. Nach 75 Minuten fand keine weitere Wassereinlagerung mehr statt. Aus diesem Grund werden nur die ersten 75 Minuten im Diagramm dargestellt.

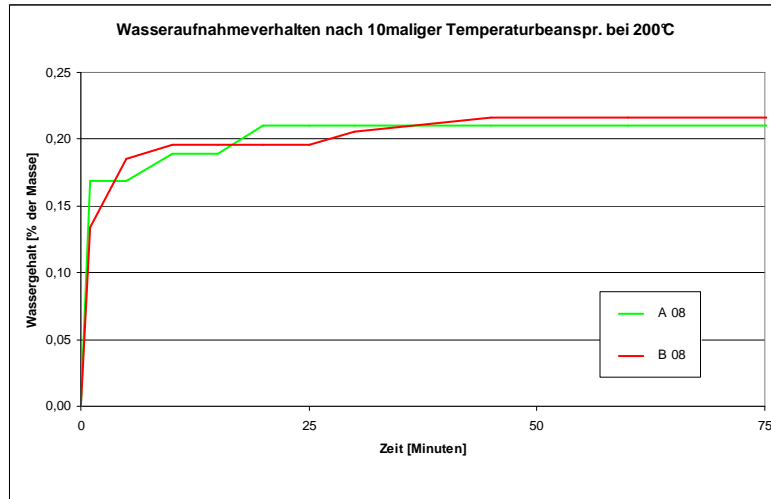


Abb. 53: Wasseraufnahmeverhalten von 2 Probekörpern (A08 und B08) nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C.

Danach wurden die wassersatten Probekörper zu Ermittlung des Wasserabgabeverhaltens herangezogen. Der Großteil der Wasserabgabe geschah innerhalb der ersten 25 Minuten. Nach einer Messzeit von 4 Stunden hatten die Gesteinsproben wieder ihre Ausgangsmasse.

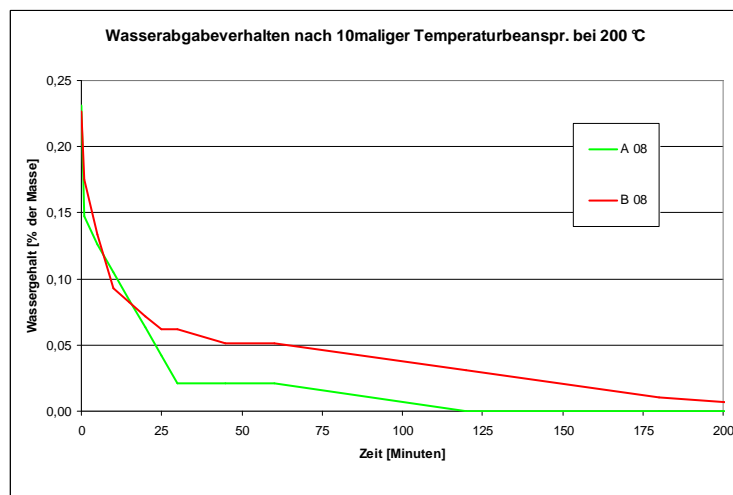
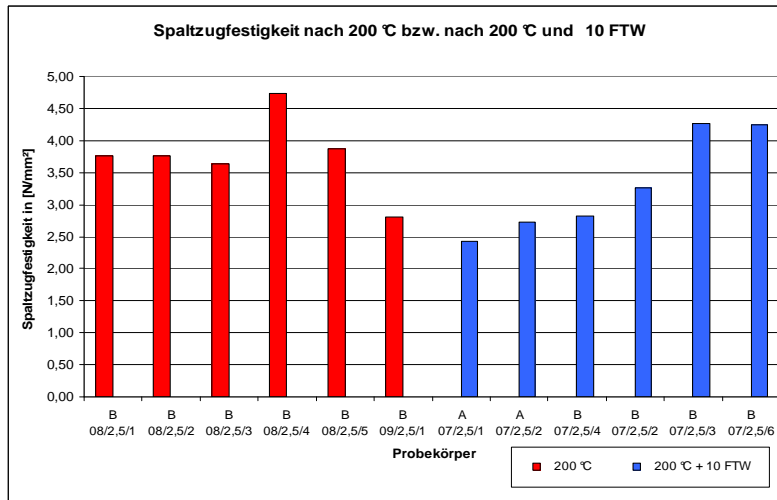


Abb. 54: Wasserabgabeverhalten von 2 Probekörpern (A08 und B08) nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C.

4.3.5. Spaltzugfestigkeit

Abb. 55 stellt die ermittelten Ergebnisse der Spaltzugfestigkeiten (SZF) nach einer zehnfachen Temperatureinwirkung von 200 °C bzw. nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW dar. Es standen jeweils sechs Prüfkörper zur Verfügung.



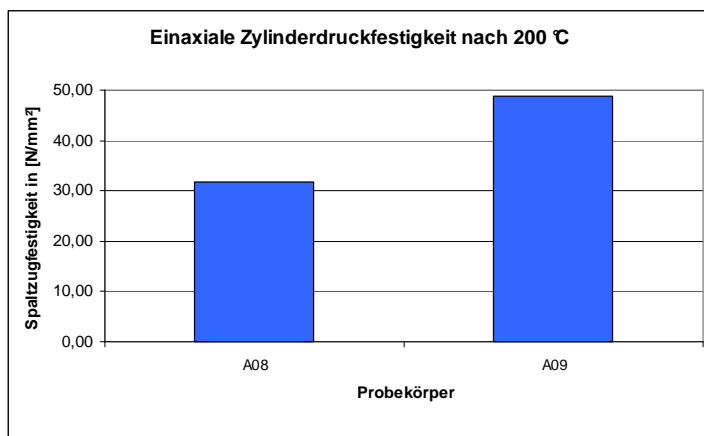
SZF 200 °C [N/mm ²]	
Minimum	2,80
Maximum	4,73
Mittelwert	3,76

200 °C+10 FTW [N/mm ²]	
Minimum	2,43
Maximum	4,26
Mittelwert	3,29

Abb. 55: Spaltzugfestigkeit nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.

4.3.6. Einaxiale Druckfestigkeit

In Abb. 56 sind die Messergebnisse zweier einaxialer Zylinderdruckfestigkeitsversuche dargestellt. Die Gesteinsproben wurden zehn Mal bei einer Temperatur von 200 °C beansprucht. Leider konnte aus Mangel an Prüfkörpern dieser Versuch nicht mit Proben, die zusätzlich einem zehnfachen Frost-Tauversuch unterzogen wurden, durchgeführt werden.



DF 200 °C [km/s]	
Probennr.	
A 08	31,74
A 09	48,73

Abb. 56: Einaxiale Druckfestigkeit nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C.

4.4. Verwitterte Probekörper

4.4.1. Allgemeines

Im letzten Schritt wurden die gesteinsphysikalischen Parameter eines durch Verwitterung vollkommen zerstörten Marmors nach Kapitel 3 bestimmt. Die Ergebnisse beschreiben den Endzustand, den Marmor im Laufe seiner Verwitterung einnimmt. Durch Vergleich aller oben ermittelten Ergebnisse, von bruchfrisch bis maximal verwittert, kann die Spannbreite der Parameter aufgezeigt und interpretiert werden.

4.4.1.1. Probenherstellung

Das Ausgangsmaterial (siehe Abb. 57) wurde vom Institut für Geotechnik zur Verfügung gestellt. Der verwendete Grabstein aus dem Jahr 1930 stand am Zentralfriedhof in Wien und wurde im Zuge einer Graberneuerung ausgetauscht. Beim Stein handelt es sich um Marmor aus dem Waldviertel mit deutlich sichtbarer Bänderung. Das Farbgebende Pigment der dunklen Schichten ist Graphit und die geschätzte mittlere Korngröße des homogenen Gefüges beträgt ca. 1 mm. Der Verwitterungszustand lässt sich mit „vollständig zerstört“ beschreiben, siehe dazu Abb. 57 und Abb. 58. Durch das Hantieren im Labor brachen viele Teile ab oder zerbröselten. Der entstandene Marmorsand wird auch Zuckermarmor genannt und ist die letzte Stufe der Marmorverwitterung.

Aus dem verbleibenden Gesteinsmaterial wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm hergestellt, siehe dazu Abb. 59 und Abb. 60. Das Bohren war durch den hohen Verwitterungsgrad des Grabsteines sehr schwierig. Unter äußerst geringer Wasserzugabe musste ausgesprochen langsam gebohrt werden. Wie in Abb. 60 deutlich zu sehen ist, entstanden während des Bohrens Risse, wonach der Stein zerbrach. In Abb. 61 sind die gewonnenen Bohrkern abgebildet und man kann erkennen, dass beinahe alle Bohrkern mehrmals zerbrochen sind. Weiters war die Form der gewonnenen Bohrkern konisch. Durch die Wasserspülung der Bohrkronen während des Bohrens wurden die Bohrkern im oberen Bereich kegelförmig zugespitzt. Nach dem Bohren wurden die Probekörper zum Trocknen auf Küchenrolle gelagert. Es wurde versucht, so viele Bohrkern wie möglich zu gewinnen und die verbleibenden Reste sind in Abb. 62 abgebildet.



Abb. 57: Ausgangsmaterial



Abb. 58: Verwitterungszustand



Abb. 59: Herstellung der Bohrkerne



Abb. 60: Blick in die Bohrlöcher mit entstandenen Rissen



Abb. 61: Gewonnene Bohrkerne



Abb. 62: Reste des Materials

4.4.1.2. Einteilung und Bezeichnung der Proben

Die Bestimmung der gesteinsphysikalischen Parameter erfolgte wie in Kapitel 3 beschrieben. In Abb. 63 sind die verwendeten Bohrkern abgebildet. Sie wurden, geordnet nach Länge, mit G01 bis G08 bezeichnet. Zur besseren graphischen Darstellung werden im folgenden Kapitel die unter 20 °C raumfeucht gelagerten Bohrkern grün und die für 24 Stunden bei 70 °C im Trockenschrank gelagerten Bohrkern gelb dargestellt.



Abb. 63: verwendete Bohrkern G01 bis G08



Abb. 64: Bohrkern G08



Abb. 65: Lagerung der Probe im Wasserbad zur Bestimmung der Rohdichte.

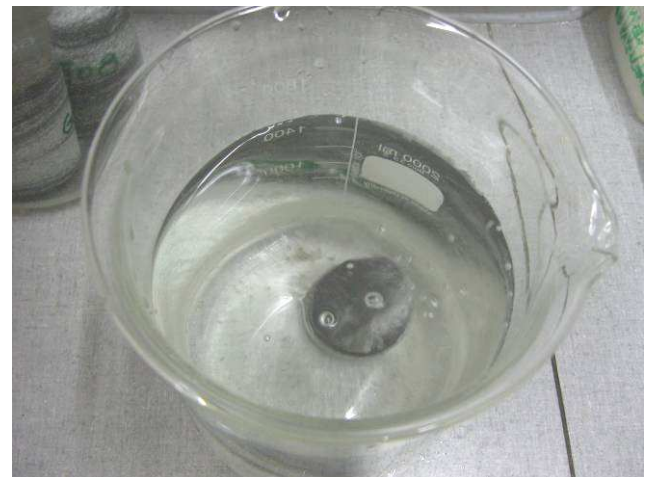
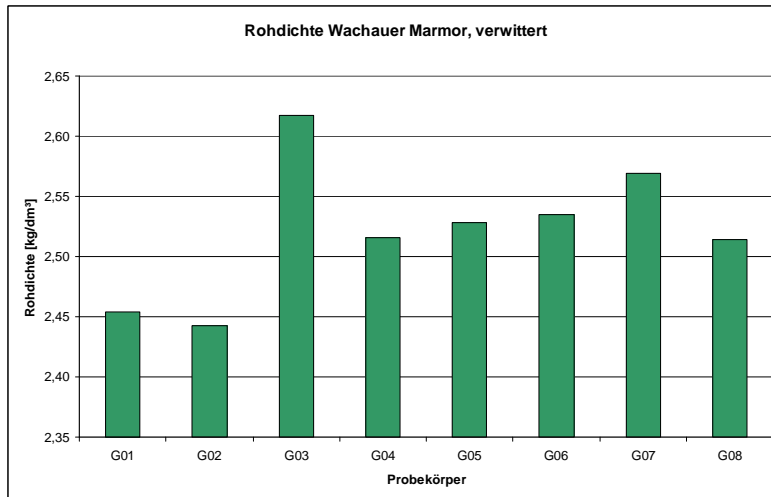


Abb. 66: Gesteinsprobe im Wasserbad mit aufsteigenden Luftbläschen.

4.4.2. Rohdichte

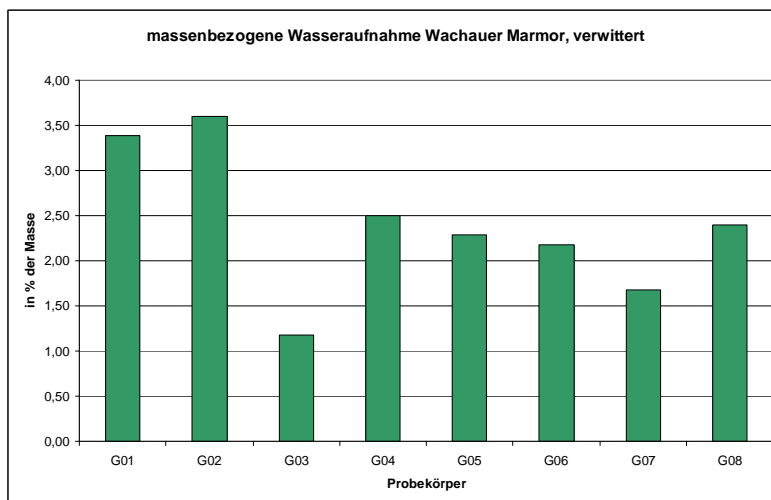
Wie bereits in Kapitel 4.4.1.1 beschrieben wurde, waren die gewonnenen Probekörper sehr zerbrechlich und mussten sehr vorsichtig gehandhabt werden. Die zuckerähnlichen Materialkomponenten lösten sich, besonders unter Lagerung im Wasserbad, leicht ab und beeinflussten somit die Messergebnisse. Vorsichtig wurden die Bohrkern in ein kleines Gefäß (gefüllt mit Wasser) gehoben und darin für 24 Stunden gelagert, siehe dazu Abb. 65 und Abb. 66. In Abb. 67 werden die ermittelten Rohdichten von acht Bohrkernen mit Angabe ihrer Extremwerte und des Mittelwertes dargestellt.



	Rohdichte [kg/dm³]
Minimum	2,44
Maximum	2,62
Mittelwert	2,52

Abb. 67: Rohdichte der verwitterten Probekörper.

Abb. 68 zeigt die ermittelte massenbezogene Wasseraufnahme der maximal verwitterten Prüfkörper mit Angabe der Extremwerte und des Mittelwertes.



	m. WA [% der Masse]
Minimum	1,18
Maximum	3,60
Mittelwert	2,40

Abb. 68: Massenbezogene Wasseraufnahme der verwitterten Probekörper.

Abb. 69 zeigt den Zusammenhang zwischen massenbezogener Wasseraufnahme und Rohdichte. Da die ermittelten Werte auf einer Geraden liegen, wird die Regressionsgerade ebenfalls dargestellt.

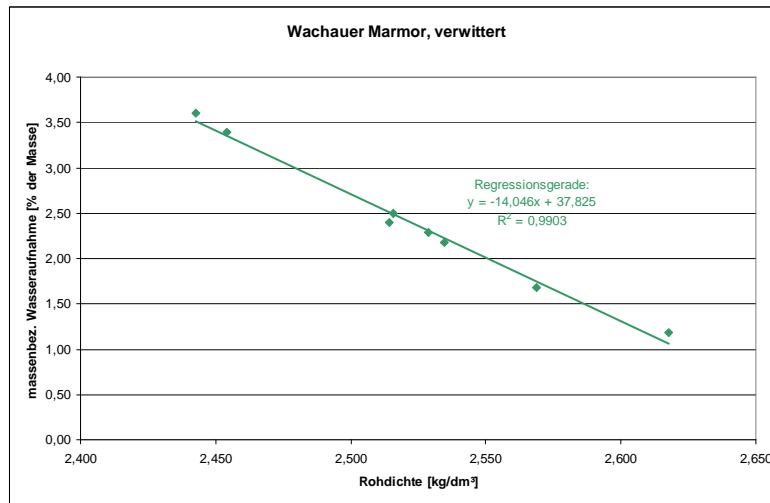


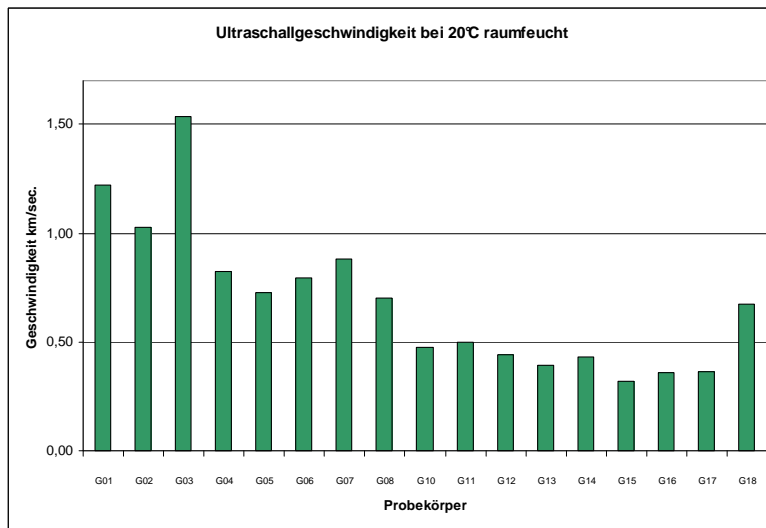
Abb. 69: Abhängigkeit der massenbezogenen Wasseraufnahme von der Rohdichte der verwitterten Probekörper.

Die vergleichsweise stark streuenden Parameter der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme belegen einen inhomogenen und ungleichartigen Gefügestand. Die Regressionsgerade in Abb. 69 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Rohdichte und massenbezogener Wasseraufnahme. Je geringer die Rohdichte eines Prüfkörpers ist, desto höher ist dessen Wasseraufnahmevermögen.

4.4.3. Messung der Ultraschallgeschwindigkeit

Die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit erfolgte stets in Bohrkernlängsrichtung, senkrecht zur Gesteinsschichtung. Durch den hohen Verwitterungsgrad ist das Gesteinsgefüge sehr inhomogen und die Gesteinsflächen, an denen Geber- bzw. Aufnehmerkopf des Messgerätes eingespannt werden, sind nicht eben. Durch diese Unregelmäßigkeiten streuten die gemessenen Werte zum Teil erheblich. Um eine hinreichende Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, wurde versucht stets an derselben Stelle zu messen, siehe dazu Abb. 63.

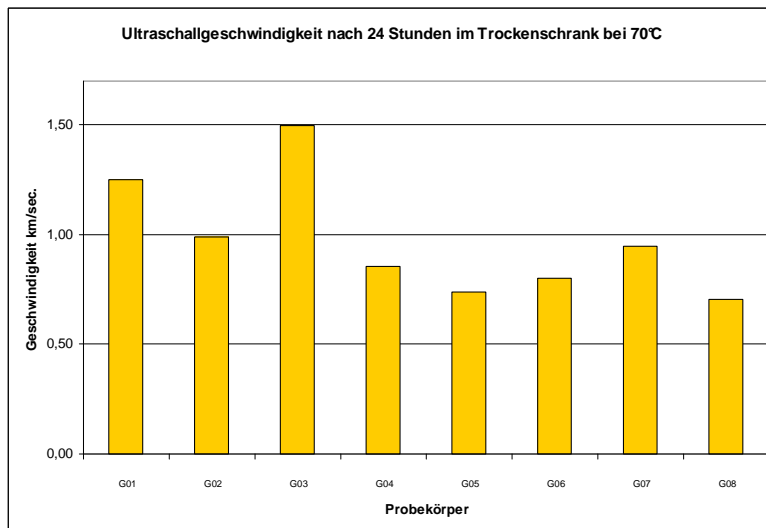
In Abb. 70 ist die Ultraschallgeschwindigkeit der verwitterten Probekörper dargestellt, die unter einer Raumtemperatur von 20 °C raumfeucht gelagert wurden. Es standen 17 Bohrkern zur Verfügung.



	Ultraschallgesch. [km/s]
Minimum	0,32
Maximum	1,53
Mittelwert	0,69

Abb. 70: Ultraschallgeschwindigkeit der verwitterten Probekörper, raumfeucht gelagert bei 20 °C.

Anschließend wurden 8 der 17 Gesteinsproben für 24 Stunden bei einer Temperatur von 70 °C im Trockenschrank gelagert. Danach wurde die Ultraschallgeschwindigkeit gemessen (siehe Abb. 71).



	Ultraschallgesch. [km/s]
Minimum	0,74
Maximum	1,50
Mittelwert	0,97

Abb. 71: Ultraschallgeschwindigkeit der verwitterten Probekörper nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C.

In Abb. 72 werden die Ergebnisse der Ultraschallgeschwindigkeiten (Abb. 70 und Abb. 71) der Bohrkernproben G01 bis G08 einander gegenübergestellt.

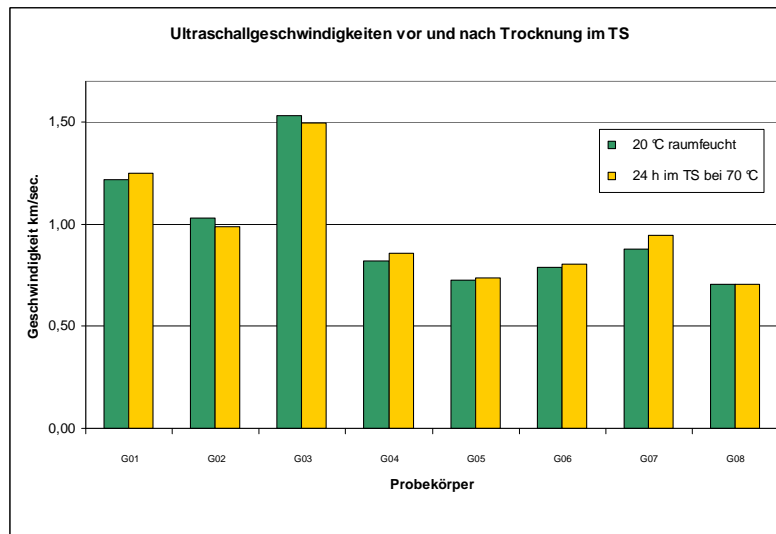


Abb. 72: Gegenüberstellung der Ultraschallgeschwindigkeiten der bei 20 °C raumfeucht gelagerten Proben und nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C.

In Abb. 73 werden die gemessenen Ultraschalllaufzeiten der Prüfkörper (G01 bis G08) in Korrelation zu ihrer Messdistanz mit den zugehörigen Regressionsgeraden dargestellt.

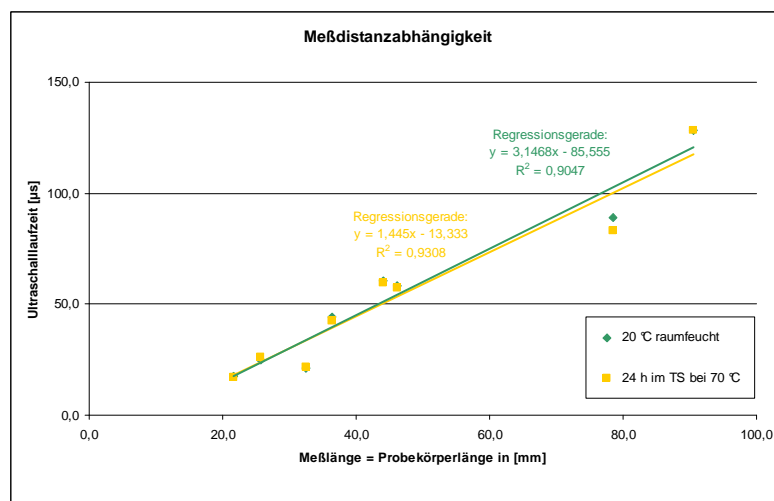


Abb. 73: Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit der Messdistanz der bei 20 °C raumfeucht gelagerten Proben und nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C.

In Abb. 72 ist deutlich erkennbar, dass der Wassergehalt der Proben auf die Messergebnisse der Ultraschallgeschwindigkeit keinen Einfluss hat. Der Mittelwert der Ultraschallgeschwindigkeiten liegt bei den raumfeucht gelagerten Proben (G01 bis G08) bei 0,96 km/s und nach der Trocknung bei 0,97 km/s. Im Zuge der Laborarbeit wurde befürchtet, dass die Gesteinsproben G10 bis G18 die Trocknung im Trockenschrank nicht überstehen würden. Aus diesem Grund wurden sie nicht herangezogen.

4.4.4. Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten

An Hand zweier Bohrkerns wurde versucht das Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten zu bestimmen. Bei der Ermittlung des Wasseraufnahmevermögens wurde festgestellt, dass die komplette Aufnahme bereits nach einer Minute abgeschlossen war. In Abb. 66 sind die aufsteigenden Luftbläschen deutlich zu sehen. Der Probekörper G07 wies eine massenbezogene Wasseraufnahme von 1,68 % der Masse und der Probekörper G08 von 2,40 % der Masse auf.

Wie oben bereits erwähnt, sind durch Handhabung und Wasserlagerung ständig Gesteinskomponenten abgebröseln, wodurch die Messergebnisse beeinflusst wurden. Aus diesem Grund wurde im vorliegenden Fall auf die Ermittlung des Wasserabgabeverhaltens verzichtet.

4.4.5. Spaltzugfestigkeit

Abb. 74 zeigt die nach ÖNORM B 3124 Teil 4 1981 ermittelten Spaltzugfestigkeiten des maximal verwitterten Gesteins.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Spaltzugfestigkeitsermittlungen hat sich im vorliegenden Fall keine eindeutige Bruchfläche ausgebildet. Die Gesteinsproben sind eher zerbröseln als zerbrochen (siehe Abb. 22). Im zugehörigen Weg-Kraft-Diagramm (siehe Anhang Abb. 106) ist deutlich zu sehen, dass nach Erreichen der maximal aufnehmbaren Last der Weg konstant zunahm und die Kraft nahezu unverändert blieb. Nach ÖNORM wären diese Versuche jedoch als ungültig zu werten.

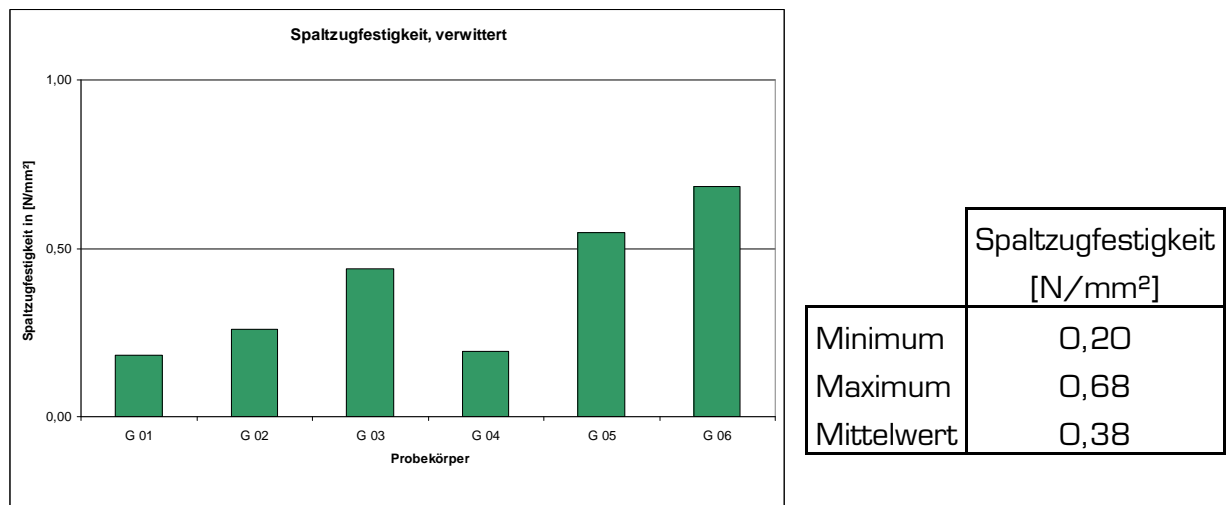
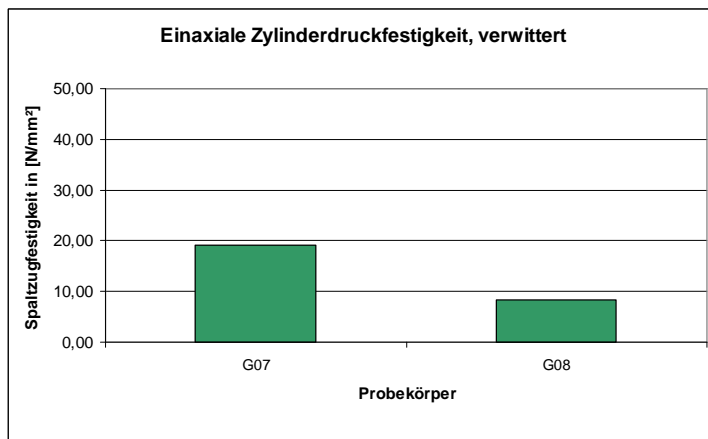


Abb. 74: Spaltzugfestigkeit der maximal verwitterten Prüfkörper.

4.4.6. Einaxiale Druckfestigkeit

In Abb. 75 sind die ermittelten Ergebnisse des einaxialen Druckfestigkeitsversuchs nach ÖNORM B 3124 Teil 1 1981 dargestellt. Bei beiden Versuchen hat sich die ideale Bruchfigur, die einer Sanduhr ähnelt, eingestellt (siehe Abb. 25 und Abb. 28). Die zugehörigen Weg-Kraft-Diagramme sind im Anhang (Abb. 113) abgebildet. Nach ÖNORM sind beide Versuche als gültig zu werten. Aus Mangel an entsprechenden Prüfkörpern konnte im vorliegenden Fall die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit nur an zwei Proben ermittelt werden.



Probennr.	Druckfestigkeit [km/s]
G 07	19,15
G 08	8,39

Abb. 75: Einaxiale Druckfestigkeit der maximal verwitterten Prüfkörper.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND VERGLEICH DER ERGEBNISSE

5.1. Rohdichte

In Abb. 76 sind die Mittelwerte der Rohdichten aller untersuchter Probekörper dargestellt. In diesem Diagramm sind die Mittelwerte der Rohdichten im Bereich von 2,40 bis 2,80 kg/dm³ aufgetragen. Es lässt sich gut erkennen, dass die Rohdichte der maximal verwitterten Probekörper deutlich unter der der restlichen Probekörper liegt. Eine Rohdichte von 2,52 kg/dm³ ist für Marmor relativ gering und spiegelt den hohen Verwitterungsgrad der Proben wider.

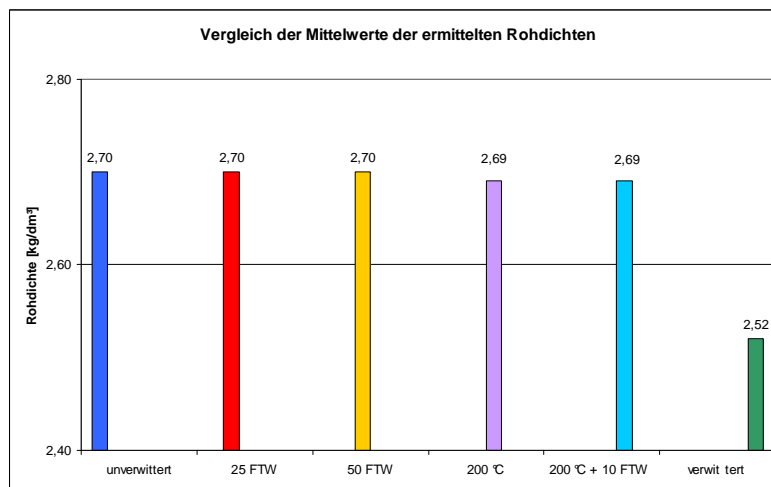


Abb. 76: Mittelwerte der Rohdichten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

5.2. Massenbezogene Wasseraufnahme

Abb. 77 zeigt die Mittelwerte der massenbezogenen Wasseraufnahmen für unterschiedlich beanspruchte Probekörper. Es ist deutlich zu sehen, dass die Beanspruchung der Proben mit 25 oder 50 FTW keine Auswirkung auf die Messergebnisse hat. Erst durch die zehnfache Temperaturbeanspruchung von 200 °C und in weiterer Folge eine zehnfache Frost-Tauwechselbeanspruchung erhöht sich die massenbezogene Wasseraufnahme auf das Doppelte. Würden die Proben weiterhin durch Frost-Tauwechsel und Temperatur beansprucht werden, erhielte man den Verwitterungszustand der maximal verwitterten Probekörper, einhergehend mit einer Verzwanzigfachung der Wasseraufnahme im Vergleich zu den bruchfrischen Proben.

Eine Zunahme der Mittelwerte der massenbezogenen Wasseraufnahme von 0,12 % der Masse der bruchfrischen Proben auf 2,40 % der Masse der maximal verwitterten Proben bedeutet bei einer Rohdichte von 2,70 kg/dm³ eine Erhöhung der Wasseraufnahme von 3,24 Liter auf 64,8 Liter pro m³.

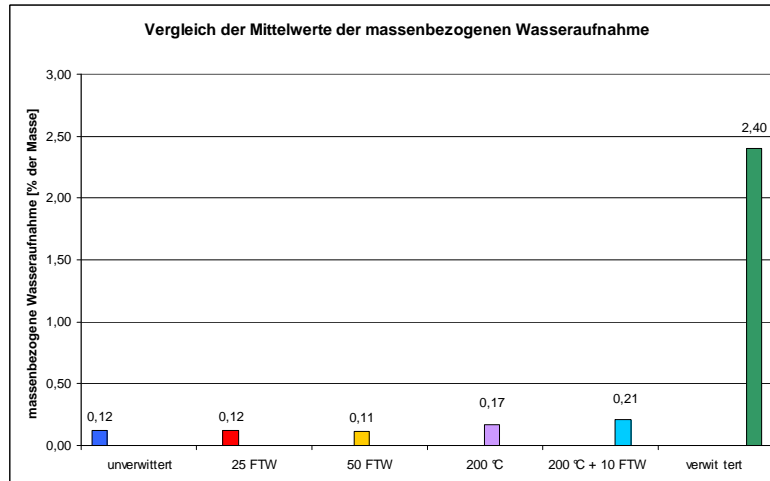


Abb. 77: Mittelwerte der massenbezogenen Wasseraufnahmen für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

5.3. Ultraschallgeschwindigkeit

Abb. 78 zeigt die Mittelwerte der Ultraschallgeschwindigkeiten nach 24stündiger Trocknung der Proben bei 70 °C im Trockenschrank. Es ist eine Reduktion bei den US-Geschwindigkeit der unverwitterten Prüfkörper von 4,77 km/s auf 3,95 bzw. 4,00 km/s nach einer 25- bzw. 50-fachen Frost- und Tauwechselbeanspruchung zu erkennen. Die Reduktion der US-Geschwindigkeit der Proben mit 25 FTW beträgt 17 % und die der Proben mit 50 FTW beträgt 16 %. Die Abnahme der US-Geschwindigkeit nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW beträgt 41 % bzw. 48 % bezugnehmend auf die US-Geschwindigkeit der unverwitterten Proben. Die Abnahme der US-Geschwindigkeit der maximal verwitterten Prüfkörper beträgt sogar 80 % im Vergleich zu den bruchfrischen Proben!

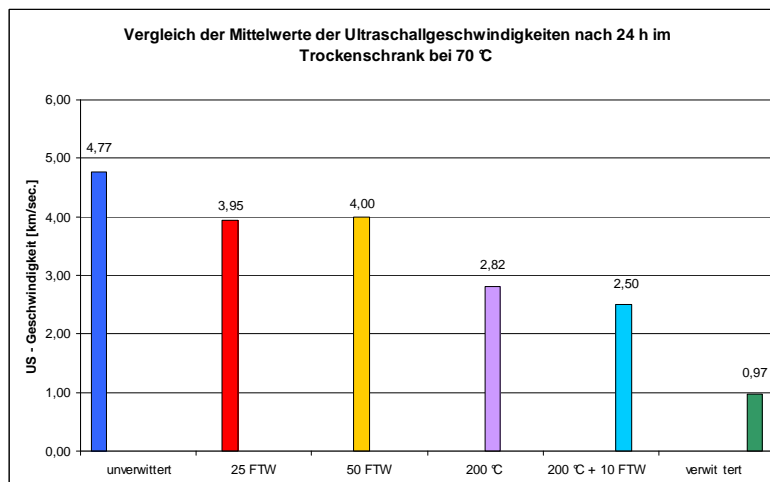


Abb. 78: Mittelwerte der Ultraschallgeschwindigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C.

In (Fleischer 2002) wird der Einfluss der Messdistanz auf die Ultraschallgeschwindigkeit untersucht und es wurden folgende Zusammenhänge ermittelt:

Gleichung der Regressionsgeraden:

$$y = k \cdot x + d$$

y ... Wert für die Ultraschalllaufzeit in [μs]

x ... die veränderliche Messdistanz in [mm]

k ... Steigung ($k = \tan \alpha$), α ist der Steigungswinkel der Geraden

d ... Achsenabschnitt

- Das konstante Glied d der Geradengleichung ist von der Messdistanz unabhängig. Bei jeder Messung ist der wegunabhängige Zeitverlust ungefähr gleich groß und ist auf die Kopplung zwischen Geber- bzw. Aufnehmerkopf und Probe zurückzuführen.
- Die Steigung k gibt die notwendigen Umwege der US-Wellen in der Probe an, die sich aus Störungsausdehnung und Störungshäufigkeit zusammensetzen. Bei Vorhandensein eines großen Risses in der Probe ist die Störungsausdehnung maßgebend, da die Welle einen großen Umweg geht. Bei aufgelockertem Gefüge ist hingegen die Störungshäufigkeit maßgebend.

Durch Vergleich der Steigung k unterschiedlicher Materialien kann man den Verwitterungszustand exakter beschreiben als durch Vergleich der Geschwindigkeitswerte.

	k-Wert	d-Wert	v ideell
Gestein:	[$\mu\text{s}/\text{mm}$]	[μs]	[km/s]
Carrara Marmor verwittert	0,282	3,234	3,55
St. Margarethener KS unverwittert	0,194	2,925	5,15
St. Margarethener KS verwittert	0,347	2,504	2,88
Schremser Granit	0,245	2,956	4,09
Sterzinger Marmor verwittert	0,347	2,510	2,89
Untersberger Kalkstein	0,172	2,852	5,80
Lindabrunner Konglomerat	0,424	0,893	2,36
Zentralgneis parallel z. Schieferung	0,410	3,377	2,44

Tabelle 4: Zusammenstellung der k-Werte, d-Werte und v ideell für unterschiedliche Gesteine. Quelle: Fleischer 2002, Seite 73.

(Vergleiche Fleischer 2002, Seite 67-69):

Der Wert d gilt als Qualitätsmerkmal für die Messungen. Je näher das konstante Glied bei Null liegt, desto genauer sind die Messergebnisse über kurze Messdistanzen. Es kann auch zu negativen d -Werten kommen. Diese deuten auf eine Störung der Messungen über die großen Messdistanzen hin.

In Abb. 79 werden die Ultraschalllaufzeiten in Abhängigkeit von der jeweiligen Messdistanz der unterschiedlich beanspruchten Prüfkörper aus Waldviertler Marmor mit den zugehörigen Regressionsgeraden dargestellt.

Deutlich erkennbar ist die stetige Zunahme der Steigung der Regressionsgeraden. Der Wert k der Geradengleichung ist bei den bruchfrischen Messungen gleich $0,21 \mu\text{s}/\text{mm}$ und wächst kontinuierlich mit fortschreitender Beanspruchung bis zum Wert der maximal verwitterten Prüfkörper mit $1,45 \mu\text{s}/\text{mm}$ an.

Der Wert d der Geradengleichung zeigt an, bei welchem Wert die Gerade die y -Achse schneidet. Demnach schneidet die Regressionsgerade den positiven Achsenabschnitt, wenn das konstante Glied d positiv ist. Bei den bruchfrischen Proben ist der Wert d gleich $0,72 \mu\text{s}$. Nach einer Beanspruchung von 25 bzw. 50 FTW wächst der Wert d auf $0,98 \mu\text{s}$ bzw. $1,02 \mu\text{s}$. Durch die zehnfache Beanspruchung mit $200 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $200 \text{ }^\circ\text{C}$ und 10 FTW nimmt das konstante Glied d der Regressionsgeraden hingegen ab und nimmt die Werte $-1,61 \mu\text{s}$ bzw. $-2,05 \mu\text{s}$ an. Das maximal verwitterte Gestein weist den geringsten Wert mit $-13,33 \mu\text{s}$ auf.

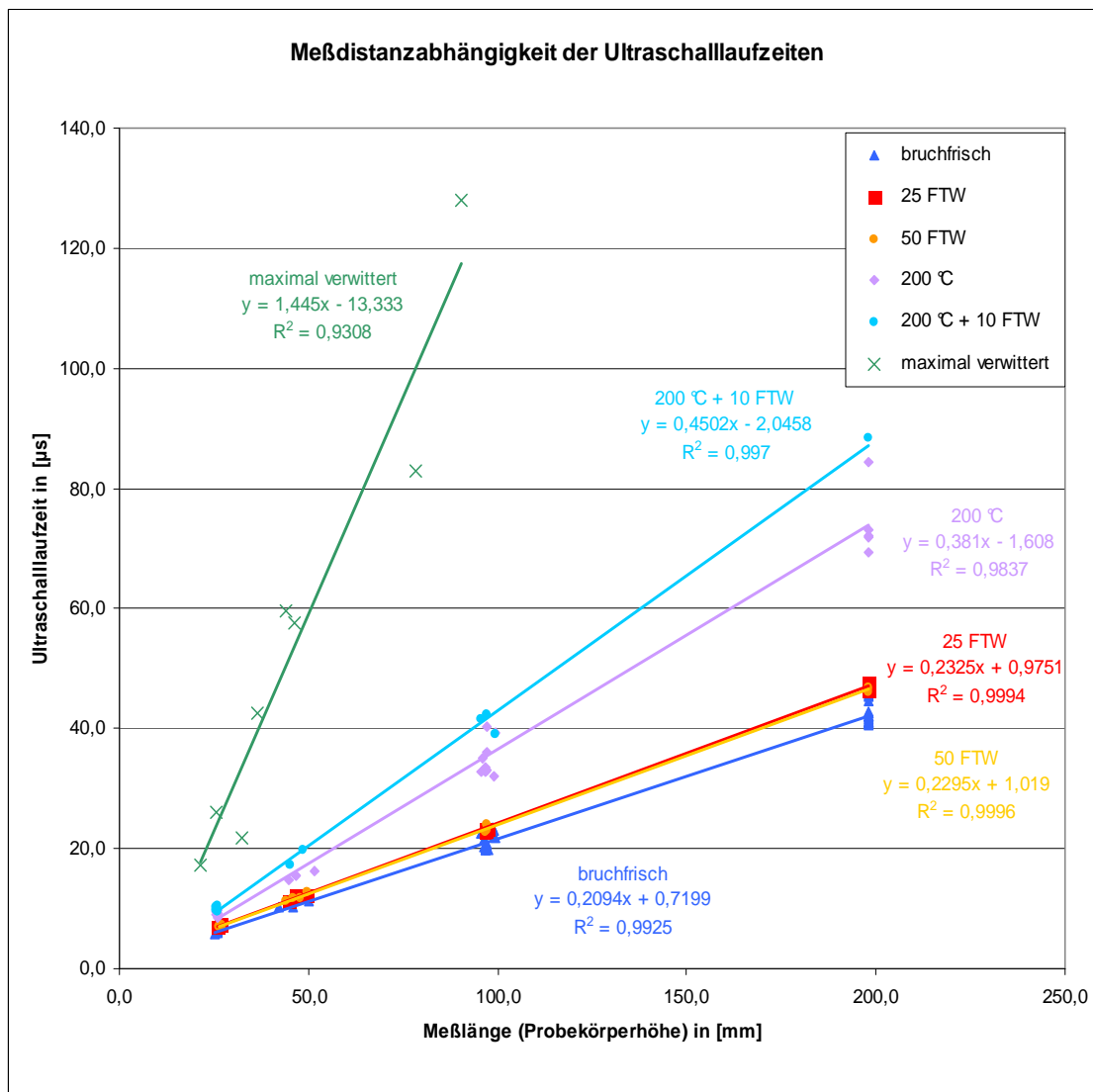


Abb. 79: Abhängigkeit der Messdistanz von der Ultraschalllaufzeit für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

	k-Wert	d-Wert	v ideell
Gestein: Waldviertler Marmor	[$\mu\text{s}/\text{mm}$]	[μs]	[km/s]
Bruchfrisch	0,209	0,720	4,77
Nach 25 Frost-Tauwechsel	0,233	0,975	3,95
Nach 50 Frost-Tauwechsel	0,230	1,019	4,00
10 mal bei 200 °C	0,381	-1,608	2,82
10 mal bei 200 °C + 10 FTW	0,450	-2,046	2,50
maximal verwittert	1,445	-13,333	0,97

Tabelle 5: Zusammenstellung von k-, d- und v ideell-Werten für Waldviertler Marmor.

In Tabelle 5 sind die ermittelten k-, d- und v ideell- Werte für Waldviertler Marmor mit unterschiedlichen Verwitterungs- und Beanspruchungsgraden aufgelistet. In Abb. 79 ist die Spannweite der messdistanzabhängigen Ultraschalllaufzeit dargestellt. Durch Messung der US-Geschwindigkeit von mindestens zwei unterschiedlichen Distanzen und durch Berechnung der Regressionsgerade kann nun der Verwitterungszustand einer beliebigen Probe aus Waldviertler Marmor beurteilt werden.

5.4. Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten

In Abb. 80 sind die Mittelwerte der Wasseraufnahme zweier Versuchsreihen dargestellt. Der Mittelwert der bruchfrischen Prüfkörper (rot) resultiert aus dem in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Wasseraufnahmeversuch. Der Mittelwert der Prüfkörper (blau), die einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C unterzogen wurden, errechnet sich aus dem in Kapitel 4.3.4 beschriebenen Versuch. Es ist deutlich zu sehen, dass einerseits das Wasseraufnahmevermögen der temperaturbeanspruchten Proben mehr als doppelt so groß ist und dass andererseits die Wasseraufnahme wesentlich schneller verläuft als bei den unverwitterten Prüfkörpern.

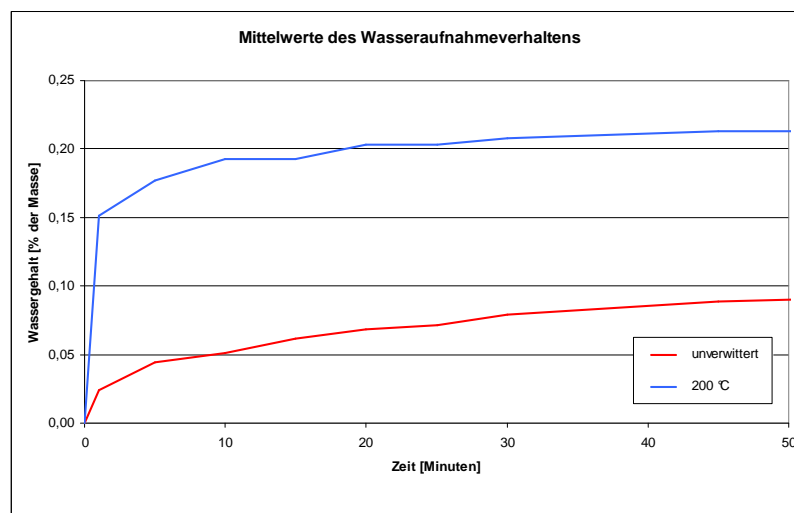


Abb. 80: Mittelwerte der Wasseraufnahme für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

In Abb. 81 sind die Mittelwerte der Wasserabgabe zweier Versuchsreihen dargestellt. Die Mittelwerte resultieren aus den in Kapitel 4.1.4 und Kapitel 4.3.4 beschriebenen Versuchen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wasserabgabe der temperaturbeanspruchten Prüfkörper (blau) wesentlich schneller verläuft als bei den bruchfrischen Prüfkörpern (rot). Im Mittel erfolgte die komplette Wasserabgabe der zehnfach beanspruchten Proben bei 200 °C nach 4 Stunden, hingegen war die Wasserabgabe der bruchfrischen Prüfkörper im Mittel erst nach 73 Stunden abgeschlossen.

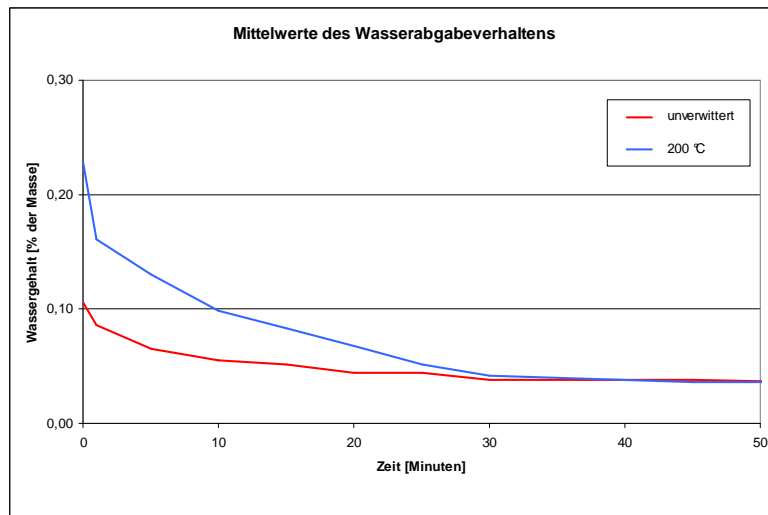


Abb. 81: Mittelwerte der Wasserabgabe für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

5.5. Spaltzugfestigkeit

In Abb. 82 sind die Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper dargestellt. Eine deutliche Reduktion der Spaltzugfestigkeit der im Labor beanspruchten Prüfkörper ist nicht zu erkennen. Wie in Kapitel 4.4.5 erwähnt wurde, sind die Messergebnisse der maximal verwitterten Gesteinsproben gemäß Norm als ungültig zu werten. Sie geben jedoch Aufschluss über die minimal mögliche Kornbindungsfestigkeit.

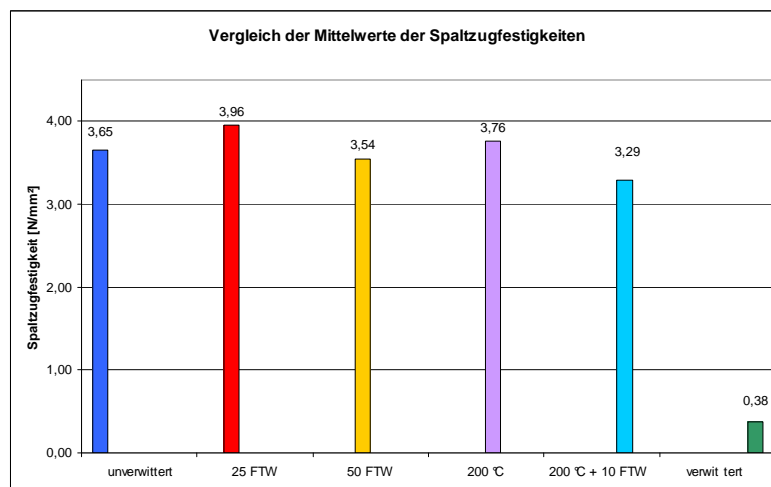


Abb. 82: Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

In Abb. 83 wird die Korrelation zwischen Ultraschallgeschwindigkeiten und einaxialen Spaltzugfestigkeiten unterschiedlich beanspruchter Prüfkörper dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die jeweiligen Messergebnisse der Ultraschallgeschwindigkeiten eng beieinander liegen. Mit Ausnahme der Werte der maximal verwitterten Prüfkörper befinden sich die Werte der Ultraschallgeschwindigkeiten jeweils auf einer nahezu horizontalen Geraden. Im Gegensatz dazu streuen die Messergebnisse der jeweiligen Spaltzugfestigkeiten mit Ausnahme der maximal verwitterten Gesteinsproben erheblich.

Offenbar ist die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit keine geeignete Methode die Verwitterungsgrade beim Waldviertler Marmor ausreichend genau zu charakterisieren. Dagegen ist die Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit eine sensiblere und aussagekräftigere Methode.

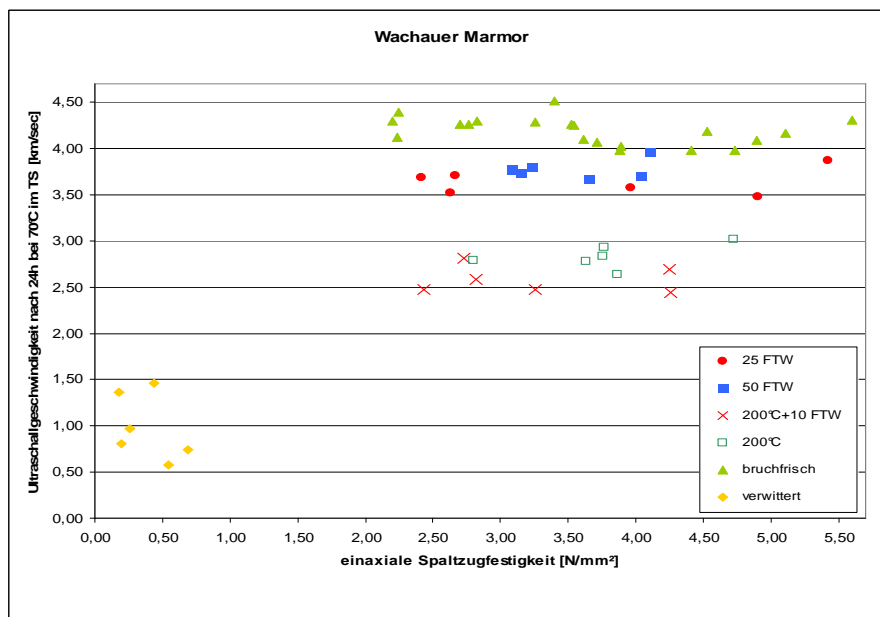


Abb. 83: Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeiten nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C von den einaxialen Spaltzugfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

5.6. Einaxiale Druckfestigkeit

In Abb. 84 sind die Mittelwerte der einaxialen Druckfestigkeiten unterschiedlich beanspruchter Prüfkörper dargestellt. Die scheinbare Zunahme der einaxialen Druckfestigkeiten durch Beanspruchungen im Labor dürfte auf die unterschiedliche Stückzahl der verwendeten Prüfkörper zurückzuführen sein. Es standen: sieben unverwitterte, fünf mit 25 FTW, vier mit 50 FTW, zwei mit einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und zwei maximal verwitterte Prüfkörper zur Verfügung.

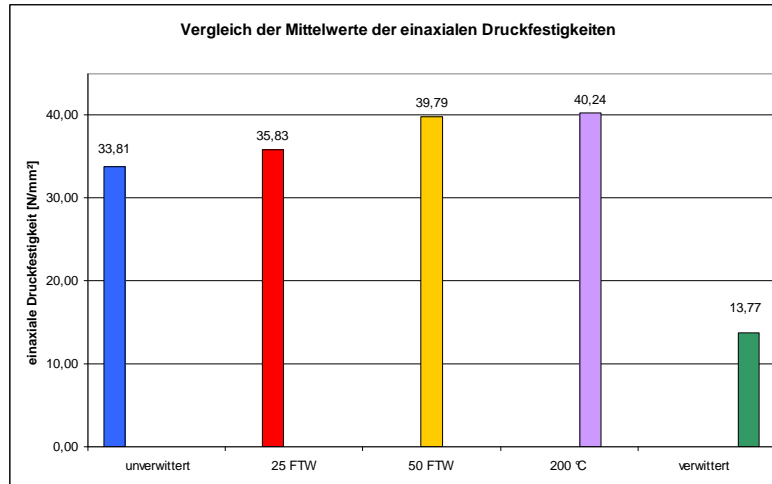


Abb. 84: Mittelwerte der einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

In Abb. 85 wird die Korrelation zwischen Ultraschallgeschwindigkeiten und einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten unterschiedlich beanspruchter Prüfkörper dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die jeweiligen Messergebnisse der Ultraschallgeschwindigkeiten eng beieinander liegen, da sie sich nahezu auf einer horizontalen Geraden befinden. Im Gegensatz dazu streuen die Messergebnisse der jeweiligen einaxialen Druckfestigkeiten erheblich.

Die Bestimmung der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit ist wie die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit keine geeignete Methode, um den Verwitterungsgrad von Waldviertler Marmor mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Im Gegensatz dazu ist die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit eine sensiblere und aussagekräftigere Methode.

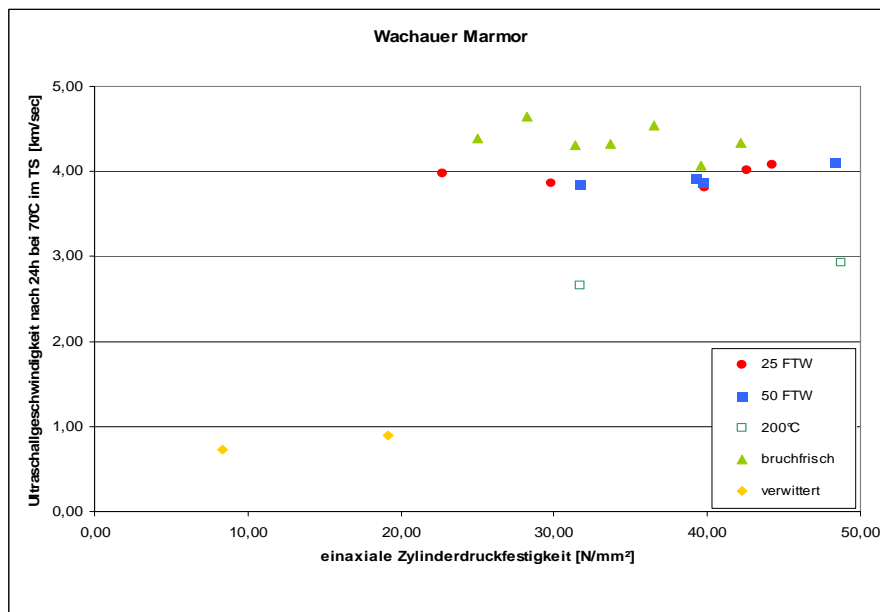


Abb. 85: Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeiten nach Trocknung im Trockenschrank bei 70 °C für 24 h von den einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

In Abb. 86 sind die Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten in Abhängigkeit der Mittelwerte der einaxialen Druckfestigkeiten mit der zugehörigen Regressionsgeraden von unterschiedlich beanspruchten Prüfkörpern dargestellt.

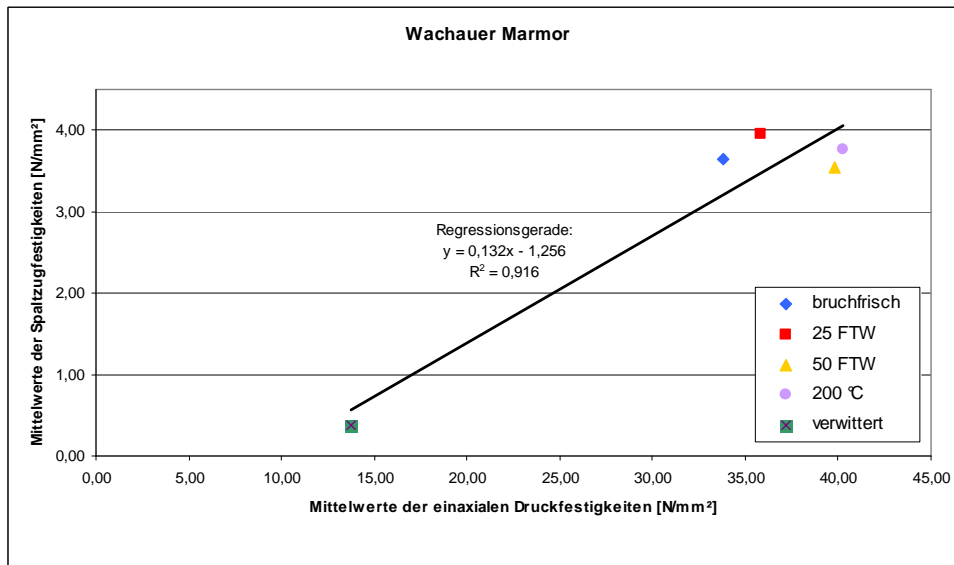


Abb. 86: Abhängigkeit der Mittelwerte der einaxialen Spaltzugfestigkeiten von den Mittelwerten der einaxialen Druckfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.

In Abb. 87 sind die Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten in Abhängigkeit der Mittelwerte der einaxialen Druckfestigkeiten mit der zugehörigen Regressionsgeraden von vier unterschiedlichen Gesteinen und SCC Beton (Schrattenholzer 2004, Seite 97) dargestellt.

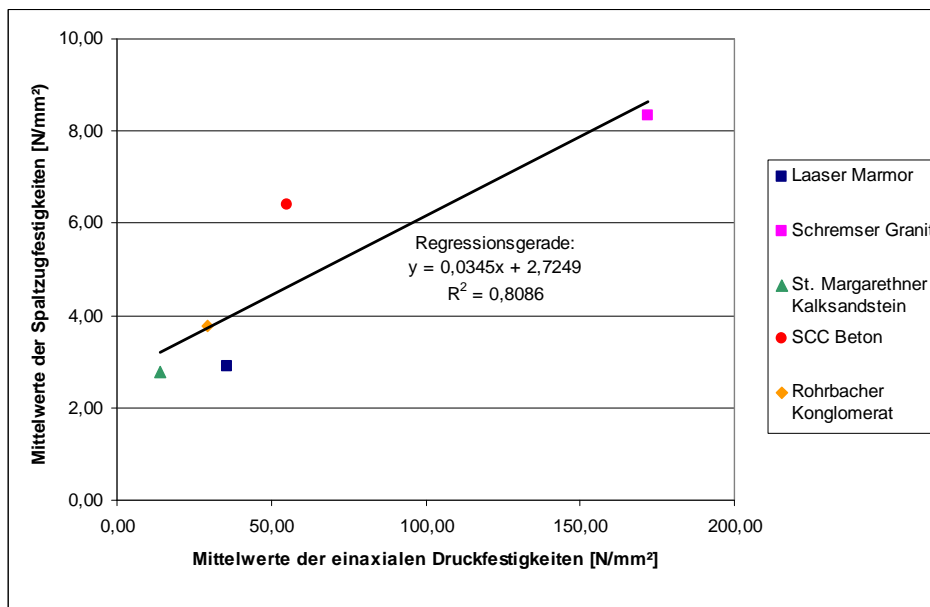


Abb. 87: Vergleich von Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit von vier unterschiedlichen Gesteinen und SCC Beton. Nach: Schrattenholzer 2004, Seite 97.

In Abb. 88 sind die Messergebnisse aus Abb. 86 und Abb. 87 zusammengefasst dargestellt.

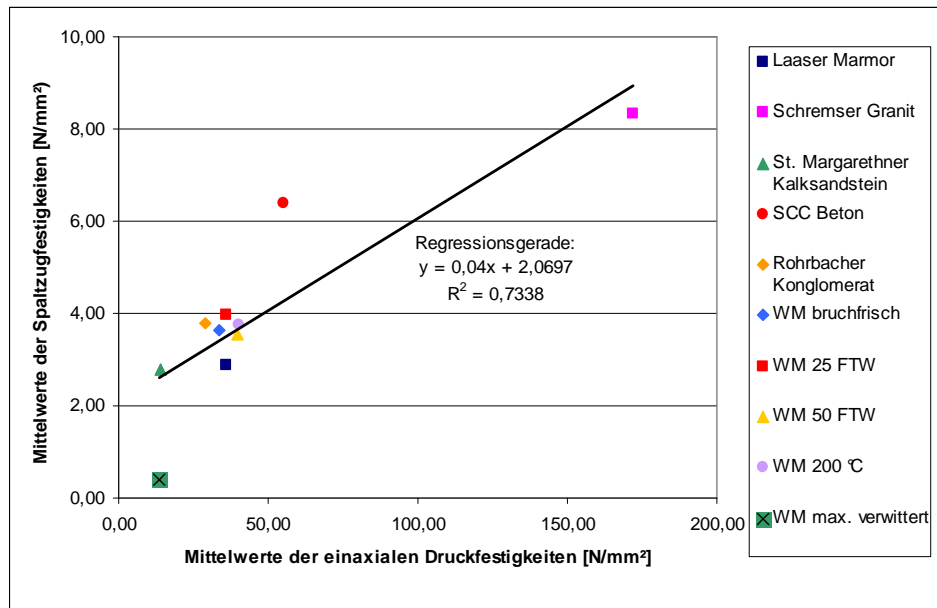


Abb. 88: Zusammenfassung der Werte nach Abb. 86 und Abb. 87.

Aus den Diagrammen (Abb. 86 bis Abb. 88) wird deutlich, dass das Verhältnis der Festigkeitswerte vom jeweiligen Gesteinstyp, dessen Gefüge und dem Verwitterungsgrad abhängt.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

6.1. Motivation

Die Restaurierung von Denkmälern aus Naturstein ist ein sehr komplexes Themengebiet. Die Steinkonservierung bedarf großer Erfahrung und Sensibilität. Damit durch unsachgemäße Konservierungsmaßnahmen keine unwiederbringlichen Kulturgüter zerstört werden, ist die Kenntnis der gesteinsphysikalischen Parameter und des Verwitterungsverhaltens notwendig.

Ziel dieser Arbeit ist es, die wissenschaftlichen Untersuchungen an Waldviertler Marmor zu erweitern, damit das Gestein optimal restauratorisch und konservatorisch behandelt werden kann. Jeder Einsatz von konservierenden Maßnahmen verändert die Gesteinsparameter. Um ein ideales Ergebnis durch konservierende Maßnahmen zu erlangen, müssen die Wechselwirkungen der Gesteinsparameter untereinander geklärt werden. Durch gezielte Bindemittelzufuhr bei Verwendung von Festigungsmitteln wird versucht, die ursprünglichen Festigkeitswerte wiederherzustellen. Allerdings können durch Einsatz von Festigungsmitteln das Wasserauf- und Wasserabgabevermögen reduziert werden, wodurch es wiederum zu Schäden kommen kann.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden folgende Parameter für Prüfkörper aus Waldviertler Marmor ermittelt:

- Rohdichte
- massenbezogene Wasseraufnahme
- Ultraschallgeschwindigkeit
- Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten
- Spaltzugfestigkeit
- einaxiale Druckfestigkeit

Die Parameter wurden in unterschiedlichen Verwitterungsstadien ermittelt und miteinander verglichen:

- bruchfrisch
- nach 25 bzw. 50 Frost-Tauwechseln
- nach zehnmaler Temperaturbeanspruchung von 200 °C
- nach zehnmaler Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 Frost-Tauwechseln
- maximal (natürlich) verwittert

6.2. Schlussfolgerungen

Bei den *Rohdichtemessungen* unterschieden sich die Ergebnisse der im Labor unterschiedlich beanspruchten Prüfkörper kaum. Lediglich die Werte für die natürlich verwitterten Proben wichen von den restlichen ab. Um eine Abnahme der Rohdichte im Labor zu simulieren, müssten die Gesteinsproben durch weitere Frost-Tauwechsel und/oder Temperatureinwirkungen beansprucht werden.

Als bessere Methode für den Nachweis von Gefügeflockungen hat sich die Ermittlung der *massenbezogenen Wasseraufnahme* herausgestellt. Es hat sich gezeigt, dass die Gefügezerstörung durch Frost-Tauwechsel einer vorhergehenden thermischen Beanspruchung bedarf. Durch alleinige Frost-Tauwechselbeanspruchung konnte keine Änderung der gesteinsphysikalischen Parameter nachgewiesen werden. Somit kann Waldviertler Marmor als frostbeständig eingestuft werden.

Die Bestimmung der *Ultraschallgeschwindigkeit* hat sich für die Ermittlung des Verwitterungszustands des Gesteins als sensibelste und aussagekräftigste Methode herausgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die Ultraschallgeschwindigkeit der maximal verwitterten Prüfkörper um 80 % im Vergleich zu den bruchfrischen Proben abnimmt. Lediglich zehn Beanspruchungen von 200 °C bewirkten eine Reduktion der Ultraschallgeschwindigkeit um 41 %. Die Darstellung der Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit von der Messdistanz ist ebenfalls eine gute Methode, um den Verwitterungsgrad zu ermitteln und zu vergleichen. Durch die Berechnung des Steigungswinkels der Geradengleichung kann der Verwitterungszustand eines Gesteins exakter ermittelt werden als durch den Vergleich der Ultraschallgeschwindigkeitswerte. In der vorliegenden Arbeit wurde die Spannbreite der k- und d- Werte der Regressionsgeraden, aus Korrelation zwischen Ultraschalllaufzeit und zugehöriger Messdistanz für unterschiedliche Verwitterungsstufen ermittelt. Durch Messung der Ultraschalllaufzeit von mindestens zwei unterschiedlichen Distanzen (je unterschiedlicher die Distanzen und je mehr Messungen vorliegen, desto genauer wird das Ergebnis) und durch die Berechnung der Regressionsgeraden kann nun der Verwitterungszustand eines Waldviertler Marmors beurteilt werden.

Die Ermittlung des *Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhaltens* ist ebenfalls eine aussagekräftige Methode den Verwitterungszustand zu bestimmen. Zehn Temperaturbeanspruchungen bei 200 °C bewirkten eine Verdoppelung des Wasseraufnahmevermögens und die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme erhöhte sich erheblich. Das Wasserabgabeverhalten änderte sich ebenfalls gravierend. Die komplette Wasserabgabe der bruchfrischen Prüfkörper war im Mittel nach 73 Stunden abgeschlossen, dagegen war die Wasserabgabe der zehnfach temperaturbeanspruchten Proben im Mittel bereits nach 4 Stunden abgeschlossen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Ermittlung der *Spaltzugfestigkeit* und der *einaxialen Zylinderdruckfestigkeit* keine geeigneten Methoden sind, die Verwitterungsgrade von Waldviertler Marmor genau zu bestimmen, da die Ergebnisse stark streuen.

6.3. Ausblick

Diese Arbeit bietet eine Grundlage für die Konservierung und Restaurierung von Waldviertler Marmor. Im Anschluss an die vorliegende Arbeit wurde das Verwitterungsverhalten und die Konservierung am Beispiel der Restaurierung des Grabmals „Schwarz-Kurz“ am Wiener Zentralfriedhof der Alten Israelitischen Abteilung am Tor 1, von (Pliessnig 2010) untersucht. Das durch Einsturz gefährdete, bürgerliche Grabdenkmal diente als Studienobjekt, und die gewonnenen Erkenntnisse konnten angewendet und erweitert werden.

Ziel zukünftiger Arbeiten kann es sein, das Verwitterungsverhalten thermisch beanspruchter Proben bis zur kompletten Gefügeflockung zu untersuchen. Die Wechselwirkung der einzelnen Parameter untereinander muss näher untersucht werden, damit wichtige Kulturgüter optimal bewahrt werden können.

LITERATURVERZEICHNIS

DEUTSCHE NORM, DIN EN 14579. Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung. Deutsche Fassung EN 14579. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Januar 2005.

FIMMEL, ROMANA. Verwitterungsverhalten der alpinen Marmore von Laas und Sterzing. Dissertation am Institut für Mineralogie und Petrographie. Leopold-Franzens Universität Innsbruck, Juli 1996.

FLEISCHER, GÜNTER. Strukturelle Festigung von St. Margarethener Kalksandstein (Burgenland) und deren Auswirkung auf die gesteinsphysikalischen Eigenschaften. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, Jänner 2001.

FLEISCHER, GÜNTER. Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege. Dissertation am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, April 2002.

FLEISCHER, GÜNTER und ROHATSCH, ANDREAS. Untersuchungen zur Generalsanierung der Kirche St. Leopold „am Steinhof“ in Wien. Referateband. Wiener Sanierungstage 27.–28.03.2003. Wien: Institut für Bauschadensforschung, ofi – Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik, 2003.

GEGENDORFER, VALENTIN. Migrationsverhalten von Flüssigkeiten im Laaser Marmor. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, Juni 2003.

HÖGELBERGER, HEINZ. Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt. Die Marmore und Kalksilikatgesteine der Bunten Serie. Petrologische Untersuchungen und geologische Konsequenzen. Band 132, Heft 1. Wien: Geologische Bundesanstalt, Mai 1989.

<http://de.wikipedia.org/wiki/Frosttag>; am 02.04.2010, um 16:41.

<http://www.labor-koehler.de/>; am 21.04.2010, um 17:38.

<http://www.wachauermarmor.at/index.php?id=19>; am 27.05.2010, um 16:14.

KURZWEL, HANS. Gewinnungsbewilligungsverfahren zum Abbau von „Kalkstein“ betreffend das Abbaufeld „WUNSCH I“. Universität Wien–Geozentrum. Institut für Petrologie, 12. Dezember 1996.

MATTHES, SIEGFRIED. Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2001.

ÖNORM B 3121. Prüfung von Naturstein. Reindichte, Rohdichte, Schüttdichte. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 1. Juni 1978.

ÖNORM B 3122. Prüfung von Naturstein. Wassergehalt und Wasseraufnahme. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 1. September 1988.

ÖNORM B 3123, Teil 1. Prüfung von Naturstein. Verwitterungsbeständigkeit. Beurteilungsgrundlagen. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 1. September 1990.

ÖNORM B 3123, Teil 2. Prüfung von Naturstein. Verwitterungsbeständigkeit. Frost-Tau-Wechselbeanspruchung von Naturstein. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 1. September 1990.

ÖNORM B 3124, Teil 1. Prüfung von Naturstein. Mechanische Gesteinseigenschaften. Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 1. März 1981.

ÖNORM B 3124, Teil 4. Prüfung von Naturstein. Mechanische Gesteinseigenschaften. Einaxiale Zugfestigkeit (Spaltzugfestigkeit). Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), 1. März 1981.

ÖNORM EN 12371. Prüfverfahren für Naturstein. Bestimmung des Frostwiderstandes. Deutsche Fassung EN 12371. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), Oktober 2001.

ÖNORM EN 14066. Prüfverfahren für Naturstein. Bestimmung des Widerstandes gegen Alterung durch Wärmeschock. Deutsche Fassung EN 14066. Wien: Österreichisches Normungsinstitut (ON), April 2003.

PLIESSNIG, MARTIN. Waldviertler Marmor. Verwitterungsverhalten und Konservierung am Beispiel der Restaurierung des Grabmals „Schwarz-Kurz“, Zentralfriedhof Wien, Alte Israelitische Abteilung Tor 1. Diplomarbeit am Institut für Konservierung und Restaurierung. Universität für Angewandte Kunst Wien, Jänner 2010.

PRESS, FRANK und SIEVER, RAYMOND. Allgemeine Geologie. Übersetzt und herausgegeben von Volker Schweizer. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 1995.

ROHATSCH, ANDREAS. Verwitterung von Naturstein. Österreichische Bauzeitung. Wien: Österreichischer Wirtschaftsverlag, 07.05.2004.

RÜDRICH, JÖRG MICHAEL. Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten. Georg-August-Universität Göttingen, 2003.

SCHRATTENHOLZER, MARTIN. Vergleich von Gesteinsfestigkeiten bei Naturstein und Beton. Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie. Technische Universität Wien, September 2004.

SNETHLAGE, R. Steinzerfall – Steinkonservierung 1990. Berlin: Ernst & Sohn, 1992.

STEININGER, FRITZ F. Erdgeschichte des Waldviertels. Herausgegeben von Fritz F. Steininger. 2. Auflage. Horn; Waidhofen/Thaya: Waldviertler Heimatbund, 1999.

THINSCHMIDT, ANDREAS. Die Marmorvorkommen in Niederösterreich. Unveröffentlichter Bericht, Proj. N-A-043/95; Universität für Bodenkultur, Amt der NÖ Landesregierung, Wien, 1995.

THURO, KUROSCH und PLINNINGER RALF. Einführung in die Ingenieurgeologie. Felsmechanisches Laborpraktikum für Geologen. Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie. 7. Auflage – Version 7.1. Technische Universität München, 06.12.1998.

WIDHALM, CLEMENS und EPPENSTEINER, WALTER und TSCHEGG ELMAR K. Meßmethoden zur Beschreibung von Gefügeanisotropien in Marmor. Zeitung der Deutschen Geologischen Gesellschaft. Band 150, Teil 2. Themenheft: Marmor-Konservierung. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), August 1999.

WESSELY, GODFRID. Geologie der österreichischen Bundesländer. Niederösterreich. Wien: Geologische Bundesanstalt, 2006.

Zeitschrift: Wachau Magazin 2009. Reisen in einer der schönsten Kulturlandschaften Europas. Mautern: ARGE Qualitätstourismus Wachau, 2009.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Polierte Platte eines Wachauer Marmors aus Mühldorf.	9
Abb. 2: Denkmal anlässlich der Fussball-EM aus Wachauer Marmor in A-1020 Wien. Quelle: www.wachauermarmor.at.....	10
Abb. 3: Pfarrkirche Stattersdorf in NÖ. Boden und Stufen aus geschliffenem Wachauer Marmor. Quelle: www.wachauermarmor.at	10
Abb. 4: Übersicht der Geologie Niederösterreichs (mit Bohrdichte und Lage des Überschnittes), Legende siehe Abb. 5. Quelle: Wessely 2006, Seite 12.....	12
Abb. 5: Schematischer Schnitt durch die geologische Einheit des Bundeslandes Niederösterreich. Quelle: Wessely 2006, Seite 13.	12
Abb. 6: Geologische Karte der Republik Österreich der Region Kottles, im Bezirk Zwettl, Niederösterreich. Der rote Pfeil markiert die Lage des Steinbruches „Wachauer Marmor GmbH“. Herausgegeben von der Geologischen Bundesanstalt Wien.	16
Abb. 7: Legende der geologischen Karte der Republik Österreich der Region Kottles, im Bezirk Zwettl, Niederösterreich. Herausgegeben von der Geologischen Bundesanstalt Wien	17
Abb. 8: Im Seilsägeverfahren hergestellte Abbauwand.	20
Abb. 9: Abbautechnik „Loch neben Loch“ mit Pressluftschlämmern.	20
Abb. 10: Gesteinskreissäge zur Herstellung massiver Werkstücke.	20
Abb. 11: Verwitterter Marmorblock.	20
Abb. 12: Waage mit Durchhang zur Massebestimmung unter Auftrieb	22
Abb. 13: Druckluftstativ mit Ultrasonic-Tester und einer eingespannten Probe.....	24
Abb. 14: Porenradialbereiche. A: wirksame Feuchtetransportmechanismen B: Messbereiche verschiedener Verfahren. (Snethlage 1992 aus Fimmel 1996, Seite 36).....	26
Abb. 15: Waage zur Massebestimmung mit Gesteinsprobe und Stoppuhr.	27
Abb. 16: Spannungsverteilung einer belasteten Probe aus: Rüdrieh 2003, Seite 21.	33
Abb. 17: Begriffsbestimmung der Spaltzugfestigkeit. Quelle: ÖNORM B 3124 Teil 4, Seite 1.....	33
Abb. 18: Probengeometrie und Versuchsanordnung aus: Rüdrieh 2003, Seite 21..	33
Abb. 19: Prinzip dreier unterschiedlicher Versuchsanordnungen beim Spaltzugversuch. Aus: Thuro und Plinninger 1998, Seite 38.....	34
Abb. 20: Computergesteuerte Presse zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit mit einer eingespannten Probe.....	35
Abb. 21: Bruchflächenausbildung nach dem Brazilian-Test der bruchfrischen und im Labor beanspruchten Gesteinsproben.	36

Abb. 22: Nach dem Brazilian-Test der maximal verwitterten Gesteinsproben bildete sich keine Bruchfläche aus.	36
Abb. 23: Begriffsbestimmung für Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit. Quelle: ÖNORM B 3124 Teil 1 1981, Seite 2.....	37
Abb. 24: Einaxialer Druckversuch mit gestrichelt dargestellter Bruchfigur. Aus: Thuro und Plinninger 1998, Seite 3.....	37
Abb. 25: Mögliche Bruchfiguren bei Ermittlung der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit. Bei Entstehung der Bruchfigur nach Bild 1 sind die Messergebnisse als ungültig zu werten. Aus: Thuro und Plinninger 1998, Seite 30.	38
Abb. 26: Computergesteuerte Presse zur Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit mit einer eingespannten Probe.	38
Abb. 27: Nach den einaxialen Druckversuchen stellte sich häufig dieses Bruchbild ein.	39
Abb. 28: Bruchbild einer maximal verwitterten Gesteinsprobe.....	39
Abb. 29: Rohdichte der bruchfrischen Probekörper.....	40
Abb. 30: Massenbezogene Wasseraufnahme der bruchfrischen Probekörper.	41
Abb. 31: Abhängigkeit der massenbezogenen Wasseraufnahme von der Rohdichte.	41
Abb. 32: Ultraschallgeschwindigkeit der bruchfrischen Probekörper bei 20 °C raumfeucht.....	42
Abb. 33: Ultraschallgeschwindigkeit der Probekörper nach 144 h bei 70 °C im Trockenschrank.....	42
Abb. 34: Ultraschallgeschwindigkeit der Probekörper bei 20 °C wassersatt.	43
Abb. 35: Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit der Messdistanz der Probekörper bei 20 °C raumfeucht, 20 °C wassersatt und nach 144 h bei 70 °C im Trockenschrank.....	43
Abb. 36: Wasseraufnahmeverhalten von 3 bruchfrischen Probekörpern (BO1 bis BO3).....	44
Abb. 37: Wasserabgabeverhalten von 3 bruchfrischen Probekörpern (BO1 bis BO3).	44
Abb. 38: Spaltzugfestigkeit der bruchfrischen Prüfkörper.	45
Abb. 39: Einaxiale Druckfestigkeit der bruchfrischen Prüfkörper.	45
Abb. 40: Rohdichte nach 25 bzw. 50 FTW.....	46
Abb. 41: Massenbezogenen Wasseraufnahme nach 25 bzw. 50 FTW.....	47
Abb. 42: Abhängigkeit der massenbezogenen Wasseraufnahme von der Rohdichte nach 25 bzw. 50 FTW.	47
Abb. 43: Ultraschallgeschwindigkeit nach 25 bzw. 50 FTW.....	48
Abb. 44: Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit der Messdistanz nach 25 bzw. 50 FTW.	48
Abb. 45: Spaltzugfestigkeit nach 25 bzw. 50 FTW.....	49

Abb. 46: Einaxiale Druckfestigkeit nach 25 bzw. 50 FTW.....	49
Abb. 47: Rohdichte nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.....	50
Abb. 48: Massenbezogenen Wasseraufnahme nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.....	51
Abb. 49: Abhängigkeit der massenbezogenen Wasseraufnahme von der Rohdichte nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.....	51
Abb. 50: Verlauf der Ultraschallgeschwindigkeit nach einer Temperaturbeanspruchung von jeweils 200 °C.	52
Abb. 51: Ultraschallgeschwindigkeit nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.	52
Abb. 52: Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit der Messdistanz nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.....	53
Abb. 53: Wasseraufnahmeverhalten von 2 Probekörpern (A08 und B08) nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C.	54
Abb. 54: Wasserabgabeverhalten von 2 Probekörpern (A08 und B08) nach einer zehnmaligen Temperaturbeanspruchung von 200 °C.	54
Abb. 55: Spaltzugfestigkeit nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C bzw. nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C und 10 FTW.	55
Abb. 56: Einaxiale Druckfestigkeit nach einer zehnfachen Temperaturbeanspruchung von 200 °C.....	55
Abb. 57: Ausgangsmaterial.....	56
Abb. 58: Verwitterungszustand	56
Abb. 59: Herstellung der Bohrkerne	57
Abb. 60: Blick in die Bohrlöcher mit entstandenen Rissen	57
Abb. 61: Gewonnene Bohrkerne	57
Abb. 62: Reste des Materials.....	57
Abb. 63: verwendete Bohrkerne G01 bis G08.....	58
Abb. 64: Bohrkern G08	58
Abb. 65: Lagerung der Probe im Wasserbad zur Bestimmung der Rohdichte.....	58
Abb. 66: Gesteinsprobe im Wasserbad mit aufsteigenden Luftbläschen.	58
Abb. 67: Rohdichte der verwitterten Probekörper.....	59
Abb. 68: Massenbezogene Wasseraufnahme der verwitterten Probekörper.....	59

Abb. 69: Abhängigkeit der massenbezogenen Wasseraufnahme von der Rohdichte der verwitterten Probekörper.	60
Abb. 70: Ultraschallgeschwindigkeit der verwitterten Probekörper, raumfeucht gelagert bei 20 °C.	61
Abb. 71: Ultraschallgeschwindigkeit der verwitterten Probekörper nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C.	61
Abb. 72: Gegenüberstellung der Ultraschallgeschwindigkeiten der bei 20 °C raumfeucht gelagerten Proben und nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C.	62
Abb. 73: Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit der Messdistanz der bei 20 °C raumfeucht gelagerten Proben und nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C.	62
Abb. 74: Spaltzugfestigkeit der maximal verwitterten Prüfkörper.	63
Abb. 75: Einaxiale Druckfestigkeit der maximal verwitterten Prüfkörper.	64
Abb. 76: Mittelwerte der Rohdichten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	65
Abb. 77: Mittelwerte der massenbezogenen Wasseraufnahmen für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	66
Abb. 78: Mittelwerte der Ultraschallgeschwindigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C.	66
Abb. 79: Abhängigkeit der Messdistanz von der Ultraschalllaufzeit für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	68
Abb. 80: Mittelwerte der Wasseraufnahme für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	69
Abb. 81: Mittelwerte der Wasserabgabe für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	70
Abb. 82: Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	70
Abb. 83: Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeiten nach 24stündiger Trocknung bei 70 °C von den einaxialen Spaltzugfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	71
Abb. 84: Mittelwerte der einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	72
Abb. 85: Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeiten nach Trocknung im Trockenschrank bei 70 °C für 24 h von den einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	72
Abb. 86: Abhängigkeit der Mittelwerte der einaxialen Spaltzugfestigkeiten von den Mittelwerten der einaxialen Druckfestigkeiten für unterschiedlich beanspruchte Probekörper.	73
Abb. 87: Vergleich von Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit von vier unterschiedlichen Gesteinen und SCC Beton. Nach: Schrattenholzer 2004, Seite 97.	73
Abb. 88: Zusammenfassung der Werte nach Abb. 86 und Abb. 87.	74

Abb. 89: Ermittlung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme der bruchfrischen Probekörper.	89
Abb. 90: Ermittlung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme nach 25 bzw. 50 FTW, sowie nach 200 °C bzw. 200 °C und 10 FTW.....	90
Abb. 91: Ermittlung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme der maximal verwitterten Prüfkörper.....	91
Abb. 92: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der bruchfrischen Probekörper.	92
Abb. 93: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der bruchfrischen und maximal verwitterten Prüfkörper.....	93
Abb. 94: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten nach 25 bzw. 50 FTW.	94
Abb. 95: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten nach 200 °C bzw. 200 °C und 10 FTW.	95
Abb. 96: Ermittlung des Verlaufes der Ultraschallgeschwindigkeit nach Temperaturbeanspruchung von 200 °C.	96
Abb. 97: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der maximal verwitterten Prüfkörper bei 20 °C raumfeucht und nach Trocknung im Trockenschrank bei 70 °C für 24 Stunden.....	97
Abb. 98: Wasseraufnahmeverhalten der bruchfrischen Prüfkörper.....	98
Abb. 99: Wasserabgabeverhalten der bruchfrischen Prüfkörper.	99
Abb. 100: Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten nach zehnmaliger Temperaturbeanspruchung von 200 °C.	100
Abb. 101: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 25 FTW.	101
Abb. 102: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 50 FTW.	101
Abb. 103: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 200 °C+10 FTW.....	102
Abb. 104: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 200 °C.	102
Abb. 105: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung der bruchfrischen Prüfkörper.	103
Abb. 106: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung der verwitterten Prüfkörper.	103
Abb. 107: Ermittlung der einaxialen Zugfestigkeiten der bruchfrischen und maximal verwitterten Prüfkörper.....	104
Abb. 108: Ermittlung der einaxialen Zugfestigkeiten der Prüfkörper mit Beanspruchung von: 25 FTW, 50 FTW, 200 °C und 200 °C + 10 FTW.	105
Abb. 109: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit nach 25 FTW.	106

Abb. 110: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit nach 50 FTW.	106
Abb. 111: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit nach 200 °C.	107
Abb. 112: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit der bruchfrischen Prüfkörper.	107
Abb. 113: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit der verwitterten Prüfkörper.	108
Abb. 114: Ermittlung der einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten der bruchfrischen und maximal verwitterten Prüfkörper und mit Beanspruchung von: 25 FTW, 50 FTW und 200 °C.	109

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Chemische Analyse von Kalkstein, Abbaufeld „Wunsch I “. Nach: Kurzweil 1996, Seite 12 und 13.	15
Tabelle 2: Mineralogische Analyse von Kalkstein, Abbaufeld „Wunsch I “. Nach: Kurzweil 1996, Seite 13.	15
Tabelle 3: Ermittlung der durchschnittlichen Frost-Wechseltage eines Jahres, Nach: Wikipedia, Frosttag.	29
Tabelle 4: Zusammenstellung der k-Werte, d-Werte und v ideell für unterschiedliche Gesteine. Quelle: Fleischer 2002, Seite 73.	67
Tabelle 5: Zusammenstellung von k-, d- und v ideell-Werten für Waldviertler Marmor.	69

ANHANG

	Seite:
Ermittlung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme der bruchfrischen Probekörper	89
Ermittlung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme nach 25 bzw. 50 FTW, sowie nach 200 °C bzw. 200 °C und 10 FTW	90
Ermittlung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme der maximal verwitterten Prüfkörper	91
Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der bruchfrischen Probekörper	92
Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der bruchfrischen und maximal verwitterten Prüfkörper	93
Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten nach 25 bzw. 50 FTW	94
Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten nach 200 °C bzw. 200 °C und 10 FTW	95
Ermittlung des Verlaufes der Ultraschallgeschwindigkeit nach Temperaturbeanspruchung von 200 °C	96
Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der maximal verwitterten Prüfkörper bei 20 °C raumfeucht und nach Trocknung im Trockenschrank bei 70 °C für 24 Stunden.	97
Wasseraufnahmeverhalten der bruchfrischen Prüfkörper	98
Wasserabgabeverhalten der bruchfrischen Prüfkörper	99
Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten nach zehnmaliger Temperaturbeanspruchung von 200 °C	100
Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 25 FTW	101
Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 50 FTW	101
Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 200 °C+10 FTW	102
Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 200 °C	102
Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung der bruchfrischen Prüfkörper	103
Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung der verwitterten Prüfkörper	103
Ermittlung der einaxialen Zugfestigkeiten der bruchfrischen und maximal verwitterten Prüfkörper	104
Ermittlung der einaxialen Zugfestigkeiten der Prüfkörper mit Beanspruchung von: 25 FTW, 50 FTW, 200 °C und 200 °C + 10 FTW	105
Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit nach 25 FTW	106
Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit nach 50 FTW	106
Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit nach 200 °C	107

Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit der bruchfrischen Prüfkörper	107
Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit der verwitterten Prüfkörper	108
Ermittlung der einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten der bruchfrischen und maximal verwitterten Prüfkörper und mit Beanspruchung von: 25 FTW, 50 FTW und 200 °C	109

Probekörper Nummer:	Höhe [mm]	Trockenmasse [g]	Masse Wassersatt [g]	Masse unter Auftrieb [g]	Wasseraufnahme absolut [g]	Massenbezogene Wasseraufnahme [% der Masse]	Auftriebsverfahren ohne Umhüllung	
							Rauminhalt der Probe mit unzug. Hohlräume [cm ³]	Rohdichte [kg/dm ³]
A01	96,9	478,3	479,0	302,5	0,7	0,146	176,813	2,705
A02	97,5	472,7	473,3	298,7	0,6	0,127	174,909	2,703
A03	96,9	473,4	474,0	299,1	0,6	0,127	175,210	2,702
A04	96,8	474,5	475,0	300,0	0,5	0,105	175,310	2,707
A05	97,1	477,9	478,5	302,3	0,6	0,126	176,512	2,707
A06	97,1	474,0	474,7	299,6	0,7	0,148	175,410	2,702
A07	96,8	476,6	477,2	301,4	0,6	0,126	176,111	2,706
A08	97,2	475,1	475,8	300,5	0,7	0,147	175,610	2,705
A09	96,6	475,5	476,0	300,5	0,5	0,105	175,811	2,705
A10	96,7	473,0	473,8	299,0	0,8	0,169	175,110	2,701
A11	96,9	469,7	470,4	296,8	0,7	0,149	173,907	2,701
A12	96,3	474,0	474,5	299,4	0,5	0,105	175,410	2,702
B01	198,0	975,9	976,9	616,5	1,0	0,102	361,038	2,703
B02	198,0	974,5	975,4	615,5	0,9	0,092	360,537	2,703
B03	198,0	970,5	971,8	613,4	1,3	0,134	359,035	2,703
B04	198,0	969,1	970,2	612,3	1,1	0,114	358,534	2,703
B05	198,0	969,1	970,0	612,4	0,9	0,093	358,233	2,705
B06	198,0	969,7	970,7	612,5	1,0	0,103	358,834	2,702
B07	198,0	971,2	972,2	613,8	1,0	0,103	359,035	2,705
B08	198,0	971,7	972,6	614,0	0,9	0,093	359,235	2,705
B09	198,0	972,7	973,8	614,6	1,1	0,113	359,836	2,703
B10	198,0	978,2	979,2	618,0	1,0	0,102	361,840	2,703
B11	198,0	975,0	975,8	615,8	0,8	0,082	360,638	2,704
B12	198,0	975,9	976,9	616,5	1,0	0,102	361,038	2,703
B13	198,0	969,4	970,5	612,5	1,1	0,113	358,634	2,703
B14	198,0	974,7	975,6	615,7	0,9	0,092	360,537	2,703
B15	198,0	966,8	967,9	610,9	1,1	0,114	357,632	2,703

Dichte von Wasser bei 20°C [g/cm ³]:	0,998232	Mittelwert:	0,837	0,12	2,704
--	----------	-------------	-------	------	-------

Abb. 89: Ermittlung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme der bruchfrischen Probekörper.

Probekörper Nummer:	Höhe [mm]	Trockenmasse [g]	Masse Wassersatt [g]	Masse unter Auftrieb [g]	Wasseraufnahme absolut [g]	Massenbezogene Wasseraufnahme [% der Masse]	Auftriebsverfahren ohne Umnüftung	
							Rauminhalt der Probe mit unzug. Hohlräume [cm ³]	Rohdichte [kg/dm ³]
25 FTW								
A01/5/1	49,7	243,3	243,6	153,6	0,3	0,123	90,159	2,699
A01/5/2	44,8	219,1	219,3	138,5	0,2	0,091	80,943	2,707
A02/5/1	46,7	228,7	229,1	144,5	0,4	0,175	84,750	2,699
A02/5/2	46,6	228,2	228,4	144,2	0,2	0,088	84,349	2,705
A03	96,9	473,6	474,2	299,0	0,6	0,127	175,510	2,698
B02	198,0	974,6	975,6	615,4	1,0	0,103	360,838	2,701
B03	198,0	970,7	971,8	613,3	1,1	0,113	359,135	2,703
Dichte von Wasser bei 20°C [g/cm ³]:			0,998232	Mittelwert:		0,117	2,702	
50 FTW								
A04/5/1	45,9	224,5	224,7	141,7	0,2	0,089	83,147	2,700
A04/5/2	47,8	234,5	234,8	148,0	0,3	0,128	86,954	2,697
A05/5/1	49,6	245,1	245,4	154,8	0,3	0,122	90,760	2,701
A05/5/2	44,0	216,9	217,2	136,9	0,3	0,138	80,442	2,696
A06	97,1	474,3	474,7	299,4	0,4	0,084	175,610	2,701
B05	198,0	969,0	970,2	612,0	1,2	0,124	358,834	2,700
B06	198,0	969,9	970,8	612,5	0,9	0,093	358,935	2,702
Dichte von Wasser bei 20°C [g/cm ³]:			0,998232	Mittelwert:		0,111	2,700	
200 °C								
A08	97,2	475,4	476,2	300,3	0,8	0,168	176,212	2,698
A09	96,6	475,7	476,4	300,3	0,7	0,147	176,412	2,697
B09/5/1	51,4	252,8	253,3	159,5	0,5	0,198	93,966	2,690
B09/5/2	44,7	217,4	217,8	137,1	0,4	0,184	80,843	2,689
Dichte von Wasser bei 20°C [g/cm ³]:			0,998232	Mittelwert:		0,174	2,693	
200°C+ 10FTW								
A07/5/1	48,6	239,5	240,2	151,2	0,7	0,292	89,158	2,686
A07/5/2	45,1	221,7	222,0	140,0	0,3	0,135	82,145	2,699
Dichte von Wasser bei 20°C [g/cm ³]:			0,998232	Mittelwert:		0,214	2,693	

Abb. 90: Ermittlung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme nach 25 bzw. 50 FTW, sowie nach 200 °C bzw. 200 °C und 10 FTW.

Probekörper Nummer:	Höhe [mm]	Trockenmasse [g]	Masse Wassersatt [g]	Masse unter Auftrieb [g]	Wasseraufnahme		Massenbezogene Wasseraufnahme [% der Masse]	Auftriebsverfahren ohne Umhüllung	
					absolut [g]	relativ [g]		Rauminhalt der Probe mit unzug. Hohlräume [cm ³]	Rohdichte [kg/dm ³]
G01	21,6	70,8	73,2	44,4	2,4	3,390	28,851	2,454	
G02	25,7	80,5	83,4	50,5	2,9	3,602	32,958	2,442	
G03	32,5	143,7	145,4	90,6	1,7	1,183	54,897	2,618	
G04	36,4	143,9	147,5	90,4	3,6	2,502	57,201	2,516	
G05	44,0	183,9	188,1	115,5	4,2	2,284	72,729	2,529	
G06	46,2	197,8	202,1	124,2	4,3	2,174	78,038	2,535	
G07	78,5	351,0	356,9	220,5	5,9	1,681	136,642	2,569	
G08	90,5	383,6	392,8	240,5	9,2	2,398	152,570	2,514	
Dichte von Wasser bei 20 °C [g/cm ³]:					0,998232	Mittelwert:	4,275	2,40	2,522

Abb. 91: Ermittlung der Rohdichte und der massenbezogenen Wasseraufnahme der maximal verwitterten Prüfkörper.

Probekörper Nummer:	Höhe [mm]	Ultraschall-Messung 20 °C		Ultraschall-Messung nach 24 Std. bei 70 °C im TS		Ultraschall-Messung nach 144 Std. bei 70 °C im TS		Ultraschall-Messung nach 144 Std. bei 70 °C im TS		Ultraschall-Messung Wassersatt bei 20 °C			
		Raumfeucht	Raumfeucht	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]
		Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]
A01	96,9	17,5	5,537	20,1	4,821	20,2	4,797	16,8	5,768				
A02	97,5	16,8	5,804	19,9	4,899	20,2	4,827	16,8	5,804				
A03	96,9	17,1	5,667	20,2	4,797	20,2	4,797	17,0	5,700				
A04	96,8	17,5	5,531	19,9	4,864	20,0	4,840	16,6	5,831				
A05	97,1	17,9	5,425	20,2	4,807	20,2	4,807	16,6	5,849				
A06	97,1	18,4	5,277	20,7	4,691	20,7	4,691	17,1	5,678				
A07	96,8	17,5	5,531	19,8	4,889	19,8	4,889	16,6	5,831				
A08	97,2	18,2	5,341	20,6	4,718	20,6	4,718	17,0	5,718				
A09	96,6	17,6	5,489	19,7	4,904	19,8	4,879	16,5	5,855				
A10	96,7	17,7	5,463	20,2	4,787	20,1	4,811	16,3	5,933				
A11	96,9	18,3	5,295	20,6	4,704	20,5	4,727	17,1	5,667				
A12	96,3	17,0	5,665	20,3	4,744	20,2	4,767	17,1	5,632				
B01	198,0	36,3	5,455	41,0	4,829	41,0	4,829	34,6	5,723				
B02	198,0	36,2	5,470	41,1	4,818	41,3	4,794	35,6	5,562				
B03	198,0	36,9	5,366	42,2	4,692	42,5	4,659	37,5	5,280				
B04	198,0	35,7	5,546	40,6	4,877	40,8	4,853	35,6	5,562				
B05	198,0	34,7	5,706	40,7	4,865	40,7	4,865	35,3	5,609				
B06	198,0	35,9	5,515	40,9	4,841	40,7	4,865	34,1	5,806				
B07	198,0	36,3	5,455	41,3	4,794	41,5	4,771	37,0	5,351				
B08	198,0	35,7	5,546	42,5	4,659	42,8	4,626	36,3	5,455				
B09	198,0	35,2	5,625	41,1	4,818	41,2	4,806	35,1	5,641				
B10	198,0	35,4	5,593	41,7	4,748	41,7	4,748	35,8	5,531				
B11	198,0	35,3	5,609	41,6	4,760	41,7	4,748	34,7	5,706				
B12	198,0	36,9	5,366	42,2	4,692	42,1	4,703	36,0	5,500				
B13	198,0	36,6	5,410	42,0	4,714	42,0	4,714	35,9	5,515				
B14	198,0	36,0	5,500	42,8	4,626	42,7	4,637	36,5	5,425				
B15	198,0	36,7	5,395	42,7	4,637	42,3	4,681	36,8	5,380				
		Mittelwerte:			5,50		4,78		4,77		5,64		

Abb. 92: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der bruchfrischen Probekörper.

	Probekörper:	US nach 24 h bei 70 °C im TS		Mittelwert:	
		Höhe	Laufzeit	Geschwindigkeit	
		[mm]	[μ s]	[km/s]	
unbehandelt	A01	96,90	20,10	4,82	4,58
	A02	97,50	19,90	4,90	
	A03	96,90	20,20	4,80	
	A04	96,80	19,90	4,86	
	A05	97,10	20,20	4,81	
	A06	97,10	20,70	4,69	
	A07	96,80	19,80	4,89	
	A08	97,20	20,60	4,72	
	A09	96,60	19,70	4,90	
	A10	96,70	20,20	4,79	
	A11	96,90	20,60	4,70	
	A12	96,30	20,30	4,74	
	B01	198,00	41,00	4,83	
	B02	198,00	41,10	4,82	
	B03	198,00	42,20	4,69	
	B04	198,00	40,60	4,88	
	B05	198,00	40,70	4,86	
	B06	198,00	40,90	4,84	
	B07	198,00	41,30	4,79	
	B08	198,00	42,50	4,66	
	B09	198,00	41,10	4,82	
	B10	198,00	41,70	4,75	
	B11	198,00	41,60	4,76	
	B12	198,00	42,20	4,69	
	B13	198,00	42,00	4,71	
	B14	198,00	42,80	4,63	
	B15	198,00	42,70	4,64	
	B13/20	198,00	44,60	4,44	
	B13/10/1	99,30	21,80	4,56	
	B13/10/2	95,70	22,60	4,23	
	B13/5/1	50,20	11,30	4,44	
	B13/5/2	46,00	10,20	4,51	
	B13/5/3	50,20	11,90	4,22	
	B13/5/4	42,20	10,20	4,14	
	B14/20	198,00	45,60	4,34	
B14/10/1	96,20	21,50	4,47		
B14/10/2	98,80	23,60	4,19		
B15/20	198,00	45,40	4,36		
B15/10/1	95,80	22,50	4,26		
B15/10/2	99,20	23,00	4,31		
B15/2,5/1	25,60	6,00	4,27		
B15/2,5/2	25,90	6,30	4,11		
B15/2,5/3	25,80	6,30	4,10		
B15/2,5/4	25,40	5,80	4,38		
B15/2,5/5	25,80	6,00	4,30		
B15/2,5/6	26,00	6,30	4,13		
verwittert	G01	21,60	17,30	1,25	0,97
	G02	25,70	26,00	0,99	
	G03	32,50	21,70	1,50	
	G04	36,40	42,50	0,86	
	G05	44,00	59,70	0,74	
	G06	46,20	57,50	0,80	
	G07	78,50	83,00	0,95	
	G08	90,50	128,10	0,71	

Abb. 93: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der bruchfrischen und maximal verwitterten Prüfkörper.

	Probekörper:	Höhe [mm]	US nach 24 h bei 70 °C im TS		Mittelwert:
			Laufzeit [μs]	Geschwindigkeit [km/s]	Geschwk.: [km/s]
25 Frost-Tau Wechsel	A01	96,9	22,8	4,250	3,949
	A02	97,5	23,4	4,167	
	A03	96,9	23,3	4,159	
	B01	198,0	47,4	4,177	
	B02	198,0	46,4	4,267	
	B03	198,0	47,7	4,151	
	A 01/5/1	49,7	12,2	4,074	
	A 01/5/2	44,8	11,3	3,965	
	A 02/5/1	46,7	12,1	3,860	
	A 02/5/2	46,6	12,2	3,820	
	B 01/2,5/2	25,9	7,0	3,700	
	B 01/2,5/3	26,8	7,2	3,722	
	B 01/2,5/4	26,9	7,3	3,685	
	B 01/2,5/5	26,7	7,2	3,708	
	B 01/2,5/6	26,8	7,6	3,526	
50 Frost-Tau Wechsel	A04	96,8	22,7	4,264	3,996
	A05	97,1	23,0	4,222	
	A06	97,1	24,0	4,046	
	B04	198,0	46,8	4,231	
	B05	198,0	46,5	4,258	
	B06	198,0	46,1	4,295	
	A 04/5/1	45,9	11,7	3,923	
	A 04/5/2	47,8	11,8	4,051	
	A 05/5/1	49,6	12,7	3,906	
	A 05/5/2	44,0	11,3	3,894	
	B 04/2,5/1	26,8	7,1	3,775	
	B 04/2,5/2	26,8	7,2	3,722	
	B 04/2,5/3	26,4	7,0	3,771	
	B 04/2,5/4	27,1	7,2	3,764	
	B 04/2,5/5	27,1	7,1	3,817	

Abb. 94: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten nach 25 bzw. 50 FTW.

	Probekörper:	Höhe [mm]	US nach 24 h bei 70 °C im TS		Mittelwert:
			Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Geschwk.: [km/s]
200 °C	A07	96,8	33,50	2,890	2,823
	A08	97,2	36,00	2,700	
	A09	96,6	32,90	2,936	
	B07	198,0	72,00	2,750	
	B08	198,0	73,10	2,709	
	B09	198,0	69,40	2,853	
	A08/10	97,0	40,2	2,413	
	A09/10	97,0	33,0	2,939	
	B08/20	198,0	84,5	2,343	
	B08/10/1	96,0	35,1	2,735	
	B08/10/2	99,5	39,4	2,525	
	B08/2,5/1	25,8	8,7	2,966	
	B08/2,5/2	25,7	9,0	2,856	
	B08/2,5/3	25,8	9,2	2,804	
	B08/2,5/4	25,9	8,5	3,047	
	B08/2,5/5	25,9	9,8	2,643	
	B08/2,5/6	25,7	9,5	2,705	
	B09/20	198,0	72,2	2,742	
	B09/10/1	99,2	32,1	3,090	
	B09/10/2	95,7	32,7	2,927	
B09/5/1	51,4	16,4	3,134		
B09/5/2	44,7	14,7	3,041		
B09/5/3	46,7	15,5	3,013		
B09/5/4	46,5	15,6	2,981		
200 °C +10 FTW	A07/10	97,1	42,3	2,296	2,502
	A 07/5/1	48,6	19,7	2,467	
	A 07/5/2	45,1	17,4	2,592	
	B07/20	198,0	88,3	2,242	
	B07/10/1	95,7	41,6	2,300	
	B07/10/2	99,4	39,0	2,549	
	B07/2,5/1	25,7	9,8	2,622	
	B07/2,5/2	25,6	10,3	2,485	
	B07/2,5/3	26,0	10,6	2,453	
	B07/2,5/4	25,9	10,0	2,590	
	B07/2,5/5	25,8	9,5	2,716	
	B07/2,5/6	26,0	9,6	2,708	

Abb. 95: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten nach 200 °C bzw. 200 °C und 10 FTW.

Probe:	A 07		A 08		A 09		B 07		B 08		B 09		Mittelwert		
	Höhe [mm]:	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	Geschw. [km/s]	Geschw. [km/s]	Abnahme [%]
Messung:	96,8	97,2	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	
12 h bei 200 °C:	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	US Mess.	Geschw. [km/s]	Geschw. [km/s]	
0	19,10	19,30	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	5,00	5,08	5,02
12	30,50	32,20	29,70	29,70	29,70	29,70	29,70	29,70	29,70	29,70	29,70	29,70	3,06	3,10	3,11
12	30,80	32,70	29,90	29,90	29,90	29,90	29,90	29,90	29,90	29,90	29,90	29,90	3,02	3,07	3,07
12	31,60	33,70	30,80	30,80	30,80	30,80	30,80	30,80	30,80	30,80	30,80	30,80	2,93	3,02	2,99
12	32,60	35,40	31,90	31,90	31,90	31,90	31,90	31,90	31,90	31,90	31,90	31,90	2,87	2,89	2,89
12	34,10	36,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	2,76	2,83	2,79
12	34,40	36,70	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	2,75	2,80	2,77
12	34,70	36,30	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	33,20	2,74	2,76	2,76
12	34,30	36,40	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	2,74	2,80	2,78
12	33,90	36,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	2,75	2,85	2,80
													2,75	2,85	2,80
													2,75	2,85	2,80
													2,75	2,85	2,80
													2,75	2,85	2,80
													2,75	2,85	2,80
													2,75	2,85	2,80
72	33,50	36,00	32,90	32,90	32,90	32,90	32,90	32,90	32,90	32,90	32,90	32,90	2,75	2,85	2,81
													2,71	2,85	-0,19

Abb. 96: Ermittlung des Verlaufes der Ultraschallgeschwindigkeit nach Temperaturbeanspruchung von 200 °C.

Probekörper Nummer:	Höhe [mm]	Ultraschall - Messung		Ultraschall - Messung	
		20 °C Raumfeucht	20 °C Raumfeucht	nach 24 Std. bei 70 °C im TS	nach 24 Std. bei 70 °C im TS
		Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]	Laufzeit [µs]	Geschwindigkeit [km/s]
G01	21,6	17,7	1,220	17,3	1,249
G02	25,7	25,0	1,028	26,0	0,988
G03	32,5	21,2	1,533	21,7	1,498
G04	36,4	44,3	0,822	42,5	0,856
G05	44,0	60,6	0,726	59,7	0,737
G06	46,2	58,3	0,792	57,5	0,803
G07	78,5	89,1	0,881	83,0	0,946
G08	90,5	128,5	0,704	128,1	0,706
G10	111,7	234,5	0,476		
G11	106,2	212,6	0,500		
G12	119,2	269,2	0,443		
G13	108,8	278,5	0,391		
G14	124,3	288,4	0,431		
G15	142,5	444,3	0,321		
G16	140,4	394,3	0,356		
G17	92,4	255,7	0,361		
G18	72,0	106,6	0,675		
Mittelwert:			0,686		0,973

Abb. 97: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten der maximal verwitterten Prüfkörper bei 20 °C raumfeucht und nach Trocknung im Trockenschrank bei 70 °C für 24 Stunden.

Wasseraufnahme		Probe: B01		Probe: B02		Probe: B03	
Zeit: [Stunden]	Zeit: [Minuten]	Masse: B01 [g]	Wassergehalt [% der Masse]	Masse: B02 [g]	Wassergehalt [% der Masse]	Masse: B03 [g]	Wassergehalt [% der Masse]
	0	975,9	0	974,5	0	970,5	0
	1	976,2	0,031	974,7	0,021	970,7	0,021
	5	976,3	0,041	974,9	0,041	971,0	0,052
	10	976,4	0,051	974,9	0,041	971,1	0,062
	15	976,5	0,061	975	0,051	971,2	0,072
	20	976,6	0,072	975,1	0,062	971,2	0,072
	25	976,6	0,072	975,1	0,062	971,3	0,082
	30	976,7	0,082	975,1	0,062	971,4	0,093
	45	976,8	0,092	975,2	0,072	971,5	0,103
1	60	976,8	0,092	975,3	0,082	971,5	0,103
2	120	976,8	0,092	975,3	0,082	971,6	0,113
3	180	976,8	0,092	975,3	0,082	971,6	0,113
4	240	976,8	0,092	975,3	0,082	971,6	0,113
5	300	976,8	0,092	975,3	0,082	971,6	0,113
6	360	976,8	0,092	975,3	0,082	971,6	0,113
21	1260	976,9	0,102	975,4	0,092	971,6	0,113
29	1740	976,9	0,102	975,4	0,092	971,6	0,113
48	2880	976,9	0,102	975,4	0,092	971,6	0,113
120	7200	976,9	0,102	975,4	0,092	971,6	0,113

Abb. 98: Wasseraufnahmeverhalten der bruchfrischen Prüfkörper.

Wasserabgabe		Masse: B01	Probe: B01	Masse: B02	Probe: B02	Masse: B03	Probe: B03
Zeit:	Zeit:	B01	Wassergehalt	B02	Wassergehalt	B03	Wassergehalt
[Stunden]	[Minuten]	[g]	[% der Masse]	[g]	[% der Masse]	[g]	[% der Masse]
	0	976,9	0	975,4	0	971,8	0
	1	976,9	0,102	975,4	0,092	971,7	0,124
	5	976,7	0,082	975,2	0,072	971,5	0,103
	10	976,5	0,061	975	0,051	971,3	0,082
	15	976,4	0,051	974,9	0,041	971,2	0,072
	20	976,4	0,051	974,9	0,041	971,1	0,062
	25	976,3	0,041	974,9	0,041	971,0	0,052
	30	976,3	0,041	974,9	0,041	971,0	0,052
	45	976,3	0,041	974,8	0,031	970,9	0,041
1	60	976,3	0,041	974,8	0,031	970,9	0,041
2	120	976,2	0,031	974,8	0,031	970,9	0,041
3	180	976,2	0,031	974,7	0,021	970,9	0,041
4	240	976,1	0,020	974,7	0,021	970,8	0,031
5	300	976,1	0,020	974,7	0,021	970,7	0,021
6	360	976,1	0,020	974,7	0,021	970,7	0,021
25	1500	976,0	0,010	974,6	0,010	970,6	0,010
73	4380	975,9	0,000	974,5	0,000	970,5	0,000

Abb. 99: Wasserabgabeverhalten der bruchfrischen Prüfkörper.

Wasseraufnahmeverhalten nach 10 Temperaturbeanspruchungen bei 200°C

Wasseraufnahme		Masse:	Probe: A08	Masse:	Probe: B08
Zeit:	Zeit:	A08	Wassergehalt	B08	Wassergehalt
[Stunden]	[Minuten]	[g]	[% der Masse]	[g]	[% der Masse]
	0	475,3	0	971,7	0
	1	476,1	0,168	973,0	0,134
	5	476,1	0,168	973,5	0,185
	10	476,2	0,189	973,6	0,196
	15	476,2	0,189	973,6	0,196
	20	476,3	0,210	973,6	0,196
	25	476,3	0,210	973,6	0,196
	30	476,3	0,210	973,7	0,206
	45	476,3	0,210	973,8	0,216
1	60	476,3	0,210	973,8	0,216
2	120	476,3	0,210	973,8	0,216
3	180	476,3	0,210	973,8	0,216
4	240	476,3	0,210	973,8	0,216
5	300	476,3	0,210	973,8	0,216
13	780	476,3	0,210	973,8	0,216
17	1020	476,3	0,210	973,8	0,216

Wasserabgabeverhalten nach 10 Temperaturbeanspruchungen bei 200°C

Wasserabgabe		Masse:	Probe: A08	Masse:	Probe: B08
Zeit:	Zeit:	A08	Wassergehalt	B08	Wassergehalt
[Stunden]	[Minuten]	[g]	[% der Masse]	[g]	[% der Masse]
	0	476,4	0,231	973,9	0,226
	1	476,0	0,147	973,4	0,175
	5	475,9	0,126	973,0	0,134
	10	475,8	0,105	972,6	0,093
	15	475,7	0,084	972,5	0,082
	20	475,6	0,063	972,4	0,072
	25	475,5	0,042	972,3	0,062
	30	475,4	0,021	972,3	0,062
	45	475,4	0,021	972,2	0,051
1	60	475,4	0,021	972,2	0,051
2	120	475,3	0,000	972,0	0,031
3	180	475,3	0,000	971,8	0,010
4	240	475,3	0,000	971,7	0,000

Abb. 100: Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten nach zehnmaliger Temperaturbeanspruchung von 200 °C.

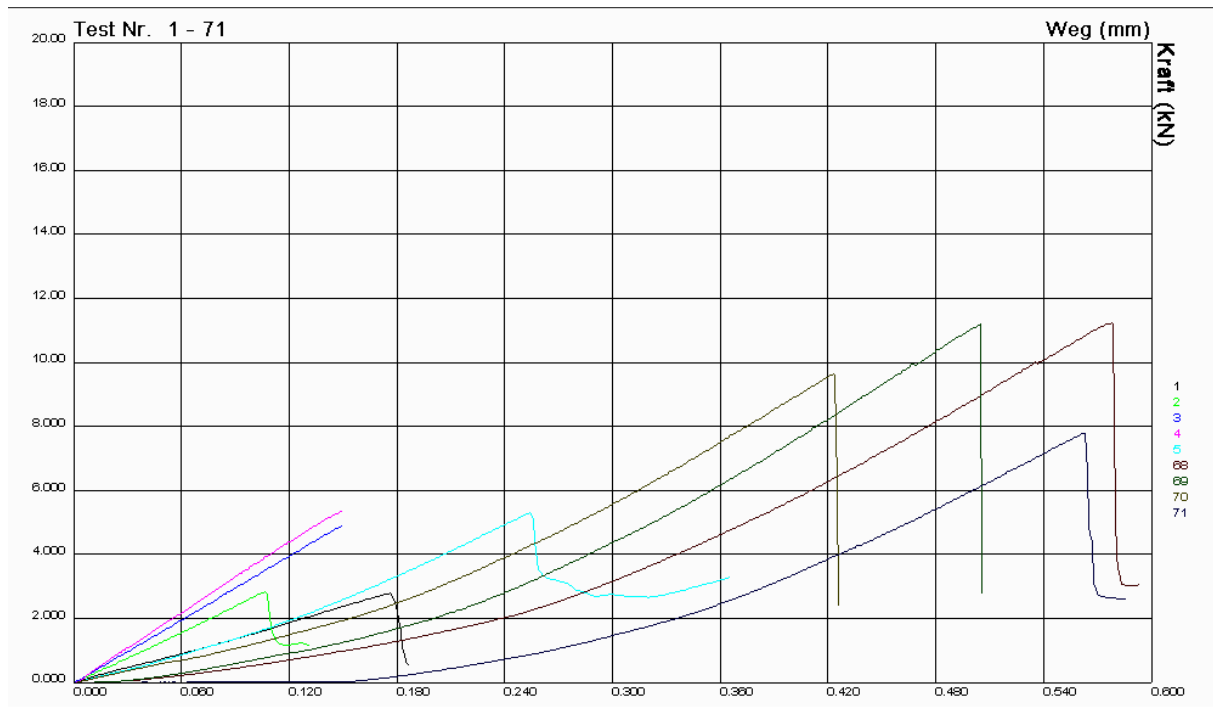


Abb. 101: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 25 FTW.

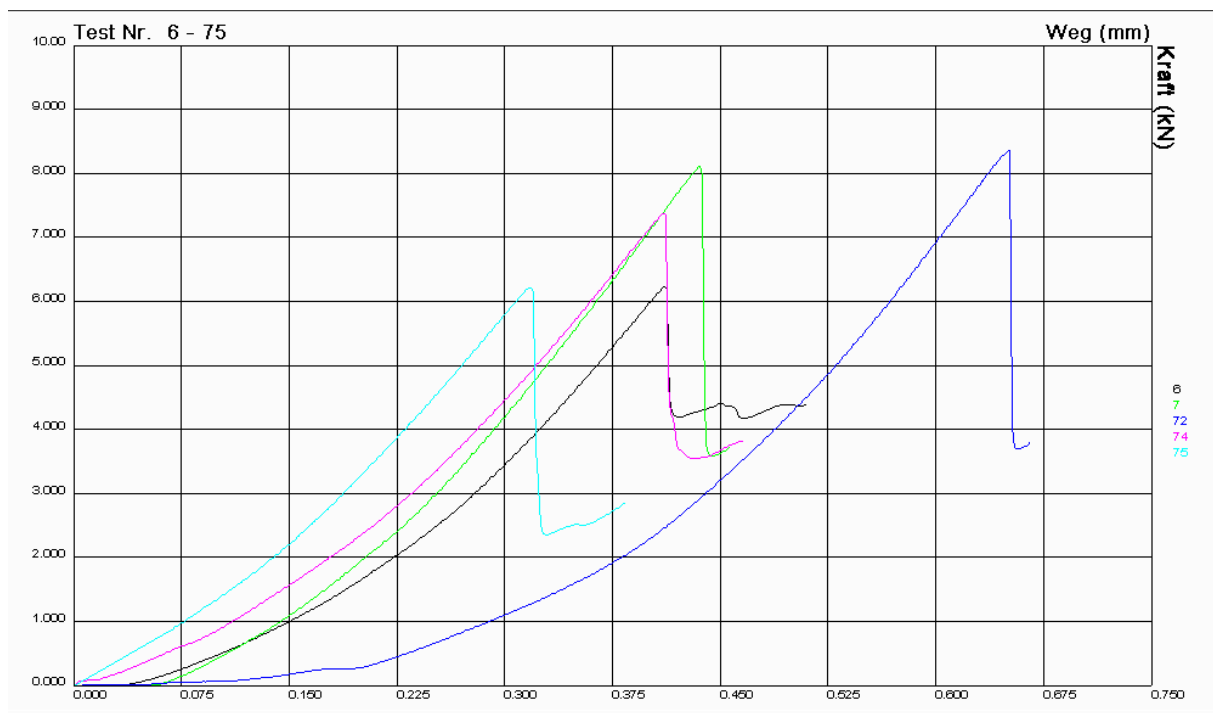


Abb. 102: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 50 FTW.

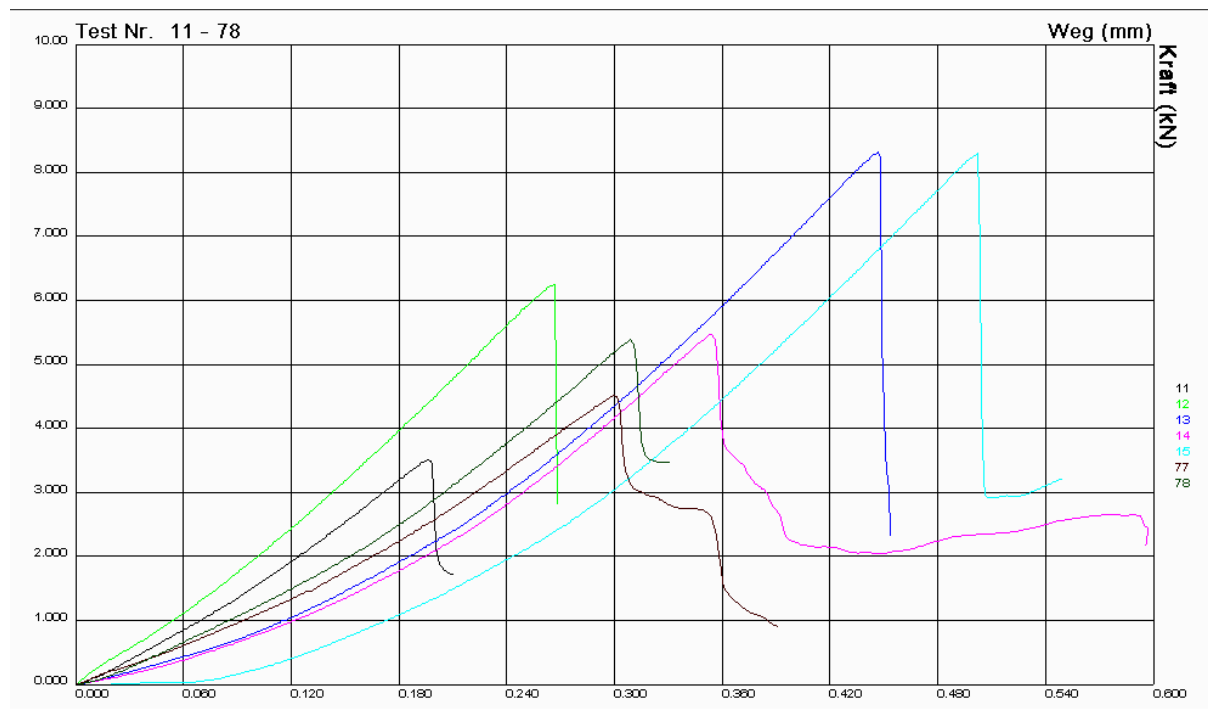


Abb. 103: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 200 °C+10 FTW.

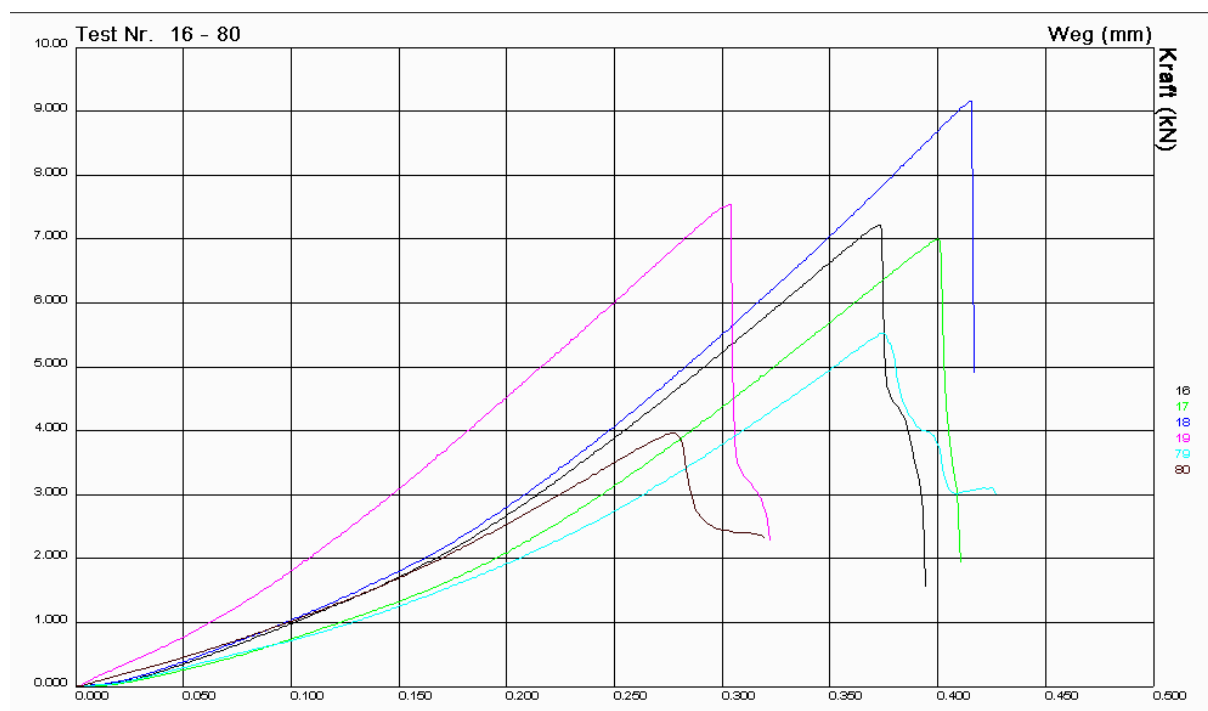


Abb. 104: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung nach 200 °C.

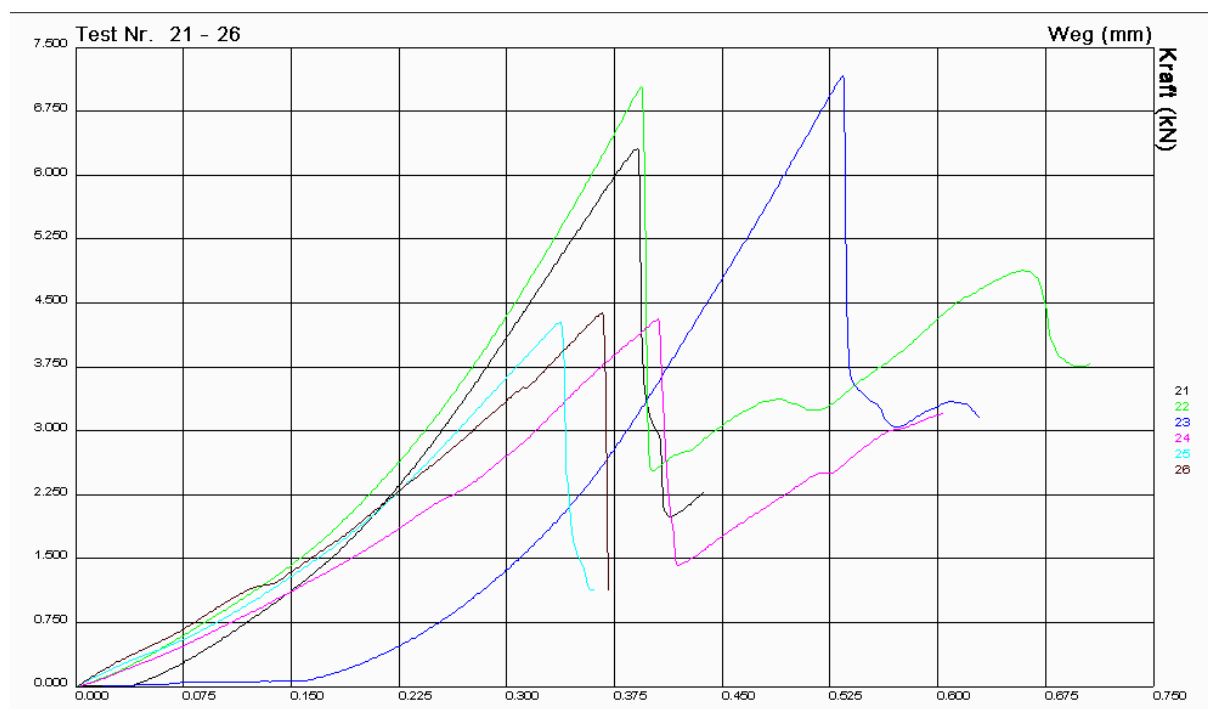


Abb. 105: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung der bruchfrischen Prüfkörper.

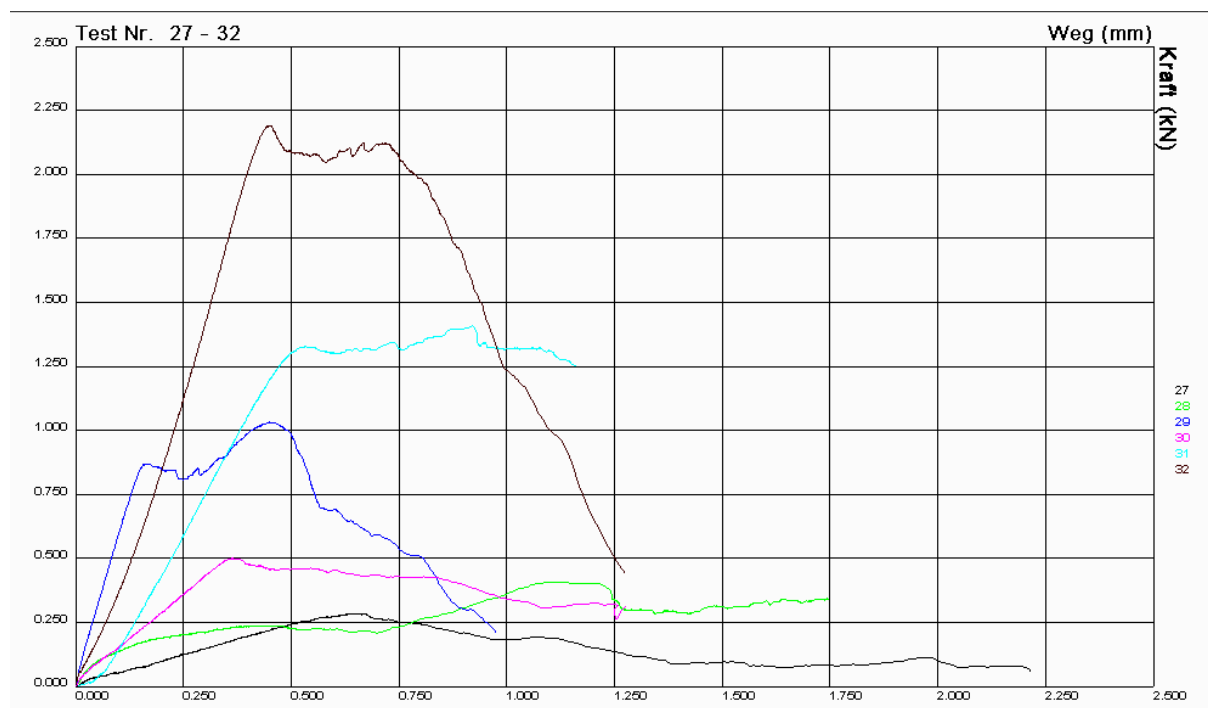


Abb. 106: Kraft-Weg-Diagramm der Spaltzugfestigkeitsbestimmung der verwitterten Prüfkörper.

Versuch	Probekörper Nummer	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Bruchlast FSZ max [kN]	Einaxiale Zugfestigkeit [N/mm ²]	nach 24h bei 70°C im TS	
						US-Laufzeit [μs]	US-Geschwgk. [km/s]
bruchfrisch	Probekörper	Höhe	Durchmesser	Bruchlast FSZ max	Einaxiale Zugfestigkeit	US-Laufzeit	US-Geschwgk.
	Nummer	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[μs]	[km/s]
	B 10/2,5/1	21,8	48,0	7,435	4,52	5,2	4,19
	B 10/2,5/2	21,7	48,0	8,005	4,89	5,3	4,09
	B 10/2,5/3	20,7	48,0	6,067	3,89	5,2	3,98
	B 10/2,5/4	21,3	48,0	4,436	2,76	5,0	4,26
	B 10/2,5/7	22,6	48,0	6,008	3,53	5,3	4,26
	B 10/2,5/8	23,0	48,0	4,688	2,70	5,4	4,26
	B11/2,5/1	22,5	48,0	8,670	5,11	5,4	4,17
	B11/2,5/2	21,9	48,0	7,284	4,41	5,5	3,98
	B11/2,5/3	23,2	48,0	4,953	2,83	5,4	4,30
	B11/2,5/4	22,4	48,0	9,462	5,60	5,2	4,31
	B11/2,5/5	21,1	48,0	7,526	4,73	5,3	3,98
	B11/2,5/6	19,3	48,0	5,665	3,89	4,8	4,02
	B11/2,5/7	22,1	48,0	5,902	3,54	5,2	4,25
	B11/2,5/8	22,6	48,0	5,790	3,40	5,0	4,52
	B 15/2,5/1	25,7	48,0	6,312	3,26	6,0	4,28
	B 15/2,5/2	25,8	48,0	7,038	3,62	6,3	4,10
	B 15/2,5/3	25,6	48,0	7,169	3,71	6,3	4,06
	B 15/2,5/4	25,5	48,0	4,314	2,24	5,8	4,40
B 15/2,5/5	25,8	48,0	4,276	2,20	6,0	4,30	
B 15/2,5/6	26,0	48,0	4,385	2,24	6,3	4,13	
Mittelwerte:					3,65		4,19
verwittert	G 01	23,5	42,8	0,286	0,18	17,3	1,36
	G 02	25,1	40,0	0,411	0,26	26,0	0,97
	G 03	31,8	47,2	1,034	0,44	21,7	1,47
	G 04	34,5	47,4	0,502	0,20	42,5	0,81
	G 05	34,3	48,0	1,410	0,55	59,7	0,57
	G 06	42,5	47,9	2,189	0,68	57,5	0,74
	Mittelwert:					0,38	

Abb. 107: Ermittlung der einaxialen Zugfestigkeiten der bruchfrischen und maximal verwitterten Prüfkörper.

Versuch	Probekörper Nummer	Höhe [mm]	Durchmesser [mm]	Bruchlast FSZ max [kN]	Einaxiale Zugfestigkeit [N/mm ²]	nach 24h bei 70°C im TS	
						US-Laufzeit [µs]	US-Geschwkg. [km/s]
25 FTW	A 01/2,5/1	27,5	48,0	11,250	5,43	7,1	3,87
	A 01/2,5/2	26,0	48,0	11,200	5,71	7,0	3,71
	A 02/2,5/1	26,1	48,0	9,641	4,90	7,5	3,48
	A 02/2,5/2	26,1	48,0	7,807	3,97	7,3	3,58
	B 01/2,5/4	26,9	48,0	4,909	2,42	7,3	3,68
	B 01/2,5/5	26,7	48,0	5,365	2,67	7,2	3,71
	B 01/2,5/6	26,8	48,0	5,312	2,63	7,6	3,53
	Mittelwert:					3,96	
50 FTW	A 04/2,5/1	27,0	48,0	8,365	4,11	6,8	3,97
	A 04/2,5/2	26,8	48,0	7,380	3,65	7,3	3,67
	A 05/2,5/1	26,2	48,0	6,214	3,15	7,0	3,74
	B 04/2,5/1	26,8	48,0	6,236	3,09	7,1	3,77
	B 04/2,5/2	26,7	48,0	8,123	4,04	7,2	3,71
	B 04/2,5/5	27,0	48,0	6,572	3,23	7,1	3,80
	Mittelwert:					3,54	
200°C+10 FTW	A 07/2,5/1	24,7	48,0	4,526	2,43	10,0	2,47
	A 07/2,5/2	26,2	48,0	5,396	2,73	9,3	2,82
	B 07/2,5/4	25,8	48,0	5,475	2,81	10,0	2,58
	B 07/2,5/2	25,5	48,0	6,258	3,25	10,3	2,48
	B 07/2,5/3	25,9	48,0	8,325	4,26	10,6	2,44
	B 07/2,5/6	25,9	48,0	8,299	4,25	9,6	2,70
	Mittelwert:					3,29	
200 °C	B 08/2,5/1	25,5	48,0	7,241	3,77	8,7	2,93
	B 08/2,5/2	25,5	48,0	7,218	3,75	9,0	2,83
	B 08/2,5/3	25,6	48,0	7,009	3,63	9,2	2,78
	B 08/2,5/4	25,7	48,0	9,163	4,73	8,5	3,02
	B 08/2,5/5	25,9	48,0	7,553	3,87	9,8	2,64
	B 09/2,5/1	26,2	48,0	5,529	2,80	9,4	2,79
	Mittelwert:					3,76	

Abb. 108: Ermittlung der einaxialen Zugfestigkeiten der Prüfkörper mit Beanspruchung von: 25 FTW, 50 FTW, 200 °C und 200 °C + 10 FTW.

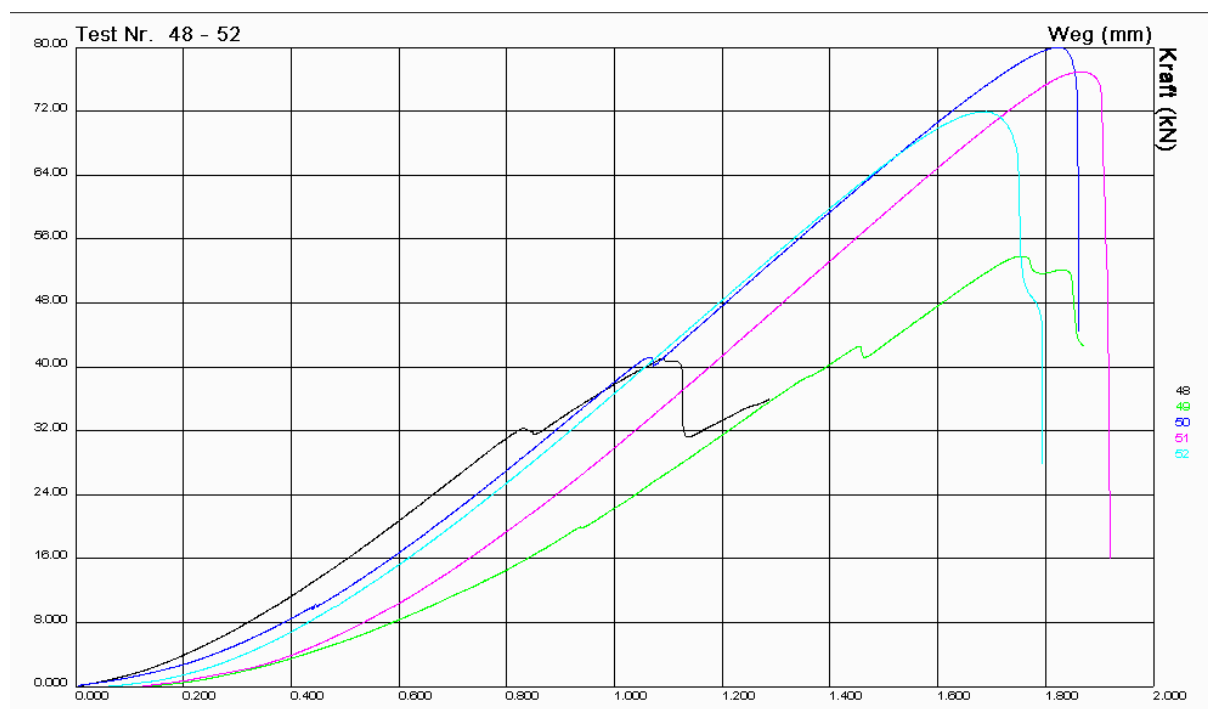


Abb. 109: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit nach 25 FTW.

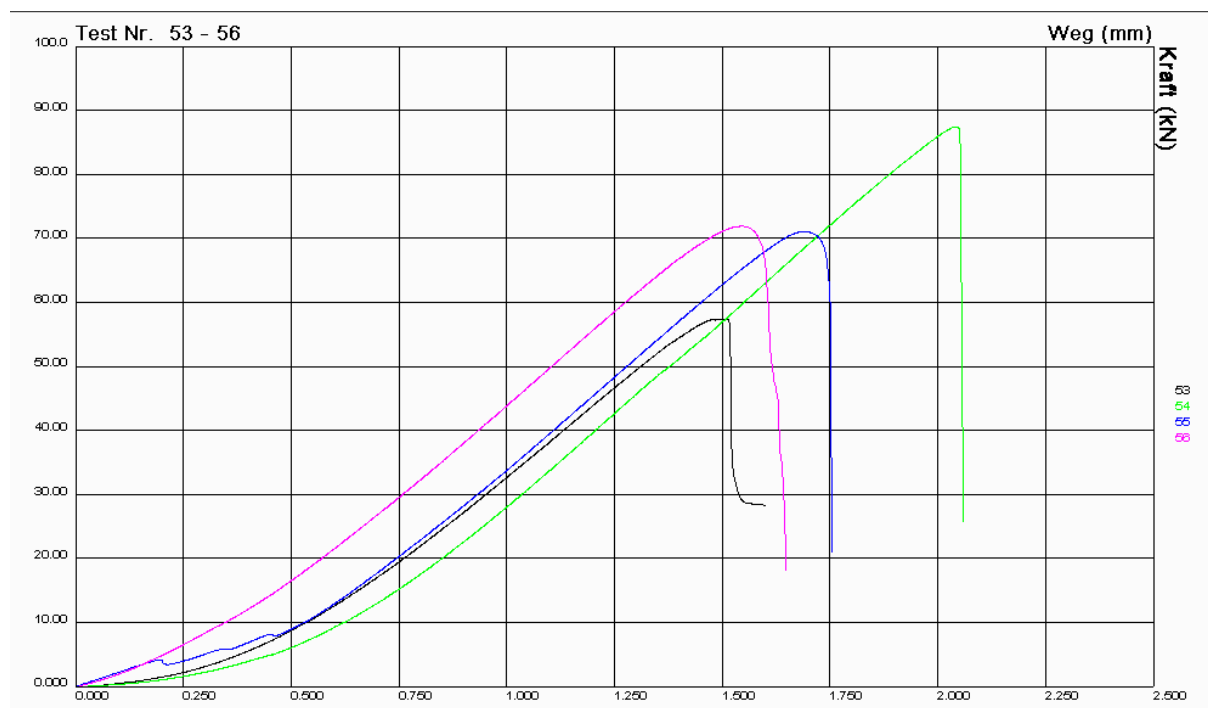


Abb. 110: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit nach 50 FTW.

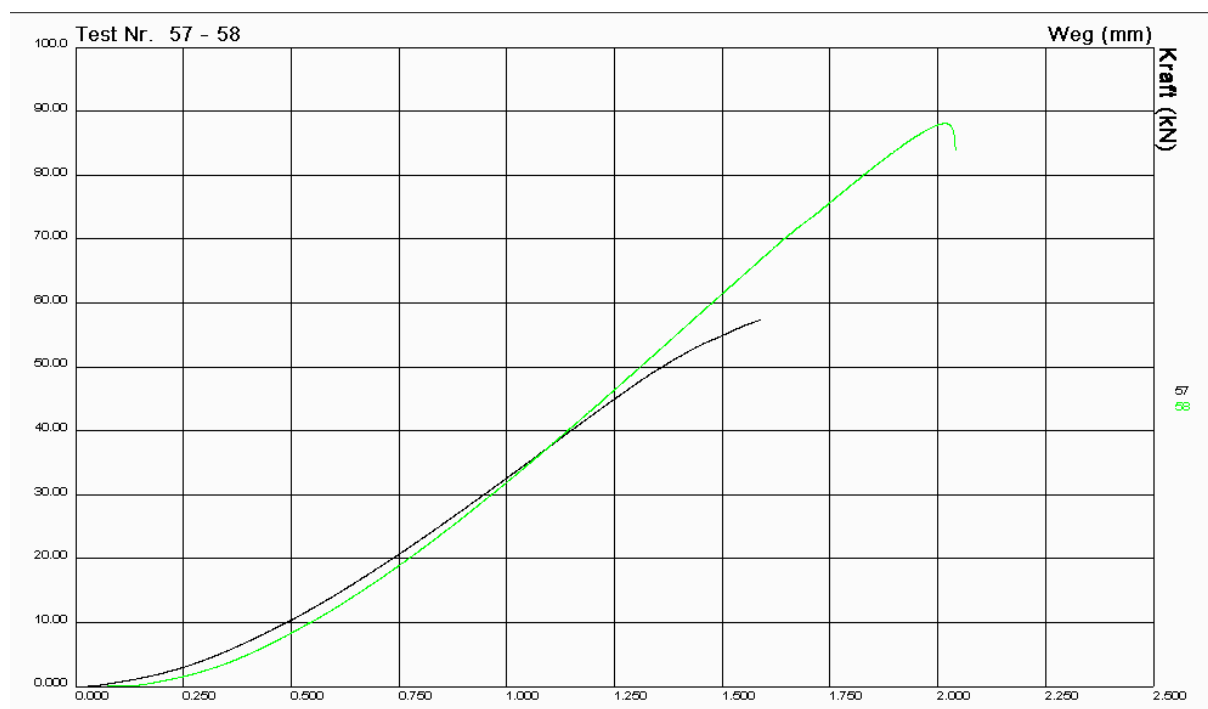


Abb. 111: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit nach 200 °C.

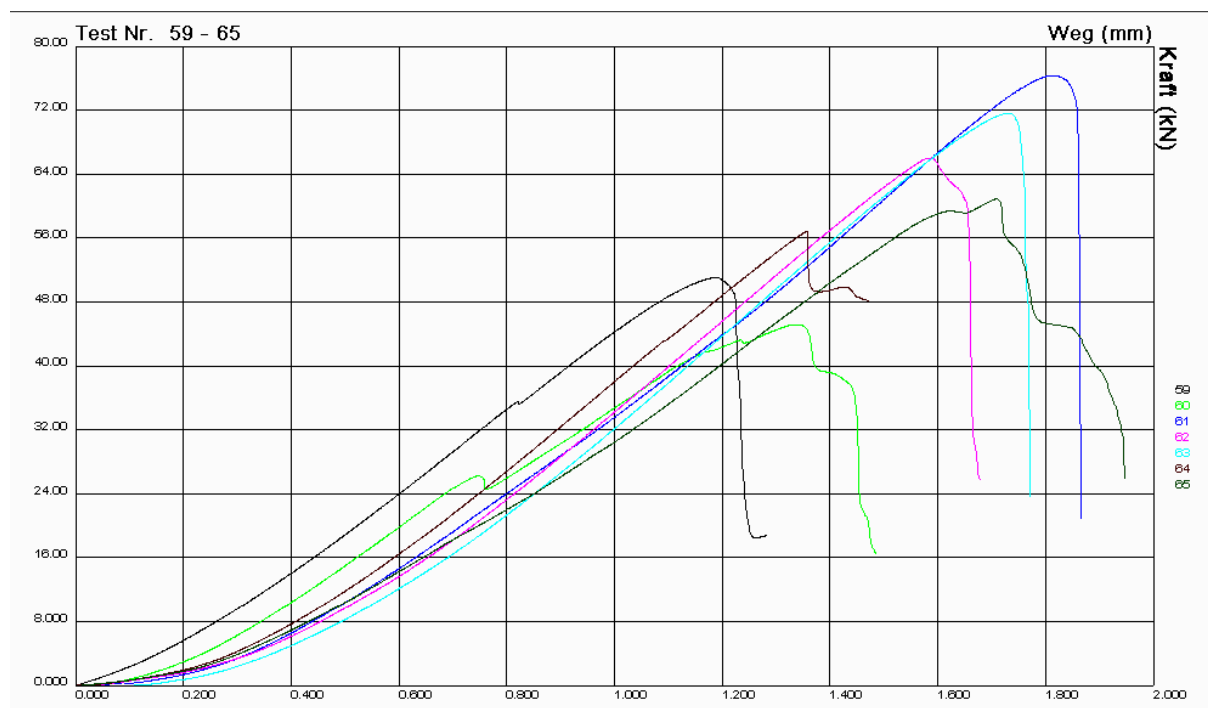


Abb. 112: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit der bruchfrischen Prüfkörper.

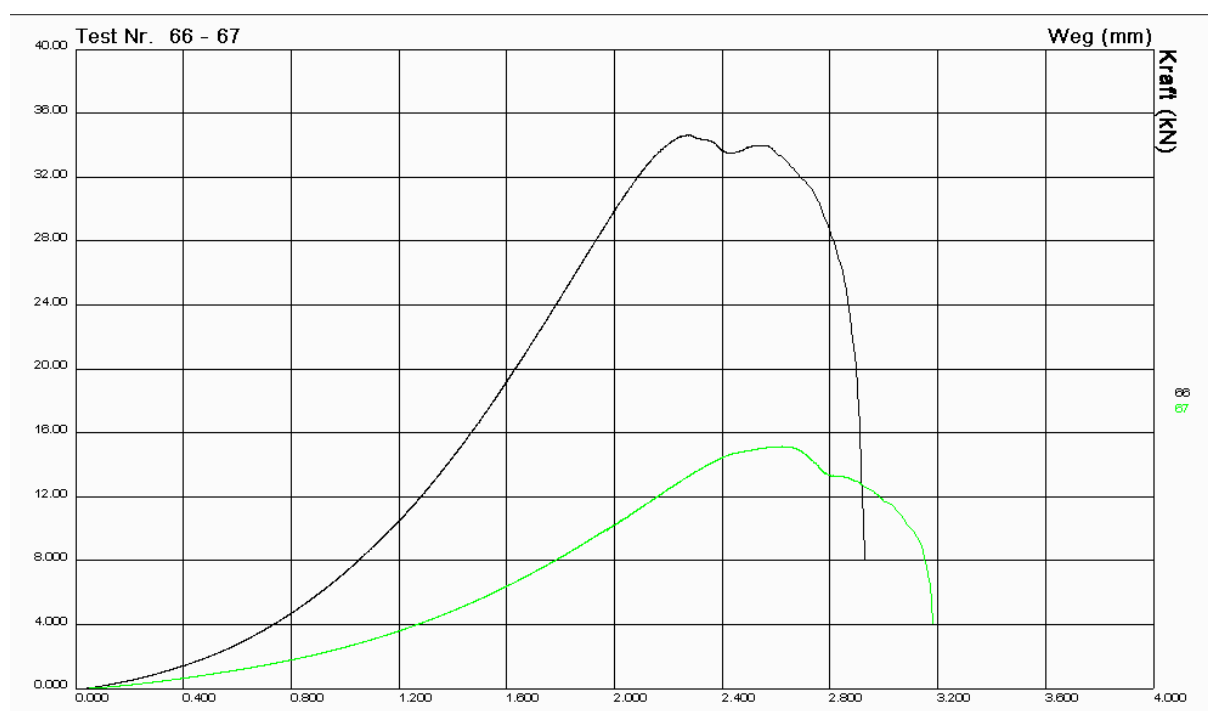


Abb. 113: Kraft-Weg-Diagramm der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit der verwitterten Prüfkörper.

						nach 24h bei 70°C im TS (Längsrichtung)	
Versuch	Probekörper	Höhe	Durchmesser	Bruchlast F	Einax. Zdfk.	US-Laufzeit	US-Geschwindigk.
	Nummer	[mm]	[mm]	[kN]	[N/mm ²]	[µs]	[km/s]
25 FTW	A03	96,9	48,0	41,12	22,72	24,4	3,971
	B02/10/1	96,8	48,0	53,90	29,79	25,1	3,857
	B02/10/2	97,9	48,0	80,09	44,26	24,0	4,079
	B03/10/1	98,3	48,0	77,01	42,56	24,5	4,012
	B03/10/2	96,5	48,0	72,02	39,80	25,3	3,814
	Mittelwert:			64,83	35,83	24,7	3,947
50 FTW	A06	96,5	48,0	57,41	31,73	25,1	3,845
	B05/10/1	99,7	48,0	87,54	48,38	24,3	4,103
	B05/10/2	95,0	48,0	71,09	39,29	24,3	3,909
	B06/10/2	95,4	48,0	71,99	39,78	24,6	3,878
	Mittelwert:			72,01	39,79	24,6	3,934
200°C	A08	96,8	48,0	57,44	31,74	36,4	2,659
	A09	96,8	48,0	88,18	48,73	33,0	2,933
	Mittelwert:			72,81	40,24	34,7	2,796
bruchfrisch	A10	98,0	48,0	51,15	28,27	21,1	4,645
	A11	96,9	48,0	45,21	24,98	22,1	4,385
	A12	96,6	48,0	76,38	42,21	22,3	4,332
	B14/10/1	96,8	48,0	66,09	36,52	21,3	4,545
	B14/10/2	96,3	48,0	71,68	39,61	23,7	4,063
	B12/10/1	96,0	48,0	56,86	31,42	22,3	4,305
	B12/10/2	98,9	48,0	60,96	33,69	22,9	4,319
	Mittelwert:			61,19	33,81	22,2	4,370
verw.	G07	66,6	48,0	34,66	19,15	74,2	0,898
	G08	77,8	48,0	15,18	8,39	106,5	0,731
	Mittelwert:			24,92	13,77	90,4	0,814

Abb. 114: Ermittlung der einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten der bruchfrischen und maximal verwitterten Prüfkörper und mit Beanspruchung von: 25 FTW, 50 FTW und 200 °C.