

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

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



Technische Universität Wien

DIPLOMARBEIT

Master`s Thesis

Einfluss der Prüfkörperdimension auf einaxiale Druckfestigkeit und E-Modul

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

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Andreas Rohatsch

Institut für Geotechnik

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

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Christian Sonnleitner

E466 / 0525124

St. Georgen am Steinfeld, Hauptstr. 147

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	6
1 Einleitung.....	8
1.1 Geschichte des Size Effect.....	8
1.2 Theorie des Size Effects.....	10
1.2.1. WEIBULL Theorie	11
1.2.2. Size Effect Gesetz von BAŽANT (SEG)	13
1.2.3. Multifraktales Maßstabsgesetz von CARPINTERI (MFMG)	14
1.3 Einaxiale Druckfestigkeit und statisches E-Modul	15
1.3.1. Einfluss der Probengeometrie auf die Druckfestigkeit (Shape Effect)	19
1.4 Versuchsbeschreibung	21
2 Verwendete Gesteinstypen.....	24
2.1 Sedimentgesteine.....	24
2.1.1. Leithakalk aus Kaisersteinbruch.....	25
2.1.2. Rohrbacher Konglomerat.....	27
2.2 Metamorphe Gesteine	28
2.2.1. Sterzinger Marmor.....	30
2.2.2. Laaser Marmor.....	31
2.3 Herstellung und Bezeichnung der Prüfkörper.....	33
2.3.1. Oberflächenausführung.....	35
2.3.2. Bezeichnung.....	35
3 Angewandte Prüfmethode.....	37
3.1 Dichtebestimmung und massebezogene Wasseraufnahme	37
3.1.1. Allgemeines.....	37
3.1.2. Verwendete Geräte	38
3.1.3. Rohdichte	39
3.1.4. Offene Porosität und Gesamtporosität	39
3.1.5. Massebezogene Wasseraufnahme.....	40
3.1.6. Reindichte	40
3.2 Porosimetermessungen	42
3.3 Ermittlung der Ultraschalllaufzeit und Ultraschallgeschwindigkeit.....	42

3.3.1.	Messdurchführung und Berechnung der Ultraschallgeschwindigkeit	43
3.3.2.	Mathematische Beschreibung der Ultraschalllaufzeit.....	44
3.3.3.	Einflüsse auf die Ultraschalllaufzeit	45
3.4	Ermittlung des statischen und dynamischen Elastizitätsmoduls sowie der einaxialen Druckfestigkeit	46
3.4.1.	Dynamisches Elastizitätsmodul.....	46
3.4.2.	Einaxiale Druckfestigkeit und statisches Elastizitätsmodul	46
4	Anmerkungen zur Messdurchführung	49
4.1	Dichtebestimmung und massebezogene Wasseraufnahme	49
4.2	Heliumpyknometermessungen	50
5	Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe	52
5.1	Sterzinger Marmor	52
5.1.1.	Allgemeine Gesteinskennwerte.....	52
5.1.2.	Ergebnisse der Ultraschallmessung.....	53
5.1.3.	Auswertung der Porosimetermessung	54
5.1.4.	Ergebnisse der Versuchsreihe 1.....	55
5.2	Laaser Marmor	57
5.2.1.	Allgemeine Gesteinskennwerte.....	57
5.2.2.	Ergebnisse der Ultraschallmessung	58
5.2.3.	Auswertung der Porosimetermessung	59
5.2.4.	Ergebnisse der Versuchsreihe 1.....	60
5.3	Rohrbacher Konglomerat.....	62
5.3.1.	Allgemeine Gesteinskennwerte.....	62
5.3.2.	Ergebnisse der Ultraschallmessung	64
5.3.3.	Auswertung der Porosimetermessung	64
5.3.4.	Ergebnisse der Versuchsreihe 1.....	65
5.4	Leithakalk aus Kaisersteinbruch.....	67
5.4.1.	Allgemeine Gesteinskennwerte.....	67
5.4.2.	Ergebnisse der Ultraschallmessung	69
5.4.3.	Auswertung der Porosimetermessung	69
5.4.4.	Ergebnisse der Versuchsreihe 1.....	73
5.5	Regressionsgeraden	75

5.6	Zusammenhänge der Messgrößen	78
5.6.1.	Einfluss der Rohdichte auf die Ultraschallgeschwindigkeit (USG).....	78
5.6.2.	Einfluss der Wasseraufnahme auf die Ultraschallgeschwindigkeit (USG).	80
5.6.3.	Einfluss der Druckfestigkeit auf die Ultraschallgeschwindigkeit	82
5.6.4.	Zusammenhang der Druckfestigkeit und des E-Moduls.....	85
5.7	Resümee der 1. Versuchsreihe.....	87
6	Ergebnisse und Interpretation der 2. Versuchsreihe	89
6.1	Sterzinger Marmor	89
6.2	Laaser Marmor	91
6.3	Rohrbacher Konglomerat.....	92
6.4	Leithakalk aus Kaisersteinbruch	93
6.4.1.	1. Versuch	93
6.4.2.	Versuch 2	94
7	Gegenüberstellung der 1. und 2. Versuchsreihe	96
8	Zusammenfassung und Ausblick	98
9	Literaturverzeichnis	100
10	Abbildungsverzeichnis	103
11	Tabellenverzeichnis.....	106
12	Anhang.....	107
12.1	Heliumpyknometermessungen zur Ermittlung der Reindichte.....	107
12.2	Tabelle zur Berechnung der maximal möglichen Messabweichungen.....	108
12.3	Auswertung Druckversuche Versuchsreihe 1.....	109
12.3.1.	Sterzinger Marmor	109
12.3.2.	Laaser Marmor	114
12.3.3.	Rohrbacher Konglomerat.....	118
12.3.4.	Leithakalk aus Kaisersteinbruch	122
12.4	Tabellen Gesteinskennwerte Versuchsreihe 2.....	126
12.4.1.	Sterzinger Marmor	126
12.4.2.	Laaser Marmor	126
12.4.3.	Rohrbacher Konglomerat.....	127
12.4.4.	Leithakalk aus Kaisersteinbruch.....	127
12.5	Auswertung Druckversuche Versuchsreihe 1.....	128

12.5.1.	Sterzinger Marmor	128
12.5.2.	Laaser Marmor	130
12.5.3.	Rohrbacher Konglomerat	131
12.5.4.	Leithakalk aus Kaisersteinbruch	133
12.6	Auswertung Druckversuche Versuchsreihe 2.....	134
12.6.1.	Sterzinger Marmor	134
12.6.2.	Laaser Marmor	135
12.6.3.	Rohrbacher Konglomerat	136
12.6.4.	Leithakalk aus Kaisersteinbruch	137
12.7	Porosimetermessungen.....	138
12.7.1.	Sterzinger Marmor	139
12.7.2.	Laaser Marmor	145
12.7.3.	Leithakalk aus Kaisersteinbruch – Block I	151
12.7.4.	Leithakalk aus Kaisersteinbruch – Block II	157
12.7.5.	Leithakalk aus Kaisersteinbruch – Block III	161
12.7.6.	Leithakalk aus Kaisersteinbruch – Block IV (normal)	167
12.7.7.	Leithakalk aus Kaisersteinbruch – Block IV (mürbe)	171

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss des Größenmaßstabes von Natursteinen unter Druckbeanspruchung. Die Theorie besagt, dass die Festigkeit von Bauteilen mit steigender Bauteilgröße abnimmt. Um diesen Umstand zu untersuchen, wurden im Labor des Instituts für Geotechnik an der TU Wien rund 200 zylinderförmige Proben aus vier unterschiedlichen Gesteinen mit einem Durchmesser zwischen 20 mm und 150 mm hergestellt. Zu den verwendeten Gesteinsarten zählen der Sterzinger Marmor, der Laaser Marmor, das Rohrbacher Konglomerat und der Leithakalk aus Kaisersteinbruch.

Untersucht wurden zwei verschiedene Anordnungen der Prüfkörper in der Prüfpresse. Der erste Versuchsdurchgang sollte klären, ob sich ein Einfluss der Prüfkörperdimension auf Druckfestigkeit und E-Modul quantifizieren lässt, wenn die Proben ohne Modifikation nach Norm getestet werden. Im zweiten Durchgang wurde der Versuchsaufbau mittels Aluminiumplatten mit aufgeklebten Teflonfolien zwischen der Probe und den Prüfstempeln dermaßen verändert, um eine Behinderung der Querdehnung an den Auflagerflächen möglichst zu vermeiden. Im Anschluss wurden die ermittelten Daten ausgewertet, und die Ergebnisse der Versuchsreihen gegenübergestellt.

Abstract

The theme of this master's thesis is the experimental investigation of the size effect from nature stones under compression loading. The theory of the size effect says that the strength of a construction element decreases when its size increases. To investigate this fact, about 200 cylindrical specimens from four different rocks, with a diameter between 20 mm and 150 mm, were fabricated in the laboratory of the Institute of Geotechnical Engineering at the Technical University of Vienna. The used rock types are the Sterzinger marble, the Laaser marble, the Rohrbacher conglomerate and the Leithakalk from Kaisersteinbruch. Both marbles are located in south Tyrol, and the other two in Lower Austria.

In this master's thesis two different arrangements of the specimens were examined in the compression test machine. The first experiment should clarify, if it's possible to measure a size effect on compression strength and Young's module, when the specimens are tested without any modification to the standard compression test. In the second experiment the setup was modified by two additional inserts of aluminum plates with Teflon films, in order to allow the lateral extension on the bearing surfaces. Finally the collected data were analyzed and the test results from the two experiments were compared.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir während des Studiums und bei der Erstellung der vorliegenden Diplomarbeit hilfreich waren, und mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Meine größte Dankbarkeit gebührt meiner Familie, die mich in der gesamten Ausbildungs- und Studienzeit unterstützt hat. Ohne sie hätte der Abschluss dieses Studiums wohl noch länger gedauert.

Ein besonderer Dank gilt ebenso meinem Betreuer, Herrn Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Andreas Rohatsch, der trotz seines vollen Terminplans immer Zeit für meine Fragen gefunden hat, und mich stets geduldig durch wertvolle Ratschläge und Anregungen bei der Entstehung der Diplomarbeit unterstützte.

Weiteres möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Victor Hugo Navas Basantes danken, der sich über Wochen hinweg die Zeit genommen hat, und mir bei der Vorbereitung der Prüfkörper sowie den unzähligen Versuchen geholfen hat.

Abschließend möchte ich mich noch bei all meinen Freunden und Kollegen bedanken, die mir geholfen haben, mein Studium zu bewältigen.

1 Einleitung

In beinahe allen Richtlinien und Normen des Ingenieurbaus, die zur Bemessung von Bauten aus Kunst- oder Natursteinen verwendet werden, ist die Tragfähigkeit eines Bauteils ausschließlich durch dessen Baustoff, der Art der Belastung und der Belastungsgeschwindigkeit bestimmt. Völlig außer Acht gelassen werden dabei die Größe und die geometrische Form. Viele Versuche belegen allerdings, dass die Festigkeit mit steigender Probenkörpergröße abnimmt. Dies bedeutet, dass der klassische lineare Spannungsnachweis, der besagt, dass sich bei einer Verdopplung der Querschnittsfläche die Tragfähigkeit eines Bauteils ebenfalls verdoppelt, nicht immer gilt. Dieser Effekt wird in der Bruchmechanik als „Size-Effect“, oder zu Deutsch als Maßstabseinfluss, bezeichnet.

Ziel dieser Diplomarbeit war die experimentelle Untersuchung des Einflusses der Prüfkörperdimension auf zwei wichtige Bemessungsgrößen – die einaxiale Druckfestigkeit, und den Elastizitätsmodul. Dafür wurden im Labor am Institut für Geotechnik 190 Proben aus vier unterschiedlichen Gesteinsarten mit einem Durchmesser zwischen 20 und 150 mm hergestellt. Des Weiteren sollte geklärt werden, ob ein Einfluss der Querdehnungsbehinderung der Prüfkörper quantifizierbar ist, und ob dies eine Auswirkung auf die Versuchsergebnisse hat. Deshalb wurden zwei Testreihen mit unterschiedlicher Probenanordnung in der Prüfpresse durchgeführt.

Dabei wurde im ersten Versuchsdurchgang die Querdehnungsbehinderung, die zwischen dem Prüfkörper und dem Prüfstempel wirkte, zugelassen. Dies sollte zeigen, ob ein Einfluss der Prüfkörperdimension quantifizierbar ist, wenn die Prüfkörper ohne Modifikation nach ÖNORM EN 14580 getestet werden. Im zweiten Durchgang wurde der Versuchsaufbau dermaßen verändert, um eine Behinderung der Querdehnung möglichst ausgeschaltet wurde. Verwendet wurden dazu Aluminiumplatten mit aufgeklebter Teflonfolie. Im Anschluss wurden die ermittelten Daten ausgewertet, und die Ergebnisse jeder Versuchsreihe gegenübergestellt.

1.1 Geschichte des Size Effect

Für eine detaillierte Geschichte vergleiche (BAŽANT, 1999, S. 705) und (MÜLLER, 2001, S. 4-5)

Die dokumentierte Geschichte des Size Effects kann bis zum Beginn des 16. Jahrhunderts auf LEONARDO DA VINCI zurückverfolgt werden. Er beschrieb in einem seiner Notizbücher mit dem Namen „*Codice Atlantico*“ ein Experiment, bei dem ein Korb an einem Eisendrahtseil aufgehängt wurde, und in diesem mittels eines Trichters Sand einlaufen ließ. LEONARDO erklärte in seiner Notiz weiter: *„Wenn der Eisendraht die Last nicht mehr tragen kann, zerreißt er. (...) Notiere dir, wie groß das Gewicht war. (...) Dann kürze den Draht um die Hälfte und beobachte, ob er jetzt mehr aushält. (...) Diese Probe kannst du mit jedem*

Material – Holz, Stein usw. – machen“ (KURRER, 2002, S. 162). Er schlussfolgerte daraus, dass *„ein Seil um vieles stärker ist (...) wenn es kürzer ist“* (WILLIAMS, 1957), erkannte oder beschrieb aber nicht explizit das Problem des Größeneinflusses. Deshalb wird neben LEONARDO auch GALILEO GALILEI (1638) als Begründer zur Idee des Size Effektes angesehen (TRUNK, 1999, S. 2). Dieser beschäftigte sich mit der Messung der Tragfähigkeit eines Bauteiles an einem verkleinertem Modell, und beschrieb seine ungelöste Frage in einer fingierten Unterhaltung mit drei Herren, bei der er zur Schlussfolgerung kam, dass *„die Größe der Knochen die Schwäche der Giganten ist“* [(BAŽANT, 2000, S. 70) und (THIEL, 2000, S. 82-84)].

Ein halbes Jahrhundert später entwickelte MARIOTTE (1686) die Idee des statistischen Size Effects. Bei seinen Untersuchungen stellte er folgendes fest: *„Ein langes und ein kurzes Seil können immer dasselbe Gewicht tragen, außer wenn im langen Seil fehlerhafte Stellen sind, an denen es früher reißt als das Kurze“*. Er nannte das Prinzip die *„Ungleichheit des Materials, dessen absoluter Widerstand an manchen Stellen kleiner ist als an anderen“* [(BAŽANT, 1999, S. 705) nach (MARIOTTE, 1686)]. Nach diesen Arbeiten geriet die Theorie des Einflusses der Größe für fast 250 Jahre in Vergessenheit.

Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckte GRIFFITH (1921), der Begründer der linear elastischen Bruchmechanik (LEBM), die physikalische Grundlage von MARIOTTES Idee des statistischen Size Effects, indem er mit Hilfe von Experimenten zeigte, dass die Nennfestigkeit von Glasfasern von Diskontinuitäten und Fehlstellen abhängig ist. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und auf dem Modell *„das schwächste Glied der Kette“* von PEIRCE (1926) sowie der Extremwertstatistik begann sich die Theorie des statistischen Size Effects weiter zu entwickeln. 1939 formulierte der schwedische Mathematiker und Ingenieur WALODDI WEIBULL (1939) die heute noch gebräuchliche und oft verfeinerte statistische Theorie des *„WEIBULL Size Effect“*. Dies gelang ihm, indem er eine nach ihm benannte neue Dichteverteilung (WEIBULL Verteilung) einführte. Unter anderem findet diese Theorie, neben der Anwendung im Gebiet des Size Effects, auch im Bereich zur Beschreibung von Lebensdauern oder Ausfallhäufigkeiten von elektronischen Bauteilen, oder bei der statistischen Untersuchung von Windgeschwindigkeiten Anwendung.

In den sechziger Jahren des 20. Jhdts. nahm das Interesse an der Thematik durch den Fortschritt in der Betontechnologie zu. So wurden zahlreiche weitere theoretische Modelle für den quasi-spröden Size Effect veröffentlicht. Darunter befinden sich unter anderem das Size Effect Gesetz von BAŽANT (SEG) (BAŽANT, 1984) und das Multifraktale Maßstabsgesetz von CARPINTERI (MFMG) (CARPINTERI & FERRO, 1994), welche in den nachfolgenden Kapiteln genauer beschrieben werden. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die zwei oben genannten Maßstabsgesetze.

1. Einleitung

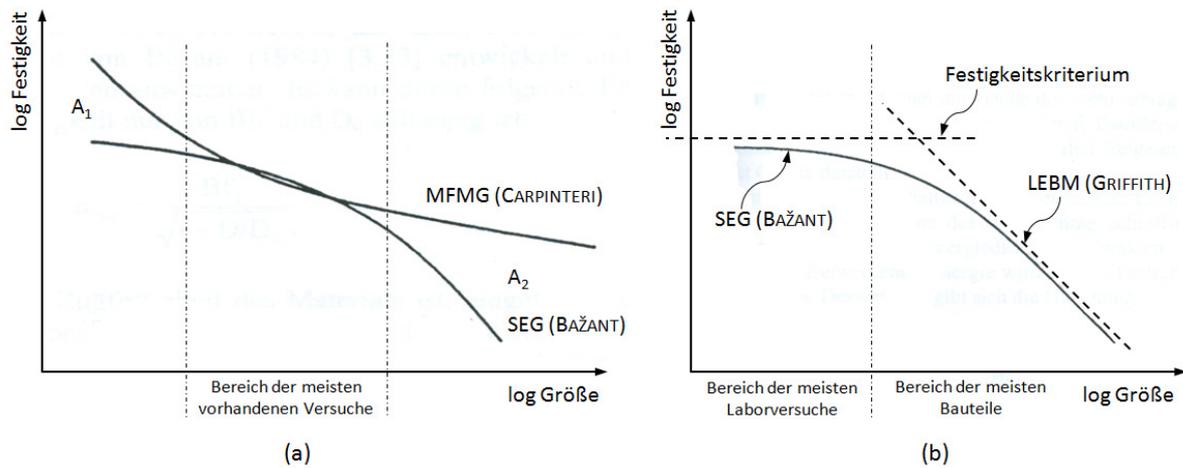


Abbildung 1: (a) Vergleich multifraktalen Maßstabsgesetz von CARPINTERI (MFMG) und Size Effect Gesetz von BAŽANT (SEG) [aus (MÜLLER, 2001, S. 19) nach (HOLLINGWORTH, 1998)], (b) SEG von BAŽANT [aus (MÜLLER, 2001, S. 19) nach (BAŽANT & PLANAS, 1998)]

Die Abbildung 1 (a) zeigt den Zusammenhang zwischen dem multifraktalen Maßstabsgesetz von CARPINTERI (MFMG) und dem Size Effect Gesetz von BAŽANT (SEG). Beide Theorien weisen im mittleren Bereich, wo die meisten Prüfkörperversuche stattfinden, eine gute Übereinstimmung auf. Um jedoch die Gültigkeiten der Näherungen zu prüfen sind Untersuchungen in den Bereichen A₁ und A₂ notwendig.

Abbildung 1 (b) stellt das Size Effect Gesetz von BAŽANT (SEG) detaillierter da und zeigt die Abnahme der Nennfestigkeit mit zunehmender Größe in der doppellogarithmischen Darstellung. Für kleine Abmessungen wird hierbei ein Festigkeitskriterium unabhängig von der Größe angenommen, wie es die meisten Normen und Richtlinien vorschreiben. Das SEG nimmt jedoch an, dass bei größer werden Bauteilabmessungen es zu einem Risswachstum kommt, und die Nennfestigkeit sinken muss. Dieses Verhalten wird durch die linear elastische Bruchmechanik (LEBM) mit einer Geraden, die einer negativen Steigung beschrieben

1.2 Theorie des Size Effects

Der Size Effect, oder Größenmaßstabseffekt, lässt sich auf drei Ursachen zurückführen, zu denen eine Vielzahl theoretischer Ansätze entwickelt wurde. In Folge wird zu jeder Ursache eine Theorie genannt und kurz beschrieben: (MÜLLER, 2001, S. 6-8)

- **statistischer Size Effect:** Dieser Effekt wird durch die WEIBULL Theorie beschrieben, und beruht auf der zufälligen Verteilung von Materialfestigkeiten in einem Körper.
- Der **Size Effect der Bruchmechanik** beruht auf der Freisetzung von Verzerrungsenergie an der Rissfront und der für die Rissfortpflanzung benötigten

1. Einleitung

Bruchenergie, die zueinander im Gleichgewicht stehen müssen. Wichtigster theoretischer Ansatz ist das Size Effect Gesetz von BAŽANT (SEG).

- **Fraktales Verhalten von Rissoberflächen:** Hierbei wird versucht, die Rissoberfläche durch Fraktale zu beschreiben. Darüber hinaus soll ihr Einfluss auf die Bildung neuer Rissoberflächen untersucht werden. Zu diesem Ansatz existiert bislang nur eine Theorie, das multifraktale Maßstabsgesetz von CARPINTERI (MFMG).

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die oben genannten Theorien noch genauer erläutert.

1.2.1. WEIBULL Theorie

Vergleiche hierzu (TRUNK, 1999, S. 24-25) und (WEIBULL, 1939).

An der königlichen technischen Universität in Stockholm veröffentlichte WALODDI WEIBULL (1939) einen Artikel mit dem Titel „A statistical theory of the strength of materials“ (WEIBULL, 1939). Darin beschreibt er, basierend auf empirischen Überlegungen, das spröde Werkstoffversagen eines Bauteils, in Abhängigkeit von der Bauteilgröße.

Ausgangspunkt dieser Überlegungen bildet ein Körper aus einem spröden Material mit isotropen Eigenschaften unter einem gleichmäßigen homogenen Spannungszustand. Zusätzlich befinden sich im Material statistisch verteilte Fehlstellen. WEIBULL (1939) geht in seiner Theorie davon aus, dass der Spröbruch an jener Stelle auftritt, an der sich die größte Fehlstelle befindet. Dort tritt auch die größte lokale Spannung auf. Zur Beschreibung dieser Theorie zerteilte er den Körper in n Einzelelemente, und ordnete jedem von ihnen eine statistisch verteilte Festigkeit zu. Im Anschluss dessen fügte er die einzelnen Elemente zu einer Kette zusammen.

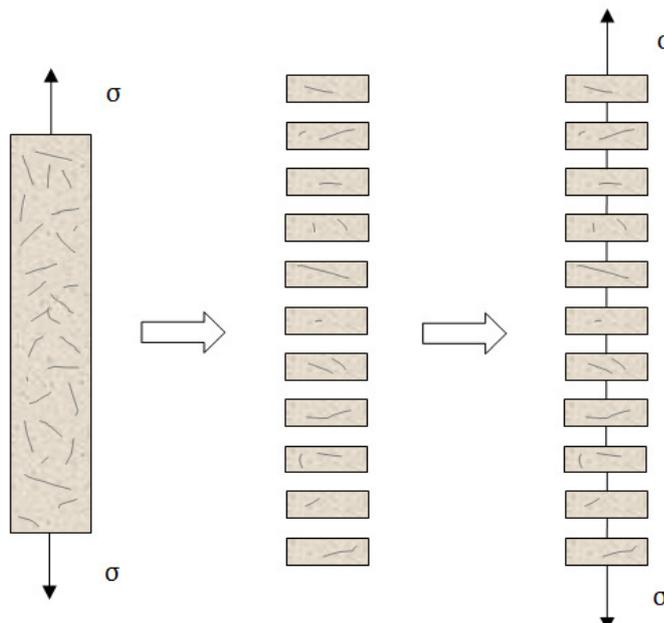


Abbildung 2: Modell des schwächsten Glieds der Kette nach (WEIBULL, 1939)

1. Einleitung

Die größte aufnehmbare Last der gedachten Kette, wird durch ihr schwächstes Glied bestimmt. Daher spricht man auch vom Modell mit dem Namen „das schwächste Glied der Kette“. WEIBULL (1939) leitete aus den vorangegangenen Überlegungen folgende Gleichung für die Versagenswahrscheinlichkeit P eines Bauteils in Abhängigkeit von seinem Volumen V und der Belastung σ her:

$$P(\sigma, V) = 1 - e^{\left\{-\left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_o}\right)^m \cdot \rho V\right\}} \quad (1.1)$$

$P(\sigma, V)$	Versagenswahrscheinlichkeit	σ_o	Referenzfestigkeit
σ	anliegende Spannung	σ_u	kleinste auftretende Festigkeit
V	Bauteilvolumen	ρ	Fehlstellendichte

$P(\sigma, V)$ gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Baukörper dann versagt, wenn aus einer Fehlstelle im Gefüge des Körpers (Mikroriss, Pore, Sprung, ...) ein Riss entsteht, der zum Versagen führt. Um zu zeigen, dass die Festigkeit mit steigender Bauteilgröße abnimmt, geht man jetzt wie folgt vor. Man vergleicht zwei Prüfkörper mit einer gleichen Versagenswahrscheinlichkeit von $P = 0.5$, aber mit unterschiedlichen Volumen V_1 und V_2 und folglich unterschiedlichen Spannungen σ_1 und σ_2 . So folgt aus der Gleichung (1.1)

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_u}{\sigma_o}\right)^m \cdot \rho V_1 = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_u}{\sigma_o}\right)^m \cdot \rho V_2 \quad (1.2)$$

Bei gleicher Fehlstellendichte ρ , die sich nur gering mit dem Volumen ändert, und vernachlässigbarer Festigkeit σ_u , vereinfacht sich die Formel weiter zu

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right) = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (1.3)$$

Fordert man, dass das Verhältnis von $V_2 / V_1 > 1$ ist, folgt das auch $\sigma_1 / \sigma_2 > 1$ sein muss. Dies bedeutet, dass $V_2 > V_1$ und $\sigma_1 > \sigma_2$, oder wörtlich, dass bei steigendem Bauteilvolumen V die Spannung σ abnimmt (vgl. Abbildung 3).

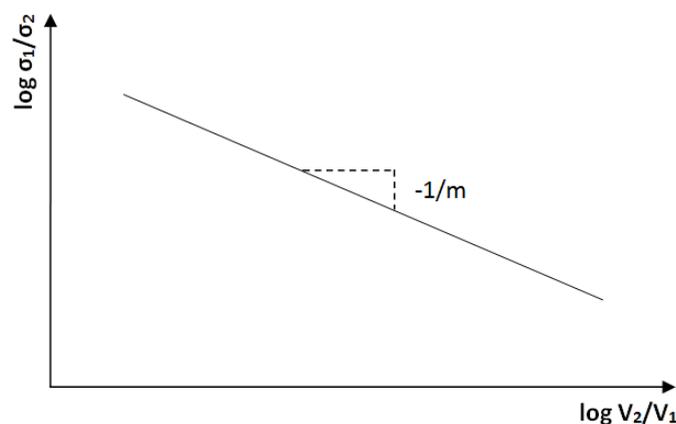


Abbildung 3: Festigkeit f_t in Abhängigkeit des Prüfkörpervolumens V nach (WEIBULL, 1939)

1.2.2. Size Effect Gesetz von BAŽANT (SEG)

Vergleiche hierzu (BAŽANT, 1984) , (TRUNK, 1999, S. 27-31) und (MÜLLER, 2001, S. 19-22)

1984 leitete BAŽANT ein halbempirisches Gesetz zwischen zwei unterschiedlichen Versagenskriterien her. Dabei handelte es sich um das „Size Effect Law“. Dies beruht auf dem Übergang zwischen einem Modell für kleine Probekörper, das auf einem Festigkeitskriterium aufbaut, und der linear elastischen Bruchmechanik (LEBM), die für große Prüfkörper (Bauteile) verwendet wird.

Als Gedankenmodell benutze er eine Platte mit der Breite b , unter einer gleichförmigen Spannung. Darin befindet sich ein Rissband der Länge h_f und einer darauf normal liegenden Schädigungszone. Eine Rissverlängerung Δa erfordert ein Maß an Energie pro Dickeneinheit des Prüfkörpers. Diese Energie wird Bruchenergie genannt, und mit G_f bezeichnet.

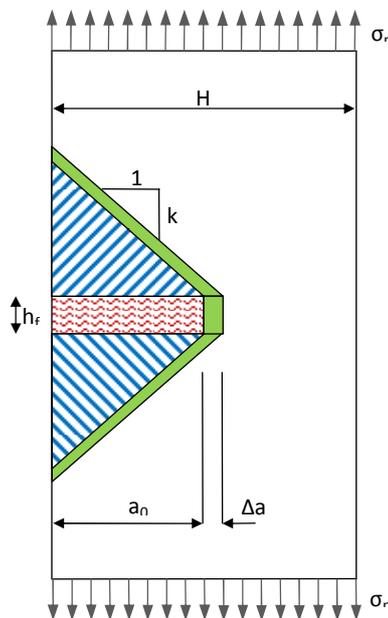


Abbildung 4: Gedankenmodell der Rissausbreitung zur Herleitung des Maßstabgesetzes nach (BAŽANT, 1999)

Des Weiteren setzt eine Verlängerung des Risses auch Verzerrungsenergie ΔW frei, die sich wie folgt berechnen lässt:

$$\Delta W = \frac{b(h_f \cdot \Delta a + 2 \cdot k \cdot a_0 \cdot \Delta a)}{2E} \cdot \sigma_n^2 \quad (1.4)$$

Setzt man diese Energie mit der zur Rissverlängerung benötigten Energie $G_f \cdot \Delta a \cdot b$ gleich, und löst die Gleichung nach der Nennfestigkeit σ_n auf, so erhält man mit

$$B \cdot f_t = \sqrt{\frac{2 \cdot G_f \cdot E}{h_f}} \quad \text{und} \quad H_0 = \frac{h_f \cdot H}{2 \cdot k \cdot a_0} \quad (1.5)$$

1. Einleitung

das Size Effect Law nach BAŽANT (1984):

$$\sigma_n = \frac{B \cdot f_t}{\sqrt{1 + H/H_0}} \quad (1.6)$$

Hierbei ist f_t die Zugfestigkeit des Materials. B und H_0 sind Konstanten, die von den Brucheigenschaften des Materials und der Geometrie abhängig sind, nicht aber von der Körpergröße.

Wenn man die Grenzwerte der Gleichung (1.6) betrachtet, so ergibt sich für eine Prüfkörpergröße die gegen 0 geht ($H \rightarrow 0$), die Nennfestigkeit zu $\sigma_n = B \cdot f_t$, also einem konstanten Wert, wie er in einem Festigkeitskriterium vorkommt. Lässt man hingegen $H \rightarrow \infty$ gehen, so ergibt sich $\sigma_n = B \cdot f_t / \sqrt{1 + H/H_0}$. Dieser entspricht der LEBM, wo die Nennfestigkeit des Bauteils mit $1/\sqrt{H}$ abnimmt.

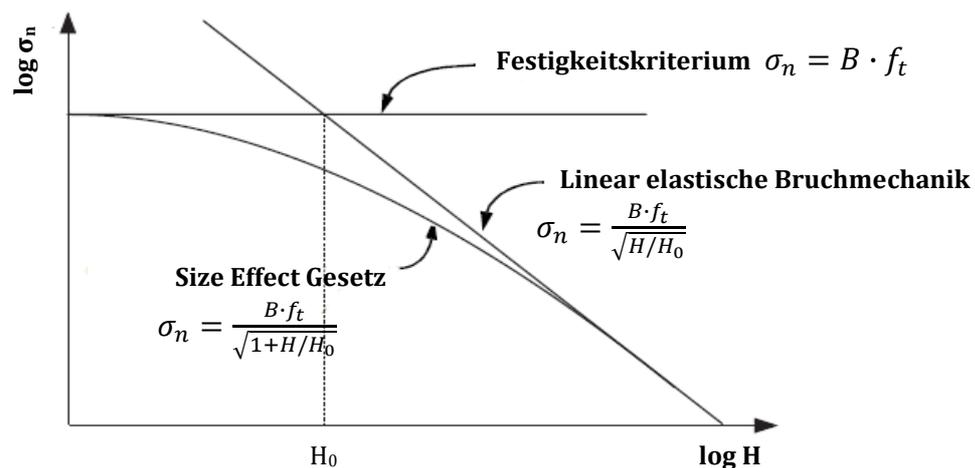


Abbildung 5: Maßstabsgesetz nach BAŽANT (1984)

1.2.3. Multifraktales Maßstabsgesetz von CARPINTERI (MFMG)

Vergleiche hierzu (CARPINTERI & FERRO, 1994), (TRUNK, 1999, S. 29-34) und (KESSEL-KRAMER, 2002, S. 19)

Aufbauend auf den Methoden der fraktalen Geometrie entwickelten CARPINTERI und FERRO (1994) ein Maßstabsgesetz für den Einfluss der Bauteilgröße auf die Zugfestigkeit f_t . Hierbei gingen sie von der Annahme aus, dass sich die Bruchflächen von zementgebundenen Werkstoffen, insbesondere Beton, durch Fraktale beschreiben lassen.

CARPINTERI's (1994) multifraktales Maßstabsgesetz (MFMG) geht dabei von einer zunehmenden Heterogenität eines Bauteils mit abnehmender Größe aus. Dahinter steht die Überlegung, dass der Größeneinfluss der Materialkomponenten eines Werkstoffes eine umso größere Rolle spielt, je kleiner die untersuchte Probe ist.

1. Einleitung

Mathematisch lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt ausdrücken:

$$f_t(H) = f_t^\infty \cdot \sqrt{1 + \frac{l_{ch}}{H}} \quad (1.7)$$

- $f_t(H)$ Zugfestigkeit des Materials für H
 H Probendimension
 f_t^∞ Zugfestigkeit des Materials für $H \rightarrow \infty$
 l_{ch} charakteristische interne Materiallänge zur Beschreibung der Sprödigkeit und Randbedingungen

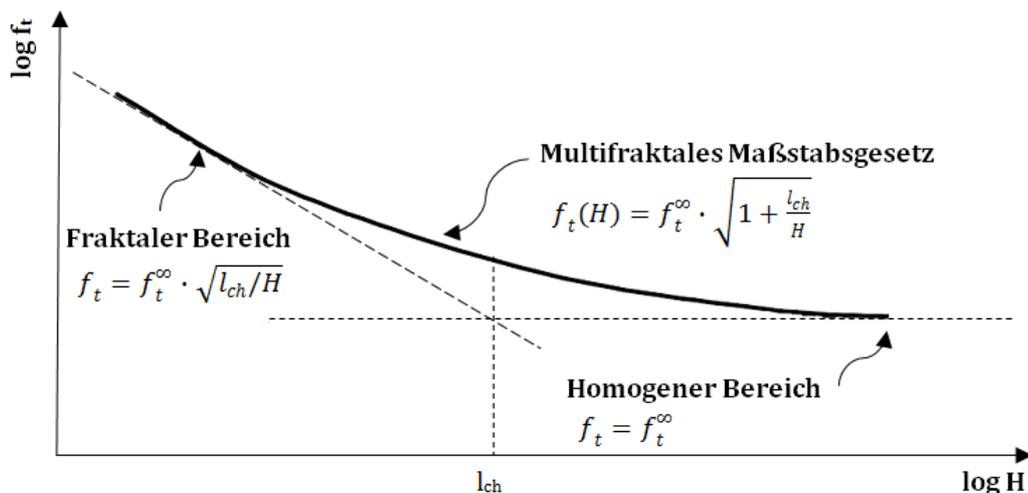


Abbildung 6: Maßstabgesetz nach CARPINTERI (1994)

1.3 Einaxiale Druckfestigkeit und statisches E-Modul

Vergleiche hierzu (THURO & PLINNINGER, 1998, S. 3-30) und (SCHUBERT, 2007, S. 5-21 bis 5-28)

Mit Hilfe des einaxialen Druckversuches wird die Gesteinsfestigkeit oder einaxiale Druckfestigkeit eines Prüfkörpers ermittelt. Dabei wird ein zylinder- oder würfelförmiger Körper mit unbehinderter Seitendehnung ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), durch eine Flächenlast σ_1 , bis zu seinem Versagen belastet. Dies ist schematisch in Abbildung 8 zu sehen. Ebenfalls zu erkennen sind der originale Zustand des Prüfkörpers vor dem Versuch (strichliert), und der stark überzeichnete nach dem Druckversuch (durchgezogene Linie). Bei genauerer Betrachtung erkennt man weiter, dass sich der Prüfkörper ungleichmäßig ausdehnt. Dies liegt an der behinderten Querdehnung, die durch Reibung im Lasteinleitungsbereich entsteht (vgl. Kapitel 1.3.1). Folgedessen bildet sich ein dreiaxialer Spannungszustand an den Deckflächen des Zylinders aus. Nur im mittleren Teil des Prüfkörpers herrscht ein einaxialer Spannungszustand mit $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

1. Einleitung

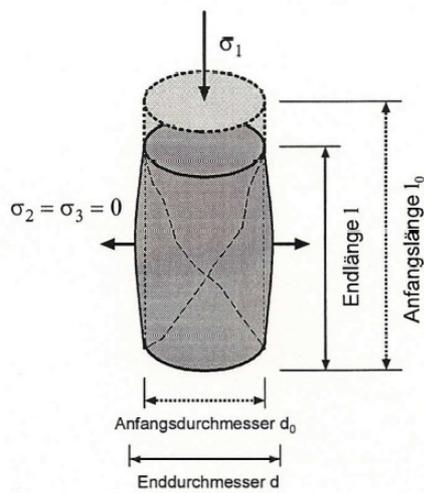


Abbildung 8: Schema eines einaxialen Druckversuches aus (THURO & PLINNINGER, 1998, S. 3)

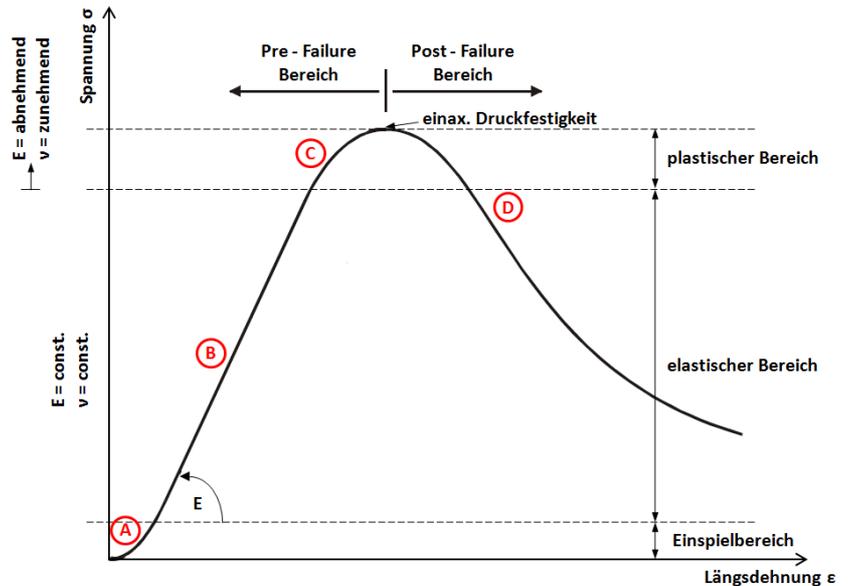


Abbildung 7: Spannung-Dehnungskurve eines einaxialen Druckversuches [modifiziert nach (SCHUBERT, 2007, S. 5-22) und (THURO & PLINNINGER, 1998, S. 11)]

Ebenfalls lässt sich aus Abbildung 8 die Querdehnzahl oder Poisson'sche Zahl ν herleiten. Diese stellt den Zusammenhang zwischen der Querdehnung ϵ_Q und der Längsdehnung ϵ_L her, vgl. (MANG & HOFSTETTER, 2004, S. 72-81).

$$\nu = -\frac{\epsilon_Q}{\epsilon_L} \quad \text{mit} \quad \epsilon_Q = \frac{d - d_0}{d_0} \quad \epsilon_L = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1.8)$$

Hierbei ist:

ν	Querdehnzahl od. Poisson'sche Zahl	ϵ_Q	Querdehnung
ϵ_L	Längsdehnung	d	Enddurchmesser
d_0	Anfangsdurchmesser	l	Endlänge
l_0	Anfangslänge		

In Abbildung 7 ist eine Spannungs – Dehnungskurve bei einem einaxialen Druckversuch dargestellt. Dabei sind vier unterschiedliche Bereiche A-D der Kurve zu erkennen:

Bereich A: In diesem Abschnitt weist die Kurve im Regelfall ein konkaves Verhalten auf. Dies kann an Folgendem liegen:

- die Lasteinleitungsflächen sind nicht exakt planparallel oder
- Mikrorisse im Prüfkörper werden geschlossen

Bereich B: In diesem Teilbereich ist die Kurve nahezu linear, und der Prüfkörper weist ein elastisches Materialverhalten mit einem konstanten Elastizitätsmodul E und Querdehnzahl ν auf. In diesem Bereich findet auch die Messung des statischen E-Moduls statt, vgl. Kapitel 3.4.2.

1. Einleitung

Bereich C: Durch beginnende Mikrorissbildung geht die Kurvenform in eine Konvexe über. Dies zeichnet den Wechsel vom elastischen zum plastischen Materialverhalten aus. Dabei nimmt die Dehnung im Vergleich zur zusätzlichen aufgebrauchten Last überproportional zu. Folglich kommt es in diesem Abschnitt zu einer Abnahme des E-Moduls und zu einer Steigerung der Querdehnzahl. Eine weitere Laststeigerung führt zum Versagen des Prüfkörpers. Dabei ist die maximal aufnehmbare Spannung, die einaxiale Druckfestigkeit σ_c , erreicht.

Bereich D: Hierbei handelt es sich um den Post – Failure Bereich. An der Form der Kurve erkennt man, ob es sich um einen Sprödbbruch, oder um ein duktilen Materialversagen handelt.

An der Bruchform der Probe lassen sich wie in Abbildung 9 dargestellt, drei unterschiedliche Versagensarten beschreiben:

- **Bruchform 1:** Bei dieser Bruchfigur ist das Messergebnis als ungültig zu werten, da die einwirkende Kraft nicht vollflächig, sondern nur punktuell eingeleitet wurde. Grund hierfür könnten eine nicht planparallele Oberfläche sowie Einkerbungen oder Ausbrüche sein.
- **Bruchform 2** stellt den klassischen Spaltbruch durch Überschreiten der lokalen Zugspannungen dar. Dabei zerbricht der Prüfkörper in zwei oder mehr säulenartige Figuren, die im weiteren Versuchsverlauf seitlich ausweichen. Dieses Bruchbild kommt zumeist bei geringen Seitendrücken und unbehinderter Querdehnung zustande.
- **Bruchform 3** zeigt einen Scherbruch. Die Ausbildung zweier konjugierter Scherflächen, deren Resultat einer Sanduhr ähnelt, ist eher selten anzutreffen. Zumeist dominiert eine Scherfläche. Diese Bruchform entsteht zumeist bei Prüfkörpern mit einem dreiaxialen Spannungszustand, bei der sich an den Auflagerflächen ein Druckkegel ausbildet, und diese die Ausdehnung in Querrichtung behindert. (vgl. Kapitel 1.3.1)

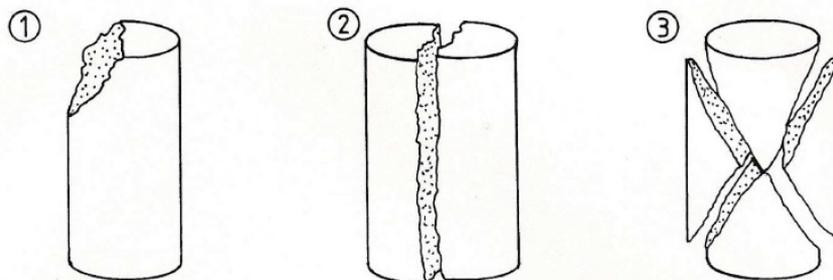


Abbildung 9: Mögliche Bruchformen bei Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit (THURO & PLINNINGER, 1998, S. 30)

1. Einleitung

Neben den drei oben genannten Bruchformen existiert noch der Gefüge oder Strukturbruch. Bei dieser Variante entstehen keine definierten Bruchflächen.

Die im Bruchzustand gemessene Druckfestigkeit eines Prüfkörpers lässt sich im σ - τ Diagramm durch Spannungskreise darstellen. Dabei ist σ die Normalspannung und τ die Schubspannung. Wie in Abbildung 10 zu sehen, können die Spannungskreise durch eine Lineare eingehüllt werden. Man spricht dabei von der MOHR - COULOMB'SCHEN Bruchgeraden. Diese ist definiert durch die Scherfestigkeitsparameter ϕ (Reibungswinkel) und c (Kohäsion). Damit lässt sich die MOHR - COULOMB'SCHE Bruchgerade wie folgt beschreiben:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot \sigma_3 + \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot c \quad (1.9)$$

Wegen der unterschiedlichen Versagensformen von Gestein, wie Spalt- oder Scherbruch, und den je nach Spannungszustand unterschiedlichen elastischen oder plastischen Materialverhalten, stimmt das von MOHR und COULOMB (1882) entwickelte lineare Bruchkriterium mit den Versuchsergebnissen nicht immer überein. Deswegen wurde von HOEK und BROWN (1982) ein Bruchkriterium mit parabolischem Ansatz zur besseren Beschreibung des Gesteinsversagens entwickelt.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \cdot \sqrt{m \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s} \quad (1.10)$$

Dabei bezeichnet σ_c die Druckfestigkeit von intakten Gestein und m und s sind Konstanten.

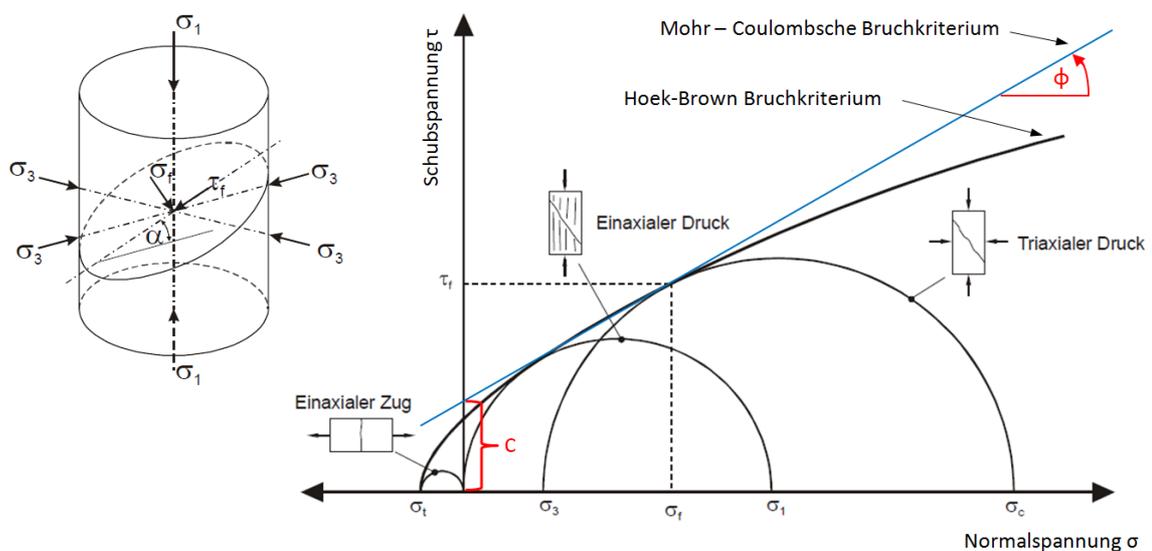


Abbildung 10: links: zweiachsialer Spannungszustand einer Gesteinsprobe; rechts: σ - τ Diagramm mit Bruchkriterien [modifiziert, aus (SCHUBERT, 2007, S. 5-26 und 5-28) nach (HOEK & BROWN, 1982, S. 138)]

1. Einleitung

Neben den Scher- oder Materialfestigkeitsparametern ϕ und c haben noch andere Randbedingungen Einfluss auf die Druckfestigkeit. Darunter befindet sich neben dem Größenmaßstabsfaktor oder „Size-Effect“ folgende:

- Einfluss der Probengeometrie (shape effect)
- Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit
- Einfluss des Feuchtegehalts der Probe
- Einfluss von Gefügeflächen

Im Folgenden wird nur der Einfluss der Probengeometrie weiter beschrieben, da sicher dieser neben dem Size Effect als wesentlicher Einflussfaktor für diese Diplomarbeit erwiesen hat. Für alle anderen wird an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen.

1.3.1. Einfluss der Probengeometrie auf die Druckfestigkeit (Shape Effect)

Unter dem Einfluss der Probengeometrie versteht man die die Zu- oder Abnahme der Gesteinsfestigkeit in Abhängigkeit von der Schlankheit λ . Diese definiert sich als das Verhältnis der Höhe zum Durchmesser oder Breite der Probe. So haben gedrungene Prüfkörper mit einer Schlankheit $h/d < 1$ eine scheinbar höhere Festigkeit als solche mit einer Schlankheit von $h/d > 1$. Abbildung 11 zeigt die prozentuale Festigkeitsverteilung der unterschiedlichen Prüfkörpergeometrien an. Ausgangspunkt ist der Würfel mit einem Seitenverhältnis von $h/b = 1:1$, bei dem die gemessene Festigkeit 100% beträgt. Betrachtet man im Vergleich dazu einen Zylinder desselben Materials mit einem Seitenverhältnis $h/b = 2:1$, so ergibt sich nur mehr eine Festigkeit von 80% des Würfels. Gegenteilig verhält es sich mit gedrungenen Geometrien wie Platten. Hier kann die gemessene Festigkeit bis auf 300% ansteigen, vgl. (KOLLEGER, 2008, S. 2-11).

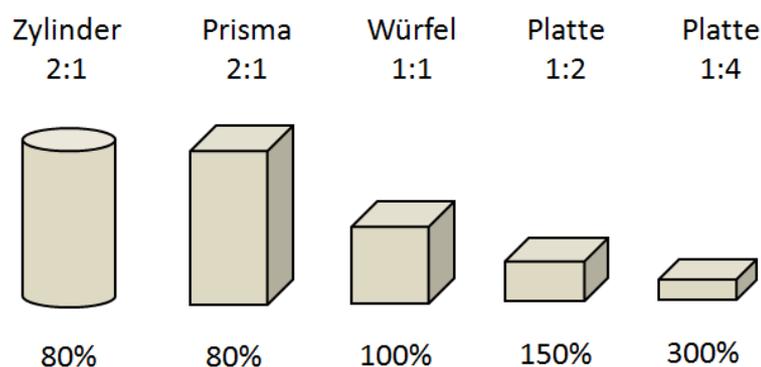


Abbildung 11: Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Druckfestigkeit nach (KOLLEGER, 2008, S. 2-11)

Verantwortlich hierfür ist im Wesentlichen die entstehende Reibung zwischen dem Prüfkörper und dem Prüfstempel, durch den die Querdehnung der Probe an den Auflagerflächen behindert wird. Dadurch entstehen Druckspannungen, die als eine Art von Druckgewölbe verstanden werden können, und die ebenfalls vorhandenen

1. Einleitung

Querzugspannungen überlagern. Dies führt zu einer Verzögerung der Makrorissbildung in jenen Bereichen, was wiederum zu einer höheren Festigkeit führt.

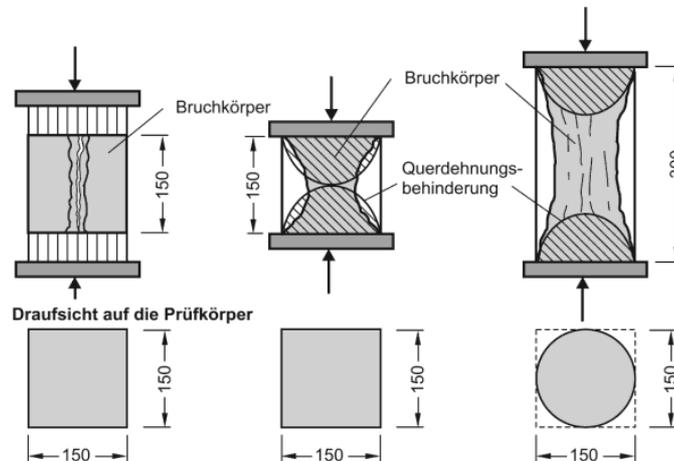


Abbildung 12: Querzug- und Druckspannungen in Prüfkörper (ZILCH & ZEHETMAIR, 2006, S. 72)

Eine Möglichkeit die Behinderung der Querdehnung an den Auflagerflächen zu reduzieren, sind die, wie in Abbildung 12 links dargestellten, „Münchener Bürsten“, die erstmals von HILSDORF (1965) eingesetzt wurden. Dabei handelt es sich um Stahlbürsten, mit deren Hilfe sich der Prüfkörper an den Lasteinleitungsf lächen frei verformen lässt. Möglich ist dies, da die Einzelborsten eine geringere Steifigkeit als die sonst verwendeten Stahlplatten haben (ZILCH & ZEHETMAIR, 2006, S. 72-73). Abbildung 13(a) zeigt die Auswirkung der Schlankheit von Betonprüfkörpern im Festigkeitsverhältnis f/f_c bei zwei unterschiedlichen Lasteinleitungsarten. Hierbei ist f die ermittelte Betondruckfestigkeit und f_c die einaxiale Betondruckfestigkeit. Weiteres ist die Kurve der dehn- und biegesteifen Lasteinleitung (z.B. über Stahlplatten) im Diagramm als „—“ gekennzeichnet, und die dehnungsweiche Krafteinleitung (z.B. über Teflon- oder Gummiplatten) als „- - -“. Dabei ist gut zu erkennen, dass bei einer dehnungsweichen Beilage der Einfluss der Prüfkörperdimension nahezu wegfällt, während das Festigkeitsverhältnis bei normaler Krafteinleitung ohne Beilagen bis auf den vierfachen Wert ansteigt.

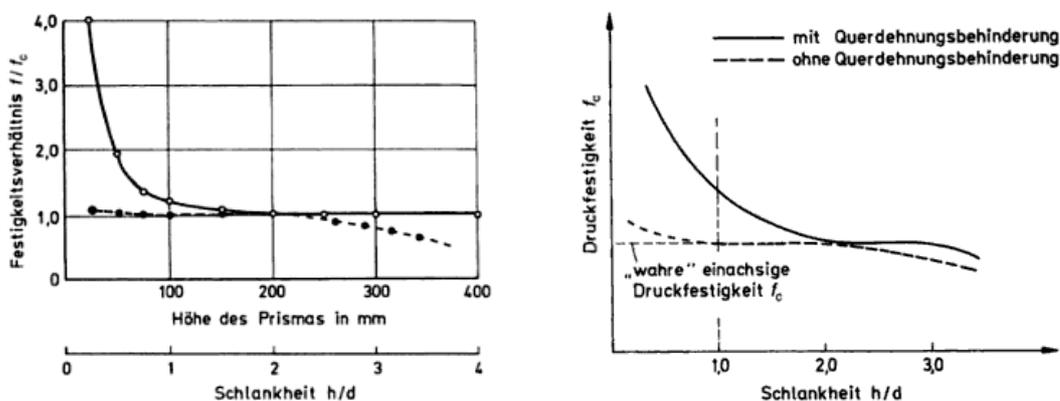


Abbildung 13: (a) Prüfkörperschlankheit zum Festigkeitsverhältnis f/f_c ; (b) Prüfkörperschlankheit zur Druckfestigkeit f_c (GRÜBL, WEIGLER, & SIEGHART, 2001, S. 312-313)

1. Einleitung

Um den Einfluss der Querdehnungsunterschiede zu minimieren, und um die „richtige“ Probeform zu finden, werden wie in Abbildung 13(b) schematisch dargestellt, die Kurven mit und ohne Querdehnungsbehinderung überlagert. Dabei ist ein Bereich zu erkennen, bei dem die Druckfestigkeiten beider Kurven nahezu ident ist. Dieser Schnittpunkt liegt bei einer Schlankheit von $h/d=2$ der Probe, und die dazugehörige Festigkeit wird mit „wahre“ oder „echte“ Druckfestigkeit f_c bezeichnet. (GRÜBL, WEIGLER, & SIEGHART, 2001, S. 311-313)

1.4 Versuchsbeschreibung

Wie aus der Einführung bekannt, setzt sich die Diplomarbeit aus zwei unterschiedlichen Versuchsreihen zusammen. Die Erste hatte das Ziel, den Einfluss der Prüfkörperdimension auf einaxiale Druckfestigkeit und E-Modul unter Verwendung der ÖNORM EN 14580 zu zeigen. Dabei wurde keine Abänderung hinsichtlich des Einbaus der Prüfkörper in die Prüfpresse vorgenommen. Im zweiten Durchgang sollte geklärt werden, ob es einen messbaren Einfluss der Querdehnungsbehinderung gibt, und welche Auswirkungen dieser auf einaxiale Druckfestigkeit und E-Modul hat. Aus diesem Grund wurde versucht, die Querdehnungsbehinderung zu minimieren. Dies sollte durch Kombination zweier unterschiedlicher Ansätze erreicht werden:

- Verringerung der relativen Steifigkeit zwischen Prüfstempel und Probe
- Verringerung der Reibung zwischen den Auflagerflächen des Prüfkörpers und den Prüfstempeln

Dabei ist für eine gleichmäßige Lasteinleitung die Verringerung der relativen Steifigkeit durch Zwischenlagen, die in etwa dieselben Materialsteifigkeiten wie die Proben aufweisen, maßgebend. Weisen beide Materialien exakt dieselben Steifigkeiten auf, so kann wegen derselben Längenausdehnung bei Belastung keine Reibung zwischen ihnen entstehen. Daraus ergibt sich eine gleichmäßige Lasteinleitung, und der Prüfkörper neigt zu einem Querspannungsversagen in Form eines Spaltbruches. Ist dies nicht der Fall, so tendiert der zylinderförmige Prüfkörper sich radialförmig auszubreiten (vgl. Abbildung 14) und zur Ausbildung eines Druckkegels (vgl. Kapitel 1.3.1). Dies erkennt man, wenn der Prüfkörper in Form eines Scherbruches bricht. Man spricht von einer nichtgleichmäßigen Lasteinleitung, vgl. (PENG & JOHNSON, 1972, S. 52-55).

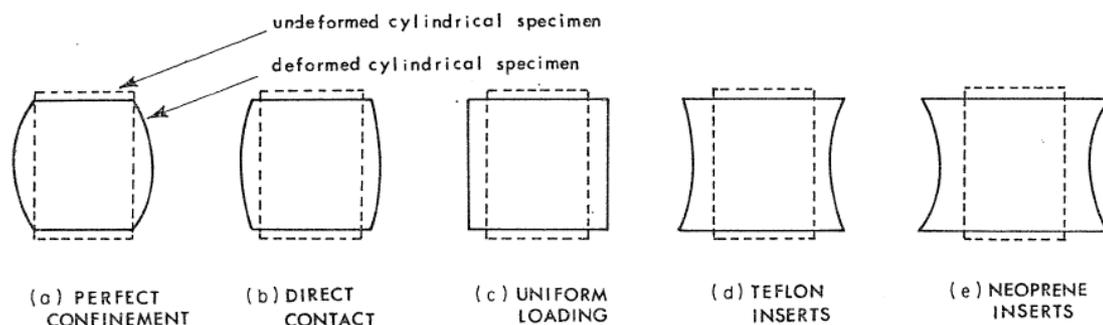


Abbildung 14: Arten der Deformation von Prüfkörpern bei unterschiedlichen Randbedingungen aus (PENG & JOHNSON, 1972, S. 53)

1. Einleitung

Um die Behinderung der Querdehnung zu minimieren, wird in der zweiten Versuchsreihe der Aufbau wie folgt modifiziert:

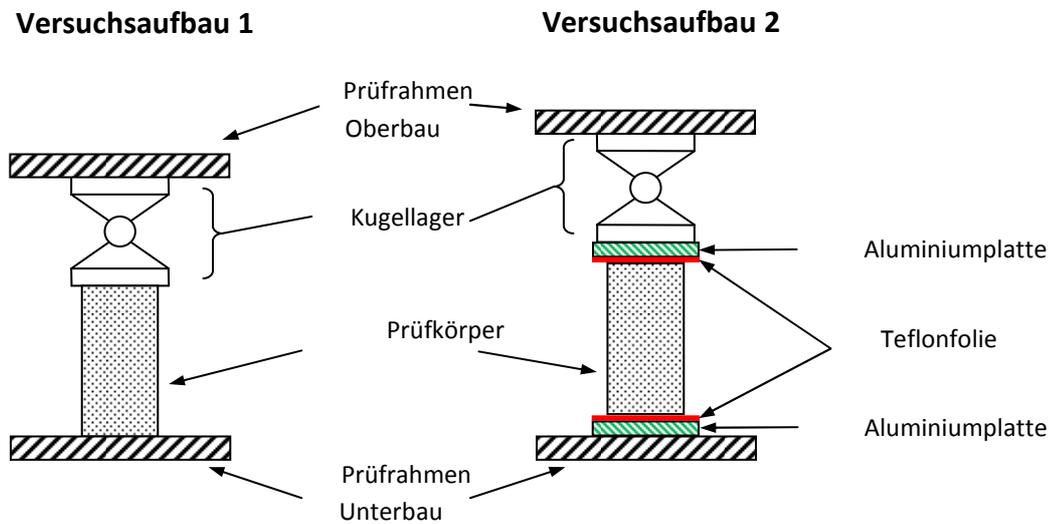


Abbildung 15: Schema des Versuchsaufbaues 1 und 2

Zwischen dem Prüfkörper und den Prüfstempeln befinden sich 2 cm dicke Aluminiumplatten mit aufgeklebten reinen Teflonfolien¹. Der Vorteil der Aluminiumplatten ist, dass diese nur ca. 1/3 des Schubmoduls sowie des Elastizitätsmoduls von Stahl besitzen. Dadurch können die Steifigkeitsunterschiede verkleinert werden, was eine Verbesserung der Querdehnung an den Auflagerflächen bewirkt. Der Nachteil von Aluminium ist aber, dass es eine höhere Gleitreibungszahl² hat:

$$\mu_{\text{Stahl-Stahl}} \approx 0,15$$

$$\mu_{\text{Alu-Alu}} \approx 1,05$$

Aus diesem Grund, und da die Reibung zwischen der Aluminiumplatte und dem Prüfkörper nicht ganz vermieden werden kann, wurde eine Teflonfolie aufgeklebt. Zum Vergleich hierzu, hat diese einen Gleitreibungskoeffizienten von $\mu_{\text{PTFE-PTFE}} = 0,04$.

Der Nachteil von Teflon ist, so wie bei allen Polymeren, die geringe Druckfestigkeit. Aus diesem Grund mussten, so wie in Abbildung 16 zu sehen, die Folien nach jedem Versuch gewechselt werden.

¹ Verwendet wurde eine selbstklebende, reine, 0,25mm dicke Teflonfolie (die korrekte Bezeichnung wäre PTFE-Folie – Polytetrafluorethylen Folie) der Firma High-tech-flon. Deren Produktbezeichnung lautet: PTFE Virginalfolie 0.25 V selbstklebend

² Alle Gleitreibungszahlen wurden entnommen aus: <http://de.wikipedia.org/wiki/Reibungskoeffizient> (12.04.2012)

1. Einleitung

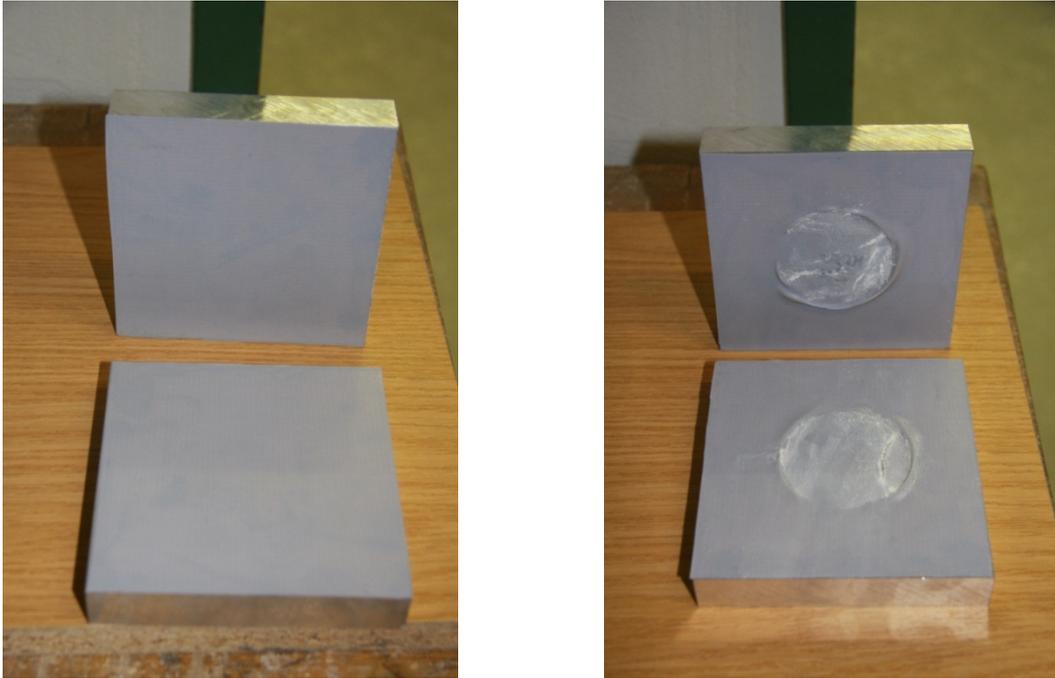


Abbildung 16: Aluminiumplatten mit Teflonfolie; links vor dem Versuch, rechts nach Versuchsende

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Einbau der Aluminiumplatten mit aufgeklebten Teflonfolien zwischen dem unteren Prüfrahmen und der Probe bzw. zwischen dem Kugellager an der Oberseite und der Probe. Ebenfalls zu sehen sind die Sensoren zur Messung der Dehnung in Probenmitte.

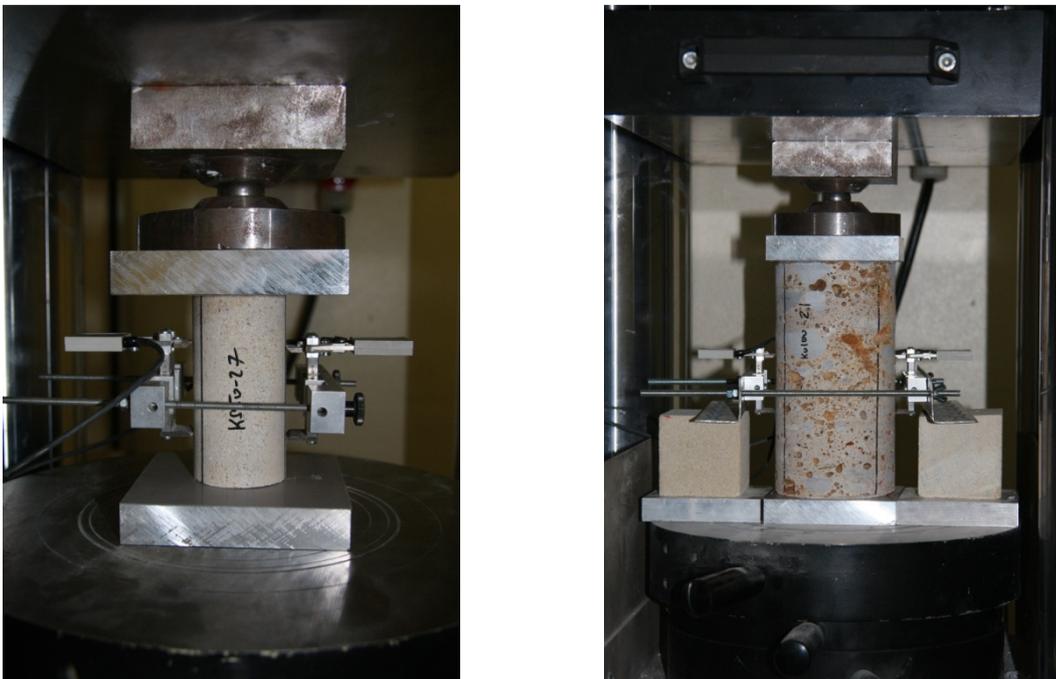


Abbildung 17: Einbau der Zwischenlagen in die Prüfpresse

2 Verwendete Gesteinstypen

Für die Diplomarbeit wurden vier unterschiedliche Gesteinstypen verwendet. Darunter befinden sich zwei Sedimentgesteine

- der **Leithakalk aus Kaisersteinbruch**
- das **Rohrbacher Konglomerat**

und zwei metamorphe Gesteine

- der **Sterzinger Marmor** und
- der **Laaser Marmor**

Diese werden in den nachfolgenden Kapiteln kurz beschrieben.

2.1 Sedimentgesteine

Vergleiche hierzu (PRESS & SIEVER, 2003, S. 64-65) und (MURR, 2005, S. 79-80)

Als Ausgangsmaterial der Sedimentgesteine dienen Sedimente. Diese sind unterschiedlich große Gesteinsbruchstücke aus der mechanischen oder chemischen Verwitterung, und werden nachfolgend durch Prozesse der Erosion abtransportiert. Als Transportmedium dient hier je nach Klimazone und Größe der Bruchstücke Wind, Wasser oder Eis. So kann die Ablagerung der Sedimente kontinental in Form von Kiesbänken oder Moränen durch Gletscher erfolgen, oder ein Transport bis ins Meer stattfinden.

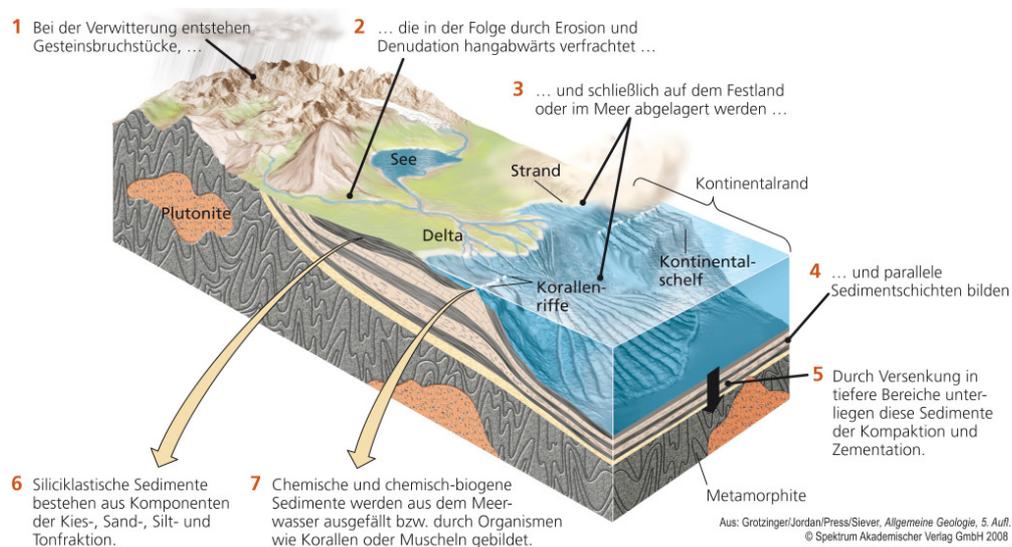


Abbildung 18: Vorgänge zur Bildung von Sedimentgesteinen (PRESS & SIEVER, 2008)

2. Verwendete Gesteinstypen

Durch den Prozess der **Diagenese** oder **Lithifikation** werden dann die lockeren Sedimentschichten durch zwei Vorgänge zu einem harten Gestein verfestigt. Dabei unterscheidet man die

- **Kompaktion:** Infolge des Eigengewichtes der übereinander lagerenden Schichten, und den dadurch entstehenden Druck, werden die Sedimente zusammengepresst.
- **Zementation:** Dabei wird durch Ausfällung neu gebildeter Minerale der Zwischenraum abgelagerter Komponenten verkittet.

Man unterscheidet zwei unterschiedliche Arten von Sedimentgesteinen:

- **Klastische Sedimentgesteine** sind mechanische abgelagerte und verfestigte Sedimentpartikel und Einzelkörner. Hierzu gehören etwa Sandstein, Tonstein oder auch Konglomerat.
- **Chemische und chemisch-biogene Sedimentgesteine** entstehen durch Ausfällung neu gebildeter chemischer Verbindungen von Gesteinsbestandteilen, die mit dem Flusswasser in Lösung gegangen sind, und ins Meer verfrachtet wurden. Dies geschieht meist unter Beteiligung von Organismen wie Riffkalk oder Kieselgur. Zu diesem Typus von Gesteinen gehören u. a. Kalkstein, Steinsalz, aber auch Torf und Kohle.

Für die Probenherstellung wurden zwei unterschiedliche Sedimentgesteine verwendet. Das klastische Rohrbacher Konglomerat und der bioklastische Leithakalk aus Kaisersteinbruch. Bei Gesteinstypen befinden sich im Wiener Becken.

2.1.1. Leithakalk aus Kaisersteinbruch

Der Leithakalk aus Kaisersteinbruch wurde in Steinbrüchen am Leithagebirge nahe der Ortschaft Kaisersteinbruch abgebaut.



Abbildung 19: Geografische Ansicht des Abbaubereiches von Leithakalk aus Kaisersteinbruch (von <http://www.bing.com/maps>, 13.04.2012)

2. Verwendete Gesteinstypen

Seine größte Bedeutung erlangte der auch „Kaiserstein“ genannte Leithakalk im 19. Jahrhundert als Werkstein für statisch anspruchsvolle Bauteile wie Überlager, Säulen oder Stiegenstufen. So wurde er wegen seiner hohen Festigkeit und Verwitterungsbeständigkeit für Bauteile im Schloss Schönbrunn, der Gloriette oder dem Kunst- und Naturhistorischem Museum verwendet. (ROHATSCH, 2007, S. 172-173)

ROHATSCH (2007, S. 172) beschrieb den Leithakalk aus Kaisersteinbruch als „*dichte, harte und feste, geschichtete, weiße bis bläuliche Kalkrotalgenkalke unterschiedlicher Korngröße (Grobsand bis Feinkies), die immer wieder kleine Gerölle von grauem Quarz und rostig verwittertem Glimmerschiefer, aber untergeordnet auch graue Dolomitkomponenten aufweisen*“.

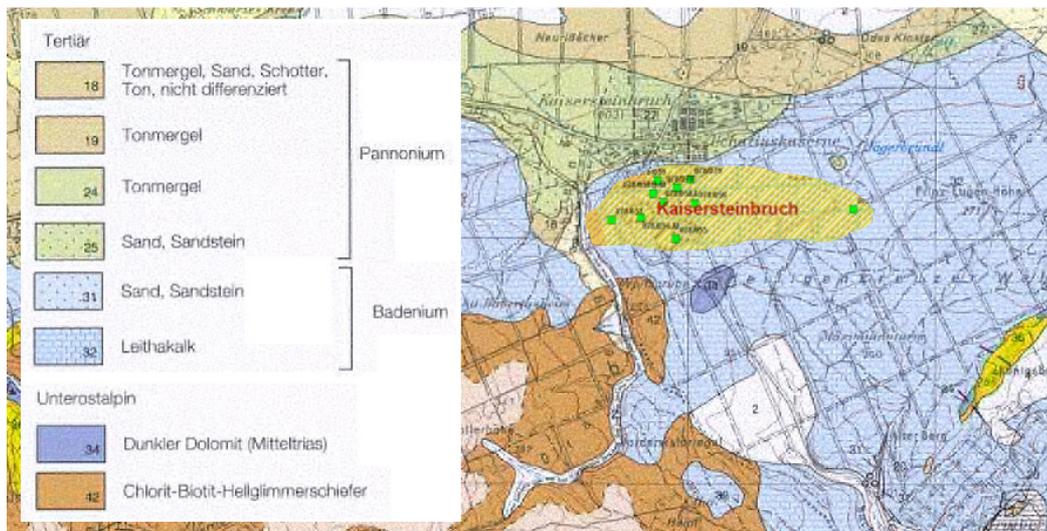


Abbildung 20: Ausschnitt geologische Karte der Republik Österreich, M 1:50.000, Blatt 78 Rust (modifiziert) und GBA Datenbank „Historic Quarries“ Eintrag zu Kaisersteinbruch

In Abbildung 20 sind die geologischen Verhältnisse in der Region Kaisersteinbruch dargestellt. Zusätzlich wurde in das Bild ein schraffierter Bereich mit grün markierten Standorten eingefügt. Diese zeigen die aufgelassenen Steinbrüche, wie z.B. den „Hausbruch“ oder den „Blauen Bruch“ an.



Abbildung 21: links: Blauer Bruch (© FURCH, H., 2007); rechts: Hausbruch um 1908 (© SCHAFER, F., 1908)
Beide Bilder entnommen von: [http://de.wikipedia.org/wiki/Kaiserstein_\(Gestein\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Kaiserstein_(Gestein)), 24.04.2012

2. Verwendete Gesteinstypen

2.1.2. Rohrbacher Konglomerat

Vergleiche hierzu (KOUKAL, 2009, S. 8-33) und (KOUKAL & WAGREICH, 2009, S. 454-456)

Konglomerate³ gehören zur Gruppe der klastischen Sedimentgesteine, und werden auch als Trümmergesteine bezeichnet. Sie bestehen aus gerundetem Kies oder Geröll, dessen Korndurchmesser 2 mm übersteigt, und einem feineren meist kalkhaltigem Bindemittel, in dem die Komponenten eingebettet sind. Dabei wurden die Bruchstücke je nach ihrem Abrasionswiderstand und dem zurückgelegten Weg abgerundet.

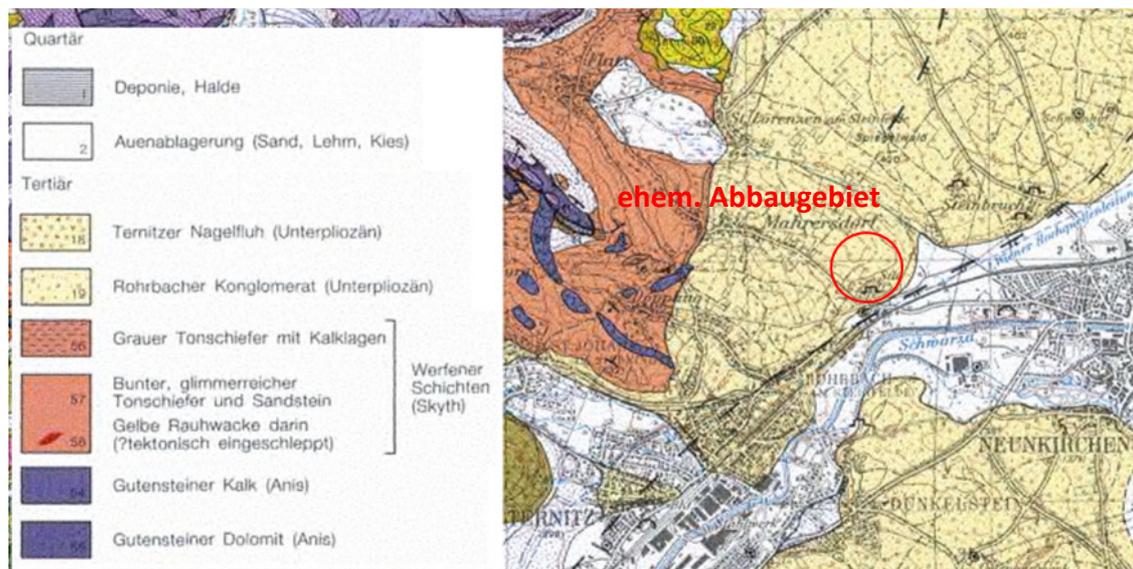


Abbildung 22: Ausschnitt geologische Karte der Republik Österreich, M 1:50.000, Blatt 105 Neunkirchen (modifiziert)

Der Herkunftsort des Rohrbacher oder auch Ternitzer Konglomerates ist die Rohrbach-Formation. Diese bildet aus geologischer Sicht die jüngsten neogenen sedimentären Ablagerungen des südlichen Wiener Beckens. Sie erstrecken sich vom unteren Sierningtal über Ternitz bis Urschendorf. BRIX & PLÖCHINGER (1988, S. 45) beschrieben das Konglomerat als „kreuzgeschichtete verfestigte Flussschotter, mit Einschaltungen von Sand-, Sandstein und Lehmlagen“. Die Komponenten des Konglomerats haben in der Regel einen Durchmesser von 2 bis 5 cm, und bestehen aus angerundeten bis gut gerundeten kalkalpinen Gesteinen der Zentralzone der Ostalpen. Diese sind in einer fein- bis grobkörnigen Sandsteinmatrix eingebettet. Hauptbestandteile der Rohrbacher Konglomerate sind Kalke, Dolomite und Sandsteine, sowie untergeordnete Gneise, Semmeringquarzite und Phyllite.

In Abbildung 23 ist das Abbaugelände des untersuchten Rohrbacher Konglomerates durch einen roten Kreis markiert. Der heute aufgelassene Steinbruch (vgl. Abbildung 24) befindet sich an der Mahersdorfer Straße, zwischen Neunkirchen und Mahersdorf, und wurde von der Fa. Bamberger betrieben.

³ lat. conglomerare: zusammenhäufen

2. Verwendete Gesteinstypen

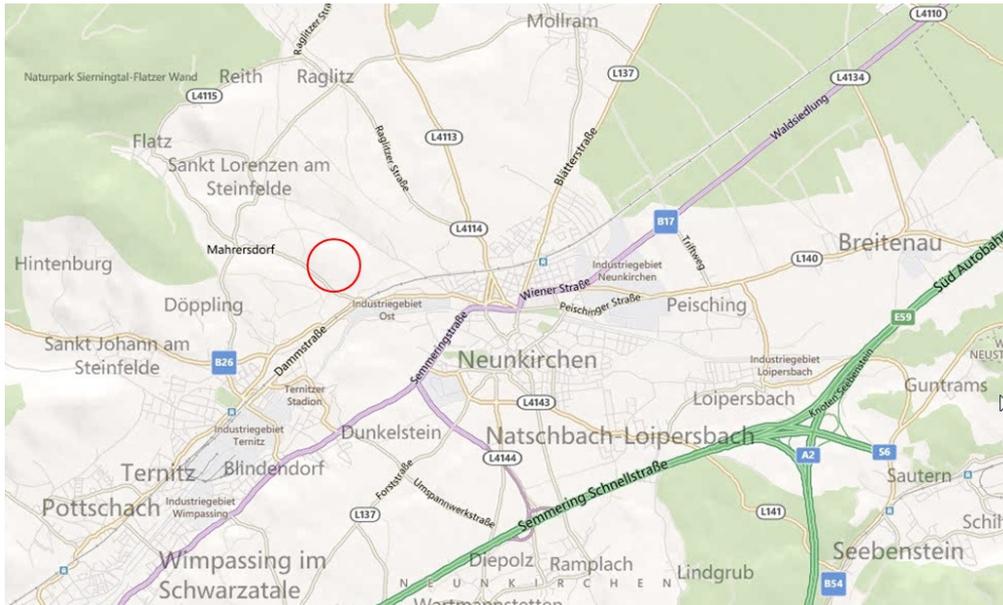


Abbildung 23: Geografische Ansicht des ehem. Abbaubereiches des Rohrbacher Konglomerates (von <http://www.bing.com/maps>, 13.04.2012)



Abbildung 24: Aufgelassener Steinbruch der Fa. Bamberger, aus (KOUKAL & WAGENREICH, 2009, S. 455)

Verwendung findet der Rohrbacher Konglomerat hauptsächlich in der näheren regionalen Umgebung als Dekorgestein für Geschäfts- und Hausfassadenverkleidungen. Weitere Verwendung fand er u. a. bei den gotischen Ausbauten des Doms in Wiener Neustadt und bei der ersten Wienerhochquellenwasserleitung.

2.2 Metamorphe Gesteine

Vergleiche hierzu (PRESS & SIEVER, 2003, S. 202-223) und (DRAGANITS, 2005)

Metamorphe Gesteine, oder auch Metamorphite, entstehen bei der Umwandlung eines beliebigen Gesteins in der Erdkruste unter dem Einfluss von Druck, Temperatur,

2. Verwendete Gesteinstypen

Porenwasser und Zeit. Die Metamorphose findet überwiegend in einer Tiefe zwischen 10 und 30 km statt, kann aber in seltenen Fällen auch Oberflächennah unter dem Einfluss von Vulkanismus erfolgen. Der Druck und die Temperatur sind auf folgende drei Ursachen zurückzuführen:

- die innere Wärme der Erde
- dem Gewicht der überlagernden Gesteine
- und dem horizontalen Druck während der Deformation der Gesteine

Abgegrenzt wird die Metamorphose von der Diagenese willkürlich, da für beide Vorgänge Druck und Temperatur notwendig sind. Jedoch sind diese beim Vorgang der Diagenese niedriger. Somit umfasst die Temperatur bei der Gesteinsmetamorphose einen Bereich von über 200°C bis zur Anatexis, dem Aufschmelzen der Gesteine, bei etwa 650 – 1200°C.

Zu den häufigsten Metamorphosearten zählen die Regional- und Kontaktmetamorphose, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

- **Regionalmetamorphose:** Ist der am häufigsten vertretene Typus, und tritt in ausgedehnten Bereichen der Kruste auf, wo sowohl hohe Temperaturen und auch Drücke herrschen.
- **Versenkungsmetamorphose:** Entsteht in tief versenkten Sedimentbecken. Hierbei geht die Diagenese durch höhere Temperaturen und Drücke, die durch die zunehmende Überlagerungen entstehen, in eine Metamorphose über.

Des Weiteren gibt es noch wie in Abbildung 25 zu sehen die Kontakt-, Hydro-, und Dynamometamorphose, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

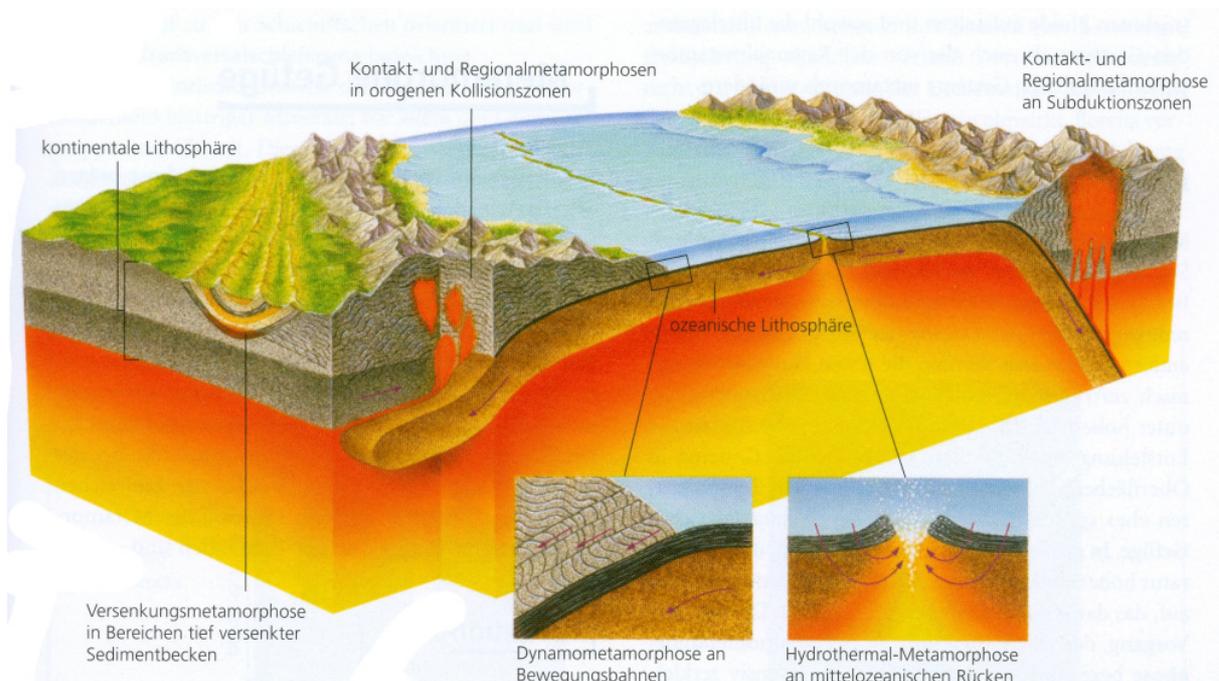


Abbildung 25: Arten der Metamorphose (PRESS & SIEVER, 2003, S. 208)

2. Verwendete Gesteinstypen

Zu den Metamorphiten gehören auch Marmore. Diese sind mittel- bis grobkörnige Metakarbonatgestein und bestehen aus zumindest 80% Kalzit. Weitere Bestandteile, die oft als „Verunreinigungen“ im Gefüge gelten, können beispielsweise Glimmer, Hornblenden, Pyrit oder Graphit sein. Marmore entstehen durch Kontakt- oder Regionalmetamorphose aus Kalksteinen oder Dolomiten.

Für die vorliegende Diplomarbeit wurden zwei unterschiedliche Marmore verwendet – der Sterzinger Marmor, und der Laaser Marmor. Beide Abbauggebiete befinden sich in Südtirol.

2.2.1. Sterzinger Marmor

Vergleiche hierzu (UNTERWURZACHER, 2007, S. 210-211)

Der Sterzinger Marmor, oder auch Ratschingser Marmor, trägt den Namen seiner Herkunftsgemeinden Sterzing und Ratsching, die sich im nördlichen Wipptal Südtirols befinden. Geologisch betrachtet, gehört er zum Schneeberger Zug des austroalpinen Stubai-Ötztal-Kristallins. Dieser setzt sich überwiegend aus Glimmerschiefer, Kalksilikatgesteinen und Paragneisen zusammen. Darin befinden sich Einlagerungen in Form von Linsen oder Zügen des Sterzinger Marmors.

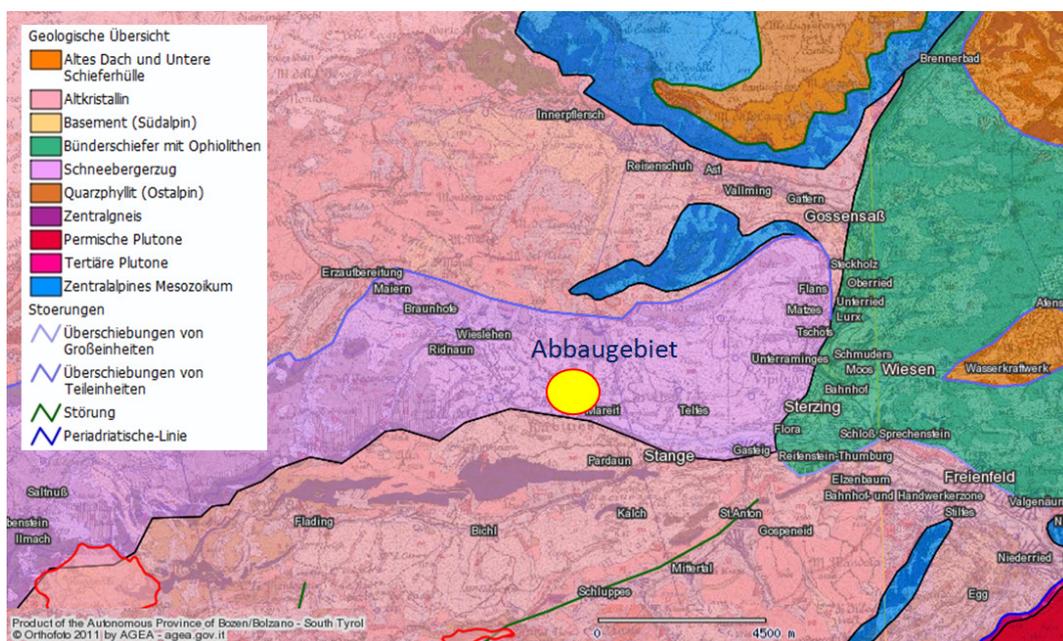


Abbildung 26: Ausschnitt geologische Karte der Provinz Bozen, M 1:100.000, Geobrowser Provinz Bozen (<http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser/>, 14.04.2012)

Der Marmor hat ein weißes bis weißgraues Erscheinungsbild, und ist überwiegend kalzitischer, teilweise auch dolomitischer Natur. Er besitzt eine durchschnittliche Korngröße von 0,8 bis 3,5 mm und gilt daher als grobkörniger Marmor. Funde des Minerals Eklogit, im

2. Verwendete Gesteinstypen

südlichen Bereich des Schneeberger Zuges, lassen auf eine Bildungstemperatur von etwa 550 bis 650 °C schließen, und einen Druck von mindestens 11 kbar.



Abbildung 27: Geografische Übersicht des Abbaugbietes Sterzinger Marmor (von <http://www.bing.com/maps>, 13.04.2012)

Abgebaut wird er heute noch am Mareiterstein nahe Pardaun, einer Nachbarortschaft von Ratsching. Hier wird der Marmor im Untertagbau mit dem Namen *Kristallina* des Unternehmens OMYA gefördert und gebrochen. Über einen 3,5 km langen Verbindungsstollen wird er im Förderbandbetrieb zur Weiterverarbeitung nach Pardaun transportiert. Verwendung findet er heute vor allem in Pulverform, als Füllstoff in der Papier- und Gummiindustrie oder als Marmorkörnung in der Putzindustrie, der Kunstmarmorplattenherstellung oder in der Düngemittelherstellung.

In der Renaissance und Barock galt der Sterzingers Marmor als beliebter Bildhauerstein. So wurden zum Beispiel im Park von Schloss Schönbrunn alle antiken Götter- und Heldenfiguren der Mythologie sowie die Figurengruppe des Neptunbrunnen aus ihm gehauen.

2.2.2. Laaser Marmor

Vergleiche hierzu (UNTERWURZACHER, 2007, S. 206-209)

Der Herkunftsort des Laaser Marmors ist der Mittelvinschgau in Südtirol, zwischen Töll bei Meran und Laas. Dort befinden sich im Altkristallin der Searl Decke die Laaser Marmorzüge, die eine Mächtigkeit von einigen Zehnermetern, stellenweise auch Hundertermeter erreichen können.

2. Verwendete Gesteinstypen



Abbildung 28: Geografische Übersicht des Abbaubereiches Laaser Marmor (von <http://www.bing.com/maps>, 13.04.2012)

UNTERWURZACHER (2007, S. 207) beschreibt den Laaser Marmor als einen „überwiegend reinweißen, teilweise auch weißgrauen gebänderten, fein bis mittelkörnigen Kalzitmarmor“ mit einer zunehmenden „durchschnittlichen Korngröße (...) von 0,3 bis 1,0 mm von Laas im Westen bis zu 0,8 bis 1,4 mm bei Morter im Osten“. Dies lässt auf einen steigenden Metamorphosegrad von West nach Ost schließen, da mit steigender Metamorphose die Grobkörnigkeit des Marmors zunimmt. Schätzungen zufolge lag die Entstehung des Laaser Marmors im Bereich der Amphibolit-Fazies, bei Temperaturen von etwa 500 °C, und Drücken zwischen 4 bis 6 kbar.

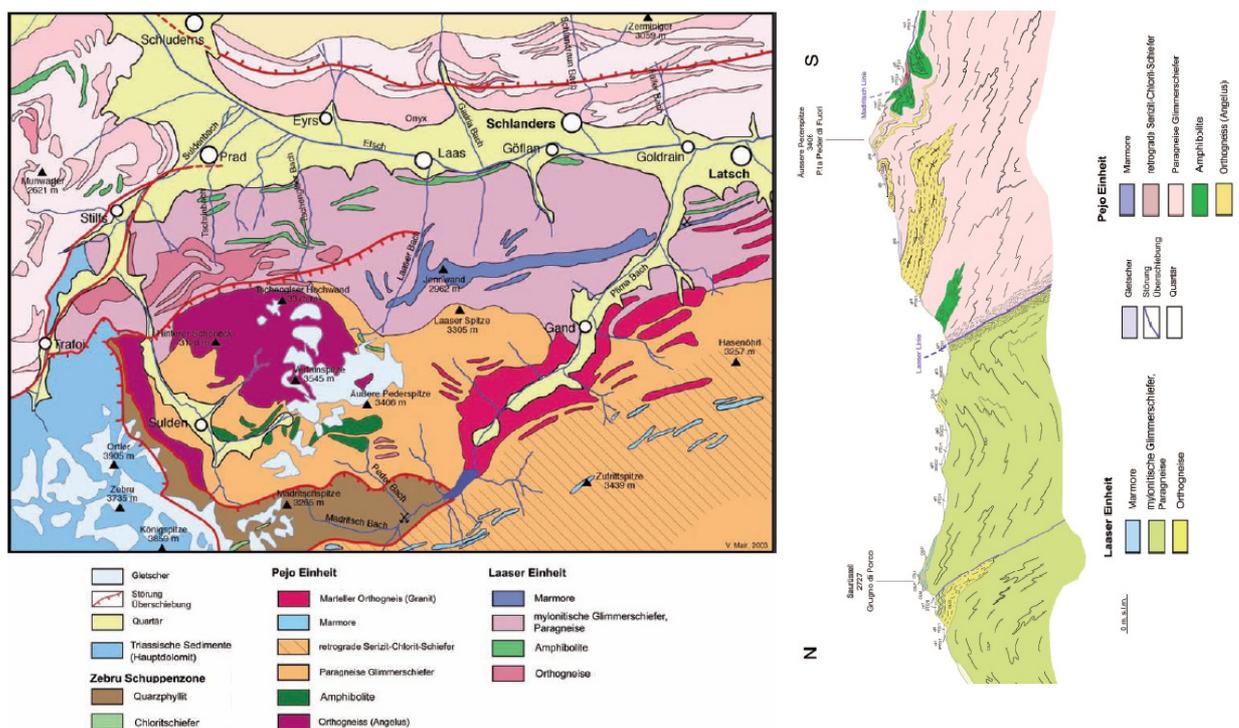


Abbildung 29: Geologische Karte und Schnitt der Laaser Marmorprovinz (Mair, 2007)

2. Verwendete Gesteinstypen

Heute wird der Laaser Marmor in folgenden Steinbrüchen abgebaut:

- **Weißwasserbruch:** Hier erfolgt ein ganzjähriger Abbau des rein weißen Marmors im Untertagebau auf 1526 m Seehöhe. Dabei wird der Werkstein in Abbauhallen mit einer Länge von 100 m, einer Breite von 20 m und einer Höhe zwischen 30 und 40 m mit Diamantseilsägen und Schrämmaschinen gewonnen. Der Abtransport, der so hergestellten Rohblöcke, erfolgt dann über einen Schrägaufzug ins Tal zur weiteren Verarbeitung.
- **Göflaner Marmorbrüche:** Hier wird der Marmor an zwei Stellen abgebaut. Im Mitterwandlbruch und im Jennwandlbruch. Beide Brüche liegen über 2200 m Seehöhe und zählen zu den höchsten Marmorsteinbrüchen Europas. Sie können nur in den schneefreien Sommermonaten betrieben werden. Im Gegensatz zum Mitterwandlbruch, bei dem im Ober- und Untertagebau Marmor gewonnen wird, erfolgt der Abbau in der fast senkrechten Jennwand über einen Stollen der nur mit einer Lastenseilbahn zugänglich ist.

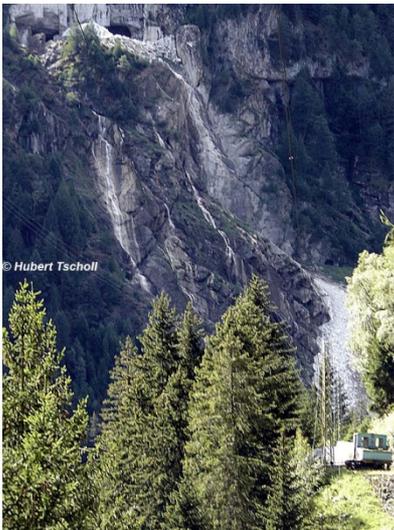


Abbildung 30: Zugang Stollen Weißwasserbruch in der Weißwasserwand (© Tscholl H., 2007, http://www.sagen.at/doku/Laas/Laas_Schraegbahn_3.html, 14.04.2012)



Abbildung 31: Göflaner Mitterwandlbruch (©Göflaner Marmor GmbH, <http://www.covelanomarmi.it>, 14.04.2012)

Verwendung findet der Marmor vor allem als Bildhauermaterial und als Werk- und Dekorstein.

2.3 Herstellung und Bezeichnung der Prüfkörper

Wie in der Norm beschrieben wurden die Prüfkörper in Zylinderform hergestellt. Das Verhältnis von Probenhöhe zu Probendurchmesser sollte dabei zwischen zwei und drei liegen, und deren kleinster Durchmesser 50 mm. Eine weitere Anforderung war, dass der Durchmesser bzw. die Seitenlänge des Prüfkörpers, zum größten Korn im Gestein, in einem

2. Verwendete Gesteinstypen

Verhältnis von mindestens 10:1 stehen muss. Dies konnte beim Rohrbacher Konglomerat nicht eingehalten werden.



Abbildung 32: Herstellung eines Ø100 mm Bohrkerns aus Sterzinger Marmor



Abbildung 33: Herstellung eines Ø70 mm Bohrkerns aus dem Leithakalkblock aus Kaisersteinbruch Nr. IV

In Summe wurden für diese Diplomarbeit 190 Prüfkörper mit einem Seitenverhältnis von $d:h = 1:2$ hergestellt, wobei je nach Gesteinstyp bis zu drei Versuchskörper mit $\varnothing 50$ mm und zwei mit $\varnothing 70$ mm zum Einstellen der unteren und mittleren Spannung lt. ÖNORM EN 14580 hergestellt wurden (vgl. Tabelle 1). Aus diesen 18 Proben wurden keine Gesteinskennwerte gewonnen, und sie scheinen in den Diagrammen auch nicht mehr auf.

Übersicht über die hergestellten Probekörper	Anzahl der Probekörper nach Durchmesser \varnothing [mm]					Total
	20	50	70	100	150	
Versuchsreihe 1						
Sterzinger Marmor	-	10 (13)*	10 (12)	10	6	
Laaser Marmor	10	10	10	-	-	
Rohrbacher Konglomerat	-	10(13)	10(12)	6	-	
Leithakalk aus Kaisersteinbruch						
Block I	-	-	-	4	-	
Block II	-	-	4(6)	1	-	
Block III	-	-	-	5	-	
Block IV	-	10(13)	6	-	-	
Summe	10	40(49)	40(46)	26	6	122(137)
Versuchsreihe 2						
Sterzinger Marmor	-	6	-	3	-	
Laaser Marmor	-	3	3	-	-	
Rohrbacher Konglomerat	-	6	-	5	-	
Leithakalk aus Kaisersteinbruch						
Block V	-	12(15)	12	-	-	
Summe	0	27(30)	15	8	0	50(53)
Total						172(190)

Tabelle 1: Übersicht über die Anzahl der hergestellten Prüfkörper; * die Werte in Klammern geben Anzahl der hergestellten Prüfkörper mit jenen zum Einstellen der Spannung an

2. Verwendete Gesteinstypen

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, wurden die Prüfkörper des Leithakalks aus Kaisersteinbruch aus fünf verschiedenen Blöcken hergestellt, wobei für die 1. Versuchsreihe nur die Blöcke I bis IV Verwendung fanden. Für die 2. Versuchsreihe wurde ein neuer Block mit der Nr. V aufgebohrt und untersucht.

2.3.1. Oberflächenausführung

Die Grund- und Deckfläche der zylinderförmigen Prüfkörper, an denen im späteren Versuchsverlauf die Last zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit aufgebracht wurde, mussten mit einer zulässigen Abweichung von 0,1 mm eben sein, und die Rechtwinkeligkeit durfte, bezogen auf die Prüfkörperachse nicht mehr als 0,01 Radiant von ihr abweichen. Des Weiteren mussten die Seitenflächen des Zylinders frei von abrupten Diskontinuitäten sein, und durften über die gesamte Länge des Prüfkörpers eine maximale Abweichung von 0,3 mm haben.



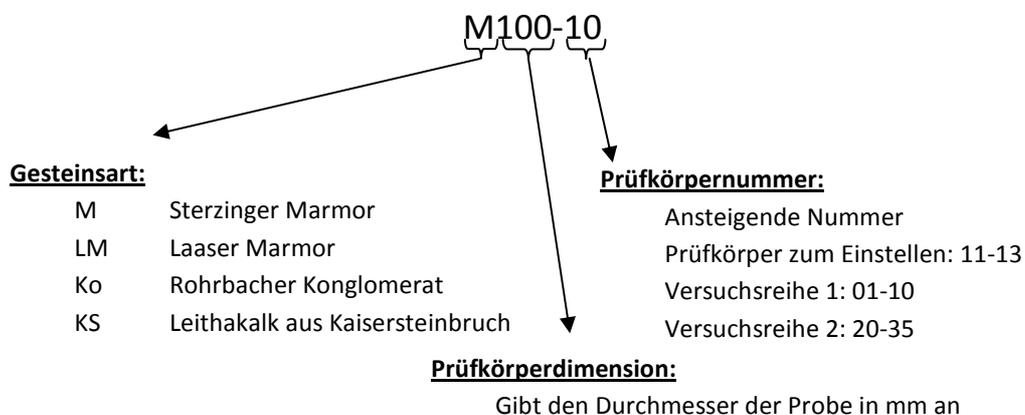
Abbildung 34: Bohrkern aus Sterzinger Marmor



Abbildung 35: Schleifen einer abgelängten Sterzinger Marmorprobe

2.3.2. Bezeichnung

Die Bezeichnung der Bohrkern folgt dem Schema am Bsp. von M100-10:



Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Prüfkörper der 1. und 2. Versuchsreihe.

2. Verwendete Gesteinstypen



Abbildung 36: Prüfkörper der 1. Versuchsreihe: v.l. Sterzinger Marmor, Leithakalk aus Kaisersteinbruch, Rohrbacher Konglomerat und Laaser Marmor



Abbildung 37: Prüfkörper der 2. Versuchsreihe

3 Angewandte Prüfmethode

Um einen möglichen Einfluss der Prüfkörperdimension auf die einaxiale Druckfestigkeit sowie stat. und dyn. E-Modul zu zeigen, musste vorab sichergestellt werden, dass alle Prüfkörper ähnliche Gesteinseigenschaften aufweisen. Aus diesem Grund wurden vor den zerstörenden Prüfungen mit der Prüfpresse folgende Kennwerte ermittelt, welche die Gefügeeigenschaften, wie Porosität und Dichte eines Gesteins in ausreichender Genauigkeit beschreiben:

- Dichtebestimmung: Rohdichte, Reindichte (an ausgewählten Probestücken) gemäß ÖNORM EN 1936: 2007-02-01
- massebezogene Wasseraufnahme gemäß ÖNORM EN 13755: 2008(D)
- offene Porosität und Gesamtporosität gemäß ÖNORM EN 1936: 2007-02-01
- Ultraschalllaufzeit und die daraus errechnete Ultraschallgeschwindigkeit gemäß ÖNORM EN 14579: 2005-01-01
- an ausgewählten Probestücken wurden Quecksilberporosimetermessungen zur Bestimmung der Porenradienverteilung, des Porenvolumen, der Porenoberfläche, etc. durchgeführt

3.1 Dichtebestimmung und massebezogene Wasseraufnahme

3.1.1. Allgemeines

Bei der Dichtermittlung eines porösen Materials, wie es auch bei Natursteinen der Fall ist, unterscheidet man zwei verschiedene Arten von Dichte. vgl. (NEROTH & VOLLENSCHAAR, 2011, S. 8-9)

- Die **Rohdichte oder scheinbare Dichte**: Diese errechnet sich aus der gemessenen Trockenmasse durch das Volumen des Körpers einschließlich deren geschlossener Porenräume (Kornporen)
- Zur Messung der **Reindichte oder wahren Dichte** gibt es mehrere Möglichkeiten. Bei der klassischen Methode wird das Material bis zu seiner Porenfreiheit zerkleinert und danach das Partikelvolumen mit einem Pyknometer gemessen. Im Anschluss wird die gemessene Masse durch das Volumen dividiert. Andere Möglichkeiten zur Messung Reindichte wären die Verwendung eines Heliumpyknometers (vgl. Kapitel 3.1.6) oder im Zuge der Porosimetermessung (vgl. Kapitel 3.2)

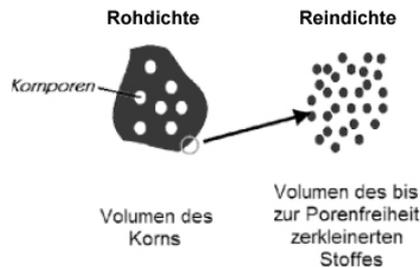


Abbildung 38: Volumen für die Bestimmung der verschiedenen Dichten (NEROTH & VOLLENSCHAAR, 2011, S. 8)

Die Ermittlung der Rohdichte sowie der offenen Porosität und Gesamtporosität erfolgte nach ÖNORM EN 1936: 2007-02-01: „Prüfverfahren von Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität“. Zur Bestimmung der Reindichte wurde ein Heliumpyknometer verwendet. Zusätzlich zu dieser Messung wurde sie auch in der Porosimetermessung errechnet.

Im selben Arbeitsgang wurde auch die massebezogene Wasseraufnahme nach ÖNORM EN 13755:2008(D): „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck“ bestimmt.

In den nachfolgenden Kapiteln 3.1.3 bis 3.1.5 wurden folgende Symbole verwendet:

m_d	Trockenmasse des Prüfkörpers, in [g]
m_h	Masse des in Wasser eingetauchten Prüfkörpers, in [g]
m_s	Masse des gesättigten Prüfkörpers, in [g]
V_b	Rohvolumen des Prüfkörpers, in [ml]
A_b	Wasseraufnahme bei atmosphärischem Druck, in [M%]
ρ_b	Rohdichte des Prüfkörpers, in [kg/m ³]
ρ_r	Reindichte des Prüfkörpers, in [kg/m ³]
ρ_{rh}	Dichte des Wassers, in [kg/m ³]
p_o	offene Porosität des Prüfkörpers, in [%]
p	Gesamtporosität des Prüfkörpers, in [%]

3.1.2. Verwendete Geräte

Die Massebestimmungen erfolgten auf zwei unterschiedlichen Geräten:

- **Mettler Waage - Model: P 2010 N, mit Durchhang**
Für Prüfkörper mit einer Masse von bis zu 2000 g (Ø20 mm, Ø50 mm, Ø70 mm), mit einer Messgenauigkeit von 0,1 g
- **Schember Tafelwaage mit Neigungsgewichteinrichtung**
Für Prüfkörper mit einer Masse über 2000 g (Ø100 mm, Ø150 mm), mit einer Messgenauigkeit von 5 g und selbstgebauter Einrichtung zur Messung der Masse unter Auftrieb



Abbildung 39: Mettler Waage mit Durchhang



Abbildung 40: Schemper Tafelwaage mit selbstgebauter Einrichtung zur Messung der Masse unter Auftrieb

3.1.3. Rohdichte

Für den ersten Teil der Messung wurden die Prüfkörper im Ofen bei 70°C bis zur Massekonstanz getrocknet. Nachdem sie sich auf Raumtemperatur abkühlt hatten, erfolgte die Messung der Trockenmasse m_d . Der nächste Schritt beinhaltete die Ermittlung der Wasseraufnahme der Probekörper. Dazu wurden sie in einem wassergefüllten Becken auf Gitter gelegt, damit das Wasser zu allen Gesteinsoberflächen ungehindert Zutritt hatte. Nach ausreichender Wasserlagerung konnten die Massen der gesättigten Proben m_s und die Massen unter Auftrieb m_h ermittelt werden. Als Prüfflüssigkeit wurde Leitungswasser verwendet. Unter Verwendung des nachfolgenden Formelsatzes und der Dichte des Wasser bei 20°C ($\rho_{rh}=998,203 \text{ kg/m}^3$), wurde das Rohvolumen V_b und die Rohdichte ρ_b der Proben ermittelt.

$$V_b = \frac{m_s - m_h}{\rho_{rh}} [\text{m}^3] \quad (3.1)$$

$$\rho_b = \frac{m_d}{V_b} [\text{kg/m}^3] \quad (3.2)$$

3.1.4. Offene Porosität und Gesamtporosität

Die offene Porosität p_o errechnet sich als das Verhältnis des Volumens der offenen Poren und des Rohvolumens des Prüfkörpers und wird in Prozent angegeben.

$$p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \cdot 100 [\%] \quad (3.3)$$

3. Angewandte Prüfmethode

Die Gesamtporosität p wird als das Verhältnis in Prozent des Volumens der offenen und geschlossenen Poren und des Rohvolumens des Prüfkörpers errechnet.

$$p = \frac{\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_r}}{\frac{1}{\rho_b}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) \cdot 100 [\%] \quad (3.4)$$

3.1.5. Massebezogene Wasseraufnahme

Die massebezogene Wasseraufnahme der Prüfkörper bei atmosphärischem Druck wurde nach EN 13755:2008 (D): „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck“ nach folgender Formel bestimmt:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} [M\%] \quad (3.5)$$

3.1.6. Reindichte

Vergleiche hierzu (MICROMERITICS-Handbuch)

Die Bestimmung der Reindichte erfolgte mittels eines Heliumpyknometers der Marke „Micromeritics Multivolume Pycnometer 1305“ (vgl. Abbildung 43) und einer Analysewaage der Firma „Sartorius“, Modell „CP64“ (vgl. Abbildung 44), mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,1$ mg. Die Messungen erfolgten im Laborgebäude des Instituts für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit.

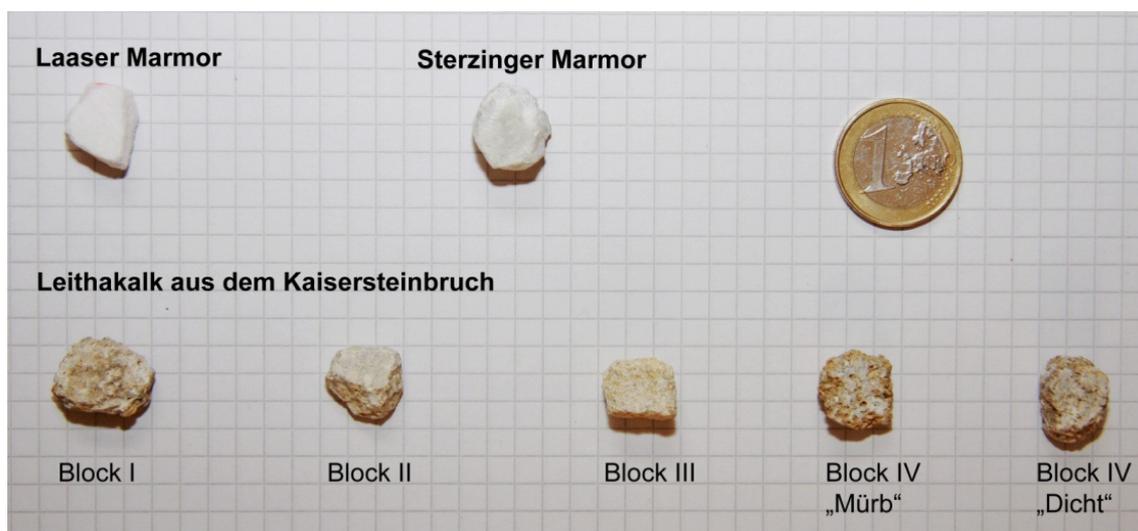


Abbildung 41: verwendete Proben für die Reindichtebestimmung im Heliumpyknometer

3. Angewandte Prüfmethode

Messprinzip:

Mit dem Pycnometer wird das Volumen einer Probe bestimmt, in dem die Gasverdrängung in der Probenkammer durch die Probe ermittelt wird. Verwendet wurde dazu das Inertgas Helium, das zwar in enge außenliegende Poren und Zwischenräume eindringen kann, nicht aber in die im inneren abgeschlossenen Hohlräume.

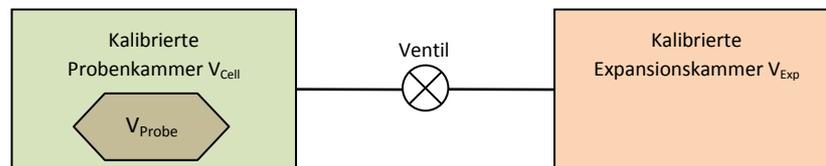


Abbildung 42: Messprinzip Heliumpycnometer

Messablauf:

Vor Beginn der Messung wird eine Gesteinsprobe von rund 3 g in den Messbehälter des Heliumpycnometers eingelegt, und der Schraubverschluss verschlossen. Danach wird die Probenkammer mit $19,500 \pm 0,200$ psig beaufschlagt (Ergebnis: P_1). Anschließend wird das Gas durch ein Ventil in eine zweite, ebenfalls genau kalibrierte Expansionskammer entspannt (Ergebnis: P_2). Daraus resultiert ein Druckabfall, der proportional der Größe der Probe in der Probenkammer ist. Durch Anwendung des idealen Gasgesetzes kann aus dem Verhältnis der Druckwerte P_1 und P_2 , und der durch die Kalibrierung bekannten Volumen von der Probenkammer ($V_{Cell} = 7,8282 \text{ cm}^3$) und der Expansionskammer ($V_{Exp} = 6,1115 \text{ cm}^3$), das Volumen der Probe berechnet werden.



Abbildung 43: Heliumpycnometer - Micromeritics Multivolume Pycnometer 1305



Abbildung 44: Analysewaage zur Messung der Probenmasse

Die Reindichte errechnete sich dann nach folgenden Formeln:

$$V_{Probe} = V_{Cell} - \frac{V_{Exp}}{\frac{P_1}{P_2} - 1} [cm^3] \quad (3.6)$$

$$\rho_{Probe} = \frac{m_{Probe}}{V_{Probe}} [g/cm^3] \quad (3.7)$$

3.2 Porosimetermessungen

Ebenfalls am Institut für Hochbau und Technologie wurden Porosimetermessungen durchgeführt. Mit diesen Messungen sind Aussagen über Porenradienverteilung, Porenvolumen, spezifische Porenoberfläche, Dichte und Porosität des Gesteins möglich.

Dieses Verfahren beruht auf dem Einpressen der nicht benetzbaren Flüssigkeit Quecksilber mit bis zu 400 MPa in die Probe, wobei zuerst die großen Poren mit kleinem Druck gefüllt werden. Mit stetig steigendem Druck werden, im Laufe der Messung, auch die kleineren Poren gefüllt. Durch die andauernde Messung des verpressten Quecksilbervolumens und dem zugehörigen Druck, wird mit Hilfe der WASHBURN-Gleichung die entsprechende Porenweite errechnet.



Abbildung 45: Porotec Pascal 440 Porosimeter
(von <http://www.porotec.de/>)

3.3 Ermittlung der Ultraschalllaufzeit und Ultraschallgeschwindigkeit

Zur Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeit sind einerseits die genauen Längen der Prüfcylinder, und andererseits die Durchlaufzeiten der Schallwellen notwendig. Die Prüfkörper wurden mit einem Messschieber durch 2 Messungen, die um 90° versetzt waren, auf 0,1 mm genau gemessen. Aus diesen beiden Werten wurde dann die mittlere Länge der einzelnen Prüfkörper errechnet.⁴

Die Ermittlung der Ultraschalllaufzeit der Prüfkörper erfolgte mit dem Impuls-Laufzeitverfahren. Hierbei wurden die Sender und Empfängereinheit an die Deckflächen der

⁴ Längenmessung der Proben erfolgte nach ÖN EN 14580:2005

3. Angewandte Prüfmethoden

zylinderförmigen Prüfkörper gepresst, um ein sattes Aufliegen der beiden Komponenten zu gewährleisten. So ergab sich ein (fast) idealer Übergang der Schallwelle in den Prüfkörper. Die Messungen erfolgten auf zwei unterschiedliche Arten, um mögliche Abweichungen zwischen der Ultraschalllaufzeit im Labor (Druckstativ) und im Feld (händisch) aufzuzeigen.

- **Druckluftstativ**

Hierbei erfolgte der Anpressdruck der beiden Messköpfe auf die Proben über ein Druckluftstativ mit 0,7 MPa

- **Feldmessung**

Bei diesem Verfahren wurden die Proben auf zwei Gummiplatten gelegt, die zur Entkopplung der Schallwellen dienten. Der Anpressdruck der Sender- und Empfängereinheit wurde danach mittels der Hände erzeugt, um ein Messergebnis im Feld zu simulieren.



Abbildung 46: Ultraschallmessung eines Leithakalkprüfkörpers mittels Druckluftstativ und im "Feld"

3.3.1. Messdurchführung und Berechnung der Ultraschallgeschwindigkeit

Nach dem Anschluss des Druckluftstativs über einen Druckluftschlauch an den Kompressor, wurde das Messgerät im ersten Schritt an einem Prüfstab aus Kunststoff kalibriert. Dazu ist der Stab zwischen der Sender- und Empfängerelement im Druckluftstativ mit 0,7 MPa eingespannt worden. Nach dem Einpendeln der Impulslaufzeit wurde, mittels Feineinstellung am Messgerät, die angezeigte Zeit am Display so lange korrigiert, bis sie mit der am Prüfstab übereinstimmte.

Im folgenden Messverlauf wurden von jedem Prüfkörper je drei Messungen der Ultraschalllaufzeit mittels Druckluftstativ und von Hand durchgeführt, und daraus zwei Mittelwerte $t_{m,Stativ}$ und $t_{m,Hand}$ gebildet.

$$t_{m,Stativ} = \frac{t_{1,Stativ} + t_{2,Stativ} + t_{3,Stativ}}{3} \quad (3.8)$$

$$t_{m,Hand} = \frac{t_{1,Hand} + t_{2,Hand} + t_{3,Hand}}{3} \quad (3.9)$$

Aus den mittleren Laufzeiten wurde in Folge, mit bekannter Probenhöhe h , die Ultraschallgeschwindigkeit der Kompressionswelle v_K wie folgt ermittelt:

$$v_{K,Stativ} = \frac{h}{t_{m,Stativ}} \quad (3.10)$$

$$v_{K,Hand} = \frac{h}{t_{m,Hand}} \quad (3.11)$$

3.3.2. Mathematische Beschreibung der Ultraschalllaufzeit

Vergleiche hierzu (FLEISCHER, 2002, S. 62-63)

Der Zusammenhang der Ultraschalllaufzeit zur Messdistanz kann mathematisch über eine Regressionsgerade beschrieben werden.

Die Gleichung der Regressionsgeraden lautet wie folgt:

$$y = k \cdot x + d \quad (3.12)$$

y... Wert für die Ultraschalllaufzeit [μs]

k... Steigung der Geraden ($k = \tan \alpha$) [$\mu\text{s}/\text{mm}$]

x... die Messdistanz [mm]

d... Achsenabschnitt (Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate) [μs]

Hierbei kann das **konstante Glied d** der Geradengleichung als wegunabhängiger Zeitverlust der Messungen interpretiert werden, und ist auf die Kopplung zwischen der Sender- oder Empfängereinheit und der Probe zurückzuführen. In diesem Kopplungsverlust stecken diverse Faktoren, wie der Anpressdruck der Messköpfe auf die Probe oder die Oberflächenrauigkeit der Probe selbst. Je näher d bei null liegt, desto genauer sind die Messergebnisse über kurze Distanzen. Liegt der d-Wert im negativen Bereich, so deutet dies auf eine Störung der Messung über eine längere Messdistanz hin.

Die **Steigung k** hingegen gibt Aufschluss über die Umwege der US-Welle in der Probe, und kann als Verzögerungsfaktor interpretiert werden. Diese „Umwege“ der Ultraschallwelle können auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

3. Angewandte Prüfmethoden

- Störungshäufigkeit (wenn das Gefüge der Probe durch Risse oder Poren gestört oder aufgelockert ist)
- Störungsausdehnung (wenn Risse in der Probe umgangen werden müssen)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Steigung umso größer ist, je gestörter die Probe ist.

3.3.3. Einflüsse auf die Ultraschalllaufzeit

Vergleiche hierzu (FLEISCHER, 2002, S. 79-103)

Bei der Ermittlung der Ultraschalllaufzeit können diverse gesteinspezifische Parameter und Randbedingungen Einflüsse auf das Messergebnis ausüben. Diese können entweder dem **Kopplungsverlust d**, oder dem **Verzögerungsfaktor k** der Geradengleichung $y=k \cdot x+d$ zugerechnet werden.

Dem **Kopplungsverlust d** ist im Wesentlichen der Anpressdruck, die Oberflächenrauigkeit, und ein eventuelles Kopplungsmedium zwischen dem Prüfkörper und der Sende- und Empfängereinheit zuzurechnen. Hierbei ist zu beachten, dass diese drei Einflüsse meist als gemeinsames System gesehen werden, da je nach Oberflächenbeschaffenheit der Probe und des Kopplungsmedium, ein bestimmter minimaler Anpressdruck der Messköpfe auf die Probe herrschen muss. Unterhalb dessen kommt es, je nach Probenmaterial, teils zu erheblichen Kopplungsfehlern und Abweichungen bei der Laufzeitmessung.

Ebenfalls große Bedeutung kommt dem Kopplungsmedium in Bezug auf die Oberflächenbeschaffenheit zu, wie z.B. dem Ausgleich von gekrümmten oder rauen Oberflächen.

Der **Verzögerungsfaktor k** wird maßgeblich vom Wassergehalt und der Temperatur der Probe selbst beeinflusst, wobei hier die Einflüsse stark vom Gefüge abhängig sind. Bei kleinporigen Marmoren, wie dem Sterzinger Marmor, kommt es durch Temperaturendehnungen des Materials zu kleineren Laufzeiten, wohingegen bei grobporigem Material nur bedingte Abweichungen möglich sind. Gleichfalls kann es durch Porenwasser im Gestein bei der Ultraschallmessung zu großen Differenzen kommen, wobei hier das Verhältnis zwischen Korngröße und Porengeometrie wesentlich ist. So kann es zu einer Verlängerung oder Verkürzung der Ultraschalllaufzeiten kommen.

3.4 Ermittlung des statischen und dynamischen Elastizitätsmoduls sowie der einaxialen Druckfestigkeit

3.4.1. Dynamisches Elastizitätsmodul

Vergleiche hierzu (RENTSCH & KROMPHOLZ, 1963)

Die Berechnung des dynamischen Elastizitätsmoduls basiert auf der Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten und der Rohdichten der Natursteine. Des Weiteren ist noch ein Proportionalitätsfaktor, die Poisson'sche Zahl (oder auch Querdehnzahl) μ , notwendig. Diese gibt den Zusammenhang der Querverformung zur Längsverformung an, und wird für die Berechnung des dyn. E-Moduls mittels Ultraschallmessungen bestimmt.

$$\mu = \frac{1 - 2 \cdot \frac{v_s^2}{v_K^2}}{2 - 2 \cdot \frac{v_s^2}{v_K^2}} \quad (3.13)$$

Hierbei ist v_s die Scherwelle (Transversalwelle) und v_K die Kompressionswelle (Longitudinalwelle). Da die Poisson'sche Zahl, die für Natursteine im Bereich von $\mu=0,20$ bis $\mu=0,30$ liegt, wurde mit $\mu=0,25$ festgelegt.

Daraus errechnet sich der dynamische Elastizitätsmodul wie folgt:

$$E_{dyn} = \rho \cdot v_K^2 \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - \mu)}{1 - \mu} \quad (3.14)$$

3.4.2. Einaxiale Druckfestigkeit und statisches Elastizitätsmodul

Die Berechnung des statischen E-Moduls erfolgte nach ÖNORM EN 14580: „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls“. Hierbei wurden die Prüfkörper nach Einbau in die Prüfpresse drei Belastungs- und Entlastungszyklen unterzogen, wie man in nachfolgender Abbildung erkennen kann.

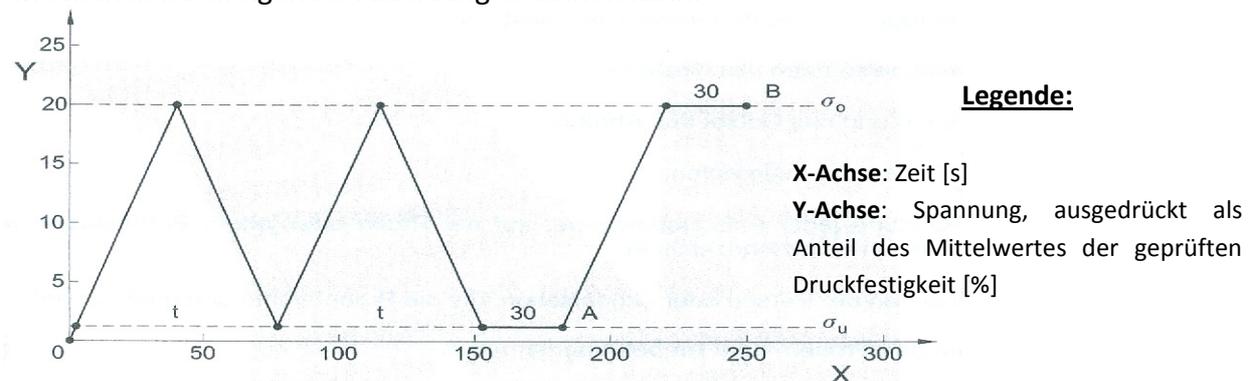


Abbildung 47: Spannungs-Zeit Diagramm zur Bestimmung des stat. E-Moduls, Beispiel für ein Gestein mit einer Druckfestigkeit von 60 MPa

3. Angewandte Prüfmethoden

Bei diesem Vorgang wird die Last mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von $(0,5 \pm 0,2)$ MPa/s zwischen der Grundspannung σ_u und der größten Spannung σ_o gewechselt. Bei den Punkten **A** und **B** (vgl. Abbildung 47) wird die entsprechenden Verformungen ε_u und ε_o gemessen. Nach der Messung am Punkt **B** wird der Prüfkörper mit derselben Belastungsgeschwindigkeit bis zum Versagen beansprucht. Daraus ergibt sich die einaxiale Druckfestigkeit R_d .

Die Grundspannung σ_u und größte Spannung σ_o liegt, wie in der Norm angegeben, bei rund 2% bzw. bei rund 33% des Mittelwertes, der im Vorhinein an Testprüfkörpern geprüften einaxialen Druckfestigkeit. Sollten mehr als 20% Abweichungen vom Mittelwert auftreten, so schreibt die Norm vor, dies zu vermerken.

Der statische E-Modul errechnet sich nach folgender Formel:

$$E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad (3.15)$$

Die Verformungen ε_u und ε_o wurden hierbei von zwei Dehnungsaufnehmer Typ DD1 der Marke HBM⁵ aufgenommen, wobei die Messsensoren für den Messaufbau auf Aluminiumstäbe montiert wurden. Für die Messung der großen Proben mit einem Durchmesser von 100 mm und 150 mm wurde diese Konstruktion zusätzlich um zwei Profilwinkel und Gewindestangen erweitert. (vgl. Abbildung 48)

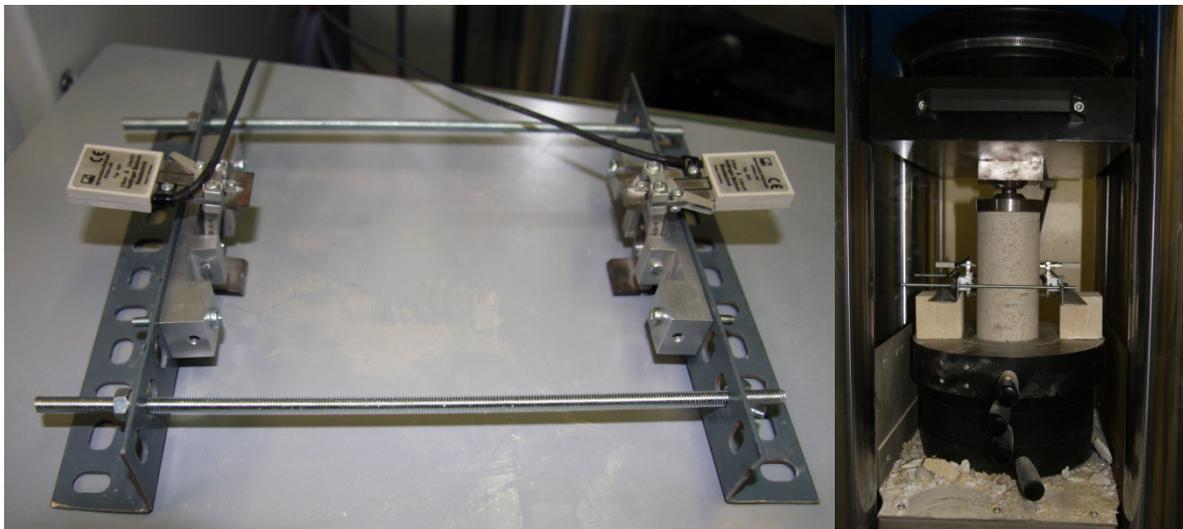


Abbildung 48: Dehnungsaufnehmer zur Messung von ε_u und ε_o

Die Prüfung selbst erfolgte über eine hydraulisch angetriebene 3000 kN 4-Säulen Druckprüfmaschine der Firma ATH (Austro Test Hrdina GmbH). Die Steuerung der Prüfpresse und Auswertung der gewonnenen Daten wurde über die zugehörige Software Test&Motion von DOLI Elektronik GmbH gelöst. (vgl. Abbildung 49)

⁵ Hottinger Baldwin Messtechnik, vgl. <http://www.hbm.com>

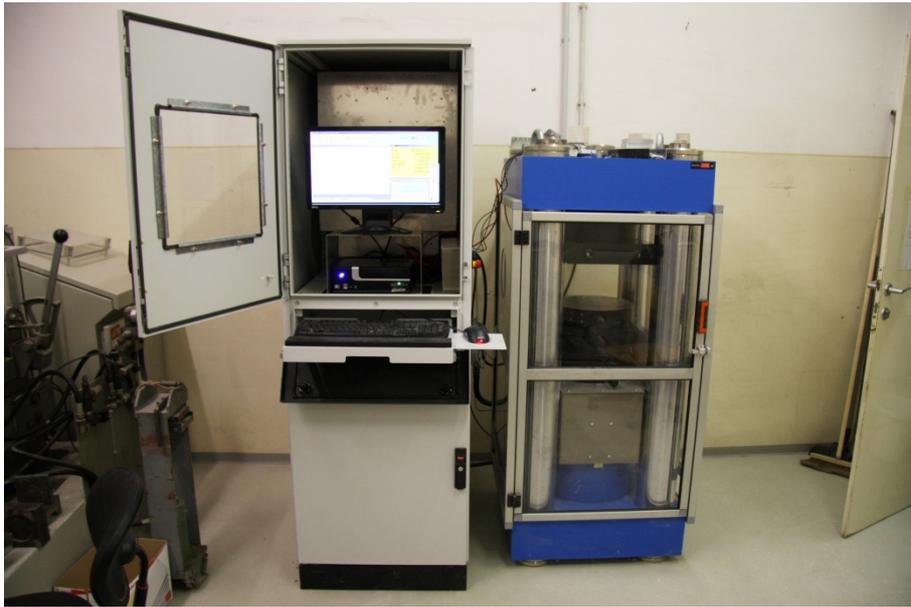


Abbildung 49: 3000 kN Prüfpresse und Steuerungseinrichtung

4 Anmerkungen zur Messdurchführung

4.1 Dichtebestimmung und massebezogene Wasseraufnahme

Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, wurden die Dichtebestimmung und die Wasseraufnahme der Prüfkörper auf zwei Waagen mit verschiedenen Genauigkeitstoleranzen durchgeführt. Dies kann in Kombination mit den verschiedenen Prüfkörperabmessungen zu unterschiedlichen Abweichungen innerhalb der Messtoleranzen führen. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wurde pro Prüfkörpergröße die maximal mögliche Abweichung der Rohdichte von der tatsächlich gemessenen Rohdichte berechnet.

Dabei wurde folgende Vorgehensweise angewandt:

$$\rho_{b,tatsächlich} = \frac{m_d}{\frac{m_s - m_h}{\rho_{rh}}} \quad (4.1)$$

$$\rho_{b,max-min} = \frac{m_d \pm \Delta m_d}{\frac{(m_s \pm \Delta m_s) - (m_h \pm \Delta m_h)}{\rho_{rh}}} \quad (4.2)$$

$$m\ddot{o}gl. Abw._{max-min} = \frac{\rho_{b,max-min} - \rho_{b,tatsächlich}}{\rho_{b,tatsächlich}} * 100 [\%] \quad (4.3)$$

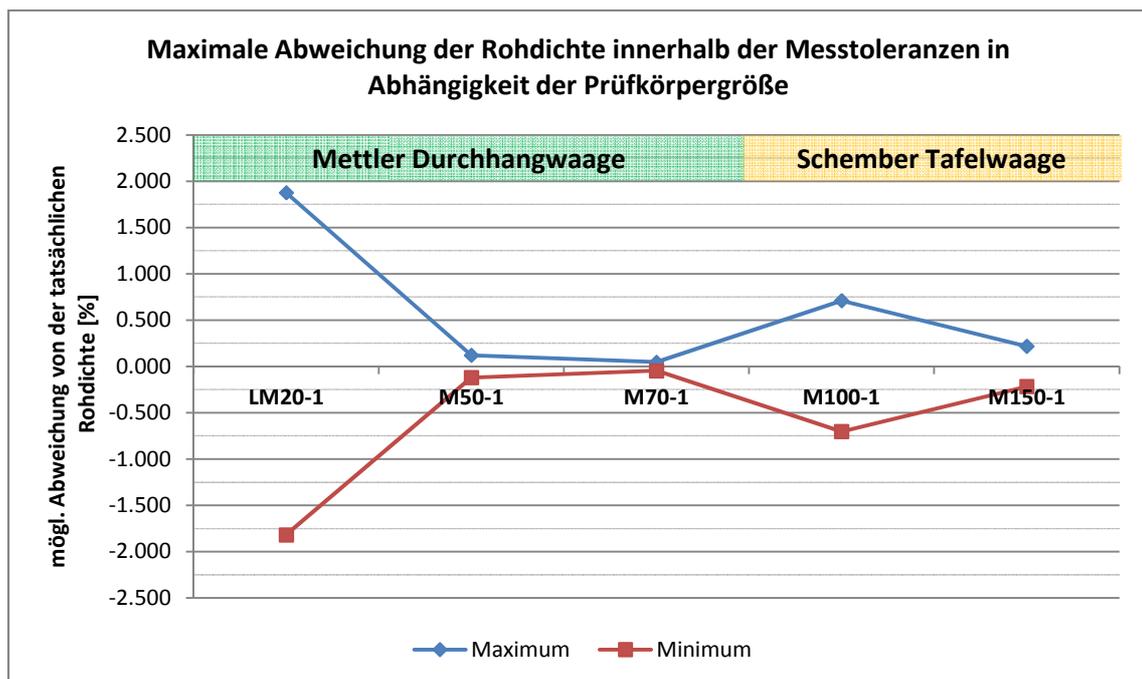


Abbildung 50: Einfluss der Messmethode und der Messgeräte auf die Rohdichte

4. Anmerkungen zur Messdurchführung

Wenn man die minimalen und maximalen Abweichungen für jede Probenkörpergröße ermittelt, kann das obenstehende Diagramm erstellt werden (vgl. Abbildung 50, die für die Erstellung notwendige Tabelle befindet sich im Anhang). Daraus wird ersichtlich, dass die maximale Abweichung von 1,8% bei den Proben mit $\varnothing 20$ mm liegt. Die zweithöchste Abweichung entsteht bei der Messung der $\varnothing 100$ mm Proben, nach Umstieg von der Mettler Durchhangwaage auf die Schember Tafelwaage.

Bei der massebezogenen Wasseraufnahme können die Abweichungen aufgrund der geringen Wasseraufnahme der Marmore noch höher sein, und wie bei der LM20-1 Probe 200% betragen (vgl. Abbildung 51).

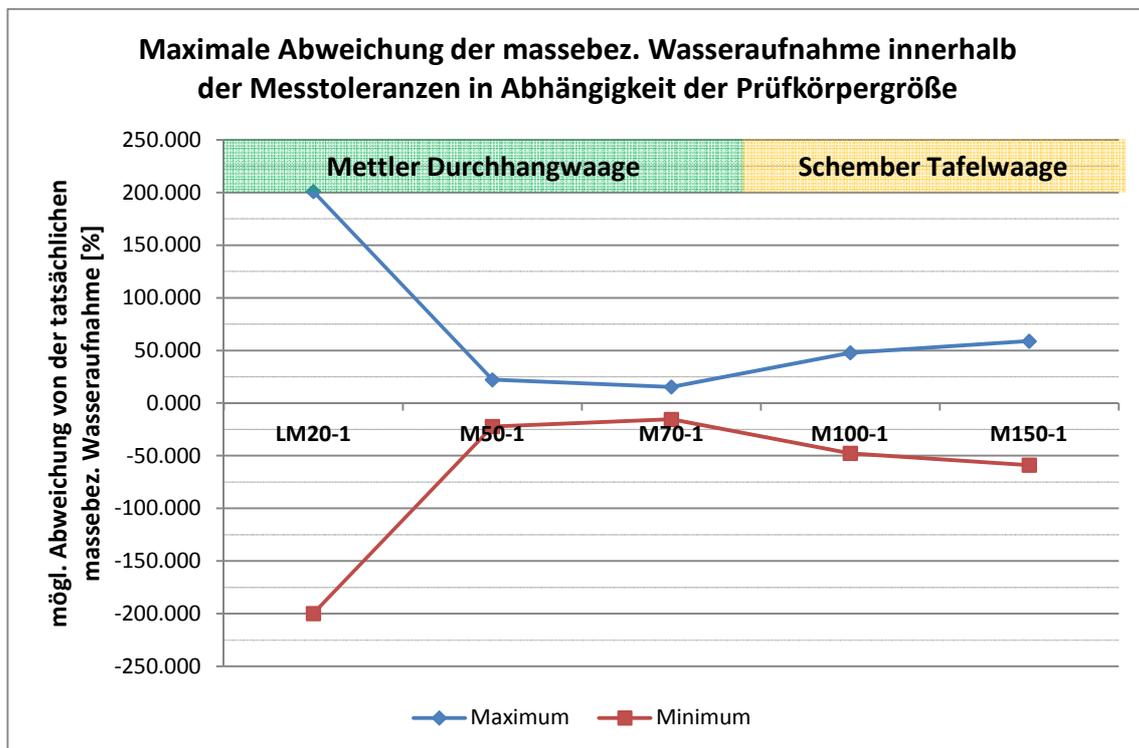


Abbildung 51: Einfluss der Messmethode und der Messgeräte auf die massebez. Wasseraufnahme

4.2 Heliumpyknometermessungen

Die Heliumpyknometermessungen wurden wie in Abbildung 41 in 3.1.6 zu sehen an je einer Probe pro verwendeten Gesteinsblock vorgenommen. Ausgenommen wurde hierbei der Rohrbacher Konglomerat. An diesem konnte wegen seiner Grobkörnigkeit und Inhomogenität keine repräsentative Messung vorgenommen werden. Ebenfalls fanden auch keine Versuche am Leithakalkblock Nr. V statt, da dieser erst in der zweiten Versuchsreihe Verwendung fand.

Vor der eigentlichen Messung wurden die Gesteinsstücke so weit zerkleinert, dass Sie in die Probekammer des Heliumpyknometers passten. Mit fortlaufender Messung stellte sich heraus, dass dieser Schritt der wesentlichste am ganzen Messvorgang selbst ist. So konnten

4. Anmerkungen zur Messdurchführung

an ein und demselben Probestück aus Sterzinger Marmor, in Abhängigkeit von der Probeform und deren Größe, Reindichten zwischen 2,5 und 10(!) g/cm³ gemessen werden. Dabei stellte sich folgendes heraus: Je größer und schwerer die Probe war ($m_{max} \approx 5,5 \text{ g}$), desto höhere Dichten konnten gemessen werden. Die besten Ergebnisse stellten sich bei einer Probekörpermasse von ca. 3 g ein. Auch eine neuerliche Kalibrierung des Gerätes brachte keine Verbesserung.

In naturwissenschaftlicher Hinsicht ist diese Prüfmethode zu ungenau, um seriöse Kennwerte zu liefern. Die klassische Pyknometermethode zur Reindichtebestimmung gemäß ÖNORM EN 1936 kann mit dieser automatisierten Methode, die an sich die Aufgabe hätte die Versuchsdurchführung zu vereinfachen, keinesfalls ersetzt werden. Deshalb können die ermittelten Reindichten und die darauf aufbauende Gesamtporosität bestenfalls als Anhaltspunkt gesehen werden.

5 Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

5.1 Sterzinger Marmor

5.1.1. Allgemeine Gesteinskennwerte

In den nachfolgenden Abbildungen ist zu erkennen, dass die mittlere Rohdichte der Sterzinger Marmorproben bei $\rho_b = 2705 \text{ kg/m}^3$ liegt, und die massenbezogene Wasseraufnahme bei $A_b = 0,10 \text{ M\%}$.

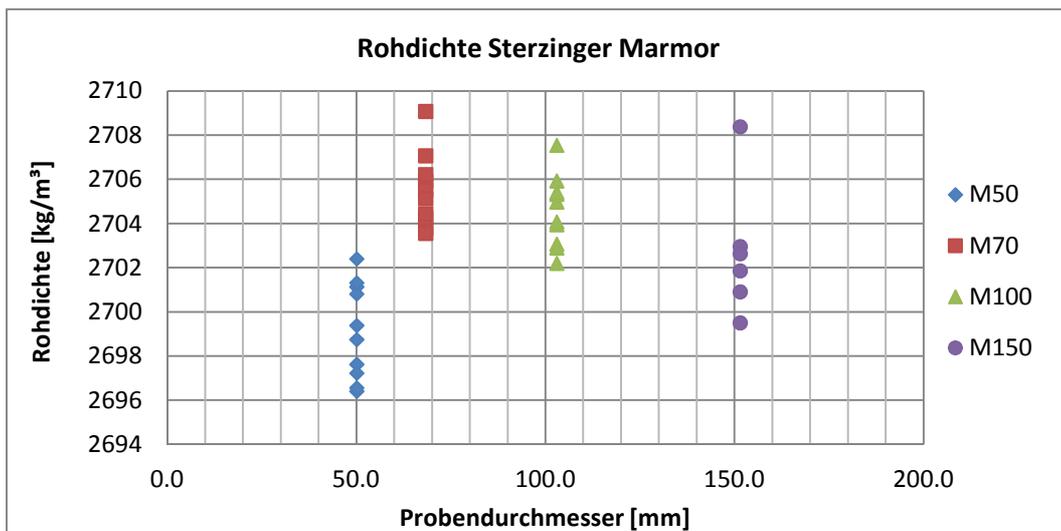


Abbildung 52: Rohdichte Sterzinger Marmor

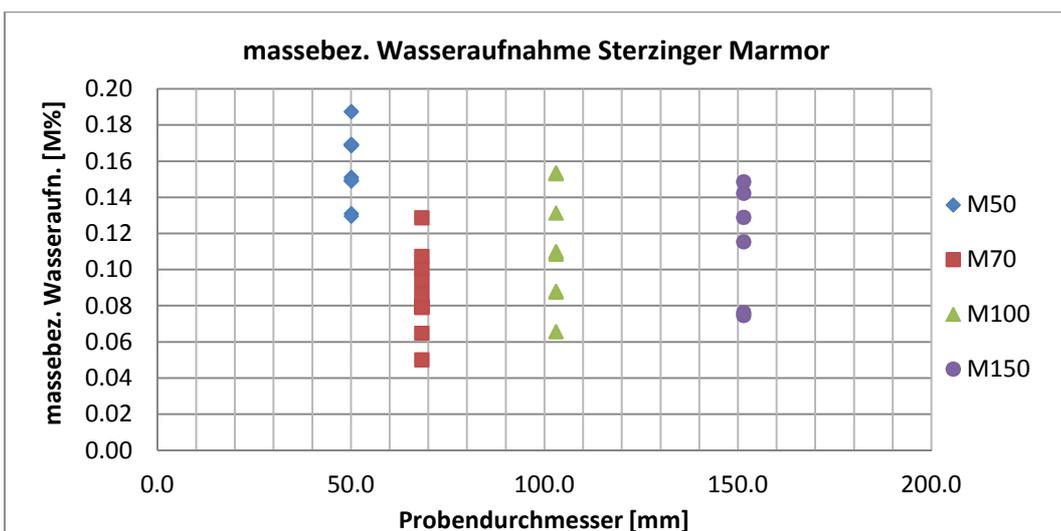


Abbildung 53: massebezogene Wasseraufnahme Sterzinger Marmor

In folgender Tabelle werden die Gesteinskennwerte der Sterzinger Marmorproben zusammengefasst:

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Minimum - Maximum			Mittelwerte	
Rohdichte:	2676-2709	kg/m ³	2705	kg/m ³
Reindichte:	-	kg/m ³	2725	kg/m ³
massebez. Wasseraufnahme:	0.05-0.19	M%	0.10	M%
offene Porosität:	0.14-0.51	%	0.30	%
Gesamtporosität:	0.58-1.05	%	0.80	%

Tabelle 2: Gesteinskennwerte Sterzinger Marmor

5.1.2. Ergebnisse der Ultraschallmessung

Wie in Abbildung 54 zu sehen, liegen die Ultraschallgeschwindigkeiten des Sterzinger Marmors zwischen 3 und 3,5 km/s. Das Fehlen der Stativmessungen bei den Ø150 mm Proben hat jenen Grund, dass sie für das Druckluftstativ mit einem maximalen Hub von 20 cm zu groß waren.

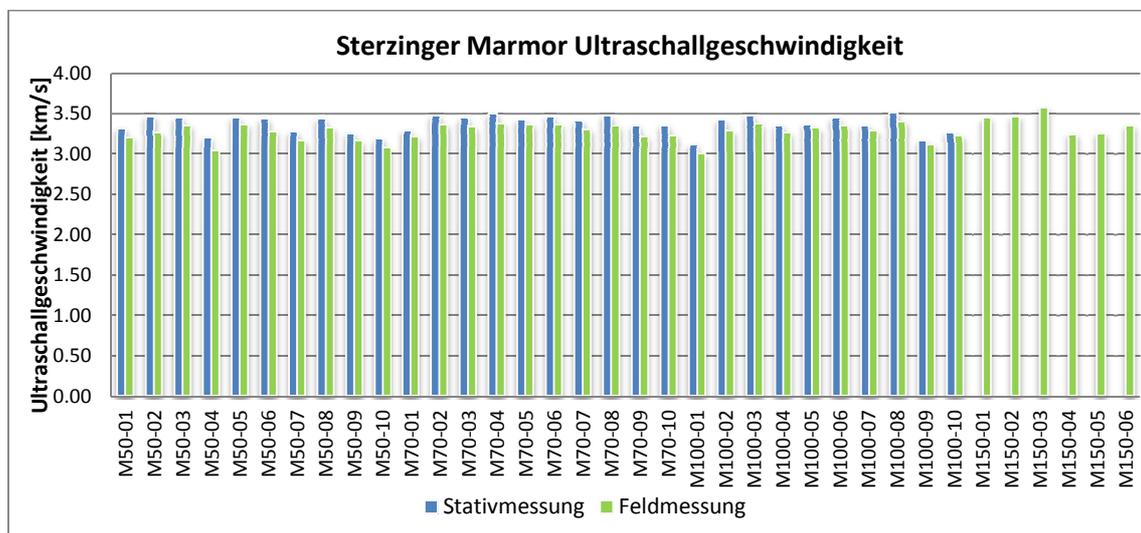


Abbildung 54: Sterzinger Marmor Ultraschallgeschwindigkeit

Die mittlere Ultraschallgeschwindigkeit der Druckluftstativmessung liegt bei 3,4 km/s. Im Vergleich zur händischen Messung ergibt sich im Mittel eine Differenz von 0,1 km/s.

	US Stativmessung		US Feldmessung		Mittelwertdifferenz	
	Minimum - Maximum	Mittelwerte	Minimum - Maximum	Mittelwerte	Stativ-Feld	
M50	3.19-3.47 km/s	3.35 km/s	3.05-3.36 km/s	3.23 km/s	0.12 km/s	
M70	3.29-3.49 km/s	3.42 km/s	3.22-3.38 km/s	3.32 km/s	0.10 km/s	
M100	3.12-3.51 km/s	3.36 km/s	3.00-3.40 km/s	3.28 km/s	0.08 km/s	
M150	- km/s	- km/s	3.25-3.57 km/s	3.39 km/s	- km/s	
Mittel	3.38 km/s		3.31 km/s		0.10 km/s	

Tabelle 3: Messergebnisse Ultraschallgeschwindigkeit Sterzinger Marmor

5.1.3. Auswertung der Porosimetermessung

Für den Sterzinger Marmor wurden drei Porosimetermessungen durchgeführt. Ein exemplarisches Ergebnis zeigt Abbildung 55. Daraus ist ersichtlich, dass die Porenverteilung nahezu linear zwischen 100 000 nm und 100 nm verläuft, wobei der kleinste verpressbare Porenradius ebenfalls bei 100 nm liegt.

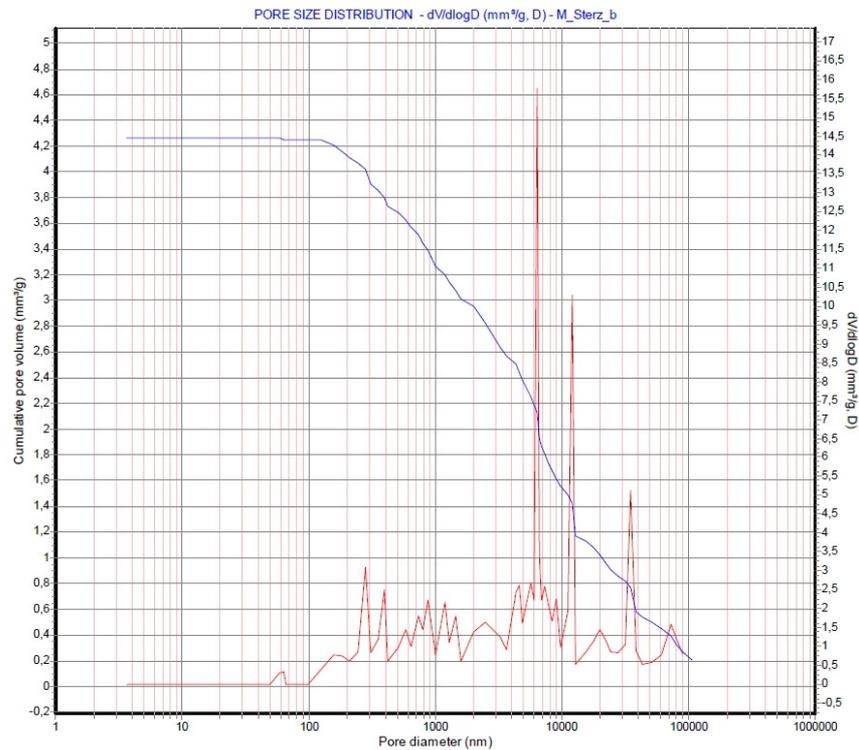


Abbildung 55: Porenverteilung Sterzinger Marmor

In Tabelle 4 befindet sich eine zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse der Porosimetermessungen. Während die Messung der Probe b mit jener der Dichtebestimmung über das Auftriebsverfahren in etwa übereinstimmen, liegen die Porosimetermessergebnisse der Proben a und c geringfügig darunter.

Sterzinger Marmor	Nr.	File Name	Envelope Density	Bulk Density	Apparent Density	Acc. Porosity
			[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
	1	M_Sterz_a	2.64	2.65	2.66	0.79
	2	M_Sterz_b	2.69	2.69	2.72	1.15
	3	M_Sterz_c	2.63	2.64	2.66	0.79

Tabelle 4: Auswertung der Porosimetermessungen beim Sterzinger Marmor

5.1.4. Ergebnisse der Versuchsreihe 1

Wie in Abbildung 56 zu sehen steigt entgegen der Annahme einer abnehmenden mittleren Druckfestigkeit diese mit größer werdender Prüfkörperdimension an. Dabei steigt auch die maximal gemessene Druckfestigkeit an.

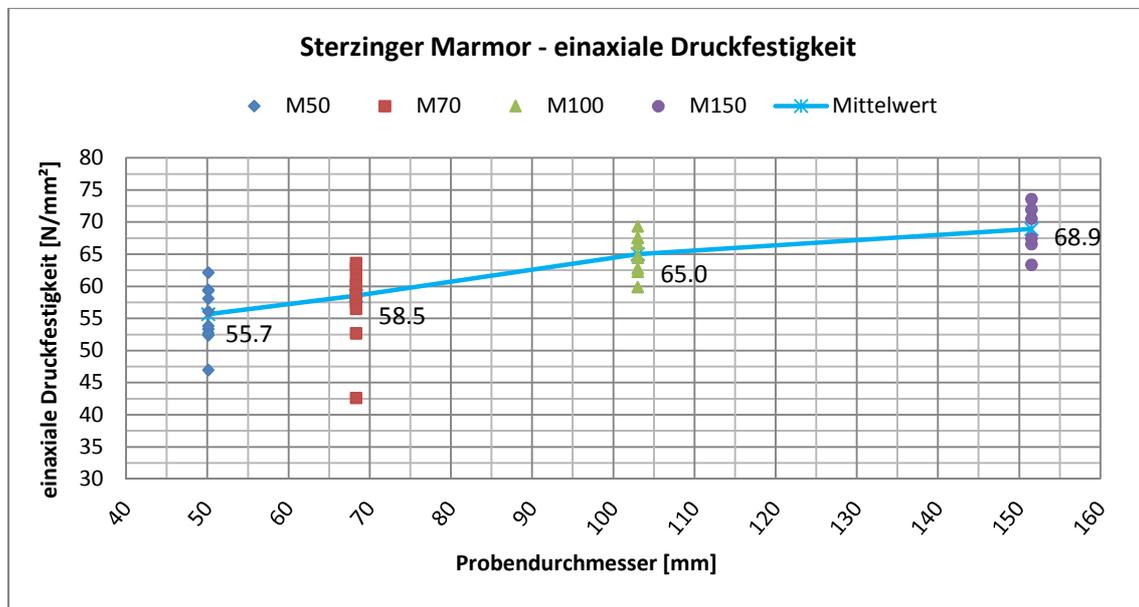


Abbildung 56: Sterzinger Marmor – einaxiale Druckfestigkeit

Abbildung 57 zeigt den statischen und dynamischen E-Modul in Abhängigkeit von der Prüfkörperdimension. Dabei wird ersichtlich, dass der Dynamische über den gesamten Probereich in etwa gleich bleibt mit 24 GPa. Der Statische nimmt hingegen mit größer werdenden Proben von rund 40 GPa um 25% auf 31 GPa ab, und nähert somit dem dynamischen Elastizitätsmodul an.

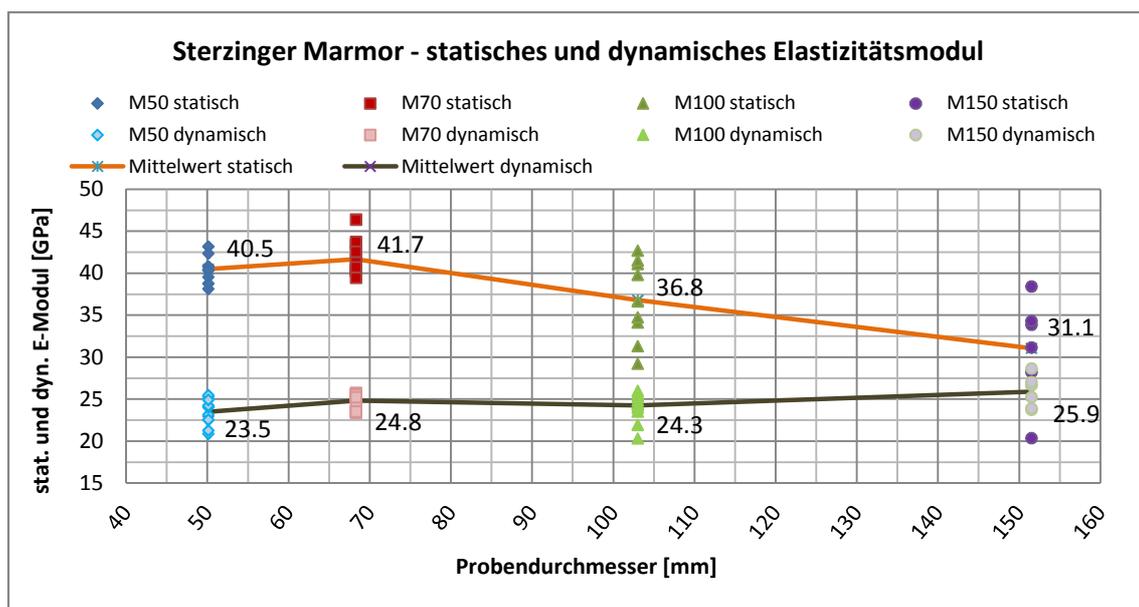


Abbildung 57: Sterzinger Marmor - statischer und dynamischer Elastizitätsmodul

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

In folgender Tabelle werden für den Sterzinger Marmor die gemittelten Werte über alle Prüfkörperdimensionen angegeben.

Sterzinger Marmor	<i>einaxiale Druckfestigkeit</i>	stat. E-Modul lt. EN 14580	dyn. E-Modul Druckluftstativ ($\mu=0,25$)	dyn. E-Modul Feldmessung ($\mu=0,25$)
	<i>Rd [N/mm²]</i>	Estat [GPa]	Edyn [GPa]	Edyn [GPa]
min	42.62	20.36	21.88	20.33
max	73.58	46.40	27.79	28.66
mittel	60.89	38.92	25.78	24.44

Tabelle 5: Gemittelte Druckfestigkeit und E-Moduli beim Sterzinger Marmor

Bei der 1. Versuchsreihe stellte sich für alle Druckversuche ein Scherversagen als Bruchbild ein. Zu beachten ist, dass mit steigender Prüfkörperdimension die Ausbildung einer zweiten Scherfläche im Bruchbild zunahm. Tabelle 6 und Abbildung 58 geben darüber einen Überblick.

Sterzinger Marmor	Anzahl Scherflächen		
	1	1 bis 2	2
Bruchform			
M50	10	0	0
M70	3	2	5
M100	4	3	3
M150	1	3	2

Tabelle 6: Verteilung der Scherflächen Sterzinger Marmorproben



Abbildung 58: 1. Reihe: M50, M70; 2. Reihe: M100, M150

5.2 Laaser Marmor

5.2.1. Allgemeine Gesteinskennwerte

Wie in Abbildung 59 und Abbildung 60 zu sehen, weisen die Messergebnisse der Prüfkörper mit $\varnothing 20$ mm große Unterschiede zu den Messwerten der Proben mit größerem Durchmesser auf. Dies lag daran, dass die LM20 Prüfkörper nur ein Volumen von rund 30 cm^3 hatten. Dadurch konnten mit der angewandten Messmethode, und deren Messgenauigkeit, innerhalb der Messtoleranzen Abweichungen von $\pm 2\%$ der gemessenen Rohdichte entstehen (vgl. Kap. 4.1). Aus diesem Grund wurden diese Ergebnisse auch nicht für die Auswertung der mittleren Rohdichte und der mittleren massebezogenen Wasseraufnahme herangezogen.

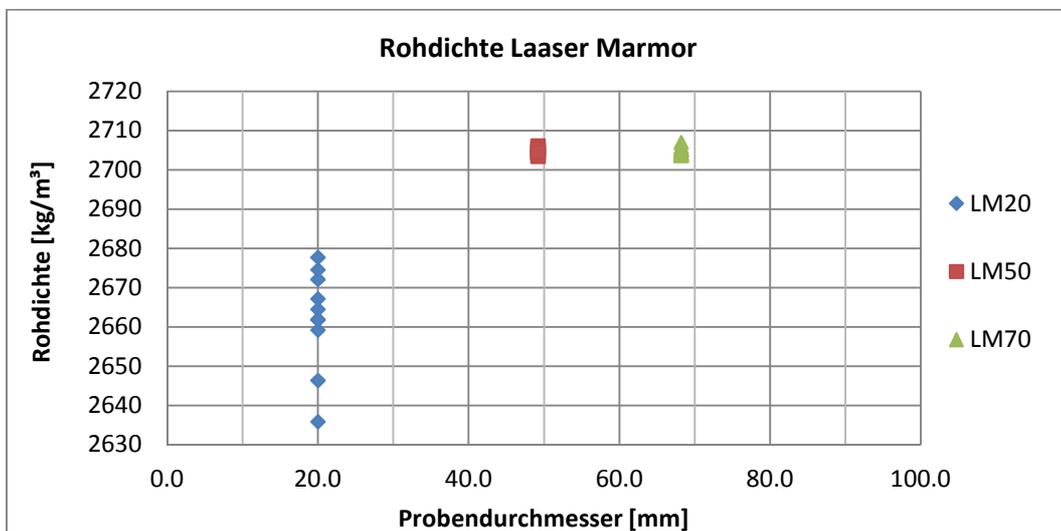


Abbildung 59: Rohdichte Laaser Marmor

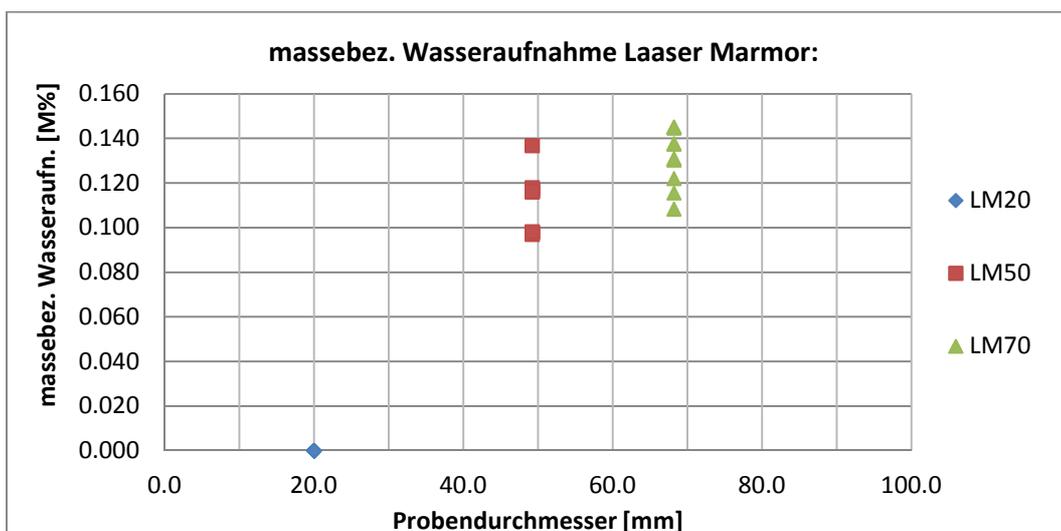


Abbildung 60: massebezogene Wasseraufnahme Laaser Marmor

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Wenn man die Prüfkörper mit $\varnothing 50$ mm und $\varnothing 70$ mm betrachtet, sieht man, dass die mittlere Rohdichte $\rho_b = 2705 \text{ kg/m}^3$, und die massenbezogene Wasseraufnahme bei $A_b = 0,10$ M% liegt.

Minimum - Maximum			Mittelwerte	
Rohdichte:	2703-2707	kg/m^3	2705	kg/m^3
Reindichte:	-	kg/m^3	2740	kg/m^3
massebez. Wasseraufnahme:	0.10-0.15	M%	0.10	M%
offene Porosität:	0.26-0.39	%	0.35	%
Gesamtporosität:	1.17-1.30	%	1.25	%

Tabelle 7: Gesteinskennwerte Laaser Marmor

5.2.2. Ergebnisse der Ultraschallmessung

Wie in der unteren Abbildung zu erkennen, liegt die Ultraschallgeschwindigkeit des Laaser Marmors etwa zwischen 3,0 km/s und 4,2 km/s. Zu beachten ist hierbei, dass die Proben mit $\varnothing 20$ mm eine geringere mittlere Ultraschallgeschwindigkeit aufweisen, als die Proben mit größeren Durchmessern. Dies liegt am größeren Einfluss der Kopplungseffekte.

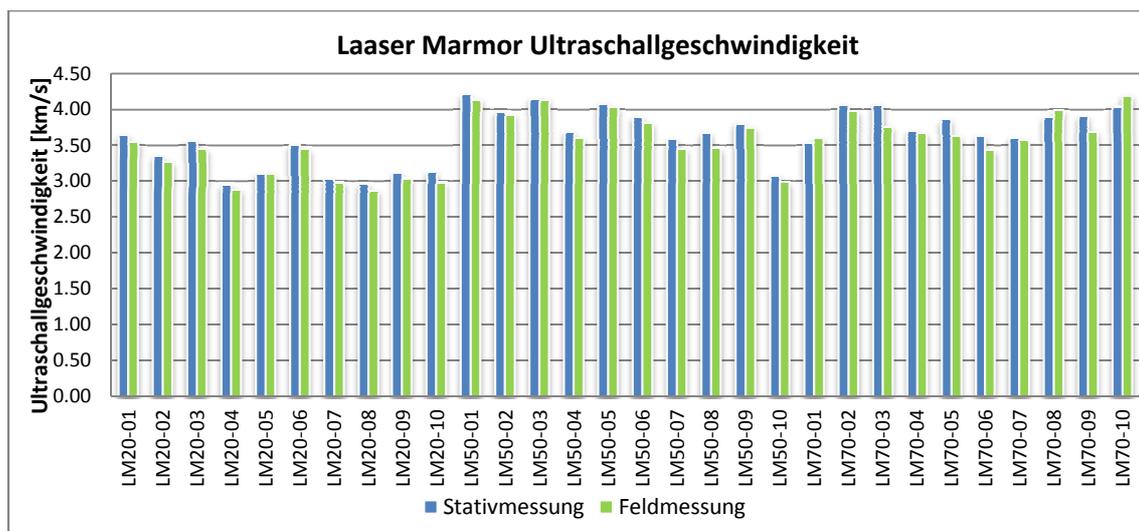


Abbildung 61: Laaser Marmor Ultraschallgeschwindigkeit

Wenn man bei dieser Mittelwertbildung die LM20 Prüfkörper ebenfalls außer Acht lässt, liegt die mittlere Ultraschallgeschwindigkeit bei 3,85 km/s bei der Druckluftstativmessung, und bei 3,75 km/s bei der Feldmessung. Daraus ergibt sich wie beim Sterzinger Marmor eine Messdifferenz von 0,1 km/s.

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

	US Stativmessung		US Feldmessung		Mittelwertdifferenz
	Minimum - Maximum	Mittelwerte	Minimum - Maximum	Mittelwerte	Stativ-Feld
LM20	2.95-3.64 km/s	3.22 km/s	2.86-3.54 km/s	3.14 km/s	0.08 km/s
LM50	3.08-4.21 km/s	3.85 km/s	2.98-4.14 km/s	3.77 km/s	0.08 km/s
LM70	3.53-4.06 km/s	3.84 km/s	3.43-4.19 km/s	3.73 km/s	0.11 km/s
Mittel	3.85 km/s		3.75 km/s		0.10 km/s

Tabelle 8: Messergebnisse Ultraschallgeschwindigkeit Laaser Marmor

5.2.3. Auswertung der Porosimetermessung

Beim Laaser Marmor wurden ebenfalls 3 Porosimetermessungen vorgenommen. Die gesammelten Ergebnisse befinden sich in der Tabelle 9.

Laaser Marmor	Nr.	File Name	Envelope Density	Bulk Density	Apparent Density	Acc. Porosity
			[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
	1	M_Laasa_a	2.64	2.65	2.67	1.10
	2	M_Laasa_b	2.71	2.71	2.74	1.27
	3	M_Laasa_c	2.69	2.69	2.73	1.55

Tabelle 9: Auswertung der Porosimetermessungen beim Laaser Marmor

Abbildung 62 zeigt die Porenradienverteilung der Probe a. In dieser sind zwei Plateaus bei etwa 20.000 und 2000 nm erkennbar, welche auf fehlende Porenradien hindeuten können

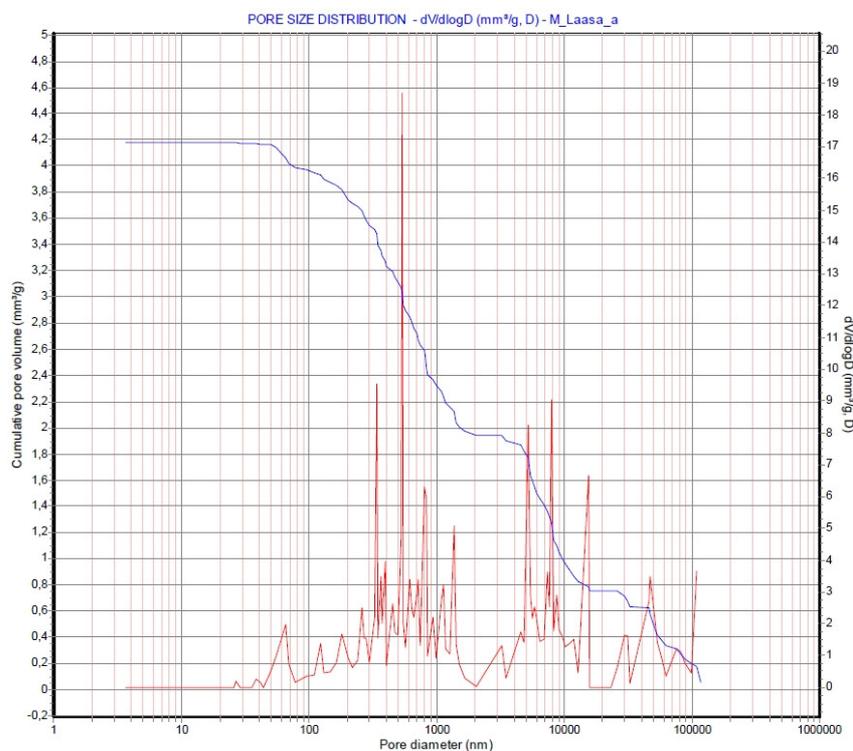


Abbildung 62: Porenverteilung Laaser Marmor

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Des Weiteren liegt der kleinste verpressbare Porenradius beim Laaser bei 50 nm, die des Sterzingers liegt bei 100 nm.

5.2.4. Ergebnisse der Versuchsreihe 1

Abbildung 63 zeigt die Druckfestigkeit des Laaser Marmors bezogen auf den Prüfkörperdurchmesser. Diese nimmt wie auch beim Sterzinger Marmor mit steigender Probengröße zu. Der sprunghafte Anstieg der mittleren Druckfestigkeit von $\varnothing 50$ mm auf die $\varnothing 70$ mm Proben um 26 N/mm^2 oder 50% lässt sich nur bedingt durch die Bruchform erklären.

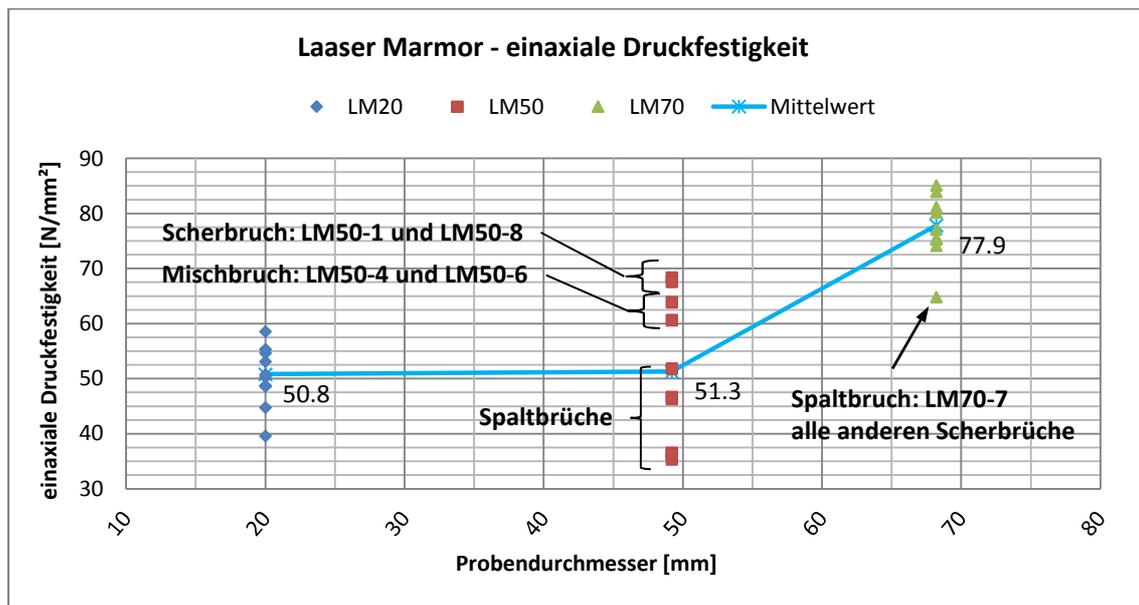


Abbildung 63: Laaser Marmor - einaxiale Druckfestigkeit

Ebenfalls zu sehen ist die große Streuung der Druckfestigkeiten der LM50 Proben. Diese lagen zwischen 35 und 68 N/mm^2 , wobei hier die großen Differenzen zumindest teilweise auf die unterschiedliche Bruchform zurückzuführen sind. So entstanden bei den 10 Druckversuchen der $\varnothing 50$ mm Proben 2 Scherbrüche, 2 Mischformen zwischen Scher- und Spaltbruch, und 6 Spaltbrüche. Wenn man in Folge die gemessenen Druckfestigkeiten den Bruchformen zuordnet, so ist lässt sich zeigen, dass die größten Werte bei den Scherbrüchen der Proben LM50-1 und LM50-8 mit im Mittel 68 N/mm^2 entstanden. Bei den Körpern mit einer Mischbruchform ging die Druckfestigkeit geringfügig zurück, und bei den Spaltbrüchen wurden im Mittel nur mehr 42 N/mm^2 gemessen. Dies entspricht einer Abnahme auf 62% der Scherbruchfestigkeit (vgl. Tabelle 10 und Abbildung 65). Mit denselben Mitteln lässt sich auch der „Ausreißer“ bei den Prüfkörpern mit $\varnothing 70$ mm erklären. Dieser brach im Gegensatz zu allen anderen in Form eines Mischbruches, der Rest als Scherbruch. Dies ist in Abbildung 65 unten zu erkennen, wo der „LM7“ Prüfkörper als einziger zwei Bruchflächen besitzt.

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Laaser Marmor	Scherbruch		Mischform		Spaltbruch	
	Anzahl [-]	mittl. einax. Druckf. Rd,m [N/mm ²]	Anzahl [-]	mittl. einax. Druckf. Rd,m [N/mm ²]	Anzahl [-]	mittl. einax. Druckf. Rd,m [N/mm ²]
LM20	6	51.56	3	46.90	1	54.69
LM50	2	68.03	2	62.31	6	42.22
LM70	9	78.67	1	64.90	0	-

Tabelle 10: Laaser Marmor - Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Bruchform

In Abbildung 64 ist der stat. und dyn. E-Modul in Abhängigkeit vom Probendurchmesser dargestellt. Während der Statische mit steigender Prüfkörperdimension wie beim Sterzinger Marmor abnimmt, bleibt der Dynamische im Bereich von 30 GPa. Der geringere dyn. Elastizitätsmodul der Ø20 mm Proben ist auf den größeren Einfluss des Kopplungseffektes der US-Messung, und der dadurch kleineren US-Geschwindigkeit zurückzuführen. Des Weiteren konnte an den LM20 Proben keine statische E-Modul Messung durchgeführt werden, da die Sensoren zur Dehnungsmessung zu groß für die Prüfkörper waren.

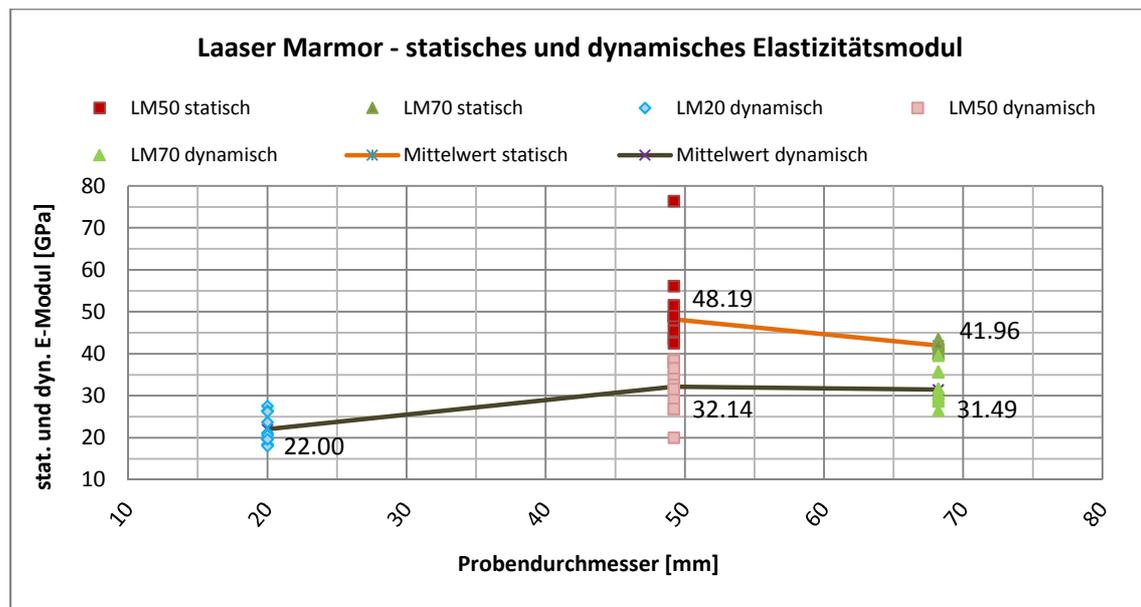


Abbildung 64: Laaser Marmor - statischer und dynamischer Elastizitätsmodul

In der abschließenden Tabelle werden für den Laaser Marmor die gemittelten Werte über alle Prüfkörperdimensionen angegeben:

Laaser Marmor	einaxiale Druckfestigkeit	stat. E-Modul lt. EN 14580	dyn. E-Modul Druckluftstativ ($\mu=0,25$)	dyn. E-Modul Feldmessung ($\mu=0,25$)
	Rd [N/mm ²]	Estat [GPa]	Edyn [GPa]	Edyn [GPa]
min	35.42	37.98	19.28	18.05
max	85.14	76.41	39.87	39.57
mittel	65.37	44.29	29.95	28.44

Tabelle 11: Gemittelte Druckfestigkeit und E-Moduli beim Laaser Marmor

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe



Abbildung 65: 1. Reihe: LM20, LM50; 2. Reihe: LM70

5.3 Rohrbacher Konglomerat

5.3.1. Allgemeine Gesteinskennwerte

Wie zu erwarten war, streuten die Gesteinskennwerte des Konglomerates aufgrund der Inhomogenität und Grobkörnigkeit sehr weit (vgl. Abbildung 66). Der Abfall der mittleren Rohdichte mit zunehmender Probengröße resultiert aus der Tatsache der selektiven Vorauswahl beim Ablängen der $\varnothing 50$ mm und $\varnothing 70$ mm Bohrkern. Hierbei wurden die Proben – insofern sich die Möglichkeit ergab – immer aus dem „schönsten“, sprich dem homogensten und kompaktesten, Kernbereich geschnitten. Bei den $\varnothing 100$ mm Prüfkörpern ergab sich diese Möglichkeit nicht, da die Blöcke aus denen die Proben gewonnen wurden, nur eine Länge von 20cm hatten. Somit liegt die Rohdichte der Rohrbacher Konglomeratblöcke im Bereich von etwa 2300 kg/m^3 .

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

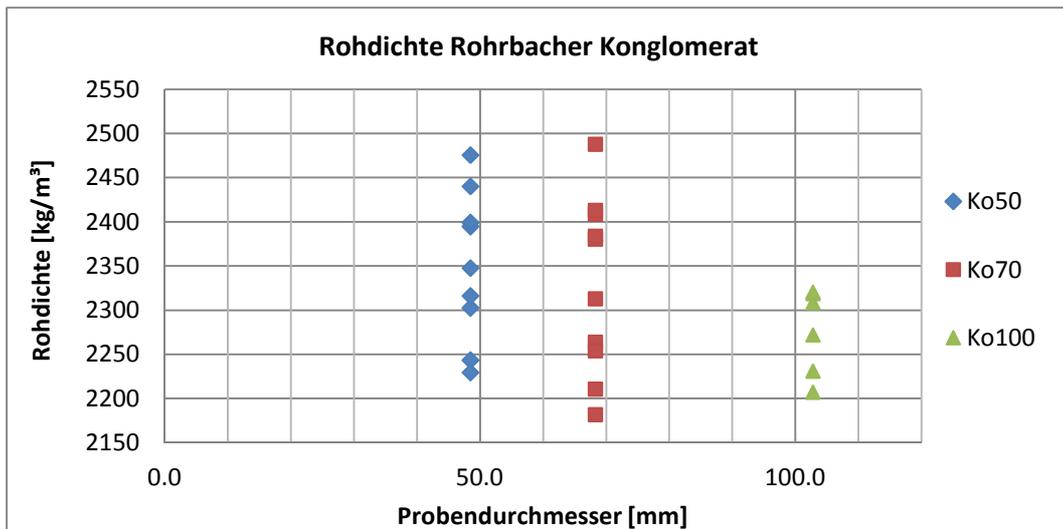


Abbildung 66: Rohdichte Rohrbacher Konglomerat

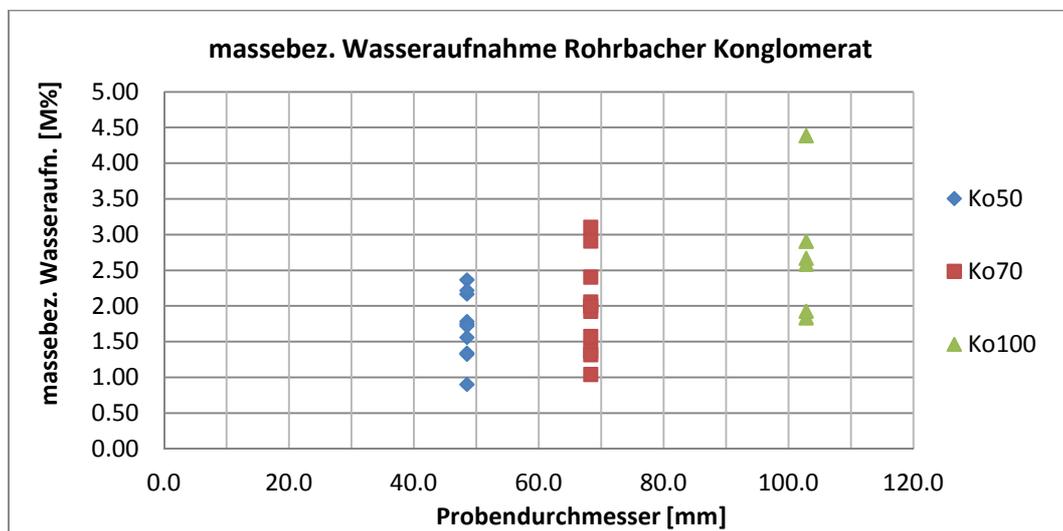


Abbildung 67: massebezogene Wasseraufnahme Rohrbacher Konglomerat

Als Resümee kann angenommen werden, dass die mittlere Rohdichte des Konglomerates bei $\rho_b = 2300 \text{ kg/m}^3$, und die zugehörige massebezogene Wasseraufnahme im Bereich von $A_b = 3,50 \text{ M\%}$ liegt.

Da die Reindichte des Rohrbacher Konglomerates wegen seiner Grobkörnigkeit nicht ermittelt werden konnte, kann auch kein Wert für die Gesamtporosität angegeben werden.

Minimum - Maximum			Mittelwerte	
Rohdichte:	2182-2488	kg/m ³	2330	kg/m ³
Reindichte:	-	kg/m ³	-	kg/m ³
massebez. Wasseraufnahme:	0.90-4.39	M%	3.50	M%
offene Porosität:	2.23-9.70	%	4.60	%
Gesamtporosität:	-	%	-	%

Tabelle 12: Gesteinskennwerte Rohrbacher Konglomerat

5.3.2. Ergebnisse der Ultraschallmessung

Die Ultraschallgeschwindigkeit des Rohrbacher Konglomerats liegt, wie in Abbildung 68 dargestellt, zwischen 4 km/s und 5 km/s. Hierbei ist zu beachten, dass es wegen der Grobkörnigkeit und Inhomogenität des Materials bei den Proben mit Ø100 mm oftmals zu einem „Springen“ der Ultraschalllaufzeit gekommen ist. Diese lagen im Bereich von +30 µs, und entsprächen einer Geschwindigkeitsabnahme von ca. 1,5 km/s. Diese „Ausreißer“ fanden keinen Eingang in die Auswertung.

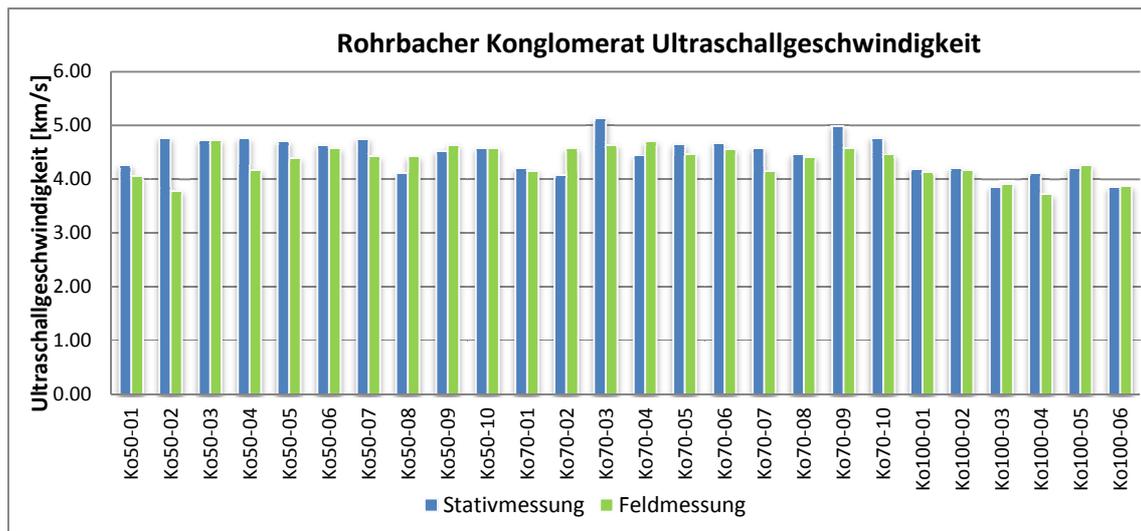


Abbildung 68: Rohrbacher Konglomerat Ultraschallgeschwindigkeit

Wie in Tabelle 13 zu sehen, nimmt die mittlere Ultraschallgeschwindigkeit mit größer werdenden Durchmesser um etwa 0,5 km/s auf 4,05 km/s ab, was im Zusammenhang mit den oben beschriebenen Messproblemen erklärt werden kann.

	US Stativmessung		US Feldmessung		Mittelwertdifferenz
	Minimum - Maximum	Mittelwerte	Minimum - Maximum	Mittelwerte	Stativ-Feld
Ko50	4.10-4.76 km/s	4.62 km/s	4.15-4.70 km/s	4.48 km/s	0.14 km/s
Ko70	4.08-5.14 km/s	4.59 km/s	3.78-4.73 km/s	4.40 km/s	0.19 km/s
Ko100	3.85-4.21 km/s	4.07 km/s	3.72-4.25 km/s	4.01 km/s	0.06 km/s
Mittel	4.43 km/s		4.30 km/s		0.13 km/s

Tabelle 13: Messergebnisse Ultraschallgeschwindigkeit Rohrbacher Konglomerat

5.3.3. Auswertung der Porosimetermessung

Wegen der Grobkörnigkeit und Inhomogenität des Rohrbacher Konglomerates war es nicht möglich Porosimetermessungen vorzunehmen.

5.3.4. Ergebnisse der Versuchsreihe 1

Wie in Abbildung 69 dargestellt streuten die Druckfestigkeiten der Prüfkörper sehr stark. Weiter erkennbar ist, dass die mittlere Festigkeit von den Ø50 auf die Ø70 mm Proben um 5 N/mm² abfällt. Bei den Ø100 mm Körpern steigt sie aber wieder auf den ursprünglichen Wert an. Die Bruchformen der Prüfkörper sind nicht eindeutig als Scher- oder Spaltbruch klassifizierbar. Am ehesten beschreibbar sind sie als gefügebedingte Spaltbrüche, wobei die steiferen Komponenten aus Kalk oder Dolomit in der Matrix die Kräfte anziehen, und das Bindemittel in dem sie eingebettet sind, auf Zug versagt.

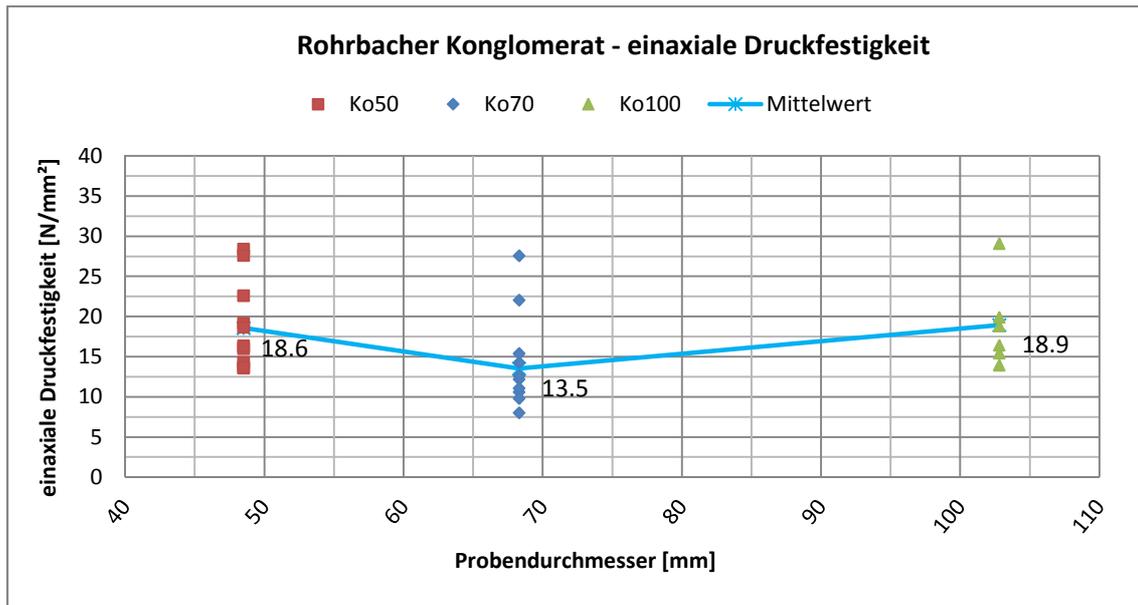


Abbildung 69: Rohrbacher Konglomerat – einaxiale Druckfestigkeit

Trägt man den gemessenen stat. und dyn. E-Modul des Rohrbacher Konglomerats gegen die Prüfkörperdimension auf, so ergibt sich Abbildung 70.

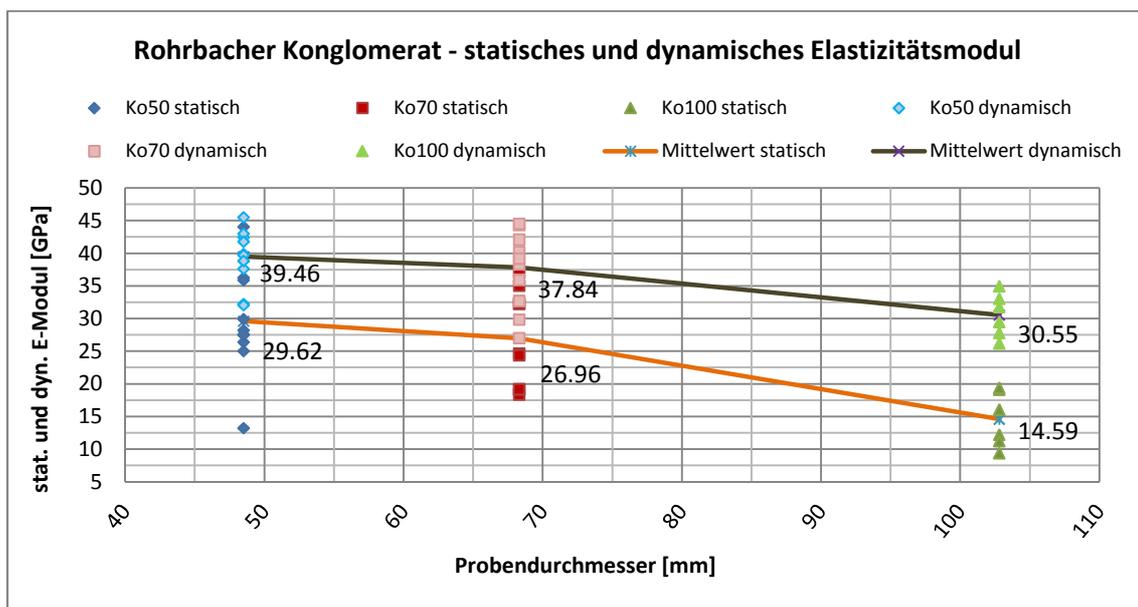


Abbildung 70: Rohrbacher Konglomerat - statischer und dynamischer Elastizitätsmodul

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Darauf ist die Abnahme der E-Moduli mit größer werdenden Probenkörpern zu sehen. Anders als bei den beiden Marmoren, nähern sich hier der statische und dynamische E-Modul nicht an. Für den großen Abfall des dyn. E-Moduls ist die abnehmende Rohdichte und US-Geschwindigkeit maßgebend, da beide Werte in die Berechnung des Moduls Eingang finden.

In Tabelle 14 werden die gemittelte einaxiale Druckfestigkeit und der stat. und dyn. E-Modul für den Rohrbacher Konglomerat unabhängig von der Prüfkörperdimensionen angegeben:

Rohrbacher Konglomerat	<i>einaxiale Druckfestigkeit</i>	stat. E-Modul lt. EN 14580	dyn. E-Modul Druckluftstativ ($\mu=0,25$)	dyn. E-Modul Feldmessung ($\mu=0,25$)
	<i>Rd [N/mm²]</i>	Estat [GPa]	Edyn [GPa]	Edyn [GPa]
min	8.02	9.40	27.54	26.20
max	29.09	44.07	52.34	45.53
mittel	16.94	24.88	38.88	36.71

Tabelle 14: Gemittelte Druckfestigkeit und E-Moduli beim Rohrbacher Konglomerat

Abbildung 71 gibt einen Überblick über die in der 1. Versuchsreihe verwendeten Prüfkörper. Am rechten unteren Bild sind die verschiedenen Bruchformen anhand von drei Ø100 mm Prüfkörper angezeigt.



Abbildung 71: 1. Reihe: Ko50, Ko70; 2. Reihe: Ko100, Bruchform Ko100

5.4 Leithakalk aus Kaisersteinbruch

5.4.1. Allgemeine Gesteinskennwerte

Da die Prüfkörperherstellung, wie eingangs unter Kapitel 2.3 erwähnt für die 1. Versuchsreihe aus vier unterschiedlichen Blöcken erfolgte, wurden die Messergebnisse, wie in Abbildung 72 und Abbildung 73 zu sehen, zusätzlich zu ihrem Prüfkörperdurchmesser, nach ihren Herkunftsblöcken aufgeschlüsselt. Daraus lässt sich erkennen, dass die Messwerte der einzelnen Gesteinsvarietäten zueinander, und auch teils innerhalb eines Blockes extrem streuen.

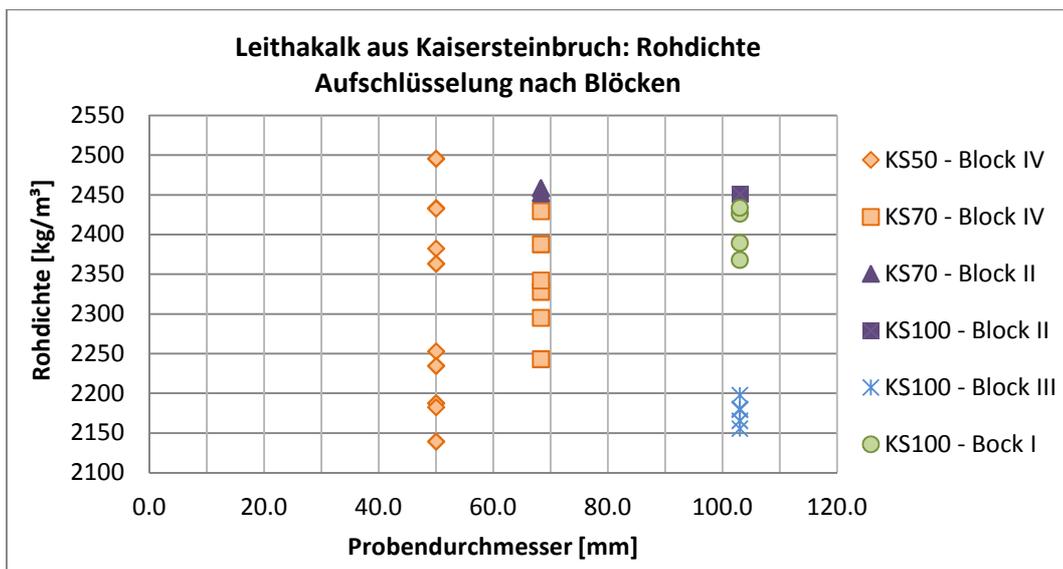


Abbildung 72: Rohdichte Leithakalk aus Kaisersteinbruch

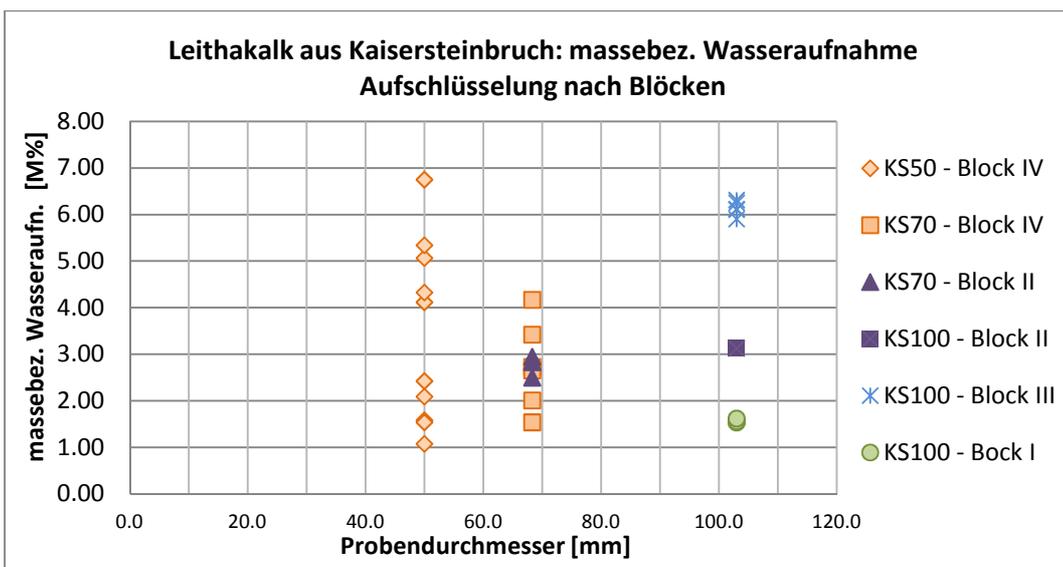


Abbildung 73: massebezogene Wasseraufnahme Leithakalk aus Kaisersteinbruch

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

So wurden im Block IV Rohdichten zwischen $\rho_b = 2140 \text{ kg/m}^3$ und $\rho_b = 2500 \text{ kg/m}^3$ gemessen. Gleichfalls verhält es sich mit der massebezogenen Wasseraufnahme, die zwischen $A_b = 1,08 \text{ M\%}$ und $A_b = 6,75 \text{ M\%}$ liegt. Als mögliche Ursache der breiten Streuung kann angeführt werden, dass alle Proben parallel zur Schichtung des Gesteins gebohrt wurden, was aber bei der Herstellung nicht vermeidbar war.

Ein repräsentativer Mittelwert der Gesteinskennwerte kann in diesem Fall nur für jeden Block bekanntgegeben werden:

	Block I				Block II			
	Minimum - Maximum		Mittelwerte		Minimum - Maximum		Mittelwerte	
Rohdichte:	2368-2434	kg/m ³	2405	kg/m ³	2451-2459	kg/m ³	2455	kg/m ³
Reindichte:	-	kg/m ³	2560	kg/m ³	-	kg/m ³	2500	kg/m ³
massebez. Wasseraufn.:	1.53-1.62	M%	1.60	M%	2.50-3.13	M%	2.85	M%
offene Porosität:	3.67-3.84	%	3.75	%	6.14-7.67	%	7.00	%
Gesamtporosität:	5.00-7.57	%	6.15	%	1.57-1.89	%	1.75	%
	Block III				Block IV			
	Minimum - Maximum		Mittelwerte		Minimum - Maximum		Mittelwerte	
Rohdichte:	2155-2198	kg/m ³	2175	kg/m ³	2139-2496	kg/m ³	2321	kg/m ³
Reindichte:	-	kg/m ³	2450	kg/m ³	2518-2558	kg/m ³	2530	kg/m ³
massebez. Wasseraufn.:	5.90-6.31	M%	6.15	M%	1.08-6.75	M%	3.20	M%
offene Porosität:	13.00-13.63	%	13.40	%	2.69-14.46	%	7.20	%
Gesamtporosität:	13.54-15.21	%	14.41	%	2.44-15.04	%	8.20	%

Tabelle 15: Gesteinskennwerte Leithakalk aus Kaisersteinbruch

Wenn man die Rohdichte der einzelnen Gesteinsvarietäten zur Wasseraufnahme in Bezug stellt, erkennt man einen relativ gleichwertigen und homogenen Gefügestand der Blöcke I bis III. Ein völlig anderes Bild liefert hingegen Block Nr. IV. Dessen Werte streuen über die gesamte Diagrammbreite. (vgl. Abbildung 74)

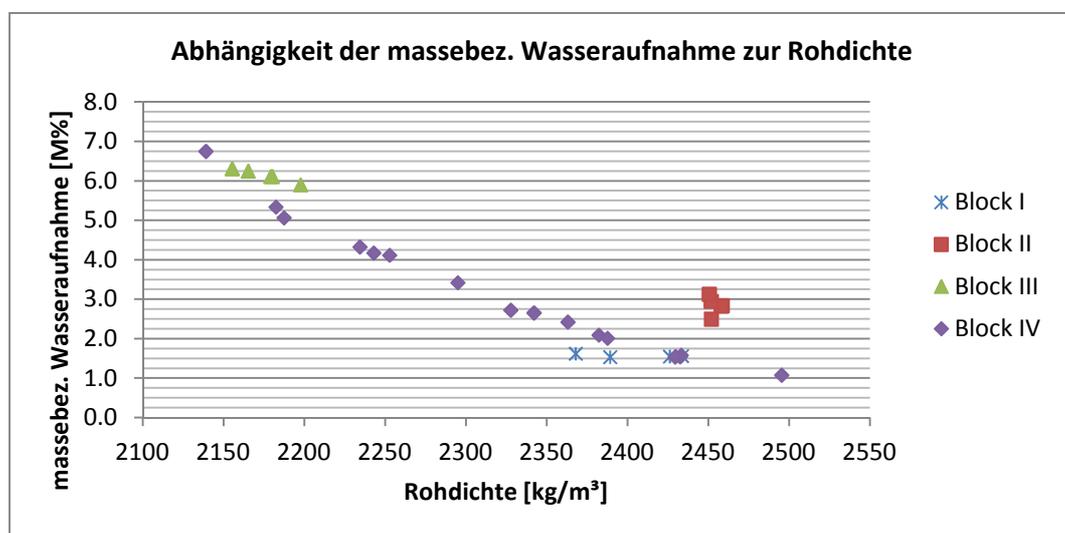


Abbildung 74: Abhängigkeit der massebez. Wasseraufnahme zur Rohdichte

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

5.4.2. Ergebnisse der Ultraschallmessung

Wie auf dem nachfolgenden Diagramm zu sehen, wurden die Ergebnisse der Ultraschallmessung nach der Prüfkörperbezeichnung geordnet. Zusätzlich wurde unterhalb der Messergebnisse ein Farbbalken eingezeichnet, um eine bessere Übersicht zu geben, welcher Prüfkörper welcher Gesteinsvarietät zugeordnet ist.

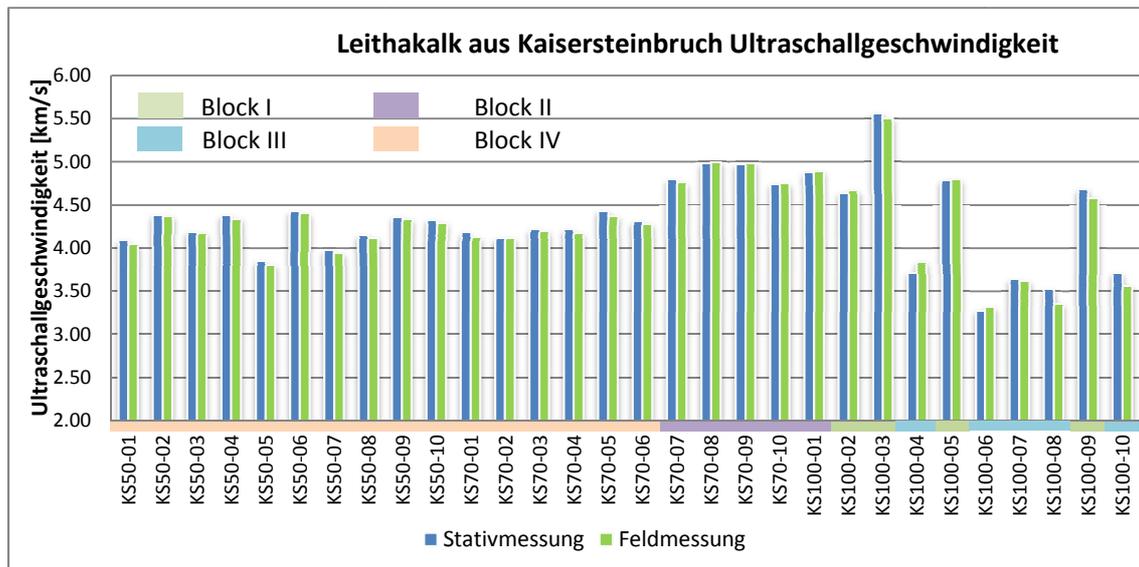


Abbildung 75: Leithakalk aus Kaisersteinbruch Ultraschallgeschwindigkeit

Fasst man die Ultraschallgeschwindigkeiten nach ihren Herkunftsblöcken in Tabellenform zusammen (vgl. Tabelle 16), so erkennt man, dass die Blöcke Nr. I und Nr. II die besten Messergebnisse mit etwa 4,9 km/s aufzuweisen haben. Im Gegensatz hierzu lieferte der Block Nr. III die niedrigsten Ergebnisse mit einer mittleren US-Geschwindigkeit von 3,6 km/s. Im direkten Vergleich bedeutet dies eine Geschwindigkeitsdifferenz von 1,3 km/s, oder 25%.

	US Stativmessung		US Feldmessung		Mittelwertdifferenz
	Minimum - Maximum	Mittelwerte	Minimum - Maximum	Mittelwerte	Stativ-Feld
Block I	4.64-5.56 km/s	4.92 km/s	4.58-5.50 km/s	4.88 km/s	0.04 km/s
Block II	4.74-4.98 km/s	4.87 km/s	4.75-5.00 km/s	4.88 km/s	-0.01 km/s
Block III	3.28-3.72 km/s	3.57 km/s	3.31-3.84 km/s	3.54 km/s	0.03 km/s
Block IV	3.85-4.43 km/s	4.22 km/s	3.80-4.40 km/s	4.19 km/s	0.03 km/s

Tabelle 16: Messergebnisse Ultraschallgeschwindigkeit Leithakalk aus Kaisersteinbruch

5.4.3. Auswertung der Porosimetermessung

Für jeden Leithakalkblock aus Kaisersteinbruch wurden mindestens zwei Porosimetermessungen durchgeführt. Eine genaue Auflistung der Anzahl der Messungen sowie deren Name, befindet sich in Tabelle 17. Dadurch können die Prüfprotokolle, die sich im Anhang befinden, den jeweiligen Blöcken zugeordnet werden.

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Leithakalk aus Kaisersteinbruch	Nr.	File Name	Envelope Density	Bulk Density	Apparent Density	Acc. Porosity
			[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
Block I	1	M_Block_1_a	2.43	2.45	2.70	9.97
	2	M_Block_1_b	2.45	2.46	2.68	8.46
	3	M_Block_1_c	2.47	2.48	2.72	9.31
Block II	1	M_Block_2_a	2.54	2.54	2.71	6.31
	2	M_Block_2_b	2.59	2.59	2.73	5.18
Block III	1	M_Block_3_a	2.17	2.18	2.87	24.24
	2	M_Block_3_b	2.10	2.11	2.72	22.55
	3	M_Block_3_c	2.17	2.19	2.74	20.84
Block IV "normal"	1	M_LK_norm_a	2.45	2.48	2.68	8.87
	2	M_LK_norm_b	2.45	2.48	2.72	9.95
Block IV "mürb"	1	M_LK_mürb_a	2.42	2.48	2.71	10.73
	2	M_LK_mürb_b	2.36	2.44	2.68	11.92

Tabelle 17: Auswertung der Porosimetermessungen

Im Folgenden wird für jeden Leithakalkblock aus Kaisersteinbruch ein Porenverteilungsdiagramm gezeigt.

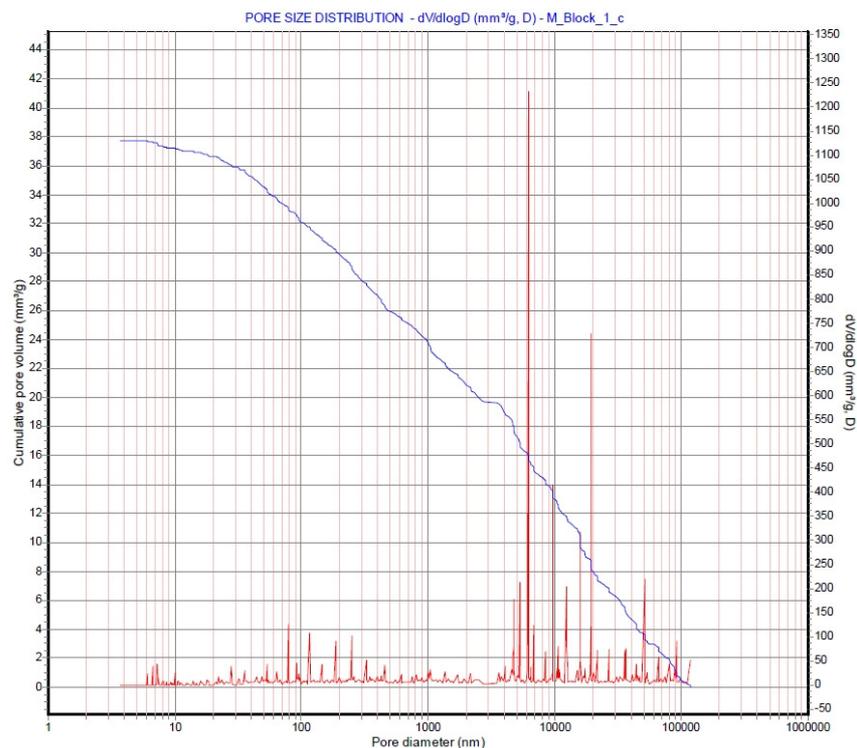


Abbildung 76: Porenverteilung Block I

Der Block Nr. I weist eine sehr weit gestufte und gleichmäßige Porenverteilung auf. Im Gegensatz hierzu stehen die Ergebnisse des Blockes Nr. II. Dieser scheint eine enge Porenverteilung im Bereich von 1000 nm bis 30 nm zu haben.

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

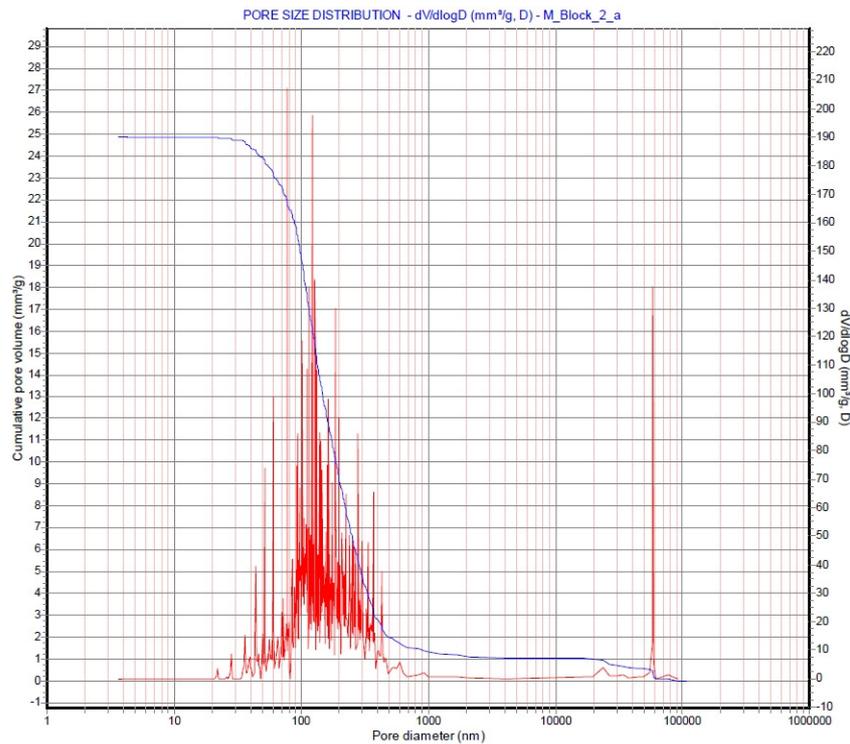


Abbildung 77: Porenverteilung Block II

Block Nr. III hat wie Block Nr. I eine weit gestufte Porenverteilung, jedoch ist sie nicht so gleichmäßig. Zu beachten ist hier, dass laut dieser Messung das kumulierte Porenvolumen bei 105 mm³/g liegt.

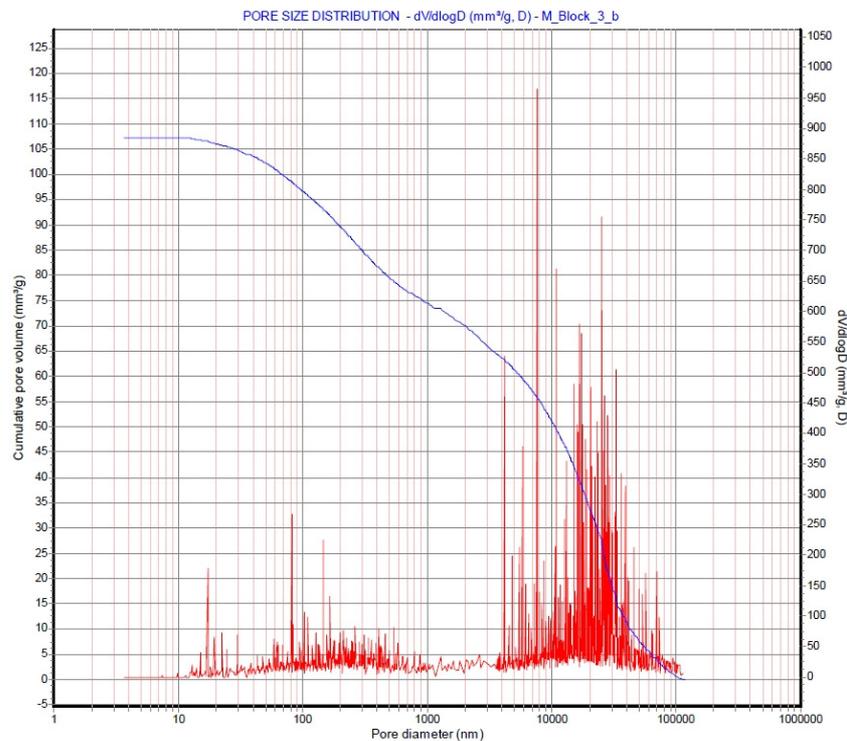


Abbildung 78: Porenverteilung Block III

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Aus dem Block Nr. IV wurden Messungen aus zwei verschiedenen Bereichen vorgenommen. Dem von außen her dichteren „normalen“ Bereich, und dem „mürben“ Bereich.

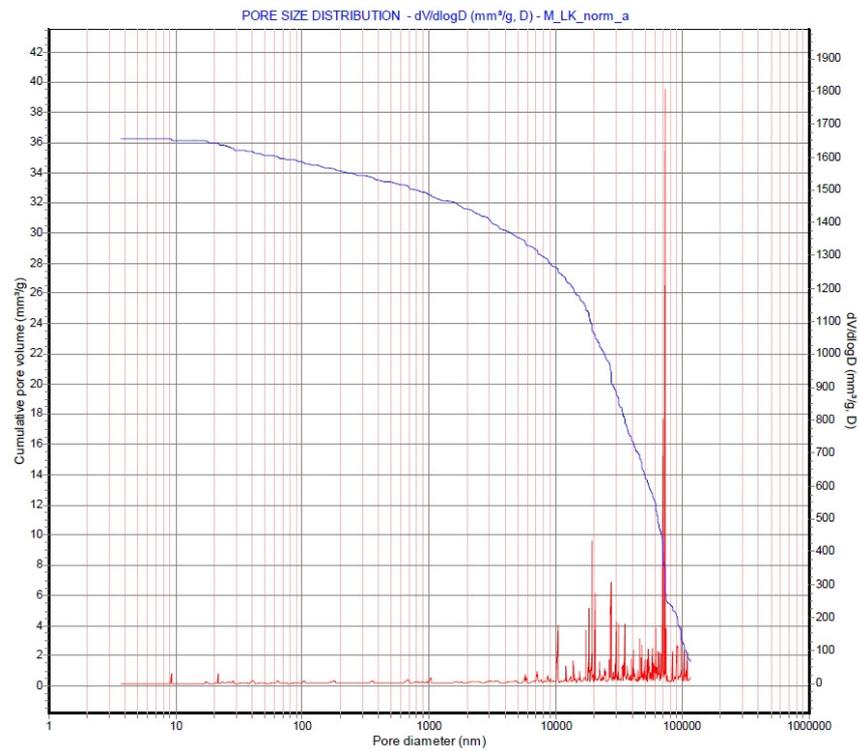


Abbildung 79: Porenverteilung Block IV "normal"

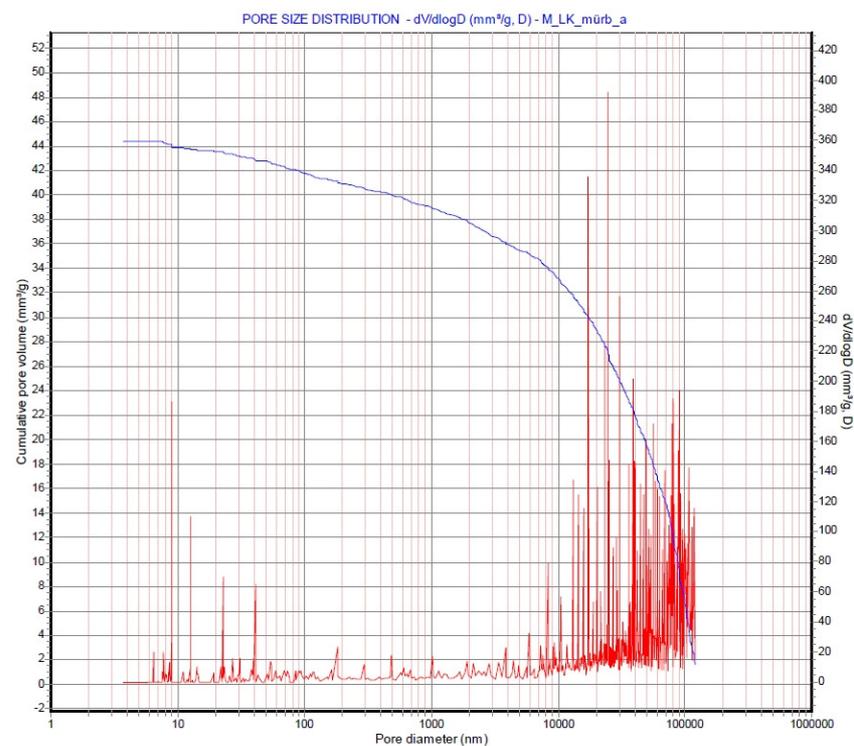


Abbildung 80: Porenverteilung Block IV "mürbe"

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Beide Kurven weisen eine ähnliche Porenverteilungskurve auf, wobei ein eindeutiges Porenmaximum bis 10 000 nm liegt.

5.4.4. Ergebnisse der Versuchsreihe 1

Wie in Abbildung 81 erkennbar, unterscheiden sich die einaxialen Druckfestigkeiten der verschiedenen Gesteinsvarietäten zu sehr, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen. So wurden alleine bei den $\varnothing 50$ mm Proben in Block Nr. IV Druckfestigkeiten zwischen 21 N/mm² und 54 N/mm² gemessen, was einer Streuung von nahezu $\pm 45\%$ vom Mittelwert, der 33 N/mm² beträgt, entspricht. Noch breiter fällt die Streuung von Block Nr. II aus. Hier schwankt die Druckfestigkeit zwischen 19 N/mm² und 66 N/mm².

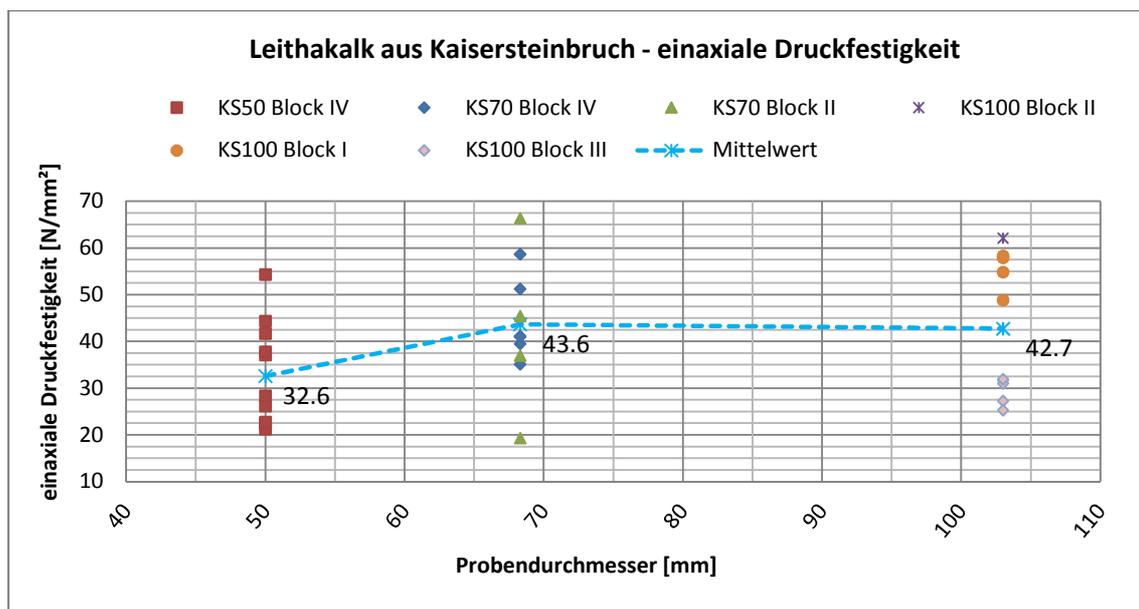


Abbildung 81: Leithakalk aus Kaisersteinbruch – einaxiale Druckfestigkeit

Enger gestuft sind die Messergebnisse des ersten und dritten Blockes, die für die großen Proben mit $\varnothing 100$ mm verwendet wurden. Jedoch sind hier die Druckfestigkeiten des Blockes Nr. I fast doppelt so hoch, wie jene des Blockes Nr. III. Aus diesem Grund wird hier nur eine strichlierte Mittellinie über die Probendurchmesser eingezeichnet.

Ähnlich verhält es sich auch bei der Gegenüberstellung des statischen und dynamischen Elastizitätsmoduls zur Prüfkörperdimension. Hier schwanken die mittleren statischen E-Module der Blöcke I, II und IV zwischen 35 GPa und 40 GPa. Jenes des Blockes Nr. III liegt bei lediglich 17 GPa. Bei den dynamischen Messungen weisen die Blöcke I und II mit 48 GPa die größten Steifigkeiten auf. Die Ergebnisse des Blocks Nr. IV ähneln mit 34 GPa jenen des stat. E-Moduls. Den geringsten Wert hat wieder Block Nr. III mit 23 GPa.

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

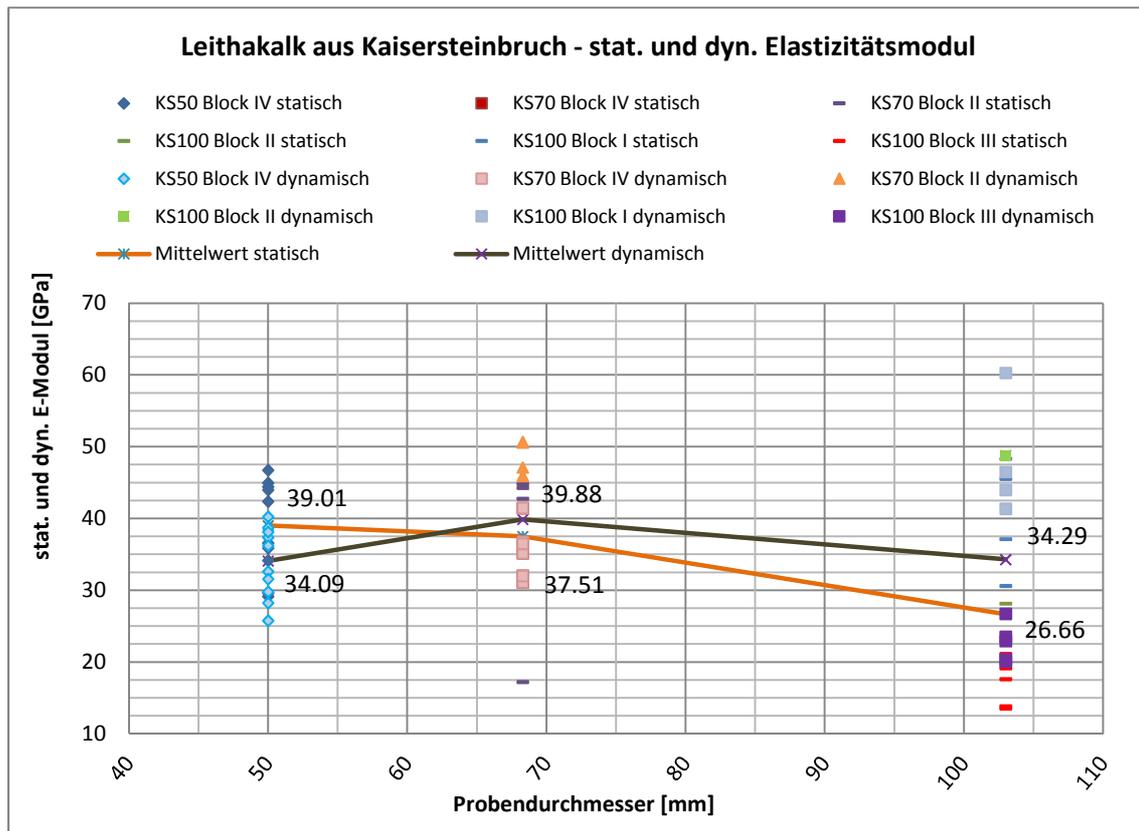


Abbildung 82: Leithakalk aus Kaisersteinbruch - statischer und dynamischer Elastizitätsmodul

In nachfolgender Tabelle werden die Ergebnisse der einaxialen Druckfestigkeit und der E-Module der Leithakalkblöcke I-IV zusammengefasst:

Block Nr.		einaxiale Druckfestigkeit	stat. E-Modul lt. EN 14580	dyn. E-Modul Druckluftstativ ($\mu=0,25$)	dyn. E-Modul Feldmessung ($\mu=0,25$)
		$R [N/mm^2]$	$E_{stat} [GPa]$	$E_{dyn} [GPa]$	$E_{dyn} [GPa]$
I	min	48.84	30.63	43.22	41.37
I	max	58.32	48.33	61.62	60.31
I	mittel	54.98	40.41	48.69	48.05
II	min	19.32	17.25	45.95	46.05
II	max	66.38	44.83	50.70	51.06
II	mittel	46.05	35.46	48.57	48.63
III	min	25.30	13.56	19.66	20.11
III	max	31.93	21.15	25.09	26.75
III	mittel	29.44	17.08	23.17	22.74
IV	min	21.21	29.17	26.44	25.79
IV	max	58.68	46.77	40.73	40.26
IV	mittel	37.69	37.57	34.66	34.14

Tabelle 18: einaxiale Druckfestigkeit und E-Moduli

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Prüfkörperserien KS50, KS70 und KS100 dargestellt. Unabhängig von der Prüfkörpergröße ist zu sehen, dass die kleinen Prüfkörper

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

aus Block IV ausschließlich als Spaltbruch brechen. Mit steigender Prüfkörpergeometrie geht dieser in einen Scherbruch über.



Abbildung 83: 1. Reihe: KS50, KS70; 2. Reihe: KS100, Scherbruch KS70-2(links) und Spaltbruch KS70-10(rechts)

5.5 Regressionsgeraden

Im Folgenden werden die Regressionsgeraden der Marmore und des Rohrbacher Konglomerates angeführt. Für den Leithakalk aus Kaisersteinbruch wurde diese Auswertung nicht vorgenommen, da die Prüfkörperherstellung wie in Kapitel 2.3 beschrieben, aus vier verschiedenen Blöcken erfolgte.

Bei drei der in den unteren Diagrammen dargestellten Regressionsgeraden kann man feststellen, dass das Konstante Glied d , welches den Kopplungseffekt des Prüfkörpers mit den Messköpfen widerspiegelt, negativ ist. Deutlich ist dies in Abbildung 86, wo die Geraden des Rohrbacher Konglomerates dargestellt werden, zu erkennen. Dies deutet zumeist auf eine Störung der US-Messung der Prüfkörper mit größerer Prüfkörperlänge hin, vgl. (Fleischer, 2002, S. 69). Dies konnte auch während den Messungen beobachtet werden, und wurde in Kapitel 5.3.2 näher beschrieben.

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

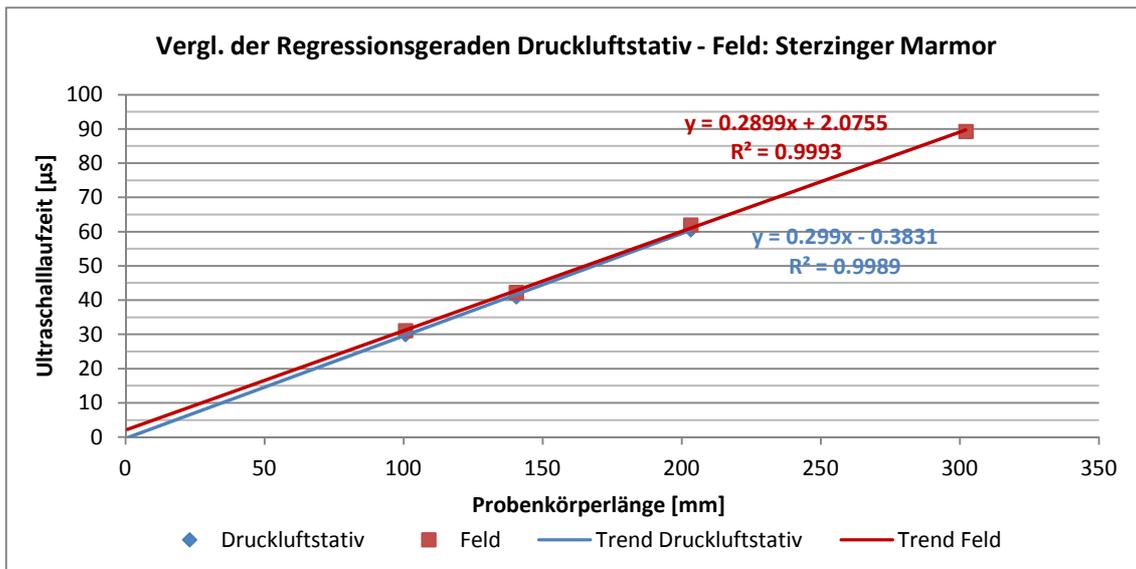


Abbildung 84: Sterzinger Marmor: Vergleich der Regressionsgeraden Druckluftstativ-Feld

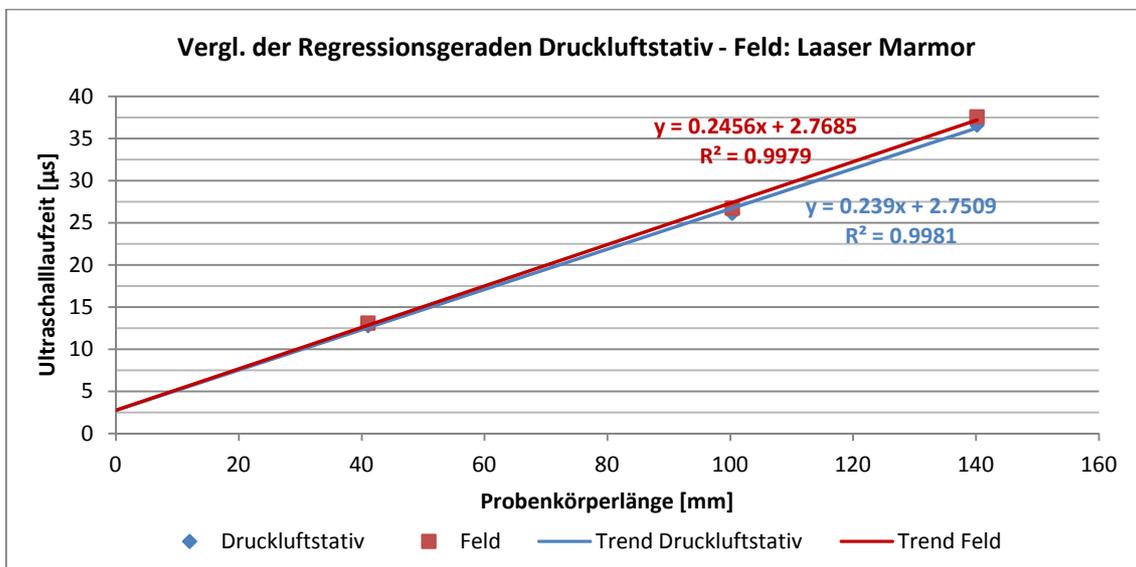


Abbildung 85: Laaser Marmor: Vergleich der Regressionsgeraden Druckluftstativ-Feld

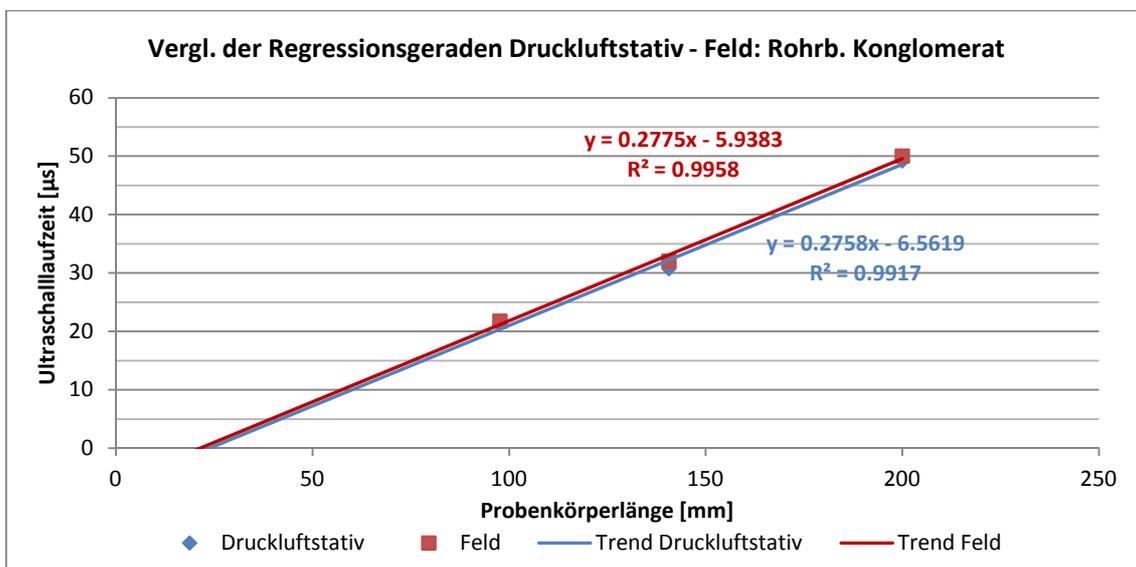


Abbildung 86: Rohrbacher Konglomerat: Vergleich der Regressionsgeraden Druckstativ-Hand

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

In den obigen Diagrammen ist zu erkennen, dass die Ultraschallmessungen mittels Druckluftstativ und Hand („Feld“) nur geringfügig voneinander abweichen, und die Unterschiede für die Praxis vernachlässigbar sind. Dies verdeutlicht auch Abbildung 87, in dem die beiden Messmethoden direkt gegenübergestellt wurden.

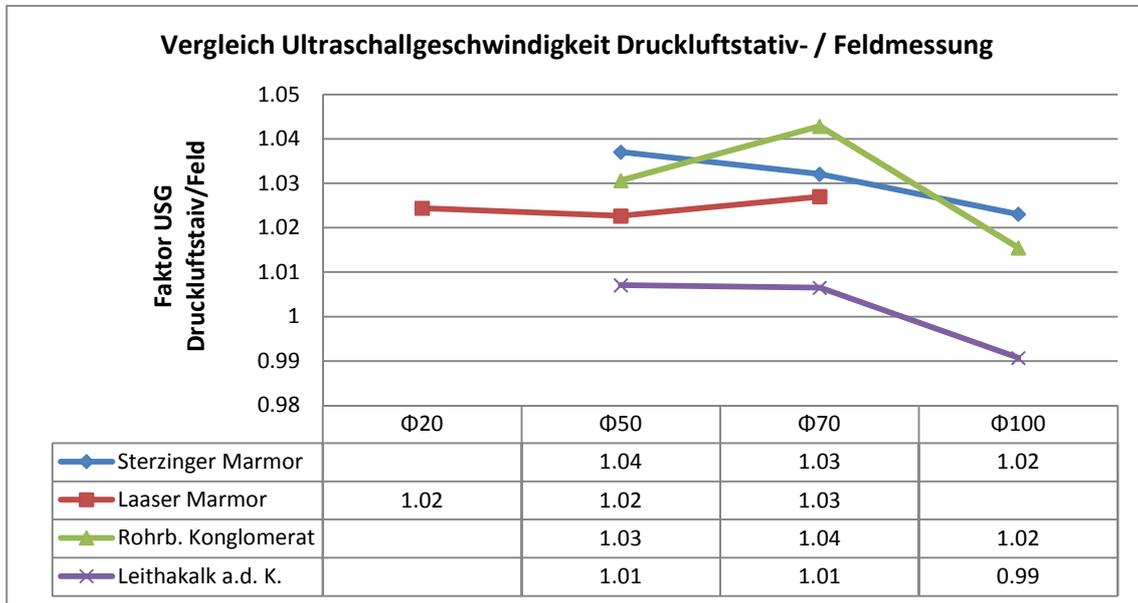


Abbildung 87: Direkter Faktorenvergleich Ultraschallgeschwindigkeit Druckluftstativ / Feld

Weitere Aussagen über mögliche Verhältnisse lassen sich über die Aufschlüsselung der Parameter k und d der Regressionsgeraden geben.

Im folgenden Diagramm wurden folgende Abkürzungen verwendet:

- $\Delta k = k_{\text{Druckstativ}} - k_{\text{Hand}}$
- $f_k = k_{\text{Druckstativ}} / k_{\text{Hand}}$
- $\Delta d = d_{\text{Druckstativ}} - d_{\text{Hand}}$
- $f_d = d_{\text{Druckstativ}} / d_{\text{Hand}}$

Vergleich k und d der Regressionsgeraden		k...Steigung der Geraden			d...Achsenabschnitt		
		k	Δk	f_k	d	Δd	f_d
Sterzinger Marmor (mit M150 Proben)	Druckluftstativ	0.299	0.009	1.031	-0.383	-2.459	-0.185
	Feld	0.290			2.076		
Sterzinger Marmor (ohne M150 Proben)	Druckluftstativ	0.299	-0.003	0.991	-0.383	-0.871	-0.785
	Feld	0.302			0.488		
Laaser Marmor	Druckluftstativ	0.239	-0.007	0.973	2.751	-0.018	0.994
	Feld	0.246			2.769		
Rohrbacher Konglomerat	Druckluftstativ	0.276	-0.002	0.994	-6.562	-0.624	1.105
	Feld	0.278			-5.938		

Tabelle 19: Vergleich k und d der Regressionsgeraden

Dabei ist im direkten Vergleich zu erkennen, dass sich die Wertepaare der Druckluftstativ und Feldmessung nur geringfügig voneinander unterscheiden. Die Messergebnisse des

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Sterzinger Marmors scheinen in obiger Tabelle zweimal auf. Dies hat jenen Grund, um aufzuzeigen, wie die Probekörper mit $\varnothing 150$ mm, bei denen nur die Handmessungen („Feld“) durchgeführt wurden, die Messergebnisse beeinflussen. Um einen unverfälschten Vergleich wiederzugeben, wurden die M150 Prüfkörper in der zweiten Gegenüberstellung vernachlässigt.

Gut zu erkennen ist, dass der Achsenabschnitt d , also der Kopplungsverlust zwischen dem Probekörper und den Ultraschallmessköpfen, bei der Druckluftstativmessung kleiner ist. Dies lässt auf eine bessere Übertragung Wellen in das Prüfmedium schließen. Bei der Steigung k der Regressionsgeraden sollte es hingegen keine Unterschiede geben. Die obigen Abweichungen betragen jedoch 1% beim Sterzinger Marmor sowie beim Rohrbacher Konglomerat, und 3% beim Laaser Marmor. Diese sind wahrscheinlich auf Messfehler zurückzuführen.

5.6 Zusammenhänge der Messgrößen

In dem nachfolgenden Kapitel werden für die 1. Versuchsreihe Messzusammenhänge zwischen

- Einfluss der Rohdichte auf die Ultraschallgeschwindigkeit
- Einfluss der Wasseraufnahme auf die Ultraschallgeschwindigkeit
- Einfluss der Druckfestigkeit auf die Ultraschallgeschwindigkeit
- Zusammenhang der Druckfestigkeit und des E-Moduls

abgebildet.

5.6.1. Einfluss der Rohdichte auf die Ultraschallgeschwindigkeit (USG)

Abbildung 88 bis 91 zeigen den Einfluss der Rohdichte auf die USG. Dabei lassen sich die linearen Trendlinien mit $y = k \cdot x + d$ wie folgt interpretieren:

- k Anstieg der Rohdichte in kg/m^3 pro Zunahme von 1 km/s USG
- d Achsenabschnitt in kg/m^3

Anhand der untenstehenden Abbildungen ist zu erkennen, dass keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können. Vielmehr müssten für jedes Material die Parameter k und d angepasst werden. So kann bei relativ Dichten und gleichmäßigen Materialien, wie dem Laaser Marmor, die USG unverhältnismäßig hoch schwanken ($k=0,93$; d.h. die Rohdichte nimmt um $0,93 \text{ kg/m}^3$ zu, wenn sich die USG um 1 km/s erhöht). Währenddessen hat sie beim Kaiserstein ($k=190$) schon mehr Aussagekraft, und könnte bei gut abgestimmten k und d erste Schätzungen der Rohdichte zulassen.

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

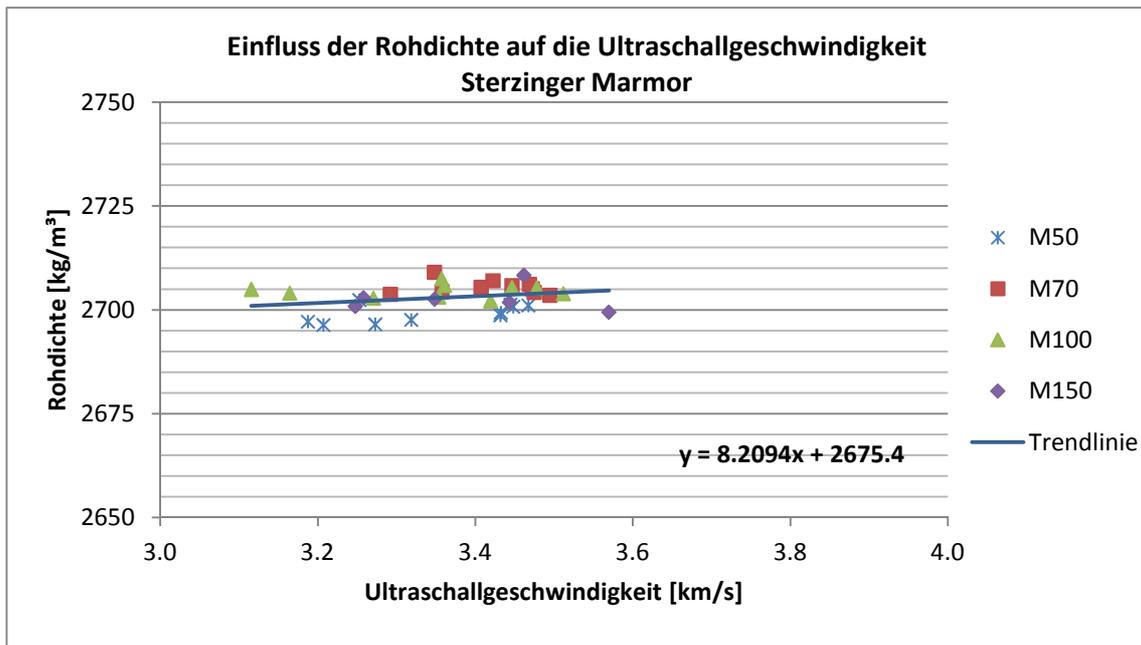


Abbildung 88: Einfluss der Rohdichte auf USG - Sterzinger Marmor

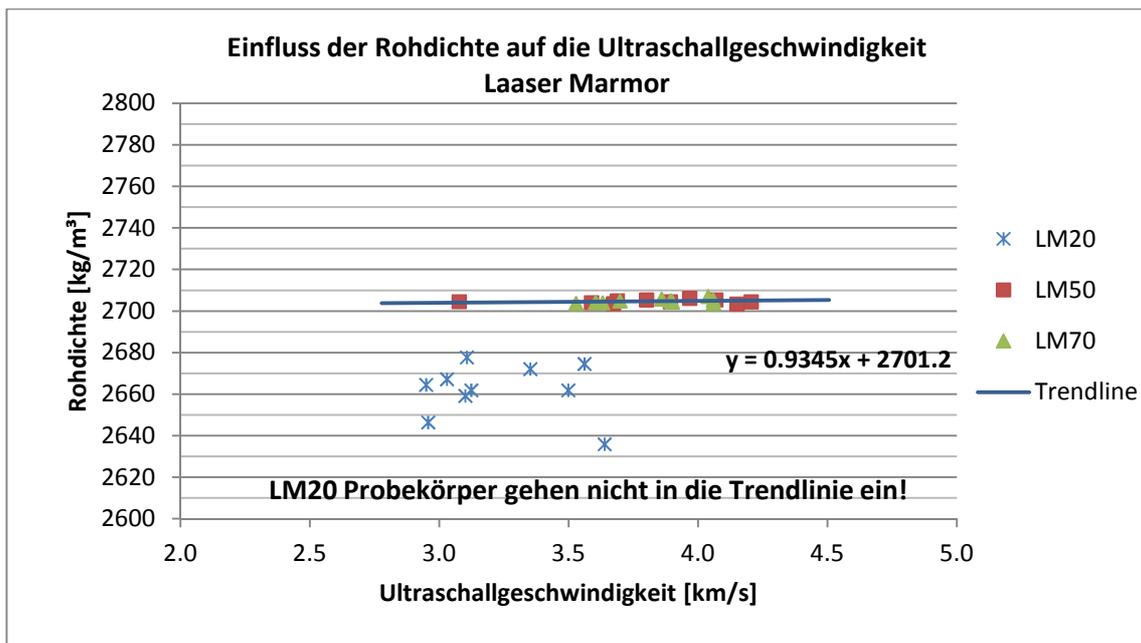


Abbildung 89: Einfluss der Rohdichte auf USG - Laaser Marmor

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

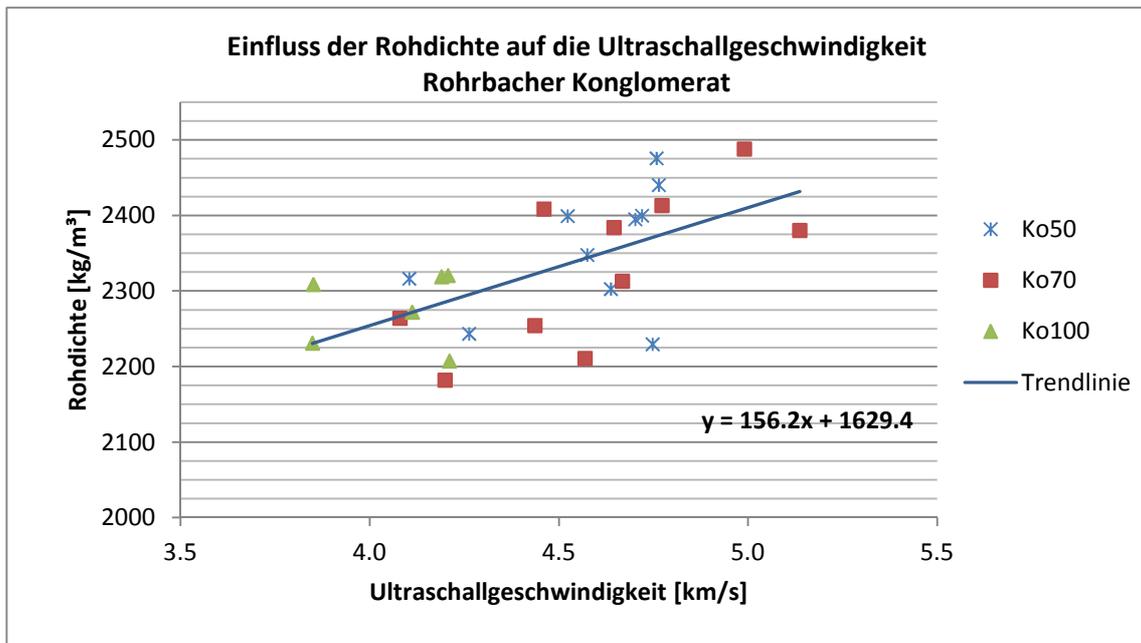


Abbildung 90: Einfluss der Rohdichte auf USG - Rohrbacher Konglomerat

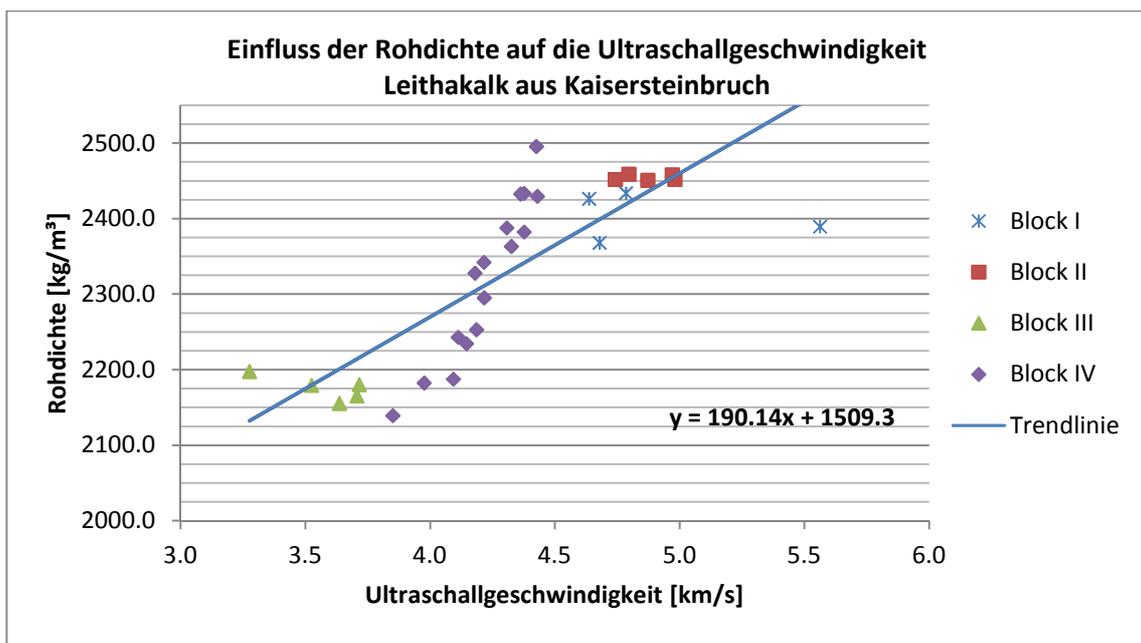


Abbildung 91: Einfluss der Rohdichte auf USG - Leithakalk aus Kaisersteinbruch

5.6.2. Einfluss der Wasseraufnahme auf die Ultraschallgeschwindigkeit (USG)

Beim Einfluss der Wasseraufnahme auf die USG verhält es sich genauso, wie beim Einfluss der Rohdichte. Während die Steigung k in M% pro km/s der linearen Trendlinie bei den Marmoren wegen der niedrigen Wasseraufnahme nahezu konstant ist, ist sie beim Rohrbacher Konglomerat und beim Kaiserstein mit $k = -1,3$ bzw. $k = -2,9$ in einem aussagekräftigerem Bereich.

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

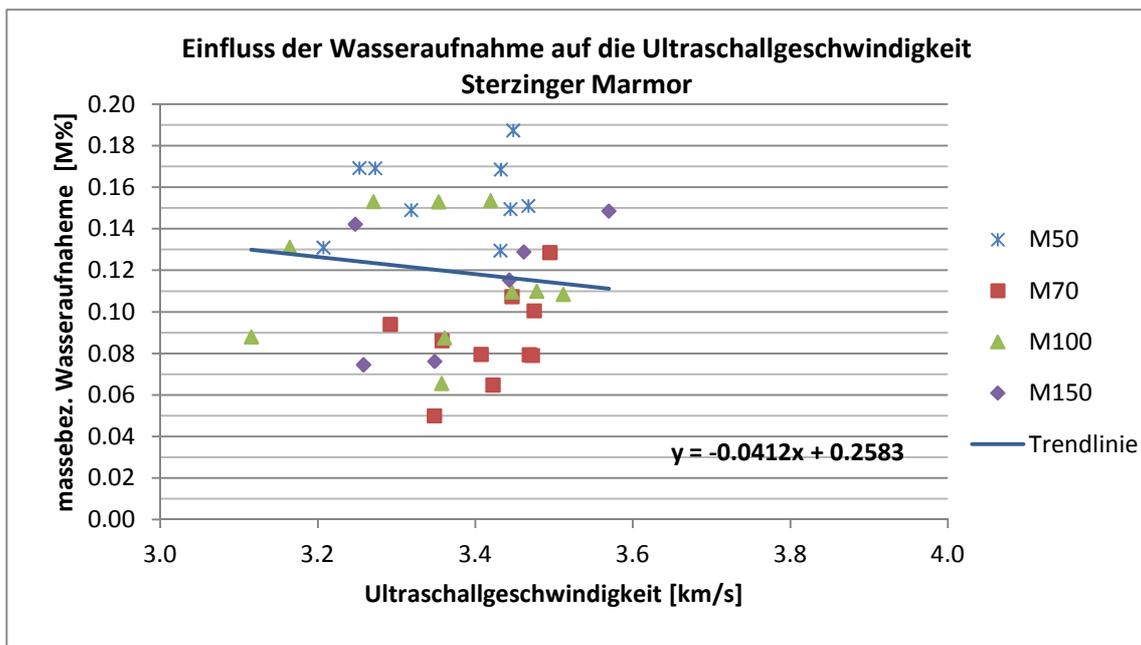


Abbildung 92: Einfluss der Wasseraufnahme auf die USG - Sterzinger Marmor

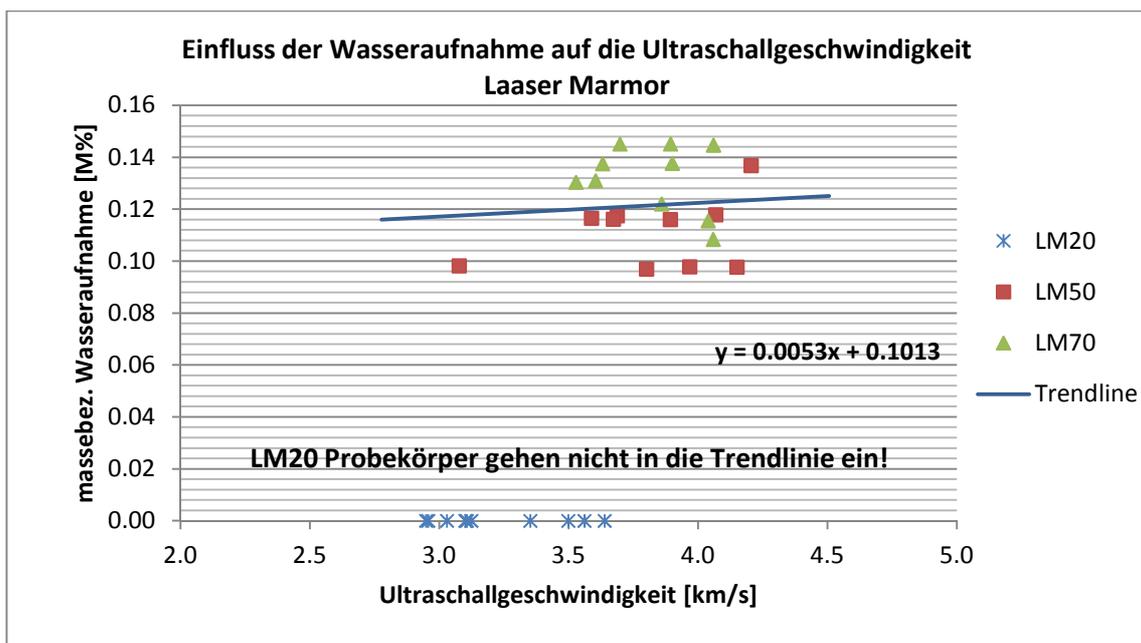


Abbildung 93: Einfluss der Wasseraufnahme auf die USG - Laaser Marmor

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

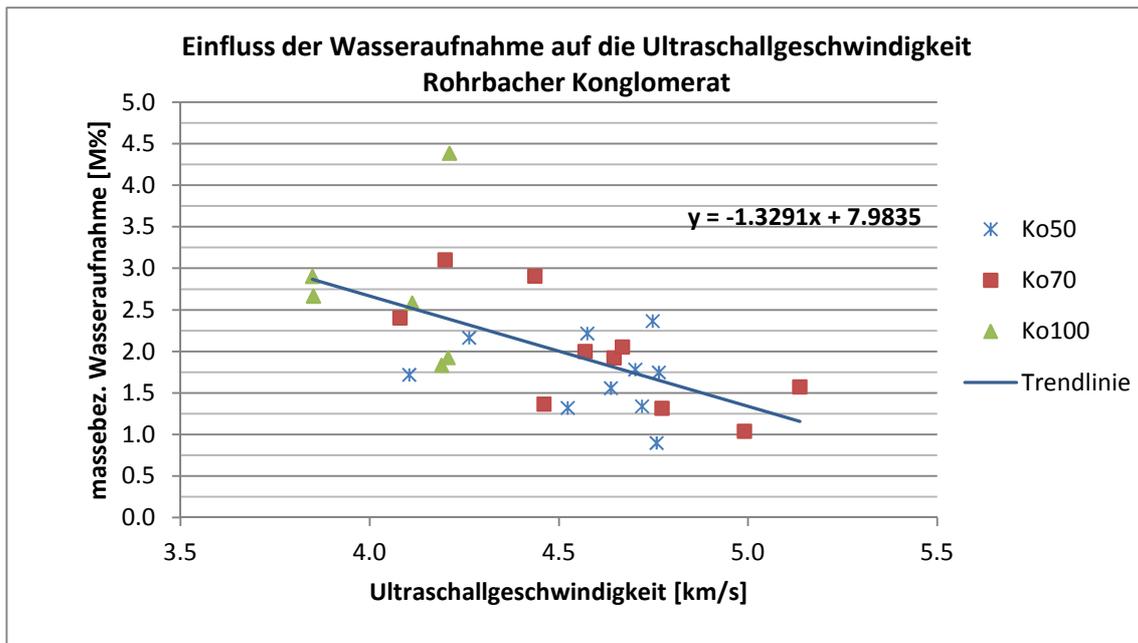


Abbildung 94: Einfluss der Wasseraufnahme auf die USG - Rohrbacher Konglomerat

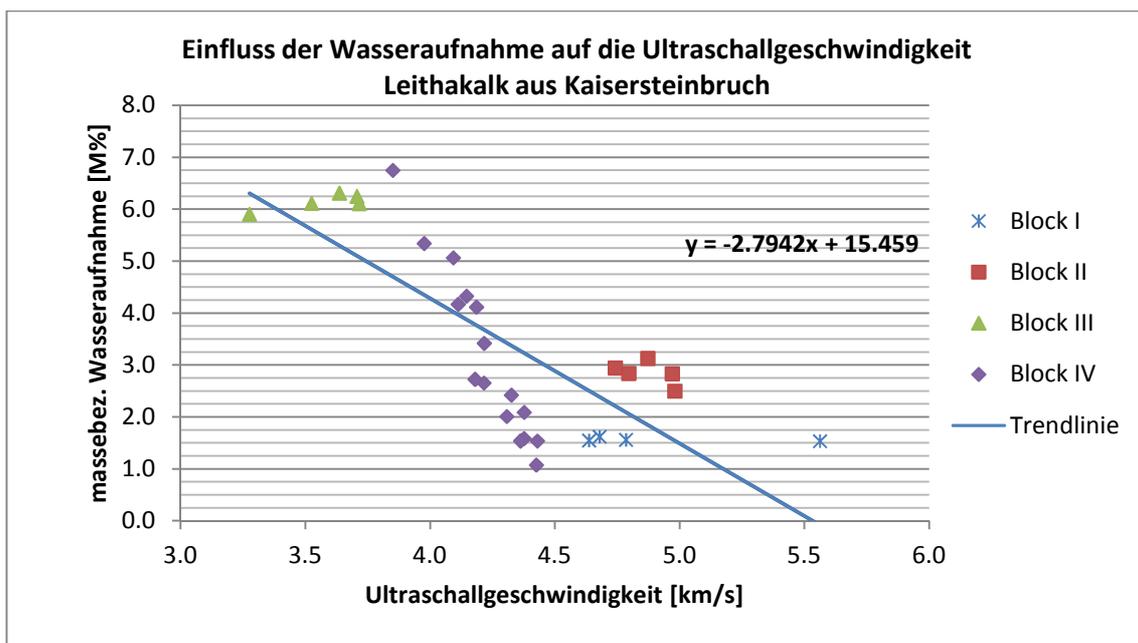


Abbildung 95: Einfluss der Wasseraufnahme auf die USG - Leithakalk aus Kaiserstein

5.6.3. Einfluss der Druckfestigkeit auf die Ultraschallgeschwindigkeit

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Zusammenhang der Druckfestigkeit und der Ultraschallgeschwindigkeit. Dabei wird ersichtlich, dass von dieser nur schwer auf die Druckfestigkeit geschlossen werden kann.

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

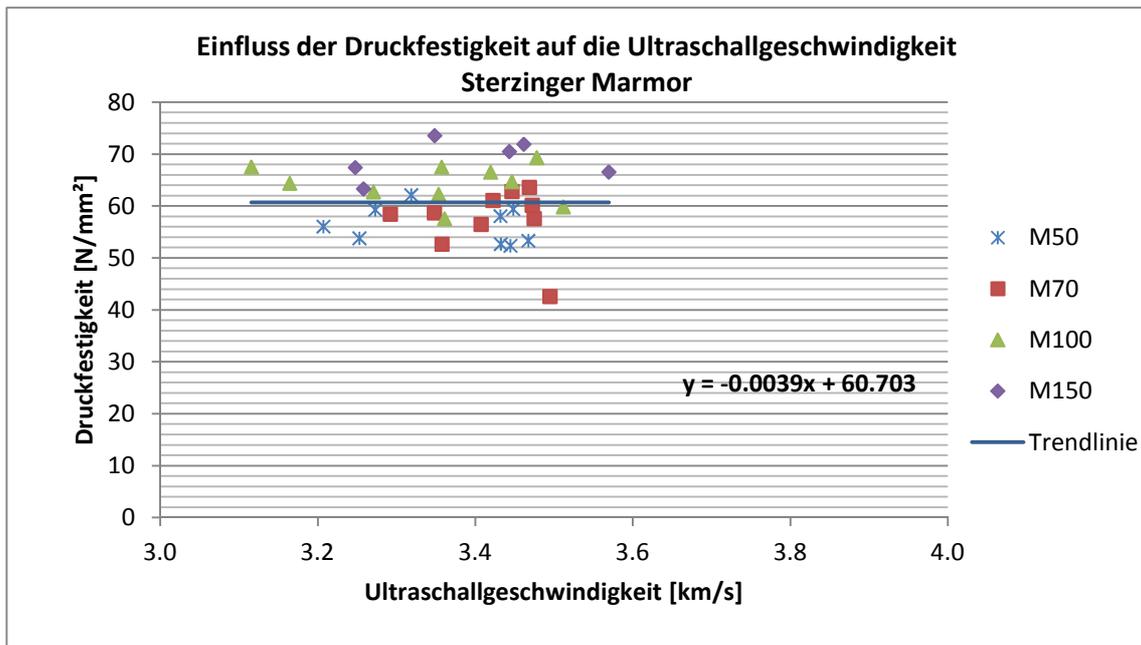


Abbildung 96: Einfluss der Druckfestigkeit auf die USG - Sterzinger Marmor

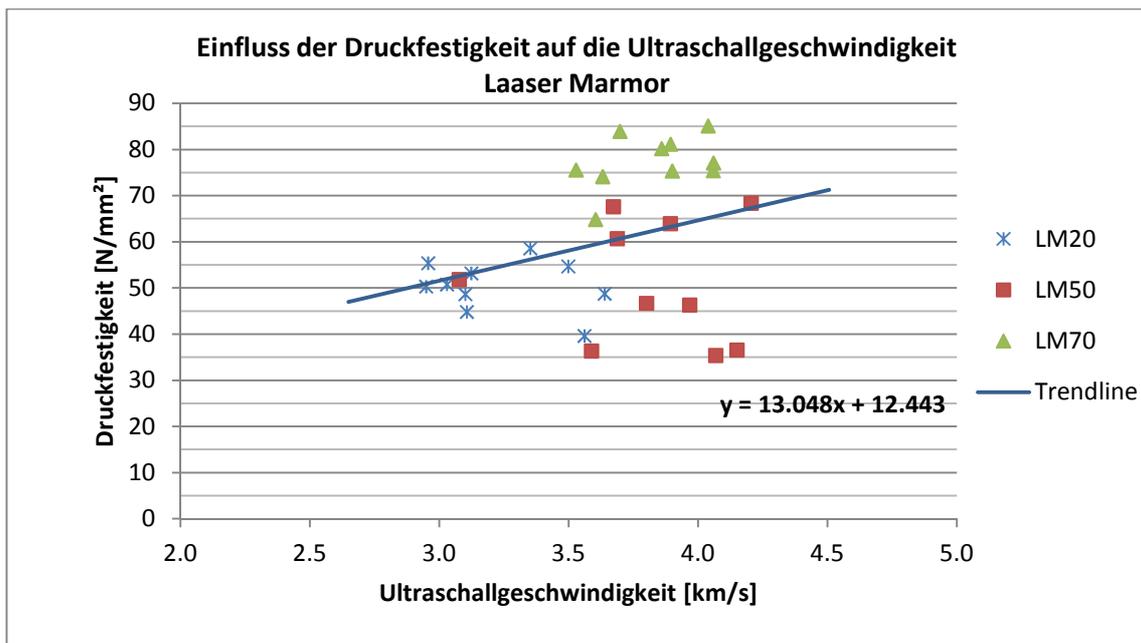


Abbildung 97: Einfluss der Druckfestigkeit auf die USG - Laaser Marmor

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

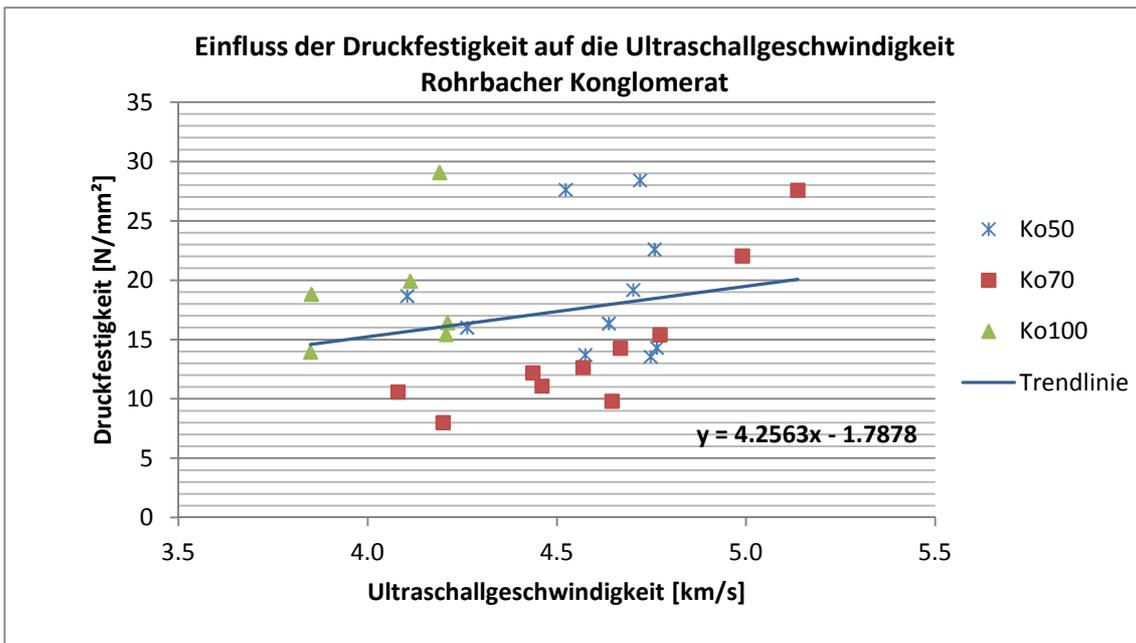


Abbildung 98: Einfluss der Druckfestigkeit auf die USG - Rohrbacher Konglomerat

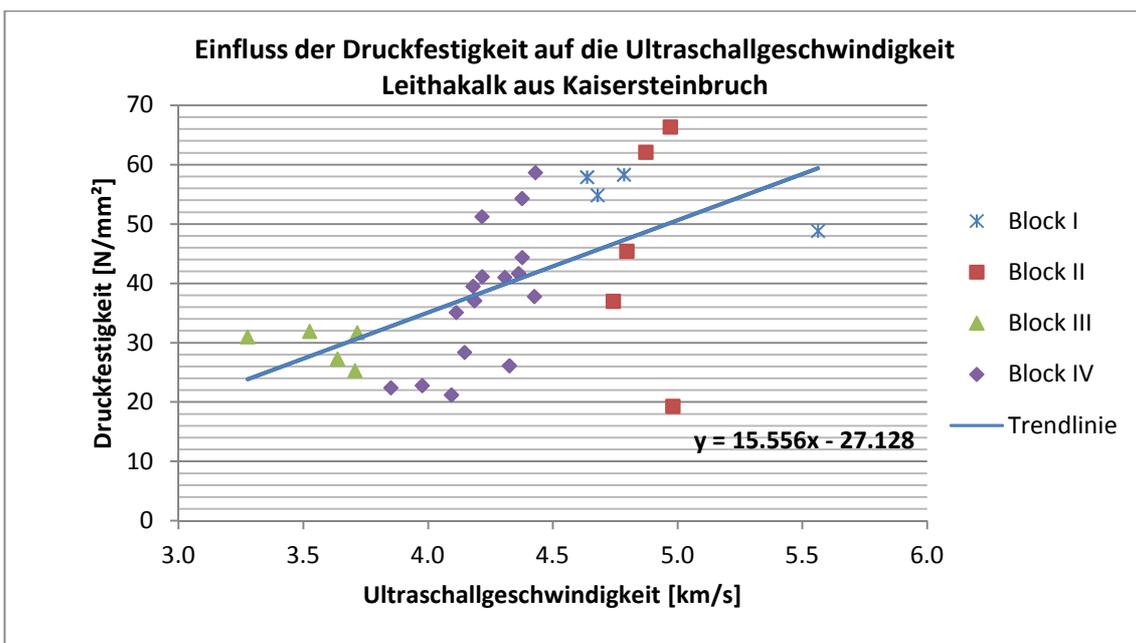


Abbildung 99: Einfluss der Druckfestigkeit auf die USG - Leithakalk aus Kaisersteinbruch

5.6.4. Zusammenhang der Druckfestigkeit und des E-Moduls

Abbildung 100 bis Abbildung 103 zeigen den Zusammenhang der Druckfestigkeit mit dem statischen und dynamischen E-Modul.

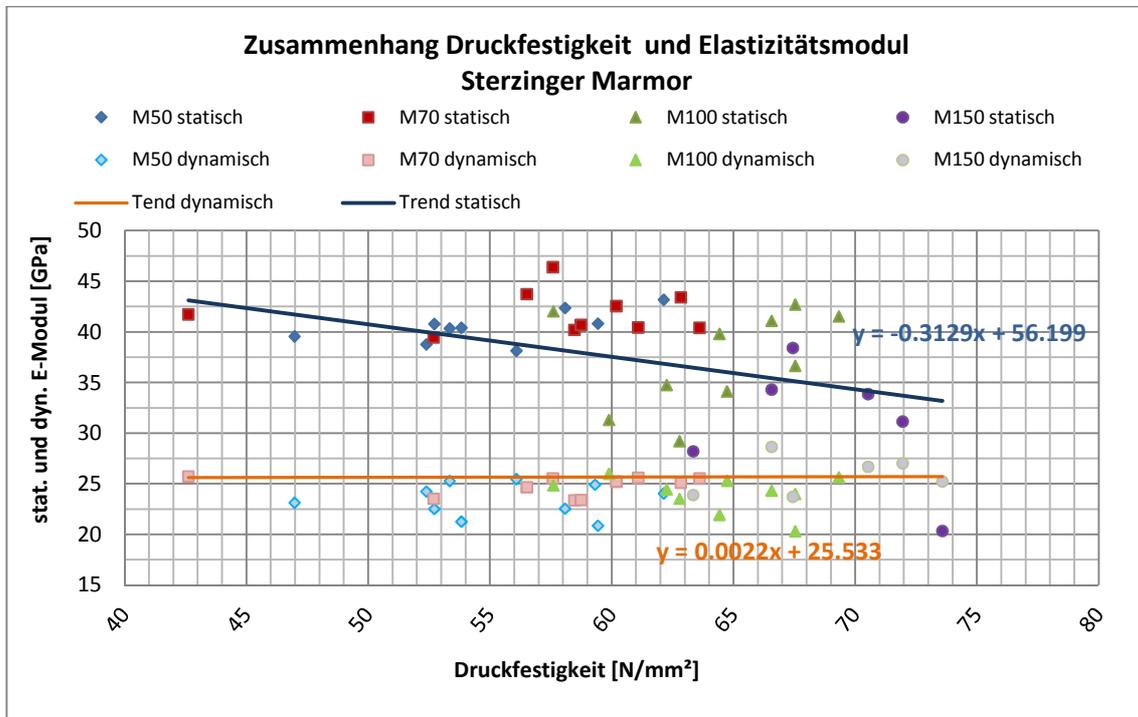


Abbildung 100: Zusammenhang Druckfestigkeit und E-Modul - Sterzinger Marmor

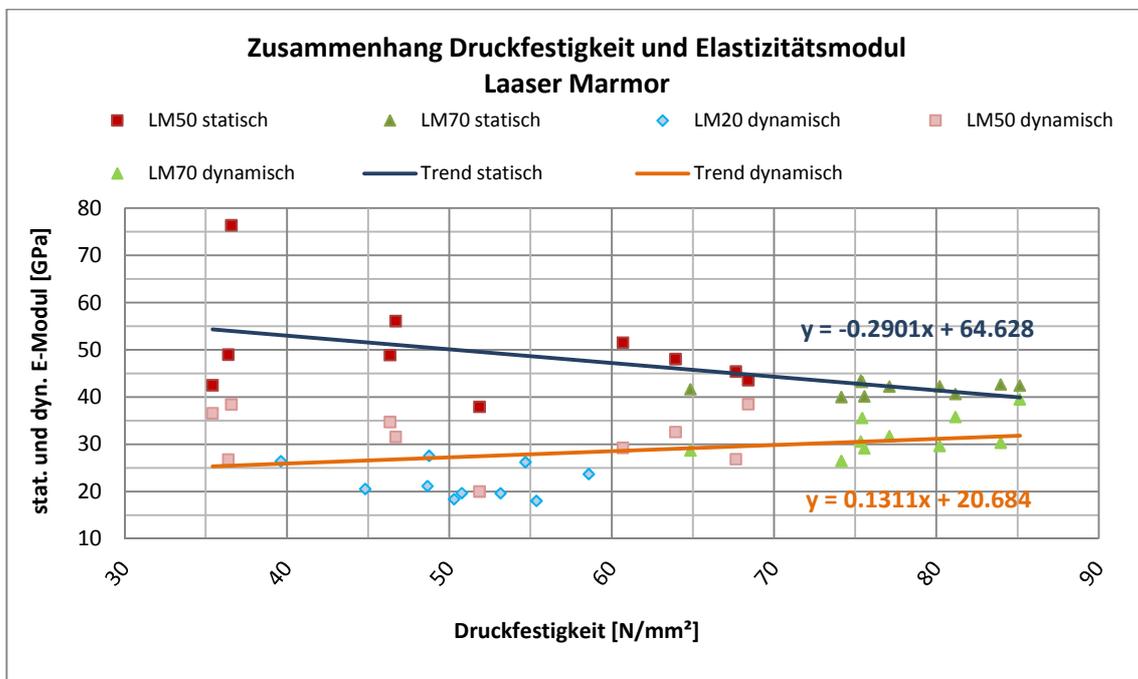


Abbildung 101: Zusammenhang Druckfestigkeit und E-Modul - Laaser Marmor

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

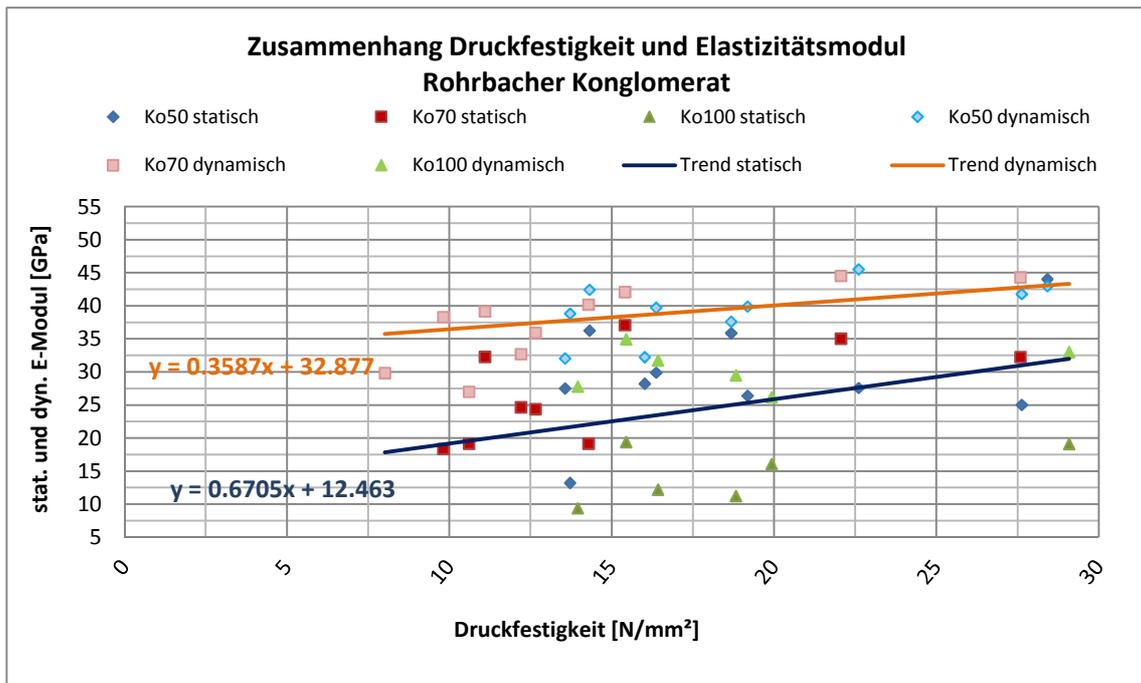


Abbildung 102: Zusammenhang Druckfestigkeit und E-Modul – Rohrbacher Konglomerat

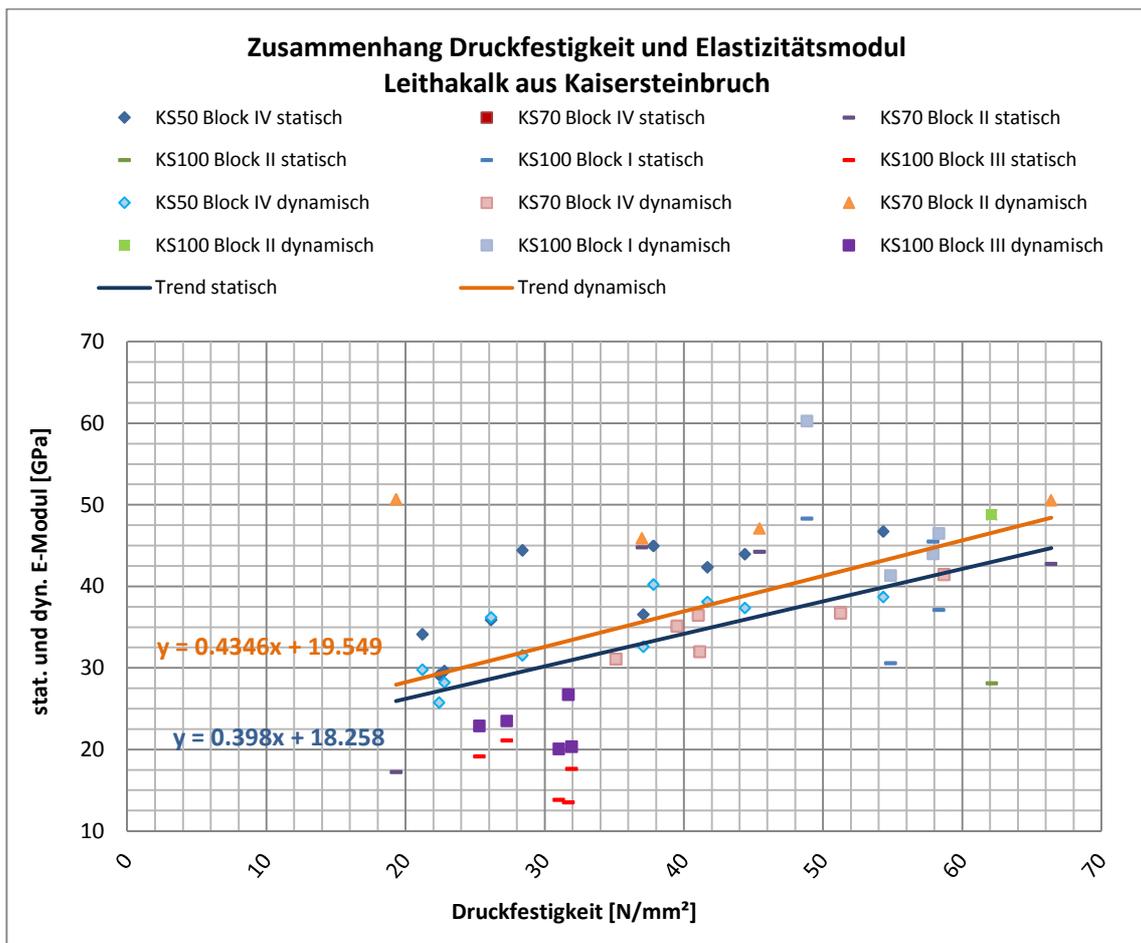


Abbildung 103: Zusammenhang Druckfestigkeit und E-Modul - Leithakalk aus Kaisersteinbruch

5.7 Resümee der 1. Versuchsreihe

Abschließend zur ersten Versuchsreihe werden in den Abbildung 104 bis Abbildung 106 die einaxiale Druckfestigkeit und das statische und dynamische Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Prüfkörperdimension dargestellt. Dabei wurden die Werte auf der Ordinate in Prozent angegeben, wobei der Ausgangspunkt die Druckfestigkeit oder das E-Modul der $\varnothing 50$ mm Proben war. Ausgenommen von den Darstellungen ist der Leithakalk aus Kaisersteinbruch, bei dem wegen der unterschiedlichen Varietäten (vgl. Kapitel 5.4) diese keinen Sinn ergeben würde.

Wie in der nachfolgenden Abbildung zu sehen, verhält sich die einaxiale Druckfestigkeit nicht so, wie in der Theorie des Size Effectes. Diese würde aussagen, dass sie mit steigender Prüfkörperdimension sinkt, was in den Versuchen aber nicht nachzuweisen war. Stattdessen steigt die einaxiale Druckfestigkeit mit der Prüfkörperdimension an.

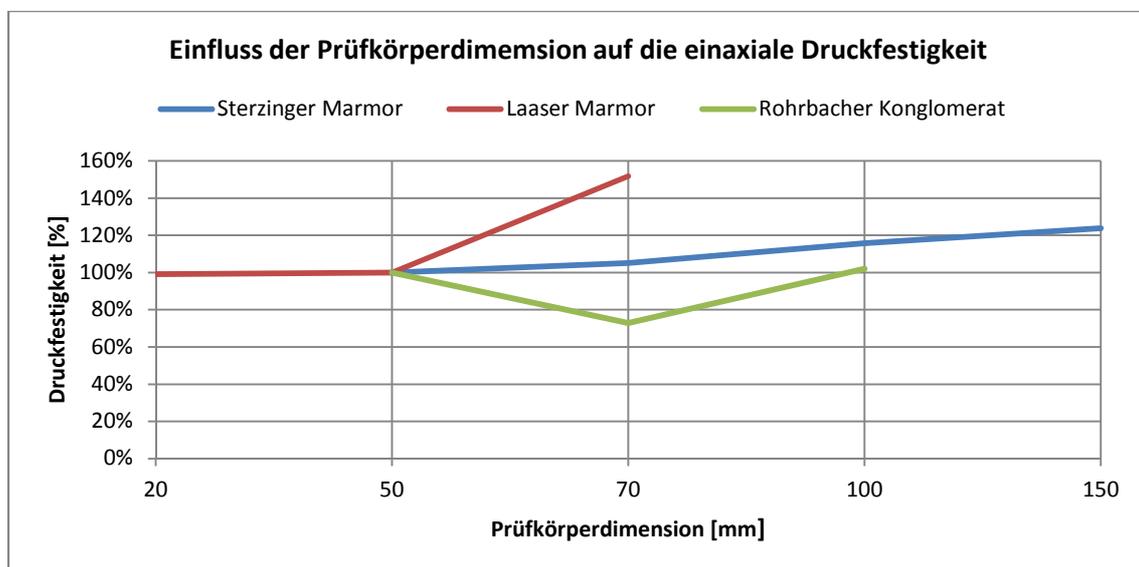


Abbildung 104: Einfluss der Prüfkörperdim. auf die einaxiale Druckfestigkeit

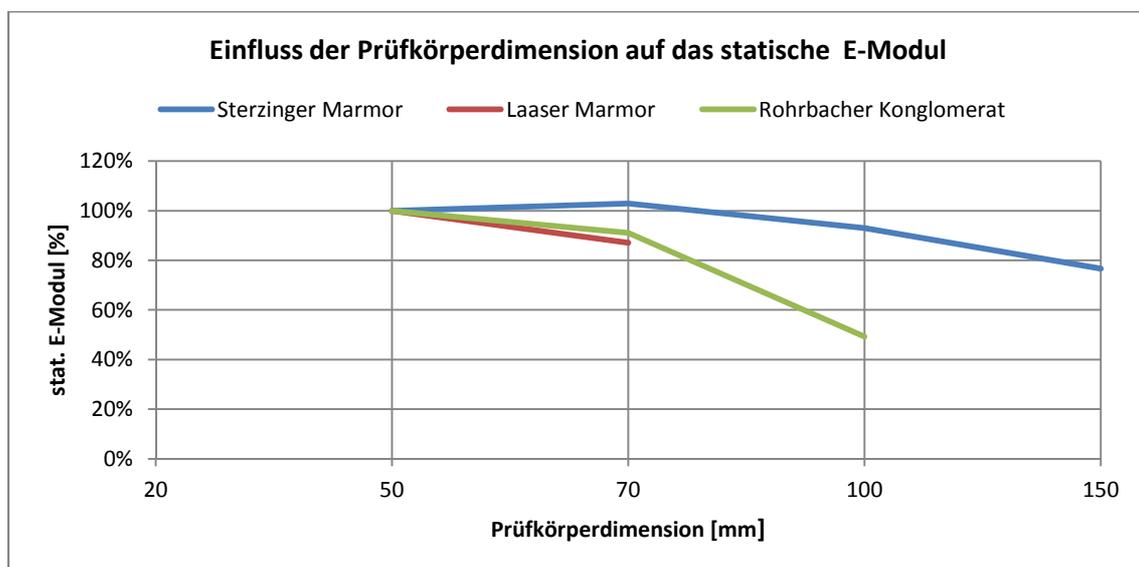


Abbildung 105: Einfluss der Prüfkörperdim. auf das stat. E-Modul

5. Ergebnisse und Interpretation der 1. Versuchsreihe

Beim statischen E-Modul ist zu beobachten, dass dieser mit steigender Prüfkörperdimension abnimmt, wohingegen er beim dynamischen E-Modul in etwa gleich bleibt, wenn man die Messpunkte des Laaser Marmors mit $\varnothing 20$ mm (zu großer Einfluss der Kopplung, vgl. Kap. 5.2.2) und Rohrbacher Konglomerats (springen der USZ, vgl. Kap. 5.3.2) außer Acht lässt.

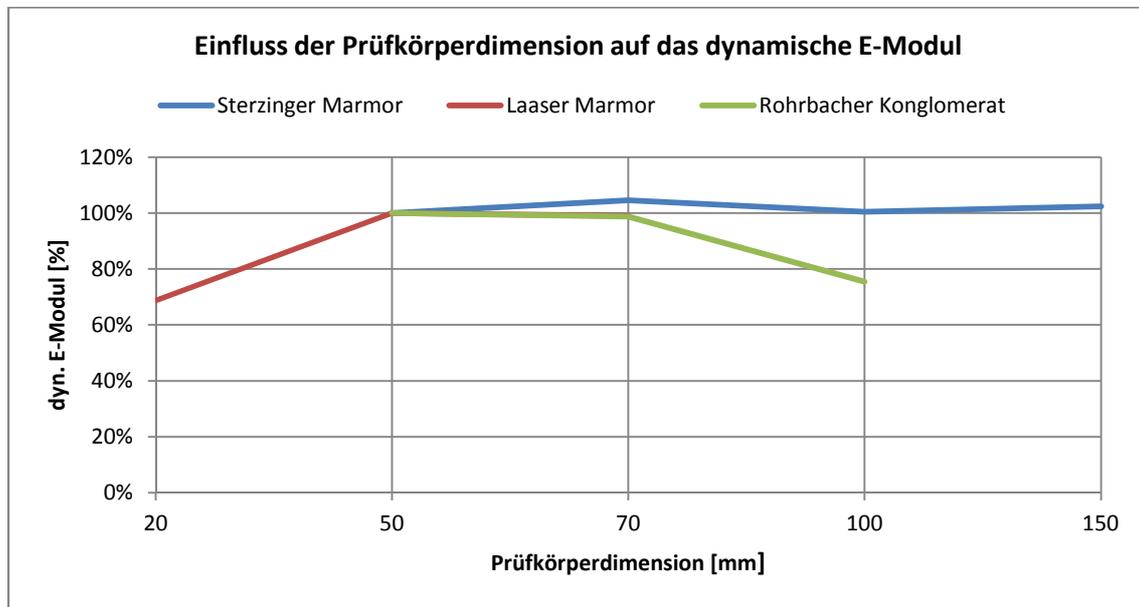


Abbildung 106: Einfluss der Prüfkörperdim. auf das dyn. E-Modul

Nachfolgende Tabelle fasst die Druckfestigkeit und E-Moduli der oben gezeigten Diagramme zusammen.

Sterzinger Marmor	Druckfestigkeit		stat. E-Modul		dyn. E-Modul	
	[N/mm ²]	[%]	[GPa]	[%]	[GPa]	[%]
M50	55.65	100.0%	40.50	100.0%	25.28	100.0%
M70	58.52	105.1%	41.66	102.9%	26.45	104.6%
M100	64.47	115.8%	37.67	93.0%	25.41	100.5%
M150	68.90	123.8%	31.06	76.7%	25.88	102.4%
Laaser Marmor	Druckfestigkeit		stat. E-Modul		dyn. E-Modul	
	[N/mm ²]	[%]	[GPa]	[%]	[GPa]	[%]
LM20	50.82	99.1%	-	-	23.08	68.8%
LM50	51.27	100.0%	48.19	100.0%	33.55	100.0%
LM70	77.87	151.9%	41.96	87.1%	33.23	99.0%
Rohrbacher Konglomerat	Druckfestigkeit		stat. E-Modul		dyn. E-Modul	
	[N/mm ²]	[%]	[GPa]	[%]	[GPa]	[%]
Ko50	18.57	100.0%	29.62	100.0%	41.73	100.0%
Ko70	13.52	72.8%	26.96	91.0%	41.22	98.8%
Ko100	18.95	102.1%	14.59	49.2%	31.48	75.4%

Tabelle 20: Zusammenfassung der Druckfestigkeit und E-Moduli in Abhängigkeit der Prüfkörperdimension

6 Ergebnisse und Interpretation der 2. Versuchsreihe

Bei den nachfolgenden Messungen der Druckfestigkeit und des statischen E-Moduls wurden wie in Kapitel 1.4 beschrieben Beilagen aus Aluminiumplatten mit aufgeklebter Teflonfolie verwendet. Ziel dieser war, die Prüfkörper so zu beeinflussen, dass alle in der Form eines Spaltbruches zerbrechen.

6.1 Sterzinger Marmor

Abbildung 107 zeigt die einaxiale Druckfestigkeit des Sterzinger Marmors in Abhängigkeit von der Prüfkörperdimension. Wie zu sehen, steigt auch bei dieser Versuchsreihe die Druckfestigkeit an, und verhält sich nicht so wie in der Theorie des Größenmaßstabsfaktors. Dies lag daran, dass die Prüfkörper trotz der Beilagen in unterschiedlichen Bruchformen brachen. Während die Aluminiumplatten mit Teflonfolie bei den kleineren Proben M50 Wirkung zeigten, und diese in der Form eines Spaltbruches versagten, trat dieser Effekt bei den großen Proben M100 nur bedingt auf. Hier brach nur der Prüfkörper M100-23 als Spaltbruch, wobei dieser aber mit einer Spannung von $\sigma = 55 \text{ N/mm}^2$ auch um über 10 N/mm^2 über der max. Bruchspannung von 45 N/mm^2 der M50 Proben lag.

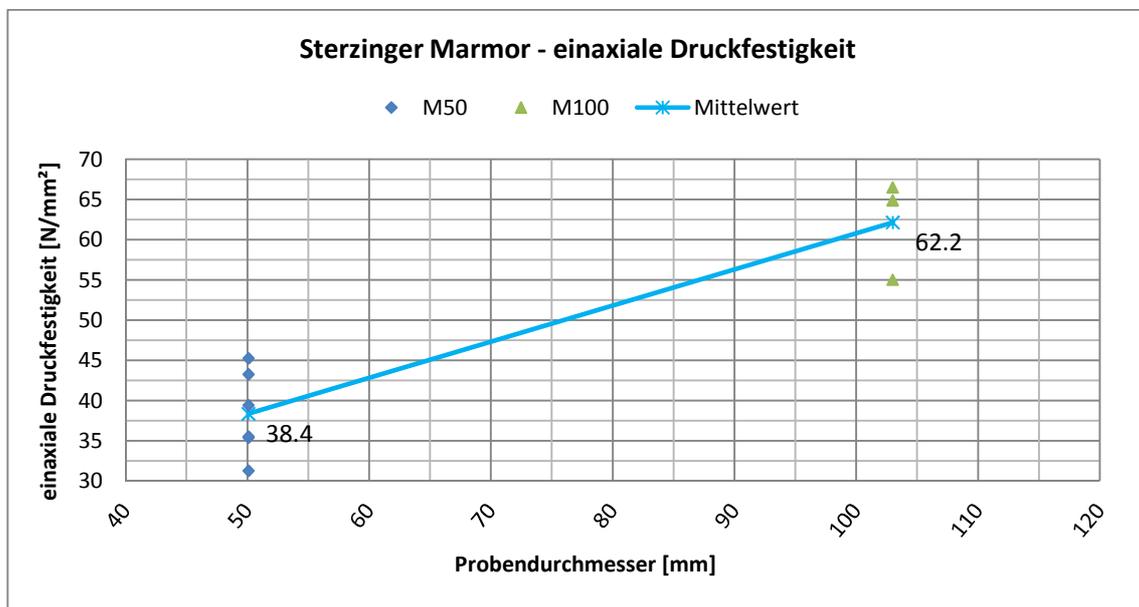


Abbildung 107: einaxiale Druckfestigkeit Versuchsreihe 2 - Sterzinger Marmor

Die nachfolgende Abbildung zeigt die unterschiedlichen Bruchformen der M100 Prüfkörper.

6. Ergebnisse und Interpretation der 2. Versuchsreihe

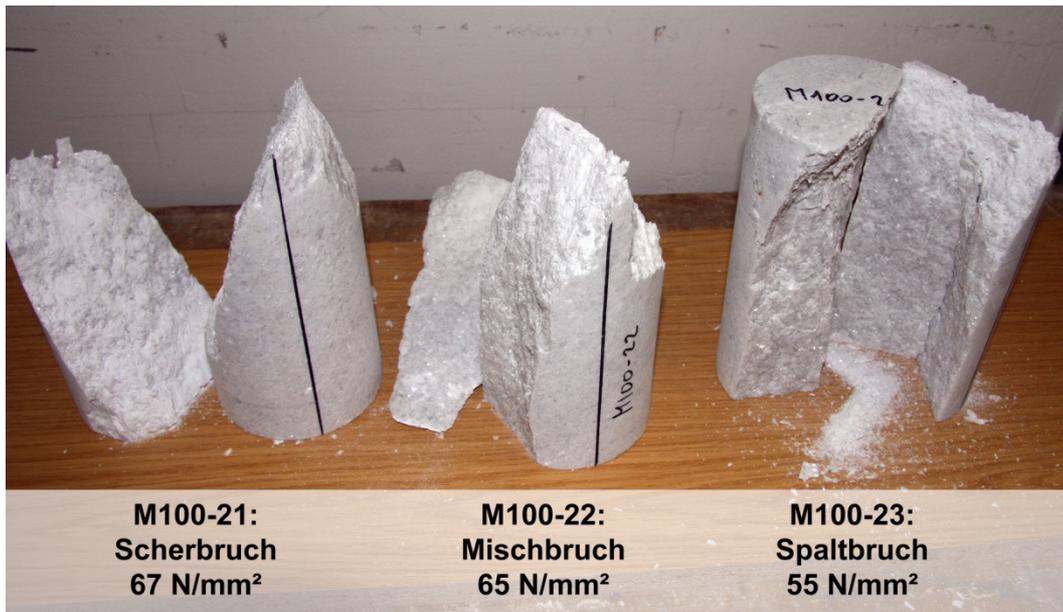


Abbildung 108: Bruchformen M100 Proben

In Abbildung 109 ist zu erkennen, dass das stat. E-Modul der $\varnothing 100$ mm Proben nur halb so groß ist, wie jenes der $\varnothing 50$ mm.

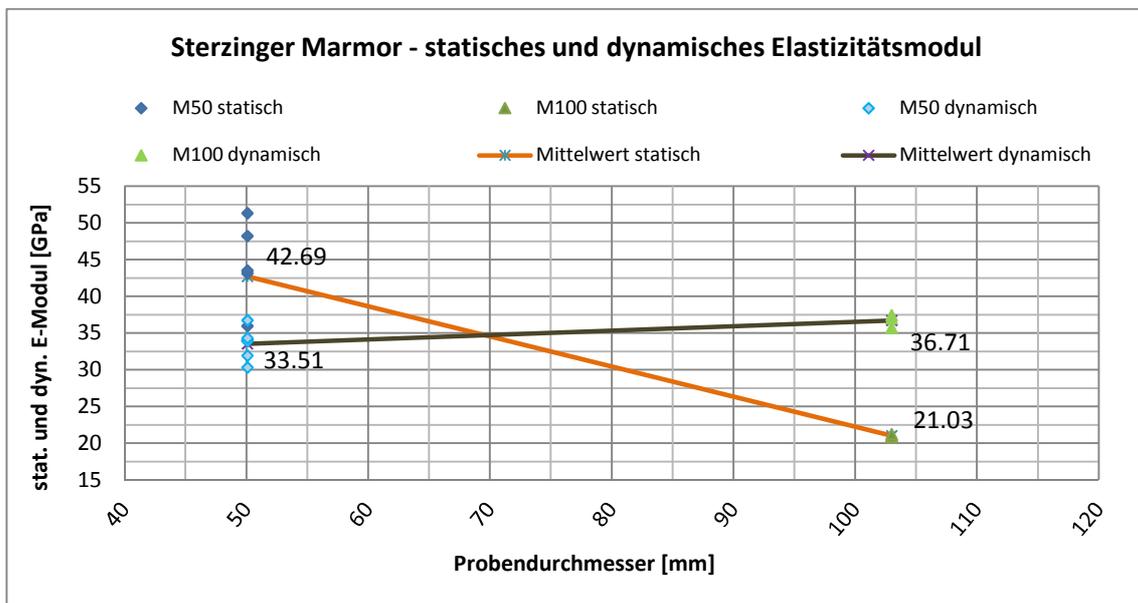


Abbildung 109: stat. und dyn. E-Modul Versuchsreihe 2 - Sterzinger Marmor

6.2 Laser Marmor

Beim Laser Marmor steigt wie beim Sterzinger Marmor die Druckfestigkeit auch mit zunehmender Probengröße an (vgl. Abbildung 110). Dabei ist zu beachten, dass es bei den $\varnothing 50$ mm Proben zu einer großen Schwankungsbreite der Druckspannungen kam, trotzdem alle einen Spaltbruch aufwiesen.

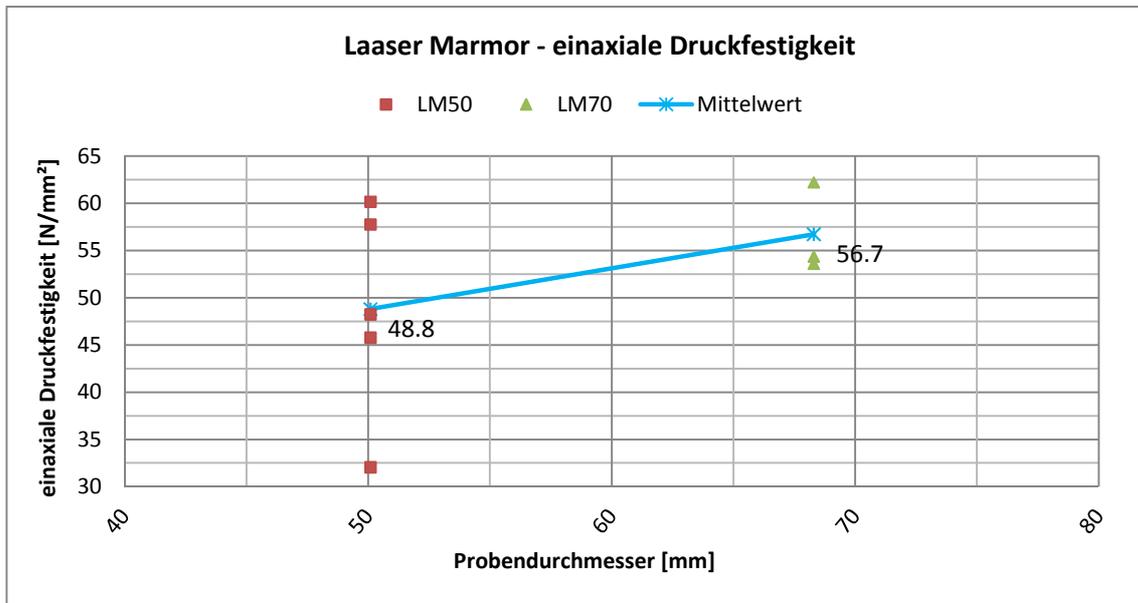


Abbildung 110: einaxiale Druckfestigkeit Versuchs. 2 - Laaser Marmor

Abbildung 111 zeigt den Verlauf des statischen und dynamischen E-Moduls über die Prüfkörperdimension.

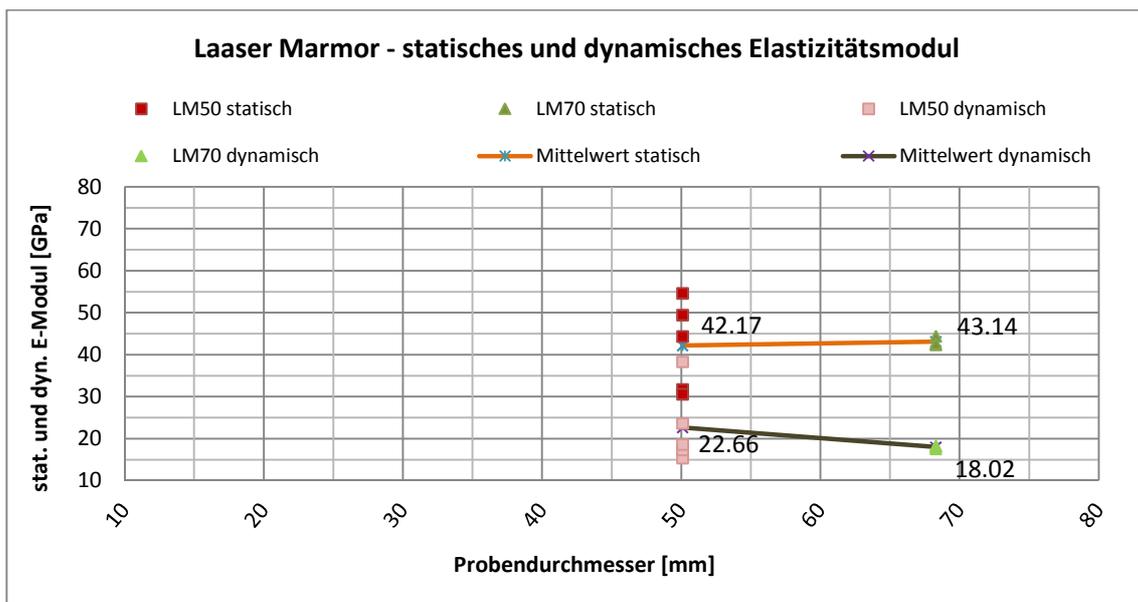


Abbildung 111: stat. und dyn. E-Modul Versuchs. 2 - Laaser Marmor

6.3 Rohrbacher Konglomerat

Beim Rohrbacher Konglomerat zeigte sich in der zweiten Versuchsreihe eine Abnahme der mittleren einaxialen Druckfestigkeit mit steigender Prüfkörperdimension (vgl. Abbildung 112). Diese verringerte sich von 23,4 N/mm² bei den Ø50 mm Proben auf 19,9 N/mm², oder 85%, bei den Ø100 mm Proben.

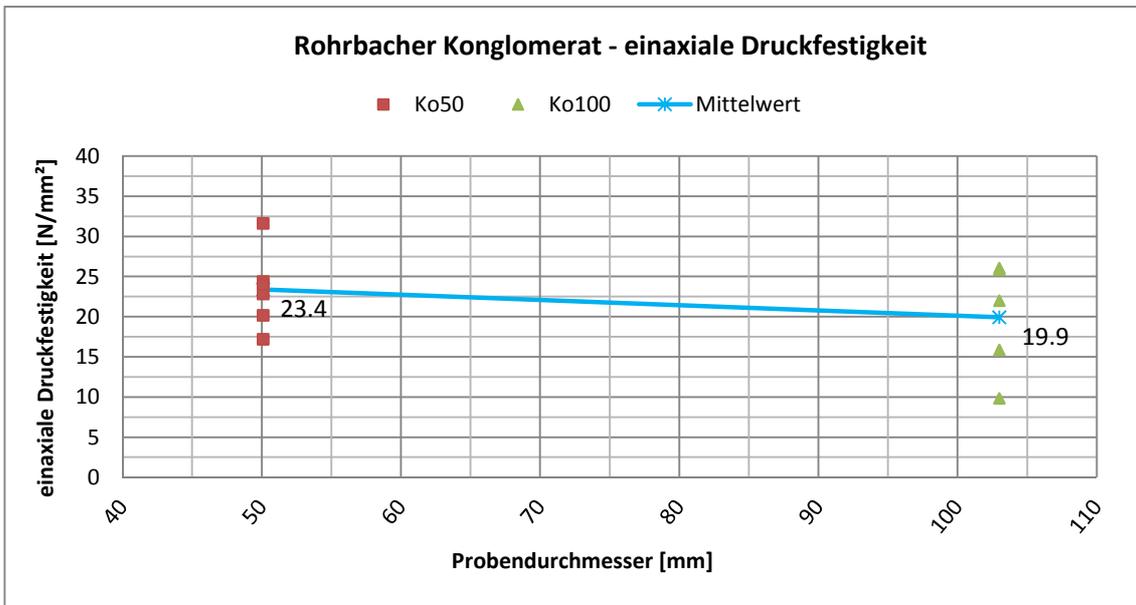


Abbildung 112: einaxiale Druckfestigkeit Versuchsreihe 2 - Rohrbacher Konglomerat

Abbildung 113 zeigt das stat. und dyn. E-Modul im Verhältnis zum Probendurchmesser.

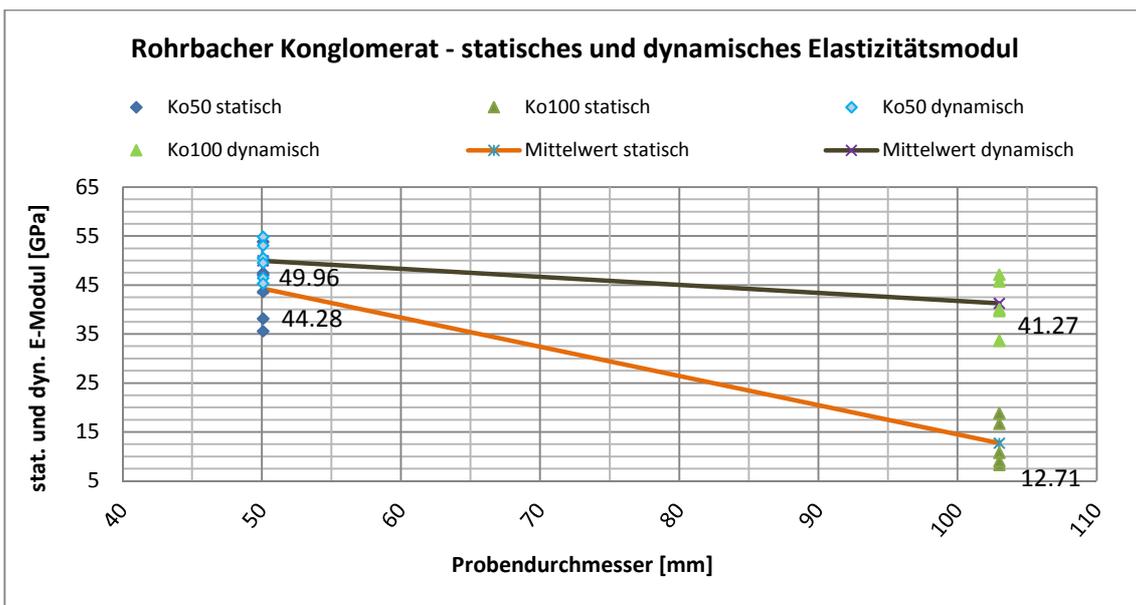


Abbildung 113: stat. und dyn. E-Modul Versuchsreihe 2 - Rohrbacher Konglomerat

6.4 Leithakalk aus Kaisersteinbruch

Die 2. Versuchsreihe des Leithakalks setzt sich aus zwei Einzelversuchen zusammen. Dabei entspricht der erste Versuch dem Aufbau ohne Zwischenlagen aus Aluminium mit Teflonfolie und die Zweite mit ihnen. Dies hatte den Grund, dass der Block Nr. V in der 1. Versuchsreihe noch nicht verwendet wurde, und so Vergleiche zwischen den beiden Versuchsaufbauten gemacht werden können.

6.4.1. 1. Versuch

Wie in Abbildung 114 dargestellt, nimmt die einaxiale Druckfestigkeit von den $\varnothing 50$ mm auf die $\varnothing 70$ mm Proben um etwa 4 N/mm^2 ab. Dies entspricht einem Festigkeitsverlust von 10%.

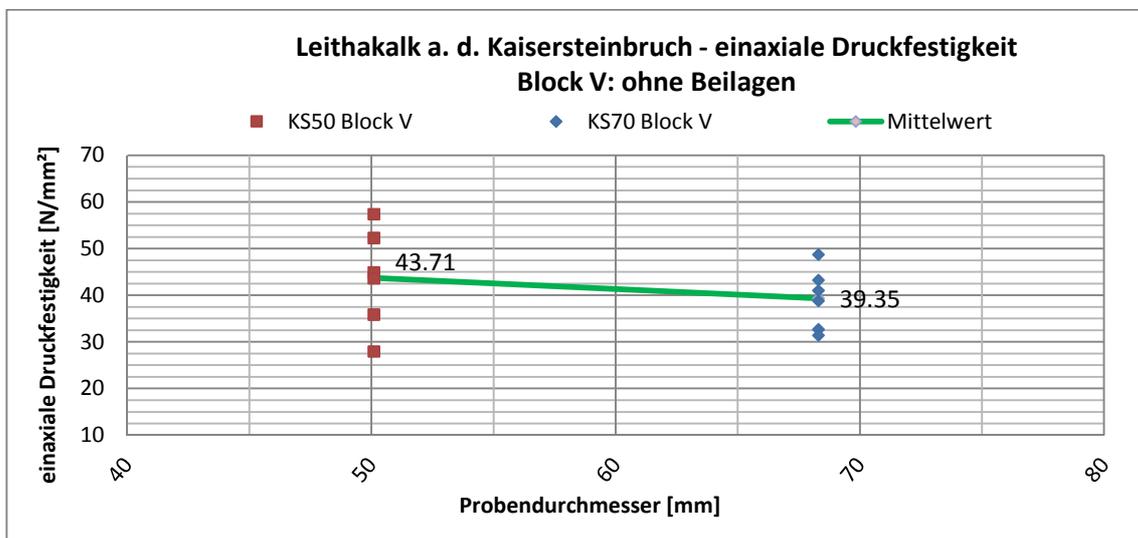


Abbildung 114: einaxiale Druckfestigkeit ohne Beilagen Versuchsreihe 2 – Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V

Abbildung 115 zeigt exemplarisch, dass bei diesem Versuchsdurchgang alle Prüfkörper als Spaltbruch versagten.

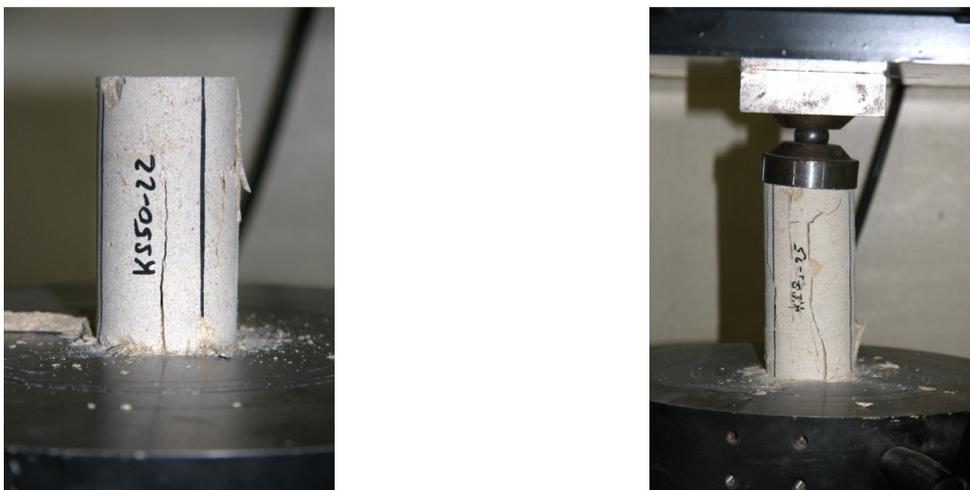


Abbildung 115: Spaltbrüche der Proben KS50-22 und KS70-25

6. Ergebnisse und Interpretation der 2. Versuchsreihe

Die nachfolgende Abbildung zeigt die E-Moduli des Leithakalkblockes Nr. V aus Kaisersteinbruch.

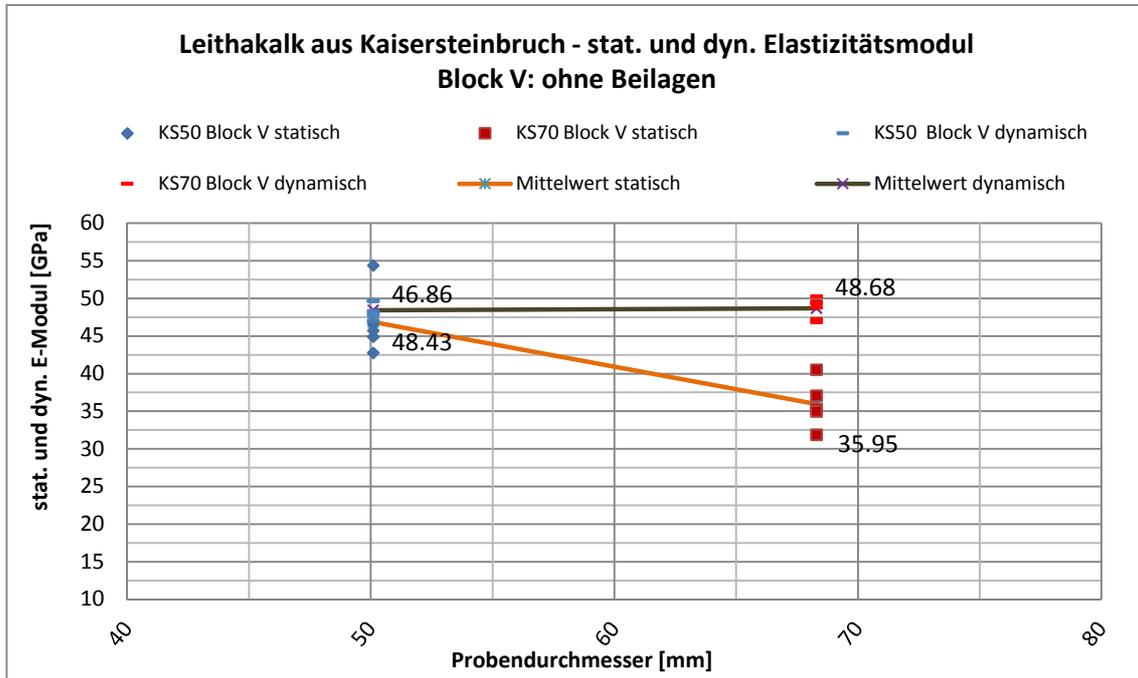


Abbildung 116: stat. und dyn. E-Modul ohne Beilagen Versuchs. 2 – Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V

6.4.2. Versuch 2

Wie in Abbildung 117 zu sehen, sinkt die einaxiale Druckfestigkeit bei einer Zunahme des Probendurchmessers um 20 mm um 10 N/mm². Dies entspricht einer Abnahme von 25%.

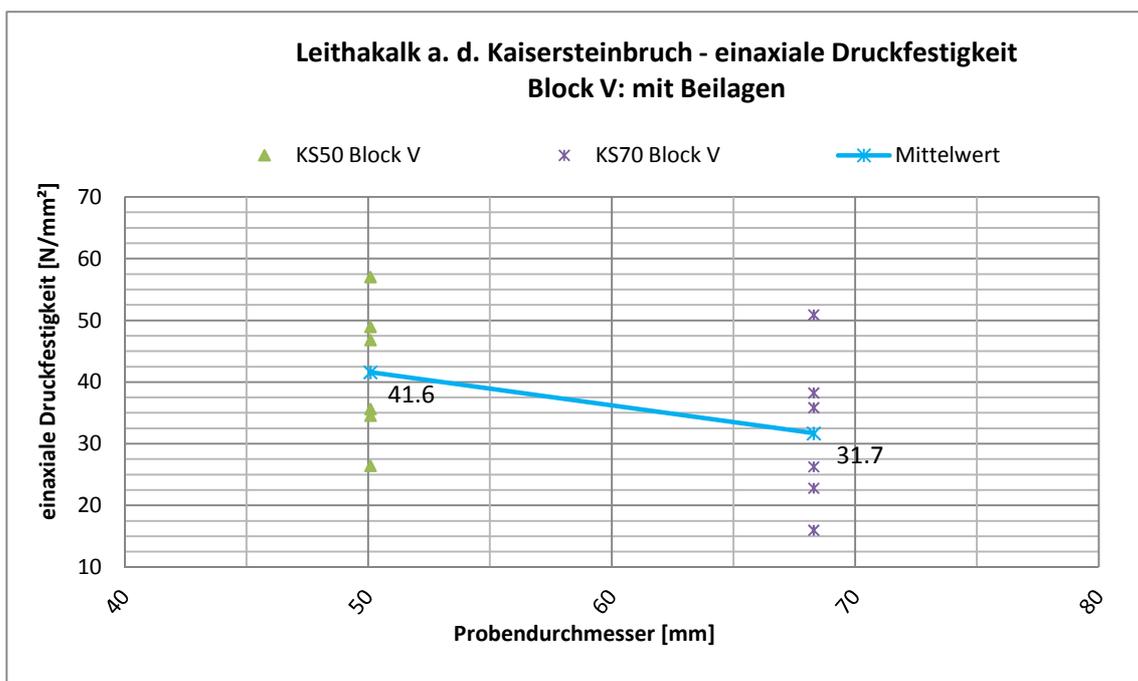


Abbildung 117: einaxiale Druckfestigkeit mit Beilagen Versuchs. 2 – Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V

6. Ergebnisse und Interpretation der 2. Versuchsreihe

Abbildung 118 zeigt die E-Moduli des Versuchs. Dabei nimmt der Dynamische leicht zu, während das statische E-Modul von 48 GPa auf 27 GPa absinkt.

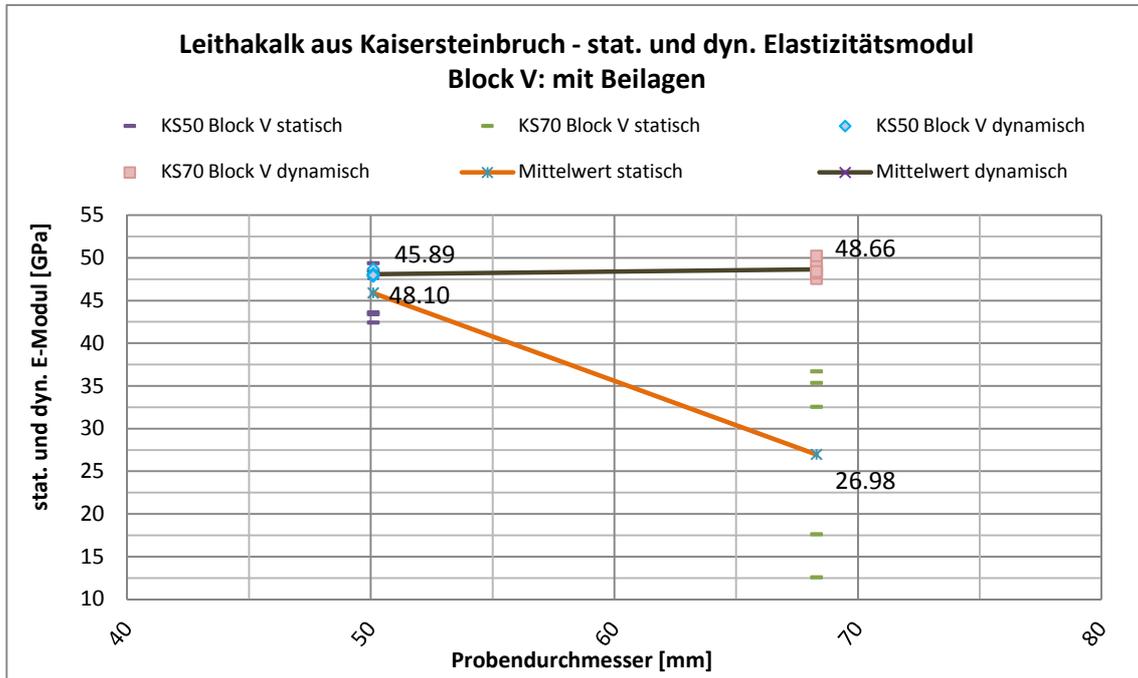


Abbildung 118: stat. und dyn. E-Modul ohne Beilagen Versuchsreihe 2 – Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V

7 Gegenüberstellung der 1. und 2. Versuchsreihe

In der nachfolgenden Tabelle wird der Einfluss der Aluminiumplatten mit aufgeklebter Teflonfolie gezeigt. Dazu wurden die mittlere Druckfestigkeit, das mittlere statische Elastizitätsmodul und die überwiegende Bruchform jeder Prüfkörperreihe mit und ohne Zwischenlagen gegenübergestellt.

		Druckfestigkeit					stat. E-Modul		
		ohne Beilagen		mit Beilagen		Ab- / Zu- nahme	ohne Beilagen	mit Beilagen	Ab- / Zu- nahme
		einax. Druckf.	überw. Bruchform	einax. Druckf.	überw. Bruchform				
		[N/mm ²]	-	[N/mm ²]	-	[%]	[GPa]	[GPa]	[%]
Sterzinger Marmor	M50	55.65	Scher	38.39	Spalt	-31.0%	40.50	42.69	5.4%
	M100	64.47	Scher	62.17	gemischt	-3.6%	37.67	21.03	-44.2%
Laaser Marmor	LM50	51.27	Spalt	48.81	Spalt	-4.8%	48.19	42.17	-12.5%
	LM70	77.87	Scher	56.74	Spalt	-27.1%	41.96	43.14	2.8%
Rohrbacher Konglomerat	Ko50	18.57	Spalt+Gefüge	23.39	Spalt+Gefüge	26.0%	29.62	44.28	49.5%
	Ko100	18.95	Spalt+Gefüge	19.94	Spalt+Gefüge	5.3%	14.59	12.71	-12.9%
Leithakalk a. K. Block V	KS50	43.71	Spalt	41.60	Spalt	-4.8%	46.86	45.89	-2.1%
	KS70	39.35	Spalt	31.70	Spalt	-19.4%	39.35	26.98	-31.4%

Tabelle 21: Einfluss der Aluminiumbeilagen mit aufgeklebter Teflonfolie auf die einax. Druckfestigkeit und das stat. E-Modul

Dabei ist zu erkennen, dass sich mit Hilfe der Zwischenlagen im zweiten Versuchsdurchgang Scherbrüche der $\varnothing 50$ mm Prüfzylinder aus Sterzinger Marmor (M50) und $\varnothing 70$ mm Prüfzylinder aus Laaser Marmor (LM70) auf Spaltbrüche reduzieren ließen. Dies hatte eine Abnahme von bis zu 31% der mittleren Druckfestigkeit, bei einem gleichzeitigen, leichtem Anstieg des statischen E-Moduls zufolge. Bei den größeren Prüfzylindern mit $\varnothing 100$ mm aus Sterzinger Marmor konnte dieser Effekt nur mehr bedingt beobachtet werden. Eine genaue Aussage ist aber hier nicht möglich, da für den zweiten Versuchsdurchgang nur mehr 3 Prüfzylinder zur Verfügung standen, und jeder anders brach (vgl. Abbildung 108). Bemerkenswert ist die überdurchschnittliche Abnahme des statischen E-Moduls um beinahe 45%.

Weiteres konnte beobachtet werden, dass bei einer Beibehaltung der Bruchform, d.h. Spaltbruch im 1. und 2. Versuchsdurchgang, die Druckfestigkeit nicht in diesem Ausmaß gesenkt werden konnte. Bei den Prüfzylindern mit $\varnothing 50$ mm aus Laaser Marmor (LM50) und Leithakalk aus Kaisersteinbruch (KS50) betrug die Abnahme je 4,8%. Bei der KS70 Reihe ($\varnothing 70$ mm) reduzierte sich die Druckfestigkeit um 19,4%. Dies kann entweder als eine Zunahme des Effektes der Zwischenlagen zur Verminderung der Querdehnungsbehinderung gedeutet werden, oder als „Zufall“, da wie weiter oben im Text, der Effekt bei den Prüfzylindern aus Sterzinger Marmor mit $\varnothing 100$ mm nur bedingt auftrat. Bei den vorher genannten Versuchen verringerte sich das statische E-Modul zwischen 2% und 31%.

7. Gegenüberstellung der 1. und 2. Versuchsreihe

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse des Rohrbacher Konglomerates brachten keine neuen Erkenntnisse, da die gemessenen Druckfestigkeiten und E-Moduli zu weit streuten. So kann die Zunahme der Druckfestigkeit um 5% bzw. 26% z.B. auf dichtere und homogenere Konglomeratblöcke für den zweiten Versuchsdurchgang zurückgeführt werden.

Aus den obigen Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Druckfestigkeit wesentlich von der Bruchform des Prüfzylinders abhängig ist. So kann die mittlere Festigkeit eines Gesteins, bei dem der Prüfzylinder als Scherbruch bricht, um 30% höher sein, als wenn er in Form eines Spaltbruches versagt. Ebenfalls nicht außer Acht zu lassen ist die Reduktion der Druckfestigkeit um bis zu 5% durch die Zwischenlagen, falls sich die Bruchform beim Versuch nicht verändert. Maßgebenden Einfluss hat in beiden Fällen die Querdehnungsbehinderung, ausgelöst durch die entstehende Reibung zwischen dem Prüfstempel und dem Prüfzylinder.

Aus diesem Grund sollte bei Ergebnissen von Druckversuchen zumindest die Versagensart des Prüfkörpers im Protokoll erwähnt werden, bzw. ob Zwischenlagen aus Aluminium, oder sonstigen Materialien verwendet wurden.

Zusammenfassend lässt sich im Hinblick auf den „Size Effect“ sagen, dass der Einfluss der Beilagen aus Aluminium mit aufgeklebter Teflonfolie mit großer Wahrscheinlichkeit auch von der Größe der verwendeten Prüfkörper abhängig ist. Um die tatsächlichen Auswirkungen quantitativ zu beschreiben, wären allerdings neue, gezielte, Versuche notwendig. Zusätzlich könnten dreidimensionale numerische Simulationen Aufschluss geben.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Diplomarbeit war die experimentelle Untersuchung des Größenmaßstabsfaktors („Size Effect“) von Natursteinen im Hinblick auf die einaxiale Druckfestigkeit und den statischen sowie den dynamischen Elastizitätsmodul. Die Theorie besagt, dass die nominelle Festigkeit von Prüfzylindern mit steigender Größe abnehmen sollte. Dies konnte aber nur bedingt in den Versuchen nachgewiesen werden. Verantwortlich dafür war im Wesentlichen die behinderte Querdehnung, die durch Reibung an den Lasteinleitungsbereichen entsteht. Folgedessen bildet sich in diesem Bereich ein dreiaxialer Spannungszustand aus, welcher bewirkt, dass die vorhandenen Querkzugspannungen durch σ_3 Druckspannungen überlagert werden. Dies führt zu einer Verzögerung der Makrorissbildung, und im Endeffekt zu einer höheren einaxialen Druckfestigkeit. Bemerkenswert dabei erscheint, dass die Auswirkung der Querdehnungsbehinderung mit steigender Prüfkörperdimension zunimmt.

Das statische Elastizitätsmodul verhält sich in beiden Fällen gleich, und sinkt mit steigender Prüfkörperdimension, wobei die E-Module bei freier Querdehnung im Regelfall kleiner sind, als bei behinderter Querdehnung. Das dynamische Elastizitätsmodul bleibt zumeist, über die verschiedenen Prüfkörperdimensionen hinweg, nahezu gleich. Dies liegt an der Berechnung des Moduls, in dem neben der Poisson'schen Zahl als Konstante, lediglich die Rohdichte und die Ultraschallgeschwindigkeit als Variablen eingehen.

Auf Grund der obigen Überlegungen und der experimentellen Versuchsergebnisse empfiehlt es sich für die Praxis, den Größenmaßstabsfaktor für die einaxiale Druckfestigkeit in zwei Kategorien einzuteilen:

- **Size Effect bei freier Querdehnung**

Dieser entspricht den gängigen Theorien, die besagen, dass die einaxiale Druckfestigkeit von Prüfkörpern mit steigender Prüfkörperdimension, und einem konstanten Seitenverhältnis von $h/d = 2:1$, abnehmen. Der Effekt tritt aber nur auf, wenn die Querdehnungsbehinderung an den Auflagerflächen durch Zwischenlagen (z. B. aus Aluminium und Teflonfolie) möglichst ausgeschaltet wird, und die Prüfkörper in Form eines Spaltbruches versagen. Dieser Typ des Size Effects konnte ausschließlich in der zweiten Versuchsreihe nachgewiesen werden, bei dem der Versuchsaufbau dermaßen modifiziert wurde, um eine Querdehnungsbehinderung möglichst zu minimieren.

- **Size Effect bei behinderter Querdehnung**

Dieser Größenmaßstabsfaktor tritt in erster Linie bei Scherbrüchen auf, die ausschließlich bei Querdehnungsbehinderung entstehen. Im Gegensatz zum Size

Effect bei freier Querdehnung wächst hier die einaxiale Druckfestigkeit mit größer werden Prüfkörpern an, was sich am Besten in der ersten Versuchsreihe zeigte.

Dabei ist jedoch zu bemerken, dass der **Size Effect bei freier Querdehnung** darauf abzielt, einen wahren, tatsächlichen Größenmaßstabsfaktor zu finden, der ausschließlich vom Material, der Geometrie und den Brucheigenschaften des Gesteins, und nicht von den Randbedingungen wie der Reibung an den Lasteinleitungsflächen abhängig ist. In der Praxis ist dieser Size Effect jedoch nur unter sehr großem Aufwand zu messen, da die Querdehnungsbehinderung beim Druckversuch nur bedingt ausgeschaltet werden kann. Dies gelingt zwar unter Umständen durch Zwischenlagen aus Aluminium und Teflonfolie, so wie teilweise in dieser Diplomarbeit, kann die Ergebnisse aber auch verfälschen, da der Versuchsaufbau nicht für alle Prüfszylinderreihen und Größen gültig sein muss.

Eine konkrete Fragestellung und Aufgabe für die Zukunft wäre es, diesen Einfluss in Abhängigkeit von der Prüfkörperdimension, und den verwendeten Zwischenlagen zu klären und quantitativ zu erfassen. Erst danach würde eine gezielte Untersuchung des Size Effectes bei freier Querdehnung, unter Verwendung von speziell angepassten Zwischenlagen für jede Prüfkörperdimension und eventuell auch für jedes Prüfmaterial, wirklich Sinn ergeben. Dieser Schritt kann nur unter Zuhilfenahme von numerischen Modellen, in Kombination mit Versuchen im Labor, zur Verifizierung der Ergebnisse, gelöst werden.

Nicht ganz unähnlich müssten die Untersuchungen zum **Size Effects mit behinderter Querdehnung** fortgesetzt werden. Hier gilt es vorab zu klären, welchen Einfluss die Reibung an den Lasteinleitungsflächen tatsächlich hat. Auch dies kann nur in Kombination von numerischen Modellen und Versuchen im Labor erfolgen.

9 Literaturverzeichnis

BAŽANT, Z. P. (2000): Size Effect. *International Journal of Solids and Structures* 37 , 69-80.

BAŽANT, Z. P. (1984): *Size Effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal.* Journal of Eng. Mechanics ASCE 110.

BAŽANT, Z. P. (1999): *Size effect on structural strength: a review.* (S. Verlag, Hrsg.) Archive of Applied Mechanics 69 (1999) 703-725.

BAŽANT, Z. P., & PLANAS, J. (1998): *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials.* Boca Raton: CRC Press.

BRIX, F., & PLÖCHINGER, B. (1988): *Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000 - Erläuterungen zu Blatt 76 Wiener Neustadt.* Geologische Bundesanstalt Wien.

CARPINTERI, A., & FERRO, G. (1994): Size effects on tensile fracture properties: A unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructures. *Materials and Structures, Volume 27, Number 10* , 563-571.

DRAGANITS, E. (2005): *Studienblätter zur Gesteinsmetamorphose.* TU Wien.

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

GRÜBL, P., WEIGLER, H., & SIEGHART, K. (2001): *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften.* Ernst & Sohn - A Wiley Company.

HOEK, E., & BROWN, E. (1982): *Underground Excavation in Rock.* E & FN Spon.

HOLLINGWORTH, S. C. (1998): *Structural and mechanical properties of high strength concrete. PhD Thesis, Division of Civil Engineering, Cardiff School of Engineering, University of Wales Cardiff.*

KESSEL-KRAMER, C. (2002): *Zugtragverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung.* Dissertation an der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).

KOLLEGER, J. (2008): *Skriptum zur Vorlesung Betonbau 1.* TU Wien.

KOUKAL, V. (2009): *Sedimentologie und Definition der Rohrbach Formation ("Rohrbacher Konglomerat", Pliozän) im Steinbruch Rohrbach/Ternitz (NÖ).* Diplomarbeit Universität Wien.

KOUKAL, V., & WAGREICH, M. (2009): *Sedimentologie und Definition der Rohrbach Formation ("Rohrbacher Konglomerat", Pliozän) im Steinbruch Rohrbach/Ternitz (NÖ)*. Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt, Band 149, Heft 4, S.453-462.

KURRER, K.-E. (2002): *Geschichte der Baustatik*. Ernst & Sohn Verlag.

MAIR, V. E. (2007): *Das Ortler Campo Kristallin in Südtirol*. Mitteilung Österr. Min. Ges.

MANG, H., & HOFSTETTER, G. (2004): *Festigkeitslehre*. Springer Verlag Wien NewYork.

MARIOTTE, E. (1686): *Traité du mouvement des eaux*. Posthumously edited by M. de la Hire. Eng. transl. by J. T. Desvaguliers, London 1718. p. 249, also Mariotte's collected works, 2nd ed. The Hague 1740.

MICROMERITICS-Handbuch: *Micromeritics Multivolume Pycnometer 1305 Handbuch, V1.0*.

MÜLLER, R. (2001): *Size Effect im Betonbau*. Diplomarbeit TU Wien.

MURR, A. (2005): *Geologie für Bauingenieure - Skript zur Vorlesung*. Universität der Bundeswehr München.

NEROTH, G., & VOLLENSCHAAR, D. (2011): *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen - Baustoffkunde - Oberflächenschutz*. Vieweg+Teuber Verlag.

EN 13755:2008 (D). (Ausgabe: 2008-07-01): *Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck*.

ÖNORM EN 14579. (Ausgabe 2005-01-01): *Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung*.

ÖNORM EN 14580. (Ausgabe: 2005-06-01): *Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls*.

ÖNORM EN 1926. (Ausgabe: 2006-11-09): *Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit*.

ÖNORM EN 1936 . (Ausgabe: 2007-02-01): *Prüfverfahren von Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität*.

PENG, S., & JOHNSON, A. M. (1972): *Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite*. International Journal of Rock Mechanics, Vol. 9, pp. 37-86.

PRESS, F., & SIEVER, R. (2003): *Allgemeine Geologie - Einführung in das System Erde*. Spektrum Verlag.

RENTSCH, W., & KROMPHOLZ, G. (Sonderdruck 1963): *Die Bestimmung der Poissonschen Zahl durch Schallgeschwindigkeitsmessungen*. Hochschule für Bauwesen Leipzig.

ROHATSCH, A. (2007): *Kaisersteinbruch: Leithakalk in bester Qualität - [in:] HOFMANN, T. (Hrsg): Wien Niederösterreich Burgenland: Wanderungen in die Erdgeschichte (22).* Pfeil Verlag.

SCHUBERT, W. (2007): *Felsmechanik und Tunnelbau Skriptum (20.02.2007 Ausg.).* Technische Universität Graz.

THIEL, R. (2000): *Die Allmählichkeit der Revolution: Blick in sieben Wissenschaften,* LIT Verlag Münster

THURO, K., & PLINNINGER, R. (1998): *Einführung in die Ingenieurgeologie. Felsmechanisches Laborpraktikum für Geologen (7. Auflage Ausg.).* Technische Universität München, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieurgeologie.

TRUNK, B. G. (1999): *Einfluss der Bauteilgröße auf die Bruchenergie von Beton.* Dissertation Uni Kaiserslautern.

UNTERWURZACHER, M. (2007): *Tiroler Marmorbaue und bedeutende Vorkommen.* Veröffentlichung des Tiroler Landesmuseums Ferdinandum.

WEIBULL, W. (1939): A statistical theory of strength of materials. *Ingeniörsvetenskapsakademies Handlingar Nr. 151 .*

WEIBULL, W. (1939): *The phenomenon of rupture in solids .* Royal Swedish Inst. Eng. Res.

WILLIAMS, E. (1957): *Some observations of Leonardo, Galileo, Mariotte and others relative to size effect.* Annals of Science.

ZILCH, K., & ZEHETMAIR, G. (2006): *Bemessung im konstruktiven Betonbau.* Springer Verlag.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: (a) Vergleich multifraktalen Maßstabsgesetz von CARPINTERI (MFMG) und Size Effect Gesetz von BAŽANT (SEG) [aus (MÜLLER, 2001, S. 19) nach (HOLLINGWORTH, 1998)], (b) SEG von BAŽANT [aus (MÜLLER, 2001, S. 19) nach (BAŽANT & PLANAS, 1998)].....	10
Abbildung 2: Modell des schwächsten Glieds der Kette nach (WEIBULL, 1939)	11
Abbildung 3: Festigkeit f_t in Abhängigkeit des Prüfkörpervolumens V nach (WEIBULL, 1939).....	12
Abbildung 4: Gedankenmodell der Rissausbreitung zur Herleitung des Maßstabsgesetzes nach (BAŽANT, 1999)	13
Abbildung 5: Maßstabsgesetz nach BAŽANT (1984)	14
Abbildung 6: Maßstabsgesetz nach CARPINTERI (1994)	15
Abbildung 7: Spannung-Dehnungskurve eines einaxialen Druckversuches [modifiziert nach (SCHUBERT, 2007, S. 5-22) und (THURO & PLINNINGER, 1998, S. 11)]	16
Abbildung 8: Schema eines einaxialen Druckversuches aus (THURO & PLINNINGER, 1998, S. 3)	16
Abbildung 9: Mögliche Bruchformen bei Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit (THURO & PLINNINGER, 1998, S. 30).....	17
Abbildung 10: links: zweiaxialer Spannungszustand einer Gesteinsprobe; rechts: σ - τ Diagramm mit Bruchkriterien [modifiziert, aus (SCHUBERT, 2007, S. 5-26 und 5-28) nach (HOEK & BROWN, 1982, S. 138)]	18
Abbildung 11: Einfluss der Probenkörpergeometrie auf die Druckfestigkeit nach (KOLLEGER, 2008, S. 2-11)	19
Abbildung 12: Querzug- und Druckspannungen in Prüfkörper (ZILCH & ZEHETMAIR, 2006, S. 72).....	20
Abbildung 13: (a) Prüfkörperschlankheit zum Festigkeitsverhältnis f/f_c ; (b) Prüfkörperschlankheit zur Druckfestigkeit f_c (GRÜBL, WEIGLER, & SIEGHART, 2001, S. 312-313).....	20
Abbildung 14: Arten der Deformation von Prüfkörpern bei unterschiedlichen Randbedingungen aus (PENG & JOHNSON, 1972, S. 53)	21
Abbildung 15: Schema des Versuchsaufbaues 1 und 2	22
Abbildung 16: Aluminiumplatten mit Teflonfolie; links vor dem Versuch, rechts nach Versuchsende	23
Abbildung 17: Einbau der Zwischenlagen in die Prüfpresse.....	23
Abbildung 18: Vorgänge zur Bildung von Sedimentgesteinen (PRESS & SIEVER, 2008)	24
Abbildung 19: Geografische Ansicht des Abbaugebietes von Leithakalk aus Kaisersteinbruch (von http://www.bing.com/maps , 13.04.2012)	25
Abbildung 20: Ausschnitt geologische Karte der Republik Österreich, M 1:50.000, Blatt 78 Rust (modifiziert) und GBA Datenbank „Historic Quarries“ Eintrag zu Kaisersteinbruch.....	26
Abbildung 21: links: Blauer Bruch (© FURCH, H., 2007); rechts: Hausbruch um 1908 (© SCHAFFER, F., 1908) Beide Bilder entnommen von: http://de.wikipedia.org/wiki/Kaiserstein_(Gestein) , 24.04.2012	26
Abbildung 22: Ausschnitt geologische Karte der Republik Österreich, M 1:50.000, Blatt 105 Neunkirchen (modifiziert) .	27
Abbildung 23: Geografische Ansicht des ehem. Abbaugebiete des Rohrbacher Konglomerates (von http://www.bing.com/maps , 13.04.2012)	28
Abbildung 24: Aufgelassener Steinbruch der Fa. Bamberger, aus (KOUKAL & WAGENREICH, 2009, S. 455)	28
Abbildung 25: Arten der Metamorphose (PRESS & SIEVER, 2003, S. 208)	29
Abbildung 26: Ausschnitt geologische Karte der Provinz Bozen, M 1:100.000, Geobrowser Provinz Bozen (http://gis2.provinz.bz.it/geobrowser/ , 14.04.2012)	30
Abbildung 27: Geografische Übersicht des Abbaugebietes Sterzinger Marmor (von http://www.bing.com/maps , 13.04.2012).....	31
Abbildung 28: Geograf. Übersicht des Abbaugebietes Laaser Marmor (von http://www.bing.com/maps , 13.04.2012)...	32
Abbildung 29: Geologische Karte und Schnitt der Laaser Marmorprovinz (Mair, 2007).....	32
Abbildung 30: Zugang Stollen Weißwasserbruch in der Weißwasserwand (© TSCHOLL H., 2007, http://www.sagen.at/doku/Laas/Laas_Schraegbahn_3.html , 14.04.2012)	33
Abbildung 31: Göffaner Mitterwandlbruch (©Göffaner Marmor GmbH, http://www.covelanomarmi.it , 14.04.2012)	33
Abbildung 32: Herstellung eines \varnothing 100 mm Bohrkerns aus Sterzinger Marmor.....	34
Abbildung 33: Herstellung eines \varnothing 70 mm Bohrkerns aus dem Leithakalkblock aus Kaisersteinbruch Nr. IV	34
Abbildung 34: Bohrkerns aus Sterzinger Marmor.....	35
Abbildung 35: Schleifen einer abgelängten Sterzinger Marmorprobe.....	35
Abbildung 36: Prüfkörper der 1. Versuchsreihe: v.l. Sterzinger Marmor, Leithakalk aus Kaisersteinbruch, Rohrbacher Konglomerat und Laaser Marmor	36
Abbildung 37: Prüfkörper der 2. Versuchsreihe.....	36

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 38: Volumen für die Bestimmung der verschiedenen Dichten (NEROTH & VOLLENSCHAAR, 2011, S. 8).....	38
Abbildung 39: Mettler Waage mit Durchhang	39
Abbildung 40: Schember Tafelwaage mit selbstgebaute Einrichtung zur Messung der Masse unter Auftrieb	39
Abbildung 41: verwendete Proben für die Reindichtebestimmung im Heliumpyknometer	40
Abbildung 42: Messprinzip Heliumpyknometer	41
Abbildung 43: Heliumpyknometer - Micromeritics Multivolume Pycnometer 1305	41
Abbildung 44: Analysewaage zur Messung der Probenmasse	41
Abbildung 45: Porotec Pascal 440 Porosimeter (von http://www.porotec.de/).....	42
Abbildung 46: Ultraschallmessung eines Leithakalkprüfkörpers mittels Druckluftstativ und im "Feld"	43
Abbildung 47: Spannungs-Zeit Diagramm zur Bestimmung des stat. E-Moduls, Beispiel für ein Gestein mit einer Druckfestigkeit von 60 MPa.....	46
Abbildung 48: Dehnungsaufnehmer zur Messung von ϵ_u und ϵ_o	47
Abbildung 49: 3000 kN Prüfpresse und Steuerungseinrichtung	48
Abbildung 50: Einfluss der Messmethode und der Messgeräte auf die Rohdichte	49
Abbildung 51: Einfluss der Messmethode und der Messgeräte auf die massebez. Wasseraufnahme	50
Abbildung 52: Rohdichte Sterzinger Marmor.....	52
Abbildung 53: massebezogene Wasseraufnahme Sterzinger Marmor	52
Abbildung 54: Sterzinger Marmor Ultraschallgeschwindigkeit	53
Abbildung 55: Porenverteilung Sterzinger Marmor	54
Abbildung 56: Sterzinger Marmor – einaxiale Druckfestigkeit.....	55
Abbildung 57: Sterzinger Marmor - statischer und dynamischer Elastizitätsmodul	55
Abbildung 58: 1. Reihe: M50, M70; 2. Reihe: M100, M150	56
Abbildung 59: Rohdichte Laaser Marmor	57
Abbildung 60: massebezogene Wasseraufnahme Laaser Marmor	57
Abbildung 61: Laaser Marmor Ultraschallgeschwindigkeit	58
Abbildung 62: Porenverteilung Laaser Marmor	59
Abbildung 63: Laaser Marmor - einaxiale Druckfestigkeit	60
Abbildung 64: Laaser Marmor - statischer und dynamischer Elastizitätsmodul	61
Abbildung 65: 1. Reihe: LM20, LM50; 2. Reihe: LM70	62
Abbildung 66: Rohdichte Rohrbacher Konglomerat	63
Abbildung 67: massebezogene Wasseraufnahme Rohrbacher Konglomerat	63
Abbildung 68: Rohrbacher Konglomerat Ultraschallgeschwindigkeit	64
Abbildung 69: Rohrbacher Konglomerat – einaxiale Druckfestigkeit.....	65
Abbildung 70: Rohrbacher Konglomerat - statischer und dynamischer Elastizitätsmodul	65
Abbildung 71: 1. Reihe: Ko50, Ko70; 2. Reihe: Ko100, Bruchform Ko100	66
Abbildung 72: Rohdichte Leithakalk aus Kaisersteinbruch.....	67
Abbildung 73: massebezogene Wasseraufnahme Leithakalk aus Kaisersteinbruch	67
Abbildung 74: Abhängigkeit der massebez. Wasseraufnahme zur Rohdichte	68
Abbildung 75: Leithakalk aus Kaisersteinbruch Ultraschallgeschwindigkeit	69
Abbildung 76: Porenverteilung Block I	70
Abbildung 77: Porenverteilung Block II	71
Abbildung 78: Porenverteilung Block III	71
Abbildung 79: Porenverteilung Block IV "normal"	72
Abbildung 80: Porenverteilung Block IV "mürb"	72
Abbildung 81: Leithakalk aus Kaisersteinbruch – einaxiale Druckfestigkeit.....	73
Abbildung 82: Leithakalk aus Kaisersteinbruch - statischer und dynamischer Elastizitätsmodul	74
Abbildung 83: 1. Reihe: KS50, KS70; 2. Reihe: KS100, Scherbruch KS70-2(links) und Spaltbruch KS70-10(rechts).....	75
Abbildung 84: Sterzinger Marmor: Vergleich der Regressionsgeraden Druckluftstativ-Feld	76
Abbildung 85: Laaser Marmor: Vergleich der Regressionsgeraden Druckluftstativ-Feld	76
Abbildung 86: Rohrbacher Konglomerat: Vergl. der Regressionsgeraden Druckstativ-Hand	76
Abbildung 87: Direkter Faktorenvergleich Ultraschallgeschwindigkeit Druckluftstativ / Feld	77
Abbildung 88: Einfluss der Rohdichte auf USG - Sterzinger Marmor	79
Abbildung 89: Einfluss der Rohdichte auf USG - Laaser Marmor	79
Abbildung 90: Einfluss der Rohdichte auf USG - Rohrbacher Konglomerat	80
Abbildung 91: Einfluss der Rohdichte auf USG - Leithakalk aus Kaisersteinbruch	80
Abbildung 92: Einfluss der Wasseraufnahme auf die USG - Sterzinger Marmor.....	81

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 93: Einfluss der Wasseraufnahme auf die USG - Laaser Marmor	81
Abbildung 94: Einfluss der Wasseraufnahme auf die USG - Rohrbacher Konglomerat.....	82
Abbildung 95: Einfluss der Wasseraufnahme auf die USG - Leithakalk aus Kaiserstein.....	82
Abbildung 96: Einfluss der Druckfestigkeit auf die USG - Sterzinger Marmor.....	83
Abbildung 97: Einfluss der Druckfestigkeit auf die USG - Laaser Marmor	83
Abbildung 98: Einfluss der Druckfestigkeit auf die USG - Rohrbacher Konglomerat.....	84
Abbildung 99: Einfluss der Druckfestigkeit auf die USG - Leithakalk aus Kaisersteinbruch.....	84
Abbildung 100: Zusammenhang Druckfestigkeit und E-Modul - Sterzinger Marmor	85
Abbildung 101: Zusammenhang Druckfestigkeit und E-Modul - Laaser Marmor	85
Abbildung 102: Zusammenhang Druckfestigkeit und E-Modul – Rohrbacher Konglomerat.....	86
Abbildung 103: Zusammenhang Druckfestigkeit und E-Modul - Leithakalk aus Kaisersteinbruch	86
Abbildung 104: Einfluss der Prüfkörperdim. auf die einaxiale Druckfestigkeit	87
Abbildung 105: Einfluss der Prüfkörperdim. auf das stat. E-Modul	87
Abbildung 106: Einfluss der Prüfkörperdim. auf das dyn. E-Modul	88
Abbildung 107: einaxiale Druckfestigkeit Versuchs. 2 - Sterzinger Marmor	89
Abbildung 108: Bruchformen M100 Proben	90
Abbildung 109: stat. und dyn. E-Modul Versuchs. 2 - Sterzinger Marmor	90
Abbildung 110: einaxiale Druckfestigkeit Versuchs. 2 - Laaser Marmor.....	91
Abbildung 111: stat. und dyn. E-Modul Versuchs. 2 - Laaser Marmor	91
Abbildung 112: einaxiale Druckfestigkeit Versuchs. 2 - Rohrbacher Konglomerat.....	92
Abbildung 113: stat. und dyn. E-Modul Versuchs. 2 – Rohrbacher Konglomerat.....	92
Abbildung 114: einaxiale Druckfestigkeit ohne Beilagen Versuchs. 2 – Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V.....	93
Abbildung 115: Spaltbrüche der Proben KS50-22 und KS70-25	93
Abbildung 116: stat. und dyn. E-Modul ohne Beilagen Versuchs. 2 – Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V	94
Abbildung 117: einaxiale Druckfestigkeit mit Beilagen Versuchs. 2 – Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V.....	94
Abbildung 118: stat. und dyn. E-Modul ohne Beilagen Versuchs. 2 – Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V	95

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Anzahl der hergestellten Prüfkörper; * die Werte in Klammern geben Anzahl der hergestellten Prüfkörper mit jenen zum Einstellen der Spannung an.....	34
Tabelle 2: Gesteinskennwerte Sterzinger Marmor.....	53
Tabelle 3: Messergebnisse Ultraschallgeschwindigkeit Sterzinger Marmor	53
Tabelle 4: Auswertung der Porosimetermessungen beim Sterzinger Marmor	54
Tabelle 5: Gemittelte Druckfestigkeit und E-Moduli beim Sterzinger Marmor.....	56
Tabelle 6: Verteilung der Scherflächen Sterzinger Marmorproben	56
Tabelle 7: Gesteinskennwerte Laaser Marmor	58
Tabelle 8: Messergebnisse Ultraschallgeschwindigkeit Laaser Marmor	59
Tabelle 9: Auswertung der Porosimetermessungen beim Laaser Marmor.....	59
Tabelle 10: Laaser Marmor - Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Bruchform.....	61
Tabelle 11: Gemittelte Druckfestigkeit und E-Moduli beim Laaser Marmor.....	61
Tabelle 12: Gesteinskennwerte Rohrbacher Konglomerat.....	63
Tabelle 13: Messergebnisse Ultraschallgeschwindigkeit Rohrbacher Konglomerat	64
Tabelle 14: Gemittelte Druckfestigkeit und E-Moduli beim Rohrbacher Konglomerat.....	66
Tabelle 15: Gesteinskennwerte Leithakalk aus Kaisersteinbruch.....	68
Tabelle 16: Messergebnisse Ultraschallgeschwindigkeit Leithakalk aus Kaisersteinbruch	69
Tabelle 17: Auswertung der Porosimetermessungen	70
Tabelle 18: einaxiale Druckfestigkeit und E-Moduli	74
Tabelle 19: Vergleich k und d der Regressionsgeraden.....	77
Tabelle 20: Zusammenfassung der Druckfestigkeit und E-Moduli in Abhängigkeit der Prüfkörperdimension	88
Tabelle 21: Einfluss der Aluminiumbeilagen mit aufgeklebter Teflonfolie auf die einax. Druckfestigkeit und das stat. E-Modul	96

12 Anhang

12.1 Heliumpyknometermessungen zur Ermittlung der Reindichte

Verwendete Formel zur Auswertung:

$$V_{\text{Probe}} = V_{\text{Cell}} - V_{\text{Exp}} / [P_1 / P_2 - 1]$$

Kalibrationswerte:

$$V_{\text{Cell}} \quad 7.828 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{Exp}} \quad 6.112 \text{ cm}^3$$

Sterzinger Marmor

Probenkörpermasse: 3.8186 g

Messung Nr	P ₁ [psig]	P ₂ [psig]	V _{Probe} [cm ³]	ρ _r [g/cm ³]
1	19.515	10.003	1.401	2.725
2	19.507	9.999	1.401	2.725
3	19.504	9.997	1.402	2.724
4	19.503	9.996	1.402	2.723
5	19.512	10.002	1.401	2.727
Mittel	-	-	-	2.72

Laaser Marmor

Probenkörpermasse: 2.7321 g

Messung Nr	P1 [psig]	P2 [psig]	V _{Probe} [cm ³]	ρ _r [g/cm ³]
1	19.454	10.281	0.978	2.792
2	19.504	10.308	0.978	2.794
3	19.511	10.310	0.980	2.788
4	19.510	10.310	0.979	2.790
5	19.509	10.309	0.980	2.788
Mittel	-	-	-	2.79

Leithakalk aus Kaisersteinbruch**Block I**

Probenkörpermasse: 2.4236 g

Messung Nr	P1 [psig]	P2 [psig]	V _{Probe} [cm ³]	ρ _r [g/cm ³]
1	19.509	10.333	0.946	2.562
2	19.506	10.332	0.945	2.564
3	19.505	10.329	0.949	2.554
4	19.505	10.331	0.946	2.562
5	19.509	10.334	0.945	2.566
Mittel	-	-	-	2.56

Leithakalk aus Kaisersteinbruch**Block II**

Probenkörpermasse: 1.9434 g

Messung Nr	P1 [psig]	P2 [psig]	V _{Probe} [cm ³]	ρ _r [g/cm ³]
1	19.505	10.444	0.784	2.479
2	19.529	10.461	0.778	2.498
3	19.505	10.449	0.777	2.502
4	19.502	10.449	0.774	2.510
5	19.506	10.449	0.777	2.500
Mittel	-	-	-	2.50

Leithakalk aus Kaisersteinbruch**Block III**

Probenkörpermasse: 2.2761 g

Messung Nr	P1 [psig]	P2 [psig]	V _{Probe} [cm ³]	ρ _r [g/cm ³]
1	19.505	10.361	0.903	2.520
2	19.508	10.368	0.896	2.541
3	19.504	10.369	0.891	2.554
4	19.514	10.373	0.893	2.549
5	19.503	10.367	0.893	2.548
Mittel	-	-	-	2.54

Leithakalk aus Kaisersteinbruch**Block VI "mürb"**

Probenkörpermasse: 2.1727 g

Messung Nr	P1 [psig]	P2 [psig]	V _{Probe} [cm ³]	ρ _r [g/cm ³]
1	19.504	10.389	0.862	2.519
2	19.506	10.391	0.861	2.523
3	19.505	10.384	0.870	2.496
4	19.505	10.390	0.862	2.521
5	19.509	10.394	0.859	2.529
Mittel	-	-	-	2.52

Leithakalk aus Kaisersteinbruch**Block VI "dicht"**

Probenkörpermasse: 2.6943 g

Messung Nr	P1 [psig]	P2 [psig]	V _{Probe} [cm ³]	ρ _r [g/cm ³]
1	19.506	10.250	1.060	2.541
2	19.526	10.269	1.049	2.569
3	19.513	10.260	1.052	2.562
4	19.508	10.256	1.053	2.557
5	19.507	10.256	1.053	2.559
Mittel	-	-	-	2.56

12.2 Tabelle zur Berechnung der maximal möglichen Messabweichungen

Einfluss der Messgenauigkeit (maximales Spiel)	Messdifferenzen				Trockenmasse			Feuchtmassse		
	Δm_d [g]	Δm_s [g]	Δm_h [g]	m_d [g]	$m_d + \Delta m_d$ [g]	%-Abw	m_s [g]	$m_s + \Delta m_s$ [g]	%-Abw	
Mittler Waage, Messgenauigkeit: 0,1g										
Schaumbler Tafelwaage: Messgenauigkeit: 5g										
LM20-1 max p_b : $m_d+0.1, m_s-0.1, m_h+0.1$	0.1	-0.1	0.1	33.8	33.9	0.296	33.9	33.8	-0.295	
LM20-1 min p_b : $m_d-0.1, m_s+0.1, m_h-0.1$	-0.1	0.1	-0.1	33.8	33.7	-0.296	33.9	34	0.295	
M50-1 max p_b : $m_d+0.1, m_s-0.1, m_h+0.1$	0.1	-0.1	0.1	533.2	533.3	0.019	534.1	534	-0.019	
M50-1 min p_b : $m_d-0.1, m_s+0.1, m_h-0.1$	-0.1	0.1	-0.1	533.2	533.1	-0.019	534.1	534.2	0.019	
M70-1 max p_b : $m_d+0.1, m_s-0.1, m_h+0.1$	0.1	-0.1	0.1	1382.5	1382.6	0.007	1383.8	1383.7	-0.007	
M70-1 min p_b : $m_d-0.1, m_s+0.1, m_h-0.1$	-0.1	0.1	-0.1	1382.5	1382.4	-0.007	1383.8	1383.9	0.007	
M100-1 max p_b : m_d+5, m_s-5, m_h+5	5	-5	5	4524	4529	0.111	4545	4540	-0.110	
M100-1 min p_b : m_d-5, m_s+5, m_h-5	-5	5	-5	4524	4519	-0.111	4545	4550	0.110	
M150-1 max p_b : m_d+5, m_s-5, m_h+5	5	-5	5	14730	14735	0.034	14747	14742	-0.034	
M150-1 min p_b : m_d-5, m_s+5, m_h-5	-5	5	-5	14730	14725	-0.034	14747	14752	0.034	

Masse Auftrieb			massebezogene Wasseraufnahme			Rohdichte		
m_h [g]	$m_h + \Delta m_h$ [g]	%-Abw	A_b (m) [M%]	A_b (Δm) [M%]	%-Abw	p_b (m) [g/cm ³]	p_b (Δm) [g/cm ³]	%-Abw
21	21.1	0.476	0.296	-0.295	-199.705	2.620	2.669	1.875
21	20.9	-0.476	0.296	0.890	200.890	2.620	2.573	-1.818
336.8	336.9	0.030	0.169	0.131	-22.237	2.702	2.706	0.120
336.8	336.7	-0.030	0.169	0.206	22.245	2.702	2.699	-0.120
873.4	873.5	0.011	0.094	0.080	-15.391	2.709	2.710	0.046
873.4	873.3	-0.011	0.094	0.109	15.393	2.709	2.707	-0.046
2868	2873	0.174	0.464	0.243	-47.677	2.698	2.717	0.711
2868	2863	-0.174	0.464	0.686	47.782	2.698	2.679	-0.703
9305	9310	0.054	0.115	0.048	-58.838	2.707	2.713	0.218
9305	9300	-0.054	0.115	0.183	58.877	2.707	2.701	-0.217

12.3 Auswertung Druckversuche Versuchsreihe 1

12.3.1. Sterzinger Marmor

Sterzinger Marmor	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m_d [g]	Feuchtmass m_s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A_b [M%]	Masse-Auftrieb m_b [g]	Volumen V_b [ml]	Rohdichte ρ_b [kg/m³]	Reindichte ρ_r [kg/m³]	offene Porosität p_o [%]	Gesamt porosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R_d [N/mm²]	stat. E-Modul E_d [N/mm²]	Bruchform
M50-01	50.1	100.4	533.2	534.1	0.9	0.169	336.8	197.655	2698	2725	0.456	1.005	46.98	39559.00	Scher
M50-02	50.1	100.9	536.6	537.4	0.8	0.149	339.1	198.657	2701	2725	0.403	0.876	62.14	43188.00	Scher
M50-03	50.1	100.8	529.5	530.3	0.8	0.151	334.6	196.052	2701	2725	0.409	0.888	59.35	40363.00	Scher
M50-04	50.1	100.6	533.5	534.5	1.0	0.187	337.0	197.856	2696	2725	0.506	1.049	59.44	40834.00	Scher
M50-05	50.1	100.7	534.2	534.9	0.7	0.131	337.5	197.755	2701	2725	0.355	0.869	56.09	38143.00	Scher
M50-06	50.1	100.8	534.9	535.7	0.8	0.150	337.9	198.156	2699	2725	0.404	0.940	52.39	38779.00	Scher
M50-07	50.1	100.7	533.8	534.7	0.9	0.169	337.1	197.956	2697	2725	0.455	1.044	52.72	40795.00	Scher
M50-08	50.1	100.1	531.8	532.7	0.9	0.169	336.0	197.054	2699	2725	0.458	0.963	59.32	-	Scher
M50-09	50.1	101.6	540.1	540.8	0.7	0.130	341.3	199.859	2702	2725	0.351	0.829	58.09	42375.00	Scher
M50-10	50.1	100.3	531.5	532.4	0.9	0.169	335.7	197.054	2697	2725	0.458	1.019	53.83	40421.00	Scher
min	-	-	-	-	-	0.13	-	-	2696	2725	0.35	0.83	46.98	38143.00	-
max	-	-	-	-	-	0.19	-	-	2702	2725	0.51	1.05	62.14	43188.00	-
mittel	-	-	-	-	-	0.16	-	-	2699	2725	0.42	0.95	55.65	40495.22	-

Sterzinger Marmor	Länge [mm]	Rohdichte ρ_r [g]	Druckluftstativ, Versuch Nr.						Ultraschalllaufzeit						Händisch, Versuch Nr.	Geschw. $v_{y,Hand}$ [km/s]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand)						
			1			2			3			1						2			3		
			$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$v_{x,Stativ}$ [km/s]	$t_{1,Hand}$ [µs]	$t_{2,Hand}$ [µs]				$t_{3,Hand}$ [µs]	$t_{1,Hand}$ [µs]	$t_{2,Hand}$ [µs]	$t_{3,Hand}$ [µs]	E_{dyn} [GPa]	E_{stat} [GPa]
M50-01	100.0	2.698	30.1	30.3	30.0	30.13	30.13	30.13	3.32	31.0	31.3	31.2	31.17	3.21	24.757	23.143	39.56	1.60	1.71				
M50-02	100.9	2.701	28.8	29.1	29.4	29.10	29.10	29.10	3.47	30.5	31.1	31.0	30.87	3.27	27.062	24.053	43.19	1.60	1.80				
M50-03	100.8	2.701	29.1	29.3	29.3	29.23	29.23	29.23	3.45	30.3	30.2	29.7	30.07	3.35	26.759	25.297	40.36	1.51	1.60				
M50-04	100.6	2.696	31.0	31.5	31.6	31.37	31.37	31.37	3.21	32.6	33.4	33.0	33.00	3.05	23.113	20.882	40.83	1.77	1.96				
M50-05	100.7	2.701	29.4	29.2	29.1	29.23	29.23	29.23	3.44	29.9	29.8	30.1	29.93	3.36	26.711	25.477	38.14	1.43	1.50				
M50-06	100.8	2.699	29.5	29.3	29.3	29.37	29.37	29.37	3.43	31.1	30.8	30.2	30.70	3.28	26.503	24.251	38.78	1.46	1.60				
M50-07	100.7	2.697	30.6	30.8	30.9	30.77	30.77	30.77	3.27	31.8	32.0	31.6	31.80	3.17	24.073	22.534	40.80	1.69	1.81				
M50-08	100.1	2.699	29.1	29.2	29.2	29.17	29.17	29.17	3.43	30.0	30.4	29.8	30.07	3.33	26.490	24.928	-	-	-				
M50-09	101.6	2.702	31.4	31.2	31.1	31.23	31.23	31.23	3.25	32.1	32.3	31.9	32.10	3.17	23.850	22.560	42.38	1.78	1.88				
M50-10	100.3	2.697	31.7	31.4	31.3	31.47	31.47	31.47	3.19	32.5	32.7	32.6	32.60	3.08	22.857	21.277	40.42	1.77	1.90				
min	100.00	2.70	-	-	-	29.10	29.10	29.10	3.19	-	-	-	29.93	3.05	22.84	20.88	38.14	1.43	1.50				
max	101.60	2.70	-	-	-	31.47	31.47	31.47	3.47	-	-	-	33.00	3.36	27.06	25.48	43.19	1.78	1.96				
mittel	100.65	2.70	-	-	-	30.06	30.06	30.06	3.35	-	-	-	31.17	3.23	25.28	23.51	40.50	1.62	1.75				

*E-Modul nicht aussagekräftig da Messfehler!		Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch:	Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:	GPa
		0.12 km/s	1.77	
		1.04	1.08	

Sterzinger Marmor	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m _d [g]	Feuchtmasse m _s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A _b [M%]	Masse-Auftrieb m _s [g]	Volumen V _b [ml]	Rohdichte ρ _b [kg/m ³]	Reindichte ρ _r [kg/m ³]	offene Porosität p _o [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R _d [N/mm ²]	stat. E-Modul Ed [N/mm ²]	Bruchform [-]
M70-01	68.3	139.8	1382.5	1383.8	1.3	0.094	873.4	511.319	2704	2725	0.255	0.778	58.47	40213.00	Scher
M70-02	68.3	140.5	1391.4	1392.8	1.4	0.101	879.2	514.525	2704	2725	0.273	0.762	57.59	46398.00	Scher
M70-03	68.3	141.2	1396.6	1398.1	1.5	0.107	882.9	516.127	2706	2725	0.291	0.700	62.84	43424.00	Scher
M70-04	68.3	141.3	1398.9	1400.7	1.8	0.129	884.2	517.430	2704	2725	0.348	0.787	41.62	41743.00	Scher
M70-05	68.3	140.2	1387.7	1388.6	0.9	0.065	876.9	512.621	2707	2725	0.176	0.658	61.09	40453.00	Scher
M70-06	68.3	139.9	1385.1	1386.2	1.1	0.079	875.3	511.820	2706	2725	0.215	0.689	63.61	40417.00	Scher
M70-07	68.3	139.7	1382.3	1383.4	1.1	0.080	873.4	510.918	2706	2725	0.216	0.715	55.52	43744.00	Scher
M70-08	68.3	140.4	1390.5	1391.6	1.1	0.079	878.5	514.024	2705	2725	0.214	0.729	60.19	42588.00	Scher
M70-09	68.3	141.4	1398.5	1399.2	0.7	0.050	883.9	516.228	2709	2725	0.136	0.584	58.74	40699.00	Scher
M70-10	68.3	140.8	1391.5	1392.7	1.2	0.086	879.1	514.525	2704	2725	0.234	0.755	52.69	39478.00	Scher
min	-	-	-	-	-	0.05	-	-	2704	2725	0.14	0.58	42.62	39478.00	-
max	-	-	-	-	-	0.13	-	-	2709	2725	0.35	0.79	63.61	46398.00	-
mittel	-	-	-	-	-	0.09	-	-	2705	2725	0.23	0.72	58.52	41657.63	-

Sterzinger Marmor	Länge [mm]	Rohdichte ρ _R [g]	Ultraschalllaufzeit												Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand) [-]			
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.							Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ) [-]		
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.		1	2	3	Mittelwert	Geschw.					
M70-01	139.8	2.704	t _{1,Stativ} [µs]	t _{2,Stativ} [µs]	t _{3,Stativ} [µs]	t _{m,Stativ} [µs]	v _{W,Stativ} [km/s]	t _{1,Hand} [µs]	t _{2,Hand} [µs]	t _{3,Hand} [µs]	t _{m,Hand} [µs]	v _{W,Hand} [km/s]	E _{dyn} [GPa]	E _{stat} [GPa]	23.379	40.21	1.65	1.72
M70-02	140.5	2.704	42.8	42.6	42.0	42.47	3.29	43.7	43.4	43.1	43.40	3.22	24.418	40.21	23.379	40.21	1.65	1.72
M70-03	141.2	2.706	40.1	40.5	40.7	40.43	3.47	41.8	41.8	41.5	41.73	3.37	27.211	46.40	25.542	46.40	1.71	1.82
M70-04	141.3	2.704	40.6	41.0	41.3	40.97	3.45	42.6	42.5	41.8	42.30	3.34	26.788	43.42	25.126	43.42	1.62	1.73
M70-05	140.2	2.707	40.2	40.5	40.6	40.43	3.49	42.5	40.9	42.0	41.80	3.38	27.514	41.74	25.745	41.74	1.52	1.62
M70-06	139.9	2.706	40.8	41.1	41.0	40.97	3.42	41.2	41.9	41.7	41.60	3.37	26.421	40.45	25.623	40.45	1.53	1.58
M70-07	139.7	2.706	40.8	40.3	39.9	40.33	3.17	41.4	41.6	41.7	41.57	3.37	27.133	40.42	25.516	40.42	1.49	1.58
M70-08	140.4	2.705	41.1	41.0	40.9	41.00	3.41	41.8	42.7	42.2	42.23	3.31	26.175	43.74	24.669	43.74	1.67	1.77
M70-09	141.4	2.709	40.0	40.6	40.7	40.43	3.47	41.7	42.1	42.1	41.97	3.35	27.181	42.57	25.231	42.57	1.57	1.69
M70-10	140.8	2.704	42.2	42.4	42.1	42.23	3.35	43.9	44.2	43.6	43.90	3.22	25.306	40.70	23.421	40.70	1.61	1.74
min	139.70	2.70	41.7	41.7	42.4	41.93	3.36	43.6	43.7	43.4	43.57	3.23	25.409	39.48	23.539	39.48	1.55	1.68
max	141.40	2.71	-	-	-	40.33	3.29	-	-	-	41.57	3.22	24.42	39.48	23.38	39.48	1.49	1.58
mittel	140.52	2.71	-	-	-	42.47	3.49	-	-	-	43.90	3.38	27.51	46.40	25.74	46.40	1.71	1.82
						41.05	3.42				42.33	3.32	26.45	41.66	24.84	41.66	1.59	1.69
			Mittlere Geschwindigkeitskoeff. Stativ/Händisch:			0.11	km/s	Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:			1.62	GPa						
			Faktor mittlere Geschwindigkeit: Stativ/Händisch:			1.03		Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch:			1.07							

Sterzinger Marmor	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m _d [g]	Feuchtmasse m _s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A _b [M%]	Masse-Auftrieb m _h [g]	Volumen V _b [ml]	Rohdichte ρ _b [kg/m ³]	Reindichte ρ _r [kg/m ³]	offene Porosität p _o [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R _d [N/mm ²]	stat. E-Modul Ed [N/mm ²]	Bruchform [-]
M100-01	103.0	202.0	4539.0	4543	4	0.088	2868	1678.015	2705	2725	0.239	0.735	67.54	36667.00	Scher
M100-02	103.0	203.0	4556.0	4563	7	0.154	2880	1686.030	2702	2725	0.416	0.836	66.57	41113.00	Scher
M100-03	103.0	203.0	4545.0	4550	5	0.110	2873	1690.019	2705	2725	0.298	0.722	69.33	41538.00	Scher
M100-04	103.0	203.0	4565.0	4568	3	0.066	2885	1686.030	2708	2725	0.178	0.641	67.54	42708.00	Scher
M100-05	103.0	203.0	4565.0	4569	4	0.088	2885	1687.032	2706	2725	0.238	0.700	57.61	42036.00	Scher
M100-06	103.0	203.0	4556.0	4561	5	0.110	2880	1684.026	2705	2725	0.297	0.718	64.74	34129.00	Scher
M100-07	103.0	204.0	4571.0	4578	7	0.153	2890	1691.039	2703	2725	0.415	0.805	62.26	34772.00	Scher
M100-08	103.0	204.5	4605.0	4610	5	0.109	2910	1703.060	2704	2725	0.294	0.772	59.89	31321.00	Scher
M100-09	103.0	204.0	4570.0	4576	6	0.131	2889	1690.037	2704	2725	0.356	0.768	64.43	39816.00	Scher
M100-10	103.0	203.0	4568.0	4575	7	0.153	2888	1690.037	2703	2725	0.415	0.811	62.79	29233.00	Scher
min	-	-	-	-	-	0.07	-	-	2702	2725	0.18	0.64	57.61	29233.00	-
max	-	-	-	-	-	0.15	-	-	2708	2725	0.42	0.84	69.33	42708.00	-
mittel	-	-	-	-	-	0.12	-	-	2704	2725	0.32	0.75	64.47	37674.00	-

Sterzinger Marmor	Länge [mm]	Rohdichte ρ _R [g]	Ultraschallzeit												Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand)
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.							
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.	τ _{dyn,Stativ} [µs]	1	2	3	Mittelwert	Geschw.	τ _{dyn,Hand} [µs]		
M100-01	202.0	2.705	τ _{1,Stativ} [µs]	τ _{2,Stativ} [µs]	τ _{3,Stativ} [µs]	τ _{dyn,Stativ} [µs]	τ _{1,Hand} [µs]	τ _{2,Hand} [µs]	τ _{3,Hand} [µs]	τ _{dyn,Hand} [µs]	τ _{dyn,Hand} [µs]	τ _{dyn,Hand} [µs]	τ _{dyn,Hand} [µs]	E _{dyn} [GPa]	E _{stat} [GPa]	Faktor stat. / dyn. E-Modul
M100-02	203.0	2.702	65.1	64.1	64.1	64.83	67.6	66.6	67.6	67.27	3.00	21.882	20.328	36.67	1.68	1.80
M100-03	203.0	2.705	58.2	59.5	58.7	59.37	60.7	61.9	61.73	61.73	3.29	26.330	24.949	41.11	1.56	1.69
M100-04	203.0	2.708	58.4	58.0	60.2	58.87	59.7	59.7	61.1	60.17	3.37	27.271	25.664	41.54	1.52	1.62
M100-05	203.0	2.706	61.2	60.4	60.3	60.40	61.5	60.7	61.4	62.23	3.26	25.430	24.007	42.71	1.68	1.78
M100-06	203.0	2.705	59.5	58.6	58.6	58.90	60.4	60.8	61.2	61.13	3.32	25.471	24.864	42.04		
M100-07	204.0	2.703	60.7	61.0	60.8	60.83	61.3	62.1	62.3	61.90	3.30	25.331	24.466	34.77	1.37	1.42
M100-08	204.5	2.704	58.3	58.1	58.3	58.23	59.8	60.9	59.9	60.20	3.40	27.788	26.002	31.32	1.13	1.20
M100-09	204.0	2.704	65.0	64.4	64.0	64.47	65.6	65.1	65.4	65.37	3.12	22.565	21.948	39.82	1.76	1.81
M100-10	203.0	2.703	62.0	62.1	62.1	62.07	62.5	63.2	62.7	62.80	3.23	24.095	23.535	29.23	1.21	1.24
min	202.00	2.70	-	-	-	58.23	3.12	-	-	60.17	3.00	21.88	20.33	29.23	1.13	1.20
max	204.50	2.71	-	-	-	64.83	3.51	-	-	67.27	3.40	27.79	26.00	42.71	1.76	1.81
mittel	203.25	2.70	-	-	-	60.61	3.36	-	-	61.99	3.28	25.41	24.27	37.67	1.47	1.55
			Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch:													
			Faktor dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:													
			Mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch:												1.14	GPa
			Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch:												1.05	

Sterzinger Marmor	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m_d [g]	Feuchtmasse m_s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A_b [M%]	Masse-Auftrieb m_h [g]	Volumen V_b [ml]	Rohdichte ρ_b [kg/m³]	Reindichte ρ_r [kg/m³]	offene Porosität p_o [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R_d [N/mm²]	stat. E-Modul Ed [N/mm²]	Bruchform
M150-01	151.5	303.0	14730.0	14747.0	17	0.115	9305.0	5451.797	2702	2725	0.312	0.849	70.53	33870.00	Scher
M150-02	151.5	303.0	14733.0	14752.0	19	0.129	9322.0	5439.775	2708	2725	0.350	0.610	71.95	31162.00	Scher
M150-03	151.5	304.0	14801.0	14823.0	22	0.149	9350.0	5482.853	2700	2725	0.402	0.936	66.57	34315.00	Scher
M150-04	151.5	303.0	14760.0	14781.0	21	0.142	9326.0	5464.820	2701	2725	0.385	0.884	67.44	38429.00	Scher
M150-05	151.5	303.0	14736.0	14747.0	11	0.075	9305.0	5451.797	2703	2725	0.202	0.809	63.35	28221.00	Scher
M150-06	151.5	297.0	14431.0	14442.0	11	0.076	9112.0	5339.595	2703	2725	0.206	0.821	73.58	20362.00	Scher
min	-	-	-	-	-	0.07	-	-	2700	2725	0.20	0.61	63.35	20362.00	-
max	-	-	-	-	-	0.15	-	-	2708	2725	0.40	0.94	73.58	38429.00	-
mittel	-	-	-	-	-	0.11	-	-	2703	2725	0.31	0.82	68.90	31059.83	-

Sterzinger Marmor	Länge [mm]	Rohdichte ρ_R [g]	Ultraschalllaufzeit												Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ) [-]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand) [-]		
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.								stat. E-Modul lt. EN 14580 E_{stat} [GPa]	dyn. E-Modul händisch ($\mu=0,25$) E_{dyn} [GPa]
			1	2	3	Mittelwert $t_{m,Stativ}$ [µs]	Geschw. $v_{s,Stativ}$ [km/s]	1	2	3	Mittelwert $t_{m,Hand}$ [µs]	Geschw. $v_{s,Hand}$ [km/s]	E_{stat} [GPa]	E_{dyn} [GPa]				
M150-01	303.0	2.702	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{m,Stativ}$ [µs]	$v_{s,Stativ}$ [km/s]	$t_{1,Hand}$ [µs]	$t_{2,Hand}$ [µs]	$t_{3,Hand}$ [µs]	$t_{m,Hand}$ [µs]	$v_{s,Hand}$ [km/s]	-	26.693	33.87	-	1.27	
M150-02	303.0	2.708	-	-	-	-	-	88.6	88.5	86.9	88.0	3.44	-	27.044	31.16	-	1.15	
M150-03	304.0	2.700	-	-	-	-	-	87.1	88.2	87.3	87.53	3.46	-	28.662	34.32	-	1.20	
M150-04	303.0	2.701	-	-	-	-	-	85.9	84.9	84.7	85.17	3.57	-	23.738	38.43	-	1.62	
M150-05	303.0	2.703	-	-	-	-	-	94.2	93.8	91.9	93.30	3.25	-	23.910	28.22	-	1.18	
M150-06	297.0	2.703	-	-	-	-	-	90.0	97.7	91.3	93.00	3.26	-	25.251	20.36	-	0.81	
min	297.00	2.70	-	-	-	-	-	89.8	88.5	87.8	88.70	3.35	-	23.74	20.36	-	0.81	
max	304.00	2.71	-	-	-	-	-	-	-	-	93.30	3.57	-	28.66	38.43	-	1.62	
mittel	302.17	2.70	-	-	-	-	-	-	-	-	89.28	3.39	-	25.88	31.06	-	1.20	
Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch:			-						Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:						GPa			
Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch:			-						Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch:									

Sterzinger Marmor Zusammenfassung	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m_d [g]	Feuchtmasse m_s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A_b [M%]	Masse Auftrieb m_h [g]	Volumen V_b [ml]	Rohdichte ρ_b [kg/m ³]	Reindichte ρ_r [kg/m ³]	offene Porosität p_o [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R_d [N/mm ²]	stat. E-Modul E_d [N/mm ²]	Bruchform
min	-	-	-	-	-	0.05	-	-	2696	2725	0.14	0.58	42.62	20362.00	-
max	-	-	-	-	-	0.19	-	-	2709	2725	0.51	1.05	73.58	46398.00	-
mittel	-	-	-	-	-	0.12	-	-	2703	2725	0.32	0.80	60.89	39031.17	-

Sterzinger Marmor Zusammenfassung	Länge [mm]	Rohdichte ρ_R [g]	Ultraschalllaufzeit												dyn. E-Modul Druckluftstativ ($\mu=0,25$) E_{dyn} [GPa]	dyn. E-Modul Händisch ($\mu=0,25$) E_{dyn} [GPa]	stat. E-Modul ft. EN 14580 E_{stat} [GPa]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ) [-]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand) [-]
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.										
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.	1	2	3	Mittelwert	Geschw.							
min	-	2.70	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{m,Stativ}$ [µs]	$v_{1,Stativ}$ [km/s]	$t_{1,Hand}$ [µs]	$t_{2,Hand}$ [µs]	$t_{3,Hand}$ [µs]	$t_{m,Hand}$ [µs]	$v_{1,Hand}$ [km/s]	3.00	21.88	20.33	1.13	0.81		
max	-	2.71	-	-	-	-	3.12	-	-	-	-	3.57	27.79	28.66	46.40	1.78	1.96		
mittel	-	2.70	-	-	-	-	3.38	-	-	-	-	3.29	25.78	24.44	39.03	1.58	1.60		
			Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch:						Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:						1.34	1.34	GPa		
			Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch:						Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch:						1.06	1.06			

12.3.2. Laser Marmor

Laser Marmor	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m_d [g]	Feuchtmasse m_s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogen Wasser-aufnahme A_b [M%]	Masse Auftrieb m_h [g]	Volumen V_s [ml]	Rohdichte ρ_b [kg/m³]	Reinlichte ρ_r [kg/m³]	offene Porosität p_o [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R_d [N/mm²]	stat. E-Modul* E_d [N/mm²]	Bruchform
LM20-01	20.0	41.0	33.8	33.8	0	0.000	21	12.823	2636	2739	0.000	3.765	48.76	-	Scher
LM20-02	20.0	41.9	34.8	34.8	0	0.000	21.8	13.023	2672	2739	0.000	2.442	58.59	-	Scher
LM20-03	20.0	42.5	35.1	35.1	0	0.000	22	13.124	2675	2739	0.000	2.352	39.63	-	Misch
LM20-04	20.0	40.7	33.9	33.9	0	0.000	21.2	12.723	2664	2739	0.000	2.720	50.30	-	Misch
LM20-05	20.0	40.0	33.3	33.3	0	0.000	20.8	12.523	2659	2739	0.000	2.913	48.66	-	Scher
LM20-06	20.0	41.4	34.4	34.4	0	0.000	21.5	12.923	2662	2739	0.000	2.816	54.69	-	Spalt
LM20-07	20.0	40.4	33.4	33.4	0	0.000	20.9	12.523	2667	2739	0.000	2.621	50.77	-	Misch
LM20-08	20.0	41.2	34.2	34.2	0	0.000	21.3	12.923	2646	2739	0.000	3.381	55.37	-	Scher
LM20-09	20.0	40.8	33.8	33.8	0	0.000	21.2	12.623	2678	2739	0.000	2.237	44.82	-	Scher
LM20-10	20.0	40.4	33.6	33.6	0	0.000	21	12.623	2662	2739	0.000	2.816	53.15	-	Scher
min	-	-	-	-	-	0.00	-	-	2636	2739	0.00	2.24	39.63	-	-
max	-	-	-	-	-	0.00	-	-	2678	2739	0.00	3.76	58.59	-	-
mittel	-	-	-	-	-	0.00	-	-	2663	2739	0.00	2.76	50.82	-	-

*) Probekörper für Dehnungsmessung zu klein

Laser Marmor	Länge [mm]	Rohdichte ρ_R [g]	Ultraschalllaufzeit												dyn. E-Modul Druckluftstativ E_{dyn} [GPa]	dyn. E-Modul stat. E-Modul lt. EN 14580 E_{stat} [GPa]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ) [-]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand) [-]
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.									
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.		1	2	3	Mittelwert	Geschw.					
LM20-01	41.0	2.636	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{m,Stativ}$ [µs]	$v_{k,Stativ}$ [km/s]	$t_{1,Hand}$ [µs]	$t_{2,Hand}$ [µs]	$t_{3,Hand}$ [µs]	$t_{m,Hand}$ [µs]	$v_{k,Hand}$ [km/s]	E_{dyn} [GPa]	E_{stat} [GPa]	-	-		
LM20-02	41.9	2.672	11.3	11.3	11.2	11.27	3.64	11.6	11.6	11.5	11.57	3.54	27.599	-	-			
LM20-03	42.5	2.675	12.6	12.5	12.4	12.50	3.35	12.8	12.8	12.9	12.83	3.26	25.020	23.737	-			
LM20-04	40.7	2.664	12.0	11.9	11.9	11.93	3.56	12.4	12.4	12.3	12.33	3.45	28.270	26.466	-			
LM20-05	40.0	2.659	13.8	13.8	13.8	13.80	2.95	14.0	14.0	14.2	14.13	2.88	19.314	18.413	-			
LM20-06	41.4	2.662	12.9	12.9	12.9	12.90	3.10	12.7	12.7	13.0	12.93	3.09	21.307	21.197	-			
LM20-07	40.4	2.667	11.8	11.9	11.8	11.83	3.50	12.1	12.1	12.0	12.03	3.44	27.151	26.256	-			
LM20-08	41.2	2.646	13.3	13.4	13.3	13.33	3.03	13.5	13.5	13.7	13.57	2.98	20.406	19.710	-			
LM20-09	40.3	2.678	14.0	14.0	14.0	13.93	2.96	14.5	14.4	14.3	14.40	2.86	19.382	18.053	-			
LM20-10	40.4	2.662	13.1	13.1	13.2	13.13	3.11	13.4	13.4	13.5	13.43	3.04	21.535	20.584	-			
min	40.00	2.64	12.8	12.8	13.0	12.93	3.12	13.6	13.6	13.5	13.57	2.98	21.645	19.671	-			
max	42.50	2.68	-	-	-	11.27	2.95	-	-	-	11.57	2.86	19.28	18.05	-			
mittel	41.03	2.66	-	-	-	13.93	3.64	-	-	-	14.40	3.54	29.09	27.60	-			
						12.80	3.22				13.10	3.14	23.08	22.00				
			Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch: 0.08												Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch: 1.08		GPa	
			Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch: 1.02												Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch: 1.05			

Laaser Marmor	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse Feuchtmasse	Wasser- aufnahme	massebezogene Wasser- aufnahme	Masse Auftrieb	Volumen	Rohdichte	Rendichte	offene Porosität		einaxiale Druckfestigkeit	stat. E-Modul	Bruchform
										ρ _p [%]	ρ [%]			
LM50-01	49.2	100.1	m _d [g] 511.8	w [g] 0.7	A _b [MNs] 0.137	m _s [g] 323.6	V _b [ml] 189.240	ρ _b [kg/m ³] 2705	ρ _r [kg/m ³] 2739	P _p [%] 0.371	ρ [%] 1.260	R _g [N/mm ²] 43651.00	43651.00	Scher
LM50-02	49.2	100.0	511.8	0.5	0.098	323.2	188.940	2706	2739	0.265	1.199	46.35	48934.00	Spalt
LM50-03	49.2	100.3	511.6	0.5	0.098	323.2	189.240	2703	2739	0.265	1.298	36.58	76408.00	Spalt
LM50-04	49.2	100.2	510.8	0.6	0.117	322.9	188.839	2705	2739	0.318	1.243	60.69	51589.00	Misch
LM50-05	49.2	99.4	509.0	0.6	0.118	321.8	188.138	2705	2739	0.319	1.225	35.42	42571.00	Spalt
LM50-06	49.2	101.1	517.2	0.6	0.116	326.9	151.244	2704	2739	0.314	1.263	63.93	48108.00	Misch
LM50-07	49.2	100.7	514.7	0.6	0.117	325.3	150.342	2704	2739	0.316	1.275	36.39	49042.00	Spalt
LM50-08	49.2	101.0	516.5	0.6	0.116	326.4	151.043	2704	2739	0.315	1.293	67.65	45447.00	Scher
LM50-09	49.2	100.6	515.5	0.5	0.097	325.8	150.542	2705	2739	0.263	1.225	46.70	56149.00	Spalt
LM50-10	49.2	99.7	509.1	0.5	0.098	321.7	188.238	2705	2739	0.266	1.258	51.86	37980.00	Spalt
min	-	-	-	-	0.10	-	-	2703	2739	0.26	1.20	35.42	37980.00	-
max	-	-	-	-	0.14	-	-	2706	2739	0.37	1.30	68.41	76408.00	-
mittel	-	-	-	-	0.11	-	-	2705	2739	0.30	1.26	51.27	48186.38	-

Laaser Marmor	Länge [mm]	Rohdichte ρ _R [g]	Ultraschalllaufzeit												Faktor stat. / dyn. E- Modul (Hand)	
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.							Faktor stat. / dyn. E- Modul (Stativ)
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.		1	2	3	Mittelwert	Geschw.			
LM50-01	100.1	2.705	t _{1,Stativ} [µs] 23.8	t _{2,Stativ} [µs] 23.9	t _{3,Stativ} [µs] 23.7	t _{mp,Stativ} [µs] 23.80	v _{h,Stativ} [km/s] 4.21	t _{1,Händisch} [µs] 24.0	t _{2,Händisch} [µs] 24.5	t _{3,Händisch} [µs] 24.1	t _{mp,Händisch} [µs] 24.20	v _{h,Händisch} [km/s] 4.14	E _{stativ} [GPa] 38.561	E _{händisch} [GPa] 43.651	1.09	1.13
LM50-02	100.0	2.706	25.3	24.9	25.4	25.20	3.97	25.3	25.5	25.6	25.47	3.93	34.772	48.934	1.38	1.41
LM50-03	100.3	2.703	24.2	24.1	24.2	24.17	4.15	24.3	24.1	24.4	24.27	4.13	38.807	76.408	1.97	1.99
LM50-04	100.2	2.705	27.2	27.0	27.3	27.17	3.69	28.2	27.8	27.4	27.80	3.60	30.665	51.589	1.68	1.76
LM50-05	99.4	2.705	24.5	24.4	24.4	24.43	4.07	24.3	24.7	24.5	24.67	4.03	37.314	42.571	1.14	1.16
LM50-06	101.1	2.704	25.8	26.4	25.7	25.97	3.89	25.9	27.8	26.0	26.57	3.81	32.638	48.108	1.41	1.47
LM50-07	100.7	2.704	28.2	27.6	28.4	28.07	3.59	29.7	28.4	29.5	29.20	3.45	26.800	49.042	1.69	1.83
LM50-08	101.0	2.704	27.7	26.7	28.1	27.50	3.67	29.3	28.0	29.9	29.23	3.45	26.893	45.447	1.50	1.69
LM50-09	100.6	2.705	26.2	26.7	26.5	26.47	3.80	26.3	27.7	26.6	26.87	3.74	32.573	56.149	1.72	1.78
LM50-10	99.7	2.705	32.4	32.3	32.5	32.40	3.08	32.5	34.1	33.6	33.43	2.98	20.042	37.980	1.78	1.90
min	99.40	2.70	-	-	-	23.80	3.08	-	-	-	24.20	2.98	20.04	37.98	1.09	1.13
max	101.10	2.71	-	-	-	32.40	4.21	-	-	-	33.43	4.14	38.56	76.41	1.97	1.99
mittel	100.31	2.70	-	-	-	26.12	3.85	-	-	-	26.76	3.77	32.14	48.19	1.54	1.62
Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch:						0.09			Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:			1.42			GPa	
Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch:						1.02			Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch:			1.04				

Laaser Marmor	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m _d [g]	Feuchtmass m _s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massezogene Wasser-aufnahme A _s [M%]	Masse Auftrieb m _s [g]	Volumen V _b [ml]	Rohdichte ρ _b [kg/m ³]	Reindichte ρ _r [kg/m ³]	offene Porosität P _p [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R _g [N/mm ²]	stat. E-Modul Ed [N/mm ²]	Bruchform [-]
LM70-01	68.2	140.2	1380.8	1382.6	1.8	0.130	872.8	510.718	2704	2739	0.353	1.291	75.57	40179.00	Scher
LM70-02	68.2	140.3	1384.1	1385.6	1.5	0.108	874.9	511.619	2705	2739	0.294	1.229	75.43	43277.00	Scher
LM70-03	68.2	140.2	1382.2	1384.2	2	0.145	873.9	511.219	2704	2739	0.392	1.287	77.11	42296.00	Scher
LM70-04	68.2	139.8	1378.2	1380.2	2	0.145	871.6	509.516	2705	2739	0.393	1.244	83.96	42709.00	Scher
LM70-05	68.2	141.0	1393.3	1395	1.7	0.122	881	514.925	2706	2739	0.331	1.211	80.20	42362.00	Scher
LM70-06	68.2	140.3	1381.8	1383.7	1.9	0.138	873.6	511.018	2704	2739	0.372	1.277	74.15	40040.00	Scher
LM70-07	68.2	139.6	1374.3	1376.1	1.8	0.131	868.8	508.213	2704	2739	0.355	1.271	64.85	41702.00	Spalt
LM70-08	68.2	139.8	1378.0	1380	2	0.145	871.5	509.415	2705	2739	0.393	1.239	81.17	40702.00	Scher
LM70-09	68.2	139.9	1379.8	1381.7	1.9	0.138	872.4	510.217	2704	2739	0.373	1.265	75.34	43551.00	Scher
LM70-10	68.2	140.3	1384.7	1386.3	1.6	0.116	875.7	511.519	2707	2739	0.313	1.167	85.14	42492.00	Scher
min	-	-	-	-	-	0.11	-	-	2704	2739	0.29	1.17	64.85	40040.00	-
max	-	-	-	-	-	0.15	-	-	2707	2739	0.39	1.29	85.14	43552.00	-
mittel	-	-	-	-	-	0.13	-	-	2705	2739	0.36	1.25	77.87	41964.88	-

Laaser Marmor	Länge [mm]	Rohdichte ρ _R [g]	Ultraschalllaufzeit												Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand)	
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.							Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.	1	2	3	Mittelwert	Geschw.				
LM70-01	140.2	2.704	t _{1,Stativ} [µs]	t _{2,Stativ} [µs]	t _{3,Stativ} [µs]	t _{mp,Stativ} [µs]	v _{W,Stativ} [km/s]	t _{1,Hand} [µs]	t _{2,Hand} [µs]	t _{3,Hand} [µs]	t _{mp,Hand} [µs]	v _{W,Hand} [km/s]	E _{stat} [GPa]	E _{dyn} [GPa]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand)	
LM70-01	140.2	2.704	39.7	39.3	40.2	39.73	3.53	40.4	36.9	39.5	38.93	3.60	28.051	29.216	1.43	
LM70-02	140.3	2.705	34.4	34.7	34.6	34.57	4.06	36.1	35.6	34.2	35.30	3.97	37.140	35.613	1.17	
LM70-03	140.2	2.704	34.5	34.7	34.4	34.53	4.06	36.4	36.0	37.6	37.33	3.76	37.137	31.775	1.14	
LM70-04	139.8	2.705	37.7	37.9	37.8	37.80	3.70	38.2	38.0	38.0	38.07	3.67	30.832	30.402	1.39	
LM70-05	141.0	2.706	36.4	36.7	36.5	36.53	3.86	38.7	40.2	37.6	38.83	3.63	33.588	29.727	1.26	
LM70-06	140.3	2.704	38.8	38.4	38.7	38.63	3.63	40.4	38.3	44.0	40.90	3.43	29.718	26.515	1.35	
LM70-07	139.6	2.704	38.7	38.2	39.3	38.73	3.60	39.0	37.5	40.8	39.10	3.57	29.272	28.726	1.42	
LM70-08	139.8	2.705	35.9	36.1	35.7	35.90	3.89	34.7	34.8	35.7	35.07	3.99	34.184	35.828	1.19	
LM70-09	139.9	2.704	35.8	35.5	36.3	35.87	3.90	38.6	36.0	39.2	37.93	3.69	34.287	30.653	1.27	
LM70-10	140.3	2.707	34.5	35.2	34.5	34.73	4.04	34.0	32.8	33.7	33.50	4.19	36.807	39.567	1.15	
min	139.60	2.70	-	-	-	34.53	3.53	-	-	-	33.50	3.43	28.05	26.52	1.14	
max	141.00	2.71	-	-	-	39.73	4.06	-	-	-	40.90	4.19	37.14	39.57	1.43	
mittel	140.14	2.70	-	-	-	36.60	3.84	-	-	-	37.57	3.73	33.23	31.49	1.27	
			Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch: 0.10 km/s												Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch: 1.74 GPa	
			Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch: 1.03												Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch: 1.06	

Laser Marmor Zusammenfassung	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m_d [g]	Feuchtmasse m_s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A_b [M%]	Masse Auftrieb m_a [g]	Volumen V_b [ml]	Rohdichte ρ_b [kg/m ³]	Reindichte ρ_r [kg/m ³]	offene Porosität P_o [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit F_d [N/mm ²]	stat. E-Modul E_d [N/mm ²]	Bruchform
min	-	-	-	-	-	0.10	-	-	2703	2739	0.26	1.17	35.42	37980.00	-
max	-	-	-	-	-	0.15	-	-	2707	2739	0.39	1.30	85.14	76408.00	-
mittel	-	-	-	-	-	0.12	-	-	2705	2739	0.33	1.25	65.37	44288.31	-

Bemerkung: Die Ergebnisse der mL20 Proben fließen aufgrund der Messverfälschung nicht in die Auswertung der Zusammenfassung ein!

Laser Marmor Zusammenfassung	Länge [mm]	Rohdichte ρ_r [g]	Ultraschallaufzeit												Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand)	
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.							Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.	1	2	3	Mittelwert	Geschw.				
min	-	2.70	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{m,Stativ}$ [µs]	$v_{k,Stativ}$ [km/s]	$t_{1,Händ}$ [µs]	$t_{2,Händ}$ [µs]	$t_{3,Händ}$ [µs]	$t_{m,Händ}$ [µs]	$v_{k,Händ}$ [km/s]	E_{stat} [GPa]	E_{dyn} [GPa]	1.09	
max	-	2.71	-	-	-	-	2.95	-	-	-	-	2.86	18.05	37.98	1.07	
mittel	-	2.70	-	-	-	-	4.21	-	-	-	-	4.19	39.57	76.41	1.99	
							3.64					3.55	28.44	44.29	1.38	
			Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch: 0.09 km/s						Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch: 1.50 GPa							
			Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch: 1.03						Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch: 1.05							

12.3.3. Rohrbacher Konglomerat

Konglomerat	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m_d [g]	Feuchtmasse m_s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A_b [M%]	Masse Auftrieb m_b [g]	Volumen V_b [ml]	Rohdichte ρ_s [kg/m³]	Reindichte ρ_r [kg/m³]	offene Porosität p_o [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R_d [N/mm²]	stat. E-Modul E_d [N/mm²]	Bruchform
Ko50-01	48.5	97.9	383.0	391.3	8.3	2.167	220.9	170.707	2244	-	4.871	-	16.02	28244.00	-
Ko50-02	48.5	96.4	405.6	412.7	7.1	1.750	246.8	166.199	2440	-	4.280	-	14.32	36273.00	-
Ko50-03	48.5	97.7	411.4	423	5.6	1.342	249.4	173.913	2400	-	3.225	-	28.42	44066.00	-
Ko50-04	48.5	98.5	432.8	436.7	3.9	0.901	262.2	174.814	2476	-	2.235	-	22.61	27607.00	-
Ko50-05	48.5	97.8	392.3	399.3	7.0	1.784	235.8	163.794	2395	-	4.281	-	19.19	26412.00	-
Ko50-06	48.5	97.7	390.8	396.9	6.1	1.561	227.5	169.705	2303	-	3.001	-	16.37	29928.00	-
Ko50-07	48.5	98.6	371.7	380.5	8.8	2.368	214.1	166.700	2230	-	5.288	-	13.57	27529.00	-
Ko50-08	48.5	97.0	389.4	396.1	6.7	1.721	228.3	168.102	2316	-	3.993	-	18.68	35904.00	-
Ko50-09	48.5	97.4	415.6	421.1	5.5	1.323	218.2	173.211	2399	-	3.181	-	27.63	25051.00	-
Ko50-10	48.5	97.3	378.7	387.1	8.4	2.218	226.1	161.290	2348	-	5.217	-	13.72	13244.00	-
min	-	-	-	-	-	0.90	-	-	2230	-	2.23	-	13.57	13244.00	-
max	-	-	-	-	-	2.37	-	-	2476	-	5.29	-	28.42	44066.00	-
mittel	-	-	-	-	-	1.73	-	-	2356	-	4.08	-	18.57	29618.50	-

Konglomerat	Länge [mm]	Rohdichte ρ_r [g]	Ultraschalllaufzeit												Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand)			
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.							Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)		
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.	$v_{m,Stativ}$ [km/s]	1	2	3	Mittelwert	Geschw.	$v_{m,Hand}$ [km/s]				
Ko50-01	97.9	2.244	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{m,Stativ}$ [µs]	$t_{1,Hand}$ [µs]	$t_{2,Hand}$ [µs]	$t_{3,Hand}$ [µs]	$t_{m,Hand}$ [µs]	$v_{m,Stativ}$ [km/s]	$v_{m,Hand}$ [km/s]	32.265	33.973	32.265	28.244	0.83	0.88
Ko50-02	96.4	2.440	22.8	23.1	23.0	22.97	4.26	23.2	23.3	24.2	23.57	4.15	4.15	46.165	42.450	36.273	0.79	0.85
Ko50-03	97.7	2.400	20.5	20.1	20.1	20.23	4.76	20.9	21.1	21.3	21.10	4.57	4.57	44.554	43.017	44.066	0.99	1.02
Ko50-04	98.5	2.476	20.6	20.9	20.6	20.70	4.72	21.1	21.0	21.1	21.07	4.64	4.64	46.716	45.535	27.607	0.59	0.61
Ko50-05	97.8	2.395	21.0	20.8	20.3	20.70	4.76	21.4	20.5	21.0	20.97	4.70	4.70	44.125	39.926	26.412	0.60	0.66
Ko50-06	97.7	2.303	21.3	20.5	20.6	20.80	4.70	22.0	21.2	22.4	21.87	4.47	4.47	41.274	39.750	29.928	0.73	0.75
Ko50-07	98.6	2.230	20.8	21.8	20.6	21.07	4.64	21.1	22.0	21.3	21.47	4.55	4.55	41.889	32.071	27.529	0.66	0.86
Ko50-08	97.0	2.316	21.2	20.6	20.5	20.77	4.75	23.9	23.7	23.6	23.73	4.15	4.15	32.519	37.641	35.904	1.10	0.95
Ko50-09	97.4	2.399	23.4	23.3	24.2	23.63	4.10	21.9	21.8	22.2	21.97	4.42	4.42	40.909	41.810	25.051	0.61	0.60
Ko50-10	97.3	2.348	21.8	21.5	21.3	21.53	4.52	21.4	21.4	21.1	21.30	4.57	4.57	40.958	38.859	13.244	0.32	0.34
min	96.40	2.23	21.7	21.0	21.1	21.27	4.58	21.7	22.0	21.8	21.83	4.46	4.46	32.07	32.07	13.244	0.32	0.34
max	98.60	2.48	-	-	-	20.23	4.10	-	-	-	20.97	4.15	4.15	46.72	45.53	44.066	1.10	1.02
mittel	97.63	2.36	-	-	-	21.23	4.62	-	-	-	21.77	4.48	4.48	39.46	39.46	29.619	0.72	0.77
			Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-/Händisch: 0.14 km/s												Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)			
			Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch: 1.03												Faktor dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch: 2.27			
															GPa			
															1.06			

Konglomerat	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m _d [g]	Feuchtmasse m _s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A _b [M%]	Masse Auftrieb m _h [g]	Volumen V _b [ml]	Rohdichte ρ _b [kg/m ³]	Reindichte ρ _r [kg/m ³]	offene Porosität p _o [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R _d [N/mm ²]	stat. E-Modul E _d [N/mm ²]	Bruchform [-]
Ko70-01	68.3	139.0	1017.4	1049.0	31.6	3.105	583.6	466.238	2182	-	6.790	-	8.02	-	-
Ko70-02	68.3	139.4	1085.1	1111.2	26.1	2.405	632.8	479.261	2264	-	5.456	-	10.61	15191.00	-
Ko70-03	68.3	140.4	1085.6	1102.7	17.1	1.575	647.5	456.019	2381	-	3.757	-	27.59	32295.00	-
Ko70-04	68.3	140.5	1058.3	1089.1	30.8	2.910	630.5	469.444	2254	-	6.573	-	12.21	24673.00	-
Ko70-05	68.3	142.0	1183.5	1206.3	22.8	1.925	710.8	496.392	2384	-	4.601	-	9.82	18385.00	-
Ko70-06	68.3	141.6	1143.1	1166.6	23.5	2.055	673.3	494.188	2313	-	4.764	-	14.29	15187.00	-
Ko70-07	68.3	141.2	1058.9	1080.1	21.2	2.002	602.0	478.961	2211	-	4.434	-	12.66	24406.00	-
Ko70-08	68.3	142.0	1199.6	1216.0	16.4	1.367	718.9	497.995	2409	-	3.299	-	11.10	32306.00	-
Ko70-09	68.3	138.9	1207.7	1220.3	12.6	1.043	755.8	485.372	2488	-	2.601	-	22.06	35057.00	-
Ko70-10	68.3	141.1	1190.0	1205.7	15.7	1.319	713.5	493.086	2413	-	3.190	-	15.41	37112.00	-
min	-	-	-	-	-	1.04	-	-	2182	-	2.60	-	8.02	18385.00	-
max	-	-	-	-	-	3.11	-	-	2488	-	6.79	-	27.59	37112.00	-
mittel	-	-	-	-	-	1.95	-	-	2329	-	4.51	-	13.52	26956.89	-

* Probekörper im ersten Lastzyklus gebrochen - keine E-Modul Messung möglich

Konglomerat	Länge [mm]	Rohdichte ρ _R [g]	Ultraschalllaufzeit												dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,25) E _{dyn} [GPa]	dyn. E-Modul händisch (μ=0,25) E _{dyn} [GPa]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ) [-]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand) [-]
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.									
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.		1	2	3	Mittelwert	Geschw.					
			t _{1,Stativ} [μs]	t _{2,Stativ} [μs]	t _{3,Stativ} [μs]	t _{m,Stativ} [μs]	v _{k,Stativ} [km/s]	t _{1,Hand} [μs]	t _{2,Hand} [μs]	t _{3,Hand} [μs]	t _{m,Hand} [μs]	v _{k,Hand} [km/s]						
Ko70-01	139.0	2.182	33.6	32.4	33.3	33.10	4.20	34.9	34.1	33.9	34.30	4.05	32.068	29.864	-	-	-	
Ko70-02	139.4	2.264	34.1	35.1	33.3	34.17	4.08	37.1	37.6	35.8	36.83	3.78	31.408	27.025	19.191	0.61	0.71	
Ko70-03	140.4	2.381	27.6	26.1	28.3	27.33	5.14	27.2	34.5	27.4	29.70	4.73	52.342	44.333	32.295	0.62	0.73	
Ko70-04	140.5	2.254	31.3	31.7	32.0	31.67	4.44	32.2	34.2	34.6	33.67	4.17	36.982	32.719	24.673	0.67	0.75	
Ko70-05	142.0	2.384	30.7	31.0	30.0	30.57	4.65	31.7	32.8	32.5	32.33	4.39	42.879	38.321	18.385	0.43	0.48	
Ko70-06	141.6	2.313	30.5	30.4	30.1	30.33	4.67	31.4	30.6	31.0	31.00	4.57	42.005	40.217	19.187	0.46	0.48	
Ko70-07	141.2	2.211	31.1	30.7	30.9	30.90	4.57	30.5	32.6	32.8	31.97	4.42	38.470	35.946	24.406	0.63	0.68	
Ko70-08	142.0	2.409	30.3	31.0	32.2	31.83	4.46	31.9	31.7	32.8	32.13	4.42	39.943	39.201	32.306	0.81	0.82	
Ko70-09	138.9	2.488	27.4	28.7	27.4	27.83	4.99	29.4	30.8	29.7	29.97	4.64	51.659	44.548	35.057	0.68	0.79	
Ko70-10	141.1	2.413	29.6	29.7	29.4	29.57	4.77	30.2	31.0	31.3	30.83	4.58	45.803	42.117	37.112	0.81	0.88	
min	138.90	2.18	-	-	-	27.33	4.08	-	-	-	29.70	3.78	31.41	27.02	18.385	0.43	0.48	
max	142.00	2.49	-	-	-	34.17	5.14	-	-	-	36.83	4.73	52.34	44.55	37.112	0.81	0.88	
mittel	140.61	2.33	-	-	-	30.73	4.59	-	-	-	32.03	4.40	41.22	37.84	26.957	0.63	0.70	
							0.19	km/s							3.38	GPa		
							1.04								1.09			

Konglomerat Zusammenfassung	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m_d [g]	Feuchtmasse m_s [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A_b [M%]	Masse Auftrieb m_a [g]	Volumen V_b [ml]	Rohdichte ρ_b [kg/m ³]	Reindichte ρ_r [kg/m ³]	offene Porosität P_o [%]	Gesamtporosität p [%]	einaxiale Druckfestigkeit R_d [N/mm ²]	stat. E-Modul E_d [N/mm ²]	Bruchform
min	-	-	-	-	-	0.90	-	-	2182	-	2.23	-	8.02	9398.00	-
max	-	-	-	-	-	4.39	-	-	2488	-	9.70	-	29.09	44066.00	-
mittel	-	-	-	-	-	1.99	-	-	2325	-	4.61	-	16.94	24883.24	-

Konglomerat Zusammenfassung	Länge [mm]	Rohdichte ρ_r [g]	Ultraschalllaufzeit												dyn. E-Modul Druckluftstativ ($\mu=0,25$) E_{dyn} [GPa]	dyn. E-Modul stat. E-Modul ft. EN 14580 E_{stat} [GPa]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ) [-]	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Hand) [-]
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.									
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.	1	2	3	Mittelwert	Geschw.						
min	-	2.18	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{m,Stativ}$ [µs]	$v_{L,Stativ}$ [km/s]	$t_{1,Hand}$ [µs]	$t_{2,Hand}$ [µs]	$t_{3,Hand}$ [µs]	$t_{m,Hand}$ [µs]	$v_{L,Hand}$ [km/s]	27.54	26.20	9.40	0.32	0.34	
max	-	2.49	-	-	-	-	3.85	-	-	-	-	-	52.34	45.53	44.07	1.10	1.02	
mittel	-	2.33	-	-	-	-	4.47	-	-	-	-	-	38.88	36.71	24.88	0.62	0.67	
			Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch:						Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:						2.17		GPa	
			Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch:						Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch:						1.06			

12.3.4. Leithalkalk aus Kaisersteinbruch

Leithalkalk aus Kaisersteinbruch Block Nr	Ø [mm]	Länge [mm]	Länge		Trockenmasse m _d [g]	Feuchtmasse m _f [g]	Wasser-aufnahme w [g]	massebezogene Wasser-aufnahme A _b [M%]	Messe-Auftrieb m _h [g]	Volumen V _b [ml]	Rohdichte ρ _R [kg/m ³]	Reindichte ρ _r [kg/m ³]	offene Porosität		einaxiale Druckfestigkeit R ₀ [N/mm ²]	stat. E-Modul Ed [N/mm ²]	Brudform
			m _d [g]	m _f [g]									p _o [%]	p [%]			
KS50-01	IV	500	100.7	424.5	446.0	252.3	5.06	194.05	2188	2518	11.100	15.122	21.21	34154.00	Spalt		
KS50-02	IV	500	101.1	480.0	487.6	290.7	158	197.25	2433	2558	3.860	4.871	54.33	46768.00	Spalt		
KS50-03	IV	500	100.5	437.4	455.4	261.6	4.12	194.15	2253	2518	9.288	10.528	57.08	36593.00	Spalt		
KS50-04	IV	500	100.1	464.2	473.9	279.4	2.09	194.85	2382	2558	4.387	6.867	44.38	43989.00	Spalt		
KS50-05	IV	500	101.3	414.9	442.9	249.3	6.75	193.95	2139	2518	14.463	15.043	22.41	29166.00	Spalt		
KS50-06	IV	500	101.2	492.5	497.8	300.8	1.08	197.35	2496	2558	2.390	2.443	37.81	44987.00	Spalt		
KS50-07	IV	500	101.0	423.3	445.9	252.3	5.34	193.95	2183	2518	11.674	11.323	22.79	29650.00	Spalt		
KS50-08	IV	500	100.9	431.5	453.3	259.2	4.33	191.45	2235	2518	9.586	11.258	28.10	44422.00	Spalt		
KS50-09	IV	500	99.5	474.5	481.8	287.1	1.54	195.05	2413	2558	3.749	4.898	41.09	42391.00	Spalt		
KS50-10	IV	500	100.3	462.6	473.8	278.4	2.42	195.75	2363	2518	5.732	6.148	26.15	35911.00	Spalt		
min	-	-	-	-	-	-	1.08	-	2139	2518	2.69	2.44	21.21	29166.00	-		
max	-	-	-	-	-	-	6.75	-	2496	2558	14.46	15.04	54.33	46768.00	-		
mittel	-	-	-	-	-	-	3.31	-	2309	2533	7.51	8.88	32.59	39014.53	-		

Leithalkalk aus Kaisersteinbruch Block Nr	Länge [mm]	Rohdichte ρ _R [g]	Ultraschalllaufzeit												Faktor stat. / dyn. E-Modul (stativ)	Faktor stat. / dyn. E-Modul (hand)		
			Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.								stat. E-Modul lt. EN 14580 E _{stat} [GPa]	dyn. E-Modul händisch (μ=0,25) E _{dyn} [GPa]
			1	2	3	Mittelwert	Geschw.	W _{dyn} [km/s]	1	2	3	Mittelwert	Geschw.	W _{dyn} [km/s]				
KS50-01	IV	100.7	2.188	24.6	24.5	24.7	24.60	4.00	25.0	24.8	24.0	24.00	4.04	20.816	34.154	1.12	1.15	
KS50-02	IV	101.1	2.433	23.1	23.1	23.1	23.10	4.38	25.1	23.0	23.3	23.13	4.37	38.343	46.768	1.20	1.21	
KS50-03	IV	100.6	2.253	24.0	24.0	24.1	24.03	4.19	24.2	24.1	24.1	24.13	4.17	32.395	36.593	1.11	1.12	
KS50-04	IV	100.1	2.382	22.9	22.8	22.9	22.87	4.38	25.1	23.1	23.0	23.07	4.34	38.044	43.989	1.16	1.18	
KS50-05	IV	101.8	2.139	26.4	26.5	26.4	26.43	3.85	26.7	26.8	26.8	26.77	3.80	26.440	25.166	1.10	1.13	
KS50-06	IV	101.2	2.496	22.9	22.8	22.9	22.87	4.43	23.0	23.1	22.9	23.00	4.40	40.732	44.987	1.10	1.12	
KS50-07	IV	101.0	2.183	25.4	25.4	25.4	25.40	3.98	25.7	25.5	25.7	25.63	3.94	28.758	26.650	1.03	1.05	
KS50-08	IV	100.9	2.235	24.3	24.5	24.2	24.33	4.15	24.6	24.4	24.5	24.50	4.12	32.017	44.442	1.39	1.41	
KS50-09	IV	99.9	2.433	22.8	23.0	22.9	22.90	4.36	25.1	23.0	23.0	23.03	4.34	38.381	41.391	1.10	1.11	
KS50-10	IV	100.8	2.363	23.3	23.3	23.3	23.30	4.33	25.5	23.4	23.6	23.50	4.29	36.358	35.911	0.97	0.99	
min	-	99.90	2.14	-	-	-	22.87	3.85	-	-	-	23.00	3.80	26.44	25.166	0.97	0.99	
max	-	101.80	2.50	-	-	-	26.43	4.43	-	-	-	26.77	4.40	40.73	46.768	1.39	1.41	
mittel	-	100.81	2.31	-	-	-	23.82	4.23	-	-	-	23.99	4.20	34.57	35.015	1.12	1.13	
Mittlere Geschwindigkeitsdiff. Stativ-Händisch:												0.47		GPa				
Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:												1.01						
Mittlere stat. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:																		
Mittlere stat. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:																		

12. Anhang

Leithalk aus Kaiser steinbruch	Block Nr.	Ø [mm]	Länge [mm]	Trockenmasse m _d [g]	Feuchtmasse m _s [g]	Wasser- aufnahme w [g]	massebezogene Wasser- aufnahme A _s [M%]	Masse Auftrieb m _a [g]	Volumen V _b [ml]	Rohdichte ρ _b [kg/m ³]	Reindichte ρ _r [kg/m ³]	offene Porosität p _p [%]	Gesamtporosität p [%]	erhobene Druckfestigkeit R _d [N/mm ²]	stat. E-Modul Ed [N/mm ²]	Bruchform
KS100-01	II	103.0	204.5	4127.0	4256.0	119.0	3.13	2375.0	1664.03	2451	2498	7.674	1.895	62.12	28160.00	Spalt
KS100-02	I	103.0	204.5	4069.0	4132.0	63.0	1.55	2458.0	1677.01	2426	2562	3.763	5.295	57.90	45545.00	Misch
KS100-03	I	103.0	240.5	4043.0	4105.0	62.0	1.53	2416.0	1692.04	2389	2562	3.671	5.736	48.84	48332.00	Spalt
KS100-04	III	103.0	204.5	3698.0	3974.0	276.0	6.11	2731.0	1666.05	2780	2542	13.346	14.275	31.70	15563.00	Misch
KS100-05	I	103.0	204.5	4101.0	4165.0	64.0	1.56	2483.0	1685.03	2494	2562	3.805	5.001	58.32	27145.00	Misch
KS100-06	III	103.0	204.0	3710.0	3929.0	219.0	5.90	2244.0	1668.00	2198	2242	12.997	10.240	31.01	10875.00	Scher
KS100-07	III	103.0	204.5	3645.0	3875.0	230.0	6.31	2187.0	1691.04	2155	2542	13.626	15.203	27.27	21146.00	Scher
KS100-08	III	103.0	204.0	3681.0	3906.0	225.0	6.11	2220.0	1689.04	2179	2542	13.345	14.265	31.98	17642.00	Spalt
KS100-09	I	103.0	204.5	4014.0	4079.0	65.0	1.62	2387.0	1695.05	2368	2562	3.842	7.569	54.85	30626.00	Spalt
KS100-10	III	103.0	204.0	3664.0	3893.0	229.0	6.25	2204.0	1692.04	2165	2542	13.558	14.814	25.30	19171.00	Scher
min	-	-	-	-	-	-	1.53	-	-	2155	2498	3.67	1.89	25.30	13562.00	-
max	-	-	-	-	-	-	6.31	-	-	2451	2562	13.63	15.21	62.12	48332.00	-
mittel	-	-	-	-	-	-	4.03	-	-	2193	2550	9.04	10.18	42.73	26663.75	-

Leithalk aus Kaiser- steinbruch	Block Nr.	Länge [mm]	Rohdichte ρ _b [g]	Ultraschalllaufzeit												Faktor stat. / dyn. E- Modul (Stativ) [-]	Faktor stat. / dyn. E- Modul (Hand) [-]			
				Druckluftstativ, Versuch Nr.						Händisch, Versuch Nr.								dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,75) E _{dyn} [GPa]	dyn. E-Modul händisch (μ=0,75) E _{dyn} [GPa]	stat. E-Modul lt. EN 14580 (Stativ) E _{stat} [GPa]
				1	2	3	Mittelwert	Geschw.	1	2	3	Mittelwert	Geschw.							
KS100-01	II	204.5	2.451	t _{1,2000} [μs]	t _{2,2000} [μs]	t _{3,2000} [μs]	t _{1,2000} [μs]	t _{2,2000} [μs]	t _{3,2000} [μs]	t _{1,hand} [μs]	t _{2,hand} [μs]	t _{3,hand} [μs]	t _{1,hand} [μs]	t _{2,hand} [μs]	t _{3,hand} [μs]	48.493	48.803	28.160	0.58	0.58
KS100-02	I	204.5	2.426	42.0	42.1	41.8	41.97	41.97	41.8	42.1	42.0	41.4	41.83	41.83	41.83	43.479	44.010	45.545	1.05	1.03
KS100-03	I	240.5	2.389	44.2	44.3	43.8	44.10	44.10	43.8	44.2	44.2	45.0	43.83	43.83	43.83	61.618	60.309	48.332	0.78	0.80
KS100-04	III	204.5	2.180	43.4	43.3	43.0	43.23	43.23	43.0	44.1	43.4	43.6	43.70	43.70	43.70	25.089	26.747	13.562	0.54	0.51
KS100-05	I	204.5	2.434	56.2	56.8	55.1	55.03	55.03	55.1	54.0	49.4	56.5	56.30	56.30	56.30	46.447	46.519	37.145	0.80	0.80
KS100-06	III	204.0	2.198	42.8	42.5	42.9	42.73	42.73	42.9	42.3	42.2	43.6	42.70	42.70	42.70	19.659	20.109	13.875	0.71	0.69
KS100-07	III	204.5	2.155	66.2	60.2	60.4	62.27	62.27	60.4	57.9	64.4	62.4	61.57	61.57	61.57	23.755	23.532	21.146	0.89	0.90
KS100-08	III	204.0	2.179	57.2	57.0	54.5	56.23	56.23	54.5	57.2	56.6	55.7	55.50	55.50	55.50	22.571	20.378	17.642	0.78	0.87
KS100-09	I	204.5	2.368	59.1	58.9	55.6	57.87	57.87	55.6	60.8	59.1	62.8	60.90	60.90	60.90	43.215	41.365	30.626	0.71	0.74
KS100-10	III	204.0	2.165	44.5	44.2	42.4	43.70	43.70	42.4	47.4	42.9	43.7	44.67	44.67	44.67	24.795	22.926	19.171	0.77	0.84
min	-	204.00	2.16	-	-	-	41.97	41.97	41.97	-	-	-	41.83	41.83	41.83	19.66	20.11	13.562	0.54	0.51
max	-	240.50	2.45	-	-	-	62.27	62.27	62.27	-	-	-	61.57	61.57	61.57	61.62	60.31	48.332	1.05	1.03
mittel	-	207.95	2.29	-	-	-	49.74	49.74	49.74	-	-	-	50.35	50.35	50.35	34.73	34.29	26.664	0.75	0.78
Mittlere Geschwindigkeitsdf. Stativ-Händisch:												Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:		GPa						
Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch:												Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch:		1.01						
Mittlere Geschwindigkeitsdf. Stativ-Händisch:												Mittlere dyn. E-Modul Abweichung Stativ-Händisch:		0.45						
Faktor mittlere Geschwindigkeit Stativ/Händisch:												Faktor dyn. E-Modul Stativ-Händisch:		1.01						

12.4 Tabellen Gesteinskennwerte Versuchsreihe 2

12.4.1. Sterzinger Marmor

Sterzinger Marmor	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,25)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
	[mm]	[mm]	ρ _b [kg/m³]	1	2	3	Mittelwert	Geschw.	E _{dyn} [GPa]	E _{st} [N/mm²]	[-]	Rd [N/mm²]	[-]
M50-21	50.1	100.0	2704	t _{1,Stativ} [μs]	t _{2,Stativ} [μs]	t _{3,Stativ} [μs]	t _{m,Stativ} [μs]	v _{h,Stativ} [km/s]	36.74	48.21	1.31	31.30	Spalt
M50-22	50.1	100.5	2704	24.5	24.7	25.1	24.77	4.04	33.93	51.30	1.51	35.43	Spalt
M50-23	50.1	99.9	2704	26.1	25.9	25.7	25.90	3.88	33.87	43.10	1.27	35.55	Spalt
M50-24	50.1	101.1	2704	25.8	25.7	25.8	25.77	3.88	30.31	34.04	1.12	45.28	Spalt
M50-25	50.1	100.8	2704	27.6	27.5	27.6	27.57	3.67	34.31	43.51	1.27	39.45	Spalt
M50-26	50.1	101.5	2704	26.2	25.5	25.8	25.83	3.90	31.92	35.95	1.13	43.30	Spalt
min	-	-	2704	-	-	-	24.77	3.67	30.31	34.04	1.12	31.30	-
max	-	-	2704	-	-	-	27.57	4.04	36.74	51.30	1.51	45.28	-
mittel	-	-	2704	-	-	-	26.13	3.85	33.51	42.69	1.27	38.39	-

Sterzinger Marmor	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,25)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
	[mm]	[mm]	ρ _b [kg/m³]	1	2	3	Mittelwert	Geschw.	E _{dyn} [GPa]	E _{st} [N/mm²]	[-]	Rd [N/mm²]	[-]
M100-21	103.0	199.5	2704	t _{1,Stativ} [μs]	t _{2,Stativ} [μs]	t _{3,Stativ} [μs]	t _{m,Stativ} [μs]	v _{h,Stativ} [km/s]	37.00	21.00	0.57	66.53	Scher
M100-22	103.0	202.0	2704	49.2	49.0	49.5	49.23	4.05	37.42	20.85	0.56	64.92	Misch
M100-23	103.0	200.0	2704	49.1	49.7	49.9	49.57	4.08	35.72	21.24	0.59	55.05	Spalt
min	-	-	2704	-	-	-	49.23	3.98	35.72	20.85	0.56	55.05	-
max	-	-	2704	-	-	-	50.23	4.08	37.42	21.24	0.59	66.53	-
mittel	-	-	2704	-	-	-	49.68	4.04	36.71	21.03	0.57	62.17	-

12.4.2. Laser Marmor

Laser Marmor	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,25)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
	[mm]	[mm]	ρ _b [kg/m³]	1	2	3	Mittelwert	Geschw.	E _{dyn} [GPa]	E _{st} [N/mm²]	[-]	Rd [N/mm²]	[-]
LM50-21	50.1	99.2	2705	t _{1,Stativ} [μs]	t _{2,Stativ} [μs]	t _{3,Stativ} [μs]	t _{m,Stativ} [μs]	v _{h,Stativ} [km/s]	23.64	31.76	1.34	32.06	Spalt
LM50-22	50.1	101.2	2705	33.6	24.8	33.5	30.63	3.24	15.39	49.47	3.21	45.78	Spalt
LM50-23	50.1	99.8	2705	39.0	37.6	39.6	38.73	2.61	17.32	44.37	2.56	60.18	Spalt
LM50-24	50.1	99.7	2705	35.7	34.9	37.4	36.00	2.77	18.61	30.62	1.65	48.26	Spalt
LM50-25	50.1	99.5	2705	35.0	35.7	33.4	34.70	2.87	38.32	54.65	1.43	57.77	Spalt
min	-	-	2705	-	-	-	24.13	2.61	15.39	30.62	1.34	32.06	-
max	-	-	2705	-	-	-	38.73	4.12	38.32	54.65	3.21	60.18	-
mittel	-	-	2705	-	-	-	32.84	3.12	22.66	42.17	2.04	48.81	-

Laser Marmor	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,25)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
	[mm]	[mm]	ρ _b [kg/m³]	1	2	3	Mittelwert	Geschw.	E _{dyn} [GPa]	E _{st} [N/mm²]	[-]	Rd [N/mm²]	[-]
LM70-21	68.3	140.3	2705	t _{1,Stativ} [μs]	t _{2,Stativ} [μs]	t _{3,Stativ} [μs]	t _{m,Stativ} [μs]	v _{h,Stativ} [km/s]	18.31	42.37	2.31	62.23	Spalt
LM70-22	68.3	140.6	2705	49.2	49.0	49.5	49.23	2.85	18.14	44.41	2.45	53.61	Spalt
LM70-23	68.3	140.4	2705	49.1	49.7	49.9	49.57	2.84	17.61	42.64	2.42	54.38	Spalt
min	-	-	2705	-	-	-	49.23	2.79	17.61	42.37	2.31	53.61	-
max	-	-	2705	-	-	-	50.23	2.85	18.31	44.41	2.45	62.23	-
mittel	-	-	2705	-	-	-	49.68	2.83	18.02	43.14	2.39	56.74	-

12.4.3. Rohrbacher Konglomerat

Rohrbacher Konglomerat	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,25)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
				1	2	3	Mittelwert	Geschw.					
[mm]	[mm]	ρ _b [kg/m ³]	t _{1,Stativ} [μs]	t _{2,Stativ} [μs]	t _{3,Stativ} [μs]	t _{m,Stativ} [μs]	V _{k,Stativ} [km/s]	E _{dyn} [GPa]	E _g [N/mm ²]	[-]	Rd [N/mm ²]	[-]	
Ko50-21	50.1	99.4	2325	19.4	19.6	19.4	19.47	5.11	50.52	43.64	0.86	22.85	Spalt + Gefüge
Ko50-22	50.1	99.1	2325	19.8	19.3	19.7	19.60	5.06	49.53	53.84	1.09	24.41	Spalt + Gefüge
Ko50-23	50.1	98.4	2325	19.8	20.1	20.4	20.10	4.90	46.43	47.06	1.01	24.03	Spalt + Gefüge
Ko50-24	50.1	98.2	2325	20.5	20.4	20.0	20.30	4.84	45.34	38.13	0.84	17.22	Spalt + Gefüge
Ko50-25	50.1	98.6	2325	18.5	18.3	18.8	18.53	5.32	54.84	47.46	0.87	31.65	Spalt + Gefüge
Ko50-26	50.1	99.1	2325	18.8	19.2	18.8	18.93	5.23	53.08	35.58	0.67	20.18	Spalt + Gefüge
min	-	-	2325	-	-	-	18.53	4.84	45.34	35.58	0.67	17.22	-
max	-	-	2325	-	-	-	20.30	5.32	54.84	53.84	1.09	31.65	-
mittel	-	-	2325	-	-	-	19.49	5.07	49.96	44.28	0.89	23.39	-

Rohrbacher Konglomerat	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,25)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
				1	2	3	Mittelwert	Geschw.					
[mm]	[mm]	ρ _b [kg/m ³]	t _{1,Stativ} [μs]	t _{2,Stativ} [μs]	t _{3,Stativ} [μs]	t _{m,Stativ} [μs]	V _{k,Stativ} [km/s]	E _{dyn} [GPa]	E _g [N/mm ²]	[-]	Rd [N/mm ²]	[-]	
Ko100-21	103.0	200.5	2325	46.8	48.3	49.2	48.10	4.17	33.67	8.29	0.25	9.86	Spalt+Gefüge
Ko100-22	103.0	203.0	2325	42.0	41.2	42.1	41.77	4.86	45.77	18.78	0.41	15.88	Spalt+Gefüge
Ko100-23	103.0	201.0	2325	44.9	45.4	42.3	44.20	4.55	40.07	10.78	0.27	26.09	Spalt+Gefüge
Ko100-24	103.0	200.0	2325	45.6	44.3	42.6	44.17	4.53	39.73	16.67	0.42	22.02	Spalt+Gefüge
Ko100-25	103.0	201.0	2325	41.2	39.7	41.4	40.77	4.93	47.10	9.02	0.19	25.87	Spalt+Gefüge
min	-	-	2325	-	-	-	40.77	4.17	33.67	8.29	0.19	9.86	-
max	-	-	2325	-	-	-	48.10	4.93	47.10	18.78	0.42	26.09	-
mittel	-	-	2325	-	-	-	43.80	4.61	41.27	12.71	0.31	19.94	-

12.4.4. Leithakalk aus Kaisersteinbruch

Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V (ohne Beilagen)	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,25)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
				1	2	3	Mittelwert	Geschw.					
[mm]	[mm]	ρ _b [kg/m ³]	t _{1,Stativ} [μs]	t _{2,Stativ} [μs]	t _{3,Stativ} [μs]	t _{m,Stativ} [μs]	V _{k,Stativ} [km/s]	E _{dyn} [GPa]	E _g [N/mm ²]	[-]	Rd [N/mm ²]	[-]	
KSS0-21	50.1	100.0	2402	20.5	20.5	20.4	20.47	4.89	47.79	44.89	0.94	27.98	Spalt
KSS0-22	50.1	99.0	2402	19.8	19.9	19.9	19.87	4.98	49.71	54.37	1.09	44.94	Spalt
KSS0-23	50.1	100.2	2402	20.7	20.6	20.7	20.67	4.85	47.05	42.75	0.91	43.70	Spalt
KSS0-24	50.1	100.1	2402	20.1	20.1	20.1	20.10	4.98	49.64	46.80	0.94	35.90	Spalt
KSS0-25	50.1	100.6	2402	20.7	20.5	20.4	20.53	4.90	48.05	45.71	0.95	52.32	Spalt
KSS0-26	50.1	99.9	2402	20.3	20.4	20.3	20.33	4.91	48.32	46.86	0.97	57.43	Spalt
min	-	-	2402	-	-	-	19.87	4.85	47.05	42.75	0.91	27.98	-
max	-	-	2402	-	-	-	20.67	4.98	49.71	54.37	1.09	57.43	-
mittel	-	-	2402	-	-	-	20.33	4.92	48.43	46.86	0.97	43.71	-

Leithakalk aus Kaisersteinbruch Block V (mit Beilagen)	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ (μ=0,25)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
				1	2	3	Mittelwert	Geschw.					
[mm]	[mm]	ρ _b [kg/m ³]	t _{1,Stativ} [μs]	t _{2,Stativ} [μs]	t _{3,Stativ} [μs]	t _{m,Stativ} [μs]	V _{k,Stativ} [km/s]	E _{dyn} [GPa]	E _g [N/mm ²]	[-]	Rd [N/mm ²]	[-]	
KSS0-27	50.1	100.0	2402	20.3	20.2	20.3	20.27	4.93	48.73	43.38	0.89	46.84	Spalt
KSS0-28	50.1	101.8	2402	20.8	20.7	20.8	20.77	4.90	48.10	49.37	1.03	35.67	Spalt
KSS0-29	50.1	99.7	2402	20.5	20.3	20.4	20.40	4.89	47.81	43.63	0.91	49.00	Spalt
KSS0-30	50.1	99.7	2402	20.3	20.4	20.3	20.33	4.90	48.12	42.43	0.88	34.59	Spalt
KSS0-31	50.1	100.4	2402	20.6	20.5	20.5	20.53	4.89	47.86	48.50	1.01	26.46	Spalt
KSS0-32	50.1	100.2	2402	20.5	20.4	20.5	20.47	4.90	47.98	48.01	1.00	57.06	Spalt
min	-	-	2402	-	-	-	20.27	4.89	47.81	42.43	0.88	26.46	-
max	-	-	2402	-	-	-	20.77	4.93	48.73	49.37	1.03	57.06	-
mittel	-	-	2402	-	-	-	20.46	4.90	48.10	45.89	0.95	41.60	-

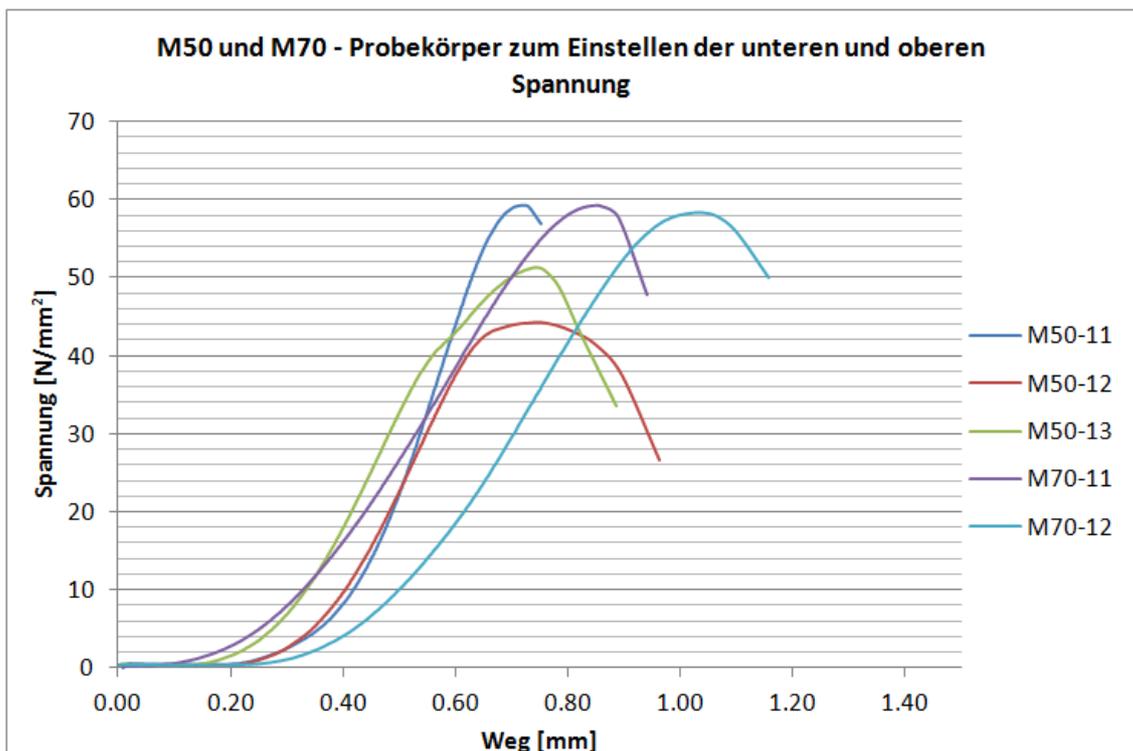
12. Anhang

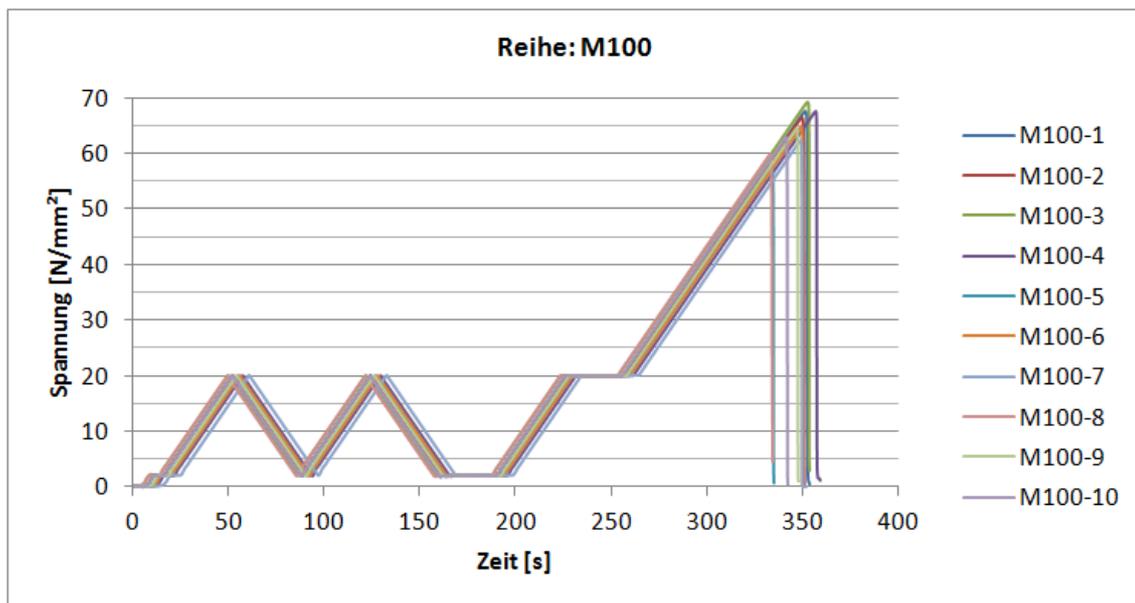
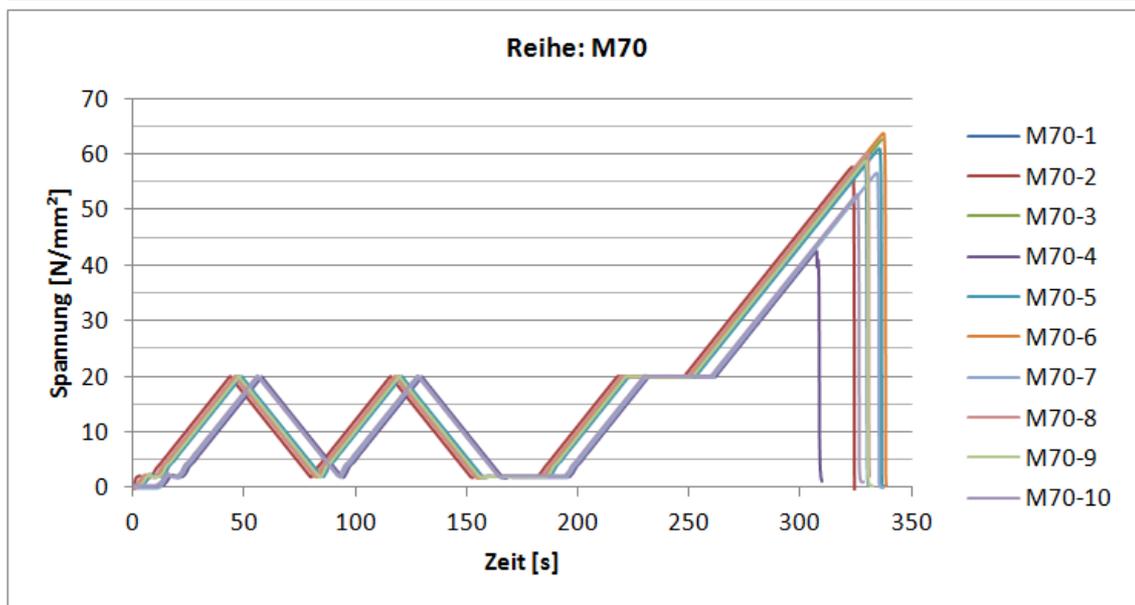
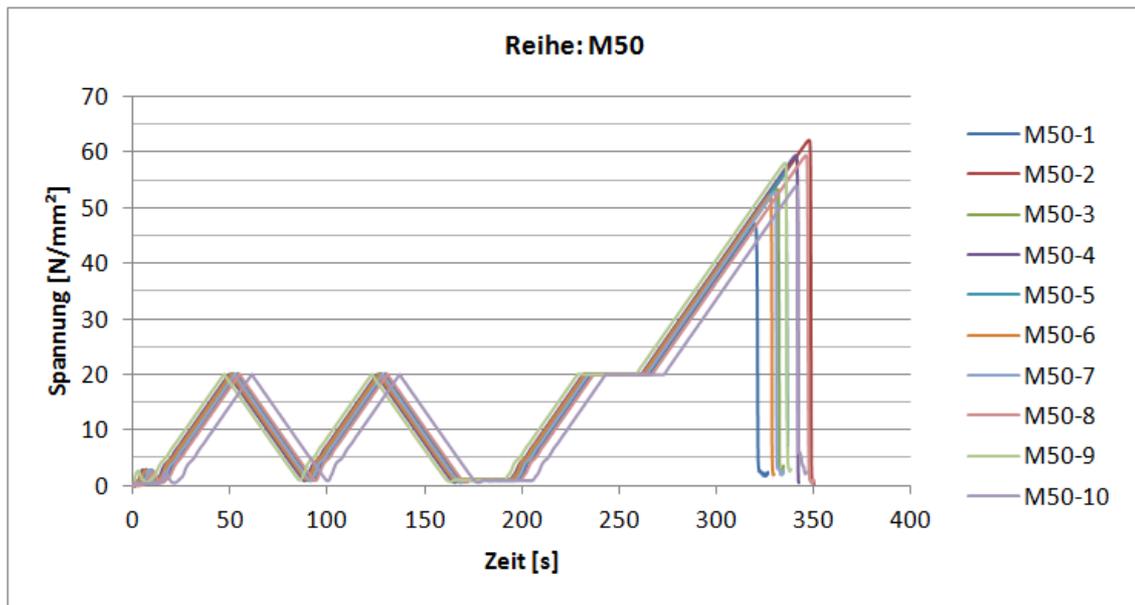
Leithalk aus Kaisersteinbruch Block V (ohne Beilagen)	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ ($\mu=0,25$)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
				1	2	3	Mittelwert	Geschw.					
	[mm]	[mm]	ρ_b [kg/m ³]	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{m,Stativ}$ [µs]	$v_{b,Stativ}$ [km/s]	E_{dyn} [GPa]	E_d [N/mm ²]	[-]	Rd [N/mm ²]	[-]
KS70-21	68.3	139.1	2402	28.6	28.7	28.6	28.63	4.86	47.24	31.87	0.67	32.72	Spalt
KS70-22	68.3	141.7	2402	28.5	28.5	28.4	28.47	4.98	49.60	-*	-*	31.45	Spalt
KS70-23	68.3	140.5	2402	28.0	28.0	28.1	28.03	5.01	50.28	35.33	0.70	48.77	Spalt
KS70-24	68.3	139.0	2402	28.8	28.5	28.9	28.73	4.84	46.84	34.98	0.75	43.30	Spalt
KS70-25	68.3	140.7	2402	28.5	28.4	28.6	28.50	4.94	48.79	37.07	0.76	38.82	Spalt
KS70-26	68.3	138.2	2402	27.8	27.9	27.8	27.83	4.97	49.35	40.51	0.82	41.06	Spalt
min	-	-	2402	-	-	-	27.83	4.84	46.84	31.87	0.67	31.45	-
max	-	-	2402	-	-	-	28.73	5.01	50.28	40.51	0.82	48.77	-
mittel	-	-	2402	-	-	-	28.37	4.93	48.68	35.95	0.74	39.35	-
*) Fehlerhafte Messung													

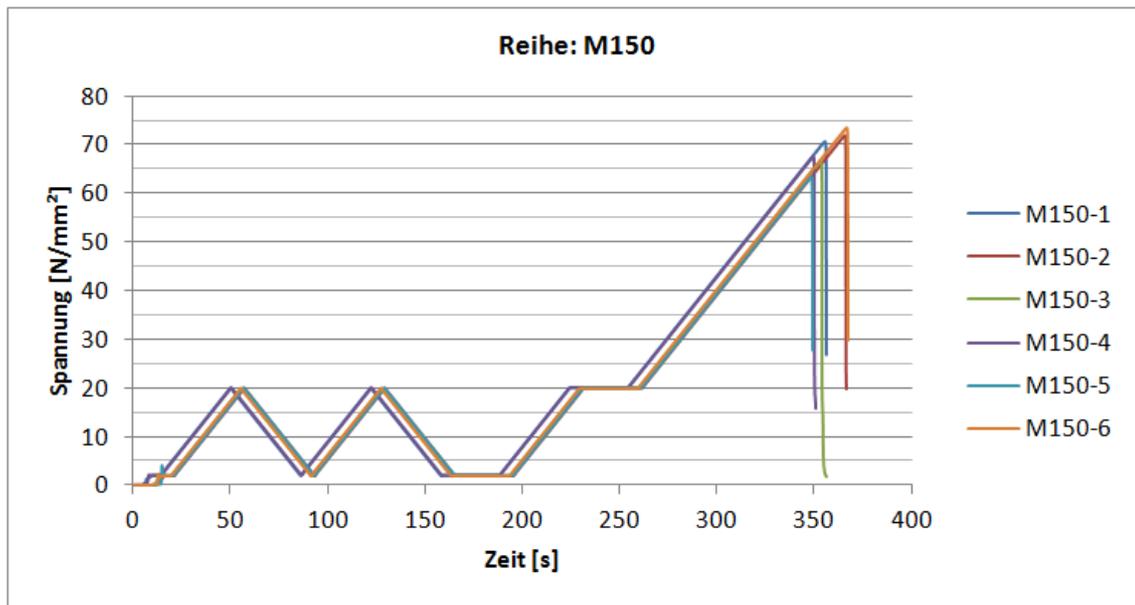
Leithalk aus Kaisersteinbruch Block V (mit Beilagen)	Ø	Länge	Rohdichte gemittelt	Ultraschalllaufzeit					dyn. E-Modul Druckluftstativ ($\mu=0,25$)	stat. E-Modul	Faktor stat. / dyn. E-Modul (Stativ)	einaxiale Druckfestigkeit	Bruchform
				Druckluftstativ, Versuch Nr.									
				1	2	3	Mittelwert	Geschw.					
	[mm]	[mm]	ρ_b [kg/m ³]	$t_{1,Stativ}$ [µs]	$t_{2,Stativ}$ [µs]	$t_{3,Stativ}$ [µs]	$t_{m,Stativ}$ [µs]	$v_{b,Stativ}$ [km/s]	E_{dyn} [GPa]	E_d [N/mm ²]	[-]	Rd [N/mm ²]	[-]
KS70-27	68.3	140.2	2402	28.8	29.0	28.5	28.77	4.87	47.55	17.64	0.37	26.30	Spalt
KS70-28	68.3	141.1	2402	28.6	28.6	28.7	28.65	4.93	48.56	-*	-*	16.01	Spalt
KS70-29	68.3	139.0	2402	28.3	28.4	28.3	28.33	4.91	48.18	35.37	0.73	35.88	Spalt
KS70-30	68.3	139.9	2402	28.2	28.6	28.0	28.27	4.95	49.03	36.71	0.75	50.92	Spalt
KS70-31	68.3	140.3	2402	28.5	28.4	28.7	28.53	4.92	48.40	12.60	0.26	22.83	Spalt
KS70-32	68.3	139.6	2402	27.7	28.0	27.9	27.87	5.01	50.23	32.56	0.65	38.27	Spalt
min	-	-	2402	-	-	-	27.87	4.87	47.55	12.60	0.26	16.01	-
max	-	-	2402	-	-	-	28.77	5.01	50.23	36.71	0.75	50.92	-
mittel	-	-	2402	-	-	-	28.40	4.93	48.66	26.98	0.55	31.70	-
*) Fehlerhafte Messung													

12.5 Auswertung Druckversuche Versuchsreihe 1

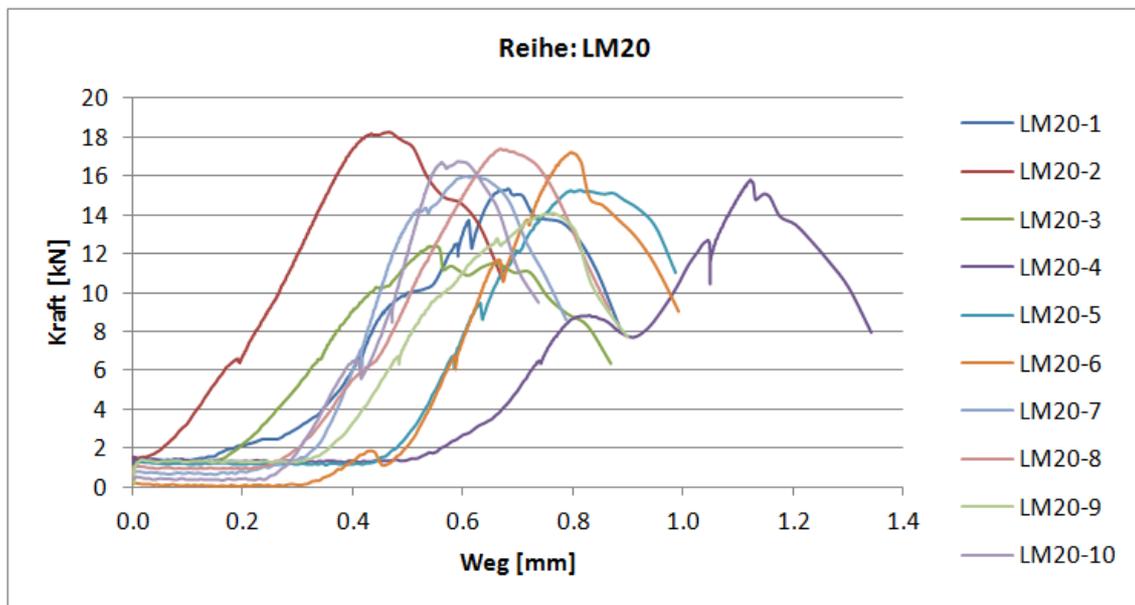
12.5.1. Sterzinger Marmor

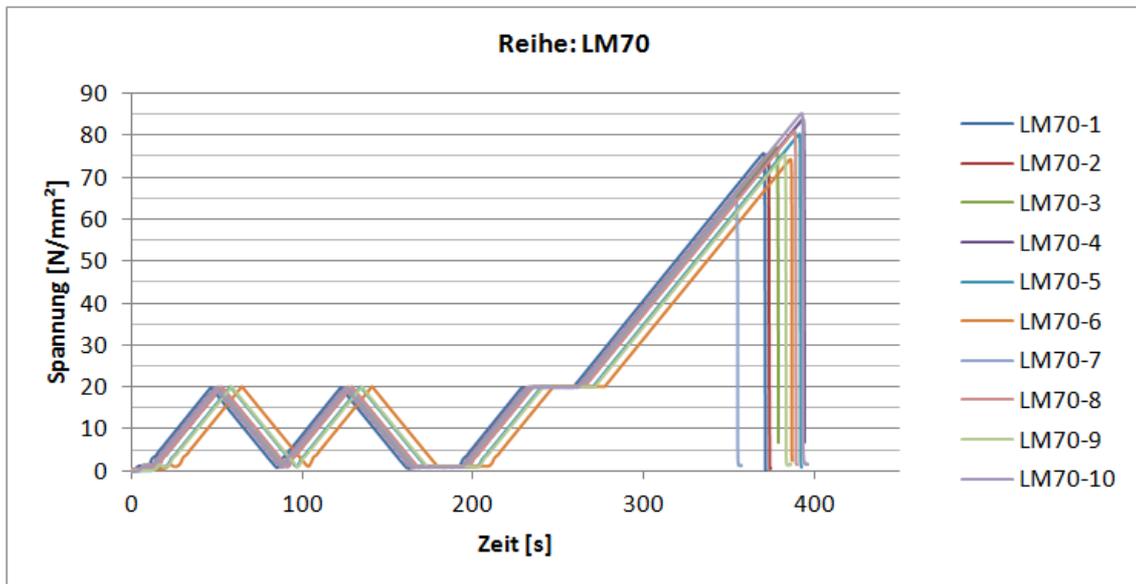
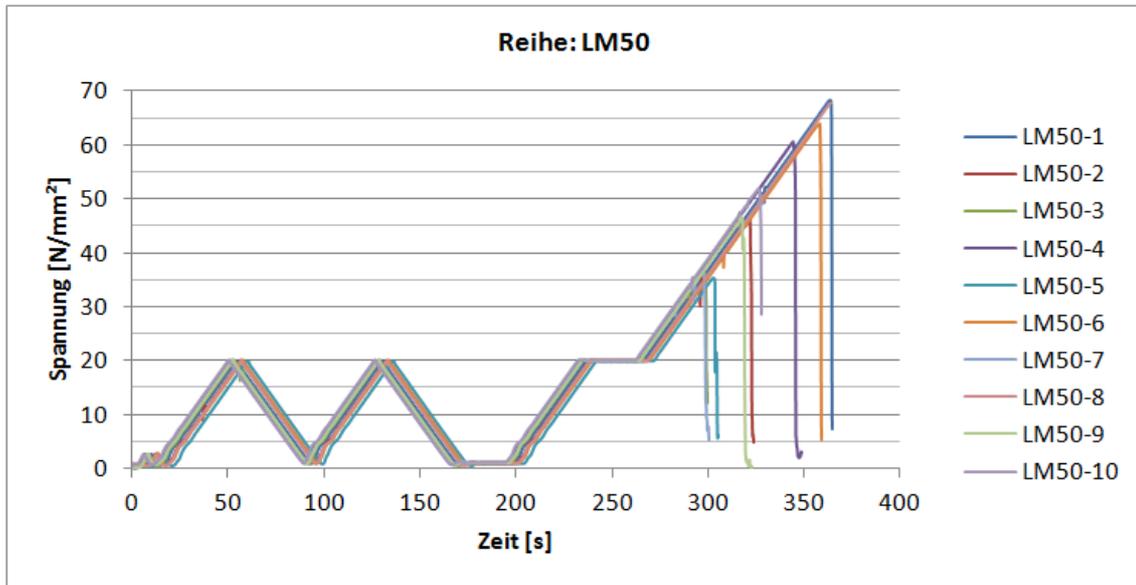




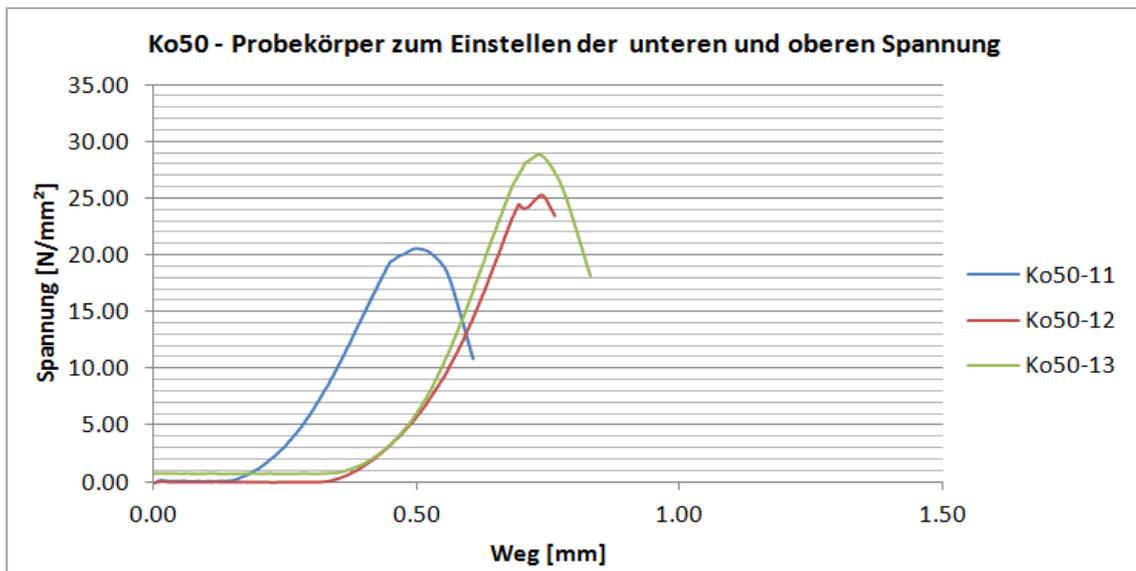


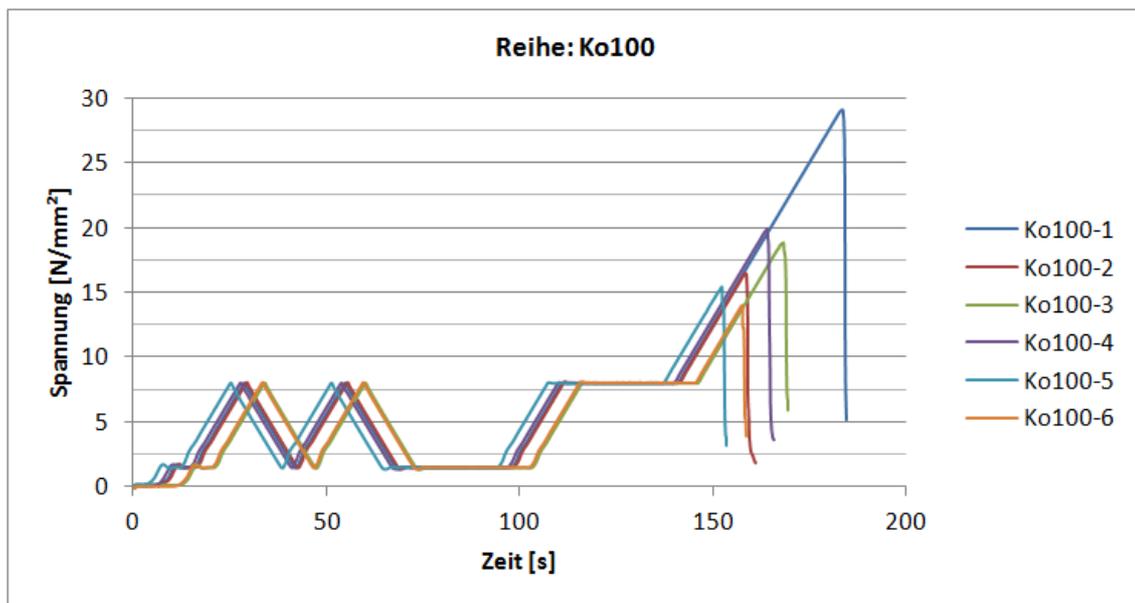
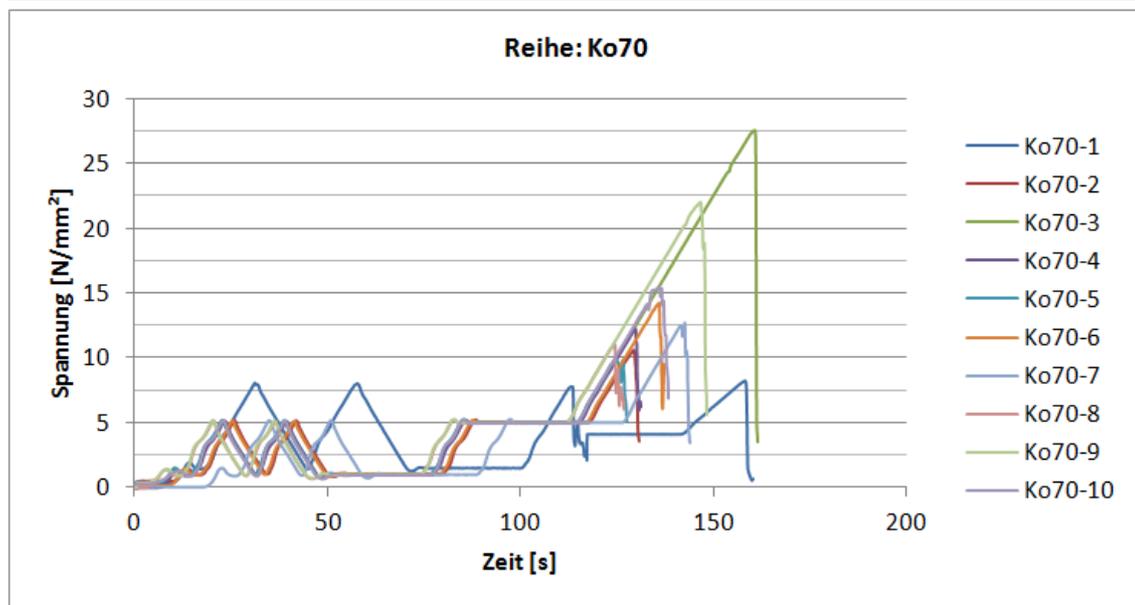
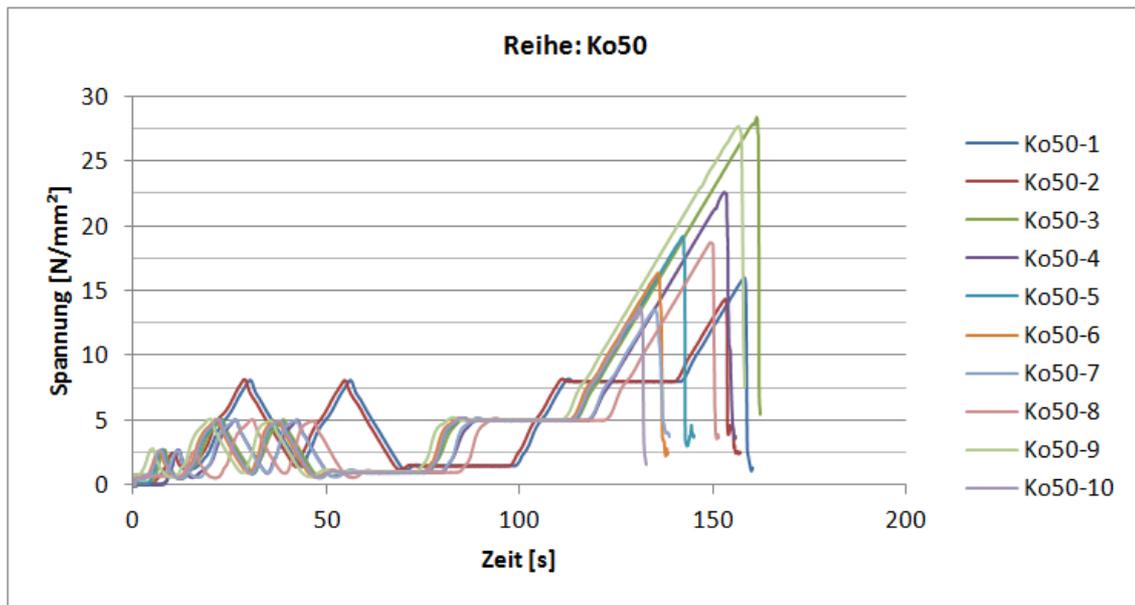
12.5.2. Laser Marmor



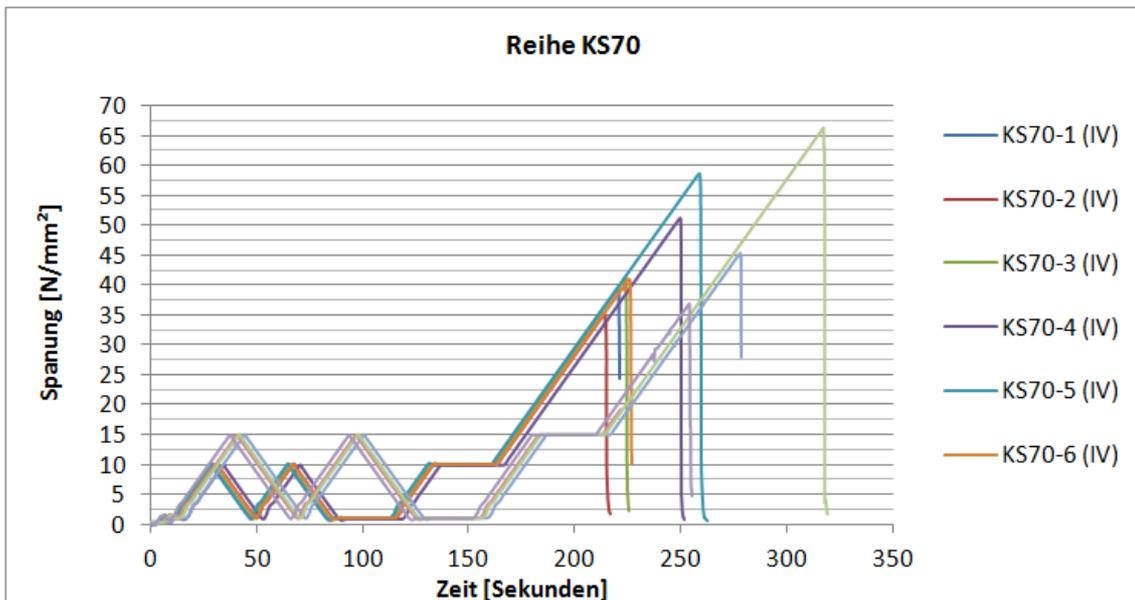
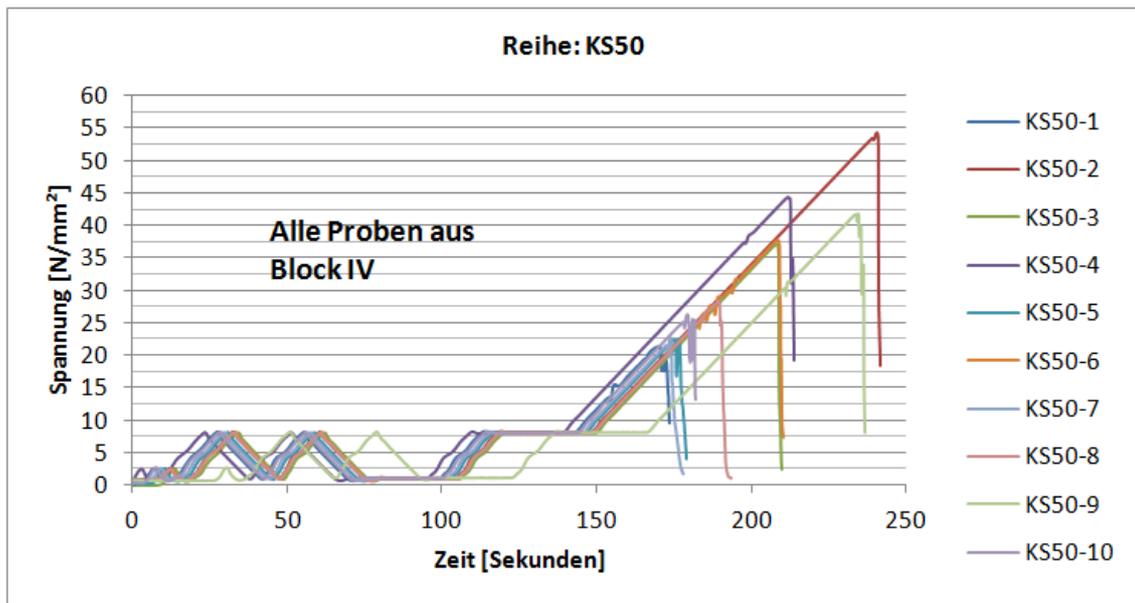
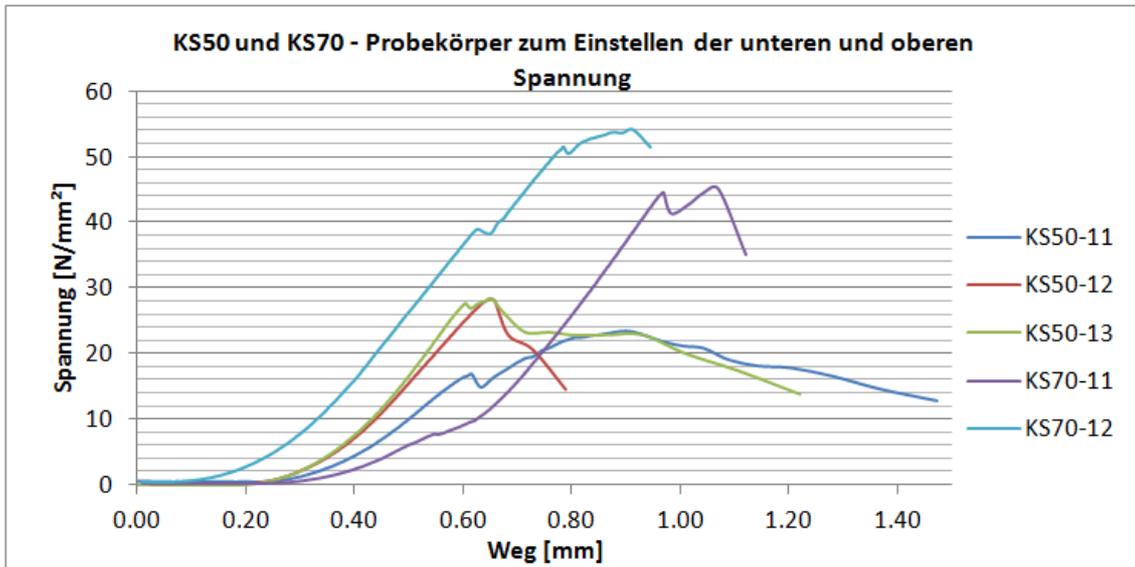


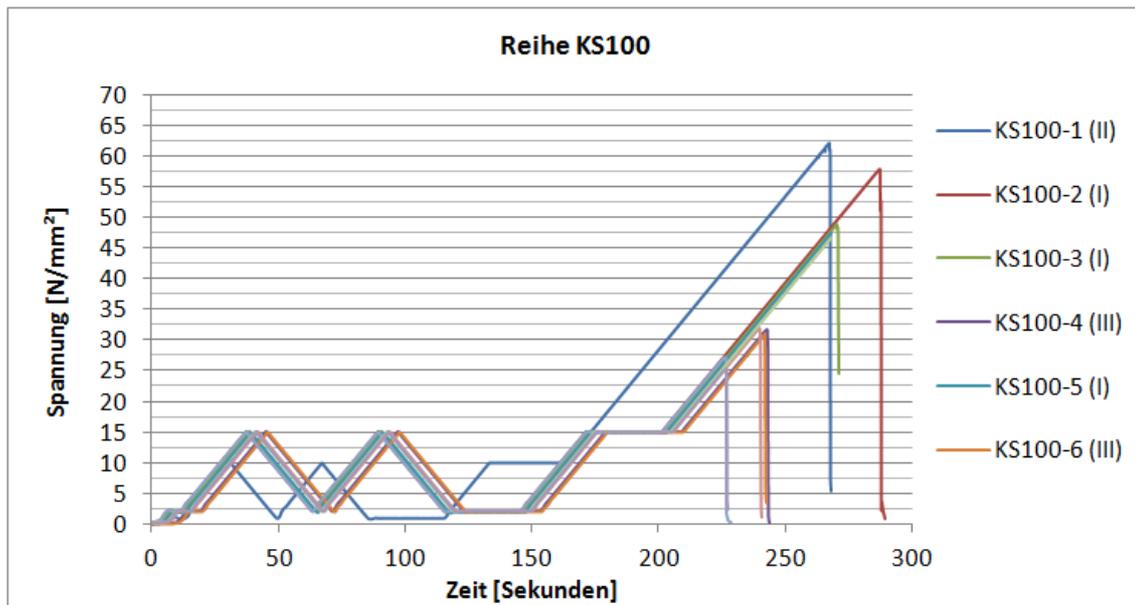
12.5.3. Rohrbacher Konglomerat





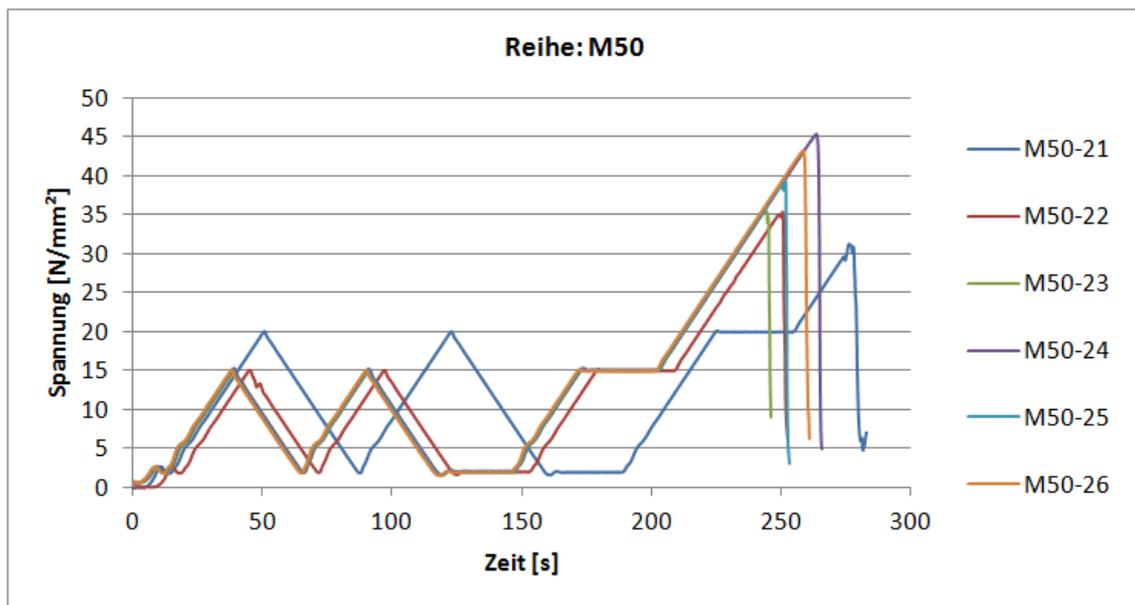
12.5.4. Leithakalk aus Kaisersteinbruch

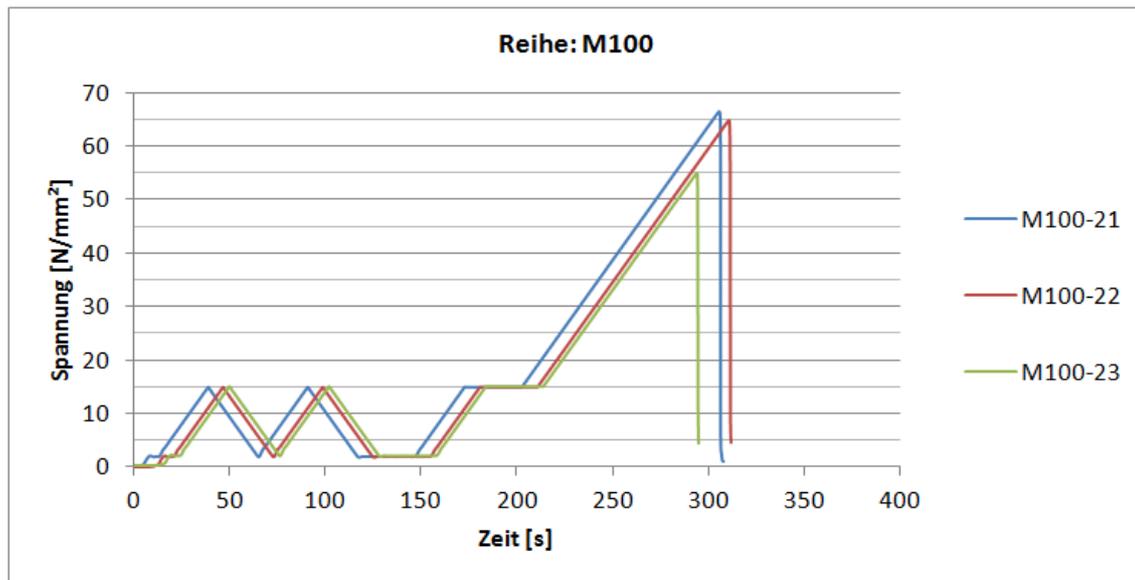




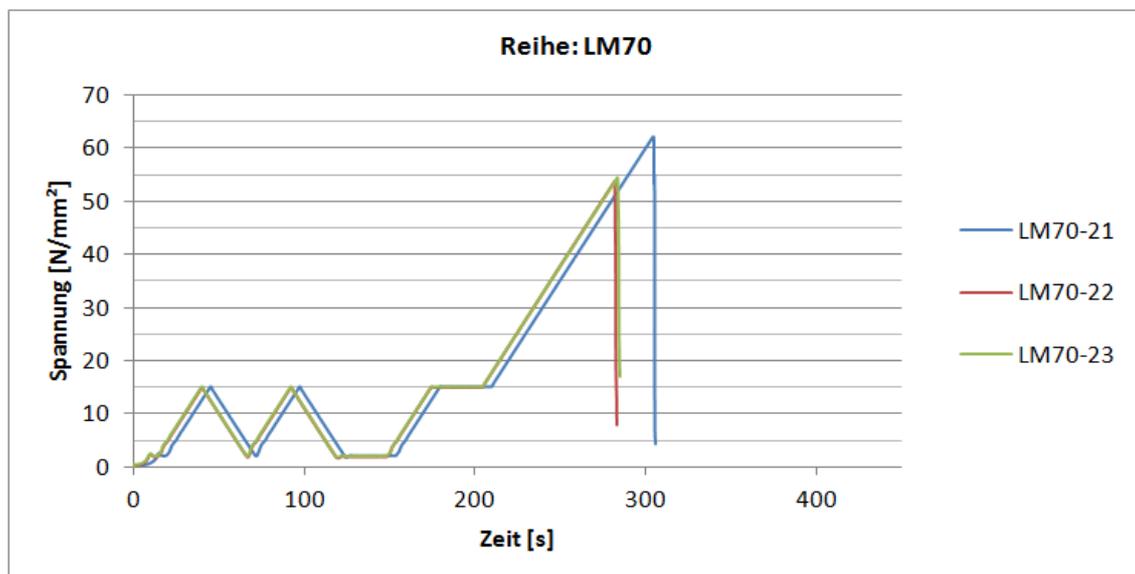
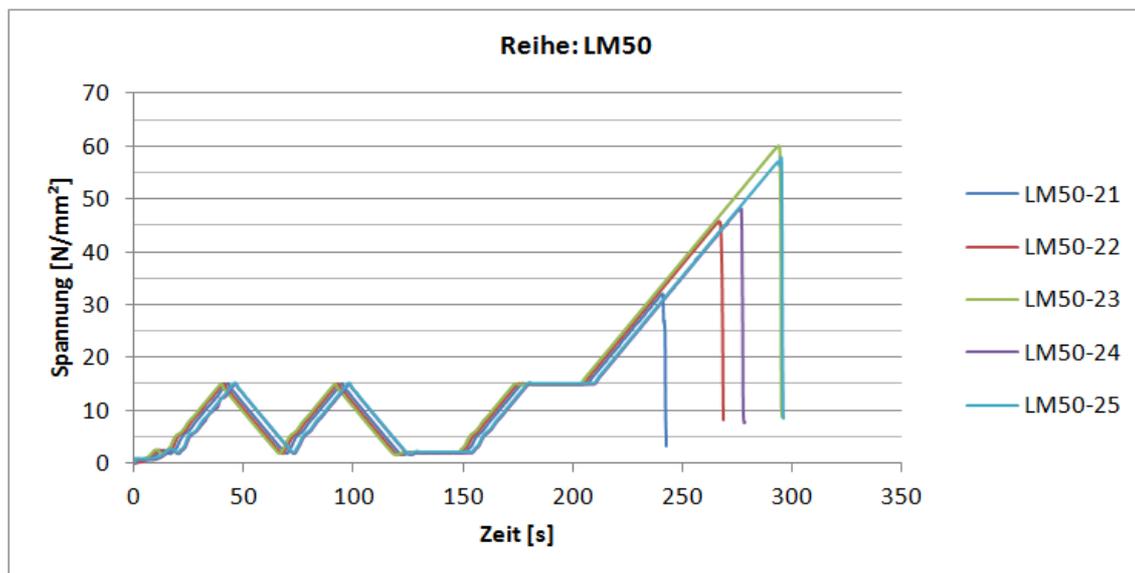
12.6 Auswertung Druckversuche Versuchsreihe 2

12.6.1. Sterzinger Marmor

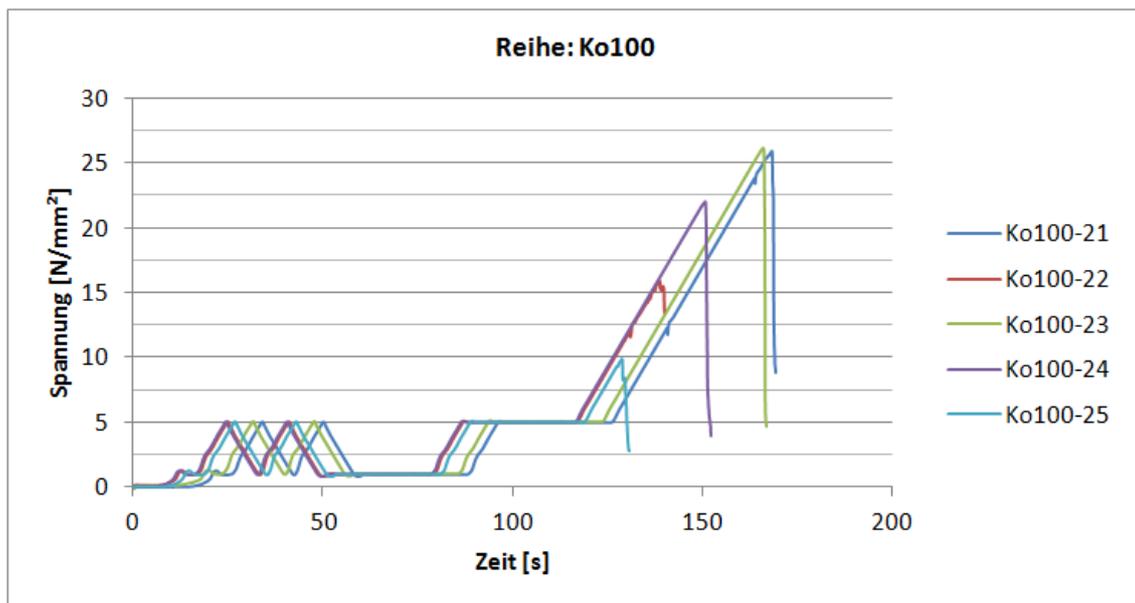
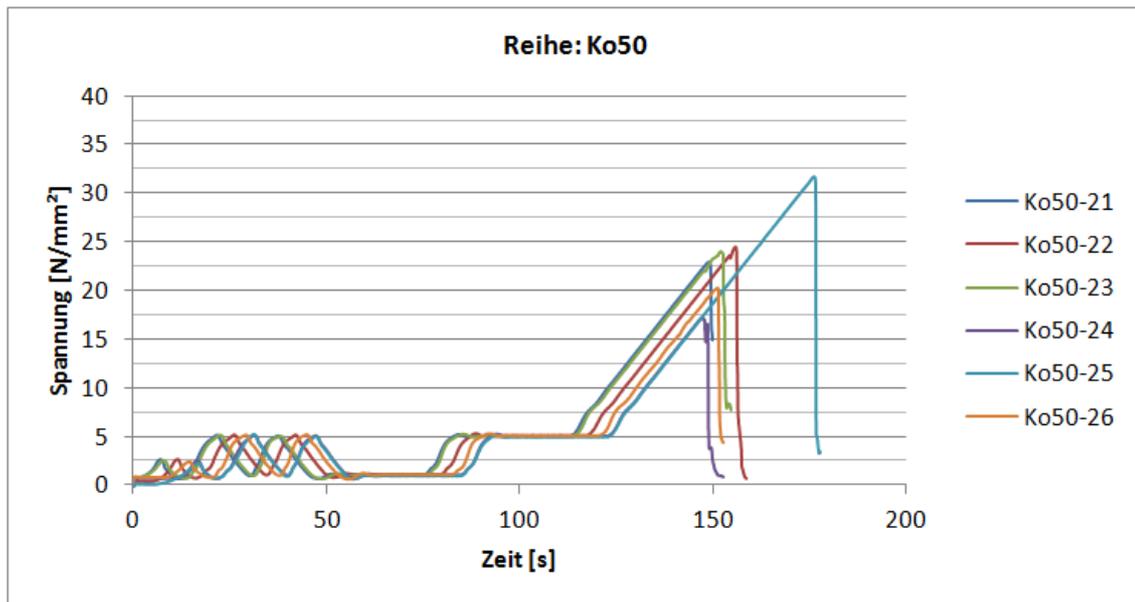




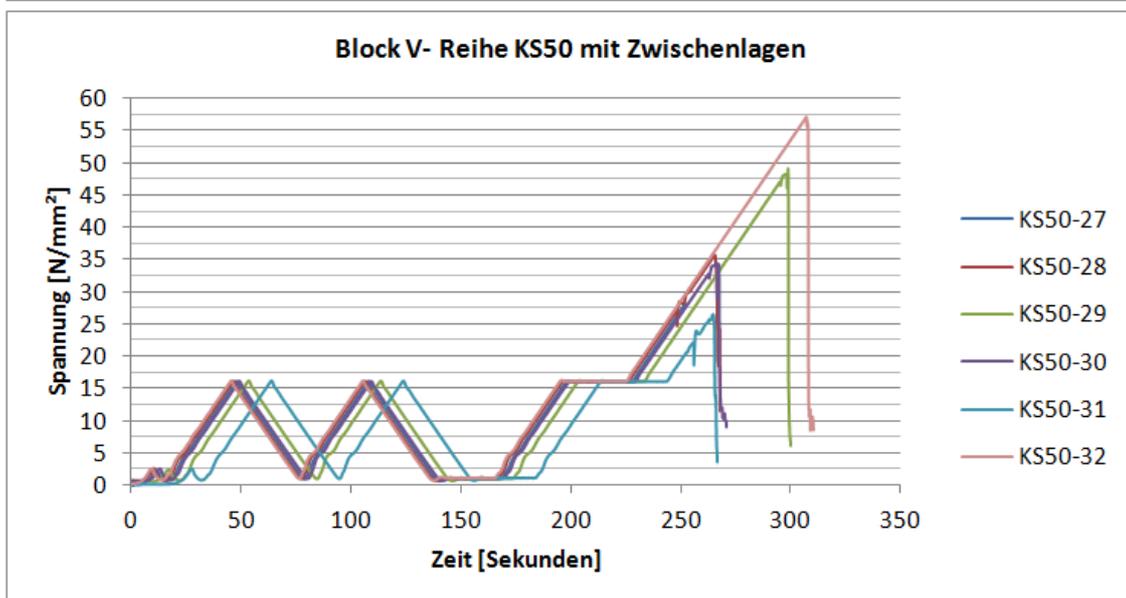
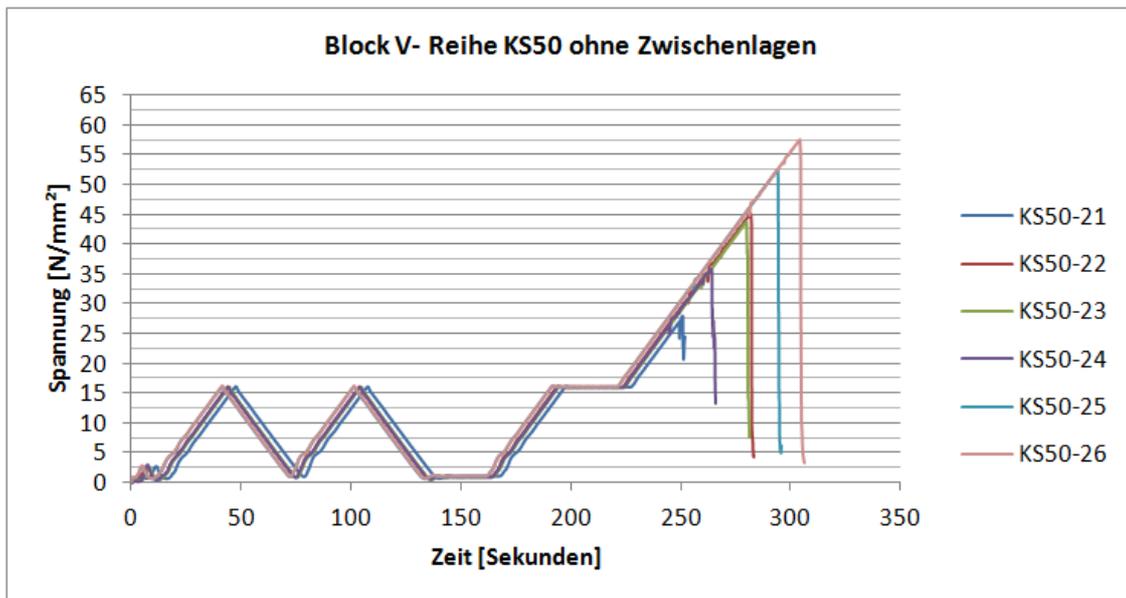
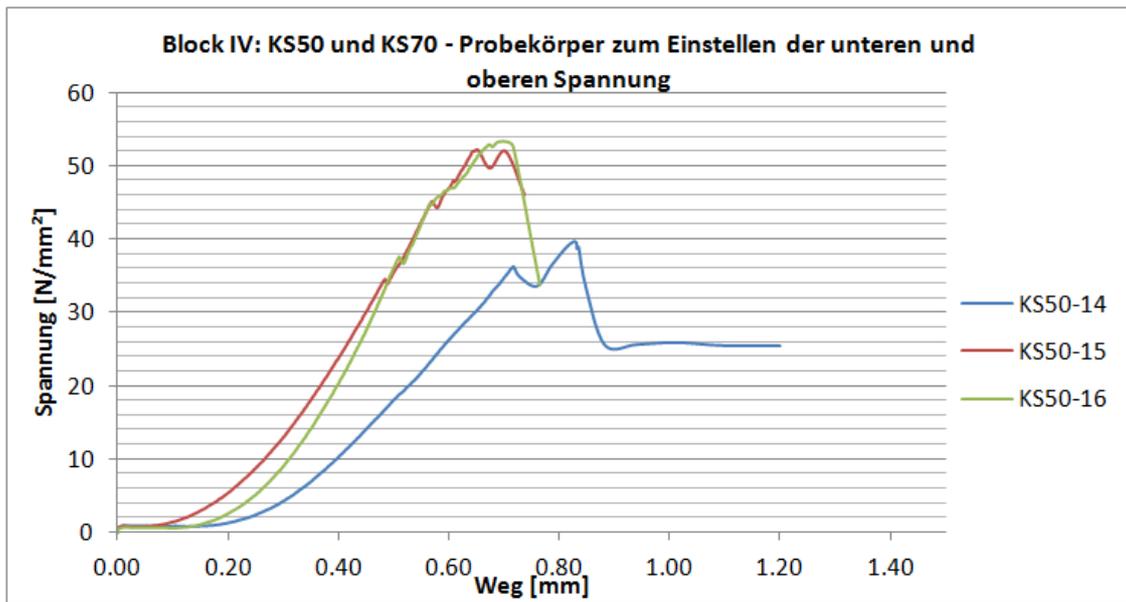
12.6.2. Laser Marmor

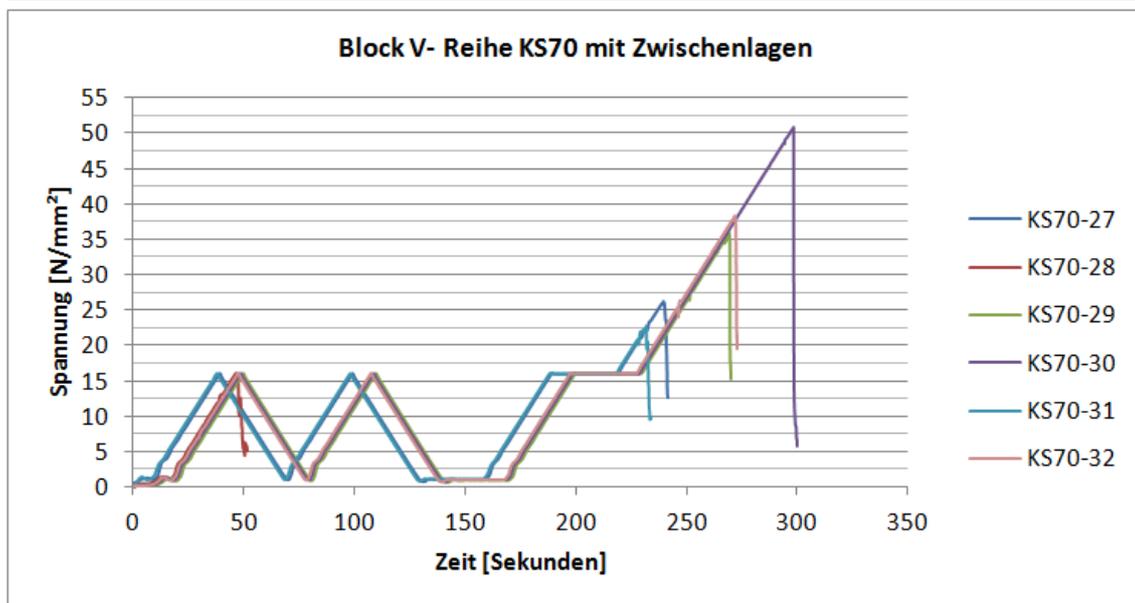
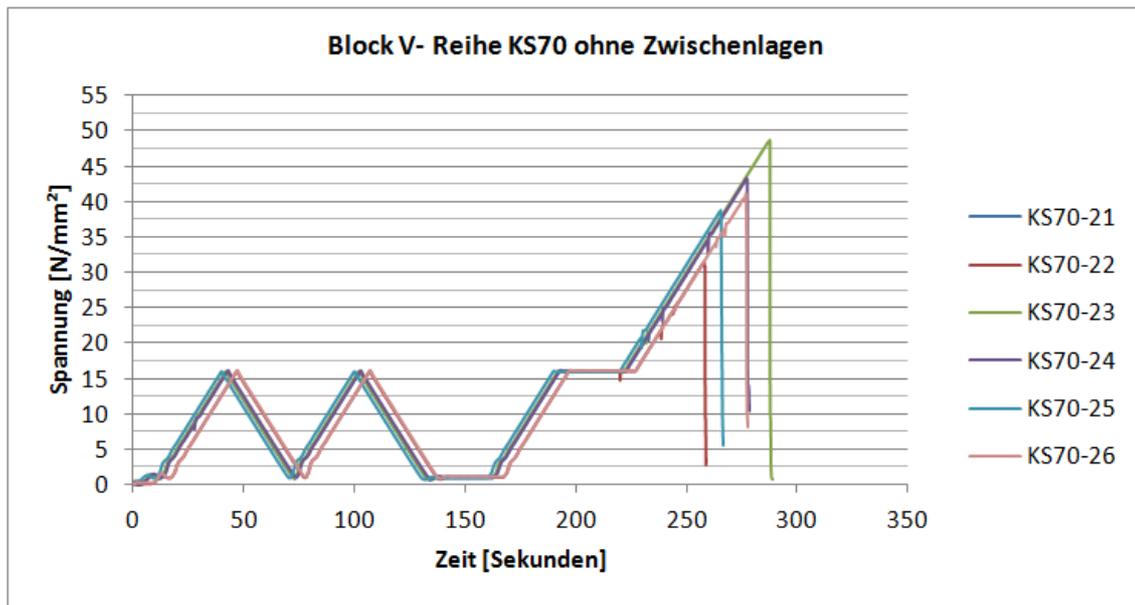


12.6.3. Rohrbacher Konglomerat



12.6.4. Leithakalk aus Kaisersteinbruch

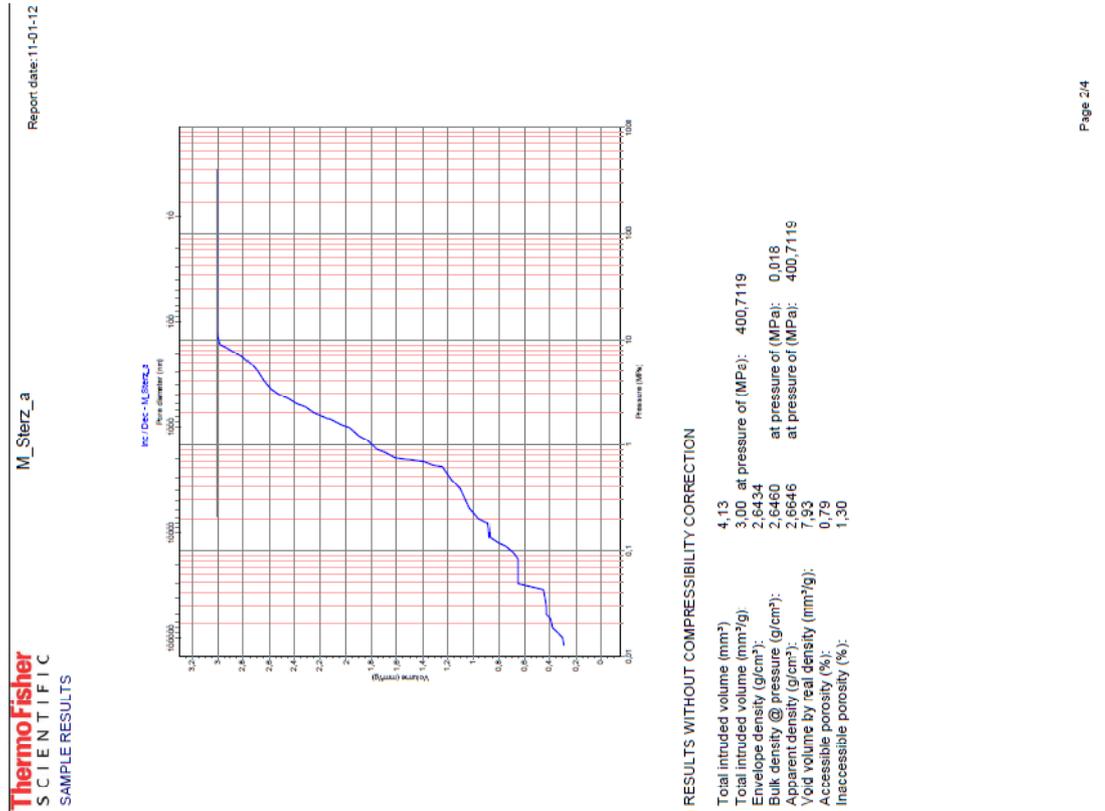




12.7 Porosimetermessungen

12.7.1. Sterzinger Marmor

Probe a:



ThermoFisher Scientific

Report date: 11-01-12

M_Sterz_a

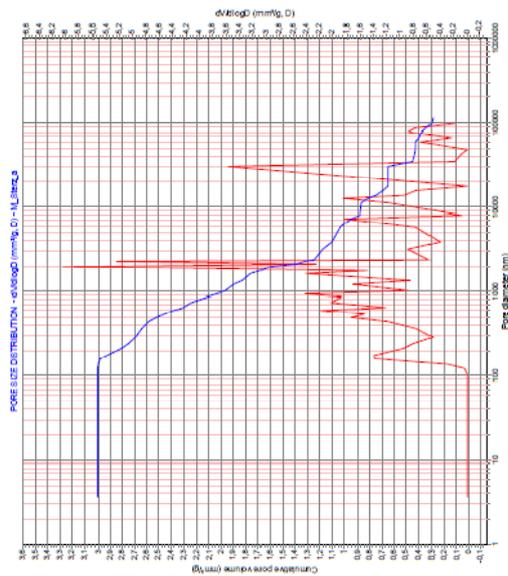
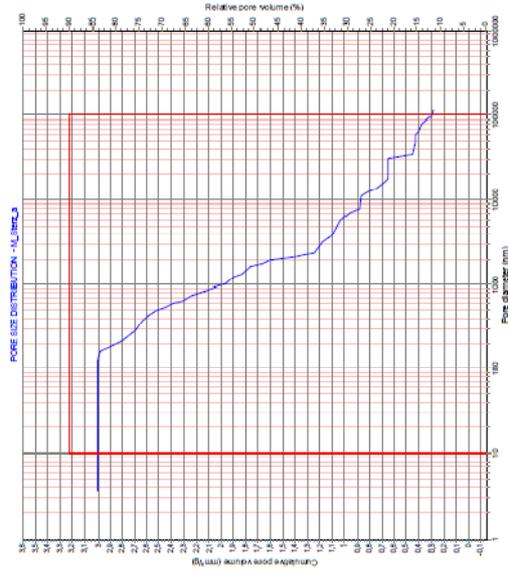
Source file: C:\Solid\Combil\Marmor_Christian\M_Sterz_a.144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION
Test date: 05-01-12
Sample name: M_Sterz_a
Comment: Christian
Sample mass (g): 1,376
Sample real density (g/cm³): 2,7
Test file name: C:\Solid\Inst2\Data\M_Sterz_a_D016_CD3P_I6_D8_2012-01-05_0853.P44
Combined with file (140): C:\Solid\Inst1\Data\M_Sterz_a_D016_CD3_I6_D8_2012-01-03_1035.P14
Mercury surface tension (N/m): 0,48
Mercury contact angle (°): 140,0
Test filling volume (mm³): 454,0
Starting hydr. press. of test (MPa): 0,0123
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 176,827
Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 176,805

ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 25,6
Mercury density @ test (g/cm³): 13,5325

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 06-05-10
Blank filename: C:\Solid\Inst2\Blank\BK_D016_CD3P_I6_D8_2010-05-06_1140.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max. pressure (MPa): 400
Blank increase speed: 6 Pascal
Blank decrease speed: 8 Pascal
Blank decrease method: Pascal
Dil. number: 16
Dil. type: CD3P
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1,5
Dil. weight (g): 59,9918
Temperature of blank (°C): 13,5316
Mercury density @ blank (g/cm³): 13,5316
Blank filling volume (mm³): 445
Starting hydr. blank press. (MPa): 0,012126
(Dil+Hg) weight (g): 182,4655

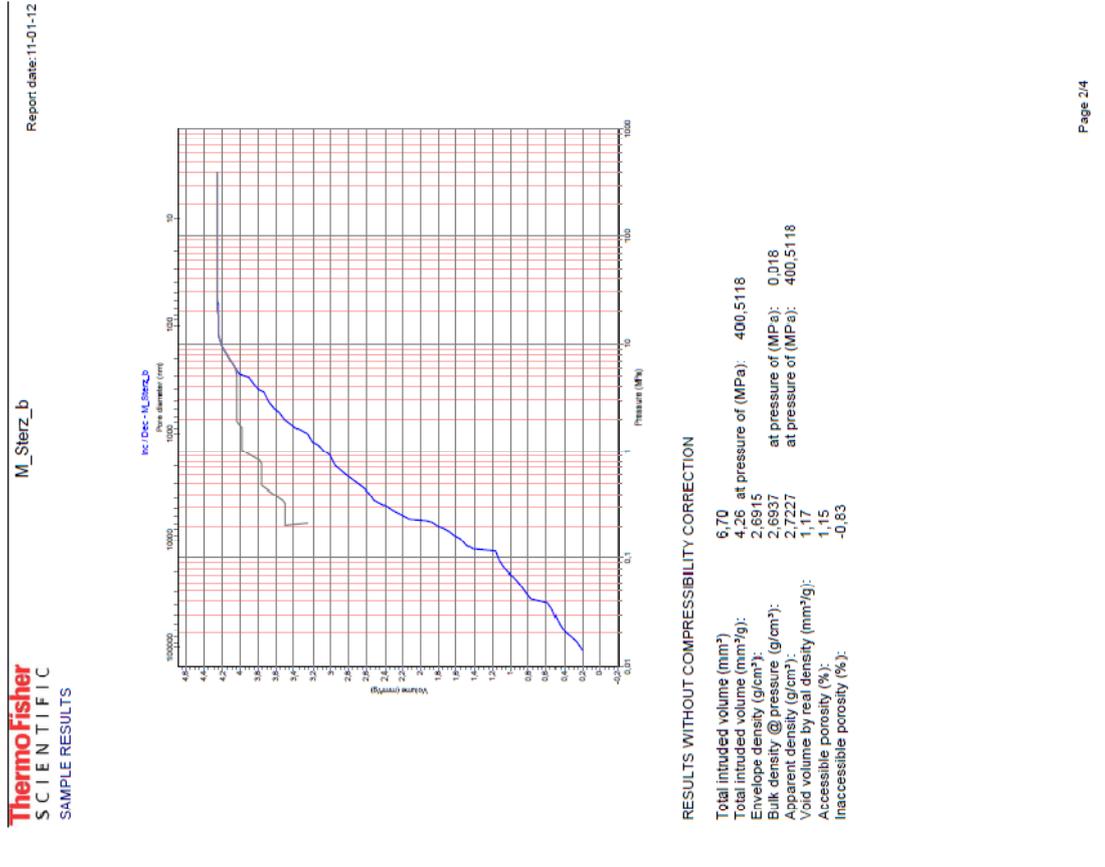


Derivative calculated with
Moving average points: 1
Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 400.7
Total pore volume (mm³/g): 3.00
Average pore surface area (m²/g): 0.013
Average pore diameter (nm): 914.35
Median pore diameter (nm): 2039.88
Max pore diameter (nm): 1955.16
Span: 48.2893

with mode: Cylindrical and Plate
(4/1A)
at (mm³/g): 1.50
at dV/dlogD (mm³/g, D): 6.04
at Min. Vol. (%) 10.0 at Max. Vol. (%) 90.0

Probe b:



ThermoFisher
S C I E N T I F I C
SAMPLE RESULTS

M_Sterz_b
Report date: 11-01-12

Source file: C:\SolidCombil\Marmor_Christian\M_Sterz_b_144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

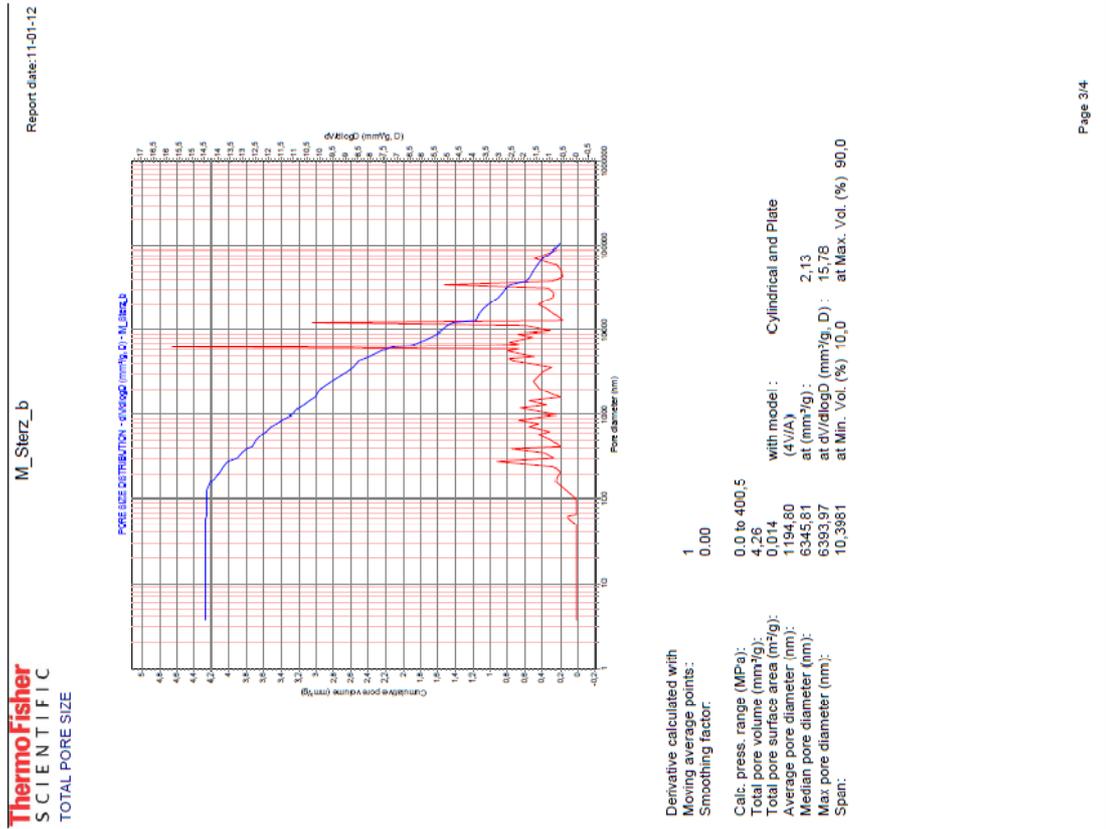
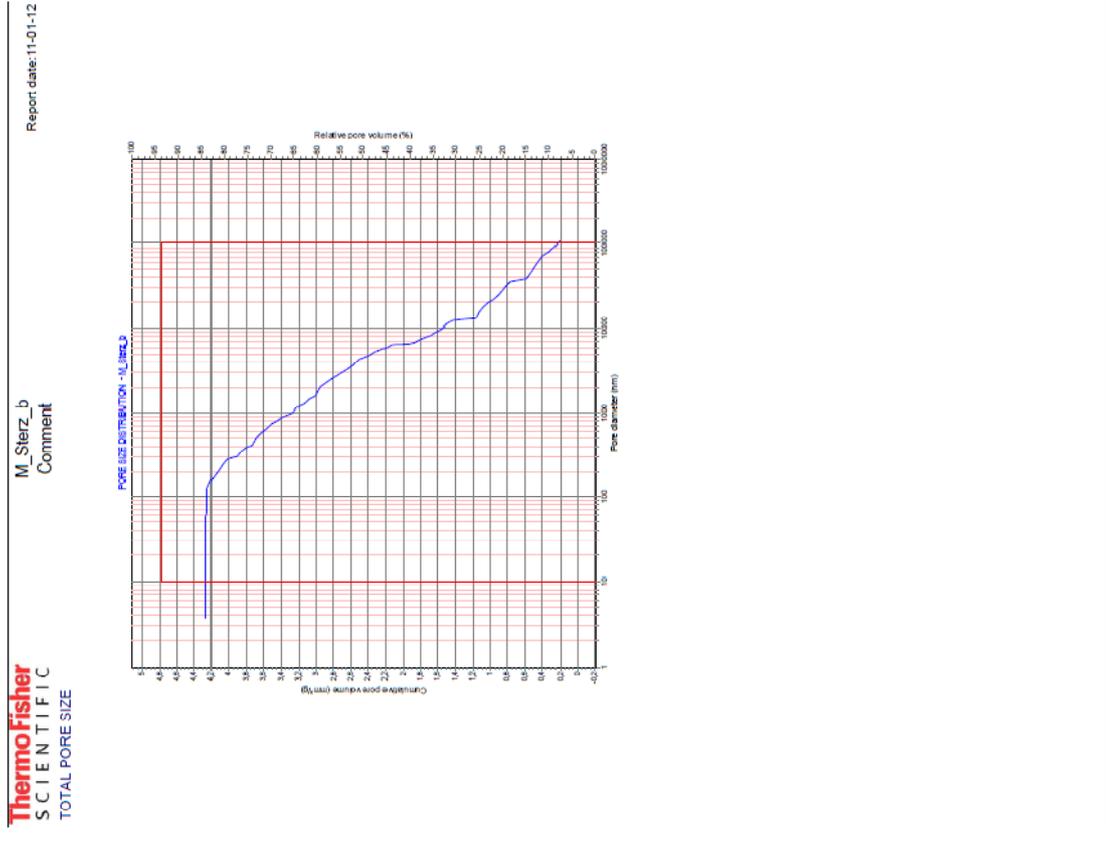
TEST INFORMATION
Test date: 09-01-12
Sample name: M_Sterz_b
Comment: Christian
Sample mass (g): 1.5729
Sample real density (g/cm³): 2.7
Test file name: C:\SolidInstr2\data\M_Sterz_b_D021_CD3P_I6_D8_2012-01-09_1004.P44
Combined with file (140): C:\SolidInstr1\data\M_Sterz_b_D021_CD3_I6_D9_2012-01-09_0856.P14
Mercury surface tension (N/m): 0.48
Mercury contact angle (°): 140.0
Test filling volume (mm³): 444.0
Starting hydr. press. of test (MPa): 0.0121
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 169.294
Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 169.443

ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 24.5
Mercury density @ test (g/cm³): 13.5352

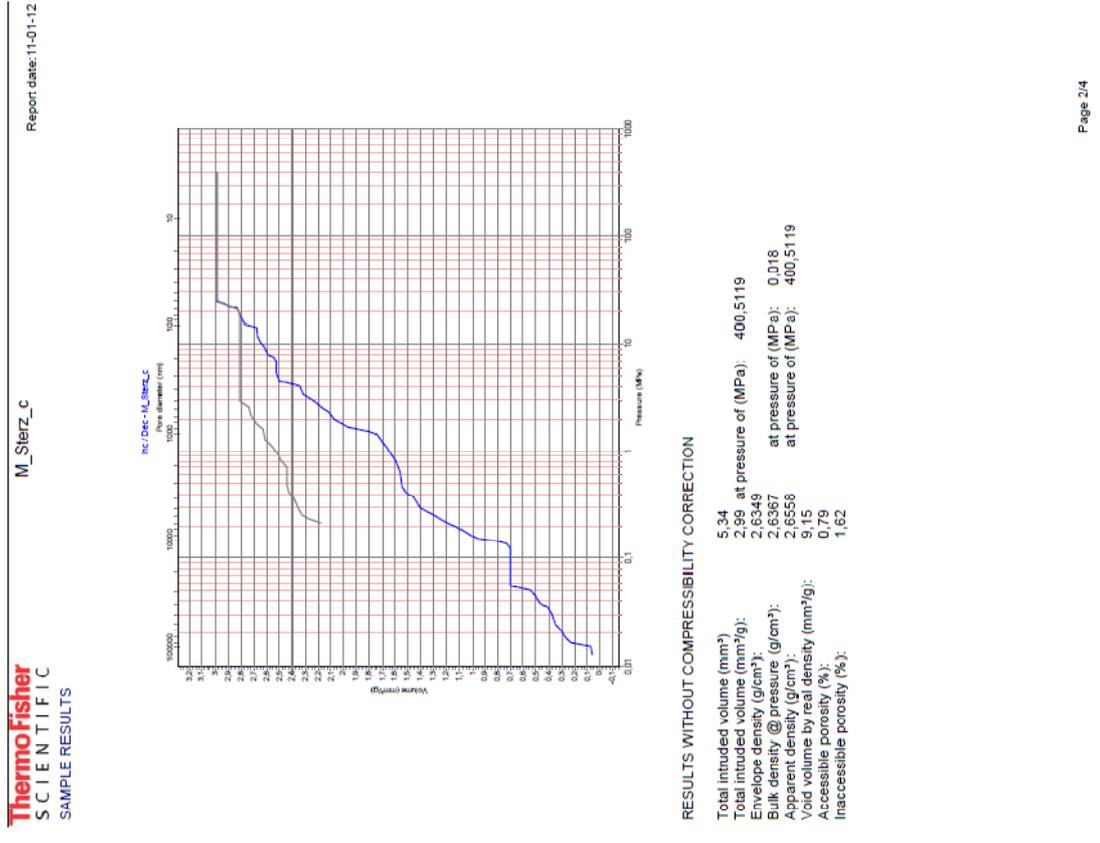
BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 13-09-11
Blank filename: C:\SolidInstr2\Blank\BK_D021_CD3P_I6_D8_2011-09-13_1209.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank Increase speed: 6 Pascal
Blank Decrease speed: 8 Pascal
Blank Decrease method: Pascal
Dil. number: 21
Dil. type: CD3P
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1.5
Dil. weight (g): 58.019
Temperature of blank (°C): 13.5293
Mercury density @ blank (g/cm³): 13.5293
Blank filling volume (mm³): 455
Starting hydr. blank press. (MPa): 0.012315
(Dil+Hg) weight (g): 175.7289

RESULTS WITHOUT COMPRESSIBILITY CORRECTION
Total intruded volume (mm³) 6.70
Total intruded volume (mm³/g) 4.26 at pressure of (MPa) 400.5118
Envelope density (g/cm³) 2.6915
Bulk density @ pressure (g/cm³) 2.6937 at pressure of (MPa) 0.018
Apparent density (g/cm³) 2.7227 at pressure of (MPa) 400.5118
Void volume by real density (mm³/g) 1.17
Accessible porosity (%) 1.15
Inaccessible porosity (%) -0.83

M_Sterz_b
Report date: 11-01-12
Page 1/4



Probe c:



ThermoFisher
S C I E N T I F I C

M_Sterz_c

Report date: 11-01-12

Source file: C:\SolidCombi\Warmor_Christian\M_Sterz_c.144

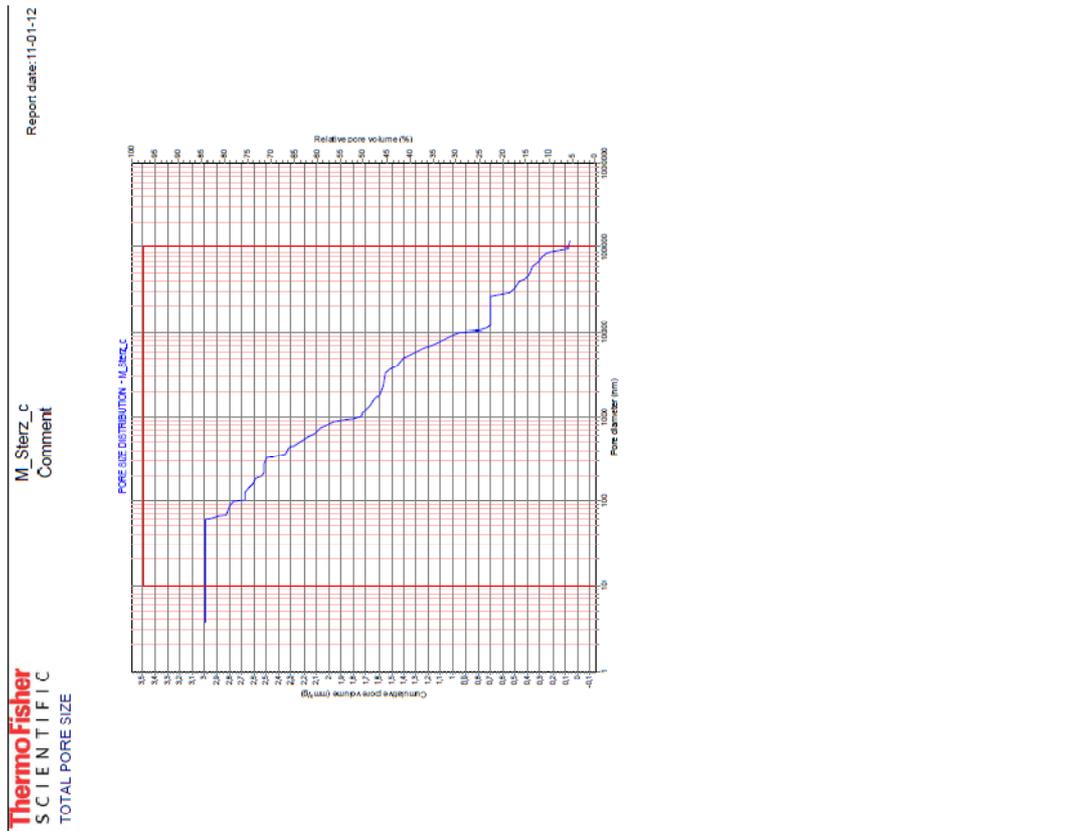
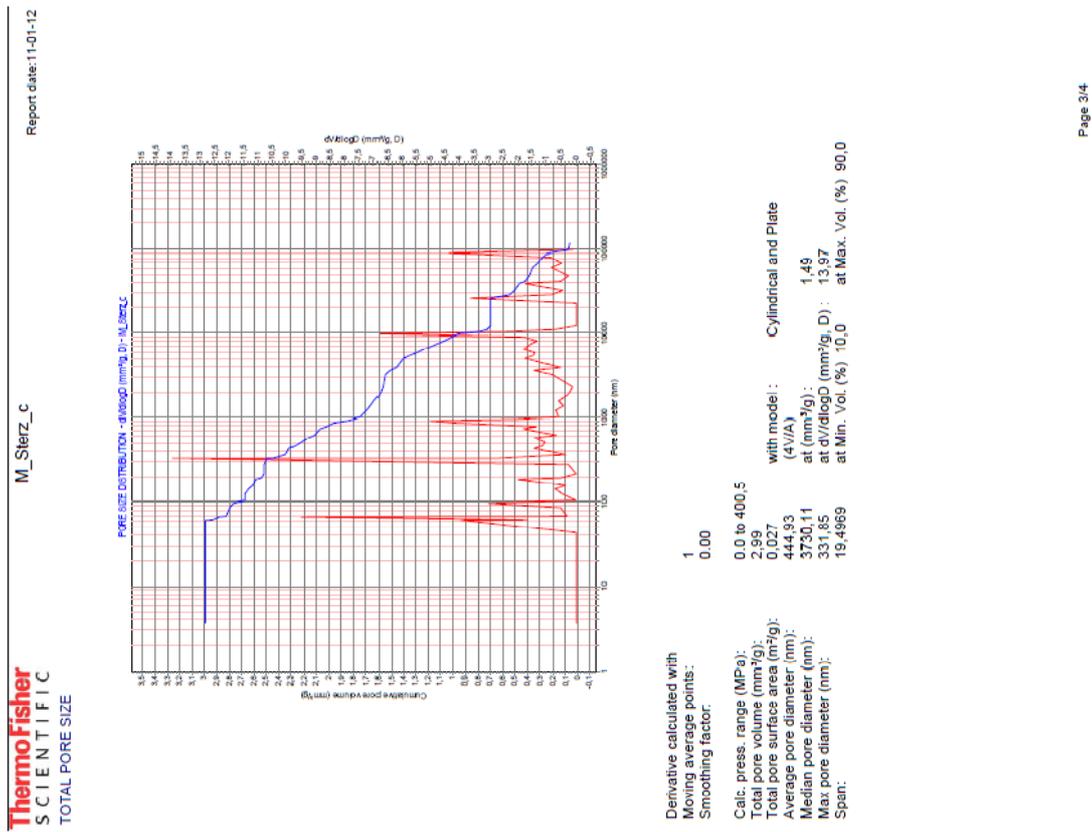
SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenejger

TEST INFORMATION
Test date: 09-01-12
Sample name: M_Sterz_c
Comment: Christian
Sample mass (g): 1,7851
Sample real density (g/cm³): 2,7
Test file name: C:\SolidInstr2\data\M_Sterz_c_D5015_CD3P_i6_D8_2012-01-09_1108.P44
Combined with file (140): C:\SolidInstr1\data\M_Sterz_c_D5015_CD3_i6_D9_2012-01-09_1013.P14
Mercury surface tension (N/m): 0,48
Mercury contact angle (°): 140,0
Test filling volume (mm³): 452,0
Starting hydr. press. of test (MPa): 0,0123
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 169,26
Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 169,568

ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease method: Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 24,8
Mercury density @ test (g/cm³): 13,5345

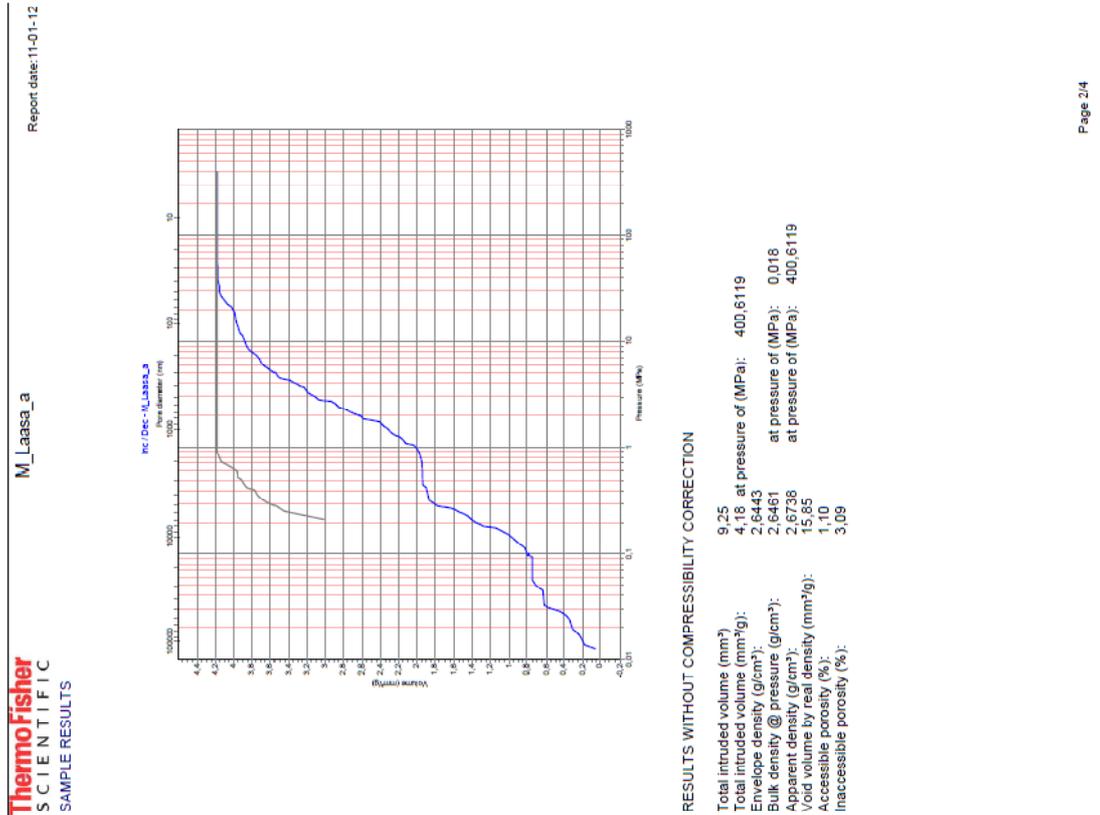
BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 14-09-11
Blank filename: C:\SolidInstr2\Blank\BK_D5015_CD3P_i6_D8_2011-09-14_1117.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank Increase speed: 6 Pascal
Blank Increase method: Pascal
Blank Decrease speed: 8 Pascal
Blank Decrease method: Pascal
Dil. number: 5015
Dil. type: CD3P
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1,5
Dil. weight (g): 60,0767
Temperature of blank (°C): 27,1
Mercury density @ blank (g/cm³): 13,5289
Blank filling volume (mm³): 460
Starting hydr. blank press. (MPa): 0,012409
(Dil+Hg) weight (g): 176,7038

RESULTS WITHOUT COMPRESSIBILITY CORRECTION
Total intruded volume (mm³) 5,34
Total intruded volume (mm³/g) 2,89 at pressure of (MPa): 400,5119
Envelope density (g/cm³): 2,6349
Bulk density @ pressure (g/cm³): 2,6367 at pressure of (MPa): 400,5119
Apparent density (g/cm³): 2,6558
Void volume by real density (mm³/g): 9,15
Accessible porosity (%): 0,79
Inaccessible porosity (%): 1,62



12.7.2. Laser Marmor

Probe a:



ThermoFisher SCIENTIFIC

M_Laasa_a

Report date: 11-01-12

Source file: C:\Solid\Combi\Marmor_Christian\M_Laasa_a_144

SOLID REPORTING

Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre

Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION

Test date: 02-01-12

Sample name: M_Laasa_a

Comment: Christian

Sample mass (g): 2,214

Sample real density (g/cm³): 2,76

Test file name: C:\SolidVnstr2\Data\M_Laasa_a_D5015_CD3P_I6_D8_2012-01-02_1056.P44

Combined with file (140): C:\SolidVnstr1\Data\M_Laasa_a_D5015_CD3_I6_D9_2012-01-02_1005.P14

Mercury surface tension (N/m): 0,48

Mercury contact angle (°): 140,0

Test filling volume (mm³): 454,0

Starting hydr. press. of test (MPa): 0,0123

(Dil+Hg-Sample) weight (g): 167,53

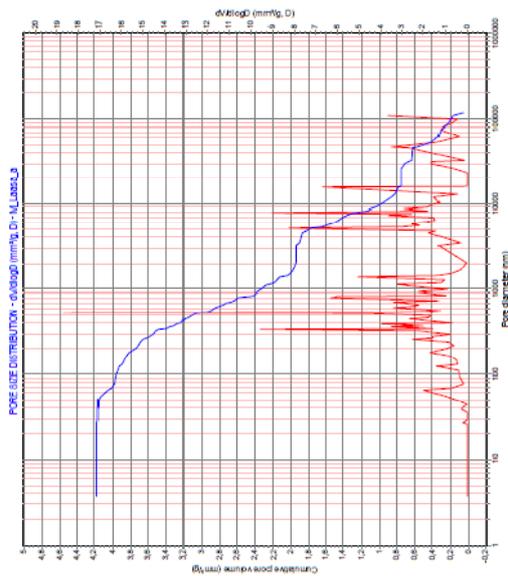
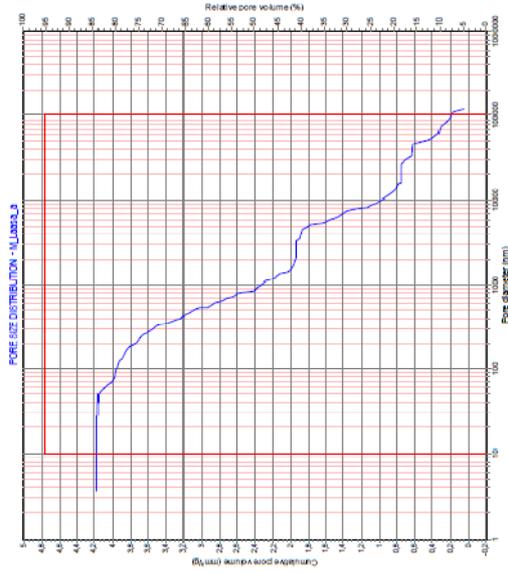
Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 167,811

ANALYTICAL CONDITIONS

Maximum test pressure (MPa):	400
Increase speed:	6 Pascal
Decrease speed:	8 Pascal
Temperature of test (°C):	26,0
Mercury density @ test (g/cm³):	13,5316

BLANK & DILATOMETER INFORMATION

Blank date:	14-09-11
Blank filename:	C:\SolidVnstr2\Blank\BK_D5015_CD3P_I6_D8_2011-09-14_1117.P44
Blank file name:	BK_D5015
Blank Comment:	400
Blank Max pressure (MPa):	6
Blank Increase speed:	8 Pascal
Blank Increase method:	8
Blank Decrease speed:	5015 Pascal
Blank Decrease method:	CD3P
Dil. number:	23
Dil. type:	Dil. Cone length (mm): 5
Dil. Electrode gap (mm):	1,5
Dil. stem radius (mm):	60,0767
Dil. weight (g):	27,1
Temperature of blank (°C):	13,5289
Mercury density @ blank (g/cm³):	460
Blank filling volume (mm³):	0,012409
Starting hydr. blank press. (MPa):	176,7038
(Dil+Hg) weight (g):	

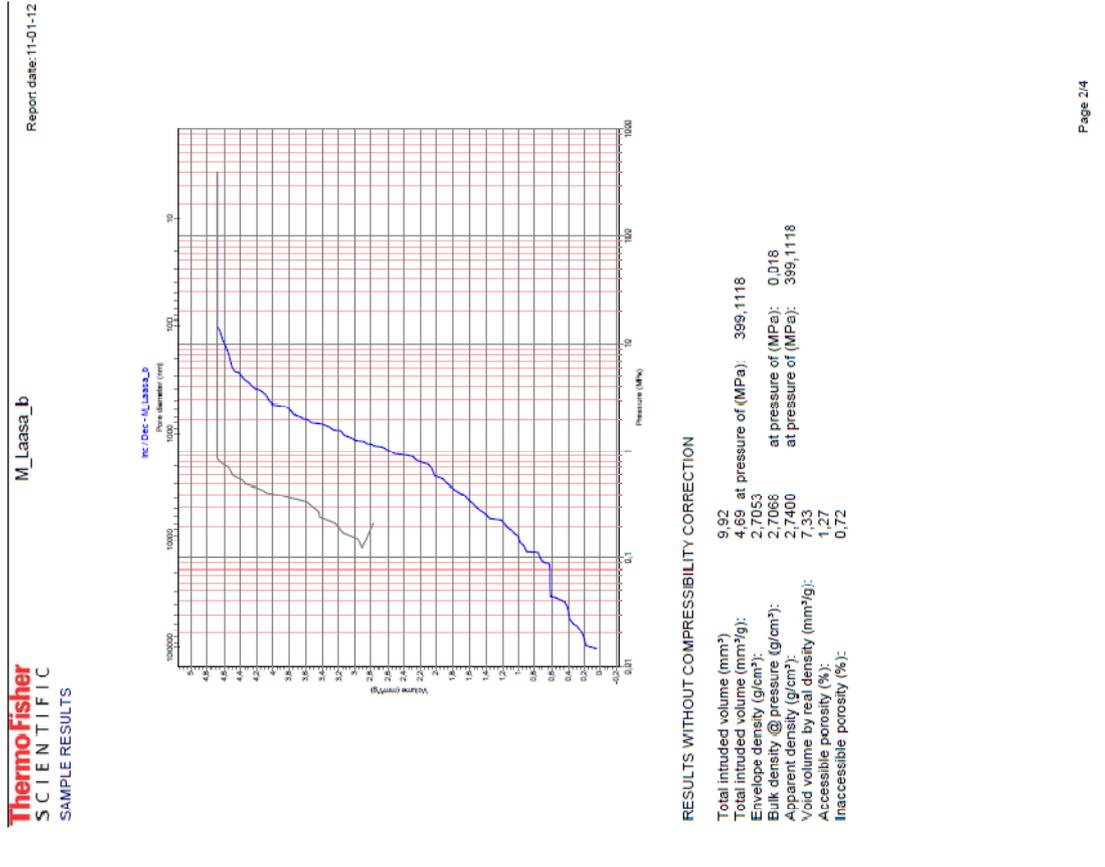


Derivative calculated with
Moving average points: 1
Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 400.6
Total pore volume (mm³/g): 4.18
Total pore surface area (m²/g): 0.034
Average pore diameter (nm): 488.60
Median pore diameter (nm): 1379.74
Max pore diameter (nm): 540.29
Span: 38.74

with model: Cylindrical and Plate
(4 1/2 A)
at (mm²/g): 2.09
at dV/dlogD (mm²/g, D): 18.70
at Min. Vol. (%) 10.0 at Max. Vol. (%) 90.0

Probe b:



ThermoFisher
S C I E N T I F I C

M_Laasa_b

SAMPLE RESULTS

Report date: 11-01-12

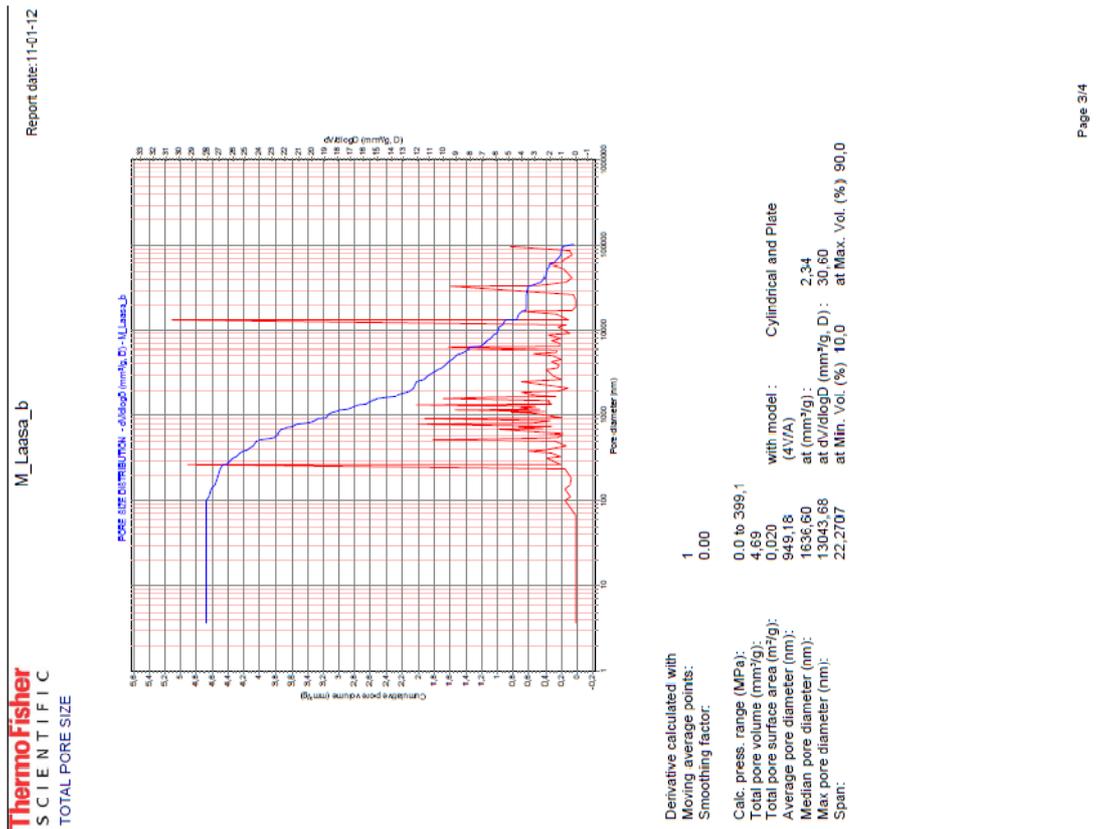
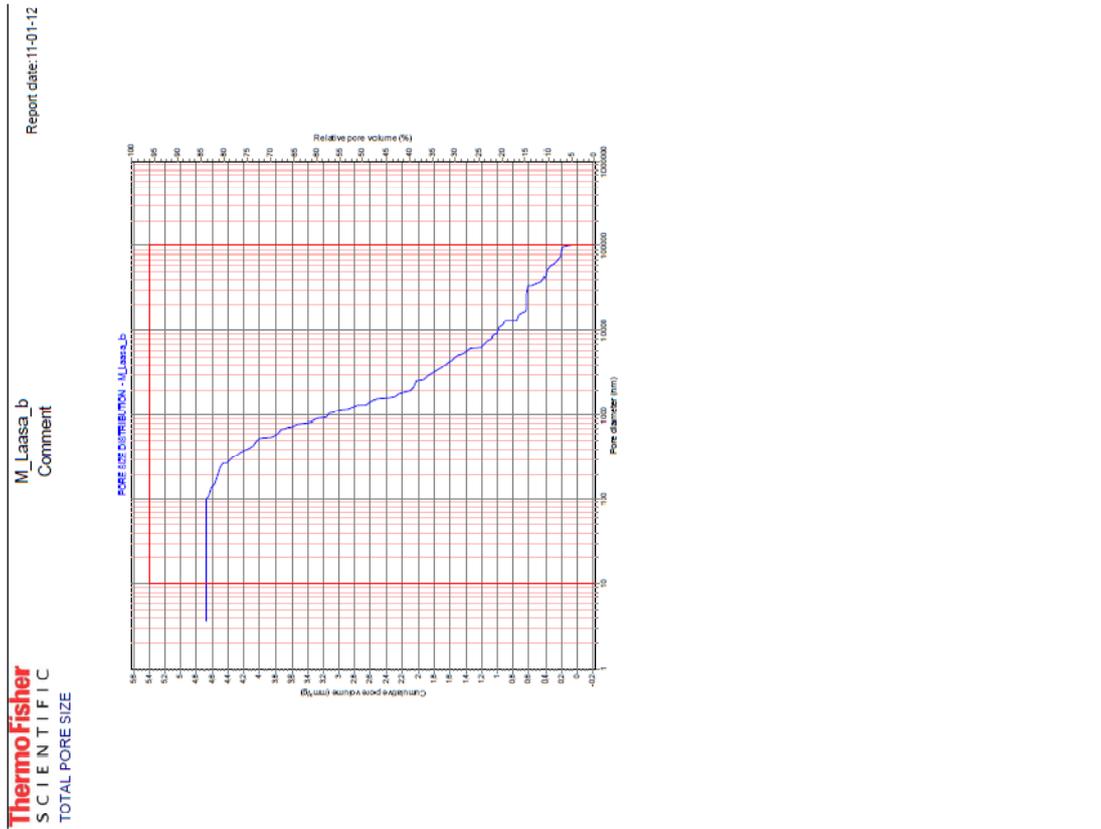
Source file: C:\Solid\Combi\Marmor_Christian\M_Laasa_b_144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

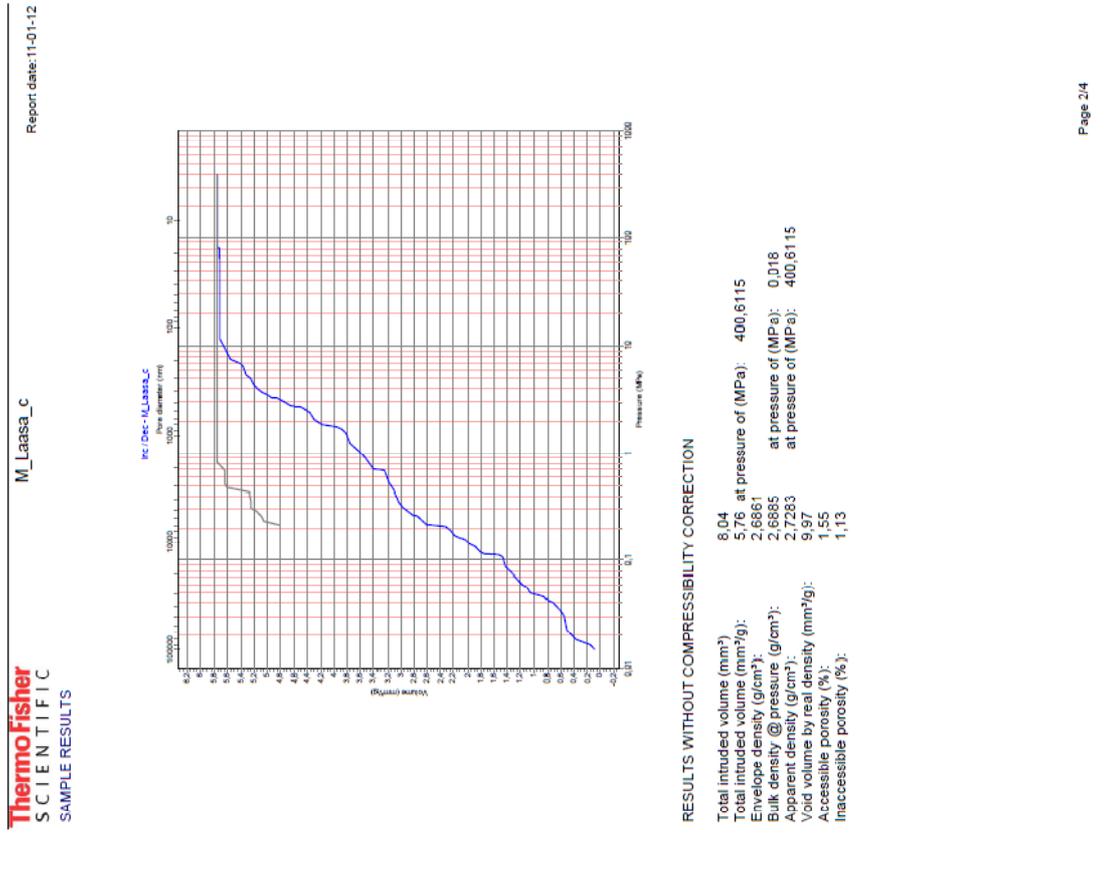
TEST INFORMATION
Test date: 02-01-12
Sample name: M_Laasa_b
Comment: Christian
Sample mass (g): 2,115
Sample real density (g/cm³): 2,76
Test file name: C:\Solid\Instr1\Data\M_Laasa_b_D051_CD3P_I6_D8_2012-01-02_1409.P44
Combined with file (140): C:\Solid\Instr1\Data\M_Laasa_b_D051_CD3_I6_D9_2012-01-02_1059.P14
Mercury surface tension (N/m): 0,48
Mercury contact angle (°): 140,0
Test filling volume (mm³): 450,0
Starting hydr. press. of test (MPa): 0,0122
(DI+Hg+Sample) weight (g): 162,935
Corrected weight (DI+Hg+Sample) (g): 162,885

ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease method: 8 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 27,0
Mercury density @ test (g/cm³): 13,5291

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 13-09-11
Blank filename: C:\Solid\Instr2\Blank\BK_D051_CD3P_I6_D8_2011-09-13_1522.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank Increase speed: 6 Pascal
Blank Increase method: 8 Pascal
Blank Decrease speed: 8 Pascal
Blank Decrease method: 5 Pascal
Dil. number: 23
Dil. type: CD3P
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1,5
Dil. weight (g): 58,5566
Temperature of blank (°C): 28
Mercury density @ blank (g/cm³): 13,5267
Blank filling volume (mm³): 447
Starting hydr. blank press. (MPa): 0,012164
(DI+Hg) weight (g): 171,3368



Probe c:



ThermoFisher
S C I E N T I F I C

M_Laasa_c

Report date: 11-01-12

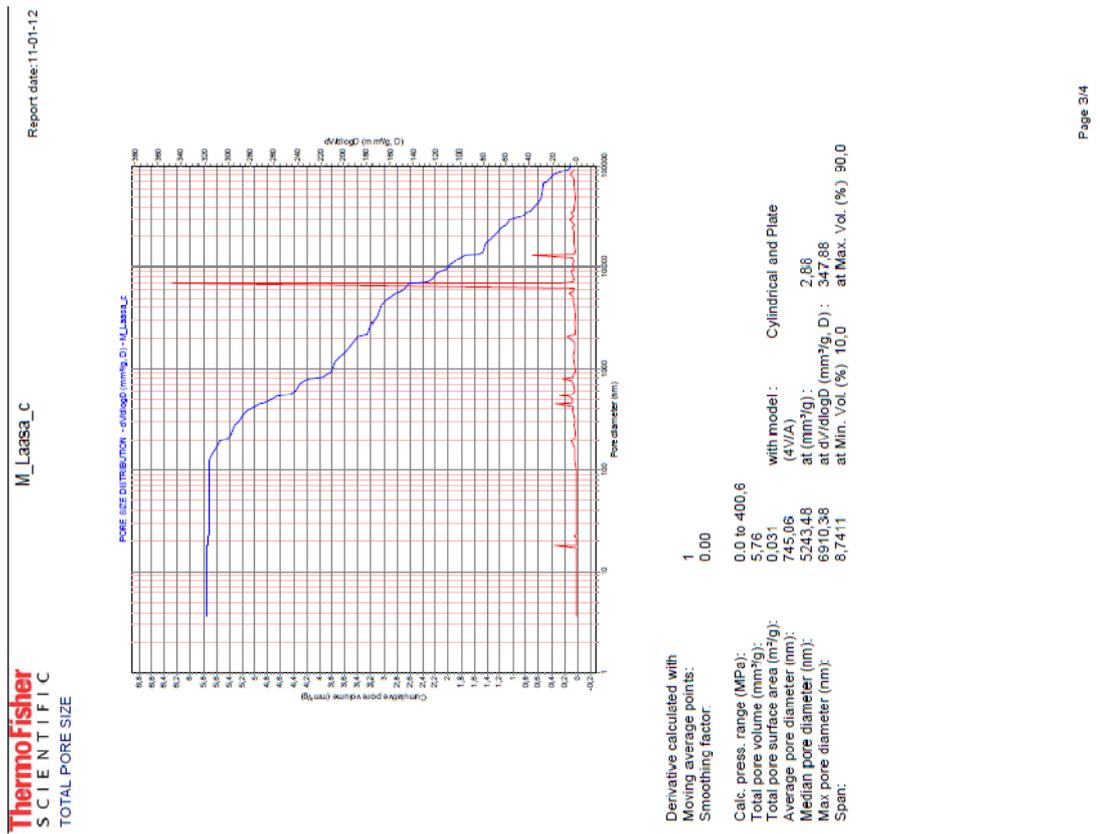
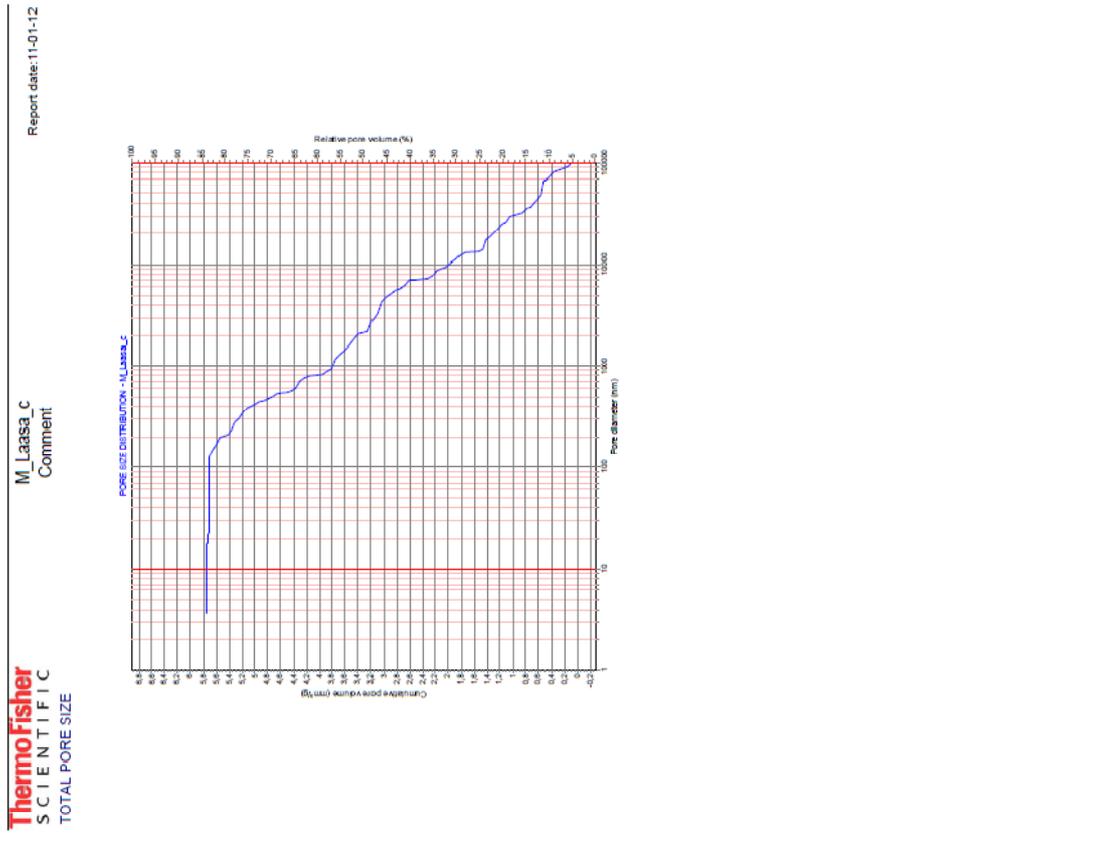
Source file: C:\SolidCombi\Warmor_Christian\M_Laasa_c.144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION
Test date: 05-01-12
Sample name: M_Laasa_c
Comment: Christian
Sample mass (g): 1.3951
Sample real density (g/cm³): 2.76
Test file name: C:\SolidInstr1\Data\M_Laasa_c_D021_CD3P_I6_D8_2012-01-03_1030.P44
Combined with file (140): C:\SolidInstr1\Data\M_Laasa_c_D021_CD3_I6_D9_2012-01-02_1412.P14
Mercury surface tension (N/m): 0.48
Mercury contact angle (°): 140.0
Test filling volume (mm³): 434.0
Starting hydr. press. of test (MPa): 0.0119
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 169.829
Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 170.113

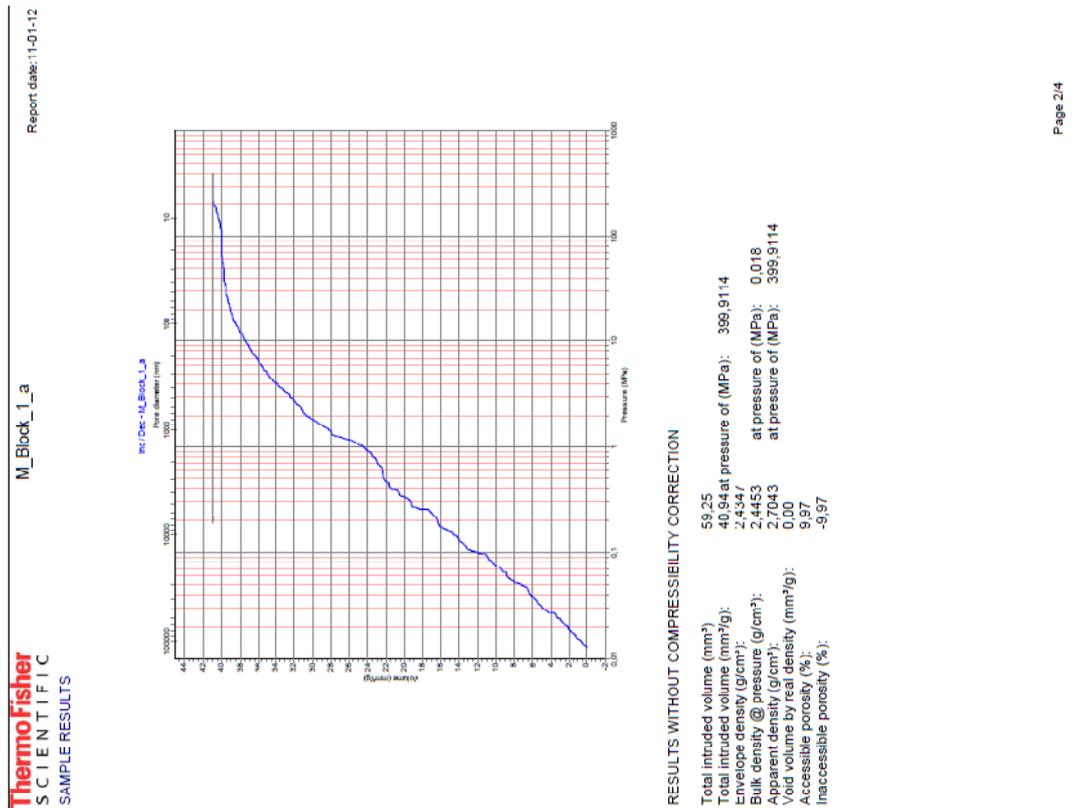
ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 26.1
Mercury density @ test (g/cm³): 13.5313

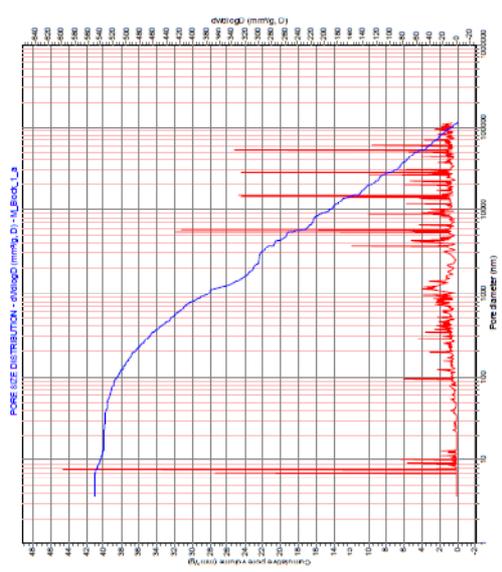
BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 13-09-11
Blank filename: C:\SolidInstr1\Blank\BK_D021_CD3P_I6_D8_2011-09-13_1209.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank Increase speed: 6 Pascal
Blank Decrease speed: 8 Pascal
Blank Dil. number: 21
Dil. type: CD3P
Dil. stem length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1.5
Dil. weight (g): 58.019
Temperature of blank (°C): 13.5293
Mercury density @ blank (g/cm³): 13.5293
Blank filling volume (mm³): 455
Starting hydr. blank press. (MPa): 0.012315
(Dil+Hg) weight (g): 175.7289



12.7.3. Leithakalk aus Kaisersteinbruch – Block I

Probe a:



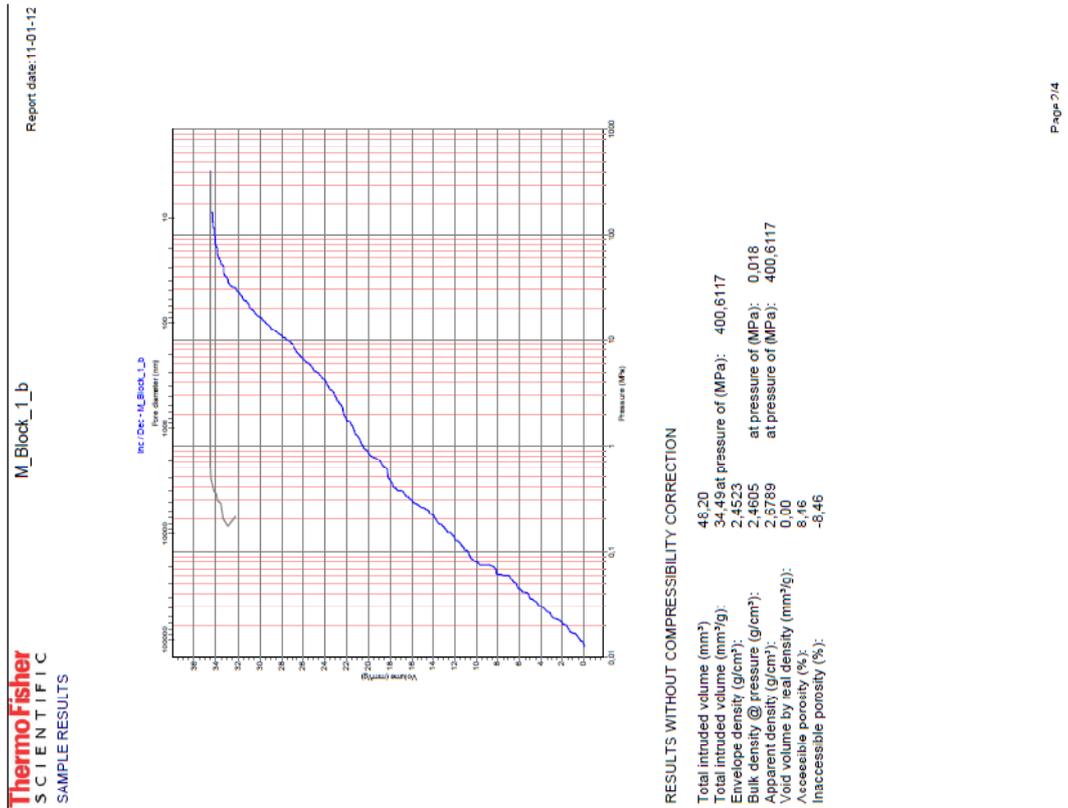


Derivative calculated with
Moving average points: 1
Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 399.9
Total pore volume (mm³/g): 40.94
Total pore surface area (m²/g): 0.701
Average pore diameter (nm): 233.47
Median pore diameter (nm): 4267.77
Max. pore diameter (nm): 7.64
Span: 12.6278

with model: Cylindrical and Plate
(4/VA)
at (mm³/g): 20.47
at d/dlogD (mm³/g, D): 597.91
at Min. Vol. (%) 10.0 at Max. Vol. (%) 90.0

Probe b:



ThermoFisher
S C I E N T I F I C

M_Block_1_b

Report date: 11-01-12

Source file: C:\Solid\CombiMarmor_ChristianM_Block_1_b_144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION
Test date: 15-12-11
Sample name: M_Block_1_b
Comment: Christian
Sample mass (g): 1.3974
Sample real density (g/cm³): 0.1
Test name: C:\Solid\instr2\data\M_Block_1_b_D051_CD3P_I6_D8_2011-12-14_1531.P44
C:\Solid\instr1\data\M_Block_1_b_D051_CD3_I6_D9_2011-12-14_1102.P14

Combined with file (140):
Mercury surface tension (N/m): 0.46
Mercury contact angle (°): 140.0
Test filling volume (mm³): 467.0
Starting hydr. press. of test (MPa): 0.0125
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 185.39
Corrected weight (Dil.+Hgr+Sample) (g): 185.119

ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 23.1
Mercury density @ test (g/cm³): 13.5387

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 13-09-11
Blank filename: C:\Solid\instr2\Blank\BK_D051_CD3P_I6_D8_2011-09-13_1522.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank increase speed: 6 Pascal
Blank decrease speed: 8 Pascal
Blank decrease method: Pascal
Dil. number: 51
Dil. type: CD3P
Dil. cone length (mm): 23
Dil. electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1.5
Dil. weight (g): 58.5566
Temperature of blank (°C): 28
Mercury density @ blank (g/cm³): 13.5267
Blank filling volume (mm³): 447
Starting hydr. blank press (MPa): 0.012164
(Dil+Hg) weight (g): 171.3368

ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_Block_1_b
 Comment

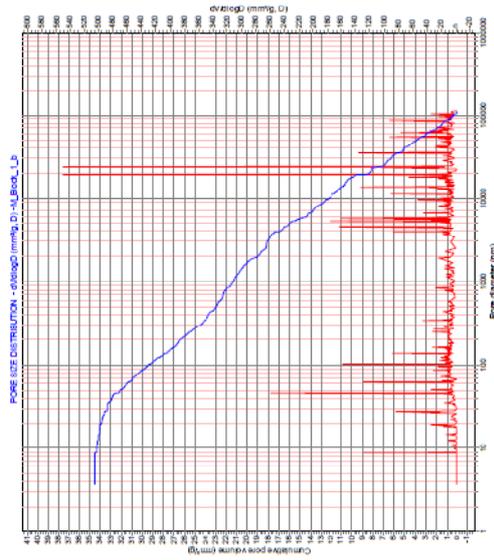
Report date: 11-01-12



ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_Block_1_b

Report date: 11-01-12

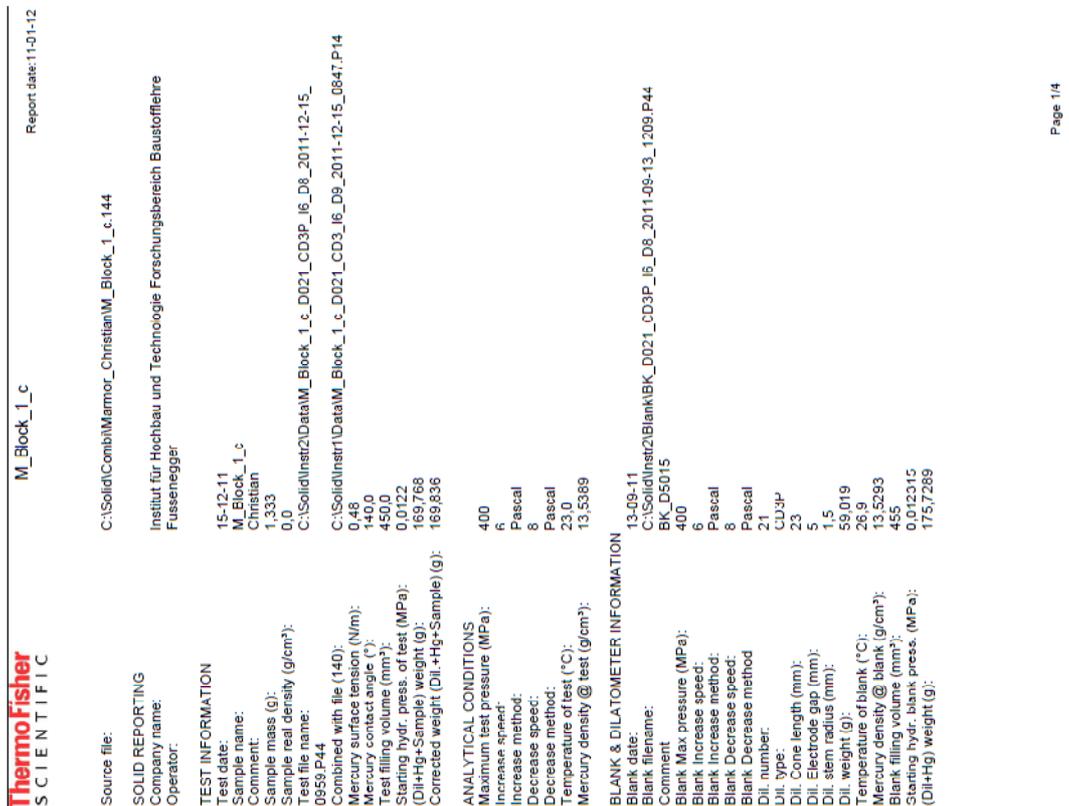
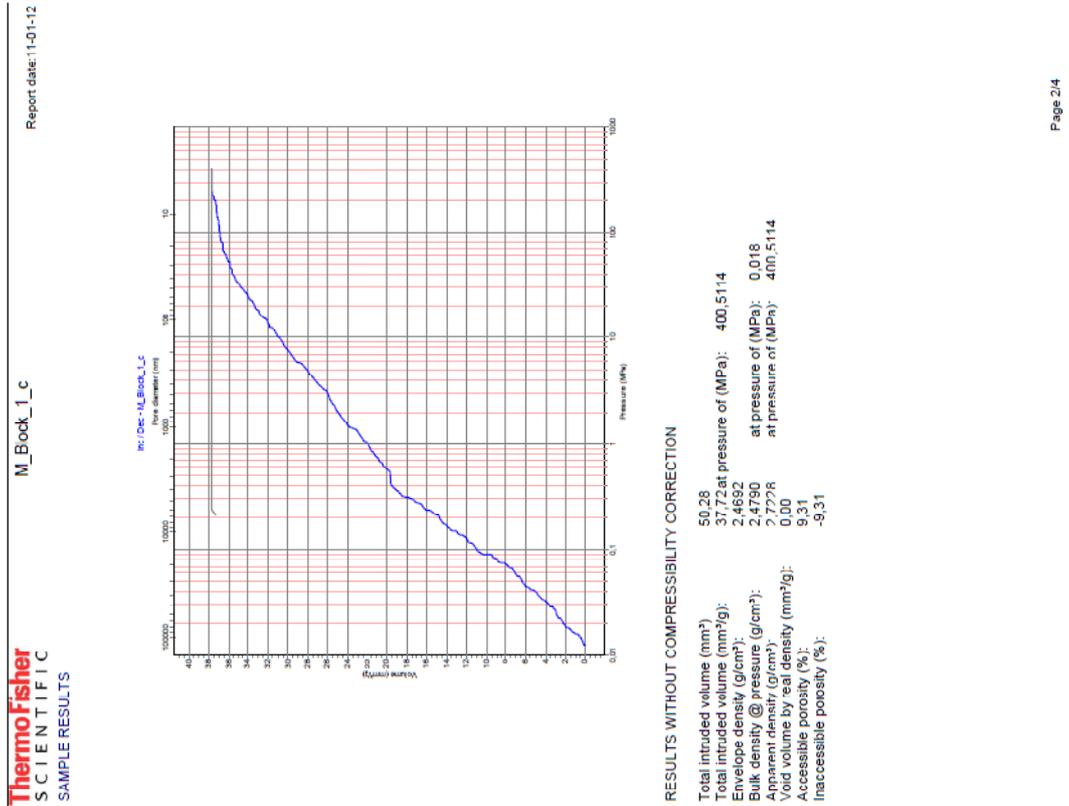


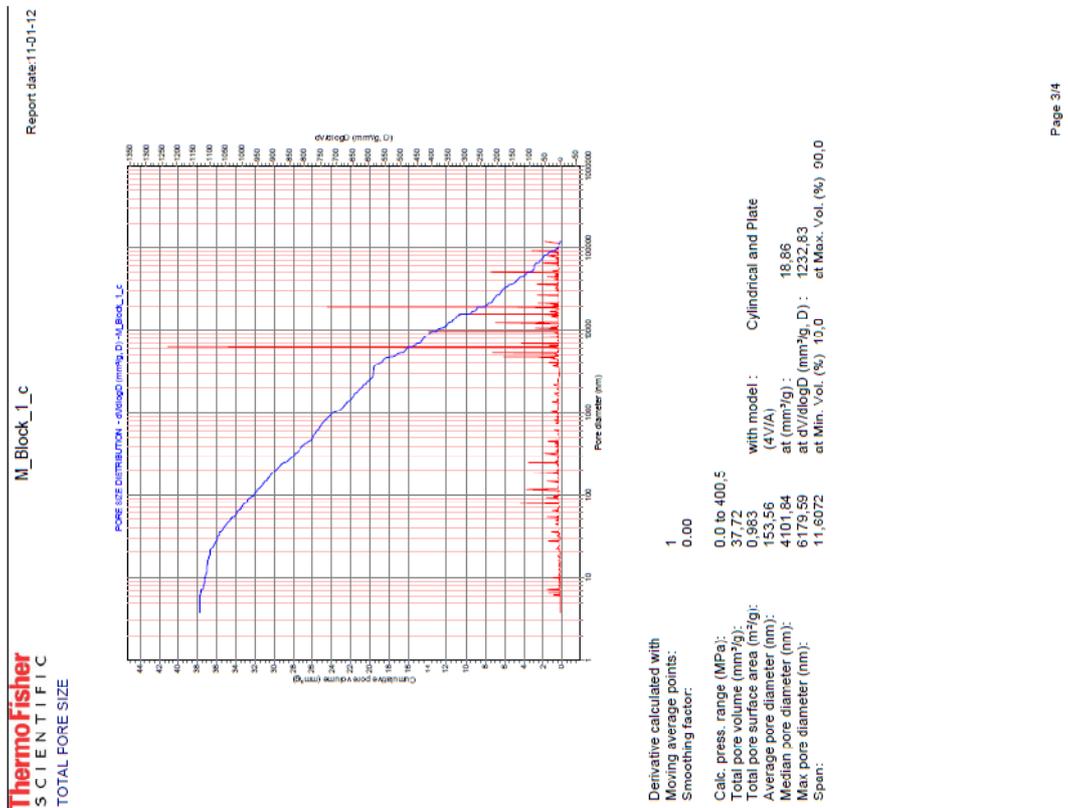
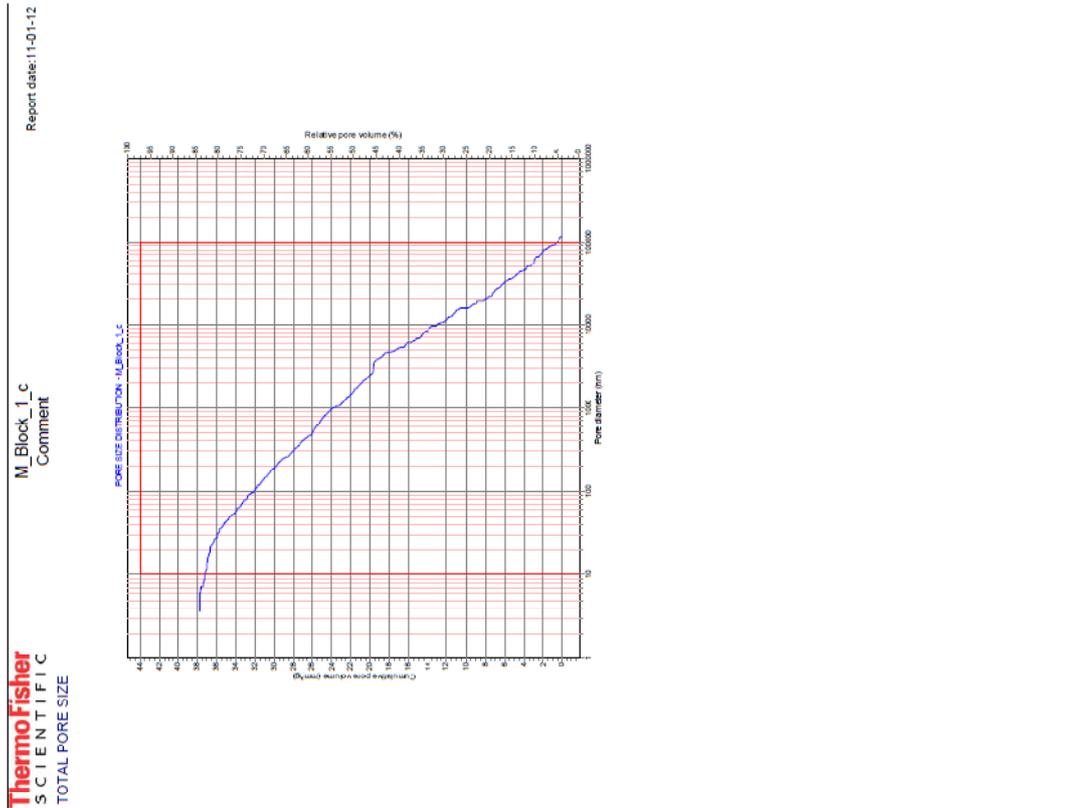
Derivative calculated with
 Moving average points: 1
 Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 400.6
 Total pore volume (mm³/g): 34.49
 Total pore surface area (m²/g): 0.7172
 Average pore diameter (nm): 182.52
 Median pore diameter (nm): 3944.02
 Max. pore diameter (nm): 24419.81
 Span: 13.9962

with model: Cylindrical and Plate
 (4/1A)
 at (mm³/g): 17.25
 at dV/dlogD (mm³/g, D): 551.24
 at Min. Vol. (%) 10.0 at Max. Vol. (%) 90.0

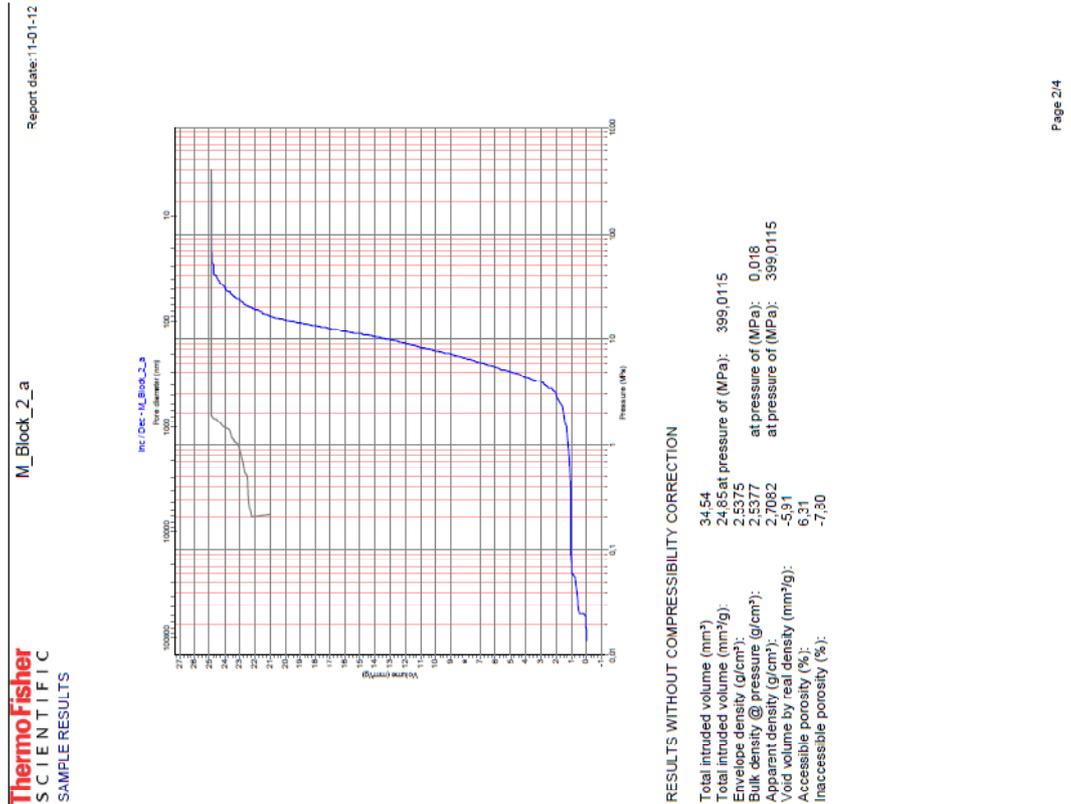
Probe c:





12.7.4. Leithakalk aus Kaisersteinbruch – Block II

Probe a:



Report date: 11-01-12

M_Block_2_a

ThermoFisher
SCIENTIFIC
SAMPLE RESULTS

Source file: C:\SolidCombiMarmor_Christian\M_Block_2_a_144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION
Test date: 16-12-11
Sample name: M_Block_2_a
Comment: Christian
Sample mass (g): 1.39
Sample real density (g/cm³): 2.5
Test file name: C:\SolidInstr2\data\M_Block_2_a_D016_CD3P_I6_D8_2011-12-16_0911.P44
Combined with file (140): C:\SolidInstr1\data\M_Block_2_a_D016_CD3P_I6_D8_2011-12-15_1316.P14
Mercury surface tension (l/m): 0.48
Mercury contact angle (°): 140.0
Test filling volume (mm³): 465.0
Starting hydr. press. or test (MPa): 0.0125
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 176.772
Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 176.501

ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 23.2
Mercury density @ test (g/cm³): 13.5384

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 06-05-10
Blank filename: C:\SolidInstr2\Blank\BK_D016_CD3P_I6_D8_2010-05-06_1140.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank increase speed: 6 Pascal
Blank decrease speed: 8 Pascal
Blank decrease method: Pascal
Dil. number: 16
Dil. type: CD3p
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1.5
Dil. weight (g): 59.9918
Temperature of blank (°C): 26
Mercury density @ blank (g/cm³): 13.5316
Blank filling volume (mm³): 445
Starting hydr. blank press. (MPa): 0.012126
(Dil+Hg) weight (g): 182.4655

RESULTS WITHOUT COMPRESSIBILITY CORRECTION
Total introduced volume (mm³) 34.54
Total introduced volume (mm³/g) 24.65
Envelope density @ pressure (g/cm³) 2.5377 at pressure of (MPa) 0.016
Apparent density (g/cm³) 2.7062 at pressure of (MPa) 399.0115
Void volume by real density (mm³/g) -5.91
Accessible porosity (%) 6.31
Inaccessible porosity (%) -7.30

Report date: 11-01-12

M_Block_2_a

ThermoFisher
SCIENTIFIC
SAMPLE RESULTS

Report date: 11-01-12

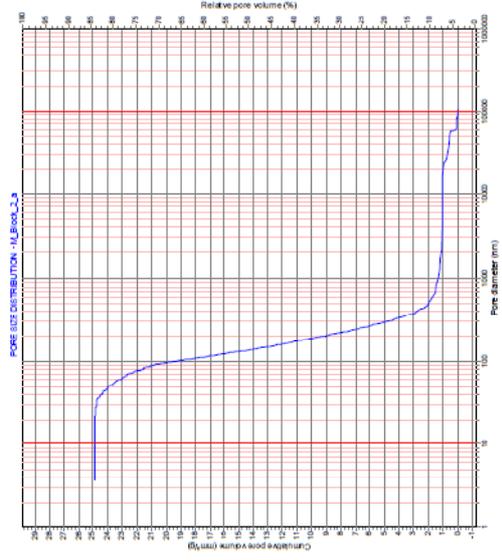
M_Block_2_a

ThermoFisher
SCIENTIFIC
SAMPLE RESULTS

ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_Block_2_a
 Comment

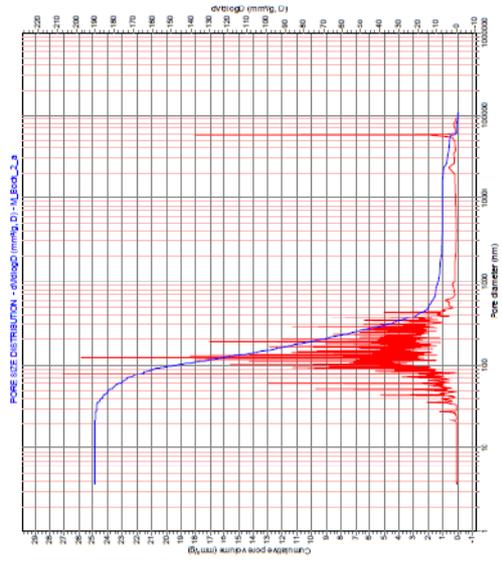
Report date: 11-01-12



ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_Block_2_a

Report date: 11-01-12

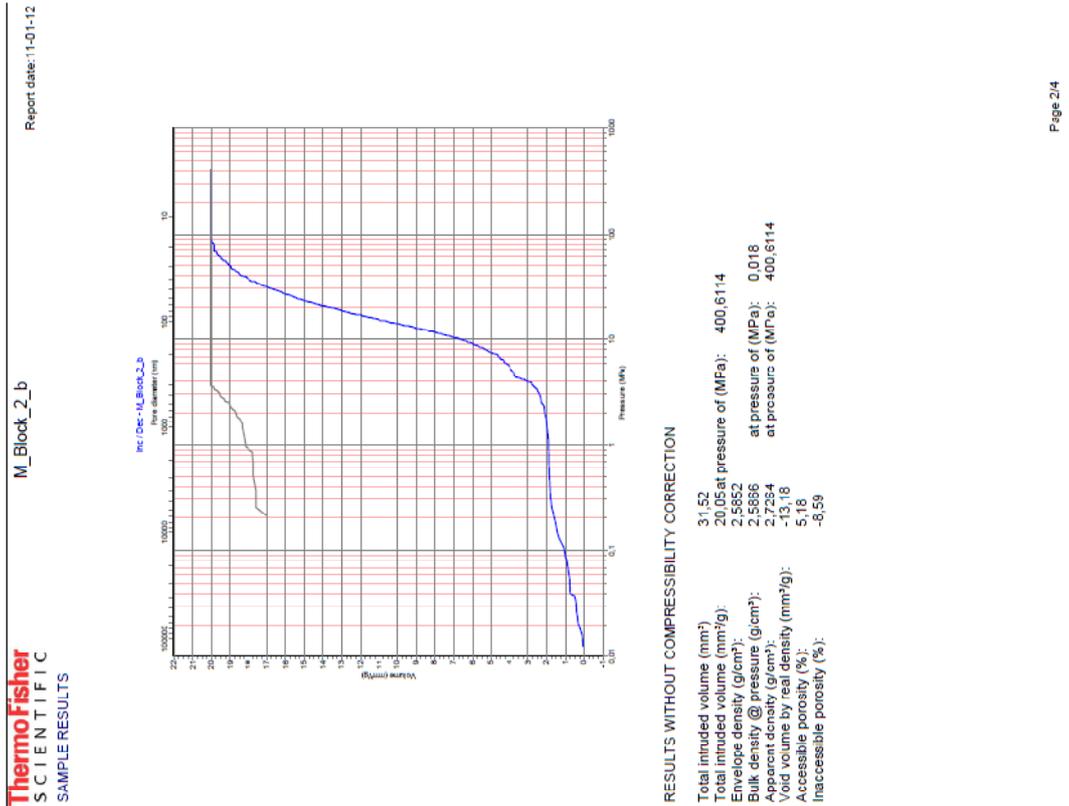


Derivative calculated with
 Moving average points: 1
 Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 399.0
 Total pore volume (mm³/g): 24.95
 Total pore surface area (m²/g): 0.746
 Average pore diameter (nm): 133.18
 Median pore diameter (nm): 155.17
 Max. pore diameter (nm): 77.81
 Span: 2.307

with model: Cylindrical and Plate
 (4V/A)
 at (mm³/g): 12.42
 at dV/dlogD (mm³/g, D): 207.37
 at Min. Vol. (%) 10.0 at Max. Vol. (%) 90.0

Probe b:



ThermoFisher
S C I E N T I F I C

M_Block_2_b

Report date: 11-01-12

Source file: C:\Solid\CombiMarmor_ChristianM_Block_2_b.144

SOLID REPORTING Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre

Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION

Test date: 16-12-11

Sample name: M_Block_2_b

Comment: Christian

Sample mass (g): 1.5723

Sample real density (g/cm³): 2.5

Test file name: C:\Solid\Insr2\data\M_Block_2_b_D021_CD03P_I6_D8_2011-12-16_1222.P44

Combined with file (140): C:\Solid\Insr1\data\M_Block_2_b_D021_CD03_I6_D9_2011-12-16_1056.P14

Mercury surface tension (N/m): 0.48

Mercury contact angle (°): 140.0

Test filling volume (mm³): 450.0

Starting hydr. press. or test (MPa): 0.0122

(DI+Hg-Sample) weight (g): 169.06

Corrected weight (DI+Hg-Sample) (g): 169.148

ANALYTICAL CONDITIONS

Maximum test pressure (MPa): 400

Increase speed: 6 Pasal

Increase method: 8

Decrease speed: Pasal

Decrease method: Pasal

Temperature of test (°C): 23.1

Mercury density @ test (g/cm³): 13.5387

BLANK & DILATOMETER INFORMATION

Blank date: 13-09-11

Blank filename: C:\Solid\Insr2\Blank\BK_D021_CD03P_I6_D8_2011-09-13_1209.P44

Comment: BK_D5015

Blank Max pressure (MPa): 400

Blank increase speed: 6 Pasal

Blank increase method: 8

Blank decrease speed: Pasal

Blank decrease method: Pasal

Dil. number: 21

Dil. type: CD3P

Dil. Cone length (mm): 23

Dil. stem radius (mm): 5

Dil. weight (g): 1.5

Temperature of blank (°C): 59.019

Mercury density @ blank (g/cm³): 26.9

Blank filling volume (mm³): 13.5393

Starting hydr. blank press. (MPa): 455

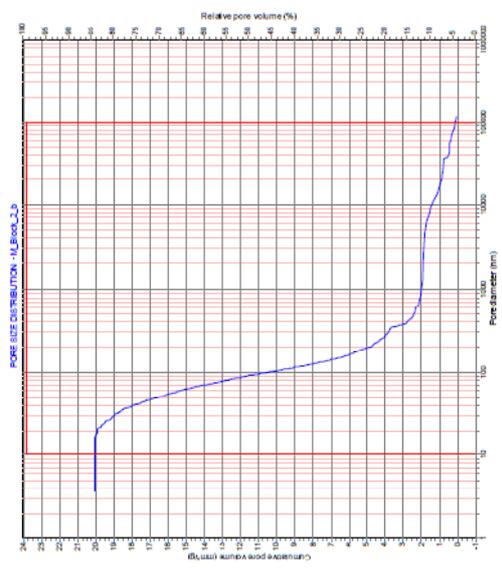
(DI+Hg) weight (g): 0.01215

(DI+Hg) weight (g): 175.7289

ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_Block_2_b
 Comment

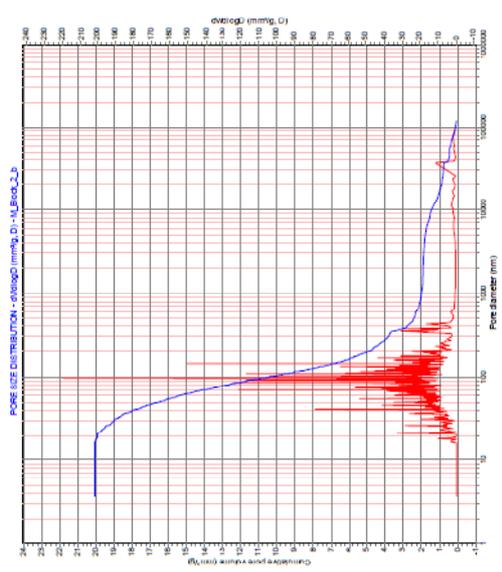
Report date: 11/01/12



ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_Block_2_b

Report date: 11/01/12



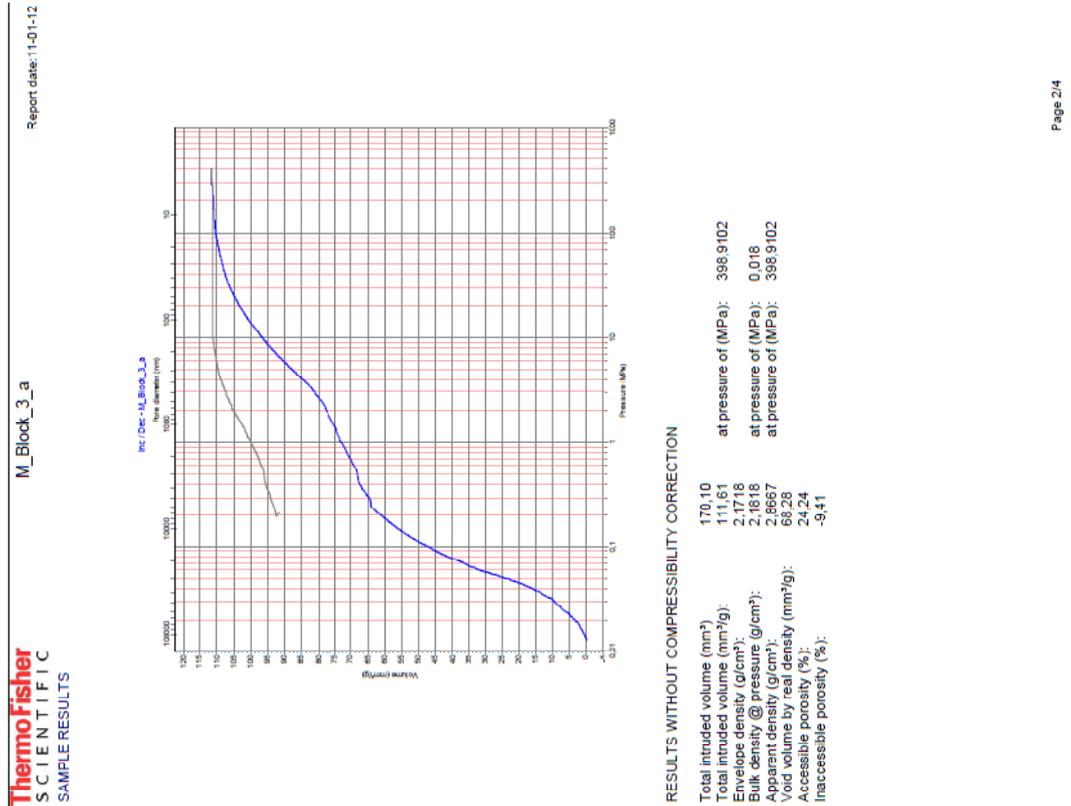
Derivative calculated with
 Moving average points: 1
 Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 400.5
 Total pore volume (mm³/g): 20.05
 Total pore surface area (m²/g): 0.968
 Average pore diameter (nm): 83.05
 Median pore diameter (nm): 103.14
 Max pore diameter (nm): 96.88
 Span: 8,889

with model: Cylindrical and Plate
 (4/1A)
 at (mm³/g): 10.02
 at d/dlogD (mm³/g, D): 220.09
 at Min. Vol. (%) 10.0 at Max. Vol. (%) 90.0

12.7.5. Leithakalk aus Kaisersteinbruch – Block III

Probe a:



ThermoFisher SCIENTIFIC

M_Block_3_a
Report date: 11-01-12

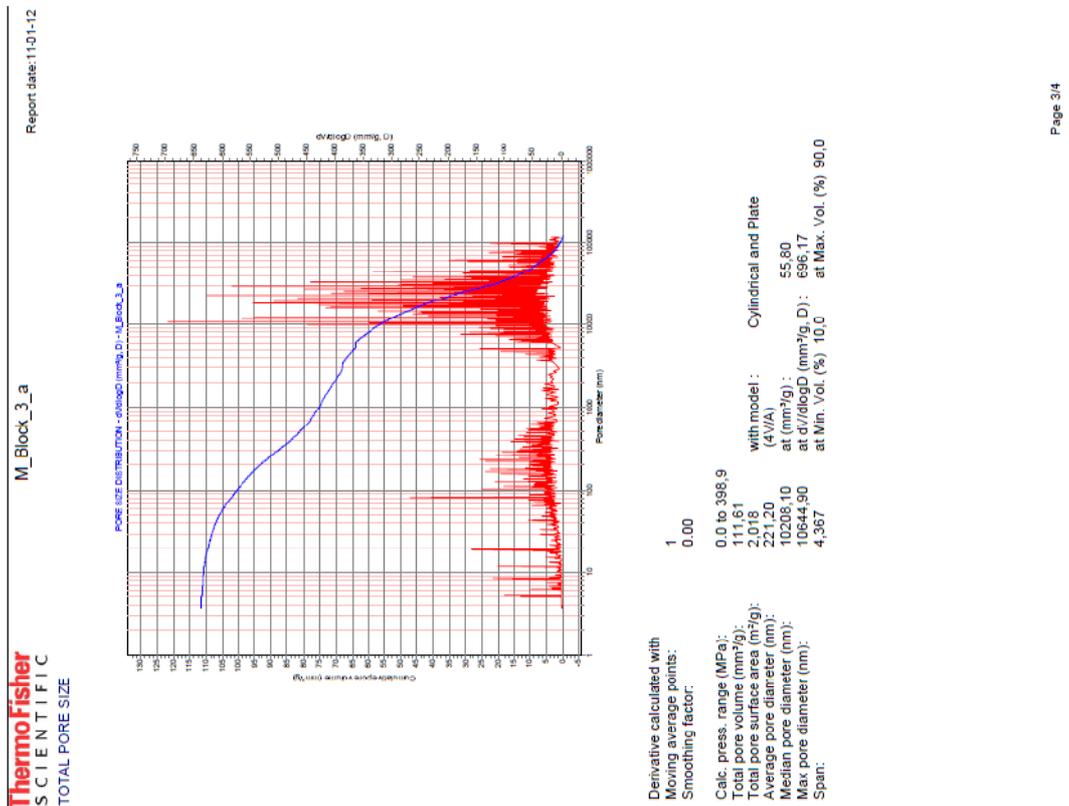
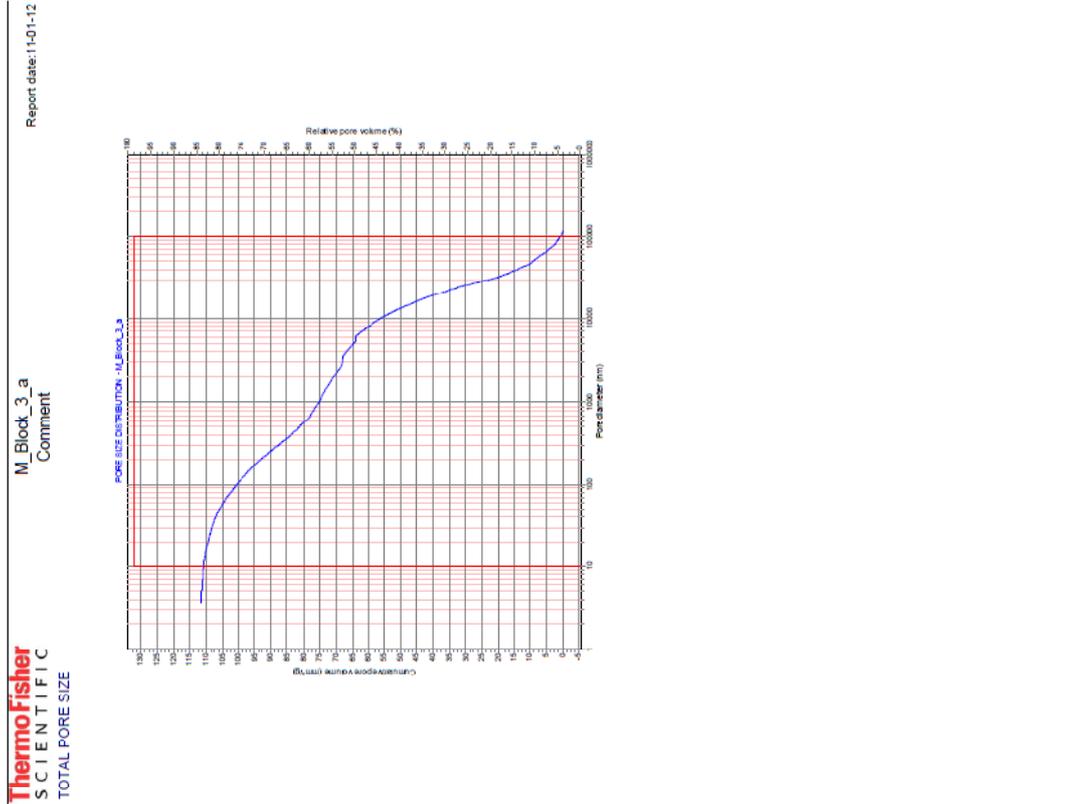
Source file: C:\SolidCombiMarmor_Christian\M_Block_3_a_144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

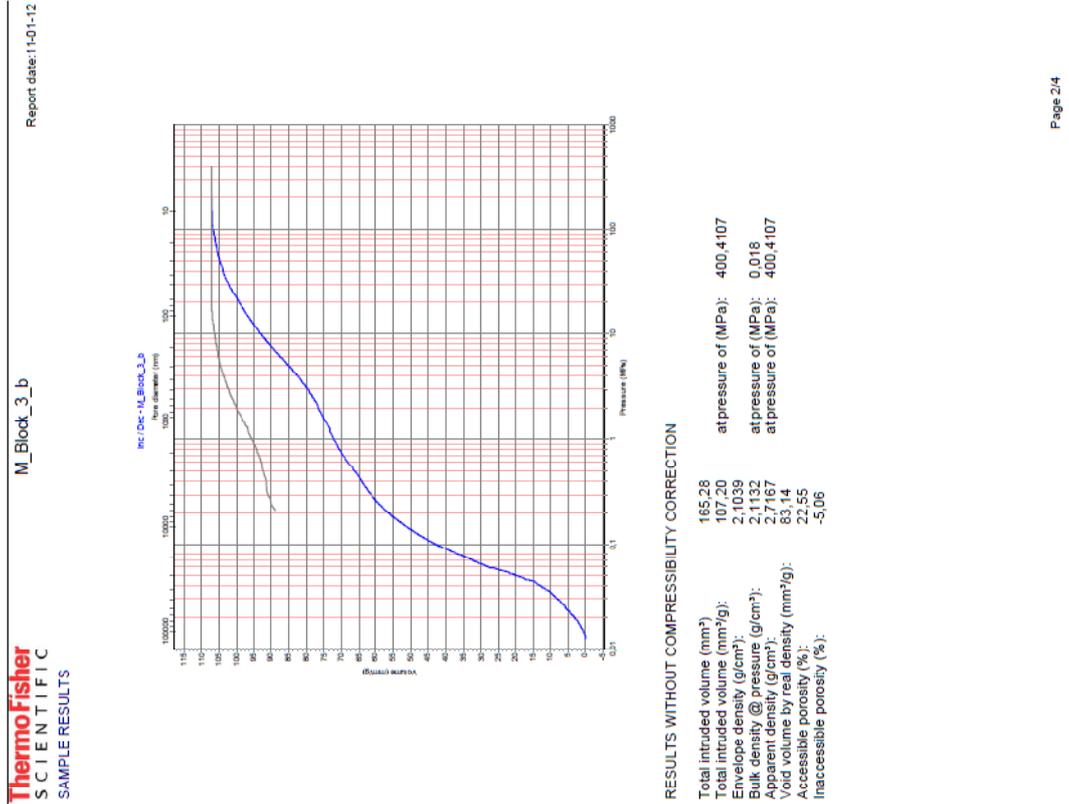
TEST INFORMATION
Test date: 19-12-11
Sample name: M_Block_3_a
Comment: Christian
Sample mass (g): 1.5241
Sample real density (g/cm³): 2.155
Test file name: C:\SolidInstr2\data\M_Block_3_a_D051_CD3P_I6_D8_2011-12-16_1332.P44
Combined with file (140): C:\SolidInstr1\data\M_Block_3_a_D051_CD3_I6_D8_2011-12-16_1227.P14
Mercury surface tension (N/m): 0.48
Mercury contact angle (°): 140.0
Test filling volume (mm³): 437.0
Starting hydr. press. or test (MPa): 0.012
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 163.325
Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 163.46

ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 23.1
Mercury density @ test (g/cm³): 13.5387

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 13-09-11
Blank filename: C:\SolidInstr2\Blank\BK_D051_CD3P_I6_D8_2011-09-13_1522.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank increase speed: 6 Pascal
Blank decrease speed: 8 Pascal
Blank decrease method: Pascal
Dil. number: 51
Dil. type: CD3p
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1.5
Dil. weight (g): 56.5566
Temperature of blank (°C): 28
Mercury density @ blank (g/cm³): 13.5267
Blank filling volume (mm³): 447
Starting hydr. blank press. (MPa): 0.012164
(Dil+Hg) weight (g): 171.3368



Probe b:



ThermoFisher SCIENTIFIC M_Block_3_b Report date: 11-01-12

Source file: C:\SolidInstr2\data\Marmor_Christian\M_Block_3_b_144

SOLID REPORTING
 Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
 Operator: Fussenegger

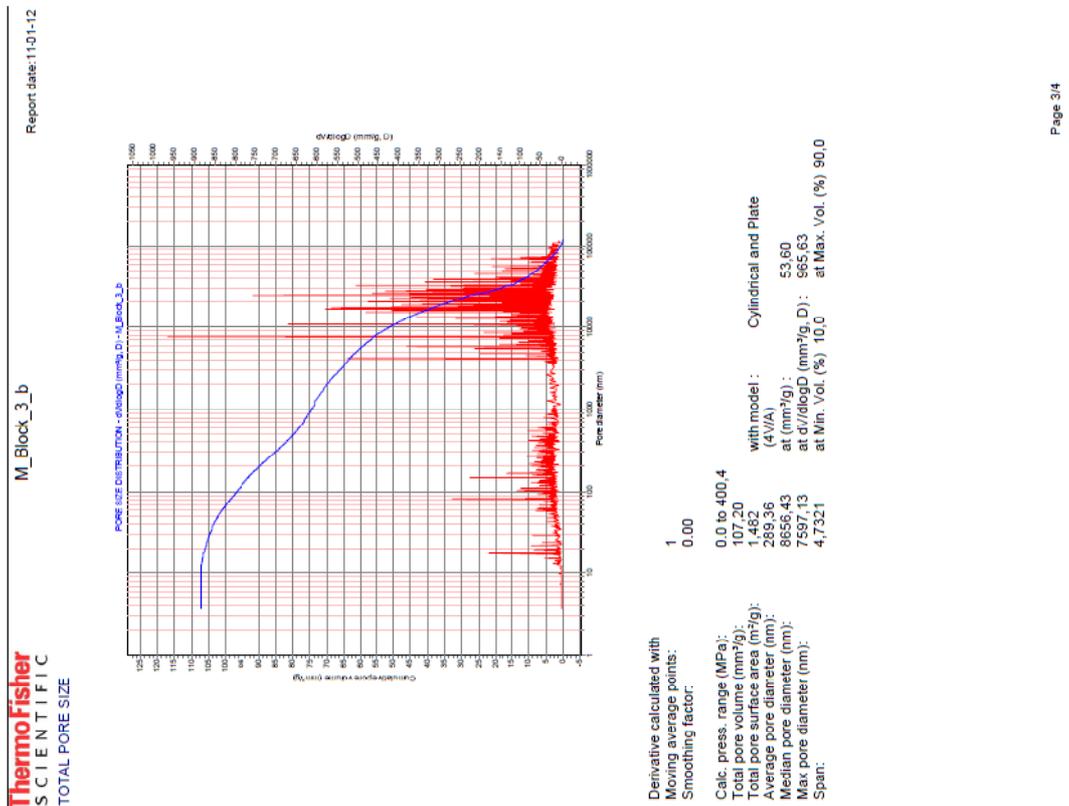
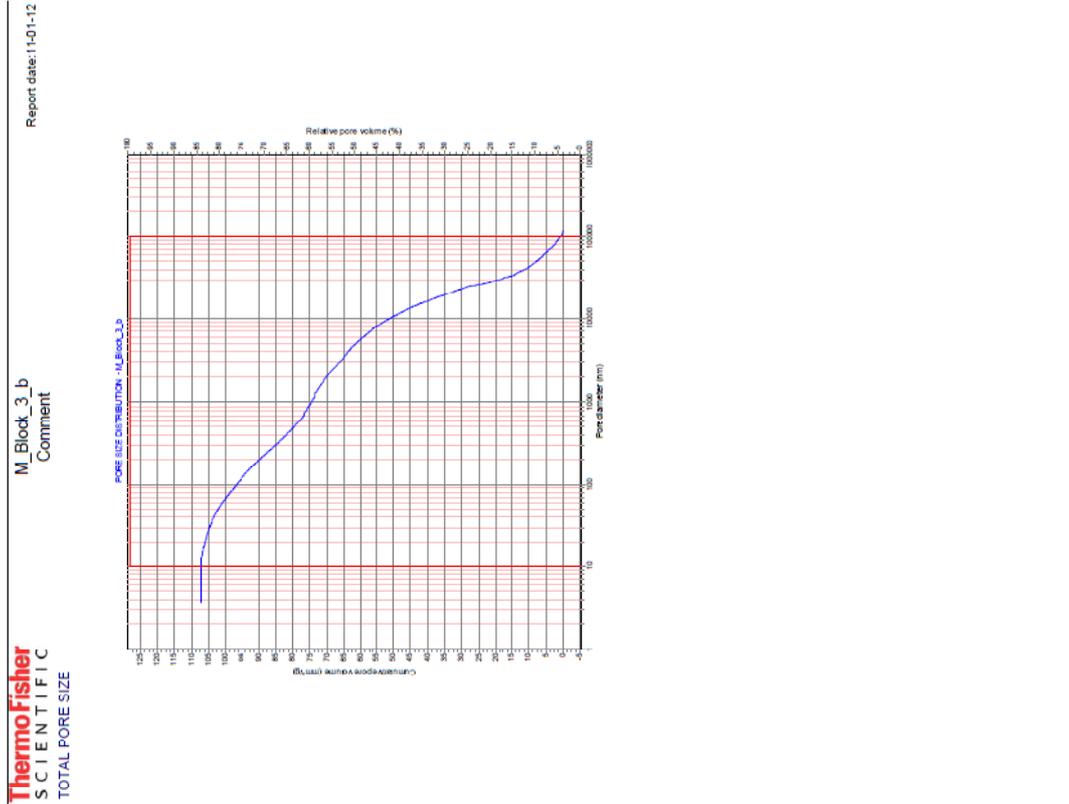
TEST INFORMATION
 Test date: 19-12-11
 Sample name: M_Block_3_b
 Comment: Christian
 Sample mass (g): 1,5418
 Sample real density (g/cm³): 2,65
 Test file name: C:\SolidInstr2\data\M_Block_3_b_D5015_CD3P_I6_D8_2011-12-19_0938.P44
 Combined with file (140): C:\SolidInstr1\data\M_Block_3_b_D5015_CD3_I6_D9_2011-12-16_1340.P14

Mercury surface tension (N/m): 0.48
 Mercury contact angle (°): 140.0
 Test filling volume (mm³): 457.0
 Starting hydr. press. of test (MPa): 0.0124
 (DI+Hg+Sample) weight (g): 188.368
 Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 188.409

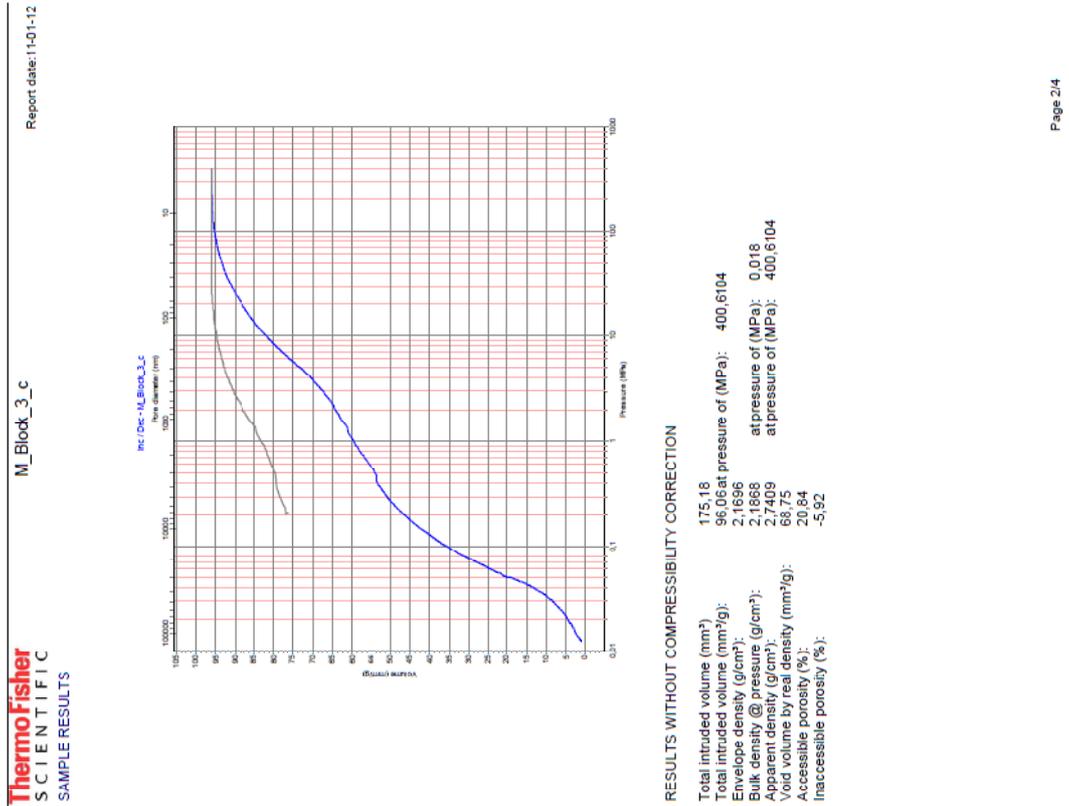
ANALYTICAL CONDITIONS
 Maximum test pressure (MPa): 400
 Increase speed: 6 Pascal
 Decrease method: 8
 Decrease speed: 8 Pascal
 Temperature of test (°C): 23.1
 Mercury density @ test (g/cm³): 13.5387

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
 Blank date: 14-09-11
 Blank filename: C:\SolidInstr2\Blank\BK_D5015_CD3P_I6_D8_2011-09-14_1117.P44
 Comment: BK_D5015
 Blank Max pressure (MPa): 400
 Blank increase speed: 6 Pascal
 Blank decrease method: 8
 Blank decrease speed: 8 Pascal
 Dil. number: 5015
 Dil. type: CD3P
 Dil. Cone length (mm): 23
 Dil. Electrode gap (mm): 5
 Dil. stem radius (mm): 1.5
 Dil. weight (g): 60.0767
 Temperature of blank (°C): 27.1
 Mercury density @ blank (g/cm³): 45.3209
 Blank filling volume (mm³): 480.2409
 Starting hydr. blank press. (MPa): 0.012409
 (DI+Hg) weight (g): 176.7058

RESULTS WITHOUT COMPRESSIBILITY CORRECTION
 Total intruded volume (mm³): 165.28
 Envelope density (mm³/g): 107.20
 Bulk density @ pressure (g/cm³): 2.1039
 Apparent density (g/cm³): 2.1132
 Void volume by real density (mm³/g): 27.167
 Accessible porosity (%): 83.14
 Inaccessible porosity (%): -5.06
 at pressure of (MPa): 400.4107
 at pressure of (MPa): 0.018
 at pressure of (MPa): 400.4107



Probe c:



ThermoFisher Scientific

M_Block_3_c
Report date: 11-01-12

Source file: C:\SolidInstr2\data\Marmor_ChristianM_Block_3_c_144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION
Test date: 19-12-11
Sample name: M_Block_3_c
Comment: Christian
Sample mass (g): 1.8236
Sample real density (g/cm³): 2.165
Test file name: C:\SolidInstr2\data\M_Block_3_c_0021_CD3P_I6_D8_2011-12-19_1413.P44
Combined with file (140): C:\SolidInstr1\data\M_Block_3_c_0021_CD3P_I6_D9_2011-12-19_1129.P14

Mercury surface tension (N/m): 0.46
Mercury contact angle (°): 140.0
Test filling volume (mm³): 453.0
Starting hydr. press. of test (MPa): 0.0123
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 186.227
Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 186.254

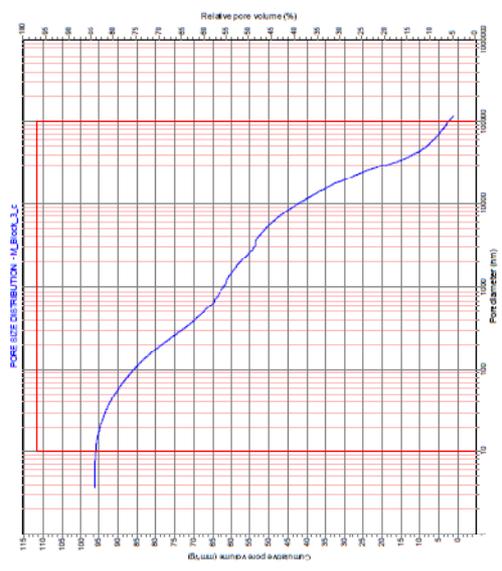
ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease method: 8
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 23.1
Mercury density @ test (g/cm³): 13.5387

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 13-00-11
Blank filename: C:\SolidInstr2\Blank\BK_D021_CD3P_I6_D8_2011-08-13_1209.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank Increase speed: 6 Pascal
Blank Decrease method: 8
Blank Decrease speed: 8 Pascal
Dil. number: 21
Dil. type: CD3P
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1.5
Dil. weight (g): 59.019
Temperature of blank (°C): 26.9
Mercury density @ blank (g/cm³): 13.5293
Blank filling volume (mm³): 45.5
Starting hydr. blank press. (MPa): 0.012315
(Dil+Hg) weight (g): 175.7289

ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_Block_3_c
 Comment

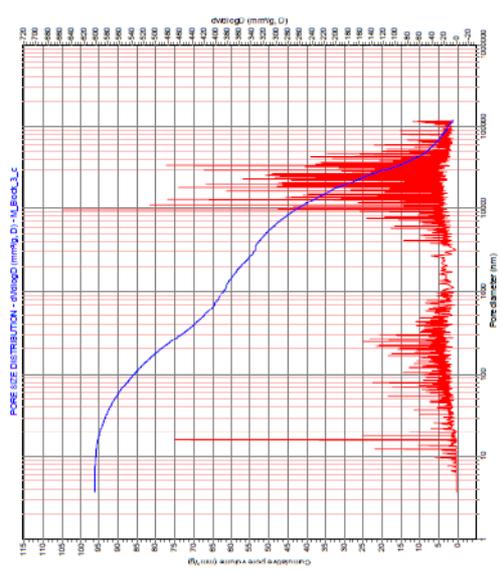
Report date: 11/01/12



ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_Block_3_c

Report date: 11/01/12



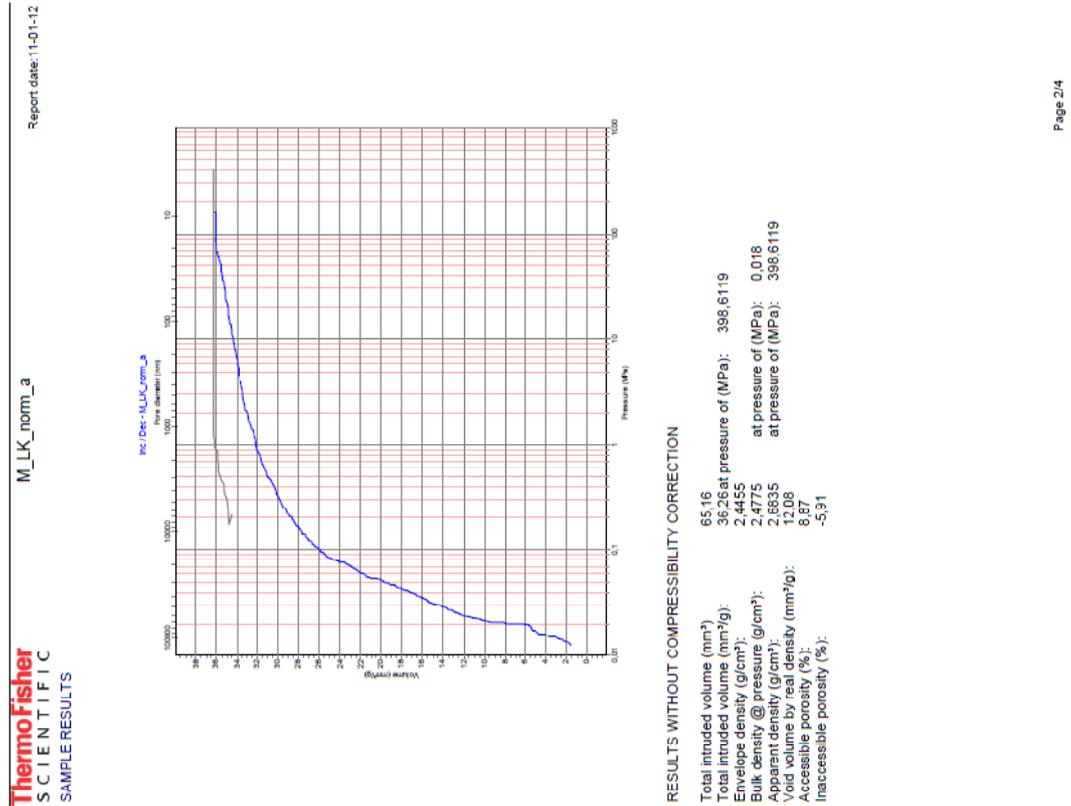
Derivative calculated with
 Moving average points: 1
 Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 400.5
 Total pore volume (mm³/g): 96.06
 Total pore surface area (m²/g): 1,393
 Average pore diameter (nm): 241.14
 Median pore diameter (nm): 6490.67
 Max. pore diameter (nm): 9465.66
 Span: 6,9947

with model: Cylindrical and Plate
 (4/VA)
 at (mm³/g): 48.03
 at d10/d90 (mm³/g, D): 655.74
 at Min. Vol. (%) 10.0 at Max. Vol. (%) 90.0

12.7.6. Leithakalk aus Kaisersteinbruch – Block IV (normal)

Probe a:



ThermoFisher Scientific
M_LK_norm_a
Report date: 11-01-12

Source file: C:\SolidCombiMarmor_Christian\M_LK_norm_a_144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION
Test date: 29-12-11
Sample name: M_LK_norm_a
Comment: Christian
Sample mass (g): 1.7969
Sample real density (g/cm³): 2.452
Test file name: C:\SolidInstr2\data\M_LK_norm_a_D021_CD3P_I6_D8_2011-12-29_0953.P44
Combined with file (140): C:\SolidInstr1\data\M_LK_norm_a_D021_CD3_I6_D8_2011-12-28_1145.P14

Mercury surface tension (N/m): 0.48
Mercury contact angle (°): 140.0
Test filling volume (mm³): 462.0
Starting hydr. press. of test (MPa): 0.0124
Staring hydr. Sample weight (g): 187.659
Corrected weight (Dil.+Hgr+Sample) (g): 187.564

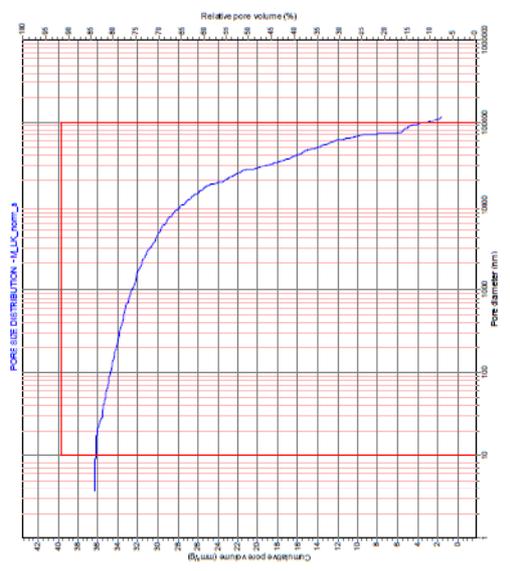
ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 28.0
Mercury density @ test (g/cm³): 13.5267

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank file: 13.09-11
Blank filename: C:\SolidInstr2\Blank\BK_D021_CD3P_I6_D8_2011-09-13_1209.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank increase speed: 6 Pascal
Blank decrease speed: 8 Pascal
Blank decrease method: Pascal
Dil. number: 21
Dil. type: CL3P
Dil. Core length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1.5
Dil. weight (g): 58.019
Temperature of blank (°C): 28.0
Mercury density @ blank (g/cm³): 13.5293
Blank filling volume (mm³): 465
Starting hydr. blank press. (MPa): 0.012515
(Dil+Hg) weight (g): 175.7289

ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_LK_norm_a
 Comment

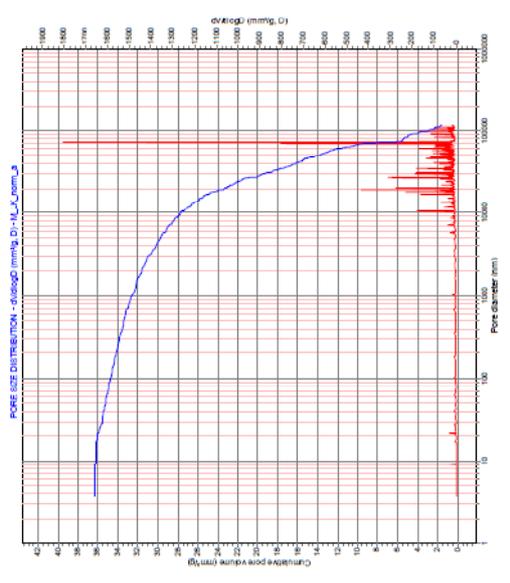
Report date: 11-01-12



ThermoFisher
SCIENTIFIC
TOTAL PORE SIZE

M_LK_norm_a

Report date: 11-01-12

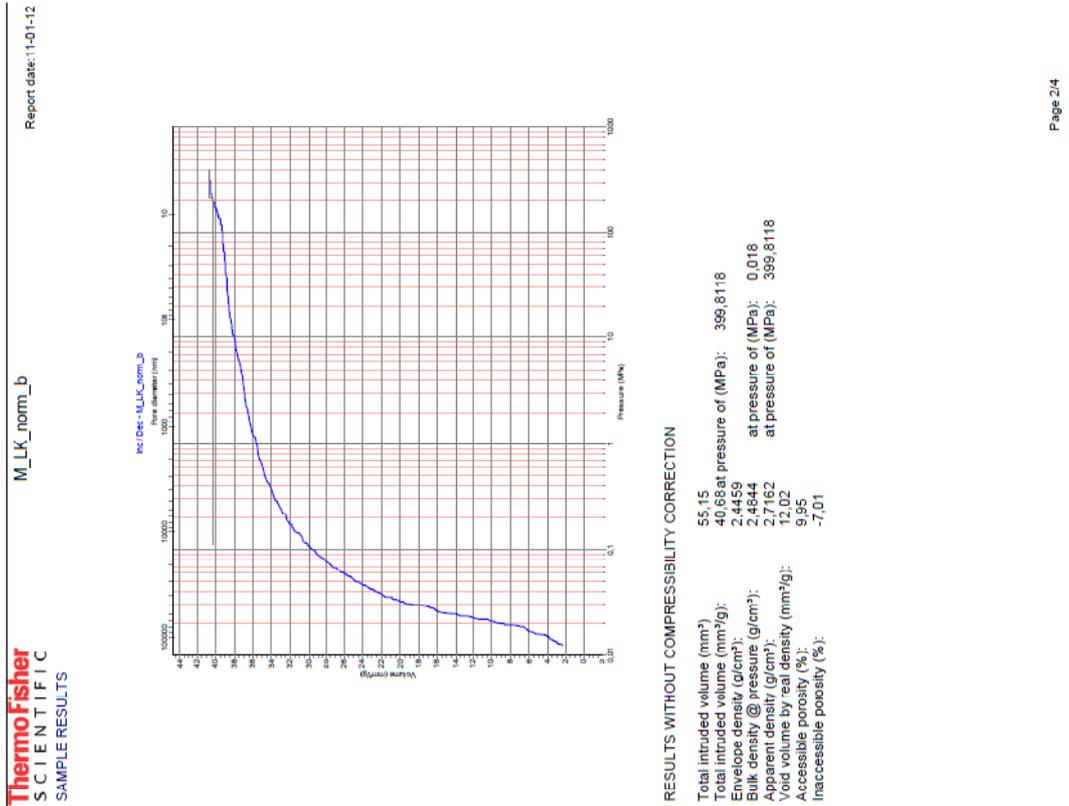


Derivative calculated with
 Moving average points: 1
 Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 398.6
 Total pore volume (mm³/g): 36.28
 Total pore surface area (m²/g): 0.265
 Average pore diameter (nm): 546.17
 Median pore diameter (nm): 3557.43
 Max. pore diameter (nm): 72920.44
 Span: 2,8618

with model: Cylindrical and Plate
 (4/1A)
 at (mm³/g): 18.13
 at dV/dlogD (mm³/g, D): 1807.17
 at Min. Vol. (%) 10.0 at Max. Vol. (%) 90.0

Probe b:



ThermoFisher SCIENTIFIC

M_LK_norm_b

Report date: 11-01-12

Source file: C:\Solid\CombiMarmor_Christian\M_LK_norm_b.144

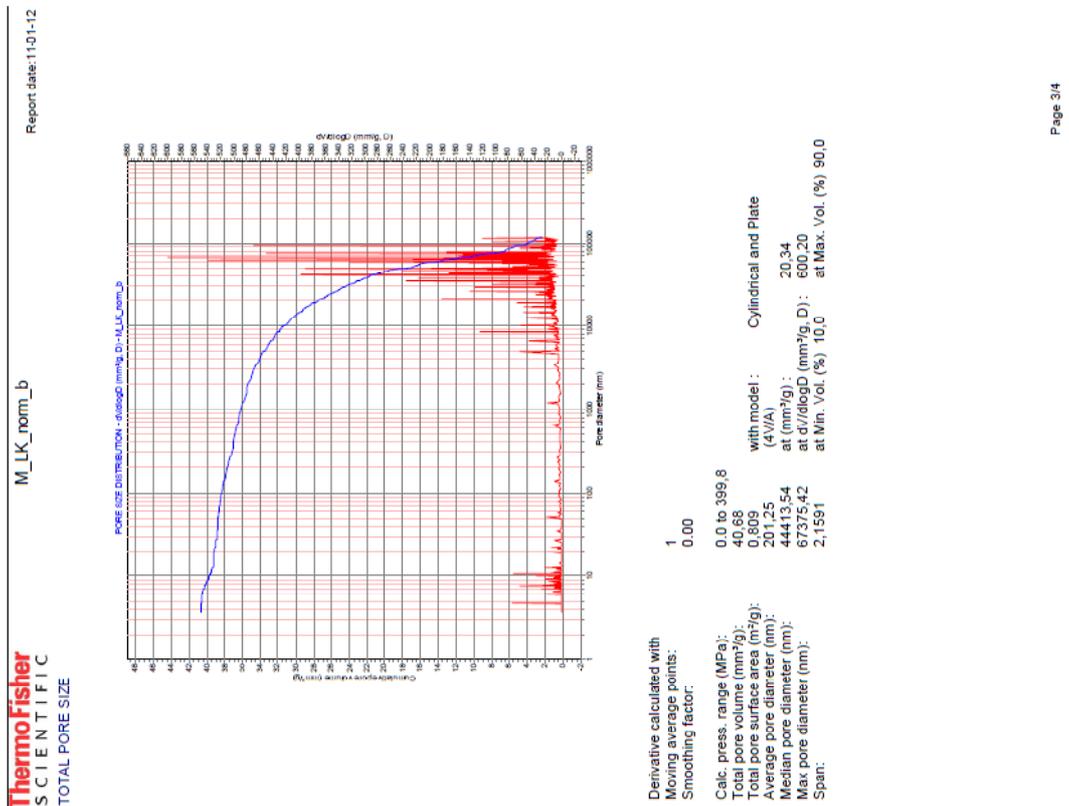
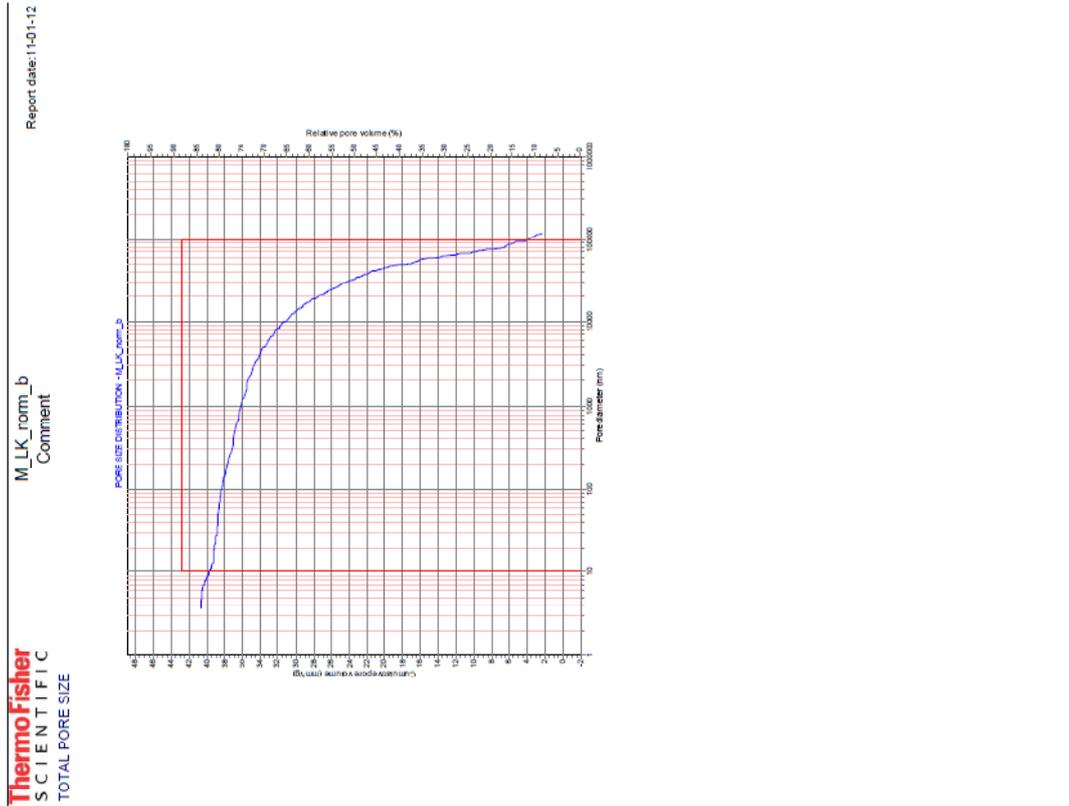
SOLID REPORTING Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION
Test date: 29-12-11
Sample name: M_LK_norm_b
Comment: Christian
Sample mass (g): 1.3557
Sample real density (g/cm³): 2.52
Test file name: C:\Solid\Instr2\data\M_LK_norm_b_D016_CD3p_i6_D8_2011-12-29_1058.P44
Combined with file (140): C:\Solid\Instr1\data\M_LK_norm_b_D016_CD3_i6_D8_2011-12-29_0958.P14

Mercury surface tension (N/m): 0.48
Mercury contact angle (°): 140.0
Test filling volume (mm³): 461.0
Starting hydr. press. or test (MPa): 0.0124
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 176.454
Corrected weight (Dil.+Hg+Sample) (g): 176.238

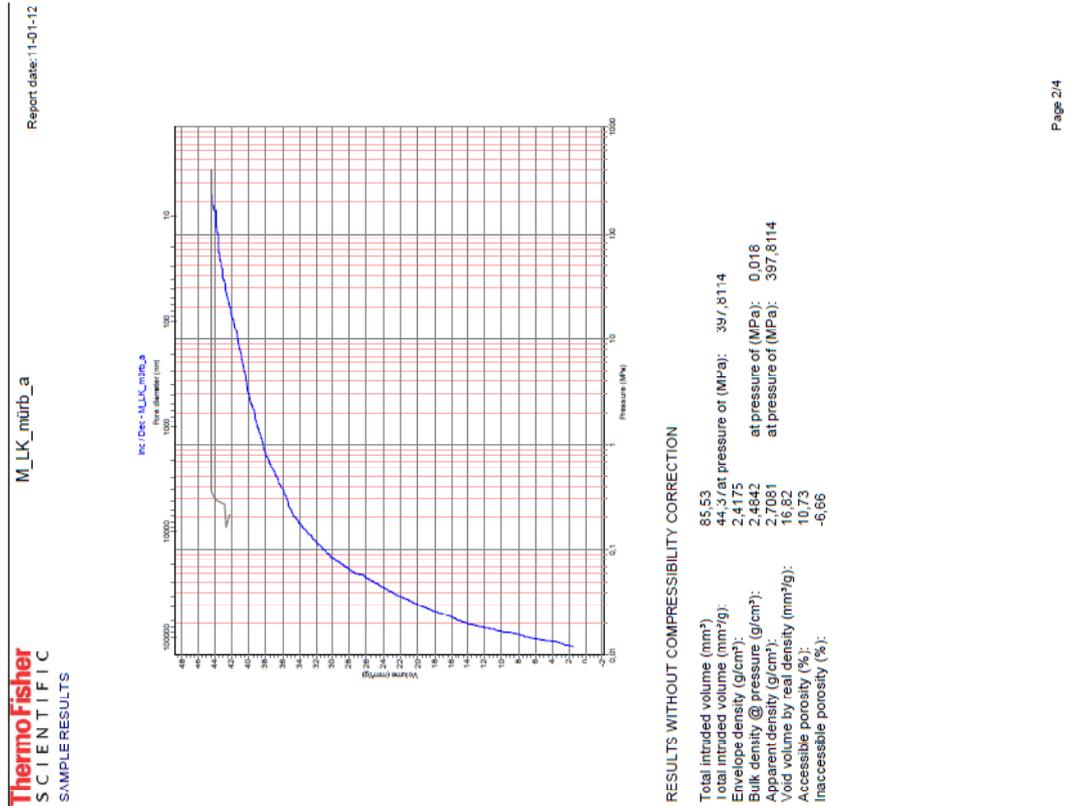
ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease method: 8
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 30.0
Mercury density @ test (g/cm³): 13.5218

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 06-05-10
Blank filename: C:\Solid\Instr2\Blank\BK_D016_CD3P_i6_D8_2010-05-06_1140.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank increase speed: 6 Pascal
Blank decrease method: 8
Blank Decrease speed: 8 Pascal
Dil. number: 16
Dil. type: CD3P
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1.5
Dil. weight (g): 59.9918
Temperature of blank (°C): 26
Mercury density @ blank (g/cm³): 13.5316
Blank filling volume (mm³): 445
Starting hydr. blank press. (MPa): 0.012126
(Dil+Hg) weight (g): 182.4655



12.7.7. Leithalk aus Kaisersteinbruch – Block IV (mürbe)

Probe a:



ThermoFisher Scientific

M_LK_mürb_a
Report date: 11-01-12

Source file: C:\SolidCombi\Marmor_Christian\M_LK_mürb_a_144

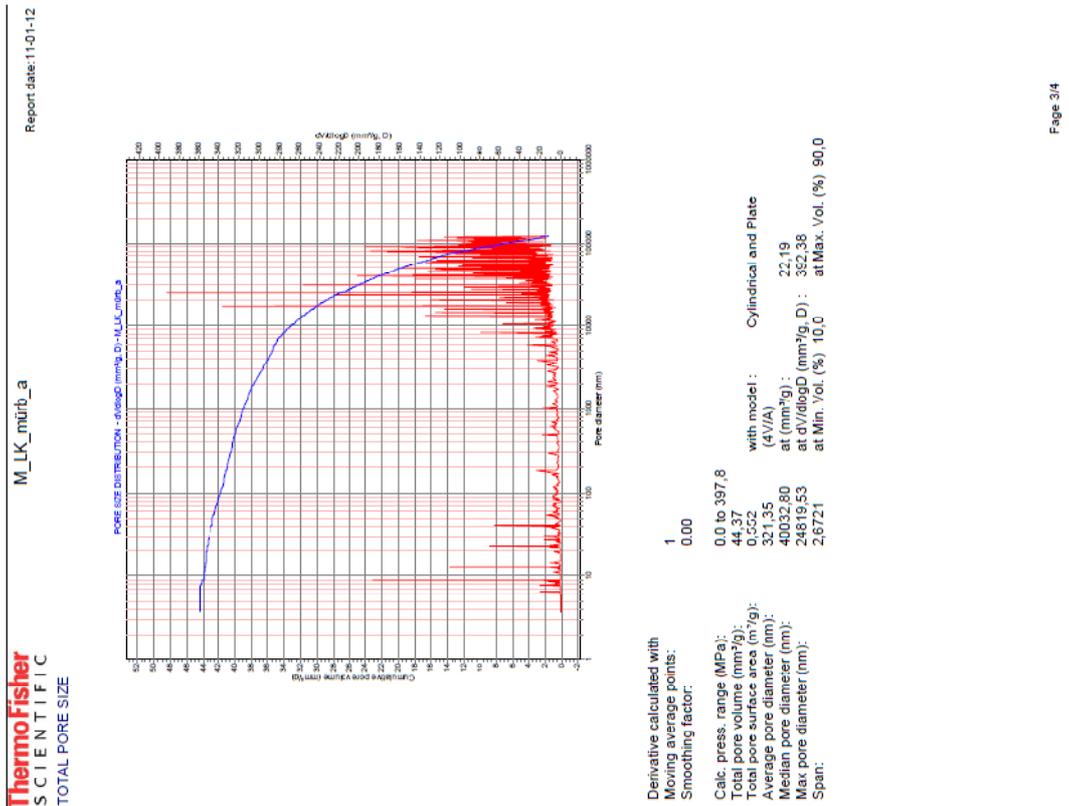
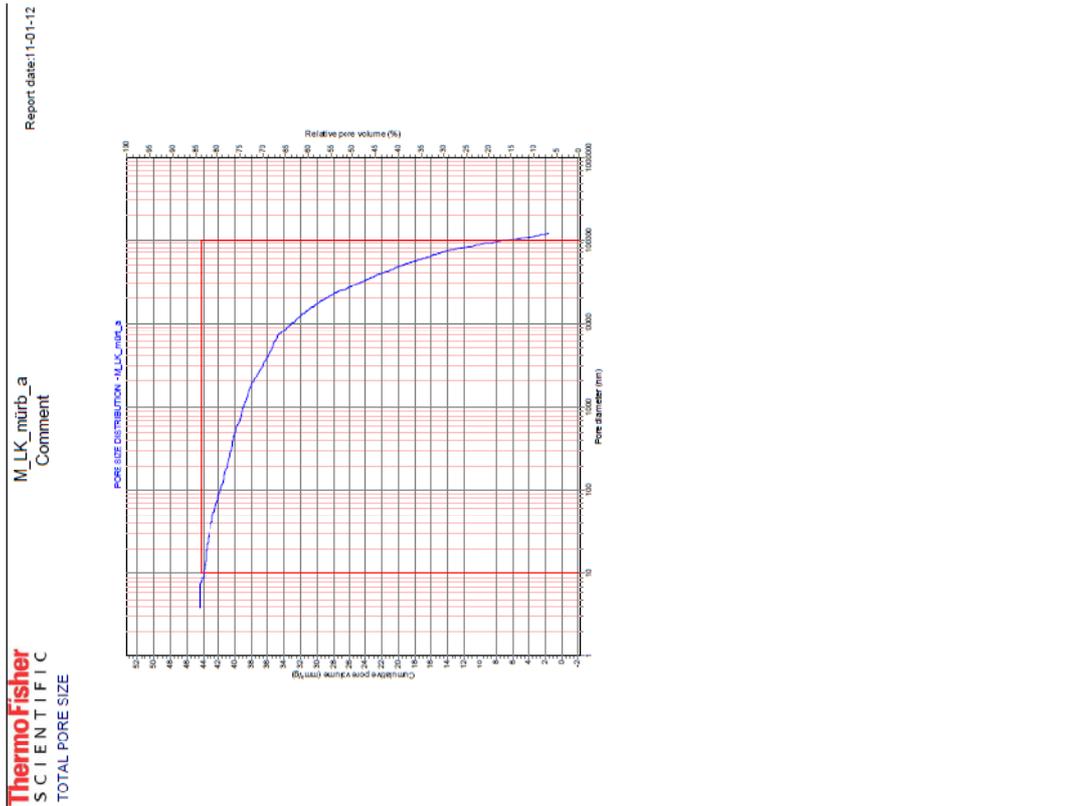
SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION
Test date: 21-12-11
Sample name: M_LK_mürb_a
Comment: Christian
Sample mass (g): 1.9277
Sample real density (g/cm³): 2.52
Test file name: C:\SolidInstr2\data\M_LK_mürb_a_D016_CD3p_i6_D8_2011-12-21_1127_P44
Combined with file (140): C:\SolidInstr1\data\M_LK_mürb_a_D016_CD3_i6_D8_2011-12-20_1246_P14

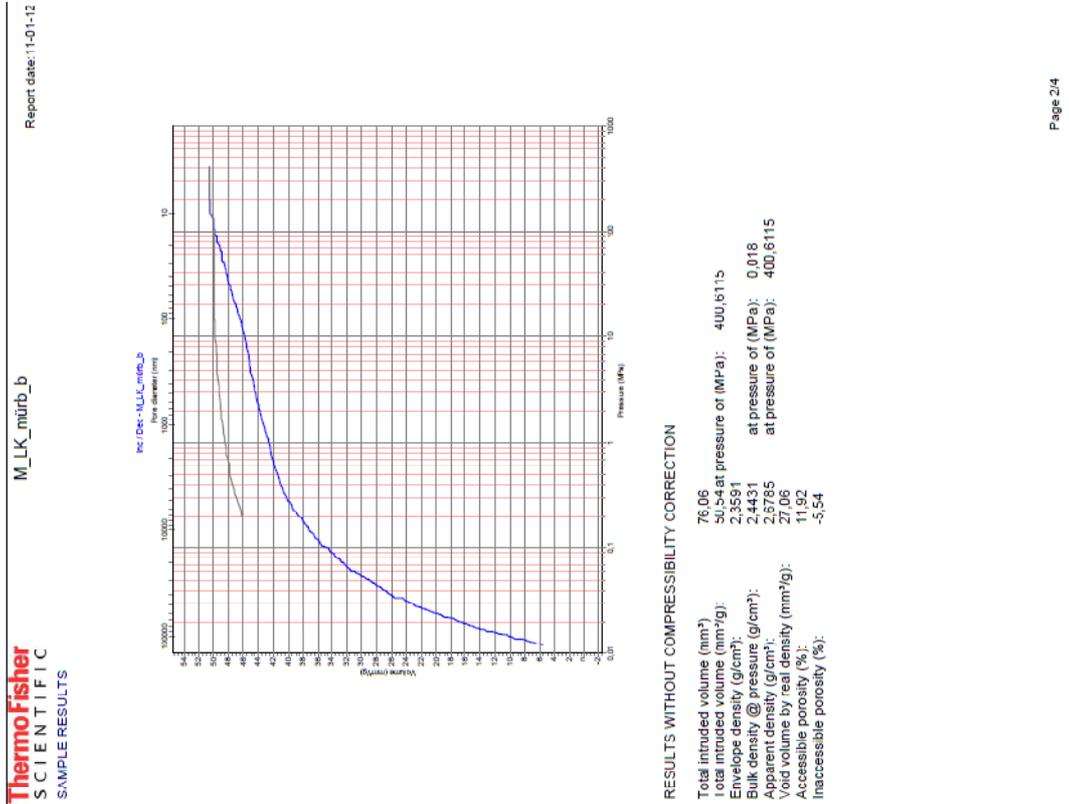
Mercury surface tension (N/m): 0.48
Mercury contact angle (°): 140.0
Test filling volume (mm³): 447.0
Starting hydr. press. or test (MPa): 0.0122
Dil+Hg+Sample weight (g): 173.569
Connector weight (Dil +Hg+Sample) (g): 173.547

ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 29.0
Mercury density @ test (g/cm³): 13.5242

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 06-05-10
Blank filename: C:\SolidInstr2\Blank\BK_D016_CD3p_i6_D8_2010-05-06_1140_P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank increase speed: 6 Pascal
Blank decrease speed: 8 Pascal
Blank Dil. number: 16
Dil. type: CD3p
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 5
Dil. stem radius (mm): 1.5
Dil. weight (g): 59.9818
Temperature of blank (°C): 26
Mercury density @ blank (g/cm³): 13.5316
Blank filling volume (mm³): 445
Starting hydr. blank press. (MPa): 0.012126
(Dil+Hg) weight (g): 182.4655



Probe b:



ThermoFisher Scientific
M_LK_mürb_b
Report date: 11-01-12

Source file: C:\SolidCombi\Marmor_ChristianM_LK_mürb_b.144

SOLID REPORTING
Company name: Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich Baustofflehre
Operator: Fussenegger

TEST INFORMATION
Test date: 28-12-11
Sample name: M_LK_mürb_b
Comment: Christian
Sample mass (g): 1,5049
Sample real density (g/cm³): 2,52
Test file name: C:\SolidInstr2\Data\M_LK_mürb_b_D5015_CD3P_I6_D8_2011-12-28_1043.P4
Combined with file (140): C:\SolidInstr1\Data\M_LK_mürb_b_D5015_CD3_I6_D9_2011-12-28_0942.P14

Mercury surface tension (N/m): 0,48
Mercury contact angle (°): 140,0
Res-filling volume (mm³): 451,0
Starting hydr. press. of test (MPa): 0,0122
Dil(Hg+Sample) weight (g): 189,419
Corrected weight (H₂O+Hg+Sample) (g): 189,541

ANALYTICAL CONDITIONS
Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 Pascal
Decrease speed: 8 Pascal
Temperature of test (°C): 29,0
Mercury density @ test (g/cm³): 13,5242

BLANK & DILATOMETER INFORMATION
Blank date: 14-09-11
Blank filename: C:\SolidInstr2\Blank\BK_D5015_CD3P_I6_D8_2011-09-14_1117.P44
Comment: BK_D5015
Blank Max pressure (MPa): 400
Blank Increase speed: 6 Pascal
Blank Decrease speed: 8 Pascal
Dil. number: 5015
Dil. type: CD3P
Dil. Cone length (mm): 23
Dil. Electrode gap (mm): 1,5
Dil. stem radius (mm): 60,0767
Dil. weight (g): 27,1
Temperature of blank (°C): 13,5289
Mercury density @ blank (g/cm³): 460
Blank filling volume (mm³): 0,012409
Starting hydr. blank press. (MPa): 176,7038
(Dil+Hg) weight (g):

