

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/>).

DIPLOMARBEIT Master's Thesis

Untersuchung von Spröbruchvorgängen anhand einaxialer Druckversuche an gelochten Scheiben

Investigations of brittle failure in uniaxial compression tests on rock prisms with circular holes

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel

Projektass. Dipl.-Ing. Kurt Mair am Tinkhof

Institut für Geotechnik E220
Forschungsbereich für Ingenieurgeologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Lucia Nussbaumer

0327089

Beatrixgasse 3a/17

1030 Wien

Wien, Jänner 2013

.....

VORWORT

An dieser Stelle möchte ich bei all jenen bedanken, die mich während meines Studiums unterstützt haben und zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

In erster Linie bedanke ich mich bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel und Projektass. Dipl.-Ing. Kurt Mair am Tinkhof für die ausgezeichnete Betreuung. Ihre tatkräftige Unterstützung, konstruktive Kritik und Hilfestellung hatten wesentlichen Einfluss auf die Entstehung dieser Diplomarbeit. Großer Dank gebührt auch Dipl.-Ing. Herbert Pardatscher für die Hilfe bei der Durchführung der Laborversuche.

Weiters bedanke ich mich bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Eltern, welche mir mein Studium ermöglicht haben.

Herzlicher Dank gebührt außerdem all meinen Freundinnen und Freunden, die mir während meiner Studienzeit zur Seite standen.

KURZFASSUNG

Überbeanspruchungen des Gebirges um Tunnelbauwerke können zu Abplatzungen am Hohlraumrand zufolge Spröbruchvorgängen führen. Auf Basis von In-situ-Beobachtungen und Laborversuchen an spröden Gesteinen schlugen Kaiser und Kim (2008) für solche Versagensmechanismen die Verwendung einer dreiteiligen Bruchkurve vor, bei welcher in Bereichen geringen Seitendrucks (nahe des Hohlraums) die Festigkeit des Gesteins deutlich geringer angesetzt wird als bei Verwendung herkömmlicher Materialmodelle wie z. B. dem Mohr-Coulomb Kriterium.

Um das Bruchverhalten von weniger spröden Gesteinen in der Umgebung eines Hohlraums zu untersuchen, wurden einaxiale Druckversuche an Sandstein- und Marmorquadern mit kreisrundem Loch durchgeführt. Da nur in Ausnahmefällen, hauptsächlich bei Marmor, mit freiem Auge sichtbare Brüche an den Hohlraumwänden vor Erreichen der Bruchlast des Prüfkörpers festgestellt wurden, wurde der Beginn plastischer Deformationen und somit erster Rissbildungen durch Auswertung der Verschiebungen an den Ulmen mittels des optischen Messsystems ARAMIS 3D festgestellt. Dabei zeigte sich, dass die aufnehmbaren Tangentialspannungen am Lochrand stark vom jeweiligen Lochdurchmesser abhängen. Ab Lochdurchmessern von 20 cm liegt die aufnehmbare Spannung am Lochrand sowohl beim Sandstein als auch beim Marmor deutlich unterhalb der Druckfestigkeit.

Numerische Untersuchungen mit FLAC^{3D} sowie die durchgeführten Laborversuche legen vor allem bei spröden Gesteinen bei rechnerischen Untersuchungen von Tunneln die Verwendung einer dreiteiligen Bruchkurve nahe, bei welcher die Gesteins- bzw. die Gebirgsfestigkeit nahe von Hohlräumen (Bereiche geringen Seitendrucks) deutlich geringer angesetzt wird als in einiger Entfernung zum Hohlraum. Bei weniger spröden Gesteinen, wie z.B. Sandstein, hat aber der Seitendruck deutlich geringeren Einfluss auf die aufnehmbaren Spannungen am Hohlraumrand als bei spröden Materialien wie Marmor.

ABSTRACT

Brittle failure around openings in rock is a widely discussed topic. In the region of maximal tangential stress breakouts occur in the sidewalls due to brittle failure. Based on in-situ-observations and laboratory tests on brittle rock Kaiser und Kim (2008) developed an s-shaped failure envelope in order to describe the dependence of spalling on confinement near openings. Using the Mohr-Coulomb criterion the strength of rock may be overrated in the low confinement range.

In order to predict the spalling failure around circular openings uniaxial compression tests on sandstone and marble samples with circular openings were carried out. Only in a few tests, especially on marble samples, brittle failure at the sidewalls could be observed. Thus the onset of plastic deformations was determined using the optical measurement system ARAMIS 3D. It became apparent that the maximal tangential stresses in the sidewalls highly depend on the diameter of the opening. The tests revealed that at diameters larger than 20 cm the maximal tangential stresses, both for marble and sandstone, are significantly lower than the uniaxial compressive strength.

The results of numerical calculations using FLAC^{3D} and the laboratory compression tests indicate that an s-shaped failure criterion has to be applied to take lower rock strength near openings into account. This is particularly true for brittle materials like marble. However, confinement has lower influence on the maximal tangential stresses around openings in sandstone than in brittle rock like marble.

INHALT

1. Einleitung.....	1
2. Bedeutung von Spröbruchvorgängen im Tunnelbau	3
3. Theoretische Ansätze und experimentelle Untersuchungen	5
3.1. Spannungszustand um den Tunnelquerschnitt.....	5
3.2. Druckversuche an Zylindern und Prismen	7
3.2.1. Bruchformen.....	7
3.2.2. Einfluss der Reibung an den Lasteinleitungsflächen.....	8
3.2.3. Einfluss der Prüfkörpergröße (size oder scale effect) auf die Ergebnisse..	13
3.2.4. Einfluss der Geometrie des Prüfkörpers (shape effect).....	14
3.2.5. Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit.....	15
3.3. Labortests an Scheiben mit Loch.....	15
3.3.1. Verhältnis aufnehmbare Spannung zu Lochdurchmesser.....	16
3.3.2. Druckversuche an Scheiben mit Loch.....	17
3.4. In-situ-Versuche und Beobachtungen bei bestehenden Tunneln	20
4. Materialmodelle – Versagenskriterien	24
4.1. Lineares Bruchkriterium nach Mohr–Coulomb.....	25
4.2. Nichtlineares Bruchkriterium nach Hoek & Brown	26
4.3. Dreiteilige Bruchkurve	28
5. Versuche.....	30
5.1. Prüfmaschine	30
5.1.1. Schenck Prüfrahmen.....	30
5.1.2. Großer Prüfrahmen	31
5.2. Messeinrichtungen.....	32
5.2.1. Optisches Verformungsmesssystem ARAMIS	32
5.2.2. Schallemissionsanalyse	34
5.3. Prüfkörper	35
5.3.1. Material der Prüfkörper.....	35
5.3.1.1. Sandstein.....	35
5.3.1.2. Marmor	36
5.3.2. Abmessungen der Prüfkörper.....	36
5.4. Bestimmung der Festigkeiten und Materialparameter	41

5.4.1.	Einaxialer Druckversuch an Zylindern	41
5.4.2.	Triaxialversuch an Zylindern.....	42
5.5.	Einaxialer Druckversuch an gelochten Scheiben	44
5.5.1.	Prüfkörper	44
5.5.2.	Versuchsaufbau.....	47
6.	Versuchsergebnisse	48
6.1.	Festigkeiten und Materialparameter.....	48
6.1.1.	Einaxiale Druckversuche – Zylinder	48
6.1.2.	Triaxialversuche - Zylinder	49
6.2.	Druckversuche an der gelochten Scheibe	50
6.2.1.	Einfluss der Zwischenlagen.....	50
6.2.2.	Ergebnisse der Druckversuche	57
6.2.3.	Rissbild	62
6.2.3.1.	Versuchsreihe S	63
6.2.3.2.	Versuchsreihe M.....	68
6.2.3.3.	Versuchsreihe L.....	73
6.2.3.4.	Versuchsreihe XL	79
6.2.3.5.	Versuchsreihe M-M	79
6.2.3.6.	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	83
6.2.4.	Einfluss der Lochgröße auf die Druckfestigkeit	84
7.	Numerische Berechnung mittels FLAC ^{3D}	88
7.1.	Versuchsreihe M – Lochdurchmesser 5,0 cm.....	88
7.2.	Versuchsreihe M – Lochdurchmesser 7,5 cm.....	94
7.3.	Versuchsreihe M – Lochdurchmesser 10,0 cm.....	100
8.	Interpretation und Ausblick	106
8.1.	Rissbild der Druckversuche	106
8.2.	Aufnehmbare Spannungen am Lochrand	107
8.3.	Vergleich mit numerischen Berechnungen	110
9.	Zusammenfassung	113
10.	Abbildungsverzeichnis	116
11.	Tabellenverzeichnis	121
12.	Literaturverzeichnis.....	122

1. EINLEITUNG

Unterirdische Hohlräume im Fels werden für verschiedene Verwendungszwecke in einer großen Bandbreite, angefangen von kleinen Bohrlöchern, über Tunnel und Schächte bis hin zu großräumigen Kavernen hergestellt. Eine Eigenschaft, welche all diese Bauwerke gemeinsam haben, ist die Veränderung des Primärspannungszustandes des Gebirges infolge des Ausbruchs. Diese Veränderung des Spannungszustandes führt zu elastischen Deformationen des Gebirges bzw. bilden sich im Falle von Spannungen am Hohlraumrand, die die Gebirgsfestigkeit übersteigen, Brüche aus, welche eine Verminderungen der Festigkeit des Gebirges nach sich ziehen. Die Rissbildungen sowie die Rissentwicklungen und die folgenden plastischen Verformungen können den Hohlraum für seine ursprünglich angedachte Nutzung unbrauchbar machen und aufwendige Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen erfordern.

Bei der Herstellung vieler Tunnelbauwerke wurden Abplatzungen an den Tunnelwänden parallel zur größten Hauptnormalspannung beobachtet, wobei die zugrundeliegenden Mechanismen noch nicht vollständig erforscht sind. Um die richtigen Stabilisierungsmaßnahmen bzw. eventuelle Schwierigkeiten beim Bau einplanen zu können, muss im Vorfeld des Ausbruchs das Gebirgsverhalten bestmöglich prognostiziert werden. Wird z. B. nicht beachtet, dass an der Hohlraumwand Sprödbrüche auftreten können, kann dies zu erheblichen Zeitverzögerungen und damit verbundenen Mehrkosten führen (Kaiser und Kim 2008).

Um diese Phänomene der Sprödbrüche, Scherbrüche und Abplatzungen am Rand von Tunnelquerschnitten besser prognostizieren zu können, wurden Versuche an sogenannten „Scheiben mit Loch“ durchgeführt (u. a. Martin 1997, Schubert 1980). Basierend auf Labortest von Hoek (1968) und Erfahrungen aus der Praxis entwickelten Kaiser et al. (2000) und Diederichs (2007) ein nichtlineares Bruchkriterium (dreiteilige bzw. s-förmige Bruchkurve), welches das Versagen rund um Hohlräume (Sprödbruchversagen bei geringem Seitendrucknahe dem Hohlraumrand, tiefgreifende Scherbrüche bei hohem Seitendruck) besser als das lineare Mohr-Coulomb-Bruchkriterium beschreiben soll. Nahe dem Hohlraum kommt es bereits vor Erreichen der Scherfestigkeit des Gesteins zu Rissbildungen und Sprödbruchvorgängen, die zu Auflockerungen und Abplatzungen führen.

Dies soll im Zuge dieser Diplomarbeit an einaxialen Druckversuchen an quaderförmigen Prüfkörpern mit kreisrundem Loch untersucht werden. Des Weiteren werden numerische Untersuchungen mittels FLAC^{3D} durchgeführt, um die Laborergebnisse mit den numerischen Rechnungen vergleichen zu können.

Von besonderem Interesse ist dabei, bei welchen Spannungszuständen ein Hohlraum „versagt“, wo das Versagen eintritt und wie es fortschreitet. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob sich der Hohlraum stabilisiert oder ob die Deformationen laufend zunehmen.

2. BEDEUTUNG VON SPRÖDBRUCHVORGÄNGEN IM TUNNELBAU

Beim Ausbruch von Hohlräumen Untertage treten des Öfteren Abplatzungen parallel zur freien Oberfläche auf, welche den Vortrieb behindern bzw. den bereits eingebauten Ausbau beschädigen und häufig aufwendige Sicherungs- oder Sanierungsmaßnahmen erfordern. Schlagartig einsetzende Abplatzungen in sprödem Gestein werden Bergschläge genannt und können zu einer nicht unwesentlichen Gefahr für die Belegschaft werden. Die Größen dieser Abplatzungen reichen von kleineren Gesteinsfragmenten bis hin zum Versagen des gesamten Hohlraumquerschnitts, wobei diese Phänomene vor allem bei hohen Primärspannungen (z. B. bei größeren Überlagerungshöhen) auftreten.

Dass dieser Problematik beim Auffahren von großen Hohlraumbauwerken eine wichtige Rolle zukommt zeigen aktuelle Tunnelprojekte durch die Alpen wie der Gotthard Basistunnel oder der Lötschberg Tunnel. Bei diesen Großprojekten zeigte sich, dass Abplatzungen und Bergschläge oftmals trotz genauer Vorerkundung der geologischen und geotechnischen Verhältnisse nicht beherrschbare Ereignisse darstellen, welche zu erheblichen Beeinträchtigungen der Vortriebsarbeiten führen (Bauch 2007).

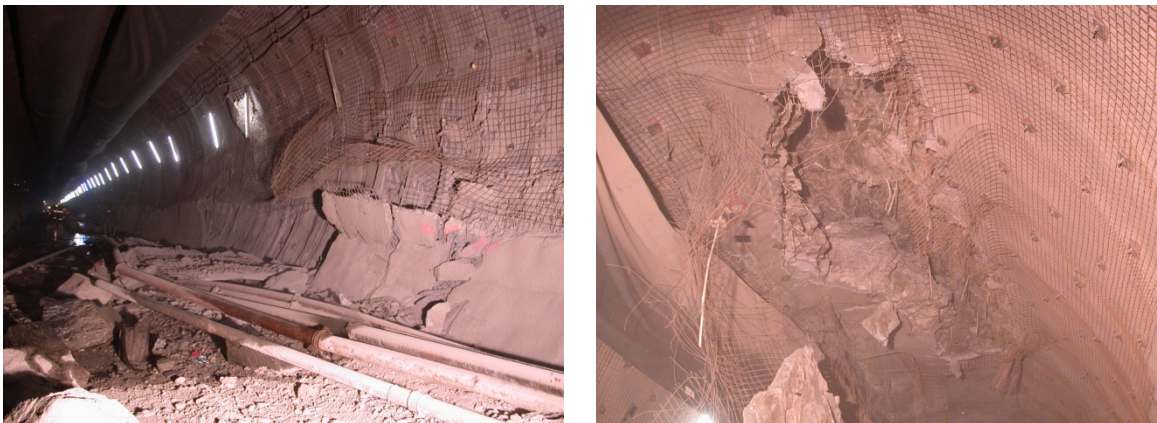


Abbildung 1: Beschädigung der Ausbruchssicherung durch Bergschläge im Gotthard Basistunnel (Consortio TAT 2005)

Feder (1977) beschreibt beim Versagen von Hohlräumen bei anisotroper Belastung 3 Bruchzustände (siehe Abbildung 2): Zustand 1 - Radiale Zugrisse in Firste und Sohle (b); Zustand 2 - Begrenzte Bruchzonen an den Ulmen durch Sprödbüche am Ausbruchrand (c); Zustand 3 - Ausbildung tiefgreifender Scherbrüche (d) (Schubert 1980).

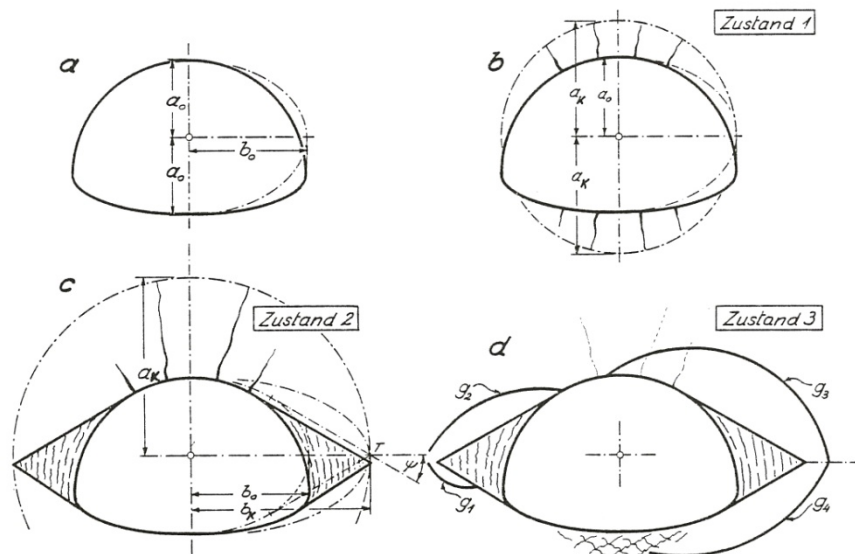


Abbildung 2: Versagenszustände eines Hohlraums bei anisotroper Belastung (aus: Feder 1977)

Damit spielen Sprödbrüche neben Scherbrüchen als Versagensart eine wichtige Rolle im Tunnelbau, wobei der jeweilige Bruchmechanismus stark von der Entfernung zum Hohlraumrand und von der Sprödigkeit des Gesteins bzw. des Gebirges abhängt. Bei spröden Gesteinen dominiert nahe dem Hohlraum - in Bereichen geringen Seitendrucks - Versagen durch Sprödbruch, wohingegen sich in einigem Abstand zum Ausbruchsrund (bei größeren Radialspannungen = Stützdrücken) Scherbrüche ausbilden (Poisel 1981).

Einhergehend mit Ausbrüchen am Hohlraumrand ist immer ein gewisses Maß an Auflockerungen und damit ein Festigkeitsverlust des den Hohlraum umgebenden Gebirges, welcher in der Tunnelbaupraxis für die richtige Dimensionierung des Innenausbaus Berücksichtigung finden muss.

Des Weiteren können Sprödbrüche auch zu einem wichtigen Faktor bei Quellvorgängen im Gebirge werden. Kommt es in quellfähigem Gebirge zur Rissbildung, so wird der Wasserzutritt ermöglicht und es können nicht unerhebliche Quelldrücke entstehen, was wiederum zu einer Beschädigung des Innenausbaus und aufwendigen Sanierungsmaßnahmen führen kann (Steiner, Kaiser und Spaun 2010).

3. THEORETISCHE ANSÄTZE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Experimentelle Untersuchungen an Zylindern und Prismen sowie an der „Scheibe mit Loch“ zeigen die Bruchmechanismen von Prüfkörpern unter Druckbeanspruchung auf, wobei die gelochte Scheibe zum Ziel hat, kreisrunde Tunnelquerschnitte oder Bohrlöcher zu modellieren. Wesentlichen Einfluss auf die Aussagekräftigkeit der Versuche haben äußere Randbedingungen wie z. B. die Lasteinleitung oder auch die Geometrie der Prüfkörper.

3.1. Spannungszustand um den Tunnelquerschnitt

Der Ausbruch eines Hohlraums Untertage führt zwangsläufig zur Veränderung des primären Spannungszustands. Die sich u. a. aus der Überlagerung ergebenden In-situ-Spannungen müssen zwangsläufig in radialer Richtung zum Hohlraum hin auf null abnehmen, während die Tangentialspannungen als Ausgleich dazu ansteigen müssen. Die Radialspannung σ_r am Tunnelrand entspricht dem Ausbauwiderstand und nimmt mit Entfernung zum Tunnelrand zu, bis sie die herrschende Primärspannung p_z erreicht. Die Tangentialspannung σ_θ hat ihr Maximum am Tunnelrand und nimmt mit zunehmender Entfernung ab (siehe Abbildung 3)

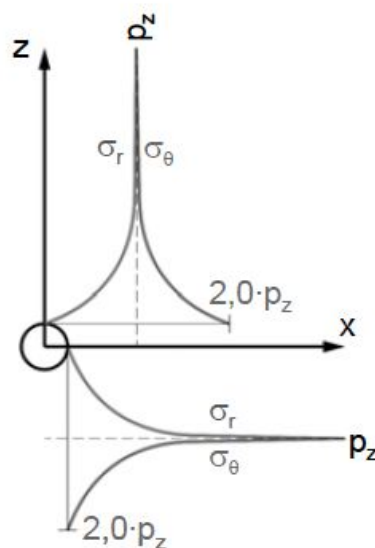
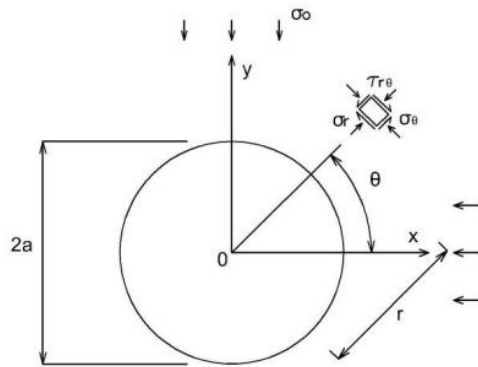


Abbildung 3: Spannungsfeld im linear-elastischen Untergrund bei isotropen Primärspannungsverhältnissen (aus: Fillibeck 2009)

Für anisotrope Spannungsverhältnisse, bei denen die Spannungen am Hohlraumrand nicht die Festigkeit übersteigen, können die Tangential- und Radialspannungen um einen kreisrunden Tunnelquerschnitt nach der Formel von Kirsch (1898) berechnet werden.



$$\sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

Abbildung 4: Berechnung der Spannung um einen Kreisquerschnitt nach Kirsch 1898 (aus: Fairhurst und Carranza-Torres 2002)

- σ_r Radialspannung
- σ_θ Tangentialspannung
- σ_1 Vertikalspannung
- σ_3 Horizontalspannung
- a Radius des Tunnels
- r Distanz vom Zentrum des Tunnels
- θ Winkel [°]

Berechnet man die Tangentialspannung am Tunnelrand ($a=r$) und berücksichtigt, dass die Radialspannung am Ausbruchsrund immer gleich null ist, so erhält man bei $\sigma_3 = 0$ für die Tangentialspannung an den Ulmen $\sigma_\theta = 3 * \sigma_1$.

3.2. Druckversuche an Zylindern und Prismen

3.2.1. Bruchformen

Poisel (1979) und Schubert (1980) haben anhand von ein- und dreiaxialen Druckversuchen an zylinderförmigen Prüfkörpern aus gebranntem Ton zwischen drei häufig auftretenden Bruchformen unterschieden:

➤ **Spaltbruch**

In Bereichen mit sehr geringem Seitendruck σ_3 (meist nur im einaxialen Druckversuch) treten bedingt durch Zugspannungen im Prüfkörper Spaltbrüche parallel zur größten Hauptnormalspannung auf. Es zeigt sich dabei schon durch Aufbringen von geringem Seitendruck ein starkes Ansteigen der Bruchlast (im Vergleich zum einaxialen Druckversuch) und ein Übergang zum Scherbruch. Es kommt infolge der seitlichen Ausdehnung und der Auflockerung der Prüfkörper zu großem Volumenzuwachs.

➤ **Scherbruch**

Bei steigendem Seitendruck (Triaxialversuch) steigt die Neigung zum Scherbruch, bei welchem der Prüfkörper in 2 Teile zerlegt wird. In der Mohrschen Darstellung ergibt sich ein deutlicher Knick in der Umhüllenden, es ist also mit der Erhöhung des Seitendruckes kein so großer Anstieg der Druckfestigkeit mehr zu erreichen wie beim Spaltbruch. Es kommt praktisch zu keiner Volumensvergrößerung infolge des Versagens.

➤ **Gefügebruch**

Bei weiterer Steigerung des Seitendruckes σ_3 tritt im Triaxialversuch bei porösem Material ein Gefüge- oder Strukturbruch auf. Es treten dabei keine bestimmten Bruchflächen mehr auf, sondern es bilden sich zu Staub zerlegte Zonen. Infolge des Eindrückens der Poren kommt es zur Volumensverkleinerung.

Bei weniger porösem Material steigt bei weiterer Steigerung des Seitendruckes σ_3 die Anzahl der Scherbrüche und es tritt duktiler Verhalten („Plastifizieren“) auf.

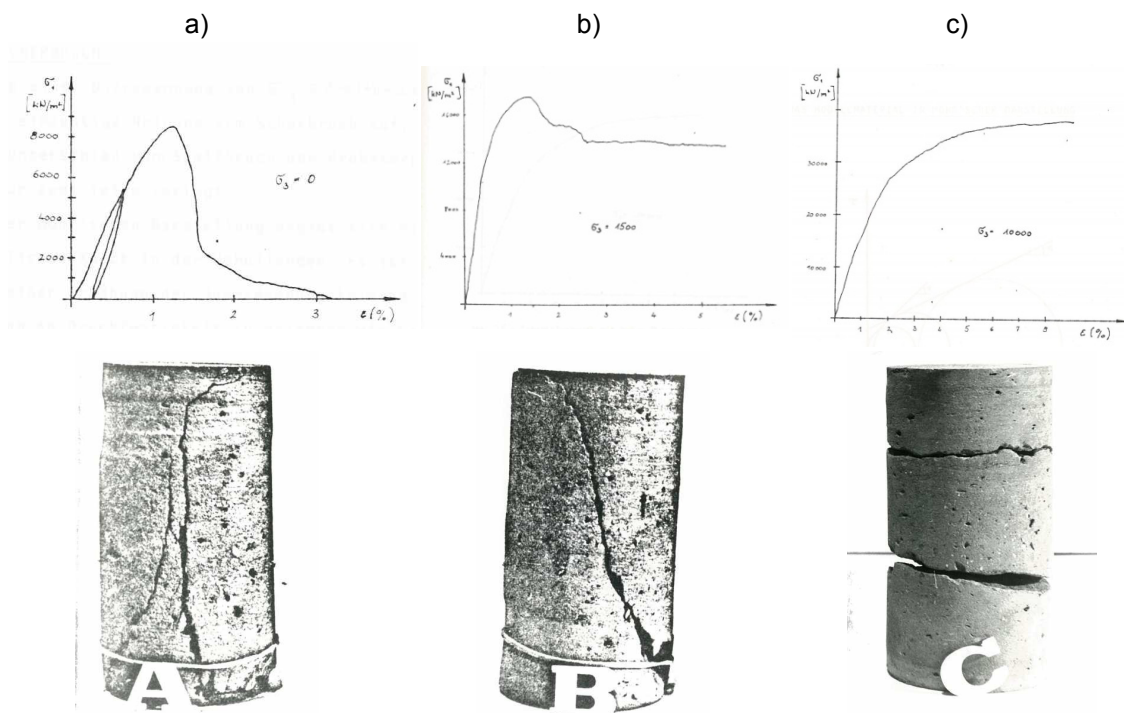


Abbildung 5: Arbeitslinien (Spannungs- Dehnungs- Diagramme) und Versagensbild der Prüfkörper a) Spaltbruch bei einaxialem Druckversuch, b) Scherbruch im Triaxialversuch, c) Gefügebruch im Triaxialversuch mit hoher Querpressung (aus: Schubert 1980)

3.2.2. Einfluss der Reibung an den Lasteinleitungsflächen

Aus Versuchen zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit ist bekannt, dass die Reibung zwischen den Lasteinleitungsflächen der Presse und dem Prüfkörper einen wesentlichen Einfluss auf die ermittelten Festigkeitswerte hat.

Aufgrund von Reibung zwischen Prüfkörper und Presse ergeben sich nach innen gerichtete Schubspannungen an den Lastenleitungsflächen der Prüfkörper, welche zur Mitte hin abnehmen. Erst ab jenem Punkt, an dem diese Schubspannungen null werden, herrscht ein einaxialer Spannungszustand. Bei sehr gedrunghenen Prüfkörpern können die Schubspannungen bis in den mittleren Bereich hinein wirken und es bildet sich somit an keiner Stelle ein einaxialer Spannungszustand aus (shape effect).

Im Zuge der vorliegenden Untersuchungen wurden ausgiebige Studien durchgeführt, um Zwischenlagen zu untersuchen, welche zwischen Prüfkörper und Presse eingelegt werden, um den Einfluss der Reibung zu verringern, womit ein

gleichmäßiger einaxialer Spannungszustand auf ganzer Höhe des Prüfkörpers erreicht werden kann.

Betrachtet man den Einfluss der Zwischenlagen während des Druckversuchs, so können folgende 2 Extremfälle beobachtet werden (Peng und Johnson 1972):

- Der Prüfkörper hat direkten Kontakt mit den Lasteinleitungsplatten der Presse, es wirkt die volle Reibung. An den Grenzflächen kann sich der Prüfkörper nicht ausdehnen, es bilden sich nach innen gerichtete Schubspannungen aus und es herrscht kein gleichmäßiger einaxialer Spannungszustand.

(Außerdem führt eine, aufgrund kleiner Unebenheiten, nicht gleichmäßig eingeleitete Last oft zu Spannungsspitzen und damit zu Abplatzungen an den Ecken des Prüfkörpers (Burtscher 2002)).

- Zwischen Prüfkörper und Lasteinleitungsplatte wird eine Zwischenlage eingebracht, welche Reibung vollkommen verhindert. Bei vielen Studien wird meist eine Teflonzwischenlage als bevorzugte Möglichkeit für einen einaxialen Spannungszustand genannt, da dadurch keine Reibung und somit keine nach innen gerichteten Schubspannungen in den Prüfkörper eingebracht werden. Es wurde jedoch, bedingt durch die starke Reduktion der Reibung, beobachtet, dass sich der Prüfkörper an den Grenzflächen stärker ausdehnt als in der Mitte, was zu Zugrissen nahe den Lasteinleitungsflächen führt.

Abbildung 6 und 7 stellen die Verformungen und den Spannungszustand im Prüfkörper in Abhängigkeit der Reibung zwischen Prüfkörper und Lasteinleitungsplatte dar.

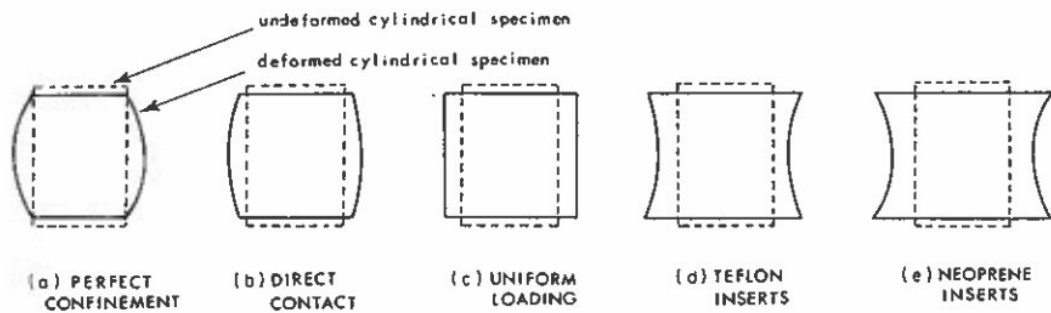


Abbildung 6: Verformungen von Prüfkörpern bei unterschiedlichen Randbedingungen (aus: Peng und Johnson 1972)

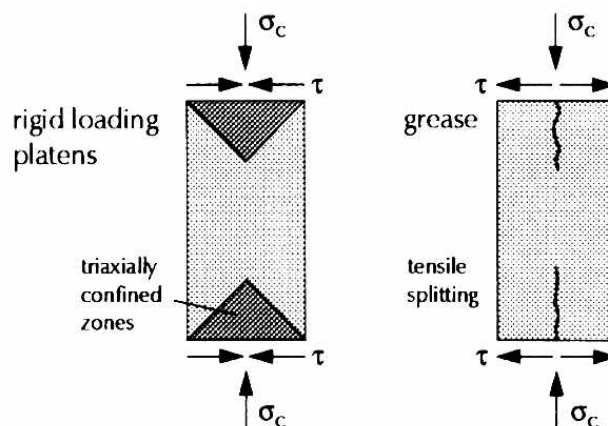


Abbildung 7: Spannungen im Prüfkörper in Abhängigkeit von den Lasteinleitungsbedingungen (aus: van Mier et al. 1997)

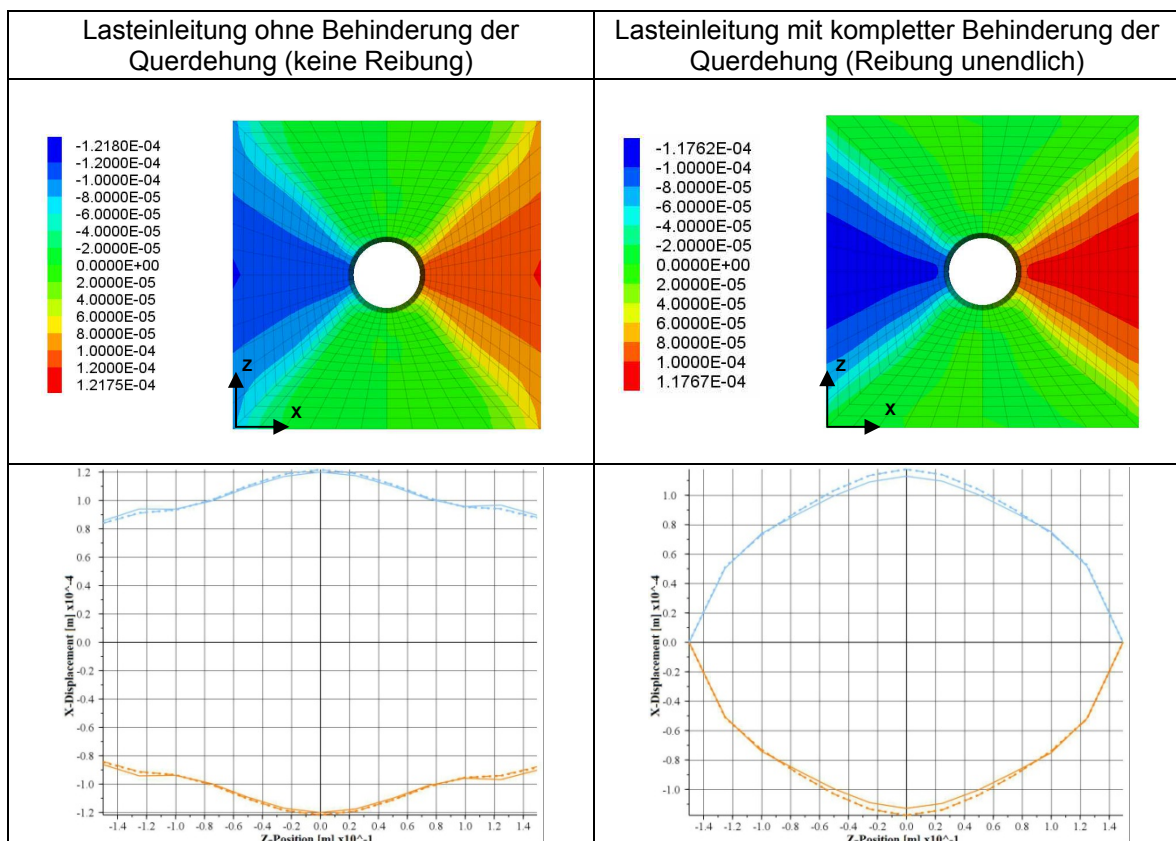
Im Zuge von Untersuchungen zum size effect bei Sandsteinquadern an der TU Wien am Institut für Stahlbeton- und Massivbau („Size effect von Beton und Sandstein unter Druckbeanspruchung“) kam Burtscher (2002) zu dem Schluss, dass die beste Möglichkeit, die Reibung zwischen Prüfkörper und Presse zu reduzieren, die Einlage einer dünnen (0,75 mm) Teflonfolie gemeinsam mit doppelseitigem Sandpapier darstellt. Das Sandpapier zwischen den Druckplatten der Presse und der Teflonfolie dient der Vergrößerung der Reibung und verhindert damit ein Weggleiten des Prüfkörpers an den Lasteinleitungsflächen der Presse (Burtscher 2002).

Um einen ungleichmäßigen Spannungszustand bzw. Abplatzungen zufolge Unebenheiten möglichst zu vermeiden, wurden im Vorfeld Berechnungen mit FLAC^{3D} durchgeführt, um die am besten geeigneten Zwischenlagen zu bestimmen. Die Berechnungen wurden anfangs ohne Zwischenlage durchgeführt,

in einem weiteren Schritt wurde die Einlage von Stahl-, Blei-, und Aluminiumplatten sowie einer Teflonfolie untersucht.

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Berechnung eines Prüfkörpers im Druckversuch mit Kantenlänge von 30x30x10 cm und einem Lochdurchmesser von 7,5 cm in FLAC^{3D}. Es ist dabei im jeweils oberen Bild die Verschiebung qualitativ dargestellt, wobei rot positive und blau negative horizontale Verschiebung bedeutet. Das jeweils untere Bild stellt die horizontalen Verschiebungen der Seiten der Prüfkörper dar, wobei die blaue Linie die rechte Seite und die orange Linie die linke Seite des Prüfkörpers darstellt.

Die Darstellungen beziehen sich jeweils auf den Zeitpunkt kurz nachdem die Maximalspannung im gesamten Prüfkörper erreicht ist. Bei den Berechnungen der Prüfkörper mit einerseits völlig reibungsfreier Lasteinleitung bzw. andererseits kompletter Behinderung der Querdehnung im Lasteinleitungsbereich ist das bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,5 mm der Fall. Bei den Prüfkörpern mit Teflon- bzw. Aluminiumeinlage und direkter Lasteinleitung über die Druckplatten bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,75 mm.



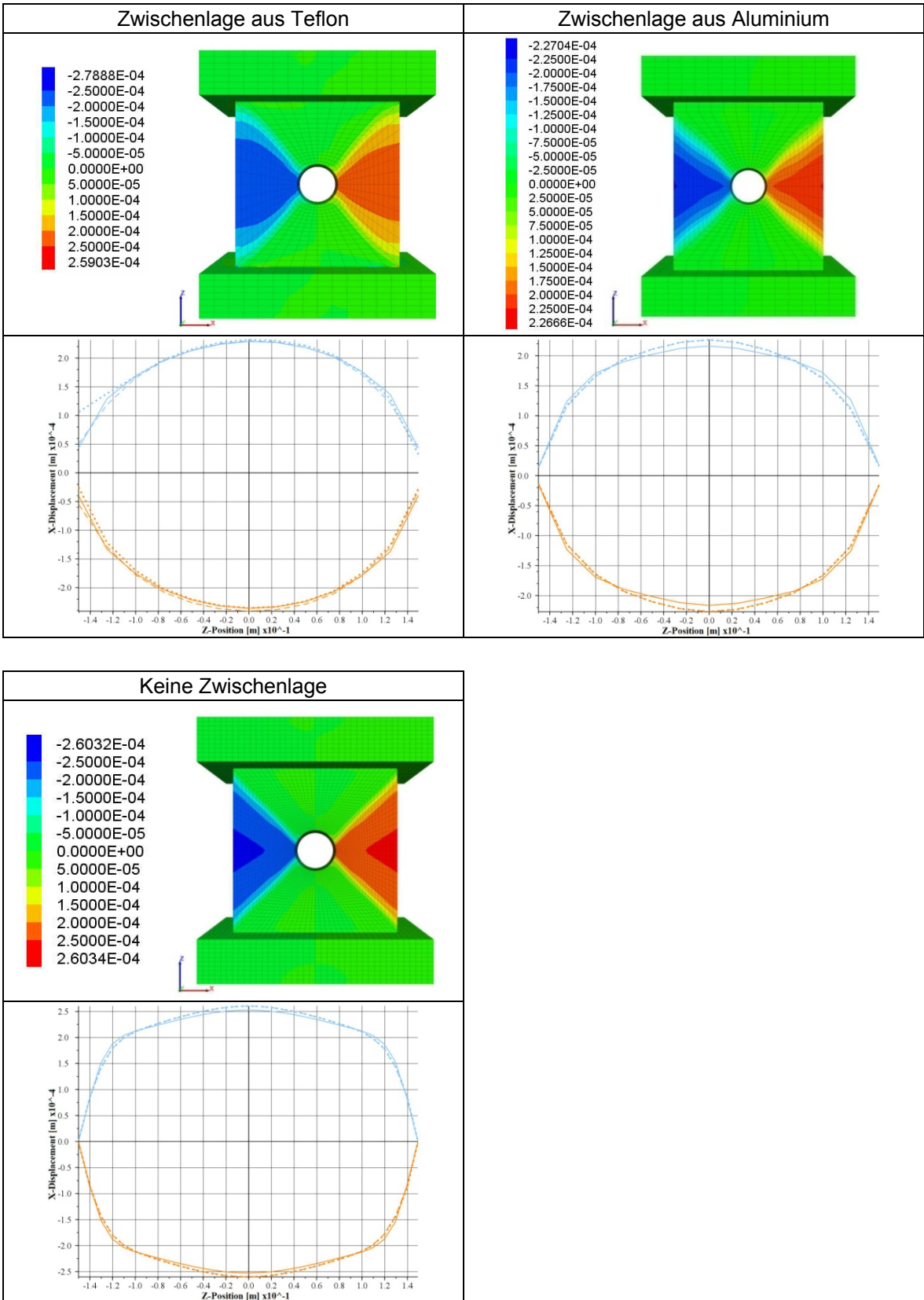


Abbildung 8: Konturplot der Horizontalverschiebungen (oben) sowie Horizontalverschiebungen am linken (orange) und rechten (blau) Rand des Prüfkörpers in Abhängigkeit von der Lasteinleitung

3.2.3. Einfluss der Prüfkörpergröße (size oder scale effect) auf die Ergebnisse

Der „size effect“ oder auch „scale effect“ beschreibt die Veränderung der Materialparameter durch Veränderung der Prüfkörpergröße. Jeder Prüfkörper enthält eine Vielzahl an Mikrorissen. Je größer der Prüfkörper, desto mehr Mikrorisse sind vorhanden und daher existiert auch eine größere Wahrscheinlichkeit schwächerer Defekte. Daraus ergibt sich, dass an kleineren Prüfkörpern höhere Druckfestigkeiten festgestellt werden (Abbildung 9).

Der Size effect beim Druckversuch an Kalksandstein wurde von Burtscher (2002) ausgiebig untersucht. Die Versuche wurden an Sandsteinquadern im Größenverhältnis von 1:32 (Breite x Höhe = 20 x 40 mm bis 640 x 1280 mm) durchgeführt, wobei immer das gleiche Verhältnis der Abmessungen des Prüfkörpers, die gleichen Lasteinleitungsbedingungen und die gleiche Belastung beibehalten wurden. Nach Auswertung dieser Versuche wurde festgestellt, dass für Prüfkörper aus Sandstein der Size effect hauptsächlich bei sehr kleinen Prüfkörpern einen Einfluss hat und dass bei größeren Prüfkörpern mehr Einfluss aus der zufolge Inhomogenitäten unterschiedlichen Dichte des Materials als aus der Prüfkörpergröße kommt (Burtscher 2002).

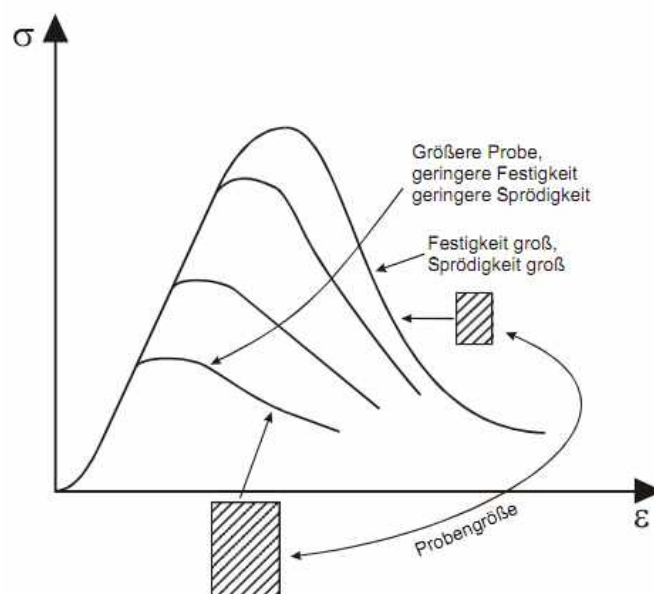


Abbildung 9: Spannungs- Dehnungskurvenverläufe im einaxialen Druckversuch in Abhängigkeit von der Prüfkörpergröße (aus: Hudson und Harrison 1997)

3.2.4. Einfluss der Geometrie des Prüfkörpers (shape effect)

Durch Veränderung des Verhältnisses von Durchmesser zu Höhe bei zylindrischen Prüfkörpern wird auch der sich ausbildende Spannungszustand verändert. Bei sehr gedrunenen Prüfkörpern bildet sich bis zur Mitte des Prüfkörpers hin ein triaxialer Spannungszustand aus und es werden höhere aufnehmbare Spannungen gemessen als beim rein einaxialen Spannungszustand (Abbildung 10). Bei zylindrischen Prüfkörpern bildet sich ein einheitlich einaxialer Zustand ab einem Verhältnis von Höhe/Durchmesser von 2,5 aus (Hudson und Harrison 1997).

Da im Fall der für die vorliegenden Untersuchungen verwendeten Prüfkörper das Verhältnis Höhe/Breite/Dicke bei jedem Prüfkörper gleich ist, ist dieser Effekt hier nicht zu berücksichtigen. Es wird jedoch der Einfluss von diversen Zwischenlagen zwischen Prüfkörper und Lasteinleitungsflächen auf den einaxialen Spannungszustand untersucht.

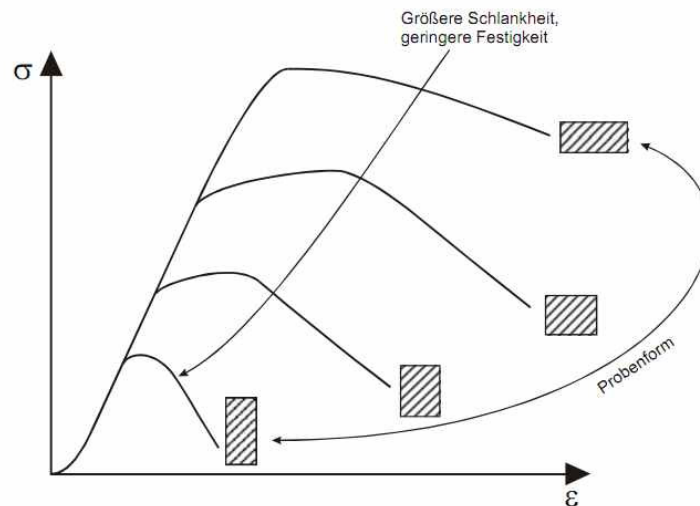


Abbildung 10: Auswirkung der Prüfkörperform auf den Verlauf der Spannungs- Dehnungskurve im einaxialen Druckversuch (aus: Hudson und Harrison 1997)

3.2.5. Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

Auch eine Veränderung der Belastungsgeschwindigkeit kann bei sonst gleichbleibenden Bedingungen zu unterschiedlichen Festigkeitswerten führen. So werden bei Prüfkörpern mit schnell aufgebrachter Belastung meist höhere Festigkeitswerte erreicht als bei langsamer Belastung, wobei die Geschwindigkeit bei Gesteinen geringerer Festigkeit im Allgemeinen weniger Einfluss hat.

Burtscher (2002) konnte im Zuge seiner Studie bei Variation der Belastungsgeschwindigkeit keine ausgeprägten Veränderungen an der Festigkeit von St. Margarethener Kalksandstein feststellen.

3.3. Labortests an Scheiben mit Loch

Scheibenförmige Prüfkörper mit einem kreisförmigen Loch stellen Modellversuche für Tunnel in einem unter Spannung stehenden Gebirgskörper dar. Dabei wird ein quaderförmiger Prüfkörper mit mittigem kreisrundem Loch in der Prüfpresse mit richtungsbetontem Druck beansprucht und die aufnehmbaren Spannungen und Verformungen gemessen.

In mehreren Untersuchungen (u. a. Martin 1997, Ewy und Cook 1990) wurde aufgezeigt, dass bei Druckversuchen von Prüfkörpern mit kreisförmigen Hohlräumen als erstes Zugrisse am Hohlraumrand normal zur Hauptbeanspruchungsrichtung auftreten. Bei weiterer Laststeigerung bilden sich sekundäre, weiter entfernte Risse und infolge von Spaltbrüchen an den Hohlraumrändern parallel zur Hauptbeanspruchungsrichtung v-förmige Ausbrüche (Abbildung 11).

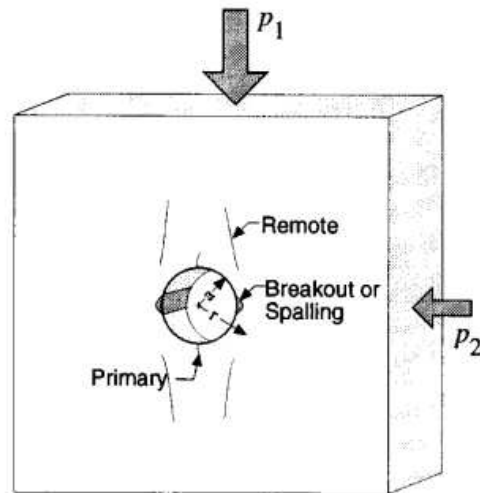


Abbildung 11: Brüche rund um einen kreisförmigen Hohlraum im Druckversuch (aus: Martin 1997)

3.3.1. Verhältnis aufnehmbare Spannung zu Lochdurchmesser

Das Verhältnis der Spannungen, die sich im Vorfeld des Versagens im Bereich des kreisförmigen Hohlraums ausbilden, zur einaxialen Druckfestigkeit, hängt stark vom Lochdurchmesser ab. So hat sich gezeigt, dass die größte Tangentialspannung beim Versagen des Materials am Rand des Loches bis zum dreifachen der einaxialen Druckfestigkeit des Gesteins betragen kann. Je größer jedoch der Lochdurchmesser wird, desto mehr nähern sich die Tangentialspannungen beim Bruch der einaxialen Druckfestigkeit an (Abbildung 12). Vor allem bei Lochdurchmessern < 25 mm, womit laut Martin (1997) die Mehrzahl der Laborversuche durchgeführt werden, ist eine starke Abhängigkeit der Festigkeit vom Lochdurchmesser zu beobachten, welche zumindest mit dem Faktor 2 berücksichtigt werden sollte, wenn man Bruchspannungen mit der Druckfestigkeit vergleicht. Ab einem Lochdurchmesser von mindestens 75 mm ist dieser Effekt nicht mehr zu beobachten (Martin 1997).

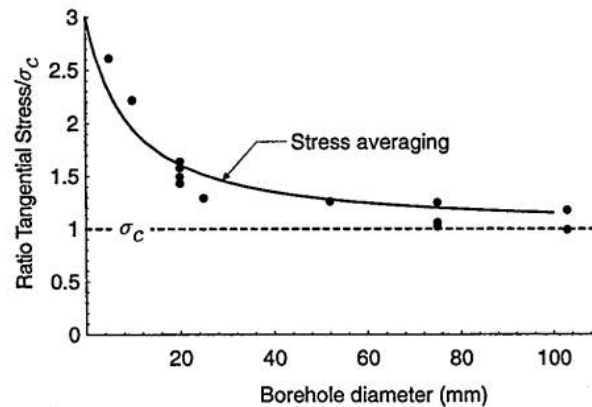


Abbildung 12: Verhältnis der Tangentialspannungen am Lochrand bei Brucherscheinungen an den Ulmen zur Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser (aus: Martin 1997)

3.3.2. Druckversuche an Scheiben mit Loch

Anhand von biaxialen Druckversuchen an Prüfkörpern aus gebranntem Ton mit einem mittigen, kreisförmigen Hohlraum (Durchmesser 58 mm) und einem Primärspannungsverhältnis $k = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} = 0,5$ beschreibt Schubert (1980) das Versagen rund um Hohlräume.

Es kommt unter Druck zu einer Spannungskonzentration an den Ulmen und damit an diesen Stellen zu den ersten Abplatzungen bei weiterer Spannungssteigerung. Der dadurch entstehende Ausbruch schließt einen Winkel von $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ mit dem Ausbruchrand ein. Bei steigender Belastung ändert sich das Bruchverhalten und es bilden sich Scherbrüche aus. Es kommt zu einer Bewegung des Bruchkörpers an den Ulmen in den Hohlraum hinein und damit zu einer vertikalen Stauchung des Hohlräume (Abbildung 13).

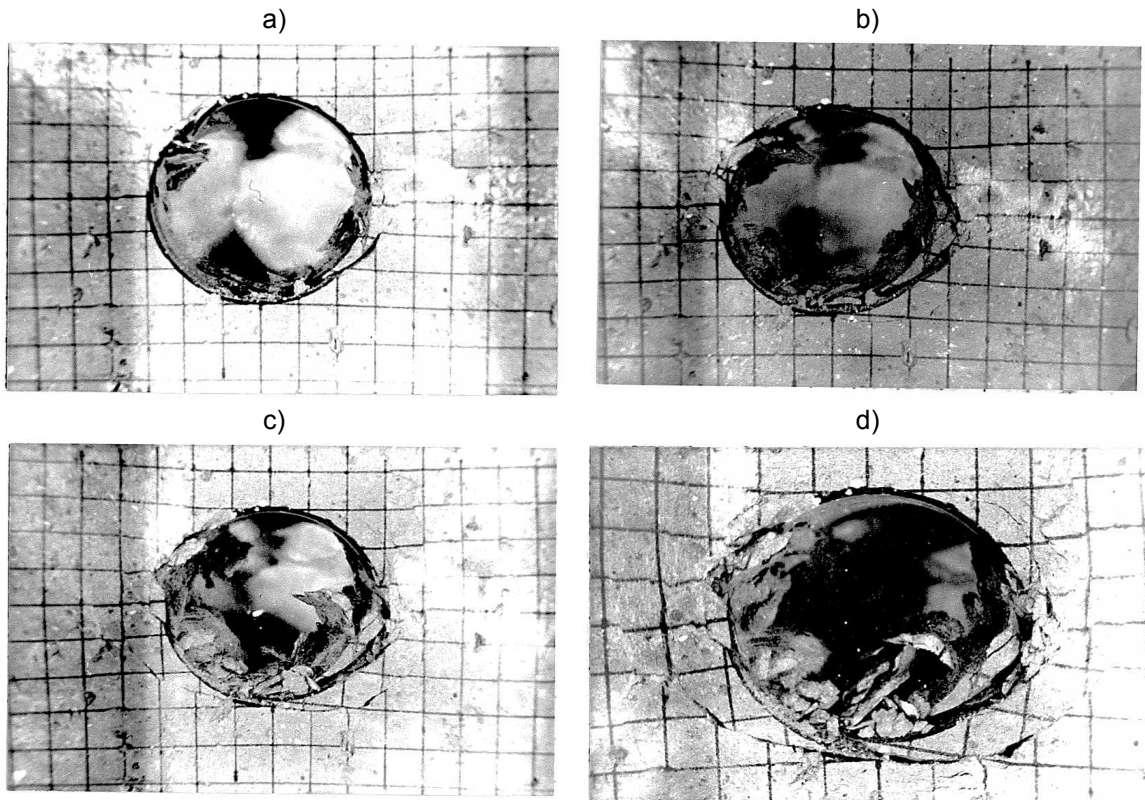


Abbildung 13: Versagenszustände eines kreisförmigen Hohlraums im biaxialen Druckversuch a) Spaltbrüche an der Oberkante b) Beginn von Scherbrüchen c) Scherbrüche links und rechts der Unterseite d) Zustand am Versuchsende (aus: Schubert 1980)

Ewy und Cook (1990) führten Druckversuche an Hohlzylindern aus Berea Sandstein und Indiana Kalkstein durch, um die elastische und nichtelastische Verformung, Bruch und Versagen von Hohlräumen Untertage zu beurteilen. Die untersuchten Zylinder haben einen Innendurchmesser von 25,4 mm, einen Außendurchmesser von 89 mm und eine Länge von 146-152 mm welche in der verwendeten Prüfmaschine durch inneren sowie äußeren Druck beansprucht wurden. Die verwendete Prüfmaschine ist in Abbildung 14 dargestellt.

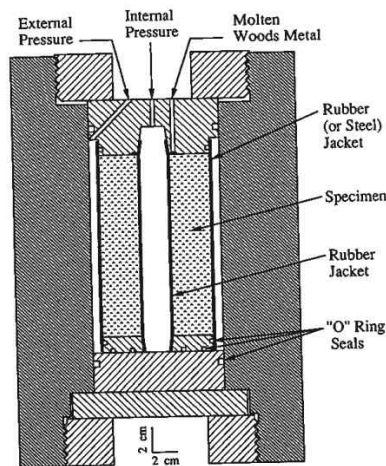


Abbildung 14: Prüfmaschine für Hohlzylinder aus Berea Sandstein und Indiana Kalkstein (aus: Ewy und Cook,1990)

Bei Aufbringung eines äußeren Drucks von 75 N/mm^2 und Reduzierung des stabilisierenden effektiven inneren Drucks auf null zeigten sich im Berea Sandstein Abplatzungen an den gegenüberliegenden Seiten parallel zur Hohlraumwand. Der belastete Prüfkörper wurde mit einem Kunstharz getränkt, so dass man das Rissbild besser erkennen kann (Abbildung 15).

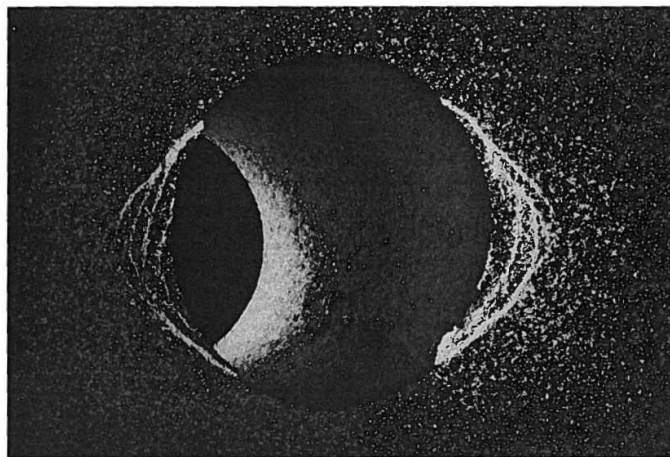


Abbildung 15: Typisches Versagensbild eines Hohlraums in Berea Sandstein. Die Risse an den Ulmen sind gut erkennbar (aus: Ewy und Cook 1990).

Die ersten Brüche bilden sich dabei an jenen Stellen, an denen das Verhältnis von Tangentialspannung zu Festigkeit am größten ist und eine große Dichte an Mikrorissen vorhanden ist. Bei diesen Versuchen wurden ebenfalls die sich gegenüberliegenden Spaltbrüche beobachtet, welche mit fortschreitender Belastung weiter ins intakte Gestein wandern.

Die Tiefe des entstehenden v-förmigen Ausbruchs reicht bis zur Hälfte des Radius des Hohlraums, wobei sich im Zuge dieser Experimente gezeigt hat, dass durch den stabilisierenden inneren Druck die Tiefe auch bei sehr großer äußerer Beanspruchung stark reduziert werden kann. Es wurde auch die von Martin (1997) beschriebene, weit über der Druckfestigkeit liegende Festigkeit am Hohlraumrand bei kleinen kreisförmigen Durchmessern festgestellt (vgl. 3.3.1). Besonders bei nicht durch Sicherungsmaßnahmen unterstützten Untertagebauwerken gehen mit dieser Art des Versagens große radiale Verformungen einher, welche mit Rechenmodellen häufig schwer nachzubilden sind.

3.4. In-situ-Versuche und Beobachtungen bei bestehenden Tunneln

Das größte Nuklearforschungszentrum von Kanada (Atomic Energy of Canada Limited - AECL) hat in seinem Untergrund-Forschungszentrum (URL), 120 km nordöstlich von Winnipeg einen Testtunnel mit einem Durchmesser von 3,5 m in kompaktem Gestein (Lac du Bonnet Granit) aufgeföhren, um die zeitabhängigen Verformungen um den Hohlraum zu beobachten und die Nutzbarkeit als Lagerstätte für nuklearen Abfall zu beurteilen. Der Testtunnel befindet sich in einer Tiefe von 420m, da dort kaum Störungzonen vorhanden sind und der durchföhrene Granit annähernd isotrope Festigkeitseigenschaften aufweist. Zu Beginn des Experiments wurden der Primärspannungszustand und die Festigkeiten des Gesteins umfassend untersucht, wobei sich 3 ausgeprägte Hauptspannungen zeigten: $\sigma_1 = 60 \pm 3 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_2 = 45 \pm 4 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_3 = 11 \pm 2 \text{ N/mm}^2$ (Abbildung 16). Zusätzlich zu der Bestimmung der Spannungen wurden Bohrungen abgeteuft, um die Standfestigkeit von Bohrlöchern verschiedenster Durchmesser zu untersuchen, wobei der Einfluss vom Durchmesser auf die aufnehmbaren Kräfte in den Feldversuchen nur geringfügig festzustellen war (Martin et al. 1997, Martin 1997).

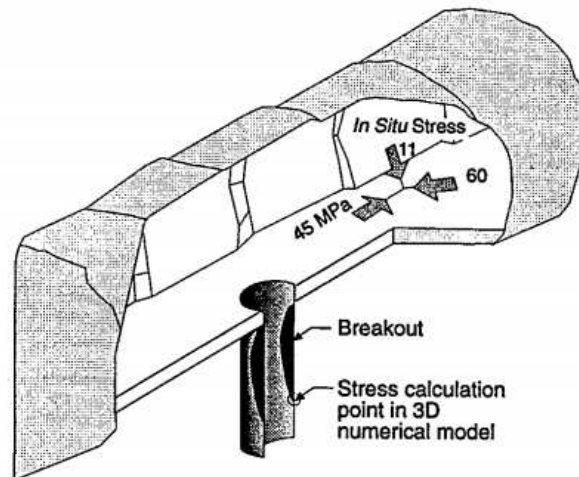


Abbildung 16: Primärer Spannungszustand des Testtunnels der AECL in Kanada im Lac du Bonnet Granit (aus: Martin 1997)

Auch bei diesem Tunnel wurden die gegenüberliegenden Abplatzungen (v-förmige Ausbrüche) unter richtungsbetonter Druckbeanspruchung beobachtet. Derartige Spaltbrüche können im Extremfall bis zum Kollaps des gesamten Hohlraums führen. Diese Art von Versagen wurde hauptsächlich bei großen Überlagerungsdrücken und anisotropen Spannungsverhältnissen in massigen Gesteinen, weniger bei seichtliegenden Tunneln beobachtet.

Infolge des Tunnelausbruchs werden die Radialspannungen am Hohlraumrand auf null reduziert. An jenen Stellen, wo die vorhandenen Tangentialspannungen größer werden als die Druckfestigkeit des Gesteins, tritt Versagen ein und es kommt durch Sprödbrüche zu Abplatzungen an den Hohlraumoberflächen parallel zur größten Hauptnormalspannung.

Aufgrund der hohen Horizontalkräfte (gedrehter Spannungszustand), die auf den Testtunnel wirken, bilden sich die v-förmigen Ausbrüche in der Firste und der Sohle des Tunnels aus (Abbildung 17). In diesem Experiment konnten nur Aufzeichnungen über die Rissentwicklung in der Firste gemacht werden, da die Sohle bis zur Beendigung des Ausbruchs mit Schutt bedeckt war (Martin 1997).



Abbildung 17: AECL Testtunnel in Lac du Bonnet Granit mit Darstellung der Hauptspannungen (Horizontalspannung größer als Vertikalspannung) (aus: Martin 1997)

Die Rissbildung begann an der Firste ca. 0,5m bis 1m vor der Stollenbrust und schritt mit fortschreitendem Abbau der Ortsbrust voran, wobei v-förmige Ausbrüche in der Firste sowie in der Sohle entstanden. Die Dicke der Abplatzungen variierte dabei von wenigen Millimetern bis zu 10 Zentimetern, wobei keine bevorzugte Seite der Abplatzungen festgestellt werden konnte.

Martin (1997) unterteilte die Entstehung der v-förmigen Ausbrüche in folgende Stufen:

➤ **Stufe 1 – Erste Rissbildungen**

Es entstanden bis zu einem Meter vor der Ortsbrust Mikrorisse im Fels, welche mit mikroseismischem Monitoringsystemen beobachtet werden konnten.

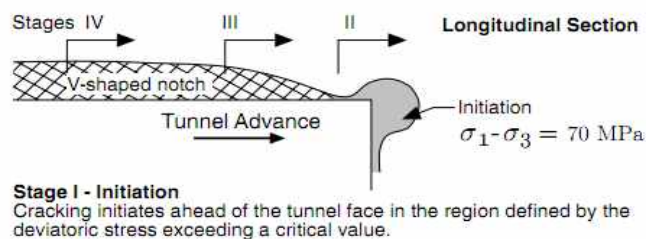
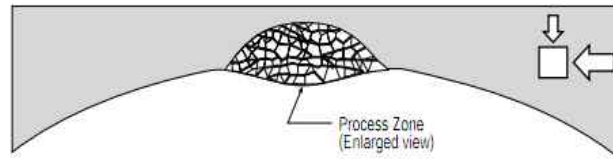


Abbildung 18: Stufe 1 – Erste Rissbildungen (aus: Martin 1997)

➤ Stufe 2 – Rissentwicklung

Eine sehr schmale, ca. 5 bis 10 cm breite Zone bildete sich ca. 0,5 m bis 1,0 m hinter der Ortsbrust an jenen Stellen aus, wo die Tangentialspannung die Druckfestigkeit des Gesteins überschritt. Die ersten Brüche entstanden dabei an jener Stelle, an der die Dichte der Mikrorisse am größten war.



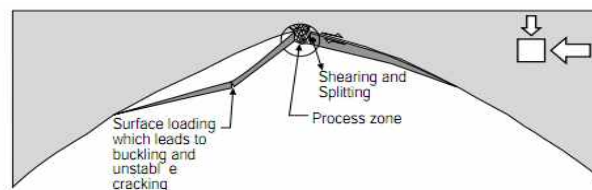
Stage II - Process Zone

Critically oriented flaws are exploited in the zone of maximum tangential stress. This process initiates at the boundary of the tunnel. Shearing and crushing occurs in a very narrow process zone about 5 - 10 cm wide. Extensive dilation, at the grain-size scale, occurs in this process zone.

Abbildung 19: Stufe 2 – Rissentwicklung (aus: Martin 1997)

➤ Stufe 3 - Abplatzungen

Bildung von ein bis mehrere Zentimeter dicken Abplatzungen an den Flanken der v-förmigen Kerbe mit fortschreitendem Ausbruch.



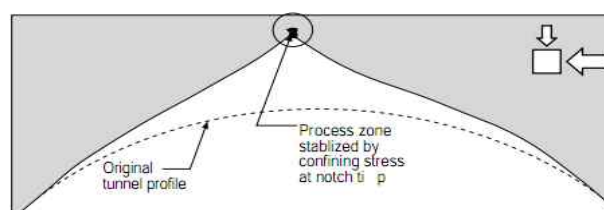
Stage III - Slabbing & Spalling

Development of the process zone leads to the formation of thin slab. These thin slabs form by: 1) shearing, 2) splitting, and 3) buckling. The thickness of the slabs varies from 1 to 5 cm. The thickest slabs form as the notch reaches its maximum size. Near the notch tip the slabs are curved.

Abbildung 20: Stufe 3 – Abplatzungen (aus: Martin 1997)

➤ Stufe 4 - Stabilisierung

Infolge der weiteren Ausformung der v-förmigen Ausbrüche und der fortschreitenden horizontalen Verformung des Hohlraums stabilisierte sich der Querschnitt und es kam zu keinen weiteren Abplatzungen.



Stage IV - Stabilization

The development of the notch stops when the notch geometry provides sufficient confinement to stabilize the process zone at the notch tip. This usually means there is a slight "tear-drop" like curvature to the notch shape.

Abbildung 21: Stufe 4 – Stabilisierung (aus: Martin 1997)

4. MATERIALMODELLE – VERSAGENSKRITERIEN

Um das Verhalten von Fels unter Druckbeanspruchung von der Entstehung und Ausbreitung von Mikrorissen bis hin zum großflächigen Versagen zu beschreiben, wurden verschiedene Materialmodelle entwickelt. Zu den am häufigsten verwendeten gehören die Bruchkriterien nach Mohr-Coulomb und nach Hoek & Brown.

Die verschiedenen Kriterien beschreiben das Gebirgsverhalten durch Verwendung unterschiedlicher Parameter. Das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb verwendet die Parameter Kohäsion und Reibungswinkel, welche relativ einfach im Labor bestimmt werden können. Durch diese Darstellung der linearen Bruchgeraden ergibt sich eine stark vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit. Das Kriterium nach Hoek & Brown berücksichtigt hingegen das tatsächliche Gebirgsgefüge durch Miteinbeziehung von empirisch bestimmten Faktoren.

Die vielen verschiedenen Materialmodelle, welche zur Berechnung zur Verfügung stehen, haben gemeinsam, dass die Simulation der komplexen Vorgänge beim Versagen eines Hohlraums lediglich eine Annäherung an die Wirklichkeit sein kann. Es stellt sich dabei die Frage, ob es sinnvoll ist, ein komplizierteres Berechnungsmodell zu verwenden, welches die tatsächlichen Vorgänge besser beschreibt, wenn die darin verwendeten Parameter schwer zu bestimmen sind, oder ob es in vielen Fällen ausreicht, ein einfacheres Modell zu wählen, bei welchem die Eingangsparameter bei Bedarf relativ einfach bestimmbar sind. Welches Bruchkriterium ein Problem am besten beschreibt, hängt außerdem vom jeweiligen Gestein und vom Bruchmechanismus ab. Zum Beispiel schlagen Diederichs (2007) und Kaiser und Kim (2008) die Verwendung einer dreiteiligen Bruchkurve (basierend auf Mohr-Coulomb) zur Beschreibung von Spröbruchvorgängen vor.

4.1. Lineares Bruchkriterium nach Mohr–Coulomb

Spannungen, welche sich beim Druckversuch im Prüfkörper ausbilden, können mit Hilfe der Mohrschen Spannungskreise im $\sigma - \tau$ Diagramm geometrisch dargestellt werden. Beim Mohr-Coulombschen Versagenskriterium wird die aufnehmbare Schubspannung τ eines Materials in Abhängigkeit von der Normalspannung σ , vom Reibungswinkel φ und von der Kohäsion c dargestellt. Die Scherfestigkeit eines Materials ist erreicht, sobald die lineare Beziehung

$$\tau = c + \sigma * \tan\varphi \quad (\text{Mohr – Coulombsche Grenzbedingung})$$

in einem Schnitt erfüllt ist, das heißt, wenn der Mohrsche Kreis die Bruchgerade tangiert. Ab diesem Punkt tritt Versagen ein, d. h., es kann keine höhere Schubspannung aufgenommen werden.

Die zur Darstellung der Scherfestigkeit benötigten Materialparameter Kohäsion und Reibungswinkel werden durch Triaxialversuche an zylindrischen Prüfkörpern bestimmt. Die relativ einfache Bestimmung dieser Materialparameter macht es zum am häufigsten verwendeten Bruchkriterium. Es handelt sich um eine lineare Darstellung, welche am besten für Untersuchungen bei großem Seitendruck σ_3 , bei welchem sich tatsächlich Scherbrüche ausbilden, geeignet ist. Bei Bruchmechanismen in Bereichen geringen Seitendrucks, wie auch bei dem in dieser Arbeit behandelten Problem des Sprödbruchs im Tunnelbau, führt die Anwendung der Mohrschen Bruchgeraden allerdings nicht zwangsläufig zu zufriedenstellenden Ergebnissen (Hudson und Harrison 1997).

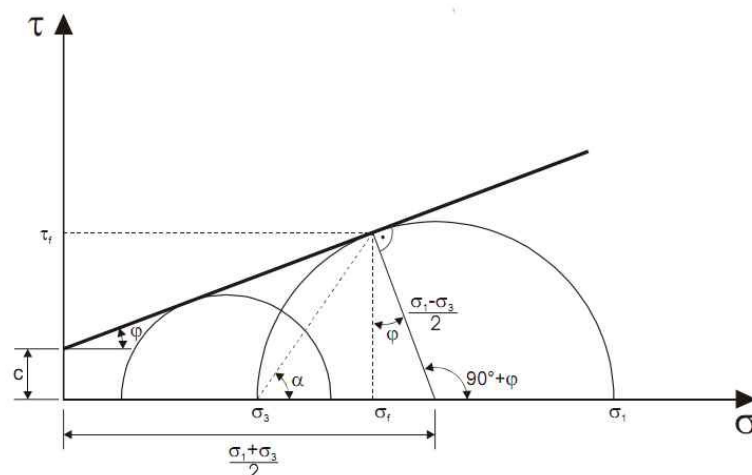


Abbildung 22: Mohr-Coulombsches Bruchkriterium (aus: Schubert 2007)

4.2. Nichtlineares Bruchkriterium nach Hoek & Brown

Ein weiteres Kriterium, welches relativ häufig zur Anwendung kommt, ist das Bruchkriterium nach Hoek & Brown (1983), welches durch den parabolischen Ansatz Abweichungen von der Linearität berücksichtigt.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s}$$

σ_1 größte Hauptnormalspannung beim Versagen

σ_3 kleinste Hauptnormalspannung, oder in Falle eines Triaxialversuchs der Seitendruck

σ_ceinaxiale Druckfestigkeit des intakten Gesteins aus dem das Gebirge aufgebaut ist

m, s ... Konstanten

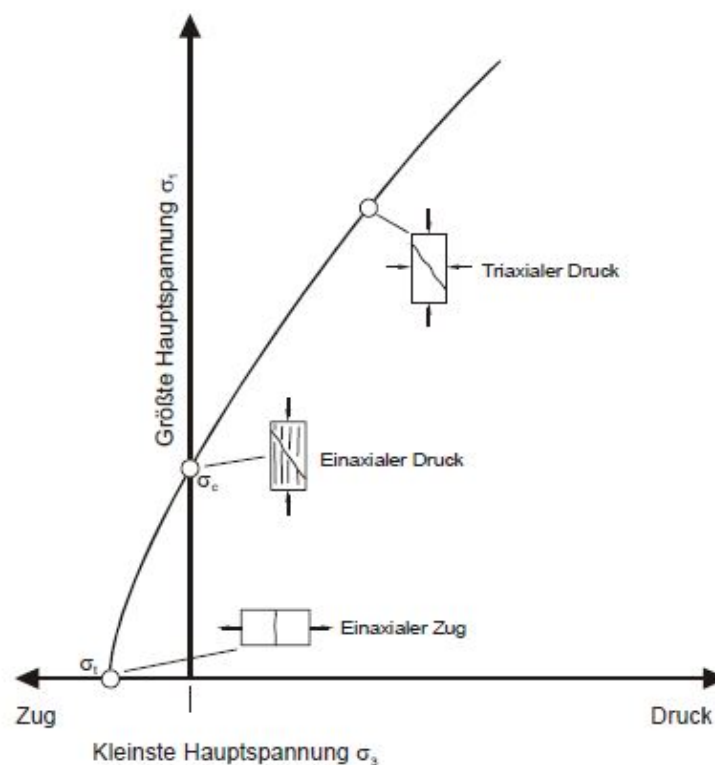


Abbildung 23: Hoek & Brown Kriterium im $\sigma_1 - \sigma_3$ Diagramm (aus: Schubert 2007)

Ein wichtiger Faktor betrifft die Unterscheidung zwischen intaktem und gestörtem Gebirge, die Unterscheidung zwischen Gesteinsfestigkeit und Gebirgsfestigkeit.

Je weiter man sich von intaktem Material zu geklüftetem Fels bewegt, desto weniger experimentell bestimmte Daten sind vorhanden. Da es sich weit leichter gestaltet, kleinere Prüfkörper aus intaktem Gestein herzustellen als Versuche an großen Prüfkörpern aus geklüftetem Fels durchzuführen, sind Daten aus Laborversuchen hauptsächlich für intakten Fels vorhanden.

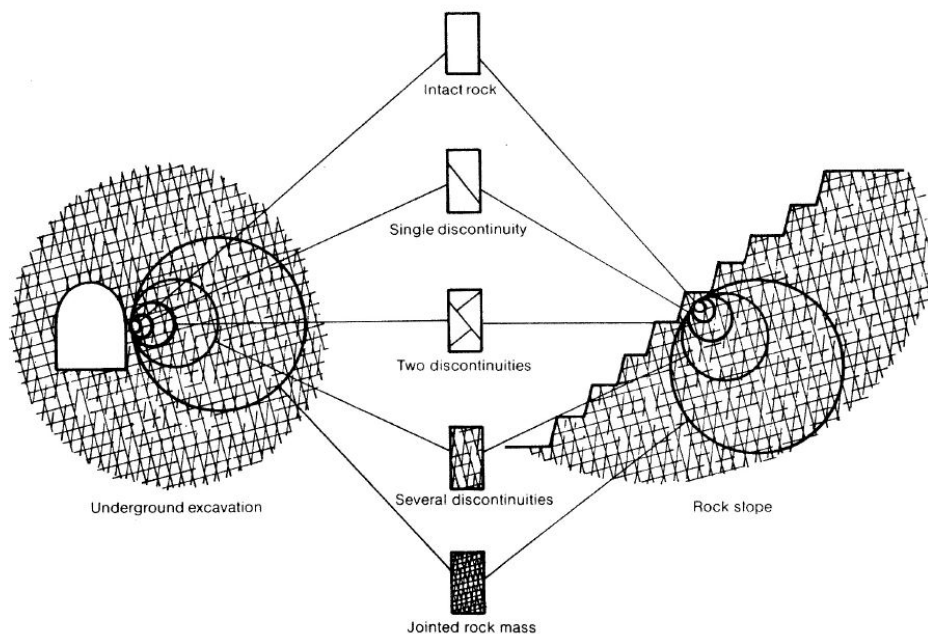


Abbildung 24: Übergang von intaktem Material zu stark geklüftetem Fels (aus: Hoek 1983)

Beim Bruchkriterium nach Hoek & Brown fließt dieser Effekt durch die Faktoren m und s in die Berechnung ein, wobei für kompaktes, intaktes Gestein in der Literatur $s=1$ vorgeschlagen wird, für stark gebrochenes oder zerlegtes Material vermindert sich s bis zu null. Der Faktor m hängt ab vom Gesteinstyp, er ist hoch für intaktes Gestein und wird für gebrochenes Material reduziert. Diese Umrechnung der Materialparameter je nach Zerlegungsgrad des Gebirges wird durch den Parameter GSI (Geological Strength Index) und durch das Maß der Störung infolge des Lösungsvorgangs bestimmt.

4.3. Dreiteilige Bruchkurve

Diederichs (2007) und Kaiser und Kim (2008) haben beobachtet, dass bei Druckversuchen ohne Behinderung der Seitendehnung die Prüfkörper durch Sprödbruch versagen, bei großem Seitendruck sich jedoch Scherbrüche ausbilden. Sie entwickelten daher eine dreiteilige Bruchkurve die das Gebirgsverhalten (besonders beim Auftreten von Sprödbrüchen) besser beschreibt. Es handelt sich dabei um ein abgewandeltes Mohr-Coulomb Kriterium, bei dem in Bereichen nahe von Hohlräumen (Bereiche geringen Seitendrucks) die Druckfestigkeit des Gesteins niedriger angesetzt wird. In diesen Bereichen versagt das Gestein infolge Sprödbruchs schon vor dem Erreichen der Scherfestigkeit nach Mohr-Coulomb.

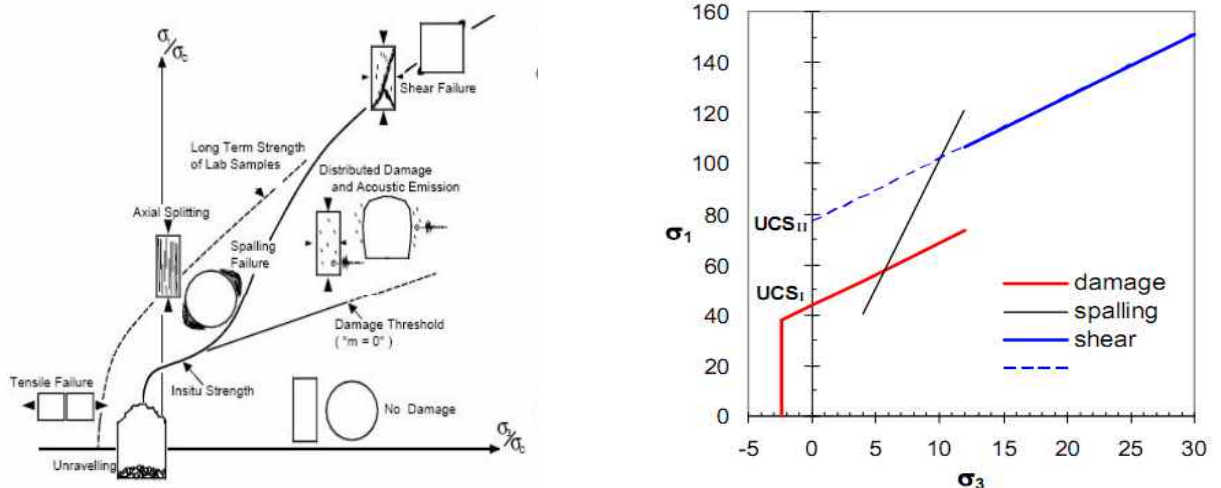


Abbildung 25: links: S-förmige Bruchkurve mit folgenden Versagensbereichen: Beginn von Rissbildungen, Sprödbruchversagen, Scherversagen; rechts: dreiteilige Bruchumhüllende zur Berücksichtigung von sprödem Versagen bei geringem Seitendruck (aus: Kaiser und Kim 2008)

Die oben abgebildete, dreiteilige Bruchkurve zeigt, dass die Druckfestigkeit nahe dem Ausbruchsrand (bei verschwindender Radialspannung σ_3) relativ gering ist, ab einem gewissen Abstand zum Hohlraum sehr stark, bis auf das Doppelte, zunimmt und weiter – wenn auch mit geringerer Steigung – ansteigt.

Um den stützenden Ausbau richtig zu wählen und zu bemessen, ist es wichtig, die Festigkeit rund um den Hohlraum richtig abzuschätzen. Dies ist mit der dreiteiligen Bruchkurve möglich. Sowohl das Mohr-Coulomb-Kriterium als auch jenes von Hoek & Brown nehmen einen stetigen Anstieg der Festigkeit an. Ersteres

Kriterium mit linearem Anstieg, zweiteres einen nicht linearen Anstieg. Würde man mit diesen konventionellen Modellen die Festigkeit des Gebirges abschätzen, besteht die Gefahr, die Festigkeiten in Bereichen mit geringem Seitendruck zu überschätzen sowie im Inneren des Berges bei hohem Seitendruck zu unterschätzen.

Ein dreiteiliges (oder s-förmiges) Kriterium ist daher bei der Modellierung im Tunnelbau nötig, um ein allgemein gültiges Versagenskriterium von Sprödbruch im Fels mit wenig Seitendruck bis zum Scherbruch in voll eingespanntem Gestein zu beschreiben (Kaiser und Kim 2008).

5. VERSUCHE

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Verhalten von insgesamt 49 quaderförmigen Prüfkörpern mit mittigem, kreisrundem Loch unter einaxialer Belastung untersucht. Damit wurden Tunnelquerschnitte im Gebirge unter anisotropen In-situ-Spannungen simuliert.

5.1. Prüfmaschine

Je nach Bruchlast und Abmessungen der Prüfkörper wurden die Versuche in einem Schenck Prüfrahmenn bzw. im großen Prüfrahmenn im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien durchgeführt.

5.1.1. Schenck Prüfrahmenn

Im Schenck Prüfrahmenn können Prüfkörper mit einer Maximallast von 2 MN beaufschlagt werden. Der Körper wird dabei in vertikaler Richtung belastet. Um eine möglichst gleichmäßige Lasteinleitung über die gesamte Prüfkörperquerschnittsfläche zu schaffen, wurde zwischen Hydraulikzylinder und Prüfkörper eine Stahlplatte eingelegt (Abbildung 26).

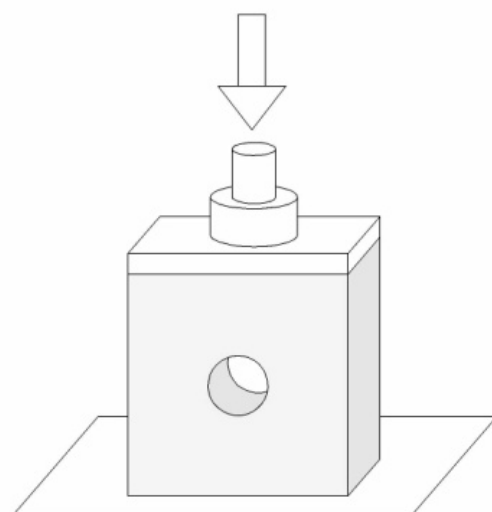


Abbildung 26: Versuchsaufbau der Versuchsreihe S bis L im Schenck Prüfrahmenn

5.1.2. Großer Prüfrahmen

Im großen Prüfrahmen kann ein Prüfkörper durch eine Maximallast von 18 MN belastet werden. Die Kraft wird in horizontaler Richtung durch 4 Hydraulikzylinder über eine Stahlplatte auf den Prüfkörper aufgebracht. Um den Ein- und Ausbau des Sandsteinquaders zu ermöglichen, wurde dieser an der linken und rechten unteren Ecke auf einer dünnen Stahlplatte mit aufgelegtem Elastomer gelagert. Die Lagerung auf Elastomerplatten ermöglichte die freie Verformung des Prüfkörpers während des Versuchs (Abbildung 27).

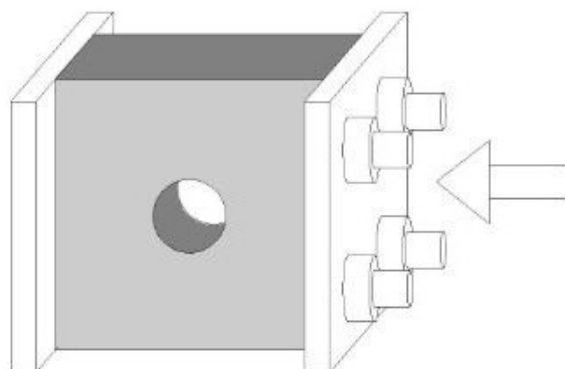
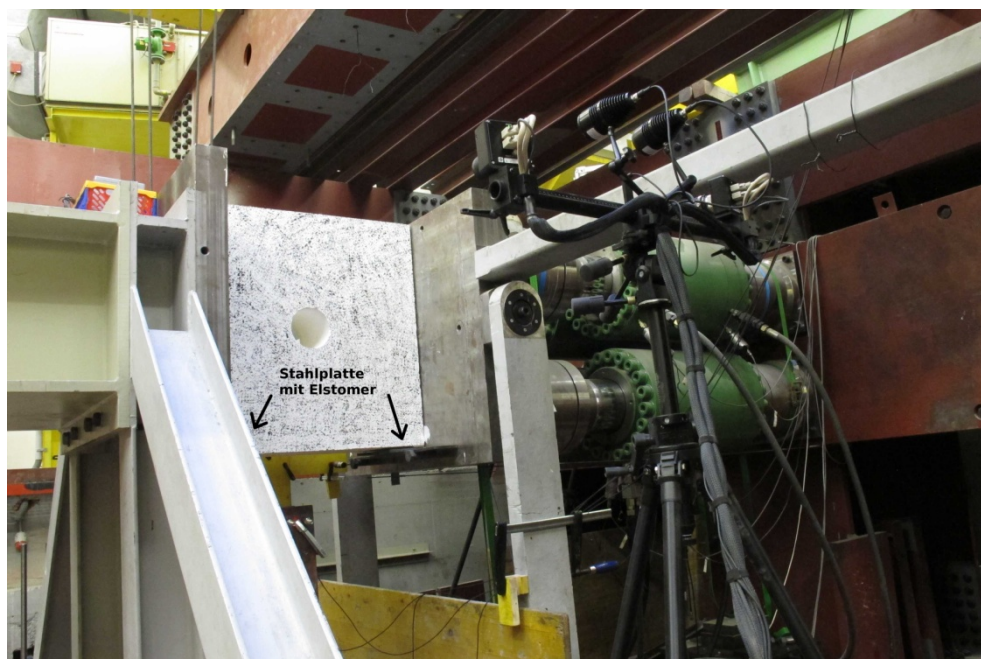


Abbildung 27: Versuchsaufbau der Versuchsreihe XL im großen Prüfrahmen

5.2. Messeinrichtungen

5.2.1. Optisches Verformungsmesssystem ARAMIS

Für die Messungen der Verschiebungen des Prüfkörpers wurde das optische Messsystem ARAMIS 3D (GOM 2012) eingesetzt. Es ermöglicht eine zerstörungsfreie, vollflächige Verformungsmessung an der Oberfläche des Prüfkörpers und hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Messsysteme angebracht werden müssen. Für die Erfassung der Verschiebungsvektoren kommen 2 Kameras (Abbildung 28) zum Einsatz, welche vor der Messung mittels Kalibrierplatte bzw. -kreuz kalibriert werden. Nach dem starten der Messung nimmt das ARAMIS-Messsystem pro Sekunde ein Bild auf, insgesamt können pro Messung ca. 1800 Bilder verarbeitet werden. Dies ermöglicht somit eine Versuchsdauer von ca. 30 Minuten. Nach dem Versuch wird der auszuwertende Bereich der Aufnahmen und ein Startpunkt für die Berechnung des Messprojektes definiert. ARAMIS beobachtet dabei die Verformung des Prüfkörpers über eine Vielzahl von rechteckigen Bildausschnitten (Facetten), deren Größe individuell festgelegt werden kann. In den verschiedenen Stufen der Bilderfolge werden diese Facetten von ARAMIS über die individuellen Grauwertstrukturen erkannt und verfolgt. Um diese Erkennung der Facetten zu ermöglichen, mussten die Prüfkörper an der Vorderseite mit einer dünnen Schicht Sumpfkalk bestrichen werden und anschließend wurde mit schwarzem Lack ein Farbmuster aufgesprüht (Abbildung 29), da die Sandsteinprüfkörper eine sehr unregelmäßige Oberfläche aufwiesen (GOM 2011).



Abbildung 28: ARAMIS-Messsystem, Hochauflösende Kameras mit zugehörigem Hochleistungsrechner (GOM 2012)

In Abbildung 29 ist die Oberfläche des Prüfkörpers L1 vor und nach der Vorbehandlung dargestellt.

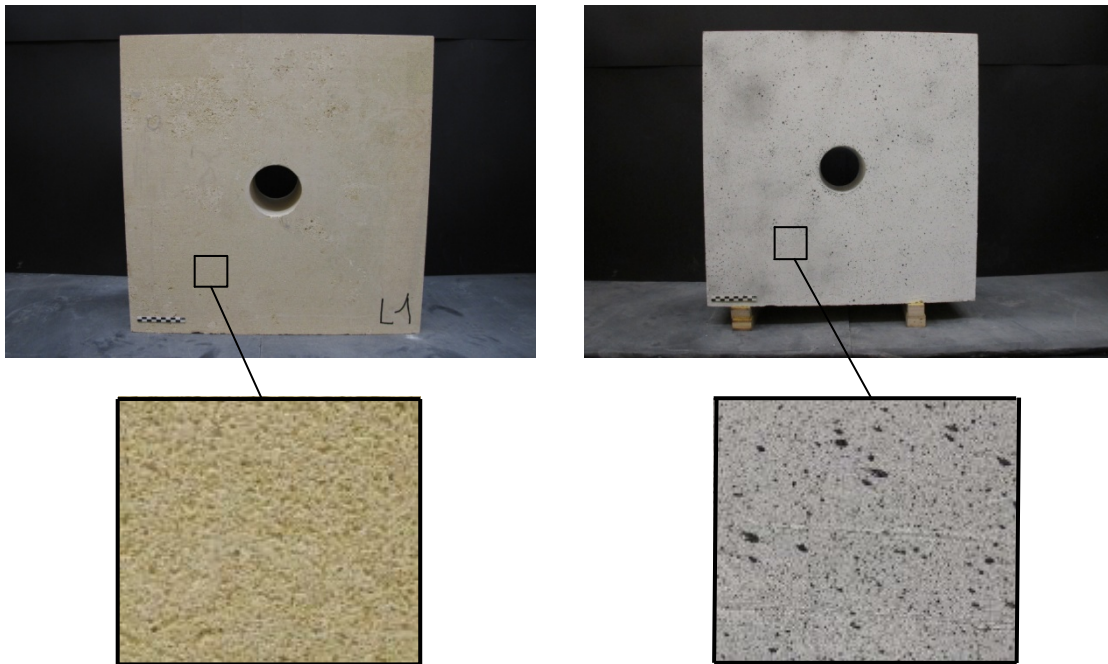


Abbildung 29: Oberfläche des Prüfkörpers L1 vor und nach Vorbehandlung (Anstrich mit Sumpfkalk und Farbsprühmuster aus schwarzem Lack)

Der große Vorteil dieses Messsystems ist neben dem geringen Aufwand nach der einmaligen Kalibrierung vor allem die genaue Aufnahme der zeitlichen Abfolge der Verschiebung und der Entwicklung des Rissbildes. Außerdem müssen bei diesem System zur Verformungsmessung keine Dehnmessstreifen angebracht werden. Im Zuge der Auswertung der Ergebnisse mithilfe der ARAMIS Software können Hauptformänderungen, Nebenformänderungen, Verschiebungen etc. dargestellt werden.

Der Nachteil dieses Messsystems ist jedoch, dass nur die Vorderseite des Prüfkörpers beobachtet wird und dass bei Abplatzungen an der Oberfläche diese Facetten ausfallen und nicht weiter gemessen werden. Bei einzelnen fehlenden Facetten können die Ergebnisse aber nachträglich interpoliert werden.

5.2.2. Schallemissionsanalyse

Bei den Versuchsreihen L und XL wurde zusätzlich zur optischen Messung der Verschiebungen ein akustisches Messsystem eingesetzt, um zusätzliche Informationen über die Entstehung der Risse zu bekommen welche (noch) nicht mit freiem Auge sichtbar sind. Es wurden 4 Sensoren auf den Prüfkörper aufgebracht, mit welchen die akustischen Signale gemessen wurden (Abbildung 30 und Abbildung 31). Durch die Kenntnis der Position der Sensoren und der Schallausbreitung im Prüfkörper kann auf die Position der Risse rückgeschlossen werden.

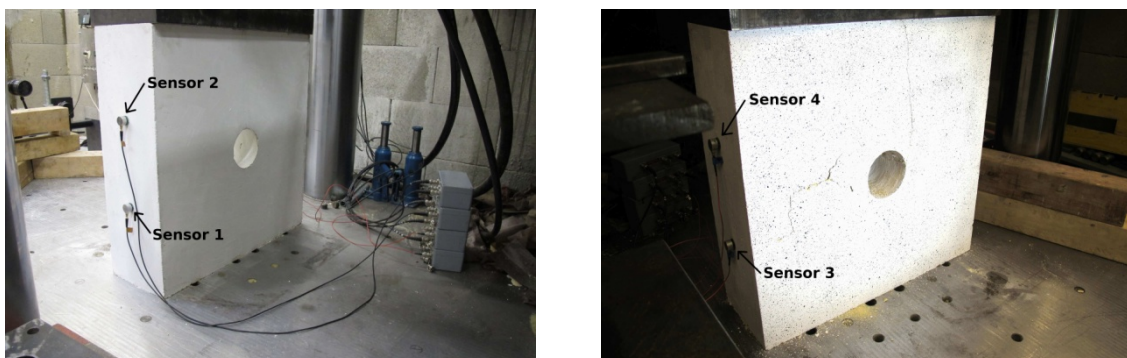


Abbildung 30: Sensoren zur Schallemissionsanalyse an den Seiten des Prüfkörpers L3 (Links: Ansicht von hinten; Rechts: Ansicht von vorne)

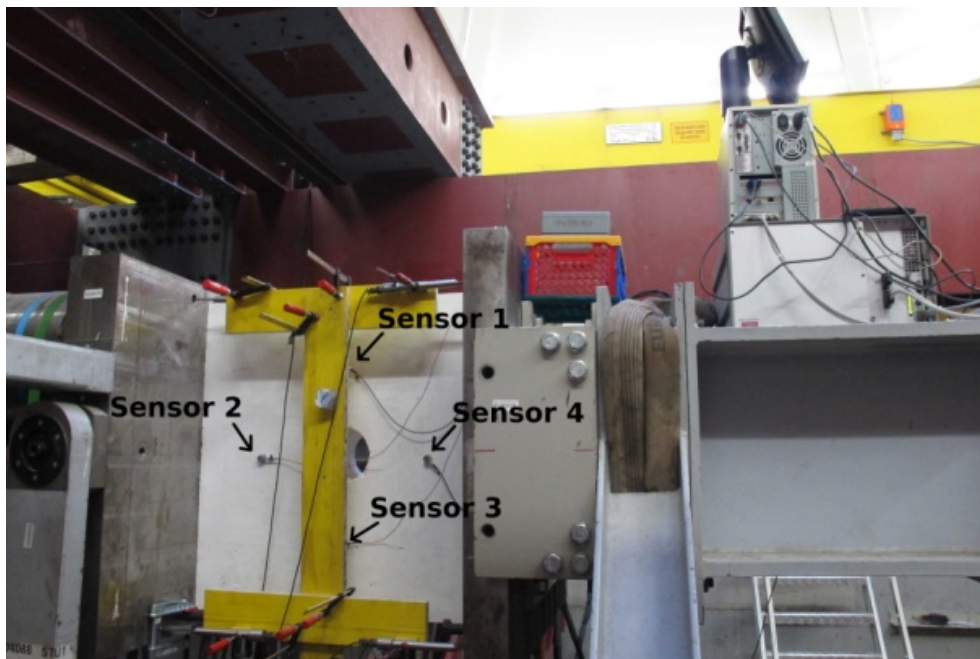


Abbildung 31: Sensoren zur Schallemissionsanalyse an der Rückseite des Prüfkörpers XL3

5.3. Prüfkörper

5.3.1. Material der Prüfkörper

Für die Versuche wurden Prüfkörper aus Sandstein und aus Marmor verwendet. Sandstein wurde vor allem deshalb verwendet, weil er trotz hoher Formfestigkeit eine relativ geringe Druckfestigkeit hat und leicht zu bearbeiten ist.

5.3.1.1. *Sandstein*

Der für die Versuche im Zuge dieser Arbeit verwendete Kalksandstein gehört zu den bedeutendsten Naturwerksteinen und stammt aus dem Römersteinbruch bei St. Margarethen im Burgenland. Bereits vor 2000 Jahren wurden dort Baumaterialien für die einstige Römersiedlung Carnuntum abgebaut. Im 17. Jahrhundert wurde der Steinbruch wieder aktiviert und ist bis heute in Verwendung. Durch die Nähe zu Wien und die leichte Bearbeitbarkeit des Steins wurde dieser für die Herstellung vieler Prunkbauten in Wien verwendet, wie zum Beispiel beim Stephansdom, dem Wiener Rathaus, dem Schloss Schönbrunn, der Wiener Börse sowie anderer Bauten entlang der Ringstraße. Somit ist heute ein wichtiger Verwendungszweck des St. Margarethener Kalksandsteins die Restaurierung und Sanierung dieser Bauwerke.

St. Margarethener Kalksandstein gehört zur Gruppe der Leithakalke, welche vor rund 15 bis 16 Millionen Jahren aus Skelettfragmenten von Rotalgen entstanden. Es handelt sich um fein- bis grobkörnigen, porösen Stein mit beige-leicht gelblicher Farbgebung.

Tabelle 1: Technische und physikalische Kennwerte von St.Margarethener Kalksandstein (aus: Rohatsch 1997)

Technische und physikalische Kennwerte		
Einaxiale Druckfestigkeit	N/mm ²	30–57
Biegezugfestigkeit	N/mm ²	7–10
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	0,8–2,9
Rohdichte	g/cm ³	1,97–2,26
Effektive Porosität	%	16–25
Wasseraufnahme	%	3,6–10,2

5.3.1.2. Marmor

Marmor ist ein aus Kalkstein oder anderen Karbonatgesteinen durch Druck oder Hitze entstandenes (metamorphes) Gestein. Der hier verwendete Laaser Marmor wird südlich von Laas in Südtirol/Italien abgebaut. Er ist mittel bis grobkörnig, seine seltenen dunkleren Lagen in der überwiegend hellweißen Farbgebung resultieren aus Verunreinigungen im Ausgangsmaterial.

Es handelt sich um einen widerstandsfähigen, wetterbeständigen und druckfesten Stein. In Wien wurde dieser Marmor beispielsweise für die Statue der Pallas Athene vor dem Parlamentsgebäude verwendet.

Tabelle 2: Technische und physikalische Kennwerte von Laaser Marmor (Lasa Marmo 2012)

Technische und physikalische Kennwerte		
Einaxiale Druckfestigkeit	N/mm ²	89
Biegezugfestigkeit	N/mm ²	14,6
Rohdichte	g/cm ³	2,71
Effektive Porosität	%	0,4
Wasseraufnahme	%	0,1

5.3.2. Abmessungen der Prüfkörper

Die Tabellen 3 bis 9 geben eine Übersicht über alle Prüfkörper aus Sandstein sowie Marmor. Es wird darin für alle Prüfkörper der Zweck des Versuchs, die Art des Versuchs sowie die verwendete Prüfmaschine und Messeinrichtung angegeben.

Die Abmessungen der Zylinder werden mit Durchmesser und Höhe, die Abmessungen der Quader mit Breite, Höhe, Tiefe und Lochdurchmesser angegeben

➤ Sandstein

Tabelle 3: Übersicht der Sandsteinzylinder – Versuchsreihe Z

Prüf- körper	Abmessungen		Anzahl	Zweck	Versuchs- art	Prüfmaschine	Mess- einrichtung
	[cm]						
Zylinder							
Z260.3 - Z260.4		Ø = 5,13 H = 12,25	2	Bestimmung der Festigkeit und Materialparameter $c, \varphi, E, \nu, \sigma$	Triaxial- versuch	Triaxzelle TU Graz	
Z1 - Z3		Ø = 10,0 H = 20,0	3	Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit σ_c	Einaxialer Druck- versuch	Schenck Prüfrahmen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS

Tabelle 4: Übersicht der Sandsteinquader – Versuchsreihe S

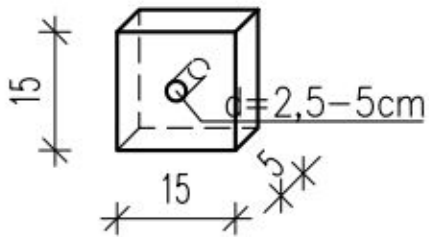
Prüf- körper	Abmessungen		Anzahl	Zweck	Versuchs- art	Prüfmaschine	Mess- einrichtung
	[cm]						
Quader mit Loch							
<i>Versuchsreihe S</i>							
S1-S5	B = 15,0 cm H = 15,0 cm T = 5,0 cm Ø = 2,5 cm	5	Beurteilung des Hohlraum- versagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druck- versuch	Schenck Prüfrahmen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS	
S6-S10	B = 15,0 cm H = 15,0 cm T = 5,0 cm Ø = 3,7 cm	5	Beurteilung des Hohlraum- versagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druck- versuch	Schenck Prüfrahmen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS	
S11-S15	B = 15,0 cm H = 15,0 cm T = 5,0 cm Ø = 5,0 cm	5	Beurteilung des Hohlraum- versagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druck- versuch	Schenck Prüfrahmen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS	

Tabelle 5: Übersicht der Sandsteinquader – Versuchsreihe M

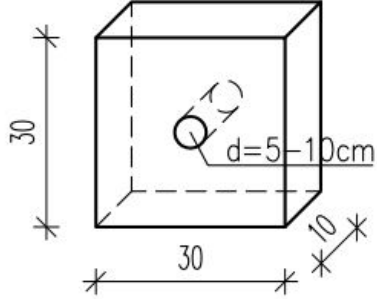
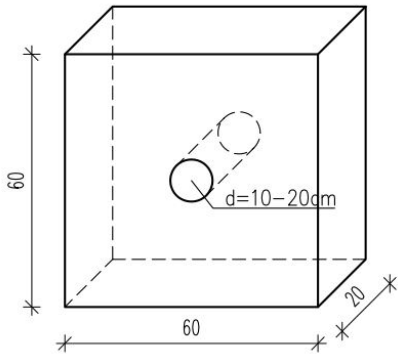
Prüfkörper	Abmessungen	Anzahl	Zweck	Versuchsart	Prüfmaschine	Messeinrichtung
	[cm]					
Quader mit Loch						
<i>Versuchsreihe M</i>						
M1-M5	B = 30,0 cm H = 30,0 cm T = 10,0 cm Ø = 5,0 cm	5	Beurteilung des Hohlraumversagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druckversuch	Schenck Prüfraumen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS
M6-M10	B = 30,0 cm H = 30,0 cm T = 10,0 cm Ø = 7,5 cm	5	Beurteilung des Hohlraumversagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druckversuch	Schenck Prüfraumen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS
M11-M15	B = 30,0 cm H = 30,0 cm T = 10,0 cm Ø = 10,0 cm	5	Beurteilung des Hohlraumversagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druckversuch	Schenck Prüfraumen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS

Tabelle 6: Übersicht der Sandsteinquader – Versuchsreihe L

Prüfkörper	Abmessungen	Anzahl	Zweck	Versuchsart	Prüfmaschine	Messeinrichtung
	[cm]					
Quader mit Loch						
<i>Versuchsreihe L</i>						
L1-L4	B = 60,0 cm H = 60,0 cm T = 20,0 cm Ø = 10,0 cm	4	Beurteilung des Hohlraumversagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druckversuch	Schenck Prüfraumen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS Schall-emissions-analyse

Prüfkörper	Abmessungen	Anzahl	Zweck	Versuchsart	Prüfmaschine	Messeinrichtung
	[cm]					
L5–L8	B = 60,0 cm H = 60,0 cm T = 20,0 cm Ø = 20,0 cm	4	Beurteilung des Hohlraumversagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druckversuch	Schenck Prüfrahen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS Schall-emissions-analyse

Tabelle 7: Übersicht der Sandsteinquader – Versuchsreihe XL

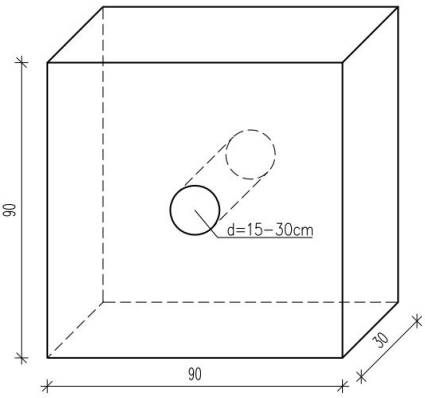
Prüfkörper	Abmessungen	Anzahl	Zweck	Versuchsart	Prüfmaschine	Messeinrichtung
	[cm]					
Quader mit Loch						
<i>Versuchsreihe XL</i>						
XL1 – XL3	B = 90,0 cm H = 90,0 cm T = 30,0 cm Ø = 15,0 cm	3	Beurteilung des Hohlraumversagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druckversuch	Prüfrahen, Maximallast: 18 MN	ARAMIS Schall-emissions-analyse
XL4 – XL5	B = 90,0 cm H = 90,0 cm T = 30,0 cm Ø = 30,0 cm	2	Beurteilung des Hohlraumversagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druckversuch	Maximallast: 18 MN	ARAMIS Schall-emissions-analyse



Abbildung 32: Sandsteinprüfkörper

➤ **Marmor**

Tabelle 8: Übersicht der Marmorzylinder-Versuchsreihe MZ

Prüfkörper	Abmessungen		Anzahl	Zweck	Versuchsart	Prüfmaschine	Messeinrichtung
	[cm]						
Zylinder							
Z260.1 - Z260.2		$\varnothing = 5,13$ H = 12,25	2	Bestimmung der Festigkeit und Materialparameter $c, \varphi, E, \nu, \sigma$	Triaxialversuch	Triaxzelle TU Graz	
MZ1 - MZ2		$\varnothing = 6,7$ H = 16,4	3	Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit σ_c	Einaxialer Druckversuch	Schenck Prüfrahmen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS

Tabelle 9: Übersicht der Marmorquader –Versuchsreihe M-M

Quader mit Loch						
Prüfkörper	Abmessungen	Anzahl	Zweck	Versuchsart	Prüfmaschine	Messeinrichtung
	[cm]					
Versuchsreihe M-M						
M-M1 - M-M3	B = 15,0 cm H = 15,0 cm T = 5,0 cm Ø = 5,5 cm	3	Beurteilung des Hohlraumversagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druckversuch	Schenck Prüfrahmen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS
M-M4 - M-M6	B = 15,0 cm H = 15,0 cm T = 5,0 cm Ø = 7,5 cm	3	Beurteilung des Hohlraumversagens Bestimmung der Druckfestigkeit	Einaxialer Druckversuch	Schenck Prüfrahmen, Maximallast: 2 MN	ARAMIS

5.4. Bestimmung der Festigkeiten und Materialparameter

5.4.1. Einaxialer Druckversuch an Zylindern

Es wurden sowohl 3 Sandsteinzylinder als auch 2 Marmorzylinder geprüft und die aufgebrachte Kraft sowie die Rissbildung mit dem ARAMIS 3D Messsystem aufgenommen.

Die Abmessungen der Zylinder sind in den Tabellen 10 und 11 angeführt.

Tabelle 10: Prüfkörper der Versuchsreihe Z

Versuchsreihe Z				
Anzahl Prüfkörper	Bezeichnung der Prüfkörper	Material	Höhe	Durchmesser
			[cm]	[cm]
3	(Z1 – Z3)	Sandstein	20,0	10,0

Tabelle 11: Prüfkörper der Versuchsreihe MZ

Versuchsreihe MZ				
Anzahl Prüfkörper	Bezeichnung der Prüfkörper	Material	Höhe	Durchmesser
			[cm]	[cm]
2	(MZ1 – MZ2)	Marmor	16,4	6,7

Fotos der Zylinder vor Versuchsbeginn sind in Abbildung 33 dargestellt.

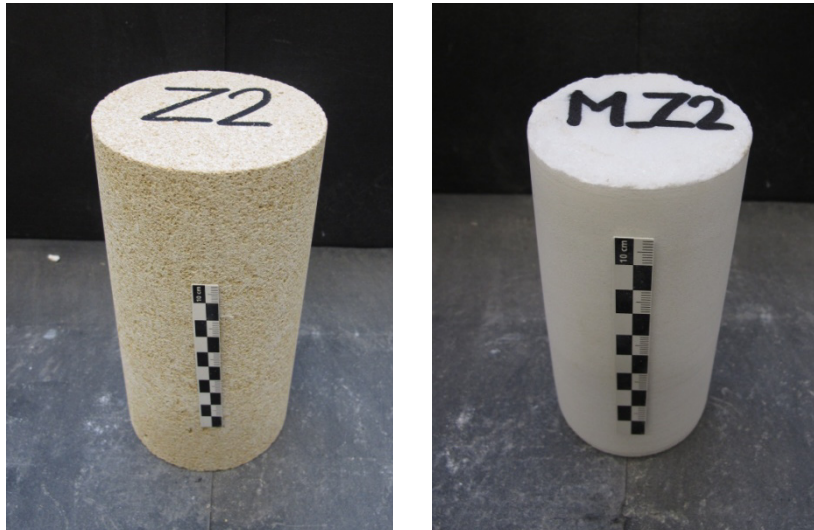


Abbildung 33: Sandstein und Marmorzylinder vor Versuchsbeginn

Die einaxialen Druckversuche wurden im Prüfraumen der Firma Schenck (siehe Kapitel 5.1.1) mit maximal aufbringbarer Kraft von 2 MN durchgeführt und die Verformungen und Kräfte mit dem optischen Messsystem ARAMIS 3D gemessen.

5.4.2. Triaxialversuch an Zylindern

Mittels Triaxialversuchen an Zylindern wurden die elastischen Parameter sowie die Parameter nach Mohr-Coulomb und Hoek & Brown bestimmt.

Die Triaxialversuche wurden als Druckversuche mit behinderter Seitendehnung durchgeführt, bei denen der zylindrische Prüfkörper in der Triax-Zelle (Abbildung 34) über ihren Umfang mit konstantem Flüssigkeitsdruck belastet wird. Um das Eindringen der Flüssigkeit in den Prüfkörper zu verhindern, wird diese mit einer Membran umhüllt. Zum Bruch des Prüfkörpers kommt es durch eine kontinuierlich gesteigerte axiale Kraft, wobei die Deformationen (axiale Längenänderung und Volumenänderung) und die Spannungen σ_1 und σ_3 aufgezeichnet werden. Die kleinste Hauptspannung $\sigma_2 = \sigma_3$ resultiert aus dem Flüssigkeitsdruck, σ_1 ergibt sich aus dem Flüssigkeitsdruck und der aufgebrauchten Axialkraft. (Lang et al. 2011)



Abbildung 34: Foto der an der TU Graz verwendeten Triaxialmaschine (aus: Schubert 2007)

Die Abmessungen der im Triaxialversuch getesteten Zylinder können den Tabellen 12 und 13 entnommen werden.

Tabelle 12: Prüfkörper Triaxialversuche Sandstein

Versuchsreihe Triaxialversuch Sandstein				
Anzahl Prüfkörper	Bezeichnung der Prüfkörper	Material	Höhe	Durchmesser
			[cm]	[cm]
2	260.3 – 260.4	Sandstein	10,3	5,1

Tabelle 13: Prüfkörper Triaxialversuche Marmor

Versuchsreihe Triaxialversuch Marmor				
Anzahl Prüfkörper	Bezeichnung der Prüfkörper	Material	Höhe	Durchmesser
			[cm]	[cm]
2	260.1 – 260.2	Marmor	10,3	5,1

5.5. Einaxialer Druckversuch an gelochten Scheiben

Um das Versagen eines kreisrunden Hohlraums unter Druckbeanspruchung und die aufnehmbaren Spannungen zu untersuchen, wurden einaxiale Druckversuche an gelochten Scheiben durchgeführt.

Entscheidende Parameter für die Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse der Versuche sind die Art der Messungen und Randbedingungen, wie Lasteinleitung und Geometrie der Prüfkörper (siehe Kapitel 3.2). Bei der Versuchsreihe M wurde der Einfluss der Reibung an den Lasteinleitungsflächen durch Einlage verschiedener Zwischenlagen (Aluminium und Teflon) untersucht.

5.5.1. Prüfkörper

Insgesamt wurden 49 quadratische Prüfkörper in 4 verschiedenen Größen sowie verschiedenen Lochdurchmessern aus Kalksandstein und Marmor abgedrückt. Die jeweiligen Abmessungen können den Tabellen 14 bis 18 entnommen werden. In den Abbildungen 35 bis 39 sind die Prüfkörper jeder Versuchsreihe vor Versuchsdurchführung dargestellt.

➤ Sandstein

Tabelle 14: Prüfkörper der Versuchsreihe S

Versuchsreihe S			
Anzahl Prüfkörper	Bezeichnung der Prüfkörper	Abmessungen (Breite x Höhe x Tiefe)	Lochdurchmesser
		[cm] x [cm] x [cm]	[cm]
5	(S1 – S5)	15 x 15 x 5	2,5
5	(S6 – S10)	15 x 15 x 5	3,7
5	(S11 – S15)	15 x 15 x 5	5,0

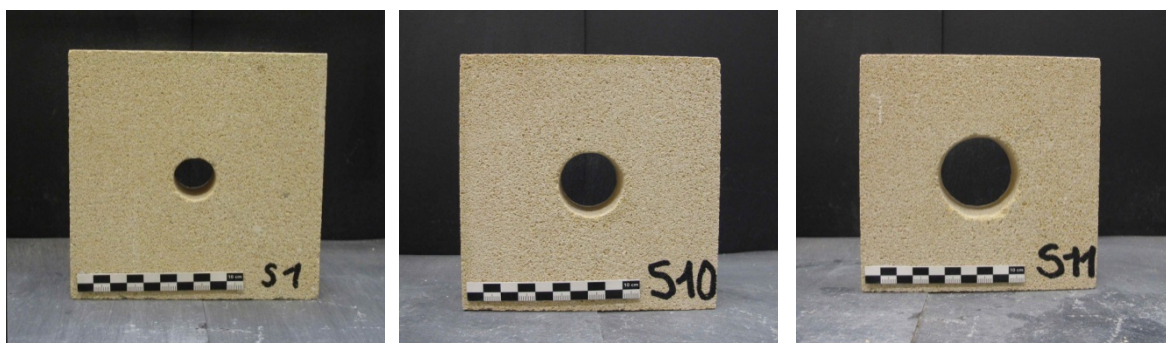


Abbildung 35: Prüfkörper der Versuchsreihe S

Tabelle 15: Prüfkörper der Versuchsreihe M

Versuchsreihe M			
Anzahl Prüfkörper	Bezeichnung der Prüfkörper	Abmessungen (Breite x Höhe x Tiefe)	Lochdurchmesser
		[cm] x [cm] x [cm]	[cm]
5	(M1 – M5)	30 x 30 x 10	5,0
5	(M6 – M10)	30 x 30 x 10	7,5
5	(M11 – M15)	30 x 30 x 10	10,0

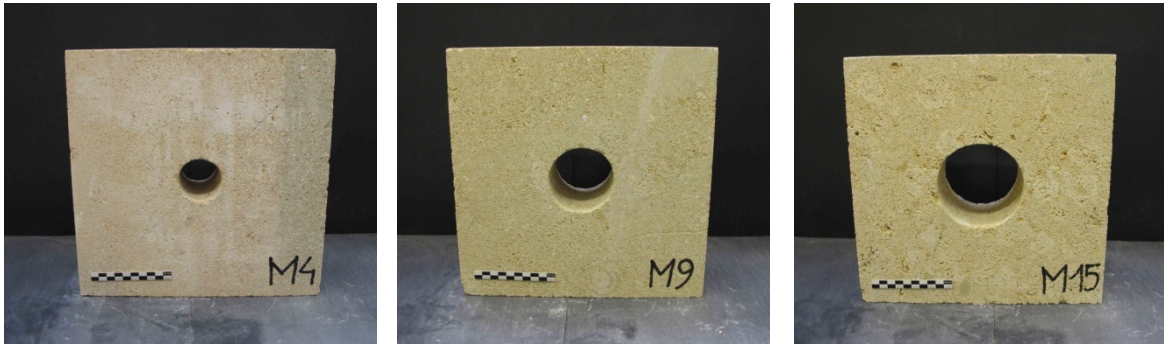


Abbildung 36: Prüfkörper der Versuchsreihe M

Tabelle 16: Prüfkörper der Versuchsreihe L

Versuchsreihe L			
Anzahl Prüfkörper	Bezeichnung der Prüfkörper	Abmessungen (Breite x Höhe x Tiefe)	Lochdurchmesser
		[cm] x [cm] x [cm]	[cm]
4	(L1 – L4)	60 x 60 x 20	10,0
4	(L4 – L8)	60 x 60 x 20	20,0

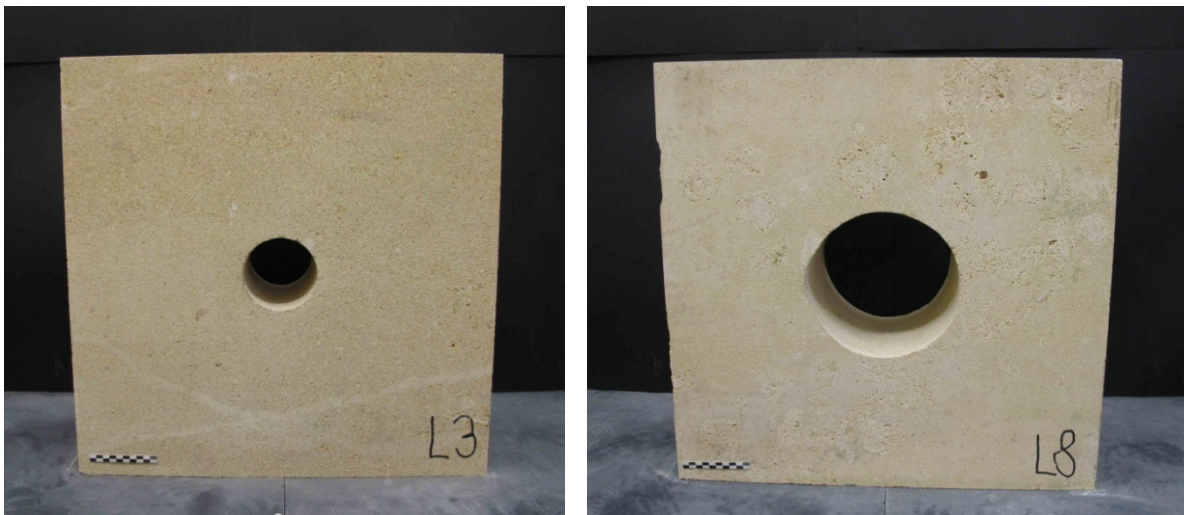


Abbildung 37: Prüfkörper der Versuchsreihe L

Tabelle 17: Prüfkörper der Versuchsreihe XL

Versuchsreihe XL			
Anzahl Prüfkörper	Bezeichnung der Prüfkörper	Abmessungen (Breite x Höhe x Tiefe)	Lochdurchmesser
		[cm] x [cm] x [cm]	[cm]
2	(XL1 –XL3)	90 x 90 x 30	15,0
3	(XL4 – XL5)	90 x 90 x 30	30,0

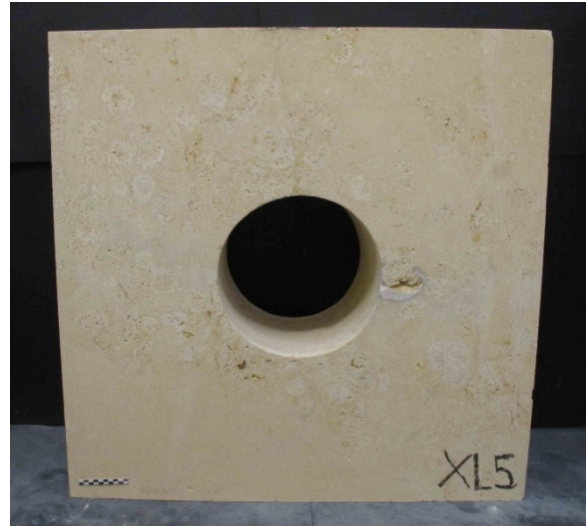
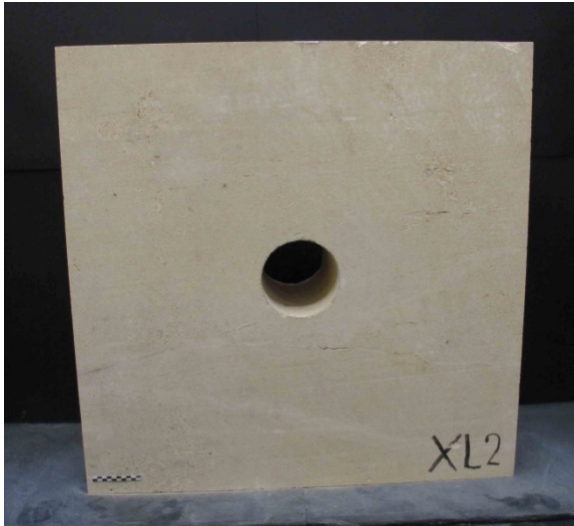


Abbildung 38: Prüfkörper der Versuchsreihe XL

➤ **Prüfkörper Marmor**

Tabelle 18: Prüfkörper der Versuchsreihe M-M

Versuchsreihe M-M			
Anzahl Prüfkörper	Bezeichnung der Prüfkörper	Abmessungen (Breite x Höhe x Tiefe)	Lochdurchmesser
		[cm] x [cm] x [cm]	[cm]
3	(M-M1 –M-M3)	30 x 30 x 10	5,5
3	(M-M4 –M-M6)	30 x 30 x 10	7,5

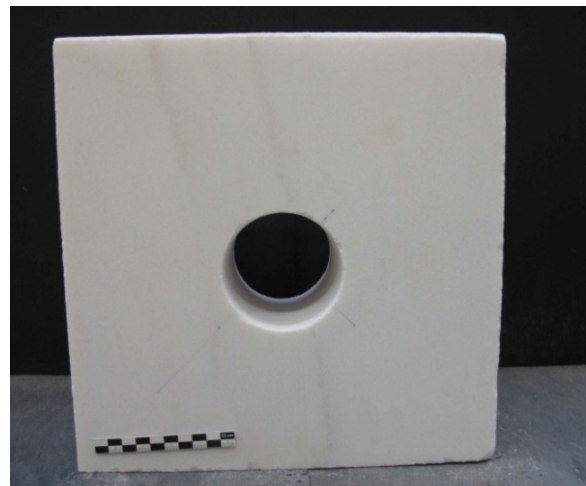
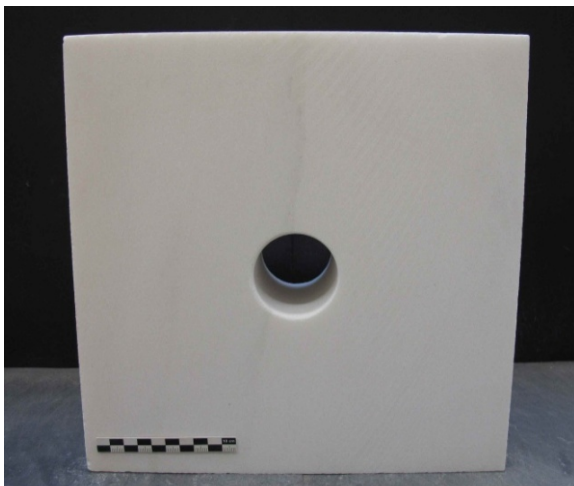


Abbildung 39: Prüfkörper der Versuchsreihe M-M

5.5.2. Versuchsaufbau

Die Versuchsreihen S, M, L und M-M konnten aufgrund der Druckfestigkeit des Gesteins und den Abmessungen in der Prüfmaschine der Firma Schenck mit aufbringbarer Last von 2 MN abgedrückt werden. Die Kraft wird dabei in vertikaler Richtung von oben auf den Prüfkörper aufgebracht (siehe Kapitel 5.1.1).

Aufgrund der Abmessungen und der daraus resultierenden hohen Bruchlast der Versuchsreihe XL wurden diese Prüfkörper im größeren Prüfrahmen des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien mit einer Höchstlast von 18 MN abgedrückt (siehe Kapitel 5.1.2).

Die Verformungen wurden bei allen Versuchen mit dem ARAMIS-Messsystem gemessen und zusätzlich wurden bei den Versuchen der Versuchsreihe L und XL Schallemissionsanalysen durchgeführt.

6. VERSUCHSERGEBNISSE

6.1. Festigkeiten und Materialparameter

Die elastischen Materialparameter sowie die Parameter nach Mohr-Coulomb und Hoek & Brown wurden am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau der TU Graz an jeweils zwei zylindrischen Prüfkörpern aus St. Margarethener Kalksandstein sowie Marmor im Triaxialversuch bestimmt. Diese Parameter werden für die numerischen Berechnungen mithilfe von FLAC^{3D} und zum Vergleich mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen benötigt.

6.1.1. Einaxiale Druckversuche – Zylinder

Aus der maximal aufnehmbaren Druckkraft im einaxialen Druckversuch wird über die gedrückte Fläche die einaxiale Druckfestigkeit des Materials berechnet.

$$\text{einaxiale Druckfestigkeit} = \frac{\text{Maximalkraft}}{\text{Fläche}}$$

Die so ermittelte einaxiale Druckfestigkeit für Sandstein und Marmor können den Tabellen 19 und 20 entnommen werden.

Tabelle 19: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinzylinder – Versuchsreihe Z

Prüfkörper	Abmessungen D x H	Fläche	Maximalkraft	Spannung bei Maximalkraft (einaxiale Druckfestigkeit)
	[cm]			
Versuchsreihe Z				
Z1	10x20	78,54	206,68	26,32
Z2	10x20	78,54	259,86	33,09
Z3	10x20	78,54	224,69	28,61

Tabelle 20: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Marmorzylinder – Versuchsreihe MZ

Prüfkörper	Abmessungen D x H	Fläche	Maximalkraft	Spannung bei Maximalkraft (einaxiale Druckfestigkeit)
	[cm]			
Versuchsreihe MZ				
MZ1	6,7x16,4	35,26	183,41	52,02
MZ2	6,7x16,4	35,26	251,92	71,45



Abbildung 40: Marmor und Sandsteinzylinder nach Versuchsdurchführung

6.1.2. Triaxialversuche - Zylinder

Die Ergebnisse der Triaxialversuche der Sandsteinzylinder sind in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Ergebnisse der Triaxialversuche – Sandsteinzylinder

			Elastische Parameter		
	Gewicht	Dichte	E-Modul	V-Modul	ν
	[g]	[t/m ³]	[GPa]	[GPa]	[-]
260.3	435	2,05	29,97	29,53	0,21
260.4	441,5	2,08	30,12	28,40	0,20
	Mohr-Coulomb		Hoek-Brown		
	c	φ	UCS	σ_t	m_i
	[N/mm ²]	[°]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]
260.3	11,46	34,57	43,36	-7,11	5,94
260.4	13,80	28,64	46,22	-10,54	4,16

Die Ergebnisse der Triaxialversuche der Marmorzylinder sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Ergebnisse der Triaxialversuche - Marmorzylinder

			Elastische Parameter		
	Gewicht	Dichte	E-Modul	V-Modul	ν
	[g]	[t/m ³]	[GPa]	[GPa]	[-]
260.1	574,2	2,71	63,53	49,21	0,24
260.2	573,8	2,70	69,40	58,25	0,26
	Mohr-Coulomb		Hoek-Brown		
	c	φ	UCS	σ_t	m_i
	[N/mm ²]	[°]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]
260.1	21,24	32,49	74,59	-11,27	6,47
260.2	19,95	32,80	68,03	-9,00	7,43

6.2. Druckversuche an der gelochten Scheibe

6.2.1. Einfluss der Zwischenlagen

Um eine möglichst einheitliche Lasteinleitung zu erreichen und um den Einfluss der Lasteinleitungsbedingungen auf den Versagensmechanismus zu untersuchen, wurden bei der Versuchsreihe M insgesamt 7 Versuche mit Zwischenlagen zwischen den Pressenplatten und dem Prüfkörper durchgeführt. Bei allen drei Lochdurchmessern wurden Zwischenlagen aus Aluminium (2 cm dicke Aluminiumplatte) sowie Teflon (dünne Aluminiumplatte mit auf Seite des Prüfkörpers aufgeklebter dünner Teflonfolie) untersucht (Abbildung 41).



Abbildung 41: Versuchsaufbau mit Zwischenlagen

Links: Prüfkörper M5 mit Teflon Zwischenlage, Rechts: Prüfkörper M8 mit 2 cm starker Aluminiumplatte

Um die Verformung des Prüfkörpers während der Versuchsdurchführung zu untersuchen, wurden in mehreren Schnitten die Horizontalverschiebungen aufgezeichnet und verglichen. Die Schnitte durch den Prüfkörper sind in Abbildung 42 dargestellt.

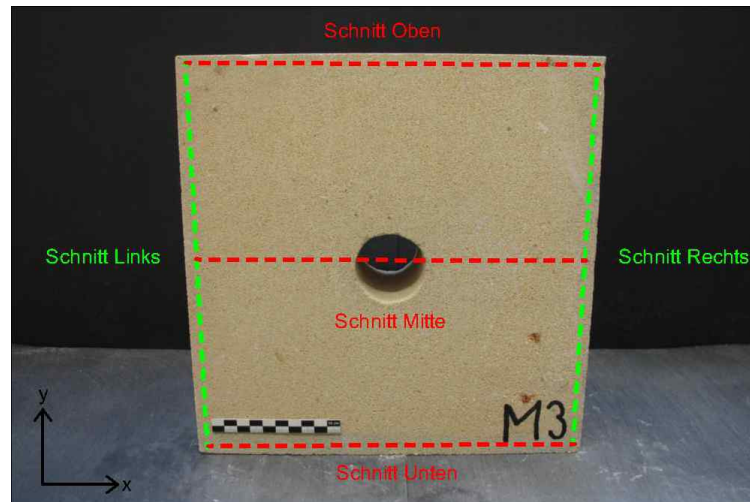


Abbildung 42: Schnitte durch den Prüfkörper, um die Verschiebung in X-Richtung (horizontal) darzustellen

➤ **Keine Zwischenlage**

Abbildung 43 zeigt das Rissbild an 2 Prüfkörpern der Versuchsreihe M, welche ohne Einlage einer Zwischenlage durchgeführt wurden.

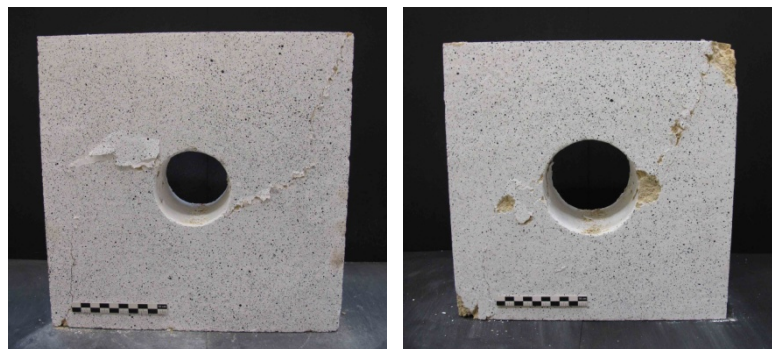


Abbildung 43: Rissbild ohne Zwischenlage
Links: Prüfkörper M7, Rechts: Prüfkörper M13

Der Druckversuch am Prüfkörper M7 wurde mit direkter Lastleitung über die Druckplatten der Presse durchgeführt. Bei $\frac{3}{4}$ der Bruchlast ist eine deutliche Ausbauchung des Prüfkörpers in der Mitte zu sehen. In den Lasteinleitungsbereichen kam es infolge der Beanspruchung nur zu geringfügigen Horizontalverschiebungen (Abbildung 44).

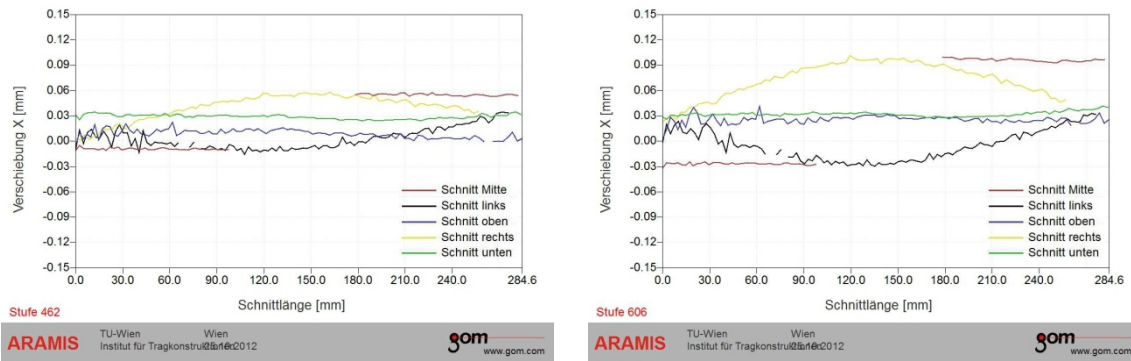


Abbildung 44: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M7
Links: bei der Hälfte der Bruchlast, Rechts: bei $\frac{3}{4}$ der Bruchlast

Auch beim Prüfkörper M13 ist zu sehen, dass sich im Druckversuch ohne Verwendung einer Zwischenlage der Prüfkörper hauptsächlich in der Mitte ausbauchte und sich an den Lasteinleitungsflächen nur geringfügig verschob (Abbildung 45).

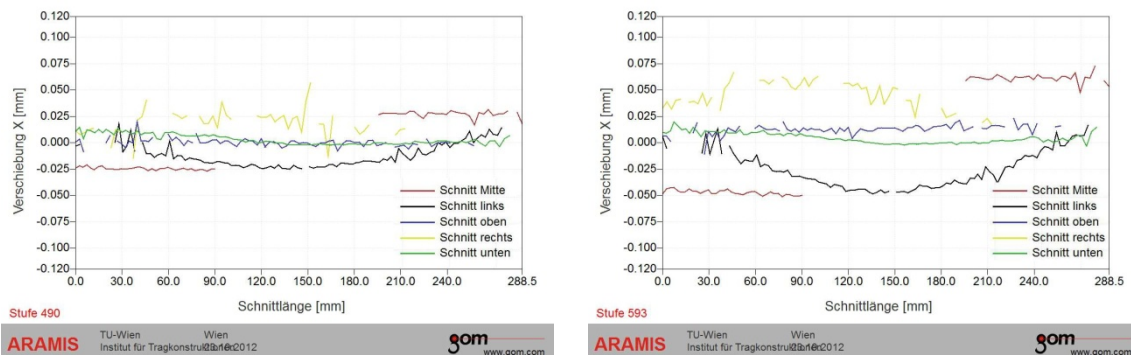


Abbildung 45: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M13
Links: bei der Hälfte der Bruchlast, Rechts: bei $\frac{3}{4}$ der Bruchlast

➤ Zwischenlage aus Teflon

Es zeigte sich vor allem bei den Druckversuchen, welche mit Einlage einer Teflonschicht durchgeführt wurden, ein sehr charakteristisches Rissbild, das sich von den übrigen Ergebnissen (ohne Zwischenlage) deutlich unterscheidet. Es zeigte sich bei den aufnehmbaren Druckkräften hauptsächlich eine große Differenz bei den kleineren Lochdurchmessern (2,5 cm), wo durch Einlage von Teflon nur $\frac{2}{3}$ der Kraft bis zum endgültigen Versagen aufgenommen werden konnte. Bei den Versuchsreihen mit größeren Lochdurchmessern (7,5 cm und 10,0 cm) zeigte sich nicht ein früheres Versagen, jedoch bildeten sich bei weit

geringeren Lasten Zugrisse aus, welche sich mit zunehmender Belastung öffneten und den Prüfkörper normal zur Lasteinleitungsfläche, parallel zur Hauptspannungsrichtung in mehrere Teile spalteten (Abbildung 46).

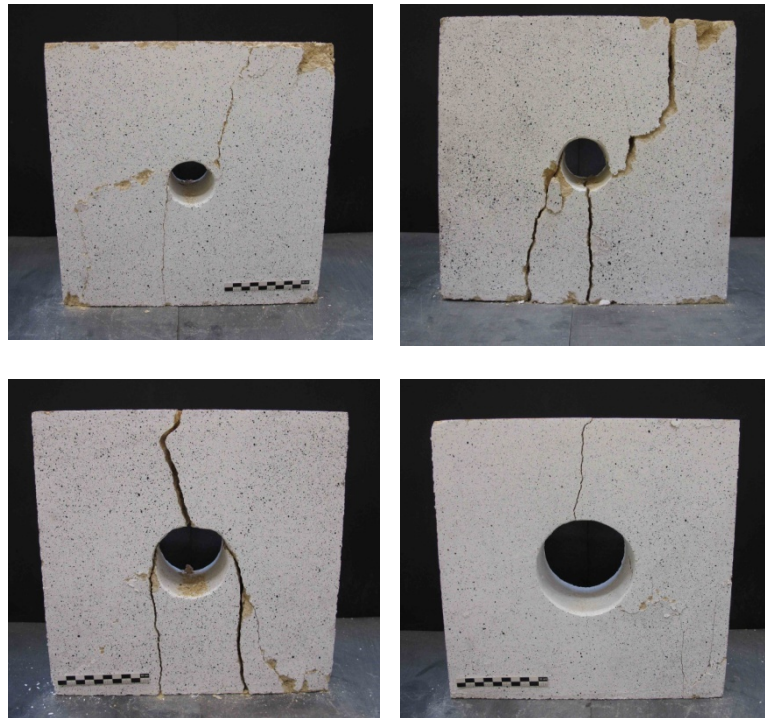


Abbildung 46: Rissbild bei Verwendung einer Teflonzwischenlage
Oben links: Prüfkörper M4, Oben Rechts: Prüfkörper M5
Unten links: Prüfkörper M9; Unten Rechts: Prüfkörper M14

Die Ober- und Unterseite des Prüfkörpers M4 verschob sich schon bei der Hälfte der Bruchlast nicht im gleichen Maß. Die untere Seite des Prüfkörpers schob sich auseinander, während sich der obere Teil beinahe nicht verschob. Dieses Verhalten war auch bei weiterer Laststeigerung weiterhin erkennbar. Die unteren Eckpunkte des Prüfkörpers bewegten sich immer weiter auseinander, was zum Versagen entlang vertikaler Zugrisse führte. Die horizontalen Verschiebungen des Prüfkörpers M4 sind in Abbildung 47 dargestellt.

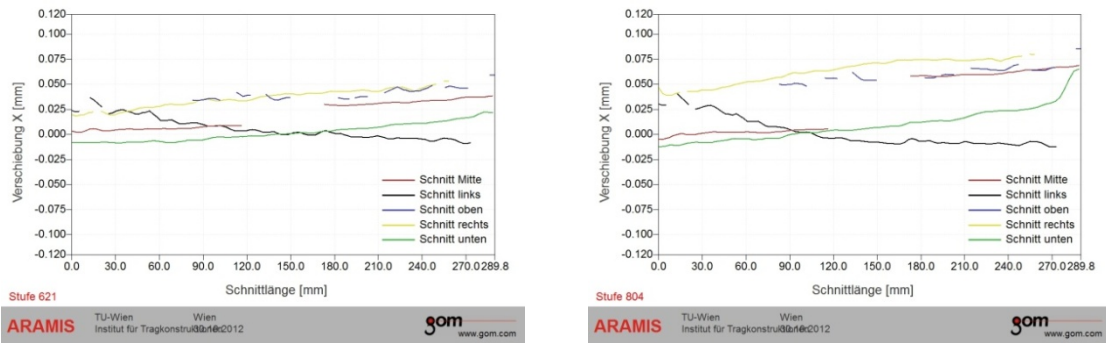


Abbildung 47: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M4
Links: bei der Hälfte der Bruchlast, Rechts: bei $\frac{3}{4}$ der Bruchlast

Die Seiten des Prüfkörpers M9 verschoben sich an der Oberseite bis zum Erreichen von der Hälfte der Bruchlast praktisch nicht. Sobald sich die ersten Zugrisse bei 164 kN an der Unterseite bildeten, glitten die Eckpunkte am Teflon immer weiter auseinander, bis der Sandsteinquader schließlich durch vertikale Risse versagte (Abbildung 48 und Abbildung 49).

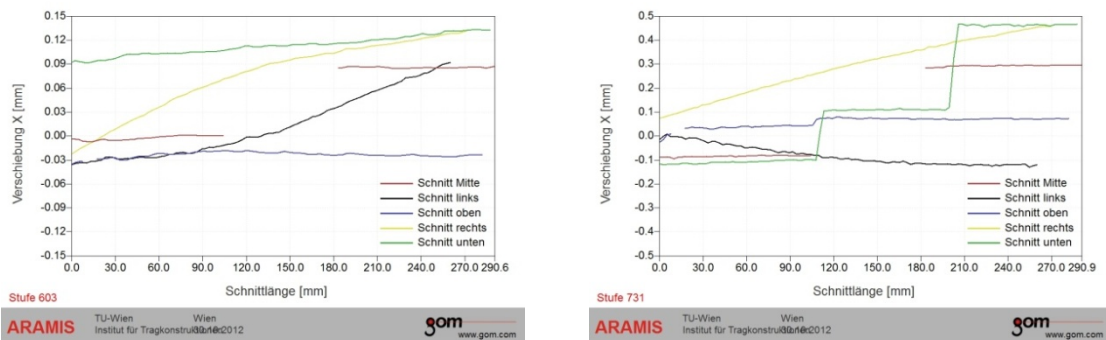


Abbildung 48: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M9
Links: bei der Hälfte der Bruchlast, Rechts: bei $\frac{3}{4}$ der Bruchlast

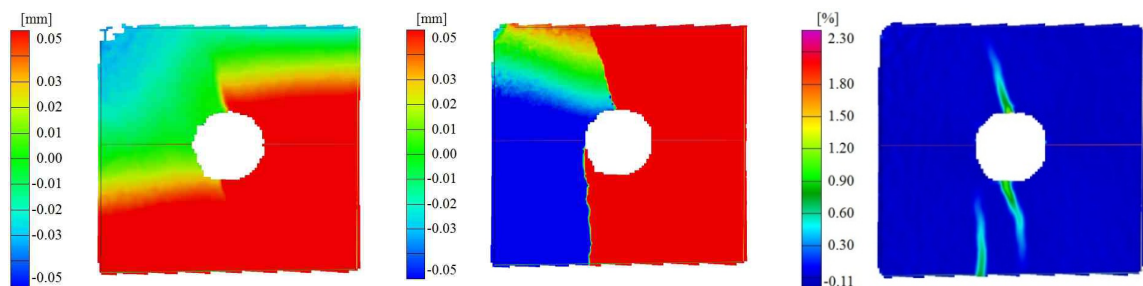


Abbildung 49: Entwicklung von Zugrisse Prüfkörper M9
Links: X-Verschiebung bei der Hälfte der Bruchlast, Mitte: X-Verschiebung bei $\frac{3}{4}$ der Bruchlast, Rechts: Maximale Hauptdehnung bei der Hälfte der Bruchlast

Da ein unmittelbares Versagen des gesamten Prüfkörpers, der das Gebirge um den Hohlraum modellieren soll, durch Zugrisse nicht der Realität entspricht, wurde für die weiteren Versuche keine Tefloneinlage verwendet.

➤ Zwischenlage aus Aluminium

Durch die Einlage einer 2,0 cm dicken Aluminiumplatte zwischen Prüfkörper und Lasteinleitungsflächen war keine charakteristische Veränderung im Rissbild gegenüber den Versuchen ohne Zwischenlage erkennbar. Es bildeten sich anfangs vertikale Zugzonen oberhalb und unterhalb des Lochs aus, der Prüfkörper versagte jedoch durch Scherbrüche. Abbildung 50 zeigt das Rissbild an 3 Prüfkörpern der Versuchsreihe M, welche mit Einlage einer Aluminiumplatte durchgeführt wurden.



Abbildung 50: Rissbild bei Verwendung einer Aluminiumzwischenlage
Links: Prüfkörper M2, Mitte: Prüfkörper M8, Rechts: Prüfkörper M12

Der Versuchskörper M2 zeigte bei $\frac{3}{4}$ der Bruchlast eine starke Ausbauchung. An den Lasteinleitungsflächen, sowohl an der Ober- als auch der Unterseite, verschoben sich die Seitenflächen nahezu nicht (Abbildung 51).

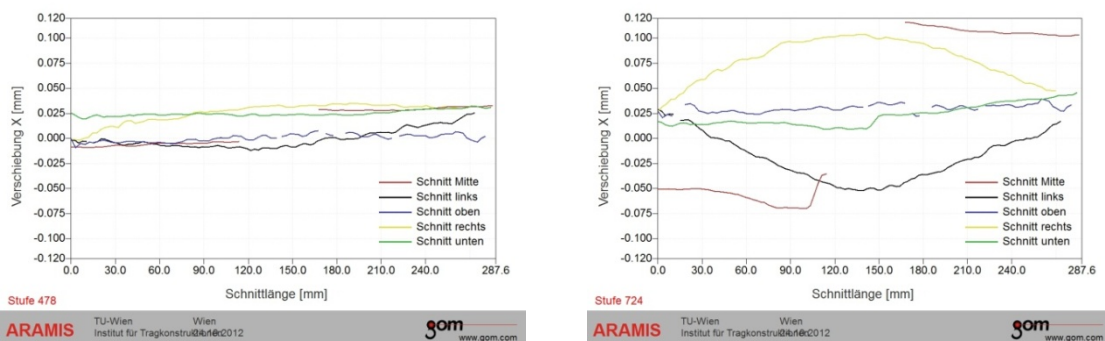


Abbildung 51: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M2
Links: bei der Hälfte der Bruchlast, Rechts: bei $\frac{3}{4}$ der Bruchlast

Der Prüfkörper M12 verschob sich an der Oberseite leicht nach rechts (ca. 0,05 mm), die Unterseite verschob sich nahezu nicht und die Mitte lässt eine eindeutige Ausbauchung bei $\frac{3}{4}$ der aufnehmbaren Kraft erkennen (Abbildung 52).

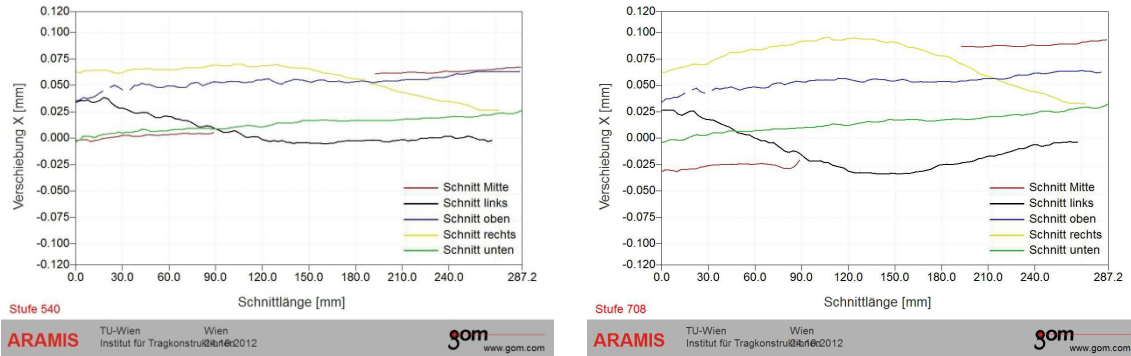


Abbildung 52: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M12
Links: bei der Hälfte der Bruchlast, Rechts: bei $\frac{3}{4}$ der Bruchlast

➤ Zusammenfassung der Ergebnisse

In Abbildung 53 werden zum Vergleich die Verformungen der Prüfkörper zufolge verschiedener Lasteinleitungsbedingungen zusammenfassend dargestellt. Es konnten keine Lasteinleitungsbedingungen gefunden werden, die die vollkommen gleichen Verschiebungen über die ganze Prüfkörperhöhe bewirkt hätten. Da die Verformungen und die Versagensmechanismen der Prüfkörper ohne Einlage einer Zwischenlage den Verformungen der Prüfkörper bei Einlage einer Aluminiumplatte glichen und die Abweichungen der Verformungen über die Prüfkörperhöhe gering waren, wurde bei den weiteren Versuchen auf die Einlage einer Aluminiumplatte verzichtet, um die Versuchsdurchführung so einfach wie möglich zu gestalten.

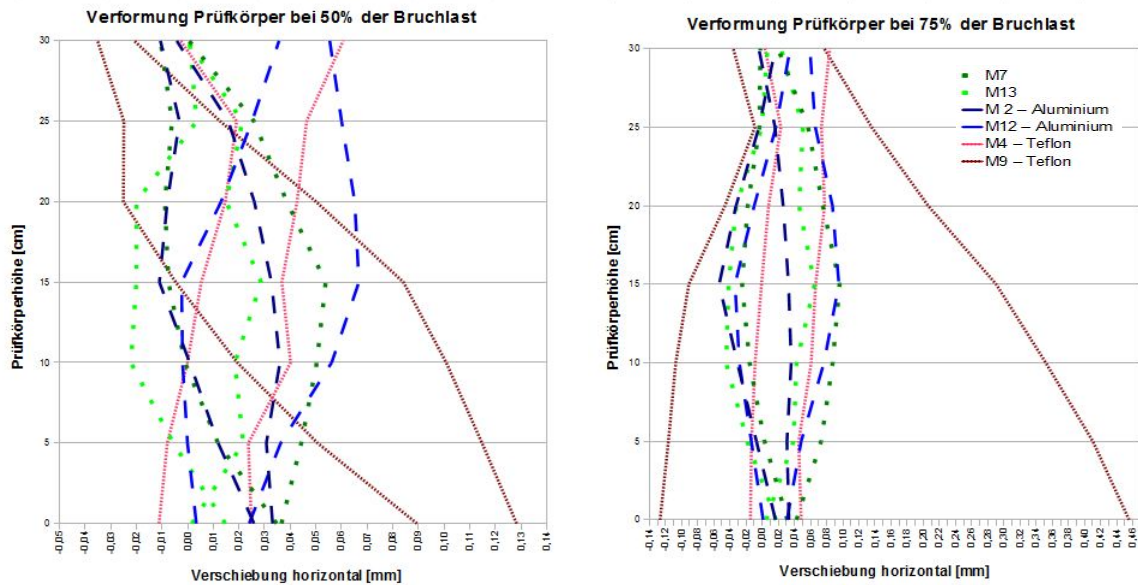


Abbildung 53: Ausbauchung (X-Verschiebung) der Prüfkörper je nach Lasteinleitungsbedingungen bei der Hälfte und $\frac{3}{4}$ der Bruchlast

6.2.2. Ergebnisse der Druckversuche

Alle Ergebnisse der Druckversuche an Sandstein- und Marmorquadern und sind in Tabelle 23 bis Tabelle 27 dargestellt.

Die Spalten bezeichnen dabei:

Prüfkörper:	Bezeichnung des Prüfkörpers von S1 bis XL5
Fläche:	Gedrückte Fläche
Maximalkraft:	Maximalkraft bei Versagen des Prüfkörpers
Spannung bei Maximalkraft:	Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlräume unter Maximalkraft $\sigma = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$
Kraft bei Ulmenversagen:	Kraft bei Beginn von Ulmenversagen
Tangentialspannung Lochrand bei Ulmenversagen:	Tangentialspannung am Lochrand bei Beginn von Ulmenversagen: $\sigma_{T,Lochrand} = 3 * \sigma$ (nach Kirsch 1898)
Anmerkungen:	Besondere Anmerkungen zur Rissbildung, zur Aussagekräftigkeit des Versuchs bzw. zum Versuchsaufbau

Tabelle 23: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinquader – Versuchsreihe S

Prüfkörper	Abmessungen B x H x T	Fläche	Loch- durchmesser	Maximalkraft	Spannung bei Maximalkraft	Kraft bei Ulmenversagen	Tangentialspannung Lochrand bei Ulmenversagen	Anmerkungen
	[cm]							
Versuchsreihe S								
S1	15x15x5	75	2,5	136,64	18,22	103	41,2	Rissbildung hauptsächlich an der Rückseite, daher mit ARAMIS nicht messbar
S2	15x15x5	75	2,5	148,09	19,75	65	26,0	Prüfkörper an der Oberfläche uneben, daher nicht gleichmäßig belastet
S3	15x15x5	75	2,5	113,22	15,10	40	16,0	-
S4	15x15x5	75	2,5	147,93	19,73	75	30,0	-
S5	15x15x5	75	2,5	114,90	15,32	55	22,0	Rissbildung hauptsächlich an der Rückseite des Prüfkörpers
S6	15x15x5	75	3,7	136,41	18,19	75	30,0	Prüfkörper an der Oberseite uneben, daher nicht gleichmäßig belastet
S7	15x15x5	75	3,7	137,94	18,39	-	-	Beginn plastischer Deformation an den Ulmen, nicht eindeutig bestimmbar
S8	15x15x5	75	3,7	121,23	16,16	75	30,0	-
S9	15x15x5	75	3,7	114,75	15,30	45	18,0	-
S10	15x15x5	75	3,7	108,26	14,44	60	24,0	-
S11	15x15x5	75	5,0	117,25	15,63	80	32,0	-
S12	15x15x5	75	5,0	100,71	13,43	52	20,8	-
S13	15x15x5	75	5,0	106,66	14,22	60	24,0	-
S14	15x15x5	75	5,0	108,41	14,46	50	20,0	-
S15	15x15x5	75	5,0	99,94	13,33	35	14,0	-

Tabelle 24: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinquader – Versuchsreihe M

Prüfkörper	Abmessungen B x H x T	Fläche	Loch- durchmesser	Maximalkraft	Spannung bei Maximalkraft	Kraft bei Ulmenversagen	Tangentialspannung Lochrand bei Ulmenversagen	Anmerkungen
	[cm]							
Versuchsreihe M								
M1	30x30x10	300	5,0	524,14	17,47	260	26,0	-
M2	30x30x10	300	5,0	361,86	12,06	-	-	Zwischenlage aus Aluminium
M3	30x30x10	300	5,0	607,38	20,25	300	30,0	-
M4	30x30x10	300	5,0	396,65	13,22	-	-	Zwischenlage aus Teflon
M5	30x30x10	300	5,0	-	-	-	-	Zwischenlage aus Teflon; ARAMIS-Messung nicht möglich aufgrund zu wenig Licht
M6	30x30x10	300	7,5	379,41	12,65	220	22,0	-
M7	30x30x10	300	7,5	352,50	11,75	120	12,0	-
M8	30x30x10	300	7,5	335,00	11,17	-	-	Zwischenlage aus Aluminium
M9	30x30x10	300	7,5	341,03	11,37	-	-	Zwischenlage aus Teflon
M10	30x30x10	300	7,5	329,90	11,00	150	15,0	-
M11	30x30x10	300	10,0			-	-	-
M12	30x30x10	300	10,0	375,00	12,50	-	-	Zwischenlage aus Aluminium
M13	30x30x10	300	10,0	335,77	11,19	130	13,0	-
M14	30x30x10	300	10,0	300,75	10,03	-	-	Zwischenlage aus Teflon
M15	30x30x10	300	10,0	309,83	10,33	100	10,0	-

Tabelle 25: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinquader – Versuchsreihe L

Prüfkörper	Abmessungen B x H x T	Fläche	Loch- durchmesser	Maximalkraft	Spannung bei Maximalkraft	Kraft bei Ulmenversagen	Tangentialspannung Lochrand bei Ulmenversagen	Anmerkungen
	[cm]							
Versuchsreihe L								
L1	60x60x20	1200	10,0	-	-	650	16,25	Bei Maximalkraft der Presse (2000 kN) kein Versagen des Prüfkörpers
L2	60x60x20	1200	10,0	1326,00	11,05	600	15	-
L3	60x60x20	1200	10,0	1362,33	11,35	500	12,5	Unterbrechung der Messung bei 700 kN
L4	60x60x20	1200	10,0	1448,29	12,07	650	16,25	-
L5	60x60x20	1200	20,0	1348,04	11,23	300	7,5	Krafteinleitung an der Oberseite nicht gleichmäßig
L6	60x60x20	1200	20,0	1300,51	10,84	400	10	-
L7	60x60x20	1200	20,0	1515,00	12,63	400	10	-
L8	60x60x20	1200	20,0	1256,48	10,47	300	7,5	-

Tabelle 26: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinquader – Versuchsreihe XL

Prüfkörper	Abmessungen B x H x T	Fläche	Loch- durchmesser	Maximalkraft	Spannung bei Maximalkraft	Kraft bei Ulmenversagen	Tangentialspannung Lochrand bei Ulmenversagen	Anmerkungen
	[cm]							
Versuchsreihe XL								
XL1	90x90x30	2700	15,0	1819,00	6,74	-	-	Aufgrund der unregelmäßigen Lasteinleitung konnten aus der Versuchsreihe XL keine aussagekräftigen Ergebnisse bezüglich der radialen Deformationen an den Ulmen gewonnen werden
XL2	90x90x30	2700	15,0	3505,00	12,98	-	-	
XL3	90x90x30	2700	15,0	2557,98	9,47	-	-	
XL4	90x90x30	2700	30,0	2649,54	9,81	-	-	
XL5	90x90x30	2700	30,0	2929,69	10,85	-	-	

Tabelle 27: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Marmorquader – Versuchsreihe M-M

Prüfkörper	Abmessungen B x H x T	Fläche	Loch- durchmesser	Maximalkraft	Spannung bei Maximalkraft	Kraft bei Ulmenversagen	Tangentialspannung Lochrand bei Ulmenversagen	Anmerkungen
	[cm]	[cm ²]	[cm]	[kN]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	
Versuchsreihe M-M								
M-M1	30x30x10	300	5,5	1740,00	58,00	900	90	ARAMIS-Messung endet schon kurz vor dem Versagen des Prüfkörpers
M-M2	30x30x10	300	5,5	1866,99	62,23	300	30	-
M-M3	30x30x10	300	5,5	1656,10	55,20	540	54	-
M-M4	30x30x10	300	7,5	1578,83	52,63	650	65	-
M-M5	30x30x10	300	7,5	1614,69	53,82	500	50	-
M-M6	30x30x10	300	7,5	1477,89	49,26	540	54	-

6.2.3. Rissbild

Zur Darstellung der Rissbildung und Rissentwicklung werden von jeder Versuchsreihe die Prüfkörper mit den aussagekräftigsten Ergebnissen herangezogen. Es werden dabei Bilder der maximalen Hauptdehnungen verwendet, um den Prozess der Rissbildung sichtbar zu machen. Zum besseren Verständnis ist jeweils ein Bild von Vorder- und Rückseite des Prüfkörpers nach Versuchsende dargestellt. Außerdem wird für jeden Versuch ein Spannungs-Verschiebungsdiagramm erstellt. Es wird hierfür die Differenz der vertikalen Verschiebung von jeweils einem Punkt an der Oberseite und an der Unterseite des Prüfkörpers in 3 Schnitten herangezogen. (Abbildung 54). Diese Verschiebungsdifferenz wird in Abhängigkeit der Spannung im Prüfkörper außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums dargestellt.

Zur Beurteilung von plastischen Deformationen (Beginn der Rissbildung) wird die Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Tangentialspannung am Lochrand untersucht. Unter Ulme versteht man dabei jene Punkte des Hohlraumrandes, an denen der Hohlraumrand parallel zur Richtung der Belastung des Prüfkörpers verläuft. Die Punkte des Hohlraumrandes, an denen der Hohlraumrand normal auf die Richtung der Belastung des Prüfkörpers steht, werden als Firste (oben) bzw. Sohle (unten) bezeichnet.

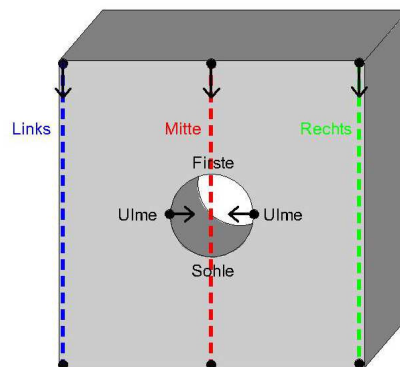
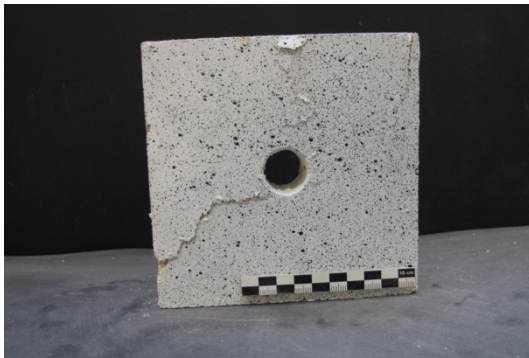


Abbildung 54: 3 Schnitte im Prüfkörper zur Aufzeichnung der Vertikalverschiebungen, sowie Darstellung der Punkte zur Aufzeichnung der Ulmenabstände

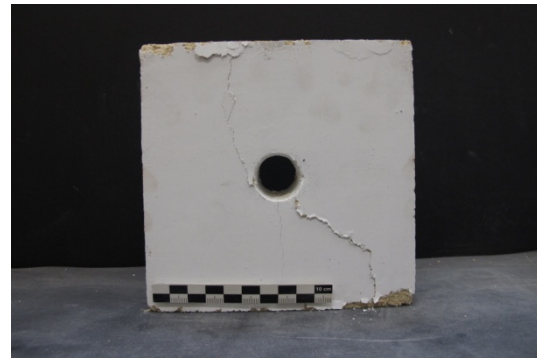
6.2.3.1. Versuchsreihe S

➤ Prüfkörper S4

Maximalkraft:	147,93 kN
Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalkraft:	18,22 N/mm ²
Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen:	min 0,102 mm, max 0,207 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 55: Prüfkörper S4 nach Versuchsende

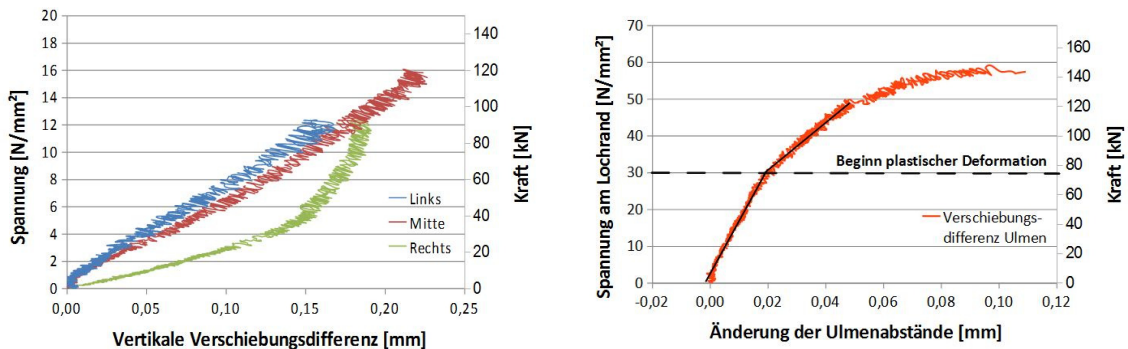


Abbildung 56: Prüfkörper S4;

links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums und der aufgetragenen Druckkraft

rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgetragenen Druckkraft

Der Prüfkörper S4 zeigt an den oberen Ecken von Versuchsbeginn an Brüche, ab 125 kN (85% der Bruchlast) bildet sich von der rechten Ulme ausgehend ein Scherbruch aus. Bei ca. 148 kN beginnt der Prüfkörper entlang dieses Scherbruchs zu brechen. Infolge der Spannungsumlagerung bildet sich ein weiterer Riss von der linken Ulme zur Unterseite hin aus.

Abplatzungen an den Ulmen sind erst bei Erreichen der Maximaldruckkraft sichtbar. Aus der Differenz der horizontalen Verschiebungen an den Ulmen, kann

man jedoch erkennen, dass plastische Deformationen und somit erste Rissbildungen bereits ab einer Belastung von 75 kN stattfinden.

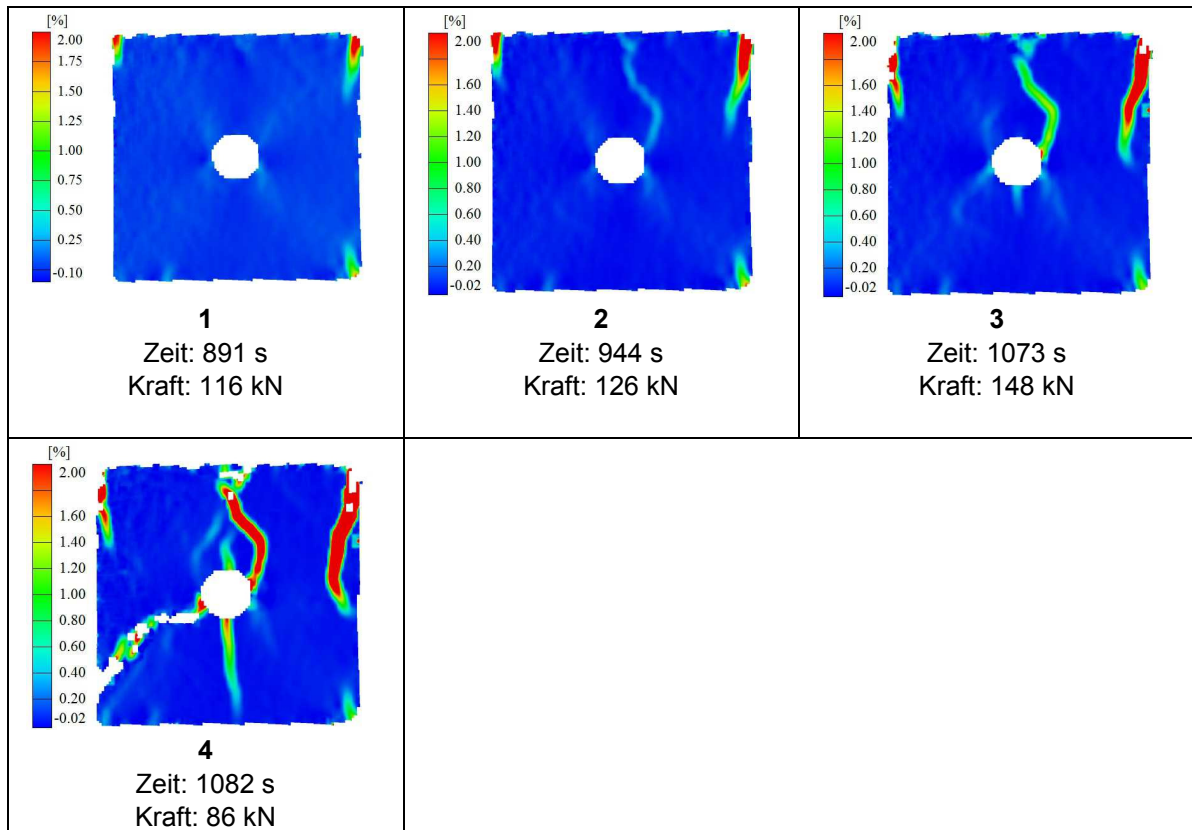
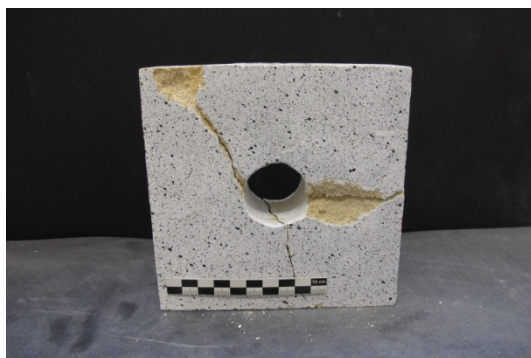


Abbildung 57: Rissentwicklung im Prüfkörper S4 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

➤ Prüfkörper S9

Maximalkraft:	114,75 kN
Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalkraft:	19,73 N/mm ²
Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen:	min 0,123 mm bis max 0,242 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 58: Prüfkörper S9 nach Versuchsende

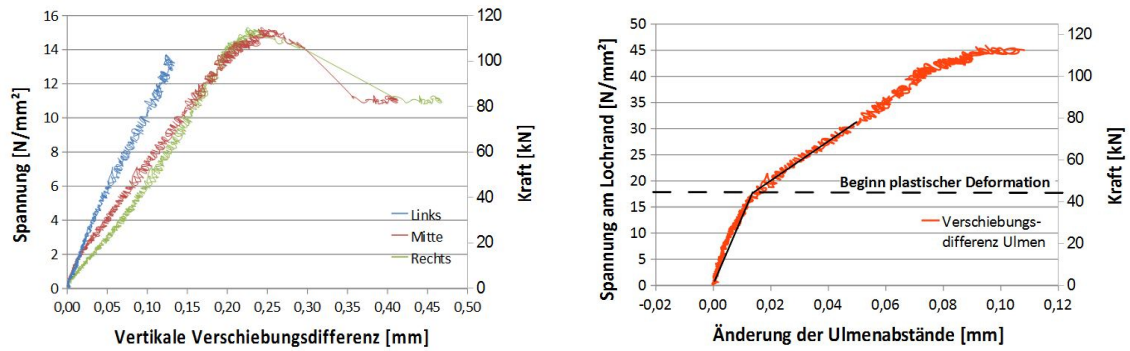
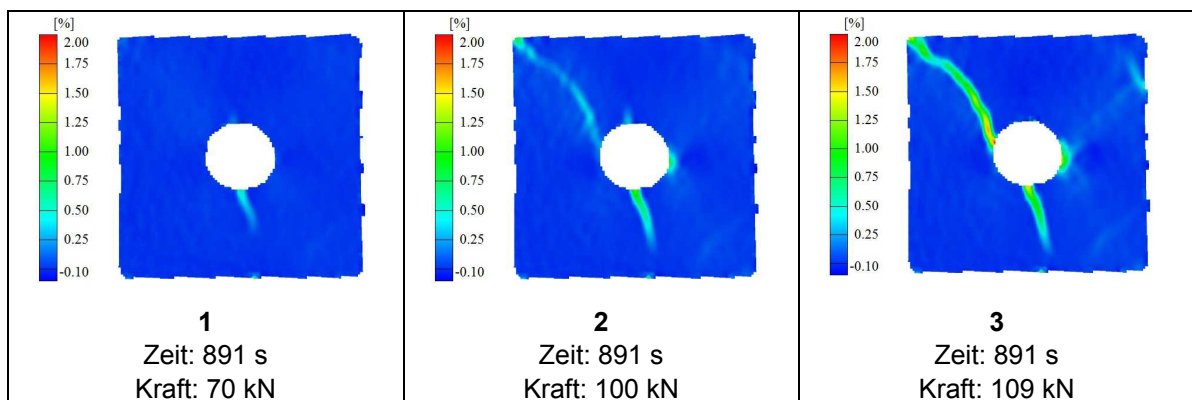


Abbildung 59: Prüfkörper S9;
 links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums und der aufgebracht Druckkraft
 rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgebracht Druckkraft

Im Zuge des Druckversuchs am Prüfkörper S9 zeigt sich eine deutliche Zugzone an der Sohle des Hohlraums, welche jedoch nicht mit freiem Auge sichtbar ist. Die weniger deutliche Zugzone an der Firste schließt sich mit Beginn der Ausbildung des ersten Scherbruchs bei ca. 100 kN (ca. 85% der Bruchlast) welcher von der linken Ulme ausgeht. Der Prüfkörper versagt bei einer Maximallast von 114 kN entlang von Scherbrüchen. Brüche am Hohlraumrand sind erst beim Gesamtversagen sichtbar.

Aus der Aufzeichnung der Differenz der horizontalen Verschiebungen der Ulmen ist der Beginn plastischer Deformationen am Hohlraumrand bei ca. 45 kN erkennbar welche sich auch bei Betrachtung der maximalen Hauptdehnungen zeigen (Bild 2 in Abbildung 60).



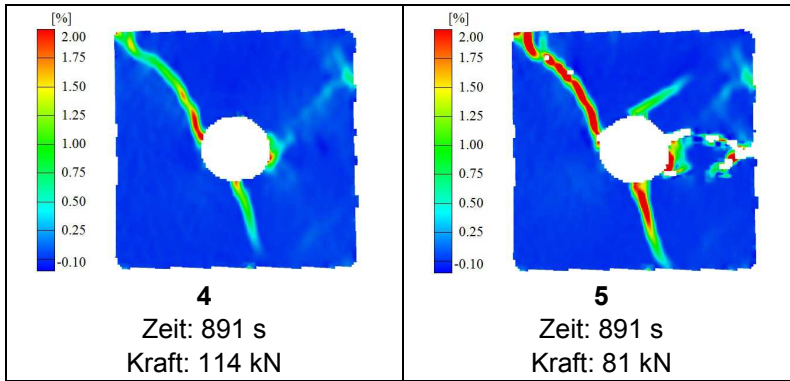
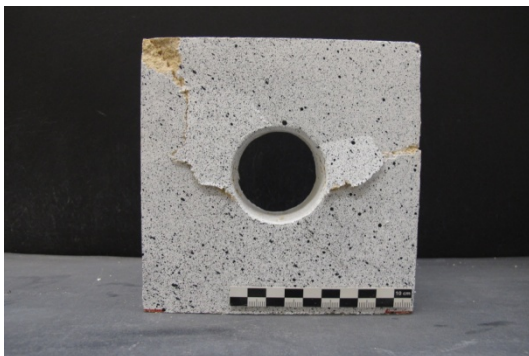


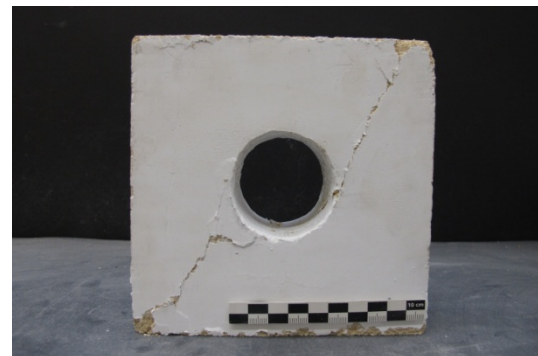
Abbildung 60: Rissentwicklung im Prüfkörper S9 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

➤ Prüfkörper S12

Maximalkraft: 100,71 kN
Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlrums unter Maximalkraft: 13,43 N/mm²
Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen: min 0,182 mm bis max 0,272 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 61: Prüfkörper S12 nach Versuchsende

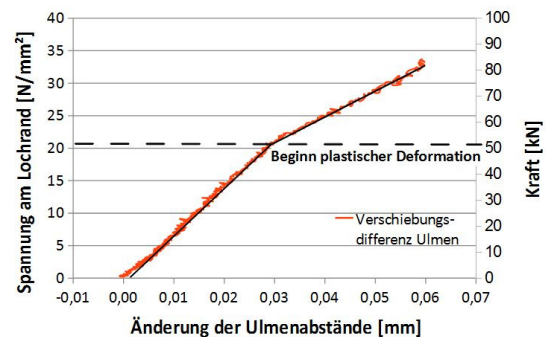
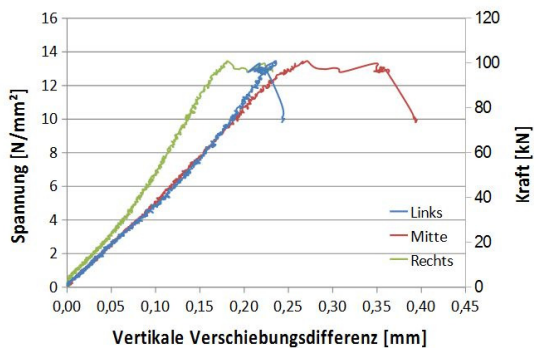


Abbildung 62: Prüfkörper S12;
 links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlrums und der aufgebracht Druckkraft
 rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgebracht Druckkraft

Es zeigen sich geringfügig Zugzonen sowohl an der Firste als auch der Sohle. Mit Beginn der Ausbildung des ersten Scherbruchs ab ca. 90 kN (ca. 90% der Bruchlast) bilden sich die Zugrisse wieder zurück. Der Prüfkörper versagt entlang des Scherbruchs nach links oben. Infolge der Spannungsumlagerung beim Bruch bilden sich weitere Scherbrüche aus.

Ab ca. 90 kN ist in der Auswertung der maximalen Hauptdehnungen, ein Versagen der Ulmen erkennbar (Bild 2 in Abbildung 63), Brüche sind mit freiem Auge erst bei Erreichen der Maximalkraft sichtbar. Aus der Aufzeichnung der horizontalen Verschiebungen über die Kraft sind Plastifizierungen an den Ulmen ab ca. 52 kN erkennbar.

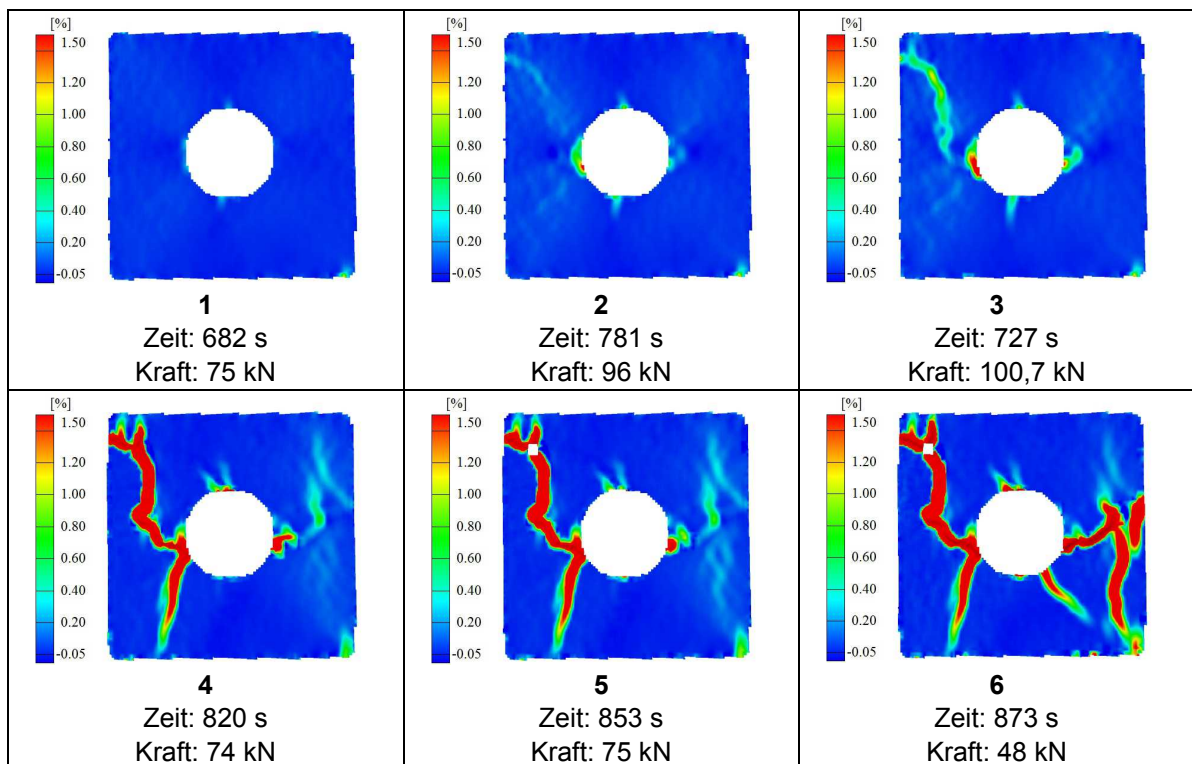


Abbildung 63: Rissentwicklung im Prüfkörper S12 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

6.2.3.2. Versuchsreihe M

➤ Prüfkörper M1

Maximalkraft:

524.60 kN

Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalkraft:

17,47 N/mm²

Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen:

min 0,244 mm, max 0,311 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 64: Prüfkörper M1 nach Versuchsende

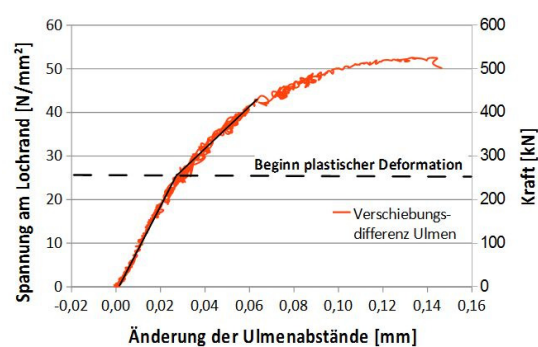
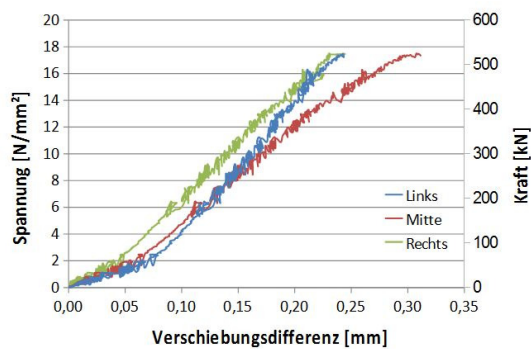


Abbildung 65: Prüfkörper M1;

links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums und der aufgetragenen Druckkraft

rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgetragenen Druckkraft

Im Prüfkörper M1 bilden sich geringfügige Zugzonen ober- oder unterhalb des Hohlraums aus. Der Prüfkörper versagt entlang eines Scherbruchs der sich von der rechten Ulme nach oben entwickelt. Infolge des Versagens bilden sich weitere Brüche nach oben und unten aus welche den Prüfkörper in mehrere Teile zerlegen.

Es sind keine Abplatzungen an den Ulmen vor Erreichen der Bruchlast des Prüfkörpers erkennbar. Die Aufzeichnung der horizontalen Verschiebungen an

den Ulmen in Abhängigkeit der Kraft zeigt Plastifizierungen, und damit erste Brucherscheinungen, ab ca. 260 kN.

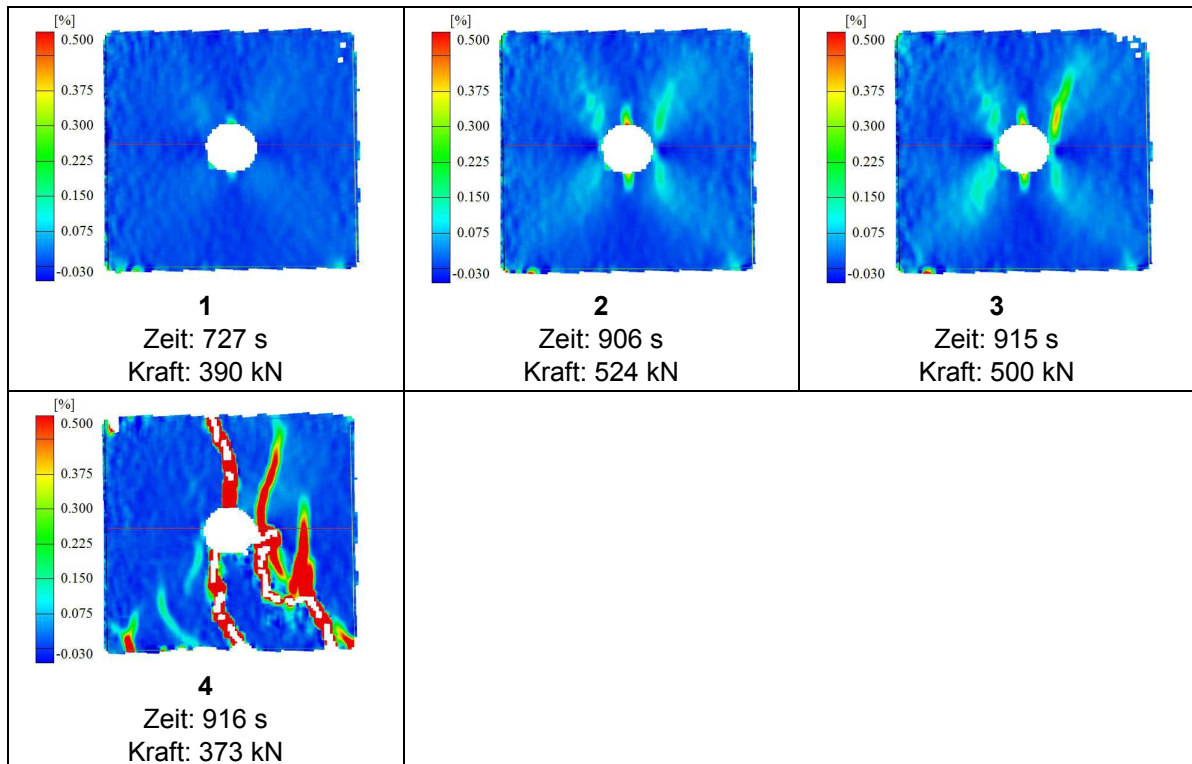


Abbildung 66: Rissentwicklung im Prüfkörper M1 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

➤ Prüfkörper M6

Maximalkraft:

381,17 kN

Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohraums unter Maximalkraft:

12,65 N/mm²

Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen:

min 0,223 mm, max 0,321 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 67: Prüfkörper M6 nach Versuchsende

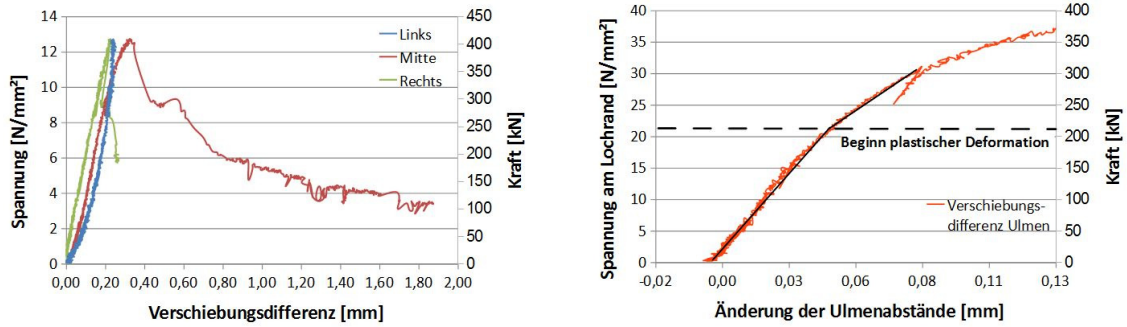


Abbildung 68: Prüfkörper M6;

links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums und der aufgebracht Druckkraft

rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgebracht Druckkraft

Ab einer Druckkraft von ca. 300 kN (ca. 80% der Bruchlast) sind in der Aufzeichnung der maximalen Hauptdehnungen vertikale Zugzonen an Firste und Sohle erkennbar. Ab ca. 370 kN beginnen sich vom Hohlraum aus kreuzförmig Scherbrüche nach oben und unten auszubilden. Infolge des Versagens entlang des Scherbruchs, welcher von der linken Ulme nach unten führt, bilden sich weitere Brüche aus.

Plastifizierungen an den Ulmen beginnen bei ca. 220 kN, sichtbare Brüche am Hohlraumrand bilden sich erst ab Erreichen der Maximaldruckkraft aus.

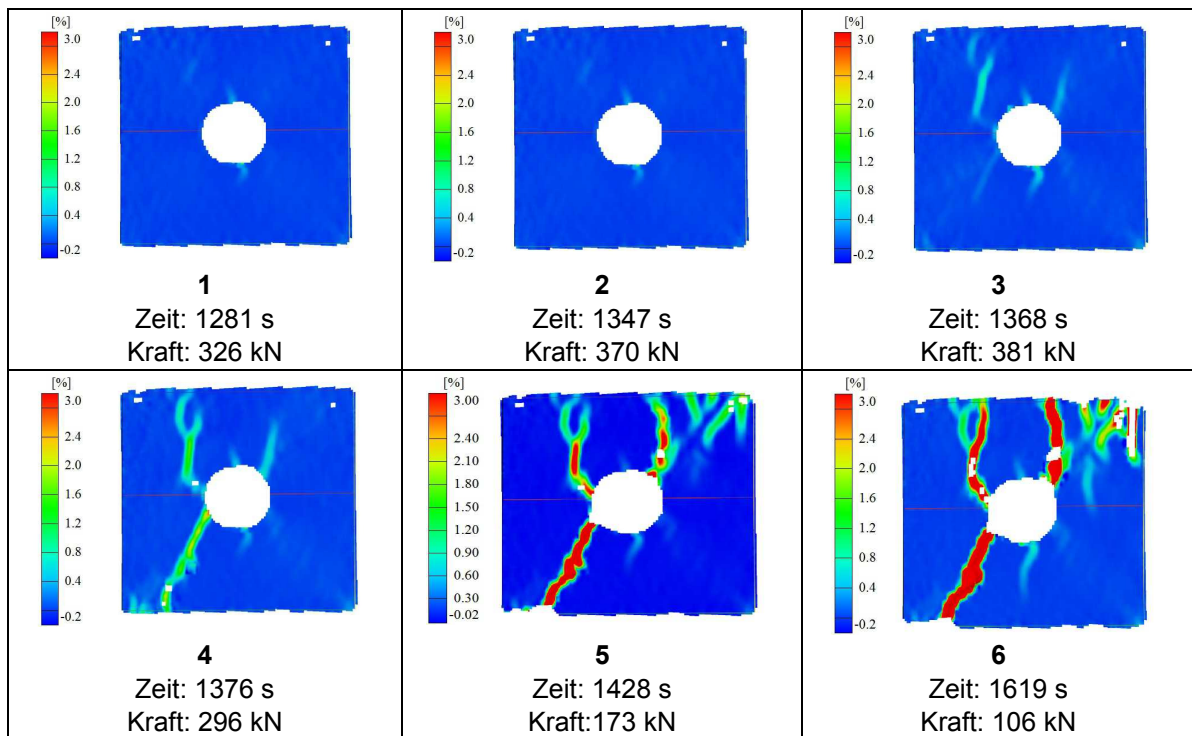


Abbildung 69: Rissentwicklung im Prüfkörper M6 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

➤ Prüfkörper M13

Maximalkraft:

335,77 kN

Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalkraft:

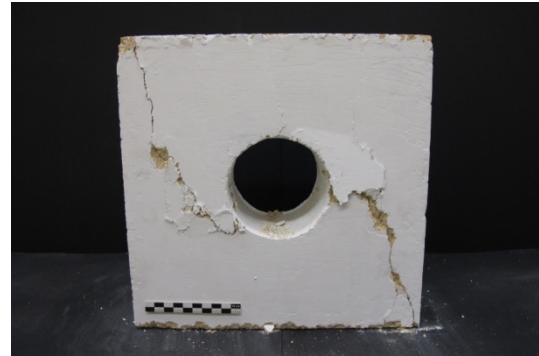
11,19 N/mm²

Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen:

min 0,041 mm, max 0,306 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 70: Prüfkörper M13 nach Versuchsende

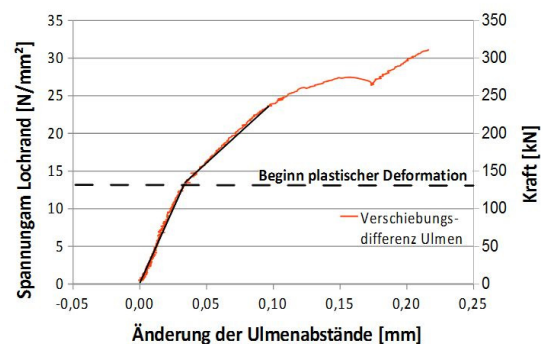
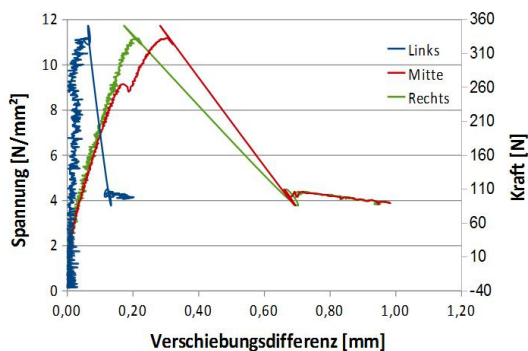


Abbildung 71: Prüfkörper M13;

links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums und der aufgebracht Druckkraft

rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgebracht Druckkraft

Ab einer Belastung von 160 kN (ca. 50% der Bruchlast) sind in der Auswertung der Hauptdehnungen, Zugzonen an Sohle und Firste erkennbar, oberhalb des Hohlraums ist der Zugriss ab 240 kN (70% der Bruchlast) mit freiem Auge sichtbar. Ab 250 kN (ca. 75% der Bruchlast) schließt sich der Zugriss unterhalb des Hohlraums gleichzeitig mit dem Beginn der Ausbildung eines Scherbruchs von der linken Ulme zur Unterseite hin. Bei ca. 335 kN versagt der Prüfkörper entlang dieses Scherbruchs und infolge der Spannungsumlagerung bilden sich weitere Brüche aus.

Erste Plastifizierungen an den Ulmen beginnen ab 130 kN. Schon vor Erreichen der Bruchlast, ab 275 kN (ca. 80% der Bruchlast) sind an der linken Ulme geringfügige Abplatzungen zu erkennen.

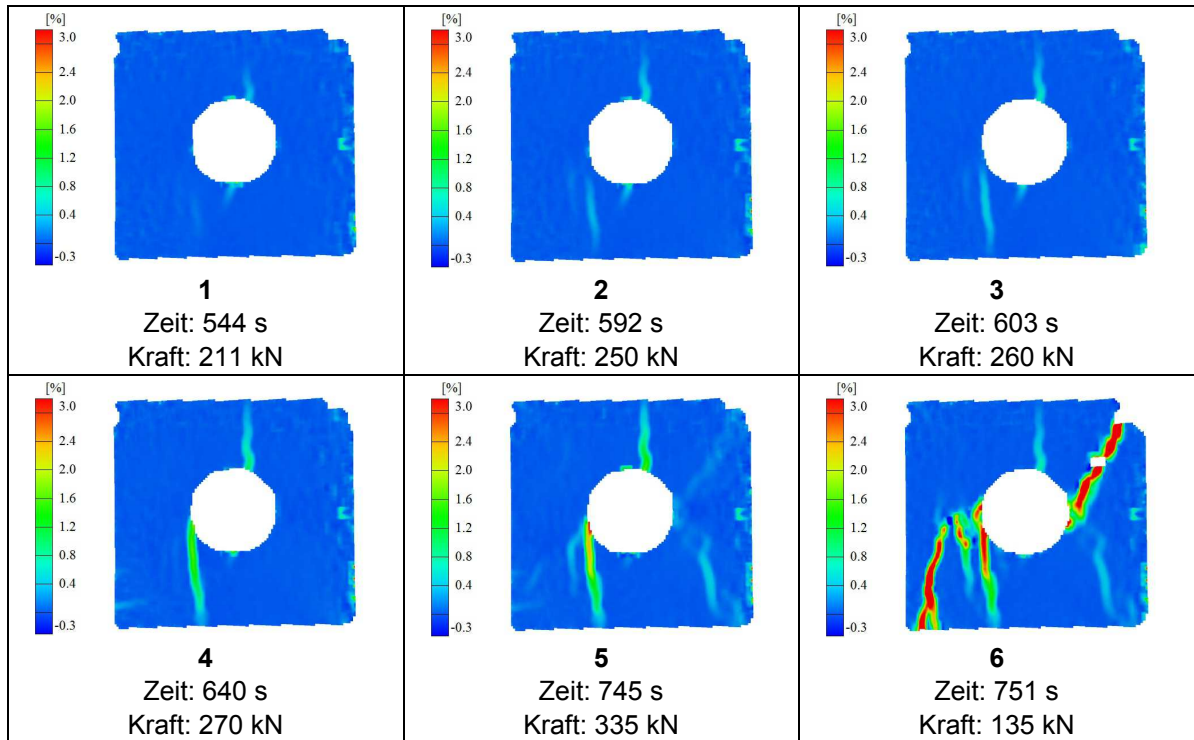
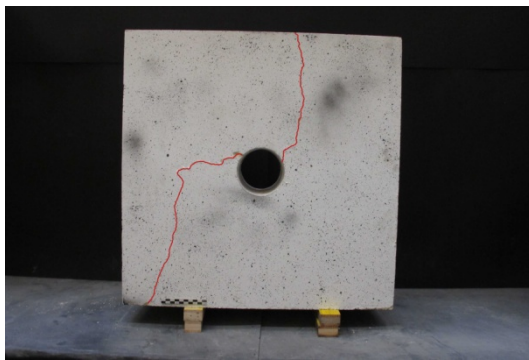


Abbildung 72: Rissentwicklung im Prüfkörper M13 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

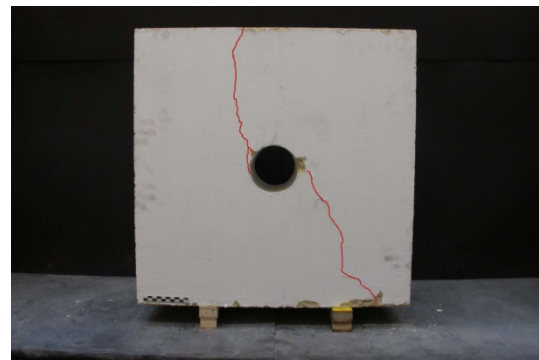
6.2.3.3. Versuchsreihe L

➤ Prüfkörper L2

Maximalkraft:	1326,00 kN
Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalkraft:	11,05 N/mm ²
Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen:	min 0,447 mm, max 0,859 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 73: Prüfkörper L2 nach Versuchsende; rot: Sichtbare Brüche nach Versuchsende

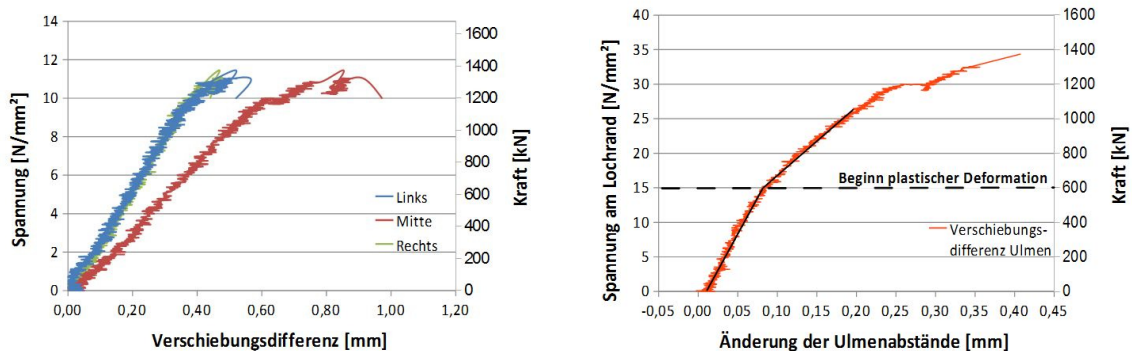


Abbildung 74: Prüfkörper L2;

links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums und der aufgebrachtten Druckkraft

rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgebrachtten Druckkraft

Ab ca. 650 kN (50% der Bruchlast) sind an der Sohle und Firste ausgeprägte Zugzonen sichtbar. Ab ca. 1000 kN sind Zugrisse deutlich mit freiem Auge erkennbar. Mit Beginn der Ausbildung des Scherbruchs von der rechten Ulme aus, ab ca. 1100 kN, schließt sich der Zugriss an der Firste wieder. Das Versagen des Prüfkörpers beginnt entlang eines Scherbruchs nach rechts oben, nach kurzer Stabilisierung des Prüfkörpers öffnet sich ein Scherbruch nach links unten und der Prüfkörper versagt.

Brüche an den Ulmen sind erst ab Erreichen der Maximallast zu erkennen. Aus der Auswertung der Abstände der Ulmen ergibt sich, dass plastische Deformationen am Hohlraumrand ab einer Belastung von 600 kN einsetzen.

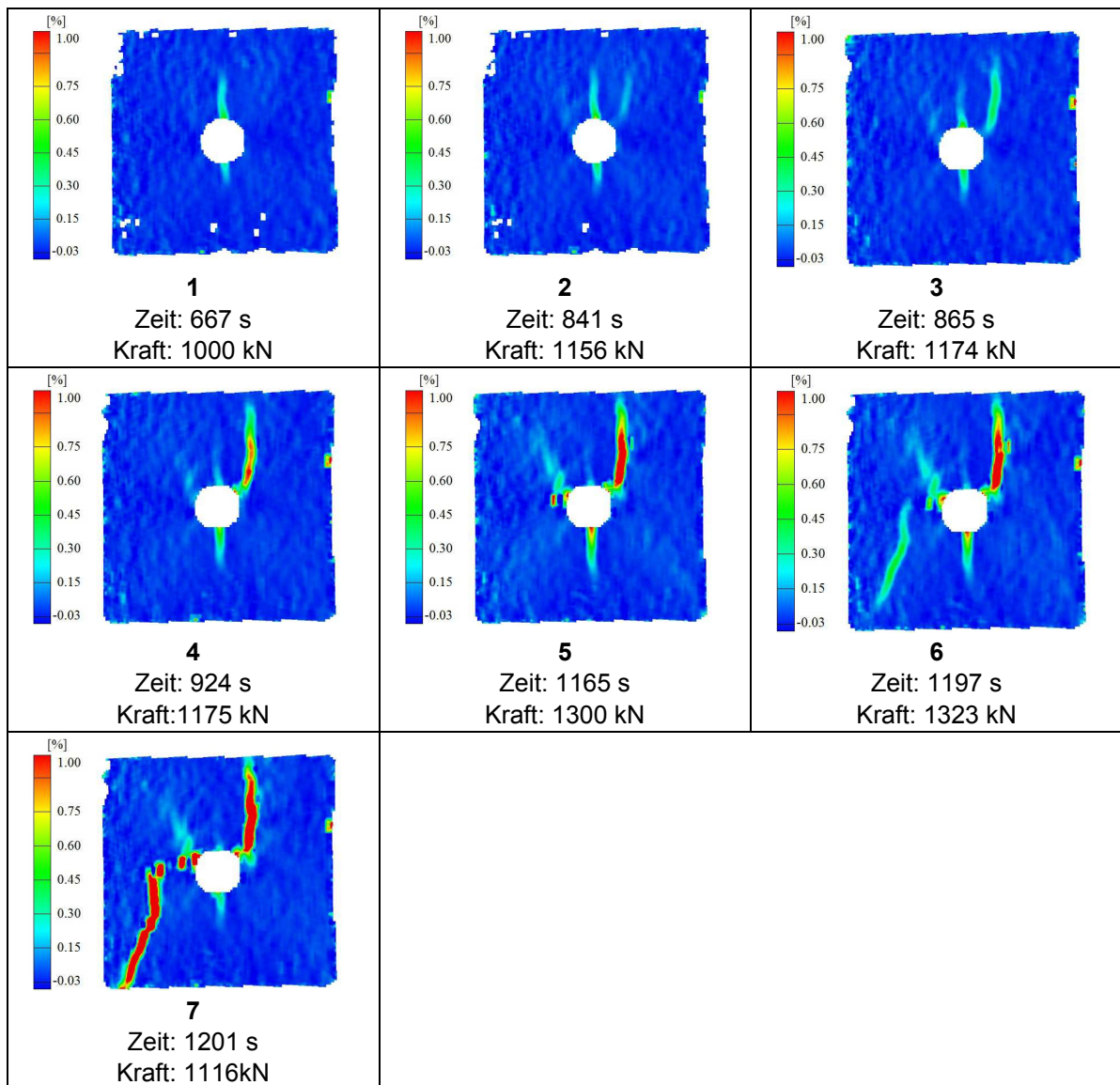


Abbildung 75: Rissentwicklung im Prüfkörper L2 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

Bei der Versuchsreihe L wurde zusätzlich eine Schallemissionsanalyse eingesetzt um den Zeitpunkt der Rissbildung besser bestimmen zu können.

Abbildung 76 zeigt die Auswertung der Schallemissionsanalyse des Prüfkörpers L2. Dabei werden die Anzahl der gemessenen Signale an den 4 angebrachten Sensoren und die Kraft über die Versuchsdauer aufgezeichnet.

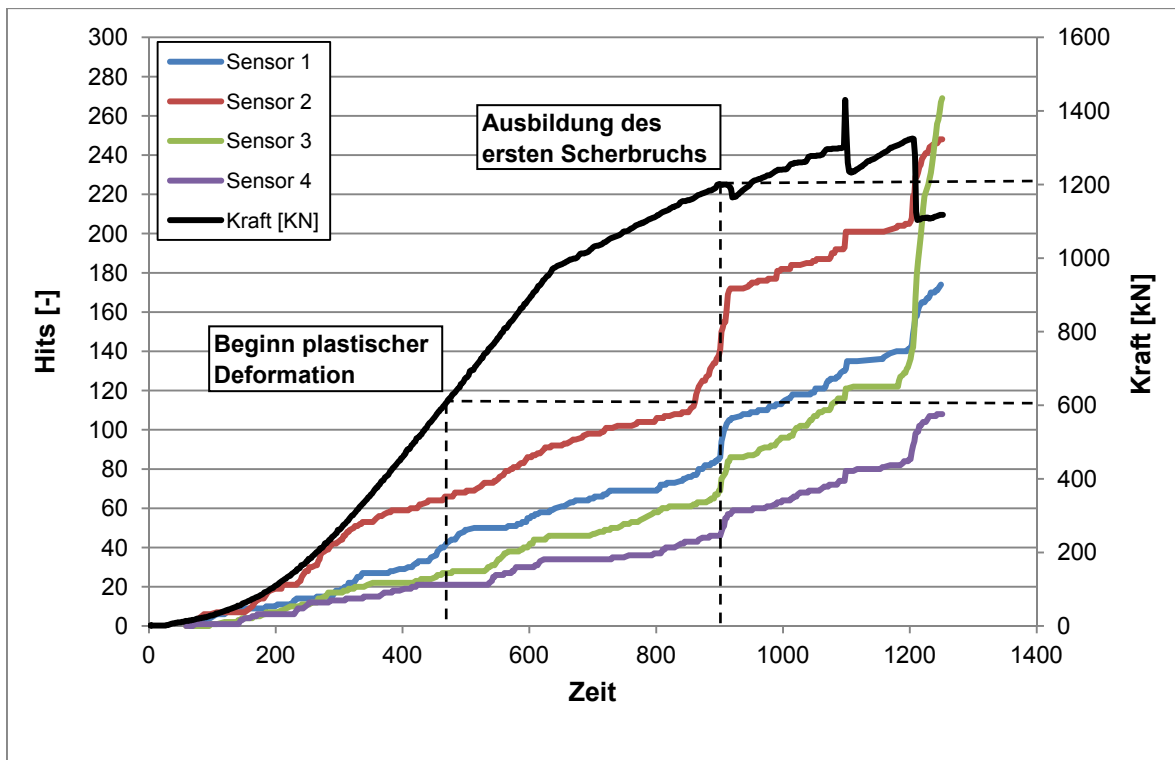


Abbildung 76: Schallemissionsanalyse des Prüfkörpers L2

Die Auswertung der Akustiksignale im Zuge des Druckversuchs am Prüfkörper L2 zeigt von Versuchsbeginn an einen kontinuierlichen Anstieg der empfangenen Signale, wobei der Sensor 2 (rechts oben) mehr Signale empfängt als die anderen Sensoren. Aus der Auswertung der Kraft-Verschiebungsbeziehung ergibt sich der Beginn der plastischen Deformationen am Hohlraumrand bei ca. 600 kN welcher auch geringfügig als Anstieg der empfangenen Signale zu erkennen ist. Ein starker Anstieg ist jedoch bei ca. 1200 kN zu erkennen. Dieser erklärt sich durch die Ausbildung des ersten Scherbruchs von der rechten Ulme ausgehend zur Oberseite hin. Der Knick in der Aufzeichnung der Kraft bei 1000 kN resultiert aus einer langsameren Belastungsgeschwindigkeit ab diesem Zeitpunkt.

➤ Prüfkörper L6

Maximalkraft:

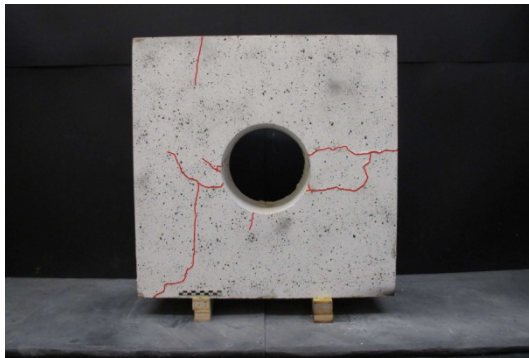
1300,51 kN

Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalkraft:

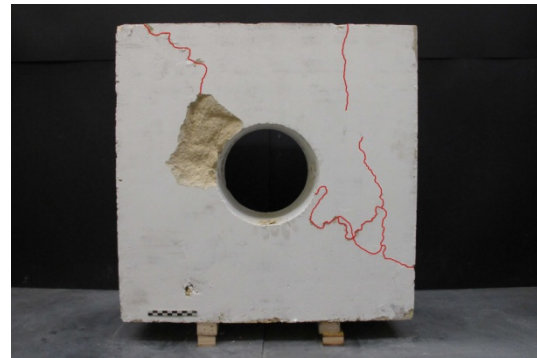
10,84 N/mm²

Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen:

min 0,470 mm, max 0,929 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 77: Prüfkörper L6 nach Versuchsende; rot: Sichtbare Brüche nach Versuchsende

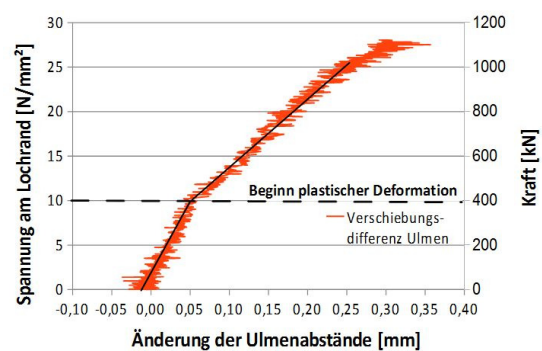
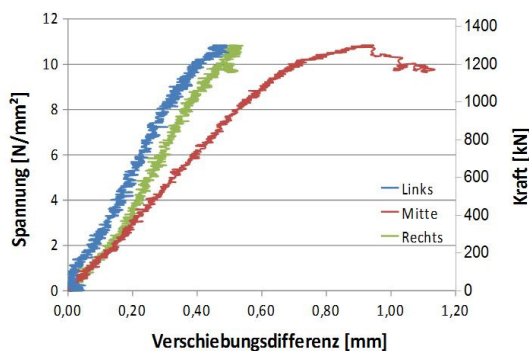


Abbildung 78: Prüfkörper L6;

links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums und der aufgetragenen Druckkraft

rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgetragenen Druckkraft

Ab ca. 750 kN (ca. 55% der Bruchlast) ist ein Zugriss an der Firste mit freiem Auge sichtbar welcher sich beim Gesamtversagen des Prüfkörpers wieder schließt. Von der Sohle ausgehend ist ab 1050 kN ein Zugriss sichtbar. Ab ca. 1200 kN (ca. 90% der Bruchlast) entwickelt sich ein erster Scherbruch links oberhalb des Hohlraums. Nach weiterer Laststeigerung versagt der Prüfkörper bei ca. 1300 kN.

Betrachtet man die Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand, so kann festgestellt werden, dass es ab einer Kraft von 400 kN zu plastischen Deformationen kommt.

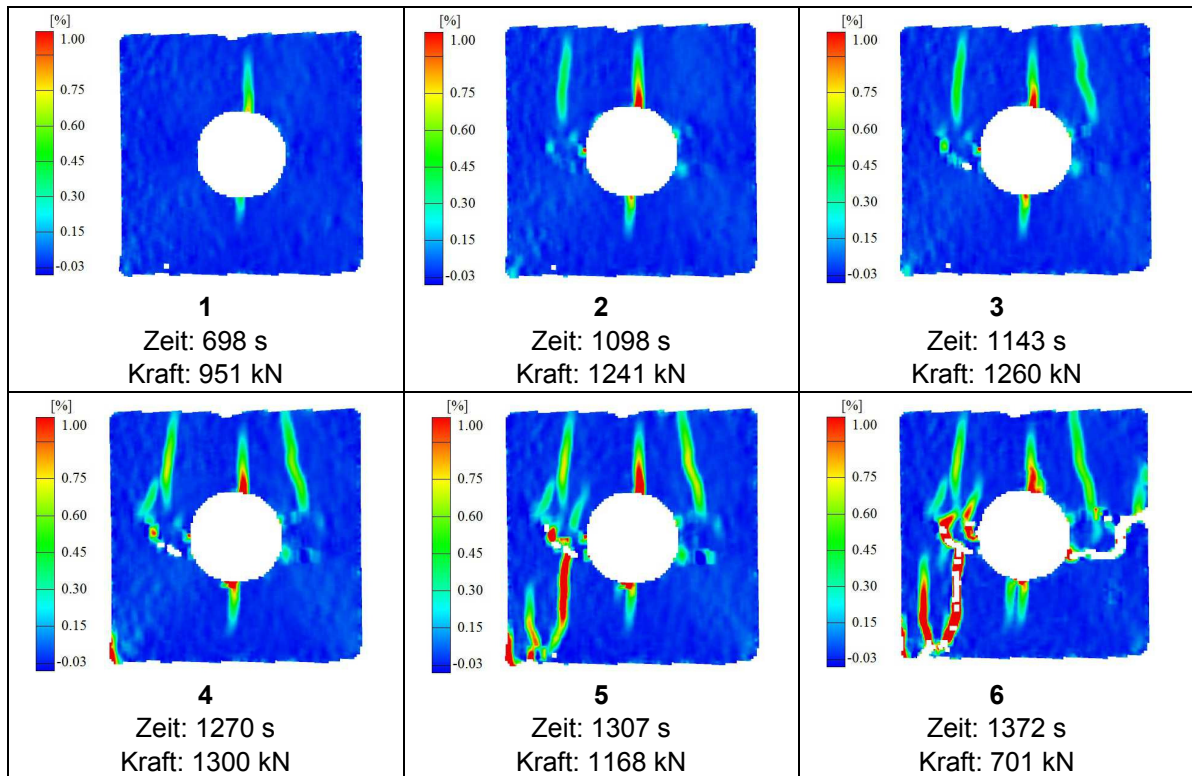


Abbildung 79: Rissentwicklung im Prüfkörper L6 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

Abbildung 80 zeigt die Auswertung der Schallemissionsanalyse des Prüfkörpers L2. Dabei wurde die Anzahl der gemessenen Signale an den 4 verwendeten Sensoren und die Kraft über die Versuchsdauer aufgezeichnet.

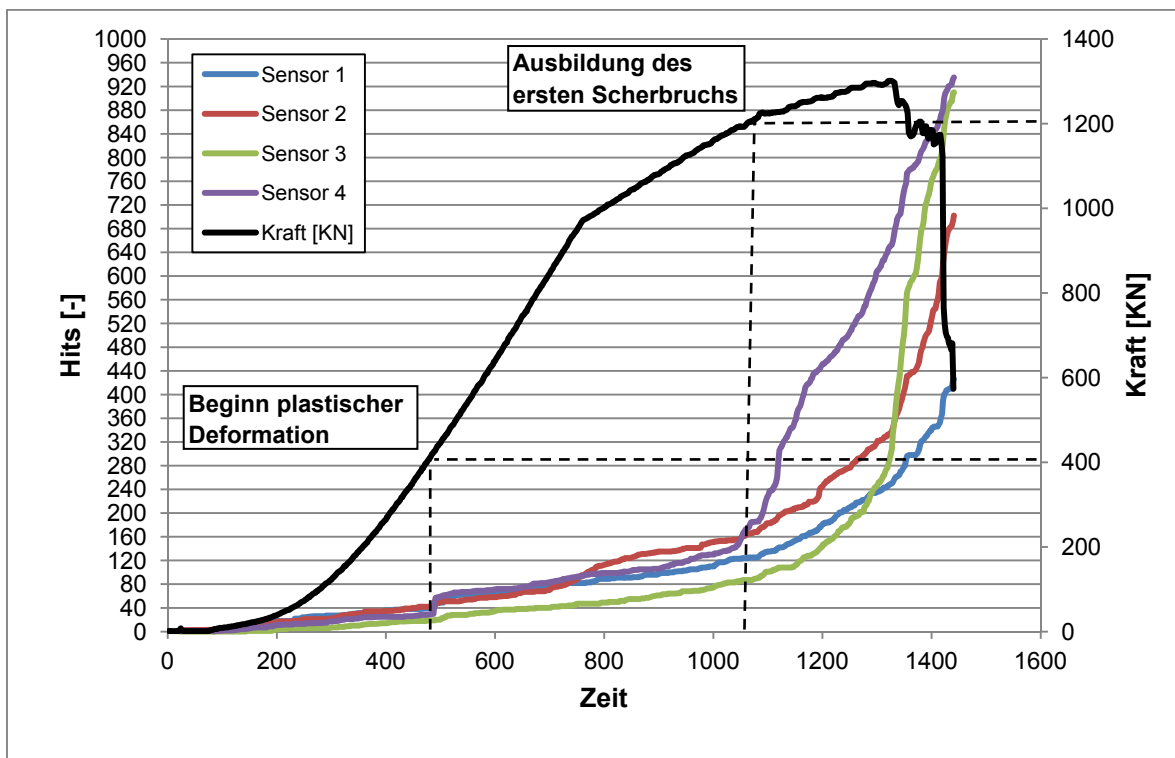


Abbildung 80: Schallemissionsanalyse des Prüfkörpers L6

Betrachtet man den Verlauf der Akustiksignale, so kann man bei einer Belastung von 400 kN einen ersten stärkeren Anstieg der aufgezeichneten Signale feststellen. Dies stimmt gut mit dem Beginn plastischer Deformationen (Rissbildung) am Lochrand überein. Ein starker Anstieg der Signale ist bei ca. 1200 kN zu erkennen. Dies erklärt sich durch die Ausbildung der tiefgreifenden Scherbrüche. Der Sensor 4 (links oben) zeigt diesen Anstieg am frühesten, da sich dort die ersten Scherbrüche ausbilden. Dies kann man auch in der Auswertung der maximalen Hauptdehnungen (Bild 2 in Abbildung 79) sehen. Der Knick in der Aufzeichnung der Kraft bei 1000 kN resultiert aus einer langsameren Belastungsgeschwindigkeit ab diesem Zeitpunkt.

6.2.3.4. Versuchsreihe XL

Aufgrund der schwierigen Pressensteuerung des großen Prüfrahmens (Belastung durch 4 Pressen) und der daraus resultierenden unregelmäßigen Lasteinleitung konnten aus der Versuchsreihe XL keine aussagekräftigen Ergebnisse bezüglich der radialen Deformation der Ulmen gewonnen werden. Deswegen wurden diese Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

6.2.3.5. Versuchsreihe M-M

➤ Prüfkörper M-M3

Maximalkraft:

1656,1 kN

Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalkraft:

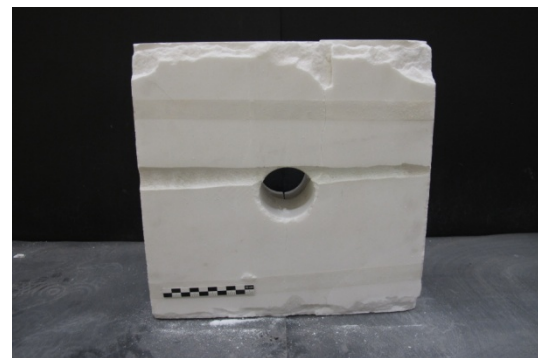
55,20 N/mm²

Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen:

min 0,227 mm, max 0,683 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 81: Prüfkörper M-M3 nach Versuchsende

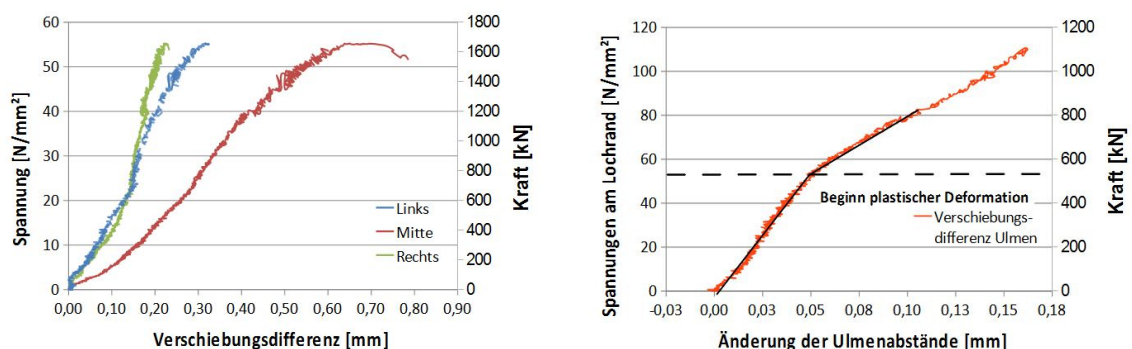


Abbildung 82: Prüfkörper M-M3;

links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums und der aufgebracht Druckkraft

rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgebracht Druckkraft

Erste vertikale Zugrisse oberhalb und unterhalb des Hohlraums sind im ARAMIS ab ca. 700 kN (ca. 42% der Bruchlast) erkennbar, ab 850 kN (ca. 50% der Bruchlast) sind diese Zugrisse mit freiem Auge sichtbar. Mit Beginn der Ausbildung der sekundären Scherbrüche ab 1500 kN schließen sich diese Zugrisse. Der Prüfkörper versagt schlagartig entlang von Scherbrüchen die den Marmorblock in mehrere Teile zerlegen.

Die Auswertung der Verschiebungen an den Ulmen zeigt, dass plastische Deformationen, und somit erste Rissbildungen, ab ca. 540 kN stattfinden. Im Gegensatz zu den Prüfkörpern aus Sandstein sind beim Prüfkörper M-M3 Abplatzungen an der Hohlraumwand bereits vor Versagen des gesamten Prüfkörpers, bei 1550 kN (ca. 93% der Bruchlast), mit freiem Auge zu erkennen (Abbildung 84).

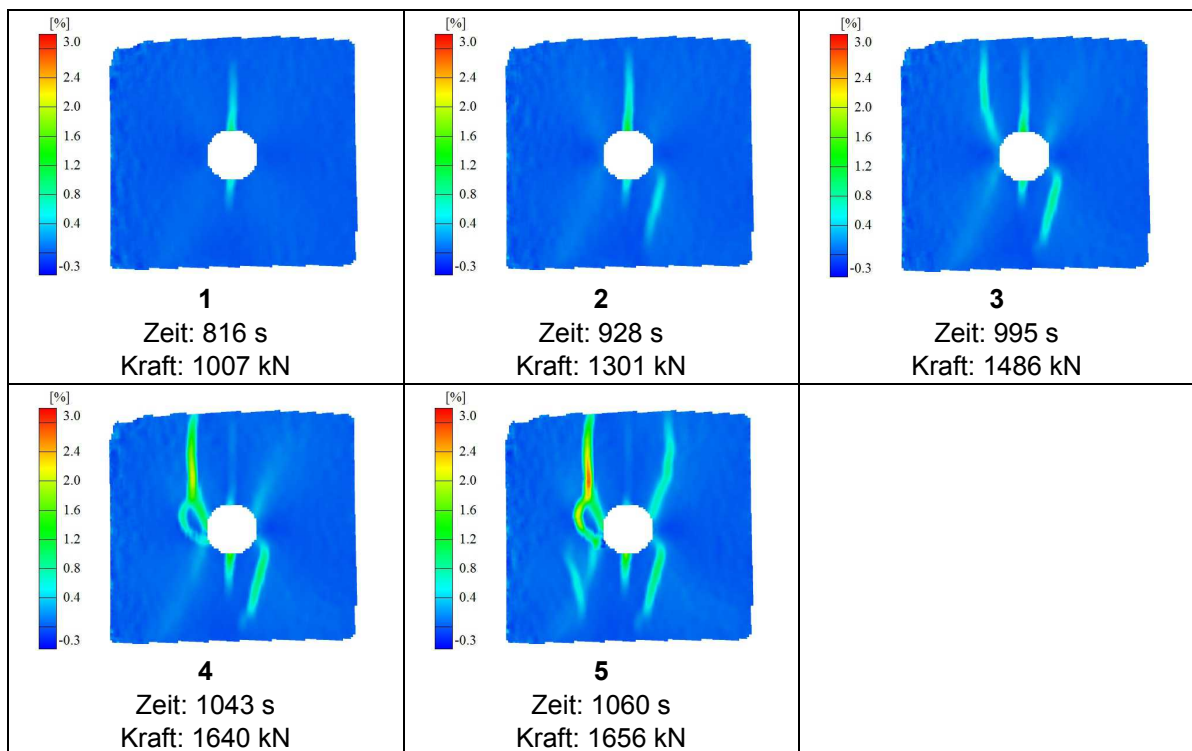


Abbildung 83: Rissentwicklung im Prüfkörper M-M3 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

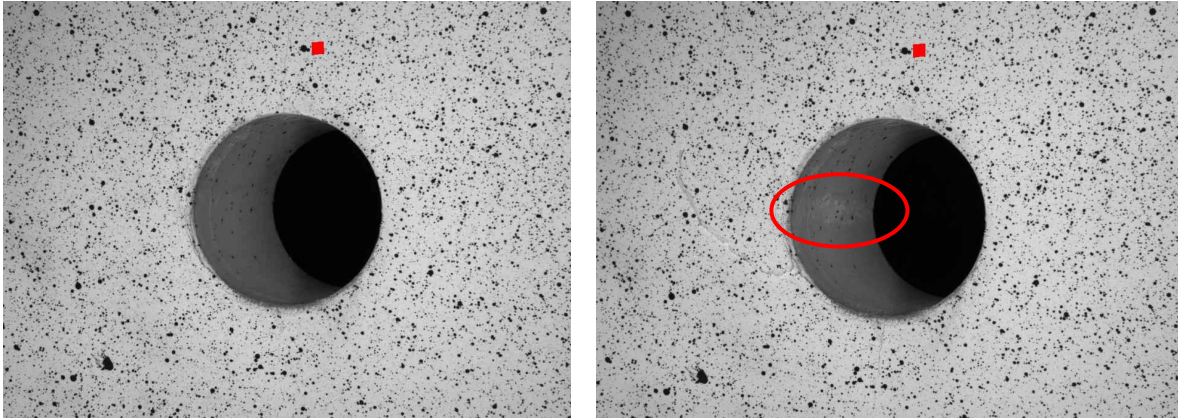


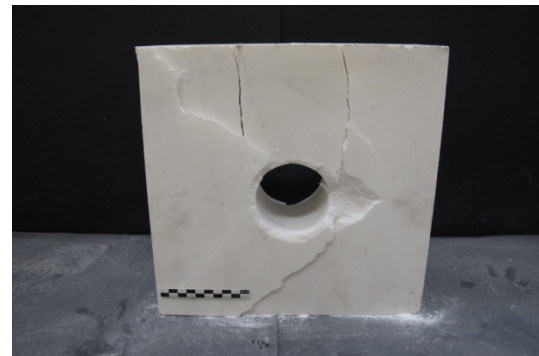
Abbildung 84: Abplatzungen an den Lochinnenseiten des Prüfkörpers M-M3: links bei 1440 kN; rechts bei 1650 kN. Die rote Umrandung zeigt die erkennbaren Abplatzungen.

➤ Prüfkörper M-M6

Maximalkraft:	1477,89 kN
Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalkraft:	49,26 N/mm ²
Vertikalverschiebungsdifferenz beim Versagen:	min 0,014 mm, max 0,331 mm



Vorderseite



Rückseite

Abbildung 85: Prüfkörper M-M6 nach Versuchsende

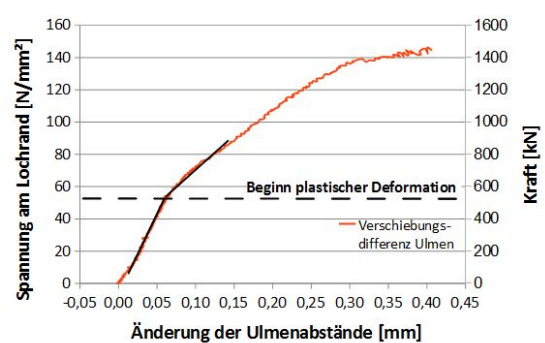
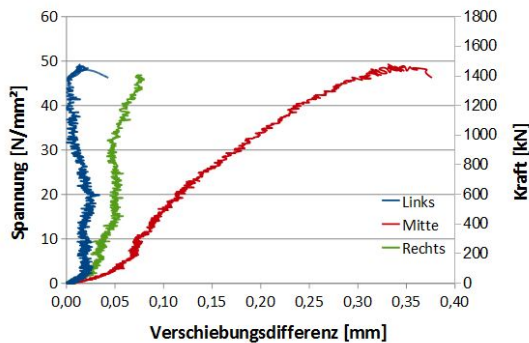


Abbildung 86: Prüfkörper M-M6;

links: Vertikale Verschiebungsdifferenz in Abhängigkeit der Spannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums und der aufgebracht Druckkraft

rechts: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Spannung am Lochrand und der aufgebracht Druckkraft

Bei weniger als 800 kN Belastung (ca. 50% der Bruchlast) zeigen sich in der ARAMIS-Auswertung vertikale Zugzonen im Bereich von Firste und Sohle, welche ab ca. 1000 kN (ca. 75% der Bruchlast) mit freiem Auge sichtbar sind. Mit Beginn der Ausbildung des ersten Scherbruchs an der rechten Ulme schließt sich der obere Zugriss wieder. Der Prüfkörper versagt schlagartig bei einer Belastung von ca. 1500 kN.

Bei 540 kN beginnen plastische Deformationen an den Ulmen. Schon vor Erreichen der Maximallast, ab ca. 1420 kN (ca. 96% der Bruchlast) sind an der linken Ulme Abplatzungen mit freiem Auge zu erkennen.

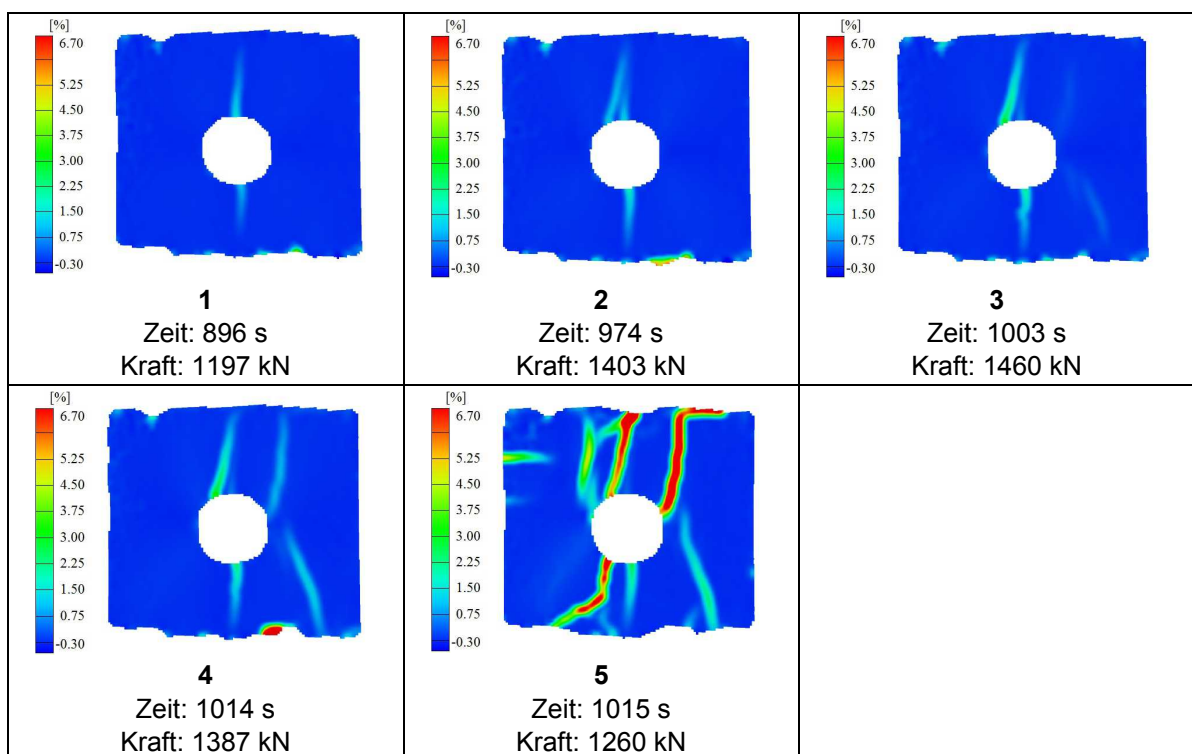


Abbildung 87: Rissentwicklung im Prüfkörper M-M6 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen

6.2.3.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei den Versuchen an den Sandsteinquadern zeigen sich in der ARAMIS-Auswertung der maximalen Hauptdehnungen lange vor dem Versagen deutliche Zugzonen an Sohle und/oder Firste des Hohlraums. Bei der Versuchsreihe L sind diese Zugrisse deutlich, hauptsächlich oberhalb des Lochs, auch mit freiem Auge sichtbar. Durch Beginn der Ausbildung der ersten Scherbrüche, welche fast immer vom Loch ausgehen, schließen sich die primären Zugrisse wieder und der Prüfkörper versagt entlang der sekundären Scherbrüche, die meist diagonal durch den Prüfkörper laufen. Zuzolge der Scherbruchausbildung sinkt die maximal übertragbare Kraft und durch Spannungsumlagerungen bilden sich weitere Brüche aus, die den Prüfkörper in mehrere Teile zerlegen.

Die Rissentwicklung der Marmorquader verhält sich ähnlich, wobei hier die Zugrisse schon bei weniger als 50% der Bruchlast sichtbar sind und das Schließen derselben mit Beginn der Ausbildung der ersten Scherbrüche mit freiem Auge gut beobachtet werden kann.

Insgesamt kommt es bei den Sandsteinquadern erst bei Versagen des Prüfkörpers zu, mit freiem Auge erkennbaren, Brüchen am Hohlraumrand. Die Versuche an Marmor zeigen hingegen zum Teil deutlich erkennbare Abplatzungen an den Lochinnenseiten schon vor Erreichen der Bruchlast. Durch Auswertung der Horizontalverschiebungen an den Ulmen mittels ARAMIS kann der Beginn plastischer Deformationen und somit erster Rissbildungen ermittelt werden bevor es zu sichtbaren Abplatzungen kommt. Dies ermöglicht einen Vergleich der Tangentialspannungen am Lochrand beim Auftreten von entsprechenden Brüchen mit der Druckfestigkeit des Gesamtprüfkörpers (siehe Kapitel 6.2.4).

Beim endgültigen Versagen der Prüfkörper zeigt sich bei den Sandsteinquadern ein im Verhältnis zum Marmor duktileres Bruchverhalten entlang einzelner Scherflächen, die Marmorprüfkörper versagen hingegen schlagartig und werden in mehrere Teile zerlegt (Spröbruchversagen). Dies kann vor allem mit der viel kompakteren Struktur des Marmors begründet werden, der eine wesentlich geringere Porosität als der Sandstein aufweist.

6.2.4. Einfluss der Lochgröße auf die Druckfestigkeit

Um die von Martin (1997) beschriebenen Zusammenhänge zwischen Lochdurchmesser und aufnehmbaren Tangentialspannungen (siehe Kapitel 3.3.1) zu untersuchen, wurden die Tangentialspannungen am Hohlraumrand berechnet bei welchen es zu ersten Rissbildungen bzw. plastischen Deformationen in diesen Bereichen kommt. Die Tangentialspannung, die sich am Hohlraumrand einstellt, entspricht dabei, bis zum Erreichen der Druckfestigkeit, nach der Formel von Kirsch (1898) der dreifachen Spannung, die außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums im Prüfkörper vorherrscht.

Martin (1997) bestimmte den Zeitpunkt, bei welchem die von ihm dokumentierten Ausbrüche am Hohlraumrand entstanden, durch Auswertung von Messungen mittels Dehnmessstreifen, welche während der Druckversuche im Bereich des Lochs angebracht waren.

Bei den im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Druckversuchen entstanden mit freiem Auge sichtbare Brüche an den Ulmen, außer in Ausnahmefällen, erst bei Erreichen der Bruchlast des Gesamtprüfkörpers. Betrachtet man die horizontalen Verschiebungen an den Ulmen mittels ARAMIS, kann jedoch festgestellt werden, dass schon bei weit geringerer Belastung plastische Verformungen und somit Rissbildungen an den Ulmen auftreten. Abbildung 88 zeigt die horizontalen Verschiebungen der Ulmen in Abhängigkeit von der Kraft beispielhaft am Prüfkörper L1 auf. In Abbildung 89 ist zum Vergleich die Veränderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit von der Kraft dargestellt. Man sieht, dass der Beginn plastischer Deformationen schon ca. bei 650 kN auftritt. Die Bruchlast des Prüfkörpers L1 liegt hingegen bei mehr als der dreifachen Last.

Die Veränderung der Ulmenabstände wurde deshalb für die Untersuchung der plastischen Deformationen herangezogen, da sich so systematische Faktoren wie z. B. Verrückung oder Verdrehung des gesamten Prüfkörpers unter Lasteinfluss ausschalten lassen. Dies ermöglicht eine gute Festlegung des Beginns plastischer Verformungen.

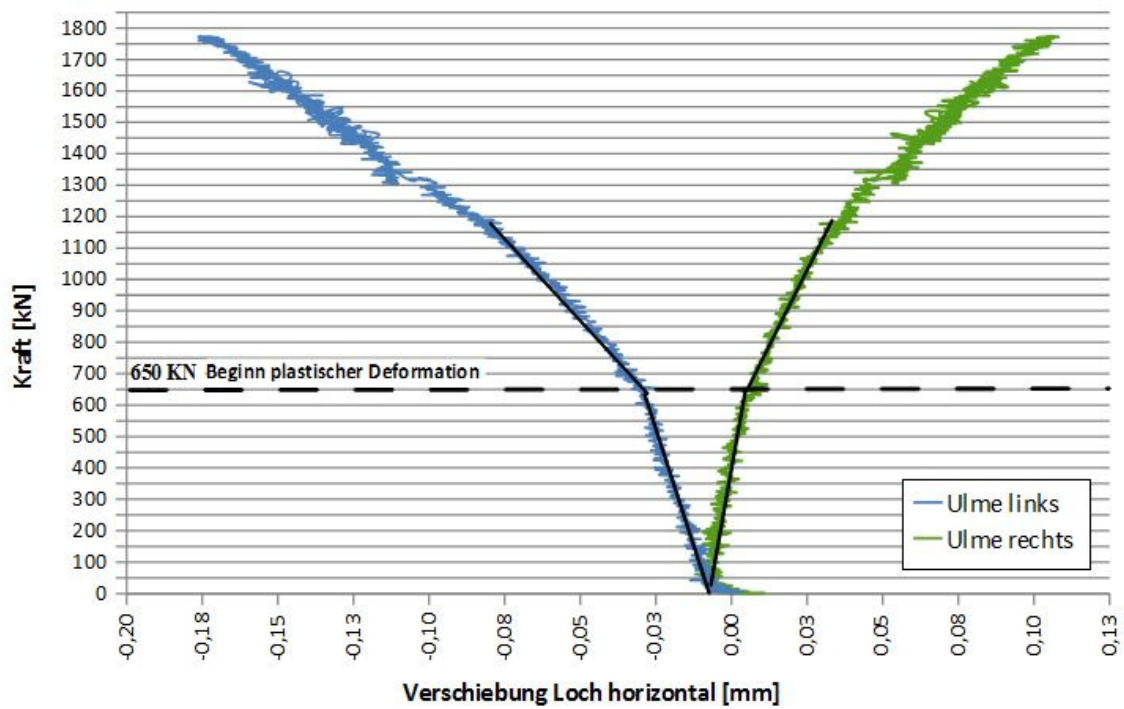


Abbildung 88: Horizontale Verschiebung der Ulmen in Abhängigkeit von der Kraft (Prüfkörper L1)

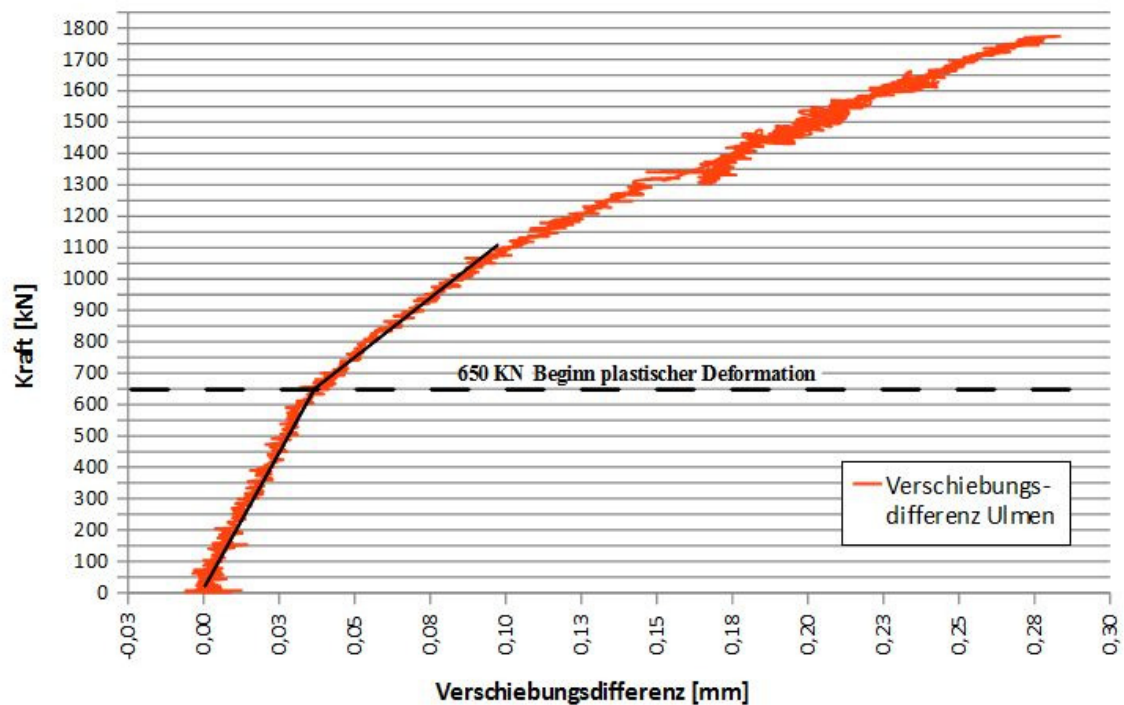


Abbildung 89: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit von der Kraft (Prüfkörper L1)

Die Verhältnisse der Tangentialspannungen am Lochrand bei Beginn plastischer Deformation zur einaxialen Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser in den Sandsteinprüfkörpern sind in Abbildung 90 dargestellt. Die einaxiale Druckfestigkeit σ_c entspricht dabei der Druckspannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximallast.

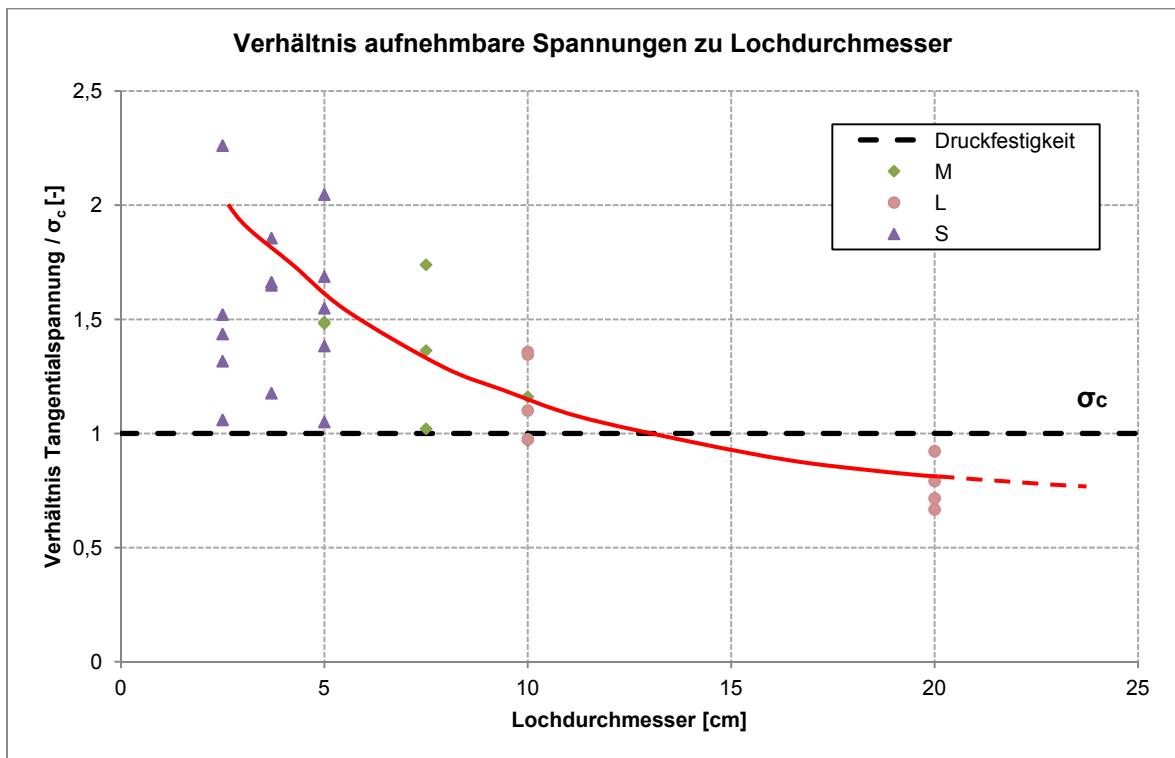


Abbildung 90: Verhältnis von Tangentialspannung am Lochrand bei Beginn plastischer Deformation der Ulmen zu einaxialer Druckfestigkeit des Prüfkörpers (Druckspannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalspannung) in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser bei Sandstein

In Abbildung 90 ist klar eine Abhängigkeit der Tangentialspannung am Lochrand bei Beginn von plastischen Deformationen vom jeweiligen Lochdurchmesser zu erkennen. Bei einem Durchmesser von 2,5 cm beträgt das Verhältnis von Tangentialspannung zu einaxialer Druckfestigkeit maximal 2,3, wohingegen ab einem Lochdurchmesser von 20 cm die aufnehmbare Spannung am Lochrand unter der einaxialen Druckfestigkeit liegt.

In Abbildung 91 zeigt sich für die Prüfkörper aus Marmor eine ähnliche Abhängigkeit vom Lochdurchmesser, wobei das Verhältnis der aufnehmbaren Spannung am Lochrand zur einaxialen Druckfestigkeit unterhalb jenem der

Sandsteinkörper liegt. So z. B. liegt die aufnehmbare Spannung am Lochrand bereits bei einem Lochdurchmesser von 7,5 cm teilweise unterhalb der einaxialen Druckfestigkeit.

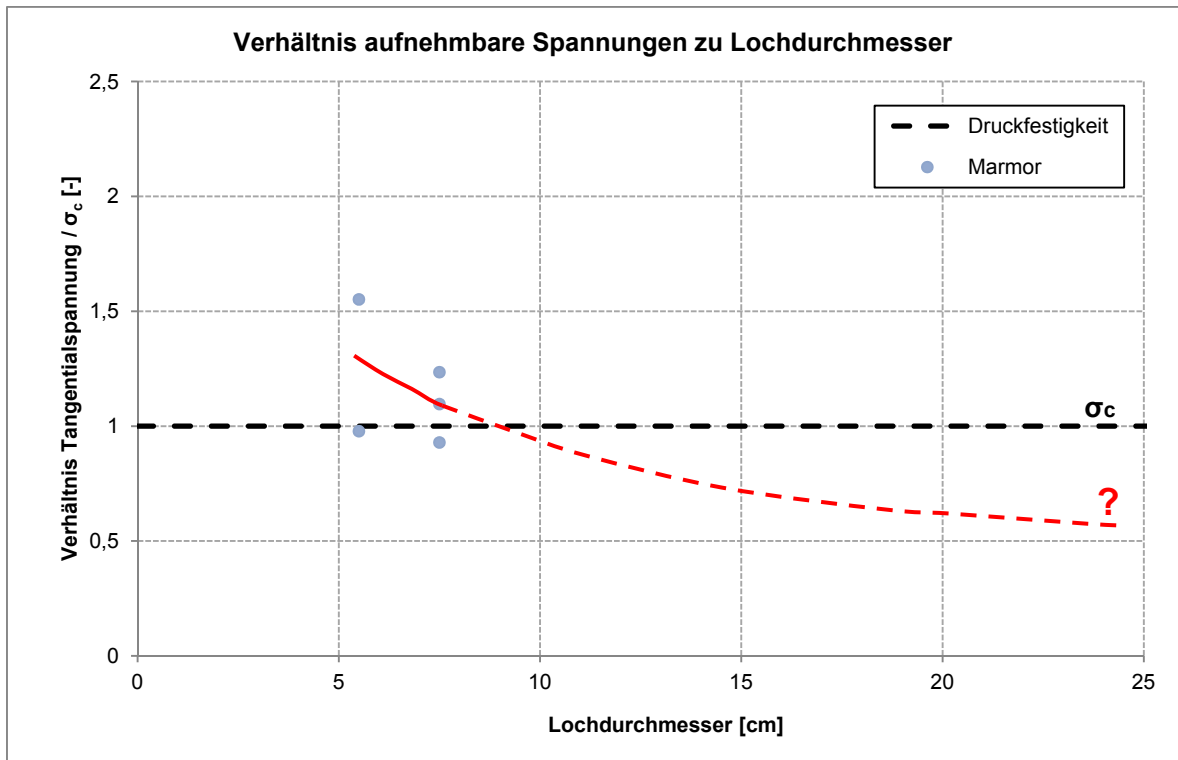


Abbildung 91: Verhältnis von Tangentialspannung am Lochrand bei Beginn plastischer Deformation der Ulmen zu einaxialer Druckfestigkeit des Prüfkörpers (Druckspannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalspannung) in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser bei Marmor

7. NUMERISCHE BERECHNUNG MITTELS FLAC^{3D}

Um die Ergebnisse aus den Versuchen mit den theoretischen Ansätzen zu vergleichen, wurden die Druckversuche der Versuchsreihe M mittels FLAC^{3D} berechnet. Bei FLAC^{3D} handelt es sich um einen Finite-Differenzen-Programm der ITASCA Consulting Group, das speziell zur Modellierung 3-dimensionaler Strukturen in Boden und Fels entwickelt wurde (ITASCA 2009).

Bei den numerischen Berechnungen wurde ein Mohr-Coulomb-Modell verwendet. Die nötigen Materialparameter wurden den Ergebnissen der Triaxialversuche entnommen (siehe Kapitel 6.1.2), wobei jeweils die Mittelwerte der Versuchsreihen angesetzt wurden (Tabelle 28). Da die Zylinder anhand welcher die Materialparameter ermittelt wurden, homogener waren und eine geringere Porosität aufwiesen als die Scheiben mit Loch, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Materialparameter zum Teil zu hoch angesetzt sind.

Tabelle 28: Gemittelte Materialparameter Sandstein für die numerische Berechnung

Dichte	E-Modul	ν	c	φ	σ_t
[t/m ³]	[GPa]	[-]	[N/mm ²]	[°]	[N/mm ²]
2,07	30,05	0,205	12,63	31,61	-8,83

7.1. Versuchsreihe M – Lochdurchmesser 5,0 cm

In den Abbildungen 92 bis 98 sind die Ergebnisse der Berechnung eines Prüfkörpers im Druckversuch mit Kantenlänge 30 x 30 x 10 cm und einem Lochdurchmesser von 5 cm dargestellt. Dies entspricht den Sandsteinprüfkörpern M1 und M3, mit direkter Lasteinleitung über die Druckplatten der Presse.

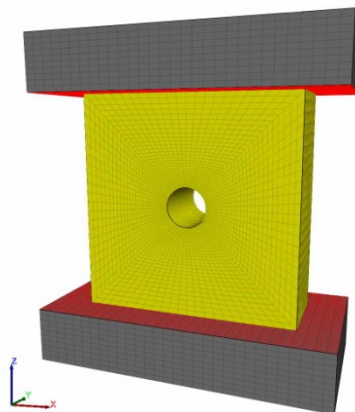


Abbildung 92: Modell von Prüfkörper und Pressenplatten der Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm in FLAC^{3D} mit vertikaler Belastung

Die Aufzeichnungen der Verschiebungen in horizontaler Richtung zeigen, dass sich der Prüfkörper bei einer von oben aufgetragenen Verschiebung von 0,75 mm in der Mitte ausbaucht (0,19 mm) und sich an den Lasteinleitungsflächen praktisch nicht verschiebt. (Abbildung 93). Dies entspricht den Beobachtungen die während der Druckversuche gemacht wurden.

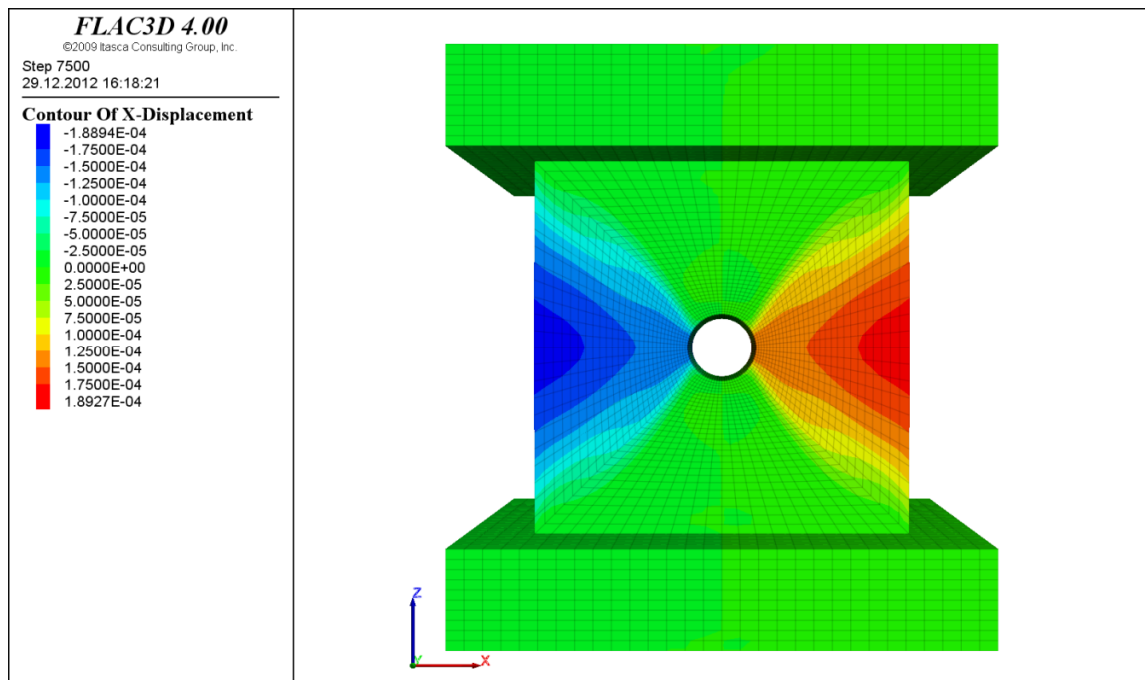


Abbildung 93: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm: Konturplot der Horizontalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,75 mm

In vertikaler Richtung verschieben sich hauptsächlich die Bereiche oberhalb und unterhalb des Lochs, welche in Richtung des Hohlraums gedrückt werden (Abbildung 94). Diese Verformungstendenz konnte auch in der Auswertung der Vertikalverschiebungen während der Laborversuche festgestellt werden.

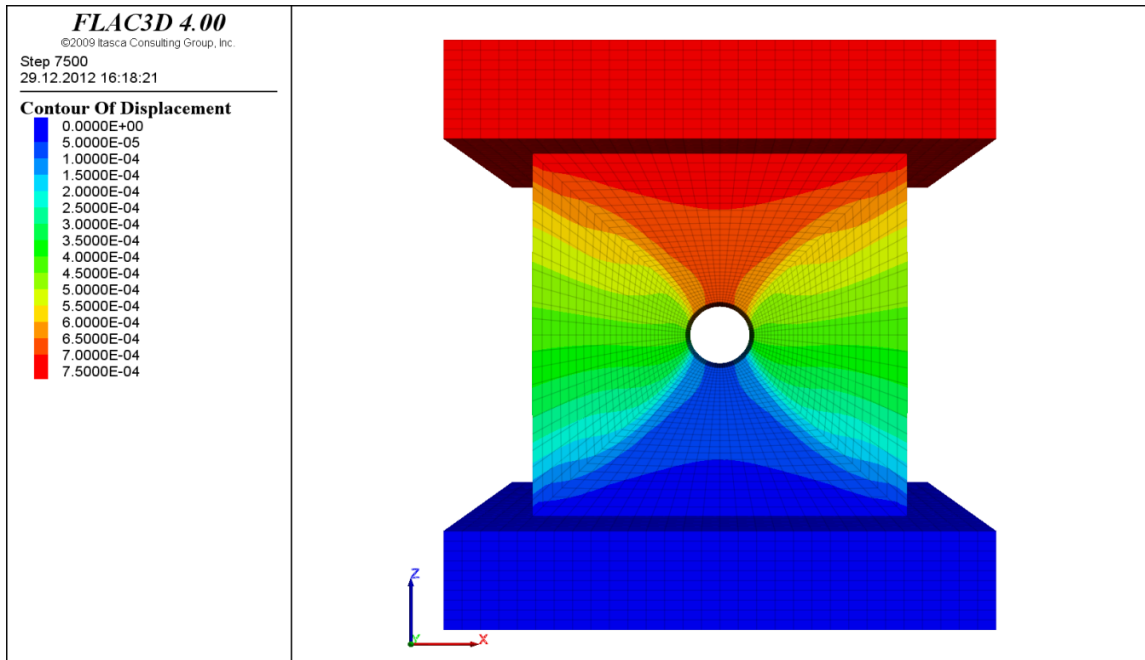


Abbildung 94: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm: Konturplot der Vertikalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgebracht Vertikalverschiebung von 0,75 mm

Um die Spannungen im Prüfkörper darzustellen, wurden ein horizontaler Schnitt in der Mitte des Prüfkörpers sowie mehrere Punkte gewählt, in welchen die Spannungen aufgezeichnet wurden (Abbildung 95).

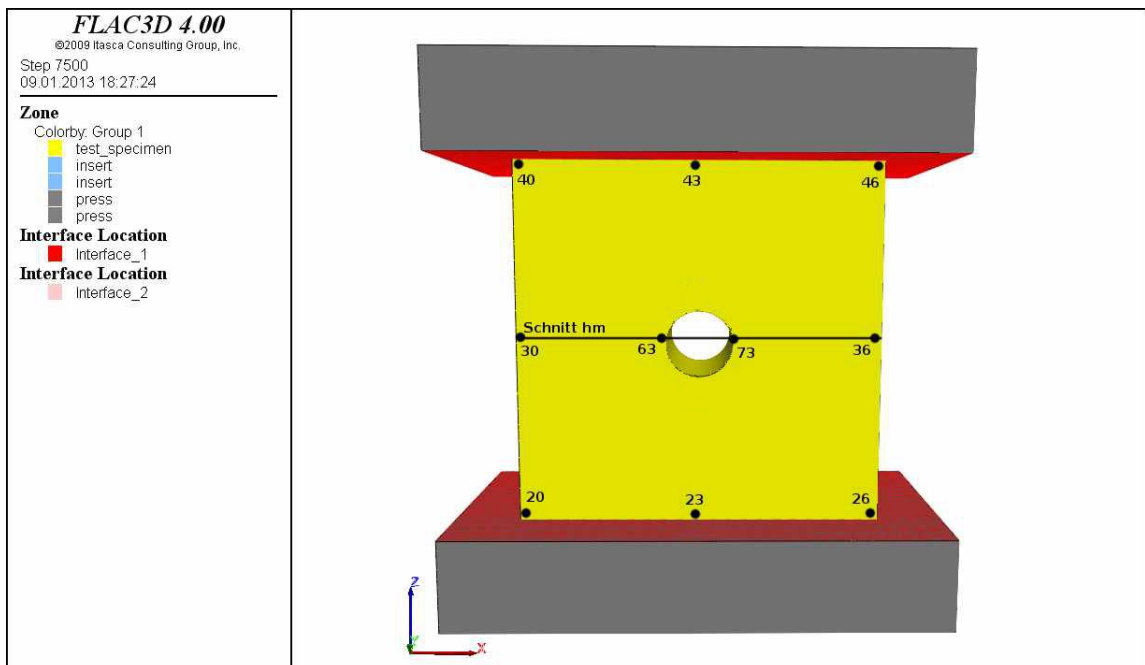


Abbildung 95: Darstellung des horizontalen Schnittes in der Mitte des Prüfkörpers und der Punkte in denen die Spannungen aufgezeichnet wurden

Die Aufzeichnung der Vertikalspannungen σ_z in der Mitte des Prüfkörpers (Abbildung 96). zeigen den Verlauf der Tangentialspannungen an den Ulmen. Die Darstellung bezieht sich auf eine aufgebrauchte Vertikalverschiebung von 0,20 mm, kurz vor dem Erreichen der maximalen Spannung an den Ulmen. In der Mitte des Prüfkörpers ist die Tangentialspannung an den Ulmen dabei höher als an der Vorder- und Rückseite.

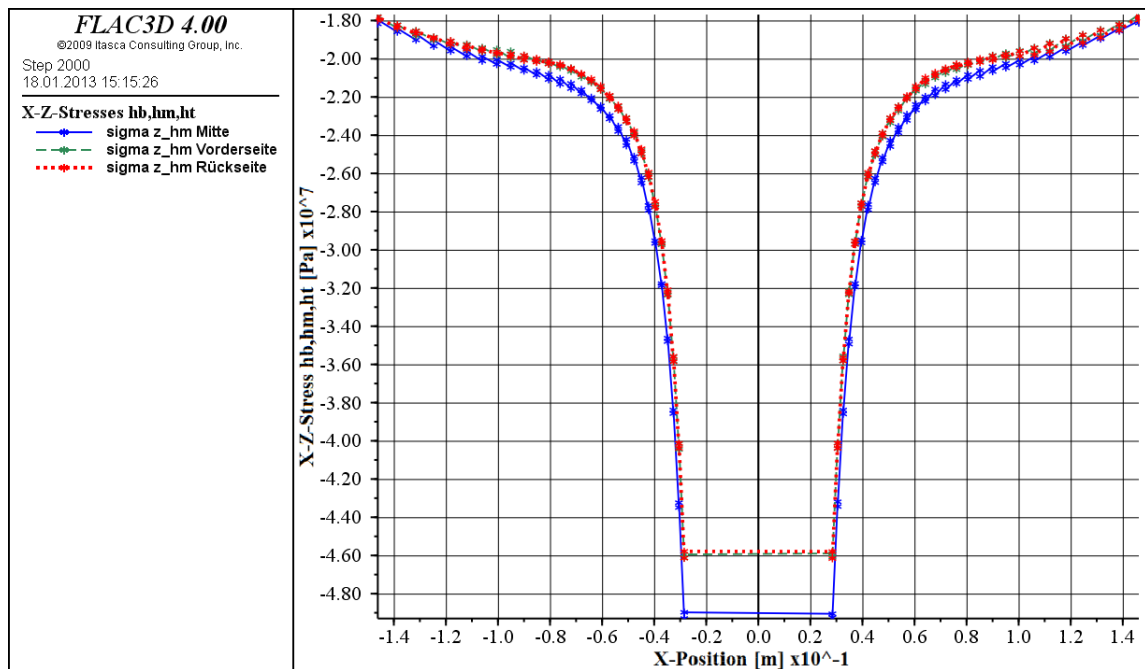


Abbildung 96: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm: Vertikalspannungen σ_z kurz vor Erreichen der Druckfestigkeit der Ulmen bei einer aufgebrauchten Vertikalverschiebung von 0,20 mm

Aus der Spannungs-Verschiebungsbeziehung (Abbildung 97) ist ersichtlich, dass die Maximalspannung an den Ulmen (Punkt 63 und 73) als erstes überschritten wird und, dass zu diesem Zeitpunkt die Spannung an den Ulmen ca. das dreifache jener Spannung beträgt die am Rand des Prüfkörpers (Punkt 30 und 36) und somit außerhalb des Einflussbereichs des Lochs wirkt. Sowohl an den Eckpunkten (Punkt 40, 46, 20 und 26), als auch oberhalb und unterhalb des Lochs (Punkt 43 und 23) ist die Maximalspannung bei einer aufgebrauchten Vertikalverschiebung von ca. 0,45 mm erreicht.

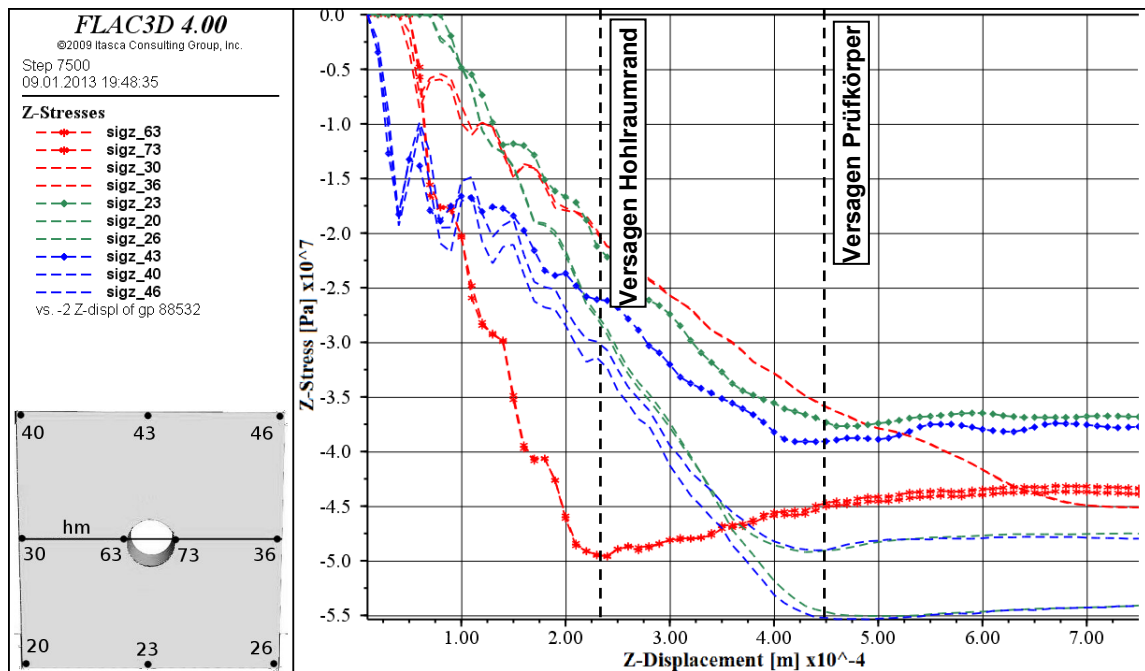
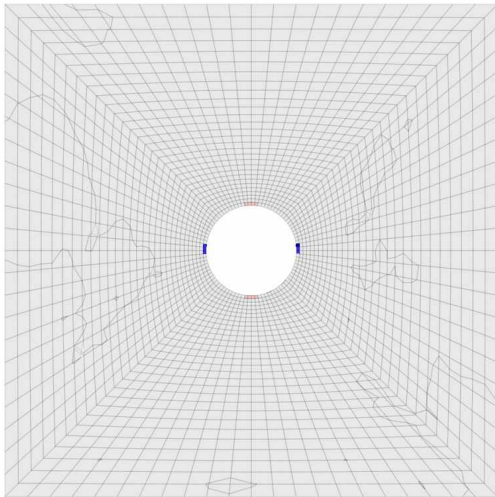


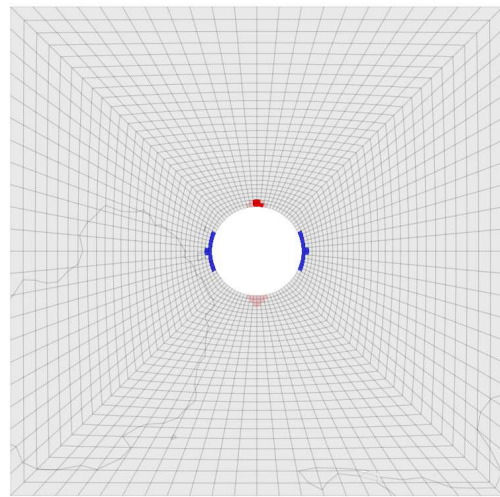
Abbildung 97: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm: Verlauf der Vertikalspannungen in gekennzeichneten Punkten in Abhängigkeit der aufgetragenen Vertikalverschiebung

In Abbildung 98 ist die Entwicklung der plastischen Zonen bei fortschreitender aufgetragener Vertikalverschiebung dargestellt anhand welcher man Aussagen zur Rissentwicklung treffen kann. Man sieht, dass sich anfangs in Sohle und Firste vertikale Zugrisse ausbilden. Ausgehend von plastischen Zonen in den Ulmen, welche als erste Rissbildungserscheinungen verstanden werden können, bilden sich bei höher werdender Belastung tiefgreifende Scherzonen aus, welche den Prüfkörper durchkreuzen. Nach Beginn der Ausbildung der Scherbrüche schließen sich die Zugrisse in Sohle und Firste.

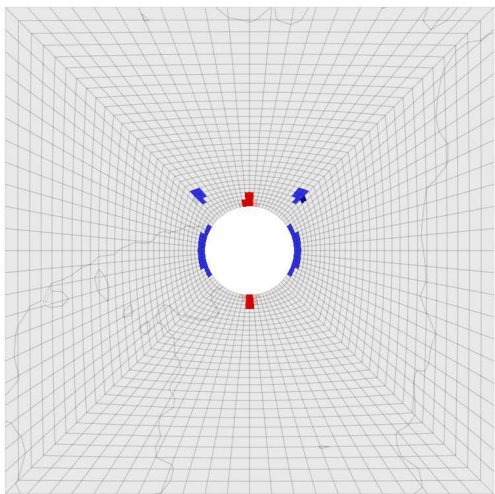
Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,20 mm



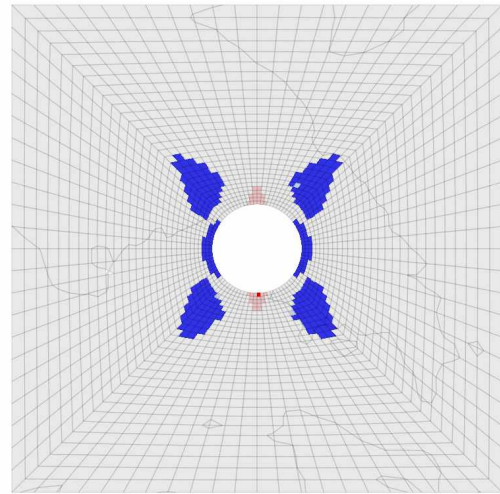
Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,25 mm



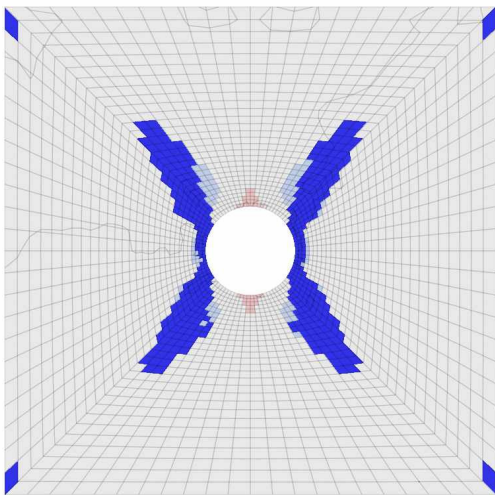
Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,30 mm



Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,35 mm



Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,40 mm



Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,45 mm

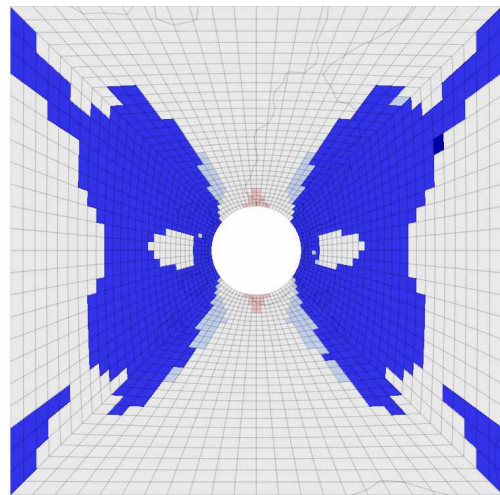


Abbildung 98: Prüfkörper M mit Lochdurchmesser 5 cm: Plastische Zonen in FLAC^{3D} zur Darstellung der Rissbildung bei fortschreitenden aufgebrachter Vertikalverschiebung (Rot: Zugversagen aktuell; Hellrot: Zugversagen in früheren Belastungszuständen, aktuell kein Versagen; Blau: Scherversagen aktuell; Hellblau: Scherversagen in früheren Belastungszuständen, aktuell kein Versagen)

7.2. Versuchsreihe M – Lochdurchmesser 7,5 cm

In den Abbildungen 99 bis 105 sind die Ergebnisse der Berechnung eines Prüfkörpers im Druckversuch mit Kantenlänge 30 x 30 x 10 cm und einem Lochdurchmesser von 7,5 cm dargestellt. Dies entspricht den Sandsteinprüfkörpern M6, M7 und M10 mit direkter Einleitung der Last über die Druckplatten der Presse.

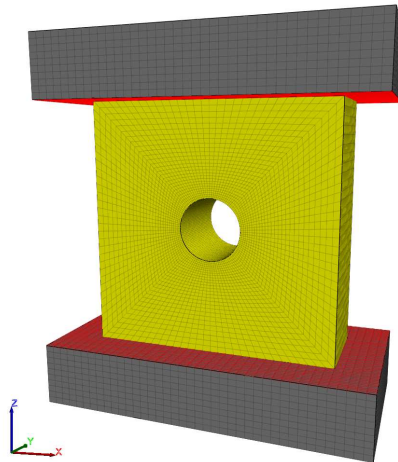


Abbildung 99: Modell von Prüfkörper und Pressenplatten der Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm in FLAC^{3D} mit vertikaler Belastung

Die Aufzeichnungen der Verschiebungen in horizontaler Richtung (Abbildung 100) zeigen, dass sich der Prüfkörper bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,5 mm in der Mitte nach außen verformt (0,11 mm) und an den Lasteinleitungsflächen praktisch nicht verschiebt. Dies entspricht auch dem Verhalten der Prüfkörper während der Versuche.

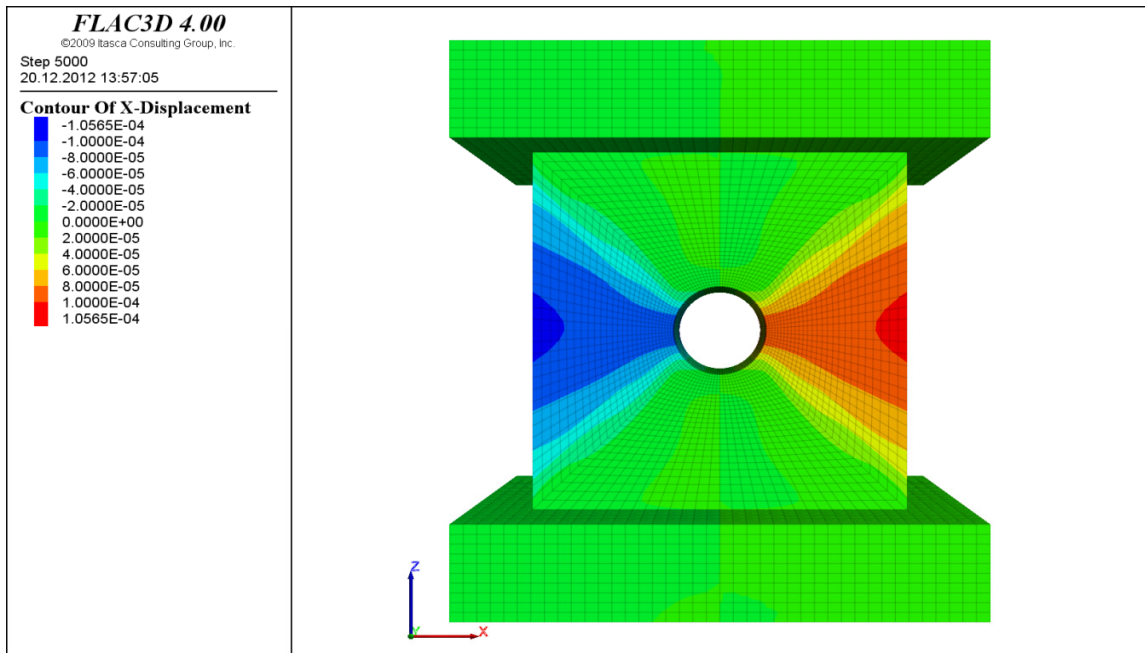


Abbildung 100: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Konturplot der Horizontalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,5 mm

In vertikaler Richtung verschieben sich hauptsächlich die Stellen oberhalb und unterhalb des Lochs, welche in Richtung des Hohlraums gedrückt werden (Abbildung 101). Derartige Verschiebungen waren auch in der Auswertung der Vertikalverschiebungen während der Laborversuche an Sandstein sichtbar.

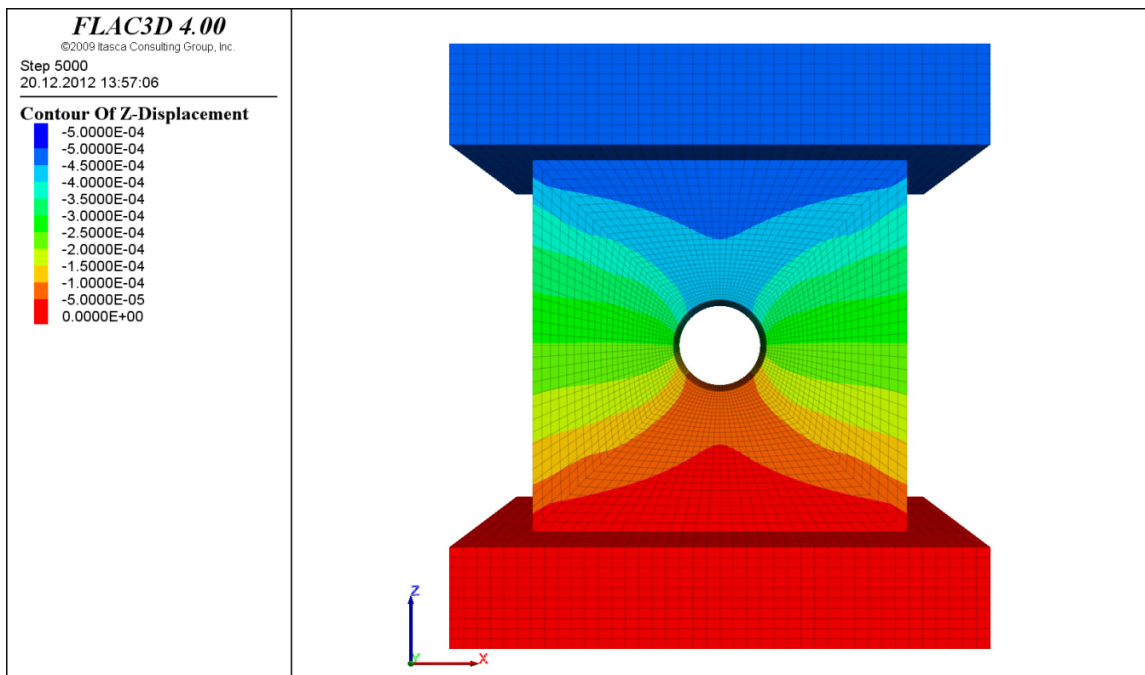


Abbildung 101: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Konturplot der Vertikalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,5 mm

Um die Spannungen im Prüfkörper darzustellen, wurden ein horizontaler Schnitt in der Mitte des Prüfkörpers sowie mehrere Punkte gewählt, in welchem die Spannungen aufgezeichnet wurden (Abbildung 102).

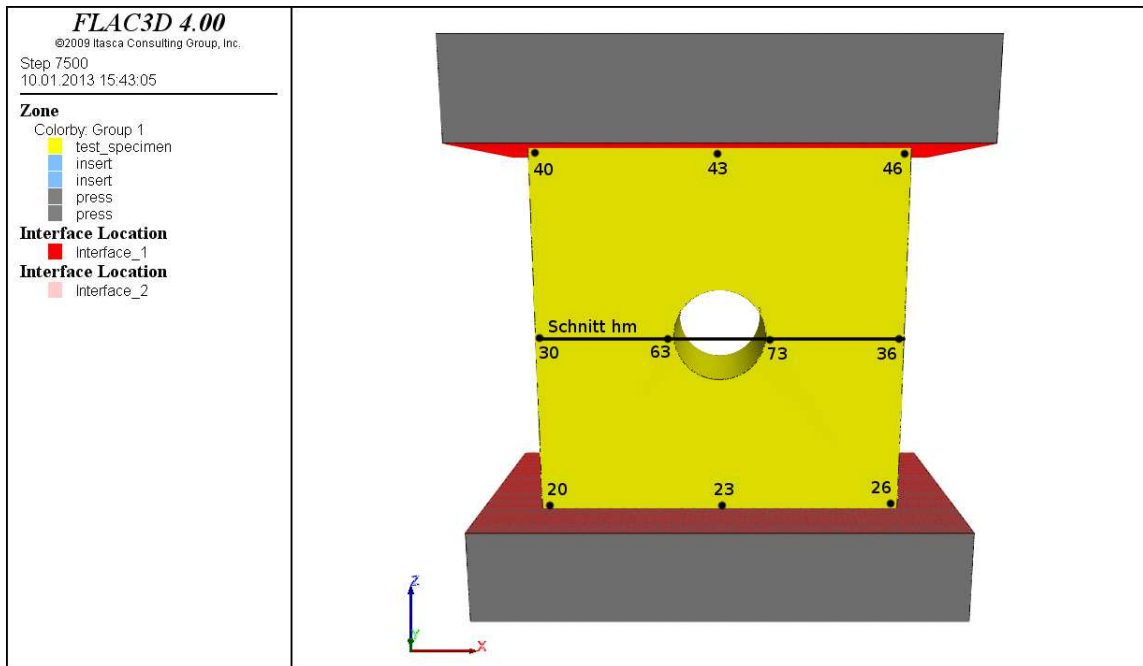


Abbildung 102: Darstellung des Schnittes in der Mitte des Prüfkörpers und Punkte in denen die Spannungen aufgezeichnet werden

In Abbildung 103 ist der Verlauf der Vertikalspannungen σ_z in der Mitte des Prüfkörpers kurz vor Erreichen der maximalen Spannungen an den Ulmen (bei einer aufbrachten Vertikalverschiebung von 0,20 mm) dargestellt. Die Spannungen nehmen vom Rand des Prüfkörpers ausgehend zur Mitte hin zu und betragen am Hohlraumrand ungefähr das Dreifache der Spannung am Rand des Prüfkörpers. In der Mitte des Prüfkörpers baut sich dabei mehr Spannung auf als an der Vorder- und Rückseite.

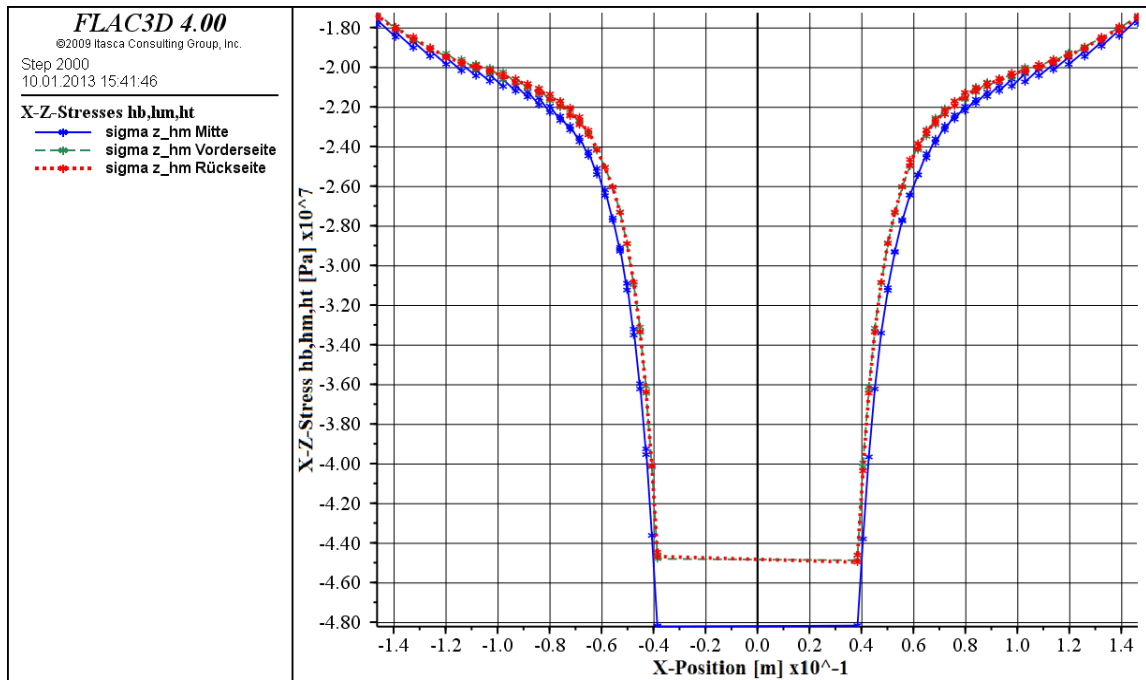


Abbildung 103: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Vertikalspannungen σ_z kurz vor Erreichen der Druckfestigkeit der Ulmen bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,20 mm

Die Spannungs-Verschiebungsbeziehung (Abbildung 104) zeigt, dass an den Ulmen (Punkt 63 und 73) die Maximalspannung als erstes (bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,22 mm) erreicht ist. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Tangentialspannung ca. das dreifache der Spannung am Rand des Prüfkörpers (Punkt 30 und 36). In den restlichen Punkten (Punkt 40, 43, 46, 20, 23 und 26) wird die maximal aufnehmbare Spannung bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von ca. 0,45 mm überschritten. In den Punkten oberhalb und unterhalb des Lochs (Punkt 43 und 23) baut sich dabei infolge der vertikalen Verschiebung weniger Spannung auf.

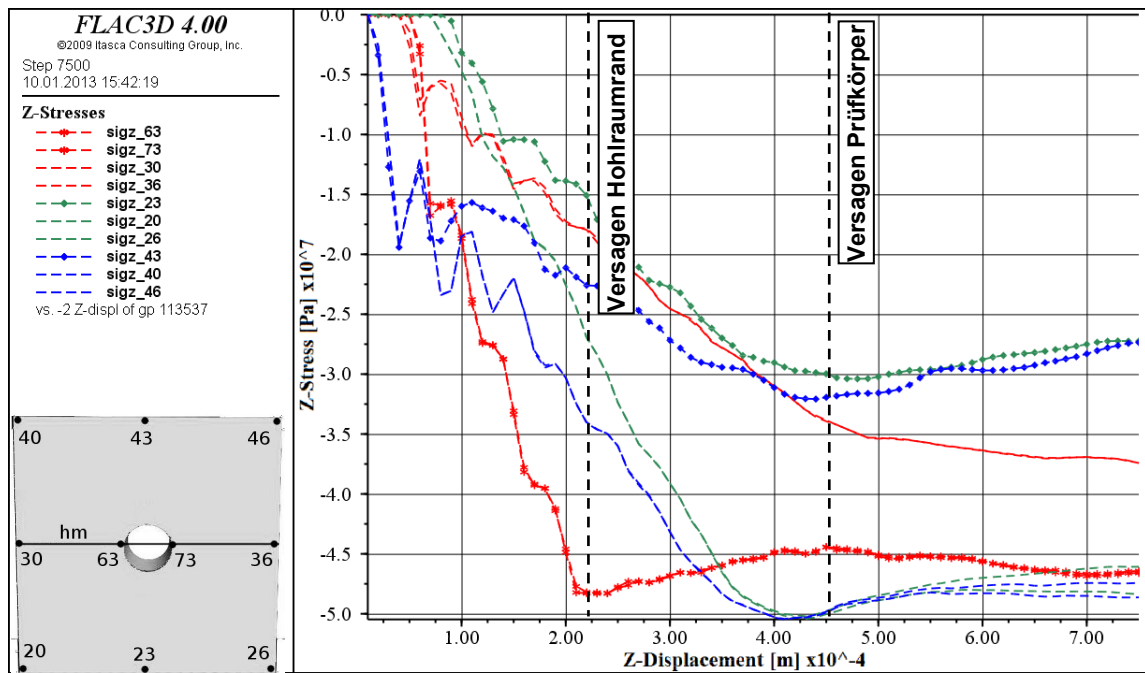
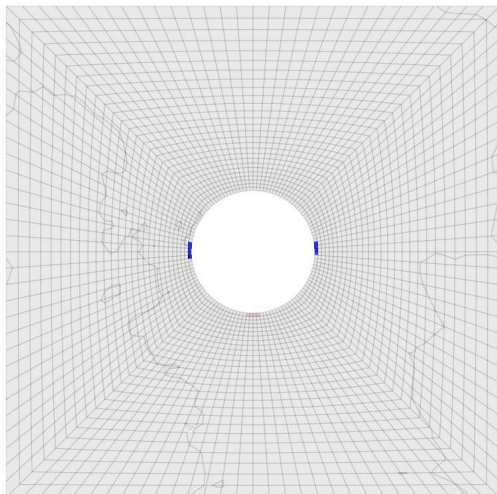


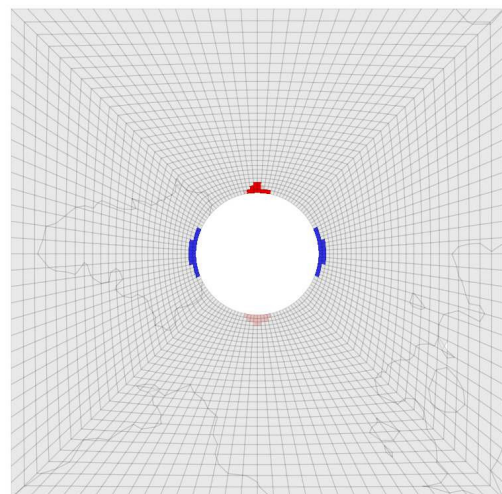
Abbildung 104: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Verlauf der Vertikalspannungen in gekennzeichneten Punkten in Abhängigkeit der aufgetragenen Vertikalverschiebung

Abbildung 105 zeigt die Rissentwicklung anhand von Aufzeichnungen der plastischen Zonen bei fortschreitender aufgetragener Vertikalverschiebung auf. Zuerst bilden sich plastische Zonen in den Ulmen und anschließend Zugrisse in Sohle und Firste. Bei weiterer Belastung bilden sich ausgehend von den Ulmen tiefgreifende Scherbrüche aus.

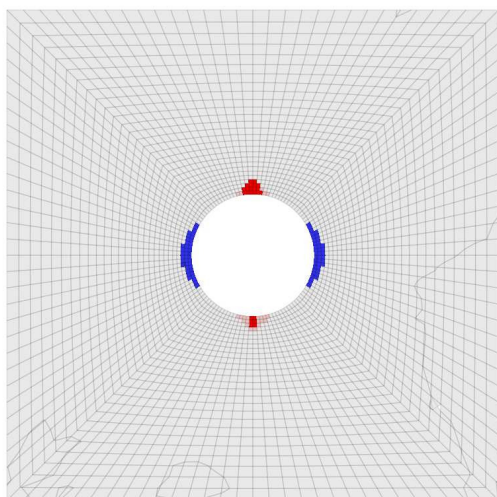
Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,20 mm



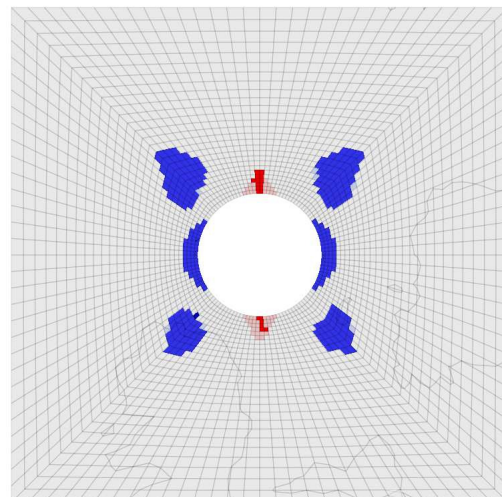
Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,25 mm



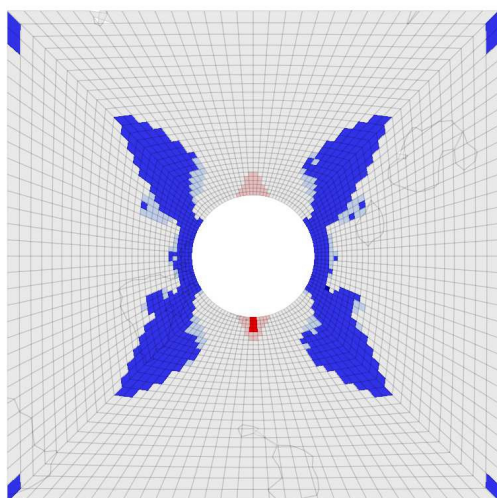
Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,30 mm



Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,35 mm



Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,40 mm



Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,45 mm

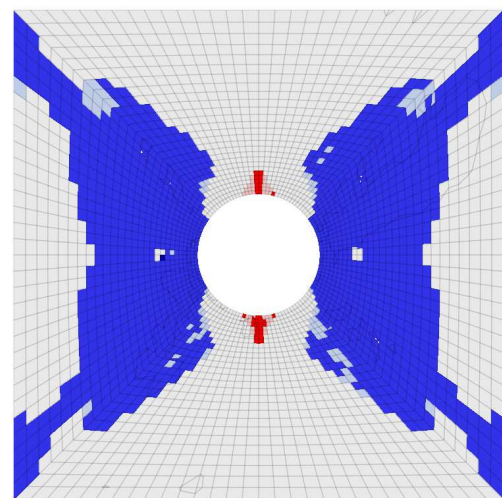


Abbildung 105: Prüfkörper M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Plastische Zonen in FLAC^{3D} zur Darstellung der Rissbildung bei fortschreitenden aufgebrachter Vertikalverschiebung (Rot: Zugversagen aktuell; Hellrot Zugversagen in früheren Belastungszuständen, aktuell kein Versagen; Blau: Scherversagen aktuell; Hellblau: Scherversagen in früheren Belastungszuständen, aktuell kein Versagen)

7.3. Versuchsreihe M – Lochdurchmesser 10,0 cm

In den Abbildungen 106 bis 112 sind die Ergebnisse der Berechnung eines Prüfkörpers im Druckversuch mit Kantenlänge 30 x 30 x 10 cm und einem Lochdurchmesser von 10 cm dargestellt. Dies entspricht den Sandsteinprüfkörpern M11, M13 und M15, mit direkter Lasteinleitung über die Druckplatten der Presse.

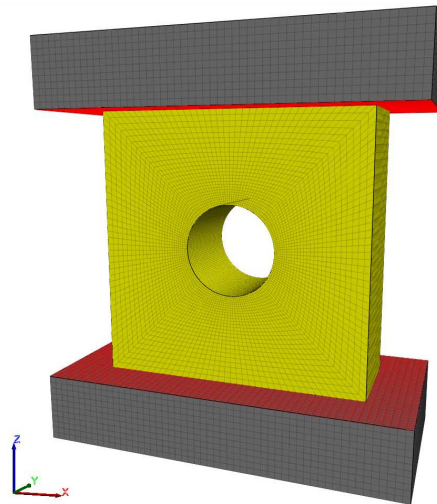


Abbildung 106: Modell von Prüfkörper und Pressenplatten der Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm in FLAC^{3D} mit vertikaler Belastung

Der Prüfkörper verformt sich in der Mitte in horizontaler Richtung nach außen, an den Lasteinleitungsflächen kommt es zu keiner bis sehr wenig Verschiebung. Bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,5 mm beträgt die maximale horizontale Verschiebung in der Mitte 0,12 mm (Abbildung 107). Derartige Verformungen der Prüfkörper wurden auch während der Laborversuche an den Sandsteinquadern beobachtet.

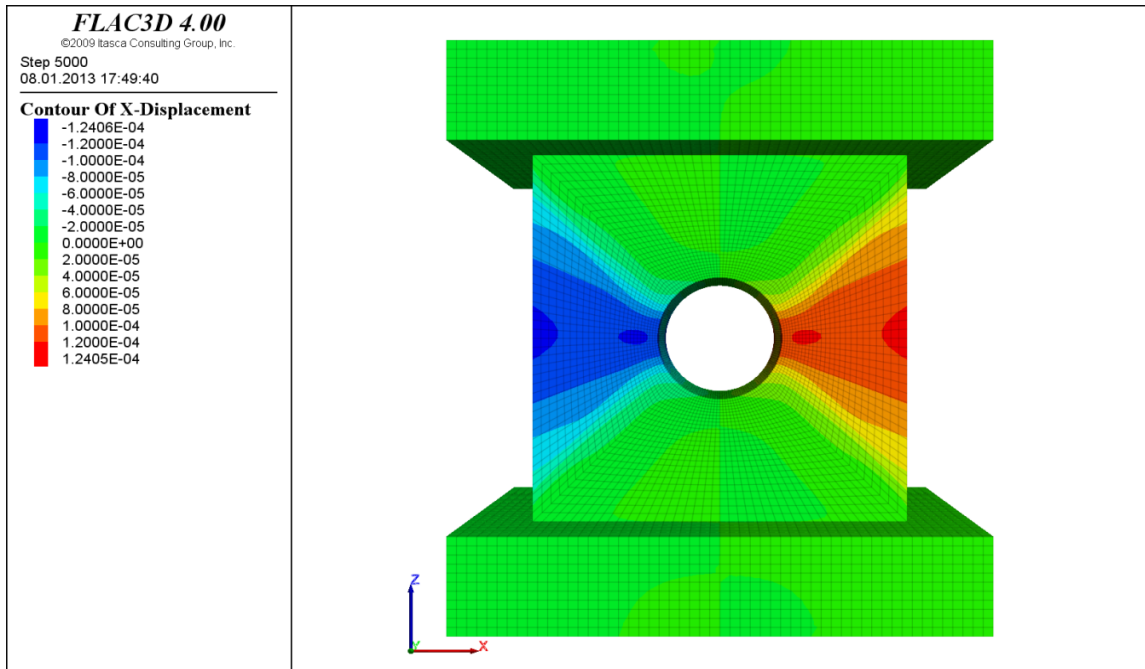


Abbildung 107: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm: Konturplot der Horizontalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgebracht Vertikalverschiebung von 0,5 mm

Die vertikalen Verschiebungen zeigen, dass die Bereiche ober- und unterhalb des Lochs sich in Richtung des Lochs verschieben (Abbildung 108). Diese Vertikalverschiebungen zeigten sich auch in der Auswertung der Ergebnisse der Laborversuche.

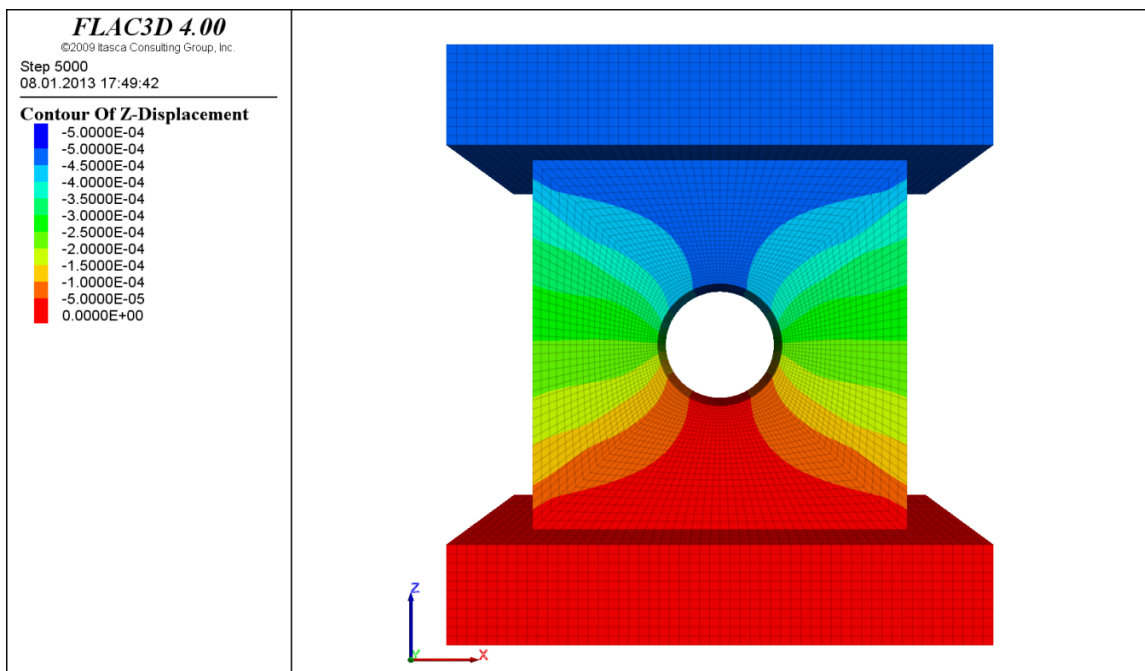


Abbildung 108: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm: Konturplot der Vertikalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgebracht Vertikalverschiebung von 0,5 mm

Um die Spannungen im Prüfkörper darzustellen, wurden ein horizontaler Schnitt in der Mitte des Prüfkörpers sowie mehrere Punkte gewählt, in welchen die Spannungen aufgezeichnet wurden (Abbildung 109).

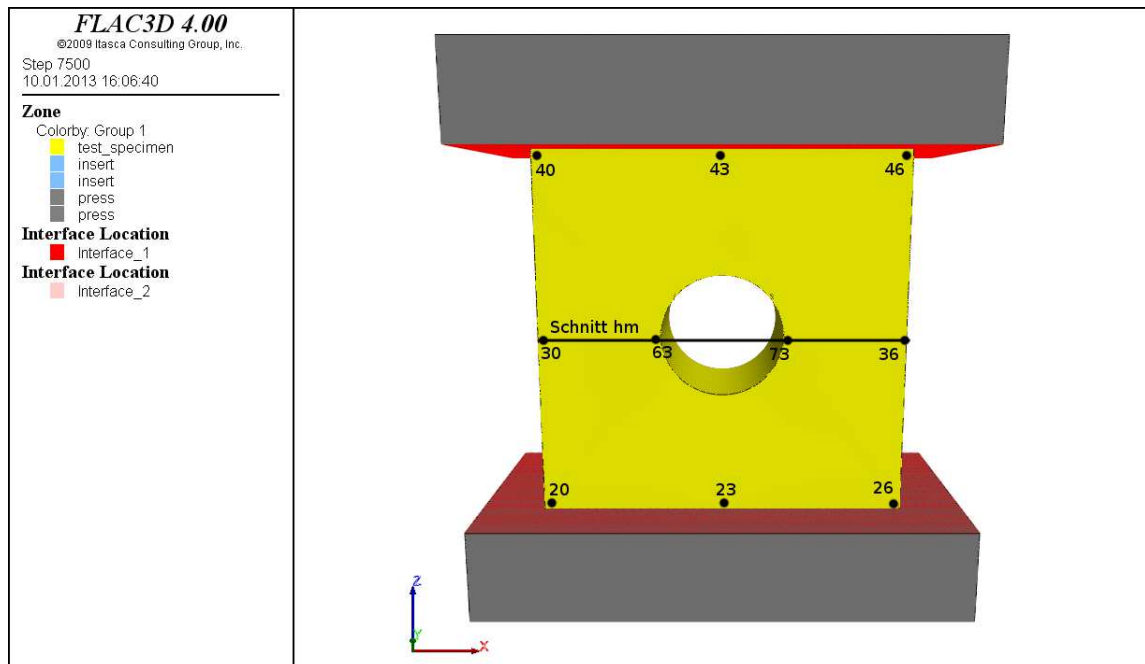


Abbildung 109: Darstellung des Schnittes in der Mitte des Prüfkörpers und Punkte in denen die Spannungen aufgezeichnet werden

In Abbildung 110 sind die Vertikalspannungen σ_z in der Mitte des Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,20 mm dargestellt. Kurz vor dem Erreichen der Maximalspannung an den Ulmen sieht man, dass die Tangentialspannung am Hohlraumrand ungefähr das Dreifache der Spannung σ_z am Rand des Prüfkörpers beträgt. In der Mitte bildet sich dabei eine höhere Spannung aus als an der Vorder- und Rückseite des Prüfkörpers.

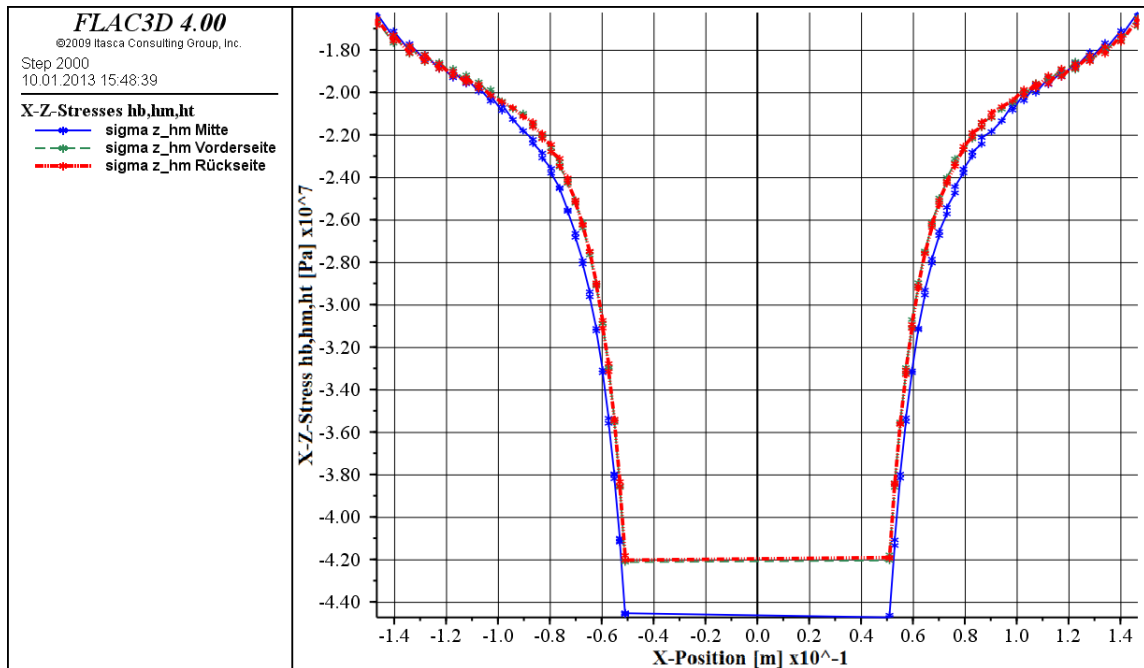


Abbildung 110: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm: Vertikalspannungen σ_z kurz vor Erreichen der Druckfestigkeit der Ulmen bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,20 mm

Die Auswertung der Spannungs-Verschiebungsbeziehung (Abbildung 111) zeigt auf, dass in den Ulmen als erstes die Maximalspannung erreicht ist (bei einer aufgetragenen Verschiebung von ca. 0,23 mm). In den restlichen betrachteten Punkten (Punkt 40, 43, 46, 30, 36, 20, 23 und 26) baut sich bis zu einer Verschiebung von ca. 0,42 mm weiter Spannung auf. In den Bereichen oberhalb und unterhalb des Hohlrums (Punkt 43 und 23) baut sich dabei aufgrund der vertikalen Verschiebung in diesen Punkten weniger Spannung auf.

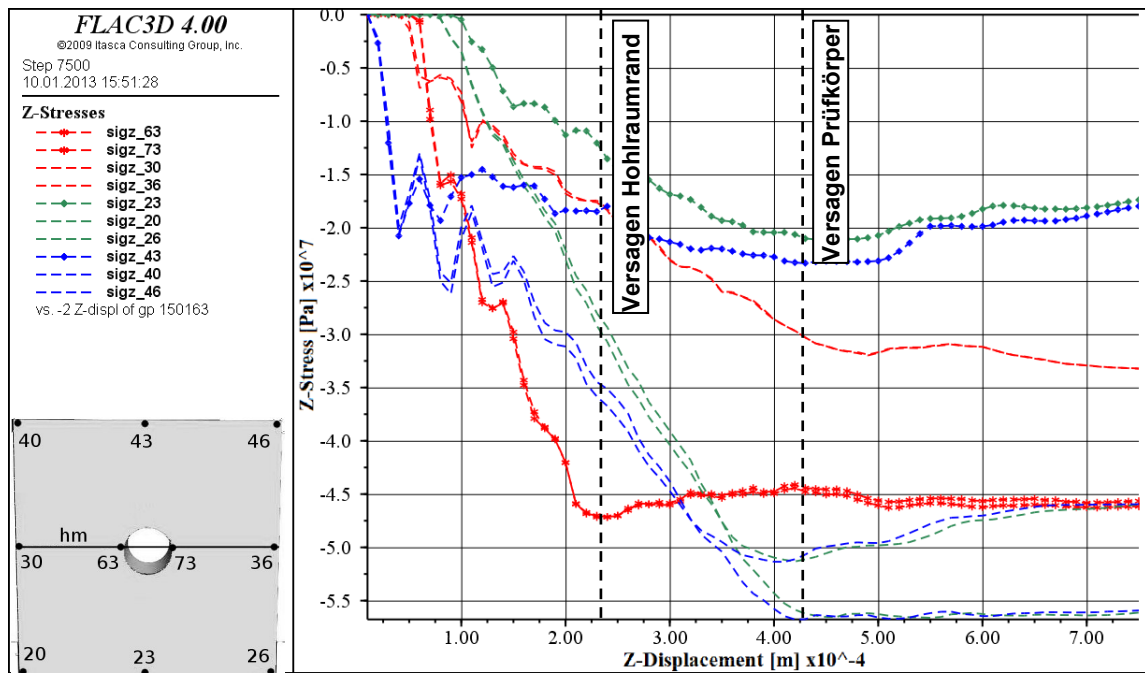
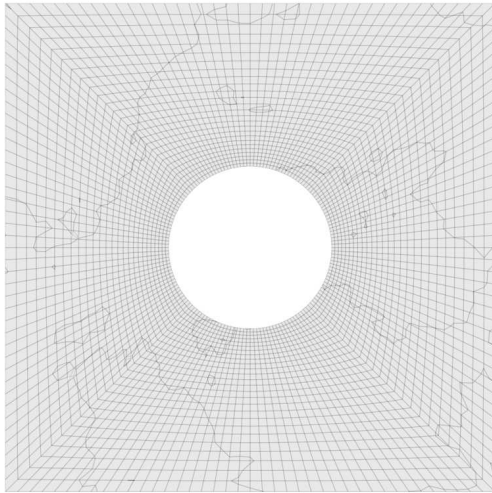


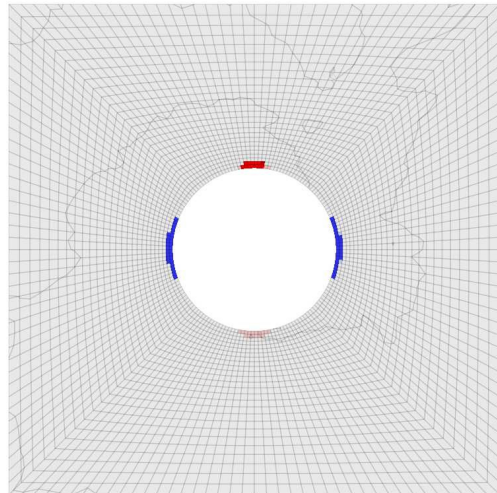
Abbildung 111: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm: Verlauf der Vertikalspannungen in gekennzeichneten Punkten in Abhängigkeit der aufgetragenen Vertikalverschiebung

Anhand der Aufzeichnung der plastischen Zonen bei fortschreitender aufgetragener Vertikalverschiebung (Abbildung 112) können Aussagen über die Rissbildung getroffen werden. Anfangs bilden sich vertikale Zugrisse an Sohle und Firste. Ausgehend von ersten Brüchen an den Ulmen bilden sich tiefgreifende Scherbrüche aus.

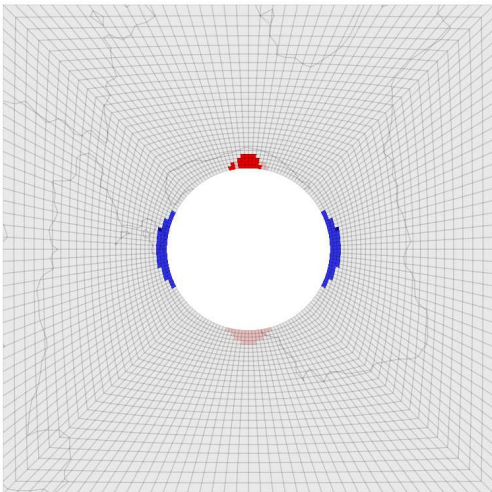
Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,20 mm



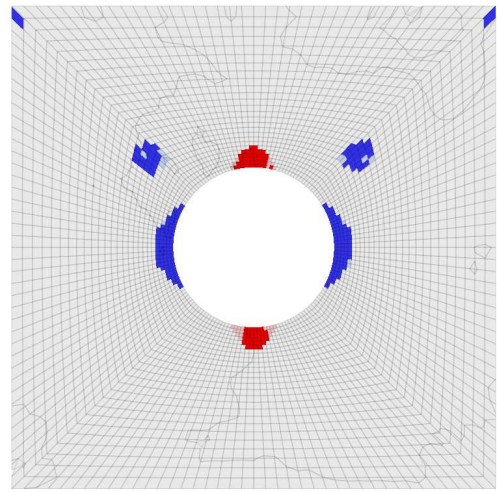
Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,25 mm



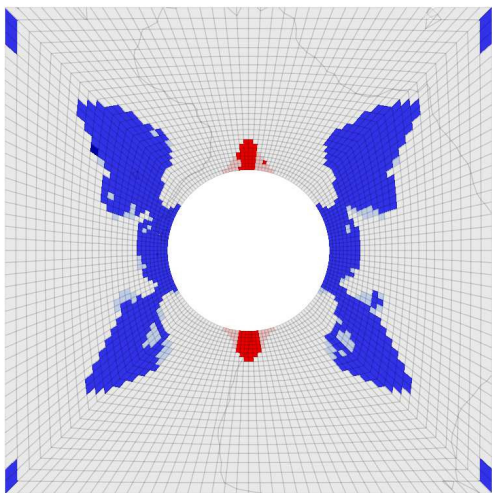
Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,30 mm



Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,35 mm



Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,40 mm



Aufgebrachte Vertikalverschiebung: 0,45 mm

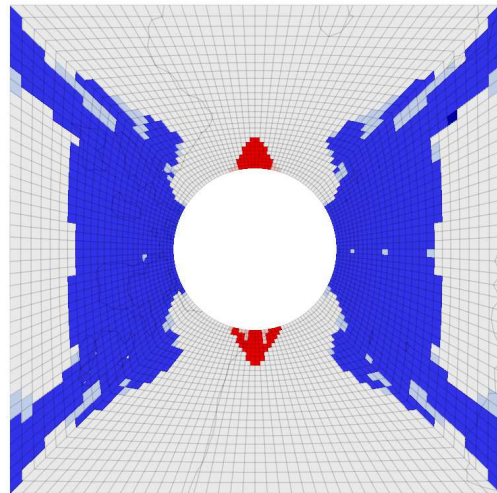


Abbildung 112: Prüfkörper M mit Lochdurchmesser 10 cm: Plastische Zonen in $FLAC^{3D}$ zur Darstellung der Rissbildung bei fortschreitenden aufgebrachter Vertikalverschiebung (Rot: Zugversagen aktuell; Hellrot Zugversagen in früheren Belastungszuständen, aktuell kein Versagen; Blau: Scherversagen aktuell; Hellblau: Scherversagen in früheren Belastungszuständen, aktuell kein Versagen)

8. INTERPRETATION UND AUSBLICK

8.1. Rissbild der Druckversuche

Die charakteristischen Rissbilder der Prüfkörper im einaxialen Druckversuch gleichen einander bei den Sandsteinquadern mit kreisrundem Loch der Versuchsreihe S, M und L. Anfangs bilden sich primäre Zugrisse an Sohle und/oder Firste des Hohlraums, bei weiterer Laststeigerung bilden sich ausgehend von den Ulmen sekundäre Scherbrüche aus und die Zugrisse (bei den kleineren Prüfkörpern nur in der ARAMIS-Auswertung sichtbar) schließen sich wieder. Zuzufolge der Ausbildung eines Scherbruchs sinkt die maximal übertragbare Kraft und infolge der Spannungsumlagerung bilden sich weitere Brüche. Meist verlaufen diese Scherbrüche ausgehend von den Ulmen diagonal durch den Prüfkörper. Mit freiem Auge sichtbare Abplatzungen an den Ulmen, bereits vor Versagen des Prüfkörpers, wie sie in der Literatur vielfach beschrieben werden, konnten bei diesen Versuchsreihen nur in Ausnahmefällen und in kaum merkbarem Ausmaß festgestellt werden. Da nach der Formel von Kirsch (1898) die Tangentialspannung in den Ulmen bei vertikaler Belastung bis zum Erreichen der Druckfestigkeit jedoch der dreifachen Vertikalspannung im Prüfkörper außerhalb der Einflussbereiche des Hohlraums entspricht, wird die Druckfestigkeit in den Ulmen als erstes überschritten. Auch in den Berechnungen mittels FLAC^{3D} ist zu sehen, dass (bei Verwendung eines Mohr-Coulomb Modells) die ersten Plastifizierungen in den Ulmen stattfinden. Bei genauerer Betrachtung der maximalen Hauptdehnungen im Bereich der Ulmen und der Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit der Tangentialspannung am Lochrand mittels ARAMIS kann jedoch festgestellt werden, dass es schon weit vor den ersten mit freiem Auge sichtbaren Rissen zu plastischen Deformationen und somit zu Mikrorissbildungen kommt. Der Zusammenhang zwischen der Tangentialspannung in den Ulmen bei Beginn plastischer Deformationen und der Festigkeit bei Versagen des gesamten Prüfkörpers wird im nachfolgenden Kapitel im Detail behandelt.

Das Bruchverhalten der Marmorquader (Versuchsreihe M-M) ähnelt dem der Sandsteinquader. Abgesehen von der höheren Druckfestigkeit bilden sich ausgeprägte primäre Zugrisse aus, welche sich mit der Ausbildung von sekundären Scherbrüchen schließen. Außerdem waren bei drei von sechs

Prüfkörpern kurz vor dem Gesamtversagen mit freiem Auge sichtbare, schalenförmige Abplatzungen an den Ulmen zu erkennen. Anhand der ARAMIS-Messungen kann wiederum das Einsetzen von plastischen Deformationen (erste Mikrorissbildungen) der Ulmen zu einem weit früheren Zeitpunkt festgestellt werden.

Die Marmorprismen und Marmorzylinder zeigen im Verhältnis zum Sandstein ein wesentlich spröderes Bruchverhalten, dies zeigt sich vor allem am schlagartigen Versagen bei Erreichen der Maximallast. D. h. Marmor ist aufgrund seiner kompakteren Struktur und weit geringeren Porosität wesentlich anfälliger für Spröbruchversagen. Damit lässt sich auch erklären, warum bei den Sandsteinprüfkörpern die Risse an den Ulmen nicht mit freiem Auge sichtbar sind, während es bei den Versuchen mit Marmor zu schalenförmigen Abplatzungen bereits vor dem Versagen des gesamten Prüfkörpers kommt.

Das bedeutet, dass sich kompaktere, homogenere Gesteine unter Umständen besser eignen für den Nachweis von Spröbruchvorgängen in Laborversuchen. So verwendete z. B. Martin (1997) Granit für seine Labor- und In-situ-Versuche zur Beschreibung von v-förmigen Ausbrüchen an den Ulmen. Man muss aber auch dazusagen, dass die v-förmigen Ausbrüche vor allem im In-situ-Versuch an dem AECL- Testtunnel mit einem Durchmesser von 3,5 Metern beobachtet werden konnten (siehe Kapitel 3.4). Ebenso ist anzumerken, dass viele der in der Literatur beschriebenen Versuchsreihen an gelochten Gesteinsprismen als Biaxialversuche mit richtungsbetonter Belastung durchgeführt wurden. Die Erfahrung zeigt, dass sich in biaxial belasteten gelochten Scheiben stärkere Abplatzungen ausbilden als bei einaxialer Belastung.

8.2. Aufnehmbare Spannungen am Lochrand

Unregelmäßigkeiten in der Lasteinleitung sowie Inhomogenitäten des Prüfkörpers können zu unsymmetrischen Spannungsverteilungen führen. Da aber keine Informationen zur genauen Spannungsverteilung vorliegen (mit ARAMIS werden nur Verformungen gemessen), wurden die Spannungen bis zum Erreichen der Druckfestigkeit nach der Formel von Kirsch (1898) ermittelt. Aufgrund der

Inhomogenitäten in Sandstein (z. B. Einschlüsse von Muscheln etc.) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es immer wieder zu unerwarteten Spannungskonzentrationen kommt, welche die Rissbildung beeinflussen. Die berechneten Tangentialspannungen am Lochrand stimmen in diesen Fällen nicht zwangsläufig mit den nach der Formel nach Kirsch berechneten Werten überein. Während der Versuchsdurchführung wurde jedoch kein Zusammenhang zwischen sichtbaren Inhomogenitäten und Rissentwicklung festgestellt.

Martin (1997) hat den Zeitpunkt des Versagens der Ulmen über die Auswertung von Dehnmessstreifen bestimmt, welche am Lochrand aufgeklebt wurden. Stellt man für die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuche die Beziehung zwischen aufgebrachtener Kraft bzw. Tangentialspannung am Lochrand und Änderung der Ulmenabstände her, so kann man den Zeitpunkt der ersten plastischen Deformationen mittels ARAMIS relativ gut bestimmen. Daraus lässt sich ableiten, dass schon vor den ersten, mit freiem Auge sichtbaren Rissen plastische Verformungen stattfinden und es somit bereits zu Rissbildungen kommt.

Vergleicht man die Verhältnisse der Tangentialspannung am Lochrand bei Beginn plastischer Deformationen in den Ulmen zur einaxialen Druckfestigkeit des Prüfkörpers (Druckspannung außerhalb des Einflussbereiches des Hohlraums unter Maximallast) (siehe Abbildung 90 und 91), mit den Ergebnissen der Untersuchungen von Martin (1997) (siehe Abbildung 12) so lässt sich die Abhängigkeit der aufnehmbaren Tangentialspannung vom Lochdurchmesser bestätigen.

Anfänglich wurde der Vergleich der Tangentialspannung am Lochrand mit der einaxialen Druckfestigkeit der Sandsteinzylinder angedacht. Da aber die Druckfestigkeit eine stark maßstabsabhängige Größe ist, gestaltete es sich schwierig, die Ergebnisse kleiner Prüfsylinder mit denen großer Sandsteinquader zu vergleichen. Es wurde daher die einaxiale Druckfestigkeit des jeweiligen Quaders mit Loch für den Vergleich herangezogen.

Es wurde dabei festgestellt, dass bei Lochdurchmessern kleiner als 10 cm, die aufnehmbare Spannung am Lochrand über der einaxialen Druckfestigkeit des Prüfkörpers liegt (max. Faktor 2,3). Bei den Versuchen mit Lochdurchmessern von

20 cm betrug die Spannung am Lochrand bei Beginn plastischer Deformationen im Mittel ca. 75% der einaxialen Druckfestigkeit (siehe Kapitel 6.2.4). Bei den Marmorprüfkörpern ist der gleiche Trend beobachtbar, wobei das Verhältnis der aufnehmbaren Spannung am Lochrand zur einaxialen Druckfestigkeit unterhalb jenem der Sandsteinprüfkörper liegt. Somit liegt die Festigkeit bei größeren Lochdurchmessern bei Marmor deutlich unter der einaxialen Druckfestigkeit. Jedoch ist eine Aussage aufgrund der geringeren Anzahl an Prüfkörpern und der daraus resultierenden geringeren Variation der Lochdurchmesser schwierig (siehe Kapitel 6.2.4). Eine Begründung für diesen Maßstabseffekt könnte sein, dass es bei kleineren Lochdurchmessern zu einer größeren Einsperrung (zusätzlicher Seitendruck) aufgrund der stärkeren Krümmung der Hohlraumlaibung kommt und sich deshalb kein einaxialer Spannungszustand am Hohlraumrand einstellt (siehe Abbildung 113 links). Eine andere Möglichkeit zur Erklärung dieses Effekts wäre, dass eine Vergrößerung des Lochdurchmessers auch eine Vergrößerung der von der Lastumlagerung beeinflussten Bereiche zur Folge hat. Danach beruht die Abhängigkeit der aufnehmbaren Spannung am Lochrand vom Lochdurchmesser zumindest zum Teil auch auf dem size-effect. (siehe Abbildung 113 rechts).

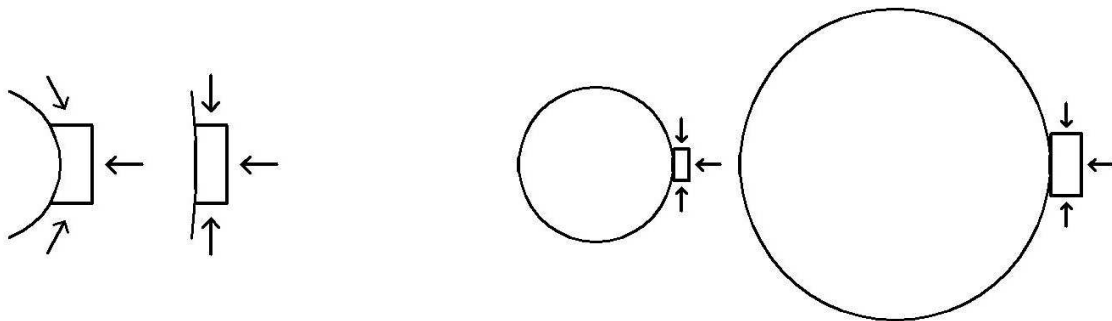


Abbildung 113: Möglichkeiten zur Erklärung der Abhängigkeit der aufnehmbaren Spannung am Hohlraumrand vom Lochdurchmesser

Links: Beeinflussung des Spannungszustands durch Einsperrung (in Abhängigkeit der Krümmung)

Rechts: Änderung der Größe des von Lastumlagerung betroffenen Bereichs (size-effect)

Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass das Versagen von Hohlräumen mit größeren Lochdurchmessern durch eine dreiteilige Bruchkurve (siehe Kapitel 4.3) beschrieben werden kann, bei welcher die Gesteinsfestigkeit nahe von Hohlräumen deutlich geringer angesetzt wird als in einiger Entfernung vom Hohlraum. Bei weniger sprödem Material wie Sandstein, ist der Unterschied zwischen Bereichen geringen Seitendrucks und hohen Seitendrucks dabei

geringer anzusetzen als bei sprödem Material wie Marmor. In Abbildung 114 wurde angedeutet, wie die dreiteiligen Bruchkurven für Marmor und Sandstein aussehen könnten. Das Verhältnis der Druckfestigkeit zur Spannung, bei welcher erste Rissbildungen auftreten, wurde aufgrund der Laborversuche festgelegt (siehe Abbildung 90 und 91). Die Spröbruchgrenze ist als Hauptspannungsverhältnis σ_1/σ_3 definiert. Für sehr heterogenes Gebirge kann diese weniger als 10, bei sehr homogenem Material bis zu 35 betragen (Diederichs 2007, Kaiser 2008). Da es sich beim Marmor um ein sehr homogenes Material handelt, das anfälliger auf Spröbruchversagen ist als der Sandstein, wurde die Spröbruchgrenze beim Marmor wesentlich steiler angesetzt.

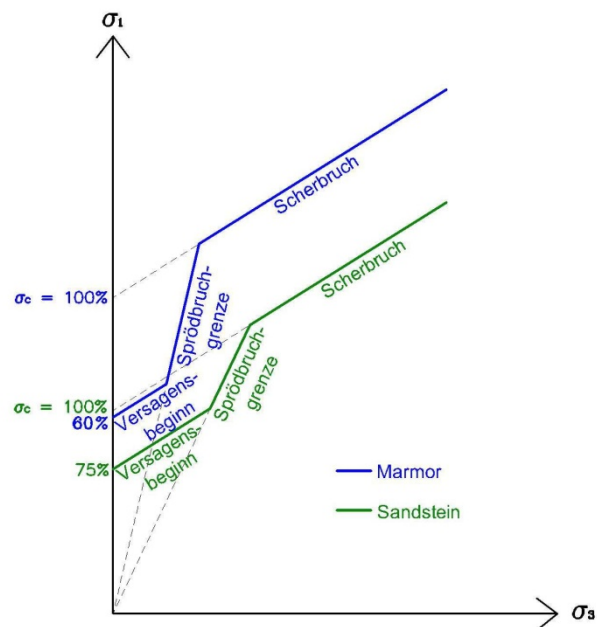


Abbildung 114: Möglicher Verlauf einer dreiteiligen Bruchkurve für die Materialien Marmor und Sandstein

8.3. Vergleich mit numerischen Berechnungen

Der Vergleich der Ergebnisse der Laborversuche und der numerischen Berechnungen zeigt, dass das Rissbild in beiden Fällen ähnlich ist. Sowohl die Laborversuche als auch die numerischen Untersuchungen mittels FLAC^{3D} zeigen zuerst vertikale Zugbrüche in der Firste und Sohle. Ausgehend von plastischen Zonen in den Ulmen (erste Rissbildungen) bilden sich bei Belastungssteigerung tiefgreifende Scherzonen aus, die den Prüfkörper diagonal durchkreuzen. Nach

Beginn der Ausbildung der Scherbrüche schließen sich die Zugrisse in Sohle und Firste.

In Abbildung 115 werden die maximalen Hauptdehnungen des Prüfkörpers M1, an denen am besten die Rissbildungen erkannt werden können, den plastischen Zonen aus der numerischen Berechnung gegenübergestellt. Dies soll zum qualitativen Vergleich des Rissbildes dienen.

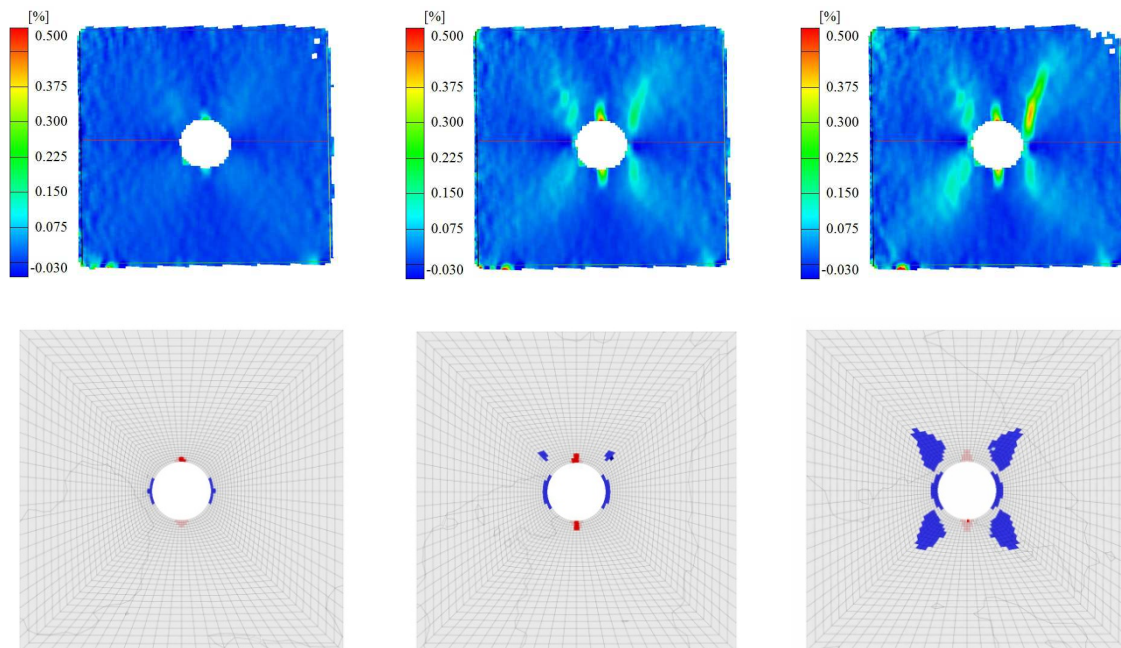


Abbildung 115: Vergleich der Rissbildung des Prüfkörpers M1 während des Laborversuchs mit den numerischen Berechnungen

Oben: Maximale Hauptdehnungen im Prüfkörper M1 während des Druckversuchs

Unten: Berechnung der plastischen Zonen im Prüfkörper M1 mit $FLAC^{3D}$ unter Verwendung des Mohr-Coulombschen Bruchkriteriums

Der tatsächliche Zeitpunkt, ab dem Plastifizierungen auftreten, ist dabei schwer zu ermitteln. Betrachtet man z. B. den Prüfkörper M6, so waren Zugzonen ab ca. 300 kN sichtbar (siehe Kapitel 6.2.3.2). Das entspricht im Prüfkörper, außerhalb des Einflussbereichs des Hohlrums, einer Spannung von 10 N/mm^2 . Aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm ist abzuleiten, dass zu diesem Zeitpunkt die Differenz der vertikalen Verschiebung des Prüfkörpers $0,22 \text{ mm}$ beträgt. Dies entspricht ungefähr den Ergebnissen der numerischen Berechnungen. Eine Belastung von 300 kN ergibt außerdem nach der Formel von Kirsch (1898) eine Zugspannung an der Firste von 10 N/mm^2 . Dies entspricht auch ungefähr dem durch die Triaxialversuche ermittelten Wert der Zugfestigkeit. Beim Prüfkörper M1

traten erste Plastifizierungen bei einer vertikalen Verschiebung von 0,17 mm auf und beim Prüfkörper M6 bei 0,18 mm (siehe Kapitel 6.2.3.2), dies entspricht ebenfalls den numerischen Berechnungen. Beim Prüfkörper M13 traten erste Plastifizierungen bei 0,05 mm auf. Wie aus dem Spannungs-Verschiebungsdiagramm des Prüfkörpers M13 ersichtlich ist, verformte sich dieser Prüfkörper allerdings sehr unregelmäßig. Aufgrund dieser unregelmäßigen Verformung ist es hier schon zu einem deutlich früheren Zeitpunkt zum Überschreiten der Maximalspannung gekommen.

Betrachtet man die Maximalspannung an den Ulmen aus der Berechnung nach Mohr-Coulomb, so fällt auf, dass diese bei einem Lochdurchmesser von 5 cm ca. 50 N/mm² und bei einem Lochdurchmesser von 10 cm ca. 47 N/mm² beträgt, was eine Abhängigkeit der aufnehmbaren Tangentialspannung vom Lochdurchmesser andeutet. Es handelt sich dabei jedoch um sehr geringe Unterschiede, welche bei der Berechnung auch durch gewählte Parameter wie der Netzfeinheit beeinflusst werden. Beide Werte liegen allerdings weit über der ermittelten Maximalspannung in den Versuchen. Es wäre daher in weiteren numerischen Berechnungen der Unterschied bei Verwendung der dreiteiligen Bruchkurve nach Kaiser und Kim (2008) zu untersuchen.

Dazu ist auch anzumerken, dass die zylindrischen Prüfkörper, anhand derer die Materialparameter bestimmt wurden, im Gegensatz zu den Scheiben mit Loch eine sehr homogene Struktur mit keinen Störungszonen aufwiesen. So wurde eine einaxiale Druckfestigkeit von ca. 30 N/mm² ermittelt. Vergleicht man diese Werte mit ebenfalls an St. Margarethener Kalksandstein durchgeführten einaxialen Druckversuchen, so ist zu sehen, dass dort geringere Werte zwischen 16 N/mm² und 21 N/mm² ermittelt wurden (Nunez Arranz 2001, Peyerl 2006). Es ist daher möglich, dass auch die Materialparameter, welche die Grundlage für die numerischen Berechnungen bildeten, überschätzt wurden.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Abplatzungen an den Tunnelwänden zufolge Sprödbruchverhaltens des Gebirges können den Vortrieb behindern und aufwendige Sicherungs- oder Sanierungsmaßnahmen notwendig machen.

Tiefliegende Hohlräume unter richtungsbetonter Druckbeanspruchung versagen, indem sich anfangs Zugrisse an Sohle und Firste ausbilden. In weiterer Folge schließen sich diese Zugrisse und es kommt zu Sprödbrüchen an der Hohlraumwand und in den Ulmen bilden sich v-förmige Bruchkörper. Dann stabilisiert sich die Sprödbruchzone und es kommt zur Bildung von tiefgreifenden Scherbrüchen (Feder 1977). Kaiser und Kim (2008) schlagen vor, dass dieser Versagensmechanismus besser mit einer dreiteiligen Bruchkurve (siehe Kapitel 4.3) beschrieben werden kann als mit herkömmlichen Bruchkriterien nach Mohr-Coulomb oder Hoek & Brown. Die Verwendung des Mohr-Coulomb Kriteriums würde in Bereichen geringen Seitendrucks (nahe des Hohlraums) die Festigkeit des Gebirges überschätzen und in Bereichen hohen Seitendrucks (in einiger Entfernung zum Hohlraum) unterschätzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einaxiale Druckversuche an gelochten Scheiben ausgeführt. Zweck der Versuche war die Ermittlung des Bruchverhaltens von weniger spröden Gesteinen in der Umgebung des Hohlraums. Es wurden Versuche an 43 Sandstein- und 6 Marmorquadern mit verschiedenen Abmessungen (Kantenlängen von 15 cm bis 90 cm) und Lochdurchmessern (von 2,5 cm bis 30 cm) durchgeführt. Für die Aufzeichnung der Verschiebungen wurde das optische Messsystem ARAMIS 3D (GOM 2012) eingesetzt. Es ermöglichte eine zerstörungsfreie, vollflächige Verschiebungsmessung an der Oberfläche der Prüfkörper und hatte den Vorteil, dass keine zusätzlichen Messsysteme angebracht werden mussten. Bei einigen Versuchsreihen wurde zusätzlich zur optischen Verschiebungsmessung ein akustisches Messsystem eingesetzt, um weitere Informationen über die Entstehung der Risse zu bekommen

In Voruntersuchungen wurden die besten Lasteinleitungsbedingungen der Prüfkörper während dieser Versuche untersucht und dabei festgestellt, dass die Einlage einer Teflonfolie bzw. einer Aluminiumplatte zwischen den Prüfkörper und den Druckplatten der Presse nicht zielführend ist. Bei Einlage einer Teflonfolie gleiten die Prüfkörper aufgrund der geringen Reibung an den

Lasteinleitungsflächen weg und versagen, wie schon von Peng und Johnson (1972) beschrieben, durch vertikale Zugrisse. Durch Einlage einer Aluminiumplatte ergibt sich keine charakteristische Änderung im Rissbild im Vergleich zu den Versuchen mit direkter Lasteinleitung über die Druckplatten der Presse.

Im Zuge der einaxialen Druckversuche an gelochten Scheiben konnte ein charakteristisches Rissbild beobachtet werden. Anfangs ausgebildete Zugrisse in Sohle und Firste schlossen sich infolge der Bildung von Scherbrüchen. Mit freiem Auge sichtbare Abplatzungen an den Ulmen fanden bei den Sandsteinquadern, abgesehen von Ausnahmefällen, erst bei Erreichen der Gesamtbruchlast statt. Bei den Marmorquadern waren bei drei der sechs Prüfkörper schalenförmige Abplatzungen an den Ulmen vor Erreichen der Maximallast mit freiem Auge sichtbar. Wie auch das schlagartige Versagen von Marmor bei Erreichen der Bruchlast zeigt, ist Marmor anfälliger für Spröbruchversagen.

Durch die Beziehung zwischen der Änderung der Ulmenabstände mittels ARAMIS und den Tangentialspannungen am Lochrand kann jedoch festgestellt werden, dass es schon weit vor den ersten mit freiem Auge sichtbaren Brüchen zu plastischen Deformationen und somit Mikrorissbildungen kommt. Die dabei auftretenden Tangentialspannungen am Lochrand liegen beim Sandstein bis zu einem Lochdurchmesser von kleiner 10 cm durchwegs über der einaxialen Druckfestigkeit, nehmen bei größeren Lochdurchmessern jedoch ab und betragen bei einem Lochdurchmesser von 20 cm nur mehr 75% der einaxialen Druckfestigkeit. Bei den Marmorprüfkörpern ist der gleiche Trend beobachtbar, wobei das Verhältnis der aufnehmbaren Spannung am Lochrand zur einaxialen Druckfestigkeit unterhalb jenem der Sandsteinprüfkörper liegt.

Bei den numerischen Berechnungen mittels FLAC^{3D} zeigt sich bei Verwendung eines Mohr-Coulomb-Modells, dass die aufnehmbaren Spannungen am Lochrand weit höher sind als die aus den Versuchen ermittelten Maximalspannungen.

Betrachtet man die vorher diskutierten Ergebnisse aus den Laborversuchen so kann man feststellen, dass ab größeren Lochdurchmessern die aufnehmbare Tangentialspannung am Lochrand unterhalb der Druckfestigkeit liegt. Dies spricht für eine Verwendung der dreiteiligen Bruchkurve, bei welcher die Gesteinsfestigkeit nahe von Hohlräumen (Bereiche geringen Seitendrucks) deutlich geringer angesetzt wird als in einiger Entfernung zum Hohlraum. Während

die Verwendung eines Mohr-Coulomb Kriteriums zu einer Überschätzung der Gebirgsfestigkeit nahe des Hohlraums führen würde berücksichtigt die dreiteilige Bruchkurve den Einfluss des Spröbruchversagens und ermöglicht somit eine realitätsgetreue Abbildung des Versagens,

Bei weniger spröden Materialien wie Sandstein ist diese Abhängigkeit vom Seitendruck dabei jedoch weit weniger zu beobachten als bei spröden Materialien wie Marmor, das heißt, die dreiteilige Bruchkurve eignet sich vor allem zur Beschreibung des Versagens von spröden Materialien.

10. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Beschädigung der Ausbruchssicherung durch Bergschläge im Gotthard Basistunnel (Conorzio TAT 2005)	3
Abbildung 2: Versagenszustände eines Hohlraums bei anisotroper Belastung (aus: Feder 1977) ..	4
Abbildung 3: Spannungsfeld im linear-elastischen Untergrund bei isotropen Primärspannungsverhältnissen (aus: Fillibeck 2009).....	5
Abbildung 4: Berechnung der Spannung um einen Kreisquerschnitt nach Kirsch 1898 (aus: Fairhurst und Carranza-Torres 2002)	6
Abbildung 5: Arbeitslinien (Spannungs- Dehnungs- Diagramme) und Versagensbild der Prüfkörper a) Spaltbruch bei einaxialem Druckversuch, b) Scherbruch im Triaxialversuch, c) Gefügebruch im Triaxialversuch mit hoher Querpressung (aus: Schubert 1980).....	8
Abbildung 6: Verformungen von Prüfkörpern bei unterschiedlichen Randbedingungen (aus: Peng und Johnson 1972).....	10
Abbildung 7: Spannungen im Prüfkörper in Abhängigkeit von den Lasteinleitungsbedingungen (aus: van Mier et al. 1997).....	10
Abbildung 8: Konturplot der Horizontalverschiebungen (oben) sowie Horizontalverschiebungen am linken (orange) und rechten (blau) Rand des Prüfkörpers in Abhängigkeit von der Lasteinleitung	12
Abbildung 9: Spannungs- Dehnungskurvenverläufe im einaxialen Druckversuch in Abhängigkeit von der Prüfkörpergröße (aus: Hudson und Harrison 1997).....	13
Abbildung 10: Auswirkung der Prüfkörperform auf den Verlauf der Spannungs- Dehnungskurve im einaxialen Druckversuch (aus: Hudson und Harrison 1997).....	14
Abbildung 11: Brüche rund um einen kreisförmigen Hohlraum im Druckversuch (aus: Martin 1997)	16
Abbildung 12: Verhältnis der Tangentialspannungen am Lochrand bei Brucherscheinungen an den Ulmen zur Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser (aus: Martin 1997). 17	
Abbildung 13: Versagenszustände eines kreisförmigen Hohlraums im biaxialen Druckversuch a) Spaltbrüche an der Ulmen b) Beginn von Scherbrüchen c) Scherbrüche links und rechts der Sohle d) Zustand am Versuchsende (aus: Schubert 1980).....	18
Abbildung 14: Prüfmaschine für Hohlzylinder aus Berea Sandstein und Indiana Kalkstein (aus: Ewy und Cook,1990).....	19
Abbildung 15: Typisches Versagensbild eines Hohlraums in Barea Sandstein. Die Risse an den Ulmen sind gut erkennbar (aus: Ewy und Cook 1990).....	19
Abbildung 16: Primärer Spannungszustand des Testtunnels der AECL in Kanada im Lac du Bonnet Granit (aus: Martin 1997)	21
Abbildung 17: AECL Testtunnel in Lac du Bonnet Granit mit Darstellung der Hauptspannungen (Horizontalspannung größer als Vertikalspannung) (aus: Martin 1997)	22
Abbildung 18: Stufe 1 – Erste Rissbildungen (aus: Martin 1997)	22
Abbildung 19: Stufe 2 – Rissentwicklung (aus: Martin 1997).....	23
Abbildung 20: Stufe 3 – Abplatzungen (aus: Martin 1997)	23
Abbildung 21: Stufe 4 – Stabilisierung (aus: Martin 1997).....	23

Abbildung 22: Mohr-Coulombsches Bruchkriterium (aus: Schubert 2007).....	25
Abbildung 23: Hoek & Brown Kriterium im $\sigma_1 - \sigma_3$ Diagramm (aus: Schubert 2007).....	26
Abbildung 24: Übergang von intaktem Material zu stark geklüftetem Fels (aus: Hoek 1983).....	27
Abbildung 25: links: S-förmige Bruchkurve mit folgenden Versagensbereichen: Beginn von Rissbildungen, Spröbruchversagen, Scherversagen; rechts: dreiteilige Bruchumhüllende zur Berücksichtigung von sprödem Versagen bei geringem Seitendruck (aus: Kaiser und Kim 2008).....	28
Abbildung 26: Versuchsaufbau der Versuchsreihe S bis L im Schenck Prüfrahmen	30
Abbildung 27: Versuchsaufbau der Versuchsreihe XL im großen Prüfrahmen	31
Abbildung 28: ARAMIS-Messsystem, Hochauflösende Kameras mit zugehörigem Hochleistungsrechner (GOM 2012).....	32
Abbildung 29: Oberfläche des Prüfkörpers L1 vor und nach Vorbehandlung (Anstrich mit Sumpfkalk und Farbsprühmuster aus schwarzem Lack).....	33
Abbildung 30: Sensoren zur Schallemissionsanalyse an den Seiten des Prüfkörpers L3 (Links: Ansicht von hinten; Rechts: Ansicht von vorne).....	34
Abbildung 31: Sensoren zur Schallemissionsanalyse an der Rückseite des Prüfkörpers XL3	34
Abbildung 32: Sandsteinprüfkörper	40
Abbildung 33: Sandstein und Marmorzylinder vor Versuchsbeginn	42
Abbildung 34: Foto der an der TU Graz verwendeten Triaxialmaschine (aus: Schubert 2007)	43
Abbildung 35: Prüfkörper der Versuchsreihe S.....	44
Abbildung 36: Prüfkörper der Versuchsreihe M	45
Abbildung 37: Prüfkörper der Versuchsreihe L	45
Abbildung 38: Prüfkörper der Versuchsreihe XL.....	46
Abbildung 39: Prüfkörper der Versuchsreihe M-M.....	46
Abbildung 40: Marmor und Sandsteinzylinder nach Versuchsdurchführung	49
Abbildung 41: Versuchsaufbau mit Zwischenlagen	50
Abbildung 42: Schnitte durch den Prüfkörper, um die Verschiebung in X-Richtung (horizontal) darzustellen	51
Abbildung 43: Rissbild ohne Zwischenlage.....	51
Abbildung 44: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M7	52
Abbildung 45: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M13.....	52
Abbildung 46: Rissbild bei Verwendung einer Teflonzwischenlage.....	53
Abbildung 47: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M4	54
Abbildung 48: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M9.....	54
Abbildung 49: Entwicklung von Zugrissen Prüfkörper M9	54
Abbildung 50: Rissbild bei Verwendung einer Aluminiumzwischenlage	55
Abbildung 51: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M2.....	55
Abbildung 52: Verschiebung in X-Richtung des Prüfkörpers M12.....	56

Abbildung 53: Ausbauchung (X-Verschiebung) der Prüfkörper je nach Lasteinleitungsbedingungen bei der Hälfte und $\frac{3}{4}$ der Bruchlast.....	57
Abbildung 54: 3 Schnitte im Prüfkörper zur Aufzeichnung der Vertikalverschiebungen, sowie Darstellung der Punkte zur Aufzeichnung der Ulmenabstände	62
Abbildung 55: Prüfkörper S4 nach Versuchsende	63
Abbildung 56: Prüfkörper S4;.....	63
Abbildung 57: Rissentwicklung im Prüfkörper S4 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	64
Abbildung 58: Prüfkörper S9 nach Versuchsende	64
Abbildung 59: Prüfkörper S9;.....	65
Abbildung 60: Rissentwicklung im Prüfkörper S9 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	66
Abbildung 61: Prüfkörper S12 nach Versuchsende	66
Abbildung 62: Prüfkörper S12;.....	66
Abbildung 63: Rissentwicklung im Prüfkörper S12 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	67
Abbildung 64: Prüfkörper M1 nach Versuchsende.....	68
Abbildung 65: Prüfkörper M1;.....	68
Abbildung 66: Rissentwicklung im Prüfkörper M1 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	69
Abbildung 67: Prüfkörper M6 nach Versuchsende.....	69
Abbildung 68: Prüfkörper M6;.....	70
Abbildung 69: Rissentwicklung im Prüfkörper M6 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	70
Abbildung 70: Prüfkörper M13 nach Versuchsende.....	71
Abbildung 71: Prüfkörper M13;.....	71
Abbildung 72: Rissentwicklung im Prüfkörper M13 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	72
Abbildung 73: Prüfkörper L2 nach Versuchsende; rot: Sichtbare Brüche nach Versuchsende	73
Abbildung 74: Prüfkörper L2;.....	73
Abbildung 75: Rissentwicklung im Prüfkörper L2 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	74
Abbildung 76: Schallemissionsanalyse des Prüfkörpers L2	75
Abbildung 77: Prüfkörper L6 nach Versuchsende; rot: Sichtbare Brüche nach Versuchsende	76
Abbildung 78: Prüfkörper L6;.....	76
Abbildung 79: Rissentwicklung im Prüfkörper L6 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	77
Abbildung 80: Schallemissionsanalyse des Prüfkörpers L6	77
Abbildung 81: Prüfkörper M-M3 nach Versuchsende	79
Abbildung 82: Prüfkörper M-M3;	79

Abbildung 83: Rissentwicklung im Prüfkörper M-M3 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	80
Abbildung 84: Abplatzungen an den Lochinnenseiten des Prüfkörpers M-M3: links bei 1440 kN; rechts bei 1650 kN. Die rote Umrandung zeigt die erkennbaren Abplatzungen.....	81
Abbildung 85: Prüfkörper M-M6 nach Versuchsende	81
Abbildung 86: Prüfkörper M-M6;	81
Abbildung 87: Rissentwicklung im Prüfkörper M-M6 dargestellt anhand der maximalen Hauptdehnungen.....	82
Abbildung 88: Horizontale Verschiebung der Ulmen in Abhängigkeit von der Kraft (Prüfkörper L1)	85
Abbildung 89: Änderung der Ulmenabstände in Abhängigkeit von der Kraft (Prüfkörper L1)	85
Abbildung 90: Verhältnis von Tangentialspannung am Lochrand bei Beginn plastischer Deformation der Ulmen zu einaxialer Druckfestigkeit des Prüfkörpers (Druckspannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalspannung) in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser bei Sandstein	86
Abbildung 91: Verhältnis von Tangentialspannung am Lochrand bei Beginn plastischer Deformation der Ulmen zu einaxialer Druckfestigkeit des Prüfkörpers (Druckspannung außerhalb des Einflussbereichs des Hohlraums unter Maximalspannung) in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser bei Marmor.....	87
Abbildung 92: Modell von Prüfkörper und Pressenplatten der Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm in FLAC ^{3D} mit vertikaler Belastung	88
Abbildung 93: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm: Konturplot der Horizontalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,75 mm	89
Abbildung 94: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm: Konturplot der Vertikalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,75 mm	90
Abbildung 95: Darstellung des horizontalen Schnittes in der Mitte des Prüfkörpers und der Punkte in denen die Spannungen aufgezeichnet wurden	90
Abbildung 96: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm: Vertikalspannungen σ_z kurz vor Erreichen der Druckfestigkeit der Ulmen bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,20 mm.....	91
Abbildung 97: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 5 cm: Verlauf der Vertikalspannungen in gekennzeichneten Punkten in Abhängigkeit der aufgetragenen Vertikalverschiebung .	92
Abbildung 98: Prüfkörper M mit Lochdurchmesser 5 cm: Plastische Zonen in FLAC ^{3D} zur Darstellung der Rissbildung bei fortschreitender aufgetragener Vertikalverschiebung.	93
Abbildung 99: Modell von Prüfkörper und Pressenplatten der Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm in FLAC ^{3D} mit vertikaler Belastung	94
Abbildung 100: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Konturplot der Horizontalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,5 mm	95
Abbildung 101: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Konturplot der Vertikalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,5 mm	95

Abbildung 102: Darstellung des Schnittes in der Mitte des Prüfkörpers und Punkte in denen die Spannungen aufgezeichnet werden.....	96
Abbildung 103: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Vertikalspannungen σ_z kurz vor Erreichen der Druckfestigkeit der Ulmen bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,20 mm.....	97
Abbildung 104: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Verlauf der Vertikalspannungen in gekennzeichneten Punkten in Abhängigkeit der aufgetragenen Vertikalverschiebung .	98
Abbildung 105: Prüfkörper M mit Lochdurchmesser 7,5 cm: Plastische Zonen in FLAC ^{3D} zur Darstellung der Rissbildung bei fortschreitender aufgetragener Vertikalverschiebung.	99
Abbildung 106: Modell von Prüfkörper und Pressenplatten der Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm in FLAC ^{3D} mit vertikaler Belastung	100
Abbildung 107: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm: Konturplot der Horizontalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,5 mm	101
Abbildung 108: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm: Konturplot der Vertikalverschiebungen nach Versagen des gesamten Prüfkörpers bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,5 mm	101
Abbildung 109: Darstellung des Schnittes in der Mitte des Prüfkörpers und Punkte in denen die Spannungen aufgezeichnet werden.....	102
Abbildung 110: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm: Vertikalspannungen σ_z kurz vor Erreichen der Druckfestigkeit der Ulmen bei einer aufgetragenen Vertikalverschiebung von 0,20 mm.....	103
Abbildung 111: Versuchsreihe M mit Lochdurchmesser 10 cm: Verlauf der Vertikalspannungen in gekennzeichneten Punkten in Abhängigkeit der aufgetragenen Vertikalverschiebung	104
Abbildung 112: Prüfkörper M mit Lochdurchmesser 10 cm: Plastische Zonen in FLAC ^{3D} zur Darstellung der Rissbildung bei fortschreitender aufgetragener Vertikalverschiebung	105
Abbildung 113: Möglichkeiten zur Erklärung der Abhängigkeit der aufnehmbaren Spannung am Hohlraumrand vom Lochdurchmesser	109
Abbildung 114: Möglicher Verlauf einer dreiteiligen Bruchkurve für die Materialien Marmor und Sandstein.....	110
Abbildung 115: Vergleich der Rissbildung des Prüfkörpers M1 während des Laborversuchs mit den numerischen Berechnungen	111

11. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Technische und physikalische Kennwerte von St.Margarethener Kalksandstein (aus: Rohatsch 1997)	35
Tabelle 2: Technische und physikalische Kennwerte von Laaser Marmor (Lasa Marmo 2012)	36
Tabelle 3: Übersicht der Sandsteinzylinder – Versuchsreihe Z	37
Tabelle 4: Übersicht der Sandsteinquader – Versuchsreihe S	37
Tabelle 5: Übersicht der Sandsteinquader – Versuchsreihe M.....	38
Tabelle 6: Übersicht der Sandsteinquader – Versuchsreihe L.....	38
Tabelle 7: Übersicht der Sandsteinquader – Versuchsreihe XL	39
Tabelle 8: Übersicht der Marmorzylinder–Versuchsreihe MZ.....	40
Tabelle 9: Übersicht der Marmorquader –Versuchsreihe M-M	41
Tabelle 10: Prüfkörper der Versuchsreihe Z	41
Tabelle 11: Prüfkörper der Versuchsreihe MZ	41
Tabelle 12: Prüfkörper Triaxialversuche Sandstein	43
Tabelle 13: Prüfkörper Triaxialversuche Marmor	43
Tabelle 14: Prüfkörper der Versuchsreihe S	44
Tabelle 15: Prüfkörper der Versuchsreihe M	45
Tabelle 16: Prüfkörper der Versuchsreihe L	45
Tabelle 17: Prüfkörper der Versuchsreihe XL	46
Tabelle 18: Prüfkörper der Versuchsreihe M-M	46
Tabelle 19: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinzylinder – Versuchsreihe Z... ..	48
Tabelle 20: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Marmorzylinder – Versuchsreihe MZ	48
Tabelle 21: Ergebnisse der Triaxialversuche – Sandsteinzylinder	49
Tabelle 22: Ergebnisse der Triaxialversuche - Marmorzylinder.....	49
Tabelle 23: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinquader – Versuchsreihe S.... ..	58
Tabelle 24: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinquader – Versuchsreihe M	59
Tabelle 25: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinquader – Versuchsreihe L	60
Tabelle 26: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Sandsteinquader – Versuchsreihe XL.. ..	60
Tabelle 27: Übersicht der Ergebnisse der Druckversuche Marmorquader – Versuchsreihe M-M	61
Tabelle 28: Gemittelte Materialparameter Sandstein für die numerische Berechnung	88

12. LITERATURVERZEICHNIS

- BAUCH, E.: *Trennbruchversagen von Festgesteinen unter triaxialen Spannungsbedingungen*. Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (2007).
- BURTSCHER, S.L.: *Size Effect von Beton und Sandstein unter Druckbeanspruchung*. Dissertation Technische Universität Wien (2002).
- DIEDERICHS, M.S.: *The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling*. Canadian Geotechnics Journal 44: 1082-1116 (2007)
- EWY, R.T., COOK, N.G.W.: *Deformation and Fracture Around Cylindrical Openings in Rock - I. Observations and Analysis of Deformations*. Int. J. Rock Mech. & Min.Sci. 27. S. 387 – 407 (1990)
- EWY, R.T., COOK, N.G.W.: *Deformation and Fracture Around Cylindrical Openings in Rock - II. Initiation, Growth and Interaction of Fractures*. Int. J. Rock Mech. & Min.Sci. 27. S. 409 – 427 (1990)
- FAIRHURST, C., CARRANZA-TORRES, C.: *Closing the circle, Some comments on design procedures for tunnel supports in rock*. University of Minnesota 50th Annual Geotechnical Conference (Februar 2002), pp. 21-84 J. F. Labuz and J. G. Bentler Eds. Minneapolis: University of Minnesota (2002).
- FEDER, G.: *Zum Stabilitätsnachweis für Hohlräume in festem Gebirge bei richtungsbetontem Primärdruck*. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte Jahrgang 122, Heft 4, 131 – 140 (1977).
- FILLIBECK, J.: *Studienunterlagen zur Vorlesung Tunnelbau*. Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau. Technische Universität München (2012).
- GOM: *Gesellschaft für Optische Messtechnik, ARAMIS Benutzerhandbuch – Software, ARAMIS v6.3 und höher* (2011)
- GOM: *Gesellschaft für Optische Messtechnik, ARAMIS Software*, <http://www.gom.com/de/3d-software/aramis-software.html>, 10.12.2012
- HOEK, E.: *Brittle Failure of Rock*. Chapter 4 in Rock Mechanics and Engineering Practice, Edited by K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz, London: J. Wiley, pp. 99 to 124 (1968).
- HOEK, E.: *Strenght of jointed rock masses*. Twenty-third Rankine Lecture, presented to the British Geological Society in London on February 23, 1983 and published in *Géotechnique, Vol. 23, No. 3, 1983, pp. 187-223* (1983).
- HUDSON, J.A., HARRISON, J.P.: *Engineering Rock Mechanics, An Introduction to the Principles*. Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London UK (1997).

- ITASCA: *FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) User's Guide*, Version 4.0. Itasca Consulting Group, 2009.
- KAISER, P.K., DIEDERICHS, M.S., MARTIN, C.D., SHARP, J., STEINER, W.: *Underground Works in hard rock tunneling and mining*. GeoEng2000, Technomic Publ. Co., pp. 841-926 (2000).
- KAISER, P.K., KIM, B.-H: *Rock Mechanics Challenges in Underground Construction and Mining*. In: Y. Potvin, J. Carter, A. Dyskin und R. Jeffery (Editors), First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, ACG, Perth, Australia, 23–38 (2008)
- LANG, H.-J., HUDER, J., AMANN, P., PUZRIN, A.M.: *Bodenmechanik und Grundbau*. Springer-Verlag (2011).
- LASA MARMO: *Die technischen Daten des Laaser Marmor*, <http://www.lasamarmo.it/de/produkt-eigenschaften/technischen-daten.html>, 03.11.2012
- MARTIN, C.D., READ, R.S., MARTINO, J.B.: *Observations of brittle failure around a circular test tunnel*. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 34(7):1065-1073 (1997).
- MARTIN, C.D.: *Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength*. Canadian Geotechnical J., 34(5): 698-725 (1997).
- NUNEZ ARRANZ, S.: *Uniaxial compression test on sandstone prisms with circular openings*. Diplomarbeit Technische Universität Wien (2011).
- PENG, S., JOHNSON, A.M.: *Crack growth and faulting in cylindrical specimens of chelmsford granite*. Int. J. Rock. Mech. Sci. Vol. 9, pp. 37 – 86, Pergamon Press (1972).
- PEYERL, M.: *Druckfestigkeit von Natursteinen in Abhängigkeit von Belastungsgeschwindigkeit und Prüfkörpergeometrie*. Diplomarbeit Technische Universität Wien (2006).
- POISEL, R.: *Ein Beitrag zur Mechanik des Gebirges um einen tiefliegenden Hohlraum im Post-Failure-Bereich*. Rock Mechanics 12, 61 – 76 (1979).
- POISEL, R.: *Ein Beitrag zur Wirkungsweise von Systemankerungen bei tiefliegenden Gebirgshohlraumbauten*. Rock Mechanics, Suppl. 11, 173 – 186 (1981).
- ROHATSCH, A.: *Gesteinskunde in der Denkmalpflege unter besonderer Berücksichtigung der jungtertiären Naturwerksteine von Wien, Niederösterreich und dem Bruggenland*. Habilitationsschrift Universität für Bodenkultur Wien (1997).
- SCHUBERT, W.: *Zum Einfluss der Ausbruchsform und der Bauweise auf die Tragwirkung des Gebirges bei tiefliegenden Hohlraumbauwerken*. Dissertation an der Montanuniversität Leoben (1980).

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

STEINER W., KAISER, P.K., SPAUN, G.: *Spröbruch in wenig festem Fels als Auslöser von Quellvorgängen: Beobachtungen und Analysen*. Geomechanics and Tunneling, Volume 3, Issue 5, Pages 583 – 596 (2010).

VAN MIER, J.G.M., SHAH, S.P., ARNAUD, M., BALAYSSAC, J.P., BASCOUL, A., CHOI, S., DASENBROCK, D., FERRARA, G., FRENCH, C., GOBBI, M.E., KARIHALOO, B.L., KÖNIG, G., KOTSOVOS, M.D, LABUZ, J., LANGE-KORNBÄK, D., MARKESIT, G., PAVLOVIC, M.N., SIMSCH, G., THIENEL, K-C., TURATSINZE, A., ULMER, M., VAN GEEL, H.J.G.M., VAN VLIET, M.R.A., ZISSOPOULOS, D.: *Strain-softening of concrete in uniaxial compression*. Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 30, May 1997, pp. 195 - 209 (1997).