

---

**Untersuchungen zur Frage des Verhaltens von Gesteinsproben  
bei Druckbeanspruchung unter Bedingungen eingeschränkter  
Querverformung**

---

Florian Georg Nurschinger

14/06/2017



---

Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft  
Department Mineral Resources Engineering  
Montanuniversität Leoben

A-8700 LEOBEN, Franz Josef Straße 18  
Tel.Nr.: +43 3842-402-2001  
Fax: +43 3842-402-2002  
bergbau@unileoben.ac.at

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

---

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

---

## Danksagung

---

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken die mir bei der Anfertigung dieser Diplomarbeit geholfen haben.

Mein Dank gilt zuallererst Herrn Professor Wagner für die Betreuung der Arbeit. Durch Denkanstöße hat er mich zu höheren Leistungen angetrieben. Durch seine konstruktive Kritik hat er mich immer wieder neu motiviert und er nahm sich immer Zeit um mir in ausführlichen Gesprächen zur Seite zu stehen.

Auch meinem Zweitbetreuer Dipl.Ing. Tobias Ladinig danke ich für die fachlichen Diskussionen und Gespräche.

Außerdem möchte ich mich bei den vielen Personen bedanken die mich bei den Versuchen unterstützt haben: Klaus Lackner bei der Probenvorbereitung, Markus Kirl bei der Versuchsdurchführung, Dipl.Ing. Raimund Fritz und Christian Stöckl, die die Zugprüfungen am Draht durchführten, Ing. Jörg Krainz für die vielen Fachgespräche und die generelle Unterstützung im Labor und ganz besonders bei Sabine Feuchter die freundlicherweise die Herstellung der Dünnschliffe übernahm.

Bei meinen Eltern, meiner Familie und meinen Schwiegereltern bedanke ich mich für ihre großartige Unterstützung.

Zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Frau Susanna bedanken, ohne die ich das nicht geschafft hätte.

---

## Abstract

---

Laboratory tests in rock mechanics, like the uniaxial compressive strength test and the triaxial test are important techniques for determining the properties of rock and have been subject of research for some time. By recreating the conditions prevalent in nature for laboratory tests, these methods attempt to predict the behaviour of rock when approaching failure. For a better understanding of the failure process it is important to recreate the actual conditions in rock as close to reality as possible. While the uniaxial stress state is actually prevalent in the sidewall of an excavation, certain differences between the triaxial stress situation in a rock mass and the laboratory test can be observed. Most testing methods rely on applying the confining pressure by means of externally applied forces. Contrasting this, the triaxial stress state in a rock mass is often the result of a three dimensional spatial restriction. In the thesis at hand, testing procedures have been reviewed and examined regarding their correctness in recreating the triaxial stress state. Special attention was paid to the means of application of the external forces on the specimen and to restrictions in the lateral direction.

The experimental part of the thesis included the development of a testing procedure to emulate the triaxial stress state of an enclosed volume. Thereof conclusions can be drawn about the impact of restricted lateral expansion on different rocks. Lateral deformation of rock specimen has been restricted by pre-stressed wire of different spacing. By evaluating the measured data the effect of restricted lateral expansion on the maximum compressive strength and the lateral, as well as the volumetric deformation have been determined. Additionally, the stress path in the  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  diagram and the deformation work have been evaluated. By generating confining stresses of up to 6.0 MPa it was possible to calculate the  $m_i$ -Values of Sandstone and Granodiorite to 15 and 19 respectively.

---

## Zusammenfassung

---

Gebirgsmechanische Tests wie die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit oder der Triaxialversuch sind wichtige Methoden zur Bestimmung von Gesteinseigenschaften und seit langem Gegenstand von Untersuchungen. Anhand von Labortests, welche die in der Natur auftretenden Zusammenhänge nachbilden, entstehen Vorhersagen über das Verhalten von Gesteinen im Versagensfall. Zum besseren Verständnis des Bruchvorganges ist es wichtig, die Vorgänge in der Natur möglichst realitätsnah nachzubilden. Während am Hohlraumrand der Zustand der einaxialen Belastung tatsächlich gegeben ist, so finden sich deutliche Unterschiede beim Vergleich der Belastungsbedingungen von Laborversuch und triaxialer Belastung im Gebirge. Bei den meisten Prüfverfahren entsteht der Umschlingungsdruck durch eine Krafteinwirkung von außen. Im Gegensatz dazu ist der triaxiale Belastungszustand im Gebirge ein Resultat der räumlichen Einschränkung. In der vorliegenden Arbeit erfolgt eine Untersuchung verschiedener bestehender Prüfmethoden zur Bestimmung von Gesteinseigenschaften und eine Überprüfung der Korrektheit bezüglich der Abbildung der Wirklichkeit. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Art der Kraftübertragung und auf der Einschränkung der Querdehnung. Der praktische Teil der Arbeit umfasst die Entwicklung eines Prüfverfahrens, welches die triaxiale Belastung eines im Berg eingeschlossenen Volumens nachbilden soll. Daraus lassen sich Schlüsse über die Auswirkung der eingeschränkten Querdehnung auf verschiedene Gesteine ziehen. Dabei wurden Gesteinsproben mit einem Draht unter Vorspannung umwickelt und axial belastet. Mit Hilfe der aufgezeichneten Messwerte wurde der Einfluss der eingeschränkten Querdehnung auf die Druckfestigkeit, auf das Querdehnungsverhalten und auf die volumetrische Verformung ermittelt. Zusätzlich erfolgte die Ermittlung des Spannungspfads im  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Diagramm und ein Vergleich der Zerstörungsarbeit. Durch die Umschlingung der Proben mit Draht konnten Umschlingungsdrücke von bis zu 6,0 MPa generiert werden. Daraus war es möglich die  $m_i$ -Werte aus dem Hoek Brown Kriterium für den Sandstein mit 15 und für den Granodiorit mit 19 zu bestimmen.

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>I</b>
<b>Danksagung</b>	<b>II</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Bestehende Prüfverfahren - Stand der Technik</b>	<b>2</b>
2.1 Aktive Prüfverfahren . . . . .	2
2.1.1 Der konventionelle Triaxialtest . . . . .	3
2.1.2 University of Wisconsin, WI, USA (1999) . . . . .	4
2.1.3 Lavender 508, Northeastern University, Shanyang, China (2016)	5
2.1.4 Sandia true triaxial facilities, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA (1997) . . . . .	6
2.1.5 Department of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, Vereinigtes Königreich (1999) . . . . .	7
2.2 Reaktive Prüfverfahren . . . . .	8
2.2.1 Das "Plane strain test rig" der University of the Witwatersrand, Johannesburg, RSA(1995) . . . . .	8
2.2.2 Der "Biaxial frame" für plane strain Versuche der University of Minnesota Twin-Cities, Minneapolis, USA (2013) . . . . .	9
2.2.3 Mining Research Laboratory, Chamber of Mines of South Africa, Johannesburg, RSA (1973) . . . . .	10
2.2.4 University of California, Berkeley, CA, USA (1989) . . . . .	11
2.2.5 Stempeldruckversuch, Chamber of Mines of South Africa, Johannesburg, RSA (1970) . . . . .	12
2.2.6 Zusammenfassung Stand der Technik . . . . .	14
<b>3 Versuchsaufbau - Prüfkonzept</b>	<b>15</b>
3.1 Prüfkonzept . . . . .	17
3.2 Versuchsprogramm . . . . .	17

<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>19</b>
4.1	Gesteine . . . . .	19
4.2	Versuchsablauf . . . . .	21
4.3	Dokumentation . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>23</b>
5.1	Berechnungen . . . . .	23
5.2	Berechnung der Probenverformung in Axialrichtung . . . . .	23
5.3	Berechnung der Probenverformung in radialer Richtung . . . . .	26
5.4	Volumetrische Verformung . . . . .	27
5.5	Druckfestigkeit . . . . .	28
5.6	Umschlingungsdruck . . . . .	29
5.7	Durchschnittskurven . . . . .	32
5.8	Zerstörungsarbeit . . . . .	33
5.9	Rissauswertung . . . . .	35
	5.9.1 Makroskopische Rissauswertung . . . . .	36
	5.9.2 Auswertung der Mikrorisse . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>40</b>
6.1	Auswirkungen des Wicklungsabstandes des Drahtes auf die maximale Druckfestigkeit . . . . .	40
	6.1.1 Auswirkungen der Variation des Wicklungsabstandes auf die maximale Druckfestigkeit beim Sandstein . . . . .	41
	6.1.2 Auswirkungen auf die maximale Druckfestigkeit beim Granit . . . . .	42
	6.1.3 Auswirkungen auf die maximale Druckfestigkeit beim Marmor . . . . .	43
6.2	Auswirkungen der Variation der Vorspannkraft . . . . .	43
	6.2.1 Auswirkung der Variation der Vorspannkraft auf die Druckfestigkeit beim Sandstein . . . . .	44
	6.2.2 Auswirkung der Variation der Vorspannkraft auf die Druckfestigkeit beim Granit . . . . .	45
	6.2.3 Auswirkung der Variation der Vorspannkraft auf die Druckfestigkeit beim Marmor . . . . .	47
	6.2.4 Verhalten der Querdehnung der Proben in Abhängigkeit des Wicklungsabstandes . . . . .	48
	6.2.5 Auswirkung der Drahtumwicklung auf das Verhalten nach dem Bruch . . . . .	50
	6.2.6 Auswirkungen des Wicklungsabstandes auf die Volumsverformung beim Sandstein . . . . .	51
	6.2.7 Auswirkungen des Wicklungsabstandes auf die Volumsverformung beim Granit . . . . .	52

6.2.8	Auswirkungen des Wicklungsabstandes auf die Volumsverformung beim Marmor . . . . .	53
6.2.9	Auswirkungen auf die Steifigkeit . . . . .	53
6.2.10	Auswirkungen auf die Zerstörungsarbeit . . . . .	55
6.3	Risse . . . . .	58
6.3.1	Sandstein . . . . .	58
6.3.2	Granit . . . . .	59
6.3.3	Marmor . . . . .	60
6.3.4	Zusammenfassung . . . . .	60
6.4	Ermittlung der Hoek-Brown Parameter aus den Laborversuchen . . . .	61
6.4.1	Spannungspfad des Sandstein im Hoek-Brown Diagramm . . . .	63
6.4.2	Spannungspfad des Granit im Hoek-Brown Diagramm . . . . .	64
6.4.3	Spannungspfad des Marmor im Hoek-Brown Diagramm . . . . .	65
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>66</b>



---

# 1 Einleitung

---

Auf dem Gebiet der Gebirgsmechanik haben sich unterschiedliche Verfahren zur Ermittlung grundlegender Gesteinsparameter etabliert. Zwei der wichtigsten Verfahren sind der einaxiale Druckversuch (uniaxial compressive strength test = UCS Test) sowie der Triaxialtest.

Beim konventionellen "Triaxialtest" wird mit  $\sigma_1$  die größte Hauptspannung und mit  $\sigma_3$  die Umschlingungsspannung bezeichnet. Da diese Umschlingungsspannung mit einer Hydraulikflüssigkeit auf die Probe aufgebracht wird, sind  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  gleich groß. Im Gegensatz dazu können beim sogenannten "True triaxial testing apparatus" (TTA) drei separate, ungleich große Spannungszustände ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ) eingestellt

werden. Aus diesem Grund wird in der Fachliteratur der konventionelle Triaxialtest auch als "axialsymmetrischer" Triaxialversuch bezeichnet. Erste triaxiale Versuche ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) wurden bereits 1910 von Theodore von Kármán durchgeführt. (Deák u. a., 2012)

Wiebols und Cook führten 1968 Untersuchungen zum Einfluss der intermediären Spannung  $\sigma_2$  auf die Gesteinsfestigkeit durch (Wiebols und Cook, 1968). Mogi entwickelte 1971 den ersten Apparat mit dem es möglich war alle drei auf die Probe einwirkenden Spannungen  $\sigma_1$  bis  $\sigma_3$  unabhängig voneinander einzustellen (Mogi, 1971).

Bei den meisten axialsymmetrischen triaxialen Verfahren erfolgt derzeit eine aktive Aufbringung der Spannungen  $\sigma_2 = \sigma_3$  über eine Hydraulikflüssigkeit. Dadurch wirkt zwar ein Druck auf den Probenkörper ein, dieser kann sich aber dennoch relativ frei verformen. Im Gebirge ist diese Verformung eines vollständig eingeschlossenen Volumens jedoch nicht auf die gleiche Weise möglich. Um die Auswirkungen dieser eingeschränkten Querdehnung auf die Gesteinseigenschaften zu erfassen sollen in dieser Diplomarbeit vorwiegend Verfahren untersucht werden, die diese Spannungen "reaktiv" (als Reaktion der verhinderten Querverformung) entstehen lassen.

---

## 2 Bestehende Prüfverfahren - Stand der Technik

---

Die Einteilung der bestehenden Prüfverfahren erfolgt in dieser Arbeit in aktive und reaktive Verfahren. Das "aktiv" bzw "reaktiv" bezieht sich hierbei darauf ob die beiden kleineren Spannungen  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  direkt auf die Probe aufgebracht werden oder ob sie Folgen einer eingeschränkten Querdehnung sind. Die aktiven Prüfverfahren sind in dieser Auflistung miteinbezogen, da bei allen triaxialen Versuchen eine Einschränkung der Proben in der lateralen Richtung stattfindet. Ein Vergleich der aktuellen Prüfverfahren soll die Unterschiede bezüglich der Kraftaufbringung und die damit einhergehenden Schwierigkeiten und Einschränkungen aufzeigen.

---

### 2.1 Aktive Prüfverfahren

---

Als aktive Prüfverfahren werden in dieser Arbeit jene Verfahren bezeichnet bei denen  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  direkt auf die Probe aufgebracht werden. Die Generierung dieser Spannungen kann über Druckstempel, hydraulisch oder über eine Kombination dieser Methoden erfolgen.

---

## 2.1.1 Der konventionelle Triaxialtest

---

Der Triaxialtest ist ein wichtiger gebirgsmechanischer Versuch bei dem eine Probe bis zum Versagen belastet wird. Im Unterschied zum UCS Test wirkt dabei aber über eine Hydraulikflüssigkeit eine Umschlingungsspannung  $\sigma_3$  auf die Probe ein. (Hoek und Franklin, 1967)

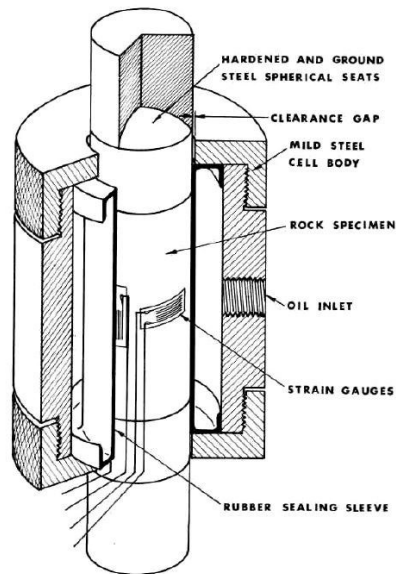


Abbildung 1: Die von Hoek und Franklin entwickelte Triaxialzelle (Hoek und Franklin, 1967)

Wie bereits erwähnt, sind beim konventionellen Triaxialtest  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  gleich groß. Man spricht auch von einem axisymmetrischen Triaxialtest. Durch das Aufbringen der Umschlingungsspannung wird ein triaxialer Spannungszustand in der Probe hergestellt, wodurch sich unter anderem die Festigkeit der Probe erhöht (Brady und Brown, 2006; Jaeger u. a., 2011;2009;2007;). Beim triaxialen Kompressionstest wird die Probe für gewöhnlich bei einer konstanten Umschlingungsspannung axial bis zum Bruch belastet. Im Vergleich dazu ist der triaxiale Extensionstest ein Versuch bei dem die Umschlingungsspannung größer als die axiale Belastung ist. Dieser Versuch wurde auch angewandt um den Einfluss der intermediären Spannung  $\sigma_2$  auf das Versagen zu beleuchten (Jaeger u. a., 2011;2009;2007;). Verschiedene Belastungspfade wurden auch verwendet um beim Vergleich des triaxialen Kompressionstest mit dem Extensionstest den Einfluss des Belastungspfades auf die maximale Festigkeit zu untersuchen (Brady und Brown, 2006). Bei vergleichenden Untersuchungen mit unterschiedlichen Belastungspfaden ergaben sich Abhängigkeiten der Festigkeiten eines roten Sandsteines vom Belastungspfad (Yang und Jing, 2013).

---

### 2.1.2 University of Wisconsin, WI, USA (1999)

---

Das *Department of Materials Science and Engineering* der University of Wisconsin entwickelte 1999 einen TTA mit dem Ziel besonders hohe Hauptspannungen ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) auf die Probe aufbringen zu können. Wie in Abbildung 2 ersichtlich werden dazu sowohl  $\sigma_1$  als auch  $\sigma_2$  mittels Druckstempel auf die Probe übertragen. Die Aufbringung von  $\sigma_3$  auf den Versuchskörper erfolgt über eine Hydraulikflüssigkeit. (Haimson und Chang, 2000)

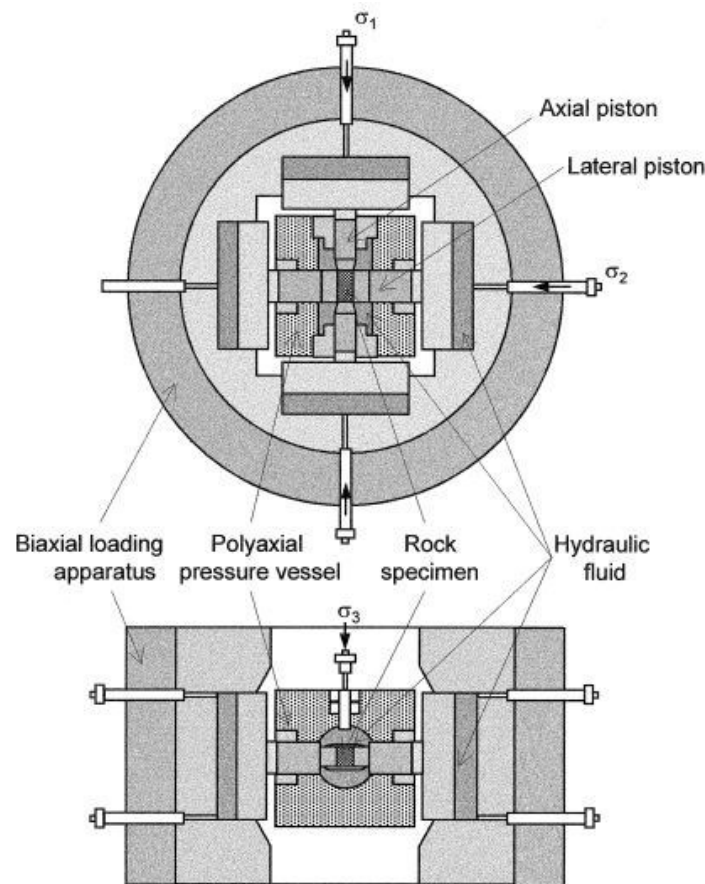


Abbildung 2: Der TTA Apparat der Universität von Wisconsin, USA (Haimson und Chang, 2000)

Aufgrund der geometrischen Anordnung können ausschließlich rechteckige Proben getestet werden. Diese müssen sehr exakt vorbereitet werden, da sich bei zu kleinen Proben die Druckstempel gegenseitig beeinflussen könnten, und bei zu großen Proben eine vollständige und gleichmäßige Belastung der Probe nicht gegeben ist.

---

### 2.1.3 Lavender 508, Northeastern University, Shanyang, China (2016)

---

Auf der Northeastern Universität in Shanyang, China wurde der in Abbildung 3 gezeigte Lavender 508 Apparat als TTA entwickelt. Vorbild war dabei die 1970 entwickelte Mogi-Prüfmaschine. (Feng u. a., 2016)

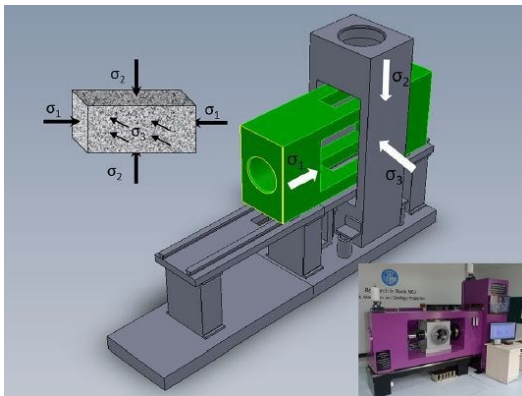


Abbildung 3: Der Lavender 508 TTA (Feng u. a., 2016)

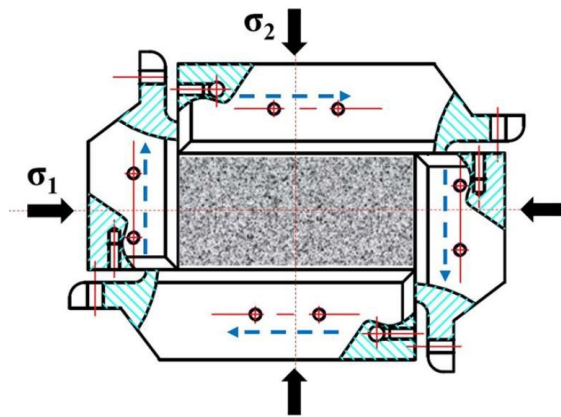


Abbildung 4: Aufbringung von  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  (Feng u. a., 2016)

Bei dieser Prüfeinrichtung erfolgt die Aufbringung von  $\sigma_1$  über einen in der horizontalen Richtung angeordneten Hydraulikzylinder. Die intermediäre Spannung  $\sigma_2$  wird über einen vertikal angeordneten Hydraulikzylinder aufgebracht und  $\sigma_3$  in vertikaler Richtung über die Hydraulikflüssigkeit. Diese Prüfeinrichtung hat gegenüber der von Haimson und Chang entwickelten TTA den Vorteil, dass die Stempel nicht zusammenstehen. Sie sind, wie in Abbildung 3 gezeigt, versetzt angeordnet. Dadurch bewegen sich die Stempel bei der Volumsvergrößerung bzw. -verkleinerung infolge der Belastung in der Richtung normal zur Belastung, entlang der Probe an einander vorbei. Es ist fraglich ob die auf die Probe aufgebrachte Spannung über den gesamten Querschnitt uniform ist, denn dazu muss sich der Probenkörper trotz des ungünstigen Randeinflusses der rechteckigen Geometrie gleichmäßig verformen. (Feng u. a., 2016)

---

#### 2.1.4 Sandia true triaxial facilities, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA (1997)

---

Dieser Testapparat, dargestellt in Abbildung 5, wurde entwickelt um auch an zylindrischen Prüfkörpern triaxiale Tests mit intermediären Spannungen durchzuführen. Dabei werden hydraulische Druckkissen, sogenannte "flat jacks", auf beiden Seiten der Probe aufgepumpt. Axial wird die Probe mit Prüfstempeln belastet. (Wawersik u. a., 1997)

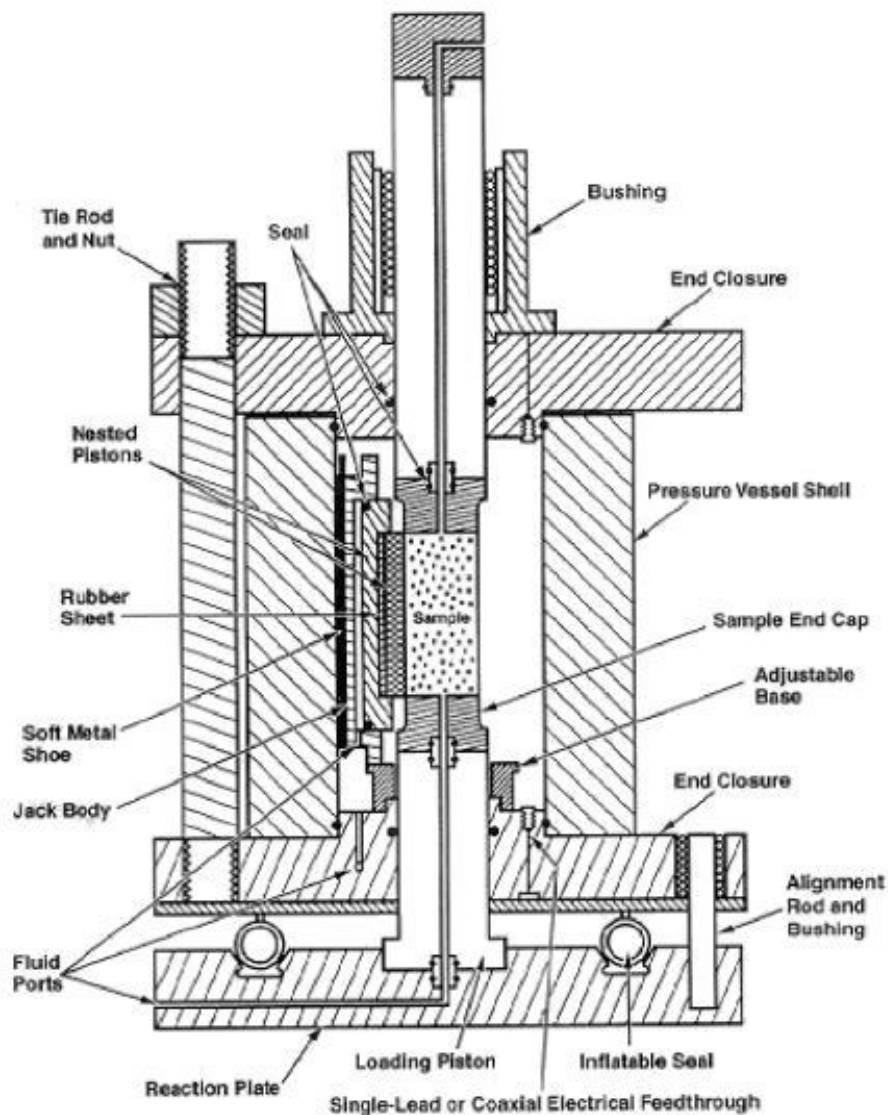


Abbildung 5: Die "Sandia true triaxial testing facilities", Albuquerque, NM, USA (Wawersik u. a., 1997)

---

## 2.1.5 Department of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, Vereinigtes Königreich (1999)

---

Dieses Prüfsystem ist eine Weiterentwicklung des in Kapitel 2.1.4 geschilderten Systems. Dabei wird wie in Abbildung 6 gezeigt, mit den am Umfang der Probe angeordneten Röhren der Umschlingungsdruck aufgebracht. Diese Röhren können selektiv unter Druck gesetzt werden und so einen "true triaxial stress state" herbeiführen. (Smart u. a., 1999)

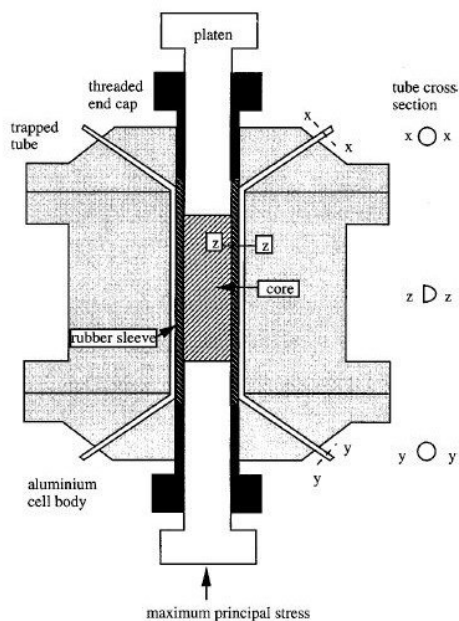


Abbildung 6: Schnitt TTA Edinburgh (Smart u. a., 1999)

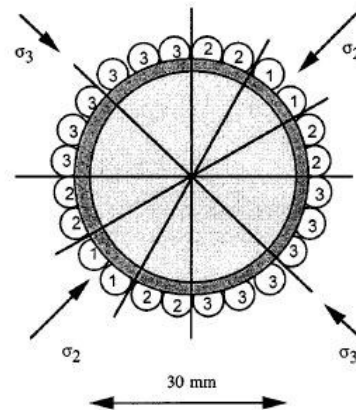


Abbildung 7: Aufbringung von  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  (Smart u. a., 1999)

In Abbildung 7 ist ein Spannungszustand zu sehen bei dem in den Röhren drei unterschiedliche Drücke eingestellt sind. Die Aufbringung der axialen Belastung erfolgt über hydraulische Prüfstempel. Dadurch wird ein Spannungszustand  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  erreicht. (Smart u. a., 1999) Auch hier werden in axialer Richtung Reibungskräfte die Probe beeinflussen.

---

## 2.2 Reaktive Prüfverfahren

---

Bei diesen Prüfverfahren werden die untergeordneten Spannungen  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  zumindest zum Teil dadurch generiert dass sich die Probe nicht frei verformen kann.

---

### 2.2.1 Das "Plane strain test rig" der University of the Witwatersrand, Johannesburg, RSA(1995)

---

Bei diesem Prüfaufbau soll ein sogenannter "plane strain" Zustand erreicht werden. Das heißt, dass die Probe dabei gehindert wird sich in eine Richtung auszudehnen; sie kann sich also nur in einer Ebene verformen. Dieser Zustand soll bei dieser Apparatur dadurch erreicht werden dass die Probe mittels der beiden in Abbildung 8 sichtbaren Bolzen zwischen zwei steifen Metallplatten eingespannt wird (Yumlu und Ozbay, 1995).

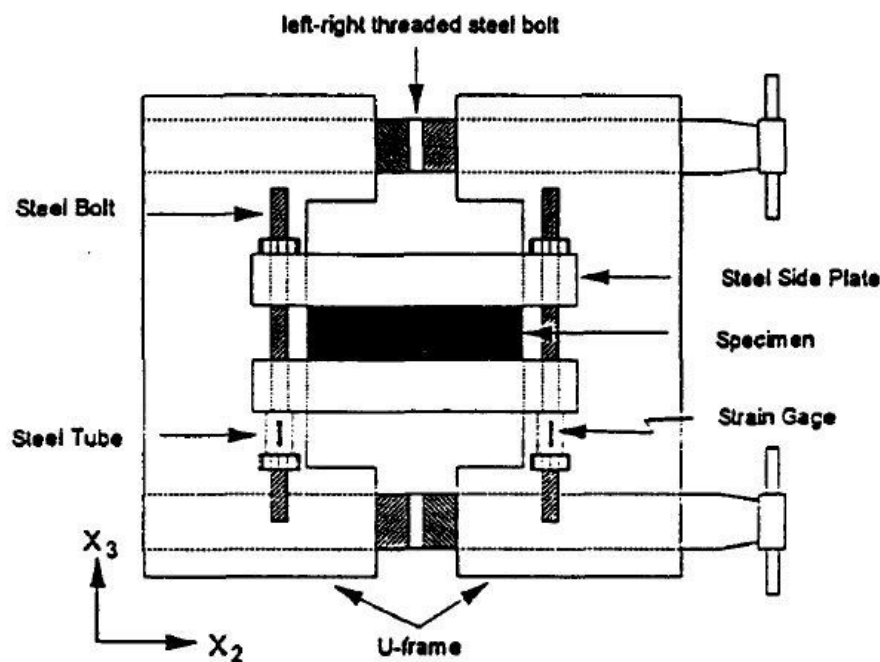


Abbildung 8: Das plane strain test rig der University of the Witwatersrand, RSA (Yumlu und Ozbay, 1995)

Auch hier besteht wieder das Problem dass die Probe von allen Seiten gleichzeitig belastet werden soll. Dadurch müssen die Proben sehr genau vorbereitet werden. Zudem muss davon ausgegangen werden dass durch die allseitige Einspannung große Reibungskräfte und dadurch Verspannungen entstehen, wodurch es schwer wird den Spannungszustand der Versuchskörper genau zu bestimmen.



---

### 2.2.2 Der "Biaxial frame" für plane strain Versuche der University of Minnesota Twin-Cities, Minneapolis, USA (2013)

---

Hierbei handelt es sich um einen steifen Metallring der die Ausdehnung der Probe in einer Achsrichtung einschränkt. Die Probe wird dann wie in Abbildung 9 zu sehen, in der Achsrichtung des Ringes mit einem hydraulisch betätigten Stempel belastet und der Seitendruck wird mit Öl aufgebracht. Erste Versuche dazu wurden von Labuz 1996 durchgeführt. (Makhnenko und Labuz, 2014)

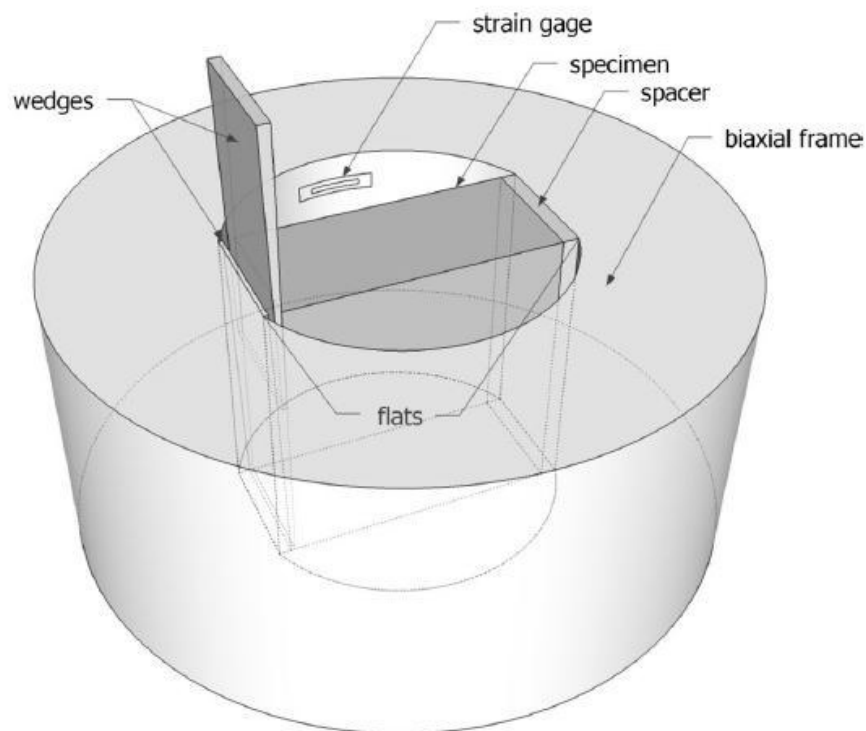


Abbildung 9: Der "biaxial frame" der University of Minnesota Twin-Cities, USA (Makhnenko und Labuz, 2014)

---

### **2.2.3 Mining Research Laboratory, Chamber of Mines of South Africa, Johannesburg, RSA (1973)**

---

Prinzipiell handelt es sich bei dieser Methode um eine Adaption des konventionellen triaxialen Versuchs. Dabei wird eine zylindrische Probe in einer geschlossenen Triaxialzelle axisymmetrisch belastet. Der anfängliche Seitendruck  $\sigma_3$  wird mit einer Hydraulikflüssigkeit aufgebracht. Während der Belastung der Probe in axialer Richtung wird in der Triaxialzelle jedoch nicht der Seitendruck  $\sigma_3$ , sondern das Volumen konstant gehalten, wodurch sich  $\sigma_3$  stetig erhöht. Die Größe von  $\sigma_3$  wird bestimmt durch die anfängliche Umschlingung durch das Metalljacket und aus der Steifigkeit der Triaxialzelle. Durch dieses Einschließen in ein Kupferjacket wird auch hier die laterale Ausdehnung eingeschränkt. Durch die Versuchsanordnung ist bei diesen Versuchen der Umschlingungsdruck von der Querdehnung der Proben und der Steifigkeit des Systems Triaxialzelle und Hydraulikflüssigkeit abhängig. (Hallbauer u. a., 1973)

## 2.2.4 University of California, Berkeley, CA, USA (1989)

Bei diesem Versuchsaufbau werden die mit Draht umschlossene Proben axial belastet. Abbildung 10 zeigt die Anordnung des Drahtes bei den durchgeführten Untersuchungen. Dabei wurden sowohl einaxiale Druckversuche (1), sowie Versuche an mit Draht umwickelten Proben durchgeführt (2-5). Außerdem wurde eine Referenzprobe (6) zum Vergleich der Mikrorisse nur bis zu einem Viertel der einaxialen Druckfestigkeit belastet. (Zheng u. a., 1990)

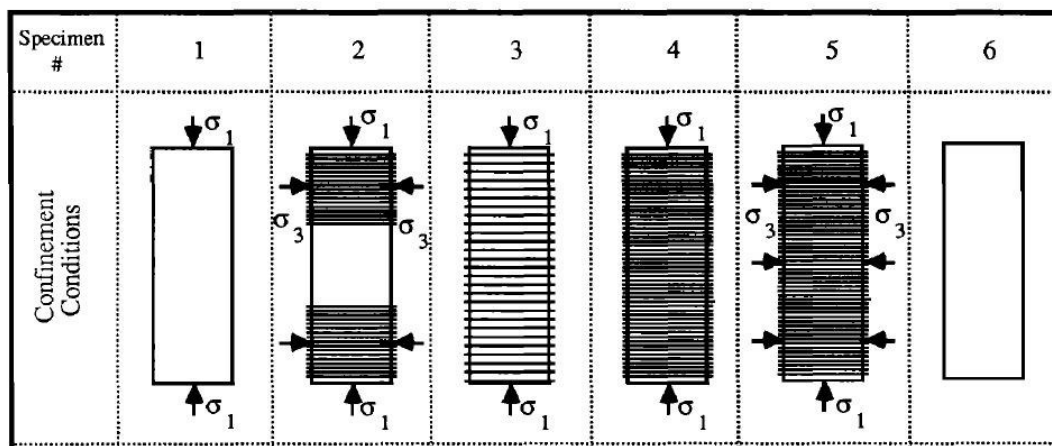


Abbildung 10: Confined axial compression test, (Zheng u. a., 1990)

Untersuchungsgegenstand war bei diesen Versuchen auch die Ausbildung der Risse. Dabei wurde festgestellt, dass es einen Zusammenhang zwischen Rissdichte, -orientierung und Seitendruck gibt. Bei größeren Seitendrücken war die Rissdichte der Mikrorisse in den mit Draht umschlungenen Proben geringer als bei den UCS Testkörpern und allgemein homogener verteilt. Außerdem treten die Mikrorisse vermehrt in der Nähe von freien Flächen auf und weisen bei den UCS Versuchen größere Längs- und Quererstreckungen auf. (Zheng u. a., 1990)

Die Laborversuche aus dem praktischen Teil dieser Arbeit wurden nach diesem Vorbild durchgeführt.

---

## 2.2.5 Stempeldruckversuch, Chamber of Mines of South Africa, Johannesburg, RSA (1970)

---

Bei dieser Untersuchungsmethode wird ein Metallstempel in eine Gesteinsprobe eingedrückt. Dabei entsteht ein dreidimensionales Spannungs- und Verformungsfeld (siehe Abbildung 11) in dem ein direkter Zusammenhang zwischen der kleinsten Hauptspannung  $\sigma_3$  und der Querdehnung der Probe besteht. (Wagner und Schümann, 1971)

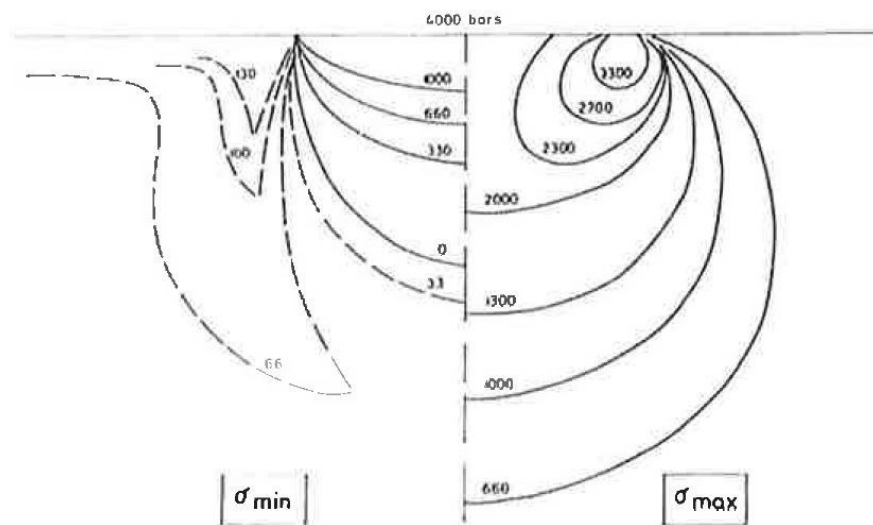


Abbildung 11: Spannungsfelder Stempeldruckversuch, (Wagner und Schümann, 1971)

Die Ergebnisse zeigten auf dass die Proben zuerst ringförmig an der Kontaktstelle Stempel - Probe versagten. Grund für das Versagen an dieser Stelle war das Überschreiten der Zugfestigkeit des Gesteins. Diese Zugrisse entstanden bei den Versuchen schon vor dem Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit, wobei sich die Stempeldruckfestigkeit für große Stempel (Durchmesser > 305 mm) der vierfachen UCS annäherte. Kleinere Stempeldurchmesser erzielten tendenziell höhere Festigkeiten. (Wagner und Schümann, 1971) merkten an dass die volumetrische Ausdehnung einen wichtigen Aspekt des Versagens der Proben unter Stempelbelastung darstellt, da die Zusammendrückung in axialer Richtung zu einer lateralen Ausdehnung des Gesteins und dadurch zu einem Ansteigen von  $\sigma_3$  führt. Dieser Zusammenhang wie auch das Versagensmuster sind in Abbildung 12 zu sehen. Zum Zeitpunkt des Versagens der Proben unterlagen diese einer rapiden Volumsvergrößerung unterhalb des Stempels welche zum Abplatzen der Oberfläche und in weiterer Folge zum Versagen der Probe führten. (Wagner und Schümann, 1971)

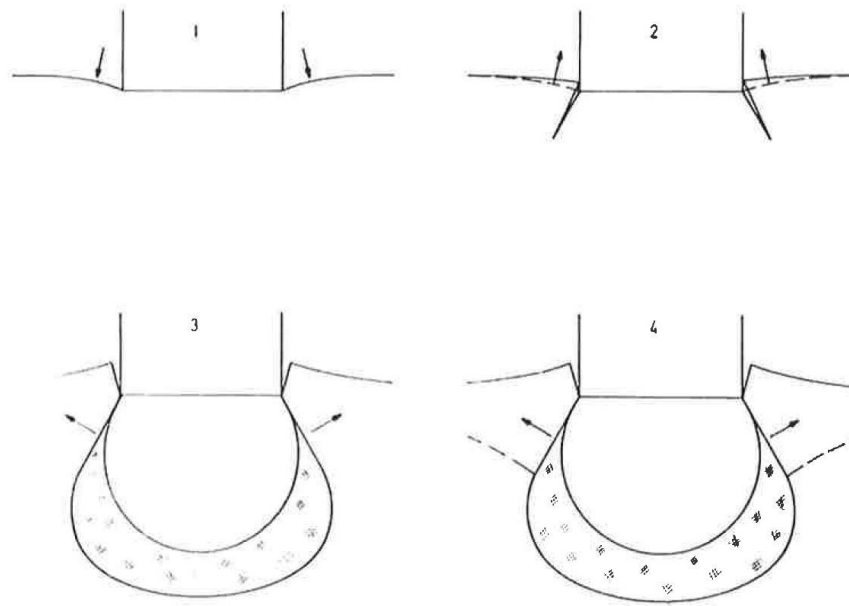


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Bruchvorganges beim Stempeldruckversuch, (Wagner und Schümann, 1971)

Abbildung 12 Bild (1) zeigt die Belastung durch den Stempel und die elastische Verformung der Probe. In (2) ist die Entstehung der Zugrisse an der Kontaktfläche Stempel / Probe zu sehen. (3) veranschaulicht den Beginn der volumetrischen Expansion der Probe und (4) zeigt das Versagen infolge der volumetrischen Expansion.

## 2.2.6 Zusammenfassung Stand der Technik

---

Den verschiedenen Prüfsystemen liegen unterschiedliche Konzepte zu Grunde. Einige Systeme bedienen sich nicht nur zur Aufbringung der größten Hauptspannung  $\sigma_1$  sondern auch zur Aufbringung des Seitendrucks ( $\sigma_2$  und  $\sigma_3$ ) hydraulischer Kolben. Diese Systeme haben den Nachteil, dass dabei die Proben sehr exakt vorbereitet werden müssen. Da sich die Proben während dem Versuch verformen kann es vorkommen, dass sich die Prüfstempel gegenseitig beeinflussen oder die Proben ungleichmäßig belasten. Außerdem kommt es durch den Kontakt Prüfstempel - Probe zu großen Reibungskräften auf dieser Kontaktfläche welche den Spannungszustand der Probe beeinflussen. Die Auswirkungen die diese Reibungskräfte haben können sind auch beim UCS Test sehr gut zu beobachten. Beim ungleichen Ausdehnen von Probe und Druckplatten entsteht bei zylindrischen Proben im Randbereich ein Kegelvolumen in dem der Spannungszustand nicht einaxial ist. Um diesem Effekt gegenzusteuern sollte die Länge der Probe zumindest dem doppelten Durchmesser entsprechen. Dadurch wird erwirkt, dass ein größeres Volumen einem uniaxialen Stress ausgesetzt wird. (Mutschler, 2004; Brady und Brown, 2006; Jaeger u. a., 2011; 2009; 2007;) Ein weiterer Ansatz zur Minimierung dieser Effekte liegt im Aufbringen von Schmiermitteln. Solche Maßnahmen können jedoch auch stark negative Auswirkungen auf die Ergebnisse der Versuche haben. Unter Umständen kann es dazu kommen dass sich durch Überdrücke in den Gesteinsporen Zugspannungen in den Proben entwickeln können, welche die Festigkeit senken. (Brady und Brown, 2006)

Bei anderen Systemen wird der Umschlingungsdruck direkt über eine Hydraulikflüssigkeit auf die Probe aufgebracht. Die Hydraulikflüssigkeit kann zwar keine Scherkräfte übernehmen, hier liegt jedoch wiederum der Nachteil darin, dass sich die Probe relativ frei verformen kann. Aus diesen Überlegungen wurde im praktischen Teil ein Versuchsaufbau angewendet, bei dem:

- die Versuchsdurchführung messtechnisch gut zu überwachen und einfach durchzuführen ist.
- die Proben in axialer Richtung nicht durch Reibungskräfte eingeschränkt werden.
- durch Wahl der Geometrie die Randeinflüsse in der horizontalen Ebene minimiert werden.
- der Seitendruck  $\sigma_3$  durch Kontakt mit dem Draht lokal aufgebracht wird und ein Resultat der Verformung der Probe ist.

---

### 3 Versuchsaufbau - Prüfkonzept

---

Beim praktischen Teil der Diplomarbeit wurde ein Prüfkonzept entworfen, welches anhand von Laborversuchen die Auswirkungen der Einschränkung der Querdehnung auf die Gesteinseigenschaften untersucht. Insbesondere wurden der Druckfestigkeit, der Änderung des Volumsverhaltens, dem Rissbild und dem Spannungspfad im  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  Diagramm besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Zu diesem Zweck wurde der konventionelle einaxiale Druckversuch modifiziert. Eine Umwicklung der Gesteinsprobe mit Draht soll die Querdehnung einschränken und zum Aufbau eines triaxialen Spannungszustandes führen. Die Abbildungen 13 und 14 zeigen zwei unterschiedliche in der MTS-Prüfmaschine eingebaute Proben. Links ist eine Sandsteinprobe im konventionellen UCS Versuch zu sehen, und rechts eine in 3 mm Abständen mit Draht umwickelte Granitprobe.

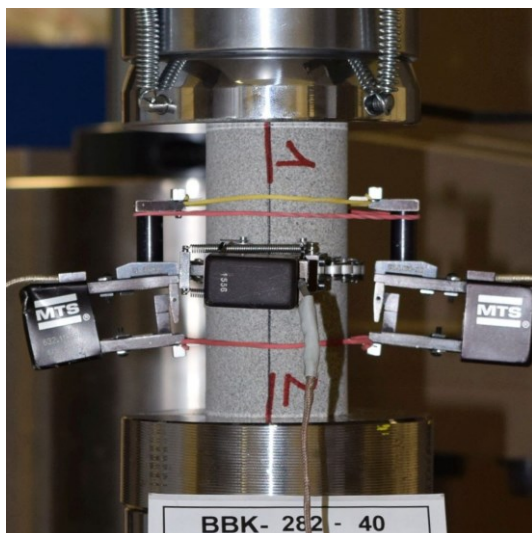


Abbildung 13: Eingebaute Probe mit Axialextensometern und Umfangskette

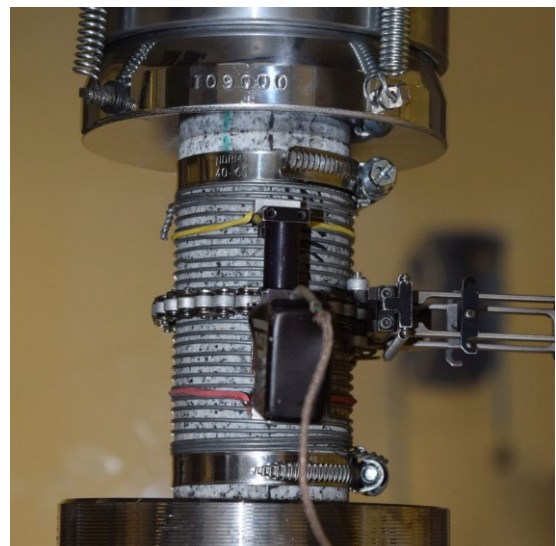


Abbildung 14: Eingebaute Probe (mit Draht) von der Seite gesehen

In dieser Abbildung sind auch die sphärische Lagerung durch eine Kugelkalotte (jeweils oben im Bild) sowie die Axialextensometer (seitlich) und die Messkette zur Umfangsdehnungsmessung gut zu sehen. Die Druckfestigkeit der Probe sollte durch die Umwicklung mit Draht stark erhöht werden. Alternative Konzepte wie zum Beispiel eine Umschlingung mit einem Stahlrohr oder Eingießen in Beton wurden deshalb verworfen, da davon ausgegangen werden muss dass dabei ein großer Anteil der axialen Kräfte über Reibung in das Stützsystem übertragen werden würde. Eine solchermaßen gestützte Probe wäre zwar

sehr belastbar, es wäre jedoch sehr schwer die Probe und das Stützsystem rechnerisch voneinander zu entkoppeln. Eine Umwicklung mit Draht hat zudem den Vorteil dass die axialen Kräfte weitgehend unbeeinflusst bleiben. Ziel der Diplomarbeit war es einen Versuchsaufbau zu entwickeln der Ergebnisse liefern soll, welche mit Triaxialversuchen zu vergleichen sind ohne jedoch auf eine Triaxzelle zurückgreifen zu müssen. Dabei war es wichtig, dass der Umschlingungsdruck aus der eingeschränkten Querdehnung entsteht. Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten wurden verschiedenste Parameter während den Versuchen aufgezeichnet. Die Erstellung des Prüfprogramms erfolgte angelehnt an die "Draft Suggested Methods" der ISRM und die Empfehlung Nr.1 des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.. (Fairhurst und Hudson, 1999; Mutschler, 2004) Bis ca. 50 % der erwarteten Druckfestigkeit wurde mit 0,5 MPa/s kraftgesteuert geregelt. Danach erfolgte die Steuerung der Prüfmaschine umfangsdehnungsgesteuert mit 5  $\mu$ strain/s bis zum Versagen der Probe. Nach dem Bruch wurde die Umfangsdehnungsrate alle 5 min verdoppelt. Die Versuchsdurchführung wurde nach dem Wiederabfall auf ca. 25 % bis 50 % der Druckfestigkeit beendet.



---

### 3.1 Prüfkonzzept

---

Zur Probenvorbereitung wurden an beiden Enden der Gesteinsproben Schlauchschellen befestigt an welchen später der Draht angeklemt wurde. Danach wurden die Proben in einer Drehbank eingespannt. Über eine Umlenkrolle wurde ein Gewicht an den Draht gehängt. Über Variation dieses Gewichtes konnte die Vorspannkraft im Draht eingestellt werden. In Abbildung 15 ist eine fertig vorbereitete Probe mit 3mm Wicklung, und in Abbildung 16 das Schema zur Aufbringung des Drahtes unter Vorspannung zu sehen.



Abbildung 15: Eine in Draht eingewickelte Probe

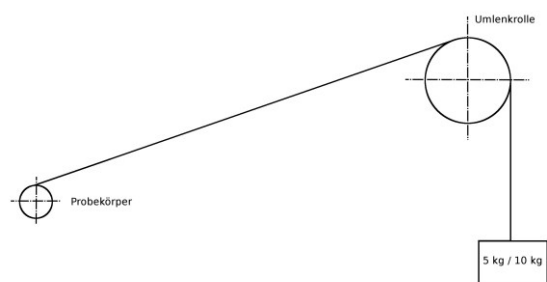


Abbildung 16: Aufbringung des Drahtes auf die Probe

---

### 3.2 Versuchsprogramm

---

Um die Auswirkungen der Einschränkung der Querdehnung besser erfassen zu können, wurden die Versuche an drei unterschiedlichen Gesteinen durchgeführt, welche in Kapitel 4.1 Gesteine genauer beschrieben sind. Ein Auswahlkriterium für die Gesteinsarten war unter anderem der  $m_i$ -Wert des Hoek-Brown-Kriterium. Dieses Bruchkriterium, beschrieben in Formel (1), beschreibt das Bruchverhalten der Gesteinsproben in einem Triaxialen Spannungszustand (Jaeger u. a., 2011;2009;2007;). Zudem wurde der Abstand der Drahtwicklungen variiert. Es wurden Versuche mit 5 mm, sowie 3 mm Abstand zwischen den Wicklungen durchgeführt. Zudem wurden alle Versuche mit 49 N und 98 N Vorspannkraft durchgeführt. Es wurden also insgesamt 45 Versuche (15 pro Gesteinsart) durchgeführt.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \overline{m_i \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + \sigma_c^2} \quad (\text{Hoek-Brown-Kriterium, 1})$$

Wie in Abbildung 17 zu sehen, hat ein höherer  $m_i$ -Wert bei dem selben Umschlingungsdruck und der gleichen einaxialen Druckfestigkeit eine höhere

Druckfestigkeit zur Folge.

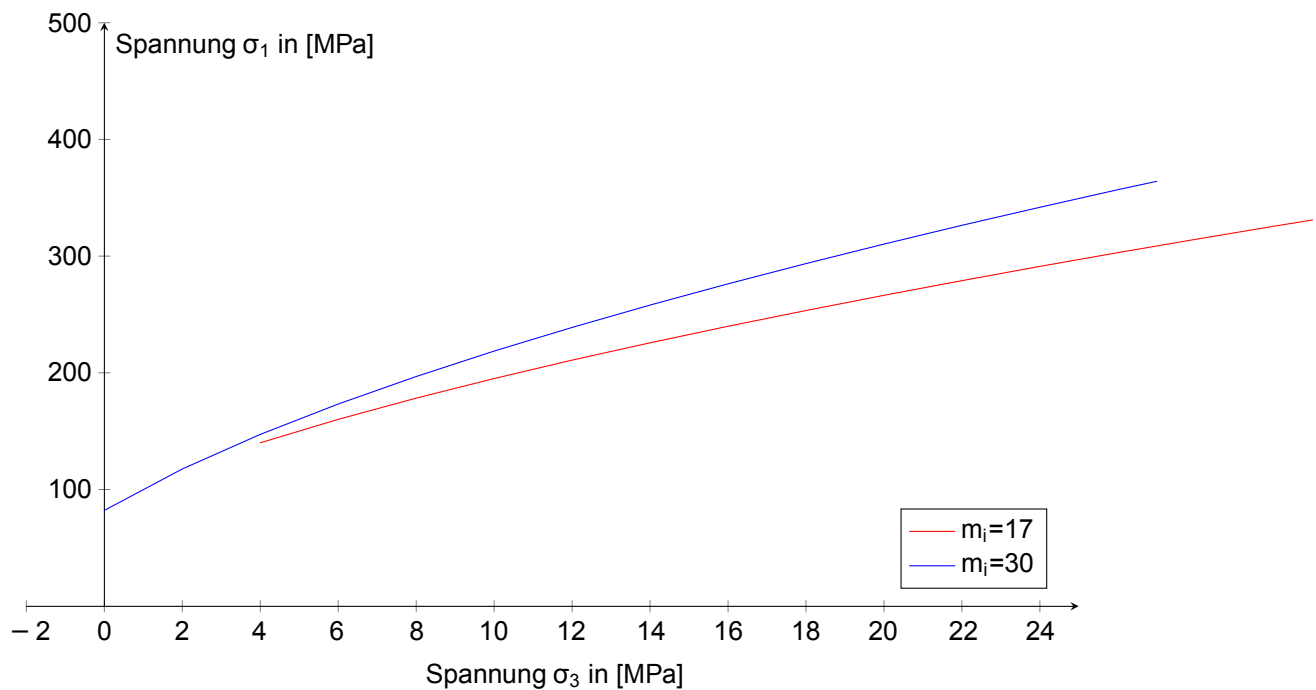


Abbildung 17: Hoek-Brown Kriterium mit  $\sigma_c = 160$  MPa und  $m_i = 17$  bzw 30

Das Hoek-Brown Kriterium ist ein weithin verwendetes Instrument, welches bei geotechnischen Problemstellungen Anwendung findet. Es beschreibt das Versagensverhalten von intaktem Gestein und von homogenem, zerklüftetem Gebirge bei mehrdimensionalen Spannungsverhältnissen.

---

## 4 Versuchsdurchführung

---

Dieses Kapitel behandelt die Durchführung der Versuche. Beginnend mit der Probenvorbereitung bis hin zur Einbettung der Proben in Epoxidharz sind alle zur Versuchsabwicklung benötigten Schritte beschrieben.

---

### 4.1 Gesteine

---

Die drei verwendeten Materialien sind Granit, Marmor und Sandstein. Im Falle des Granits handelt es sich mineralogisch gesehen um einen Granodiorit. Dieser stammt aus St. Martin im Mühlkreis und trägt die Handelsbezeichnung "Neuhauser Granit". Im Unterschied zu Graniten besteht der Feldspatanteil der Granodiorite zu einem größeren Anteil aus Plagioklasen als aus Orthoklasen. In dieser Arbeit wird der Granodiorit zur Vereinfachung und gemäß seiner Handelsbezeichnung als Granit bezeichnet. Der Sandstein, mit dem Markennamen "Imberg Sandstein", stammt aus Dortmund, der Marmor ist aus dem Krastal in Kärnten. In Abbildung 18 sind die Spannungs-Dehnungskurven der drei Materialien zu sehen.

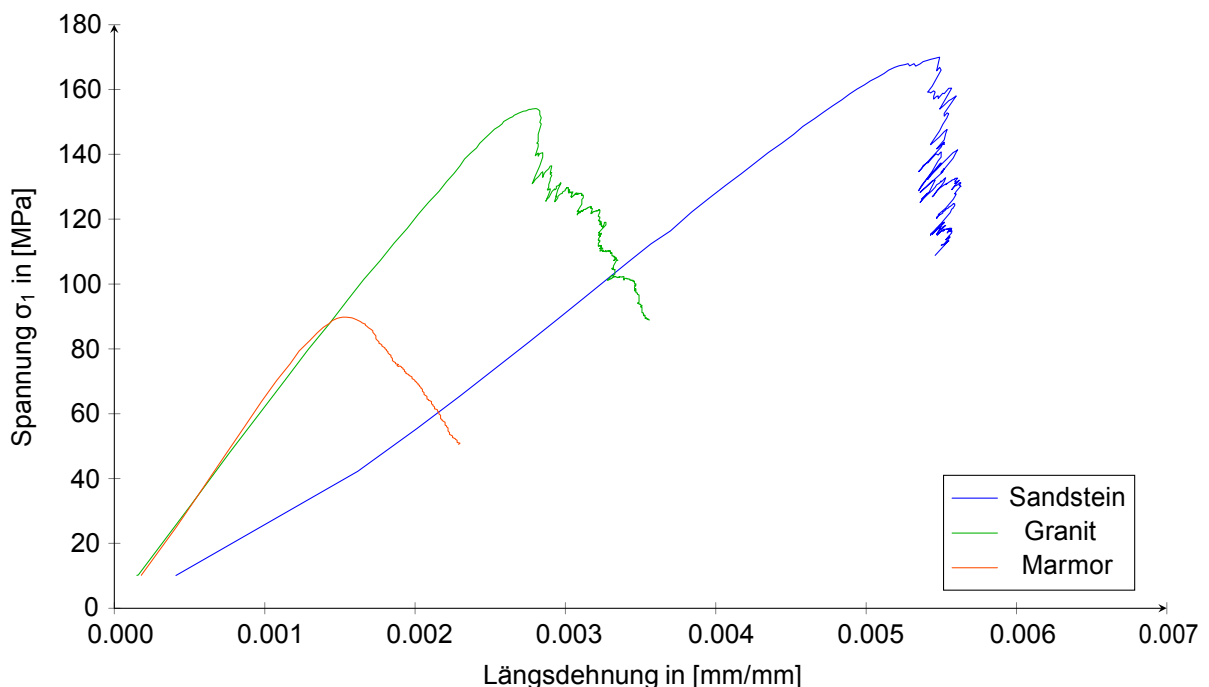


Abbildung 18: Vergleich der Spannungs-Dehnungsdiagramme der drei Gesteine bei einaxialer Druckbelastung

Aus diesem Diagramm heraus ist sogleich ersichtlich dass die einaxiale

Druckfestigkeit (uniaxial compressive strength = UCS) des Sandstein am höchsten ist. Mit 169,9 MPa ist diese etwas höher als die des Granit (154,0 MPa), welche ihrerseits doch noch deutlich höher als die des Marmors (89,8 MPa) ist. Es ist auch zu bemerken dass der Granit und der Marmor einen ähnlich hohen E-Modul aufweisen. Der E-Modul des Sandstein ist geringer. Bei diesen Kurven handelt es sich um die Durchschnittskurven von jeweils drei einaxialen Druckversuchen am jeweiligen Material. Genauere Informationen wie diese Durchschnittskurven ermittelt wurden finden sich in Kapitel 5.7 Durchschnittskurven Die  $m_i$ -Werte aus der Literatur sind breit gefächert. Im Folgenden werden die  $m_i$ -Werte von Hoek und Brown und von Mostyn u. a. angegeben. Für Sandstein liegt der  $m_i$ -Wert laut Mostyn u. a. zwischen 2 und 40, laut Hoek und Brown bei ca. 19. Der Granodiorit liegt laut Mostyn u. a. zwischen 10 und 26, laut Hoek und Brown bei ca. 30. Und für den Marmor ergibt sich der  $m_i$ -Wert nach Mostyn u. a. zwischen 2 und 26, laut Hoek und Brown bei ca 9. Die breite Streuung verdeutlicht auch die Schwierigkeit den  $m_i$ -Wert eines Gesteins abzuschätzen.

---

## 4.2 Versuchsablauf

---

Die Vorbereitung der Gesteinsproben erfolgte im Probenvorbereitungsraum im IZR Gebäude der Montanuniversität. Dabei erfolgte die Probenvorbereitung nach den "Suggested Methods" der ISRM und der Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreis Versuchstechnik Fels der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Fairhurst und Hudson, 1999; Mutschler, 2004)

Der Ablauf war dabei untergliedert in:

- bohren, schneiden,  
fräsen
- Probendokumentation
- I
- anzeichnen der Abstände für den  
Draht
- anbringung der Schlauchschellen für die Befestigung des Drahtes
- aufbringen des Drahtes (unter  
Vorspannung)
- ankleben am  
Ende
- Probendokumentation
- II
- 
- Versuchsdurchführung
- Probendokumentation
- III
- einbetten in  
Harz
- halbieren der Proben in der  
Mitte
- Probendokumentation
- IV
- herstellen der  
Dünnschliffe
- auswertung der  
Dünnschliffe

---

## 4.3 Dokumentation

---

Wie schon aus dem oben geschilderten Ablauf ersichtlich, wurden sämtliche Proben im Lauf des Versuches mehrere Male fotografiert. Die erste Probendokumentation

erfolgte unmittelbar nach dem Herstellen der zylindrischen Gesteinsproben. Dabei wurden auch Länge, Durchmesser, Masse sowie die Planparallelität jeder Probe ermittelt. Ungenügende Proben wurden, wenn möglich, erneut gefräst oder sonst ausgeschieden. Außerdem erfolgte bei dieser Station auch die erste Fotodokumentation bei der die Gesamtheit der Proben stirnseitig, sowie je vier mal längsseitig (um jeweils 90 ° gedreht) fotografisch festgehalten wurden.

Die zweite Fotodokumentation erfolgte nach dem Umwickeln mit Draht. Dieser Schritt wurde von jenen Proben ausgelassen, welche nicht mit Draht umwickelt wurden. Ebenso wie bei der ersten Dokumentation wurde hierbei darauf geachtet die Probe sowohl auf den Stirnseiten, als auch auf den Längsseiten fotografisch

festzuhalten. Eine solche Serie, von der Probe BBK-351-8, ist in den Abbildungen 19 bis 24 zu sehen. Außerdem wurden auch während der Versuchsdurchführung an der Prüfmaschine zusätzliche Bilder aufgenommen.



Abbildung 19: Stirnseite 1

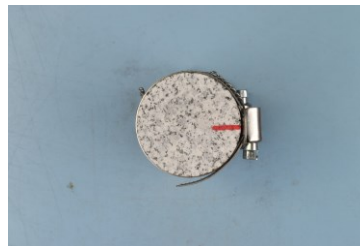


Abbildung 20: Stirnseite 2



Abbildung 21: Längs 0°



Abbildung 22: Längs 90°



Abbildung 23: Längs 180°



Abbildung 24: Längs 270°

Die dritte Fotoserie hielt den Zustand der Proben nach erfolgter Versuchsdurchführung fest. Wieder wurden in jeweils sechs Fotos alle Seiten dokumentiert. Nach dem Einbetten in Epoxidharz und dem Teilen der Probe, erfolgte eine weitere Fotoserie. In dieser Serie wurden nur die Schnittflächen der halbierten Proben fotografiert. Diese Fotos wurden sowohl unter Kunstlicht als auch unter langwelligem UV-Licht geschossen. Einen Vergleich dieser Bilder sieht man in Abbildungen 25 und 26.

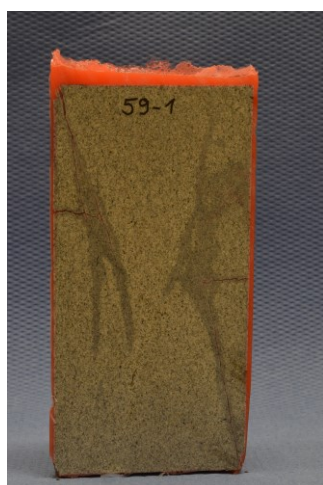


Abbildung 25: Die Probe BBK-282-59

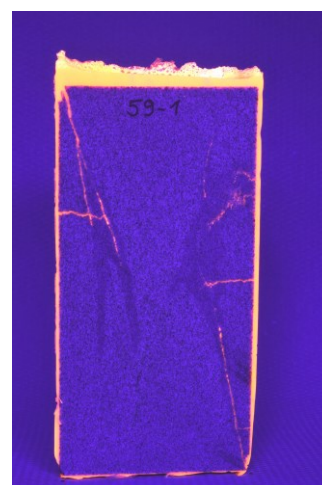


Abbildung 26: Die Probe BBK-282-59 in langwelligem UV-Licht

---

## 5 Auswertung

---

Das Kapitel Auswertung ist in zwei Teilbereiche aufgeteilt. Einerseits werden die getätigten Berechnungen angesprochen, andererseits wird näher auf die Rissauswertung eingegangen.

---

### 5.1 Berechnungen

---

Dieses Kapitel bespricht die getätigten Berechnungen. Es wird erklärt welche Formeln verwendet, und welche Annahmen getroffen wurden.

---

### 5.2 Berechnung der Probenverformung in Axialrichtung

---

Die Bestimmung der Längenänderung der Proben erfolgt über zwei Extensometer die im mittleren Bereich der Probe entlang der Längserstreckung seitlich aufgebracht werden. Die Ausgangsmesslänge der Extensometer beträgt dabei 49,5 mm. Die Extensometer messen also nur die Verformung im zentralen Bereich der Probe (in dem auch ein annähernd uniaxialer Spannungszustand vorherrscht). Von dieser Messlänge aus wird anhand von (2) auf die Verformung der gesamten Probe geschlossen.

$$s_{\text{axial}} = \frac{\Delta l}{49,5 \text{ mm}} \cdot l_{\text{Probe}} \quad (\text{Längsdehnung, 2})$$

Da die Extensometer auf der Probenoberfläche angebracht sind muss davon ausgegangen werden dass sie ab dem Bruch nicht mehr exakt die Verformung der Probe messen können. Dieses Verhalten ist dem Umstand geschuldet dass sich einer oder beide Extensometer auf einem Teil der zerstörten Probe befinden könnten die sich nach dem Bruch zwar bewegt, aber nicht verformt. Aus diesem Grund wurde die Verformung der Probe ab dem Bruch aus dem Kolbenweg der Prüfmaschine berechnet. Da sich die Maschine durch die Belastung der Probe während des Versuchs jedoch auch verformt, entspricht der Kolbenweg nicht der Verformung der Probe. Um die Verformung der Probe zu erhalten muss zuerst die Verformung der Maschine vom Kolbenweg abgezogen werden. Zur Vereinfachung wird dabei angenommen dass sich die Maschine beim Entlasten nicht hysteretisch sondern elastisch verhält. In Abbildung 27 sind die Spannungs - Verformungskurven der Probe und der Maschine während eines Versuches eingezeichnet.



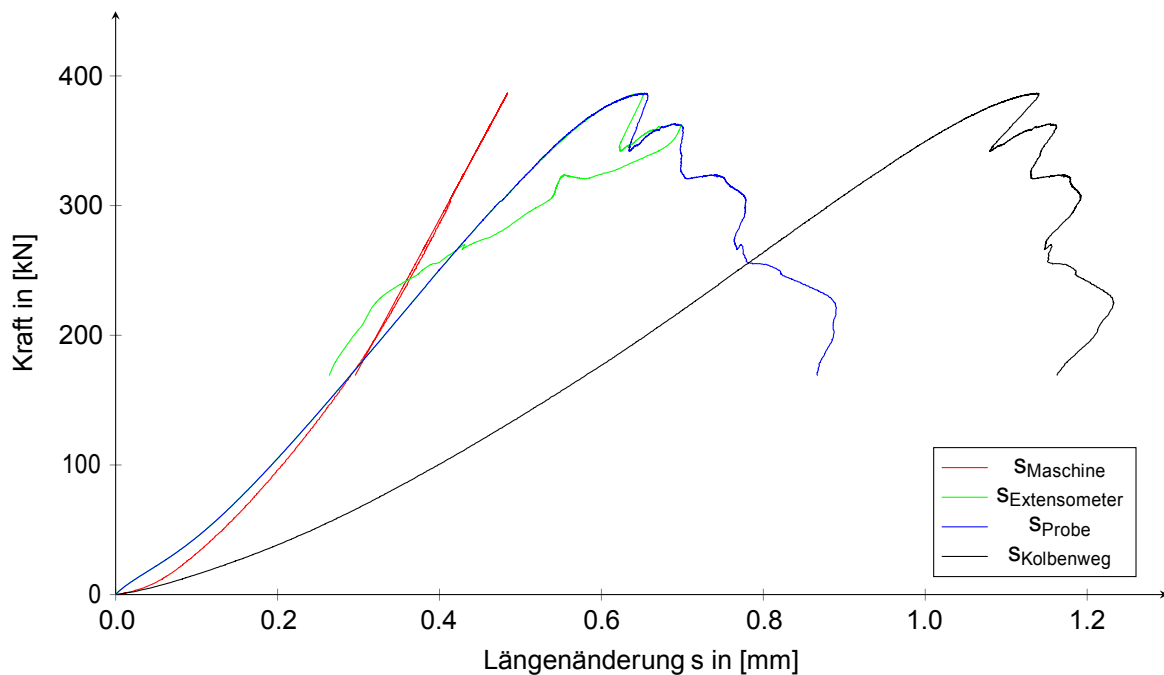


Abbildung 27: Spannungs - Dehnungsdiagramm Sandsteinprobe: BBK-282-59

Während die grüne Kurve in Abbildung 27 den Mittelwert der beiden Extensometermesswerte zeigt, zeigt die schwarze Kurve den an der Prüfmaschine gemessenen Kolbenweg. Die rote Kurve ist die berechnete Verformung der Maschine und die blaue Kurve ist die berechnete Verformung der Probe. Diese Verformung der Probe wird aus dem Kolbenweg und den Extensometermessungen errechnet. Der Kolbenweg beinhaltet jedoch, wie bereits Anfangs im Kapitel erwähnt, die Verformung der Maschine. Diese muss also zunächst ermittelt werden. Formel (3) beschreibt die Annahme, dass sich die Gesamtverformung des Systems (Kolbenweg) aus der Verformung der Maschine (rote Linie) und der Verformung der Probe zusammensetzt.

$$s_{\text{System}} = s_{\text{Maschine}} + s_{\text{Probe}} \quad (\text{Gesamtverformung des Systems, 3})$$

Die Verformung des Systems (Kolbenweg) sowie die Verformung der Probe bis zum Bruch (Extensometermessungen) sind bekannt. Für den pre-failure Bereich können die Messwerte der Extensometer als Verformung der Probe verwendet werden. Dazu wird das in Formel (2) ermittelte  $e_{\text{axial}}$  mit der Ausgangslänge der Probe multipliziert. Durch Subtraktion der Probenverformung vom Kolbenweg kann die Verformung der Maschine bei der Belastung ermittelt werden.

Da die Extensometer nach dem Bruch jedoch nicht mehr aussagekräftig sind, wird für den post-failure Bereich angenommen dass sich die Maschine beim Entlasten elastisch rückverformt. Zur Verifizierung dieser Annahme wurde ein Versuch an einem Aluminiumzylinder durchgeführt. Dieser Zylinder mit Durchmesser 70 mm

wurde in drei Stufen auf 600 kN belastet. Die Ergebnisse dieses Tests sind in Abbildung 28 zu sehen.

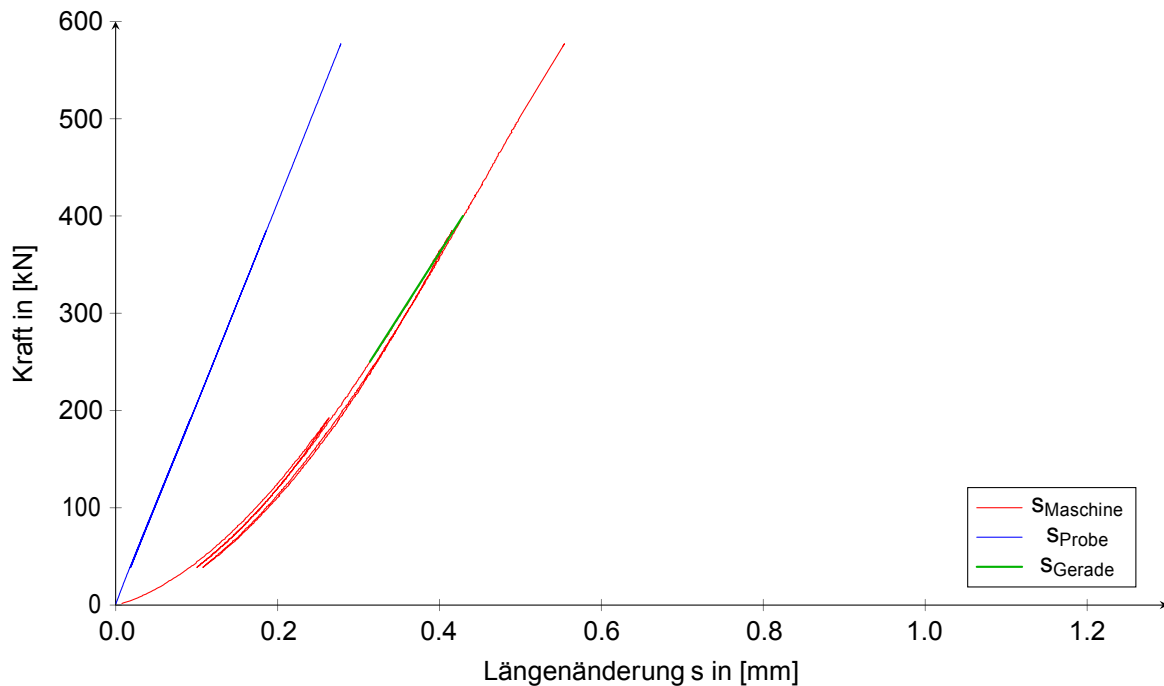


Abbildung 28: Spannungs-Dehnungsdiagramm Aluminiumzylinder

In Abbildung 28 sind die Verformung des Aluminiumzylinders (blau), der Maschine (rot) und der für die Berechnungen angenommene Rückverformungspfad der Maschine (grün) eingezeichnet. Der Aluminiumzylinder verhält sich dabei linear elastisch mit einem E-Modul von 75 GPa und weist den selben Spannungspfad für Be- und Entlastung auf. Die rot eingezeichnete Prüfmaschine zeigt dagegen ein von der Spannung abhängiges Verformungsverhalten welches erst im oberen Spannungsbereich ab  $\sim 200$  kN annähernd linear wird. In Abbildung 28 ist außerdem zu sehen dass sich Be- und Entlastungspfad nur geringfügig voneinander unterscheiden. Der Entlastungspfad der Maschine ist etwas steifer als der Pfad der Belastung.

### 5.3 Berechnung der Probenverformung in radialer Richtung

Die Verformung der Probe in radialer Richtung wurde mittels einer Umfangsdehnungskette ermittelt. Aus dem Zusammenhang:  $\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta r \cdot 2\pi}{r \cdot 2\pi} = \frac{\Delta r}{r}$  zeigt sich, dass die Begriffe Querdehnung und Umfangsdehnung synonym verwendet werden können. Für die Messung muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Messkette die Umfangsänderung aufgrund der geometrischen Anordnung nicht direkt messen kann. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 29 verdeutlicht.

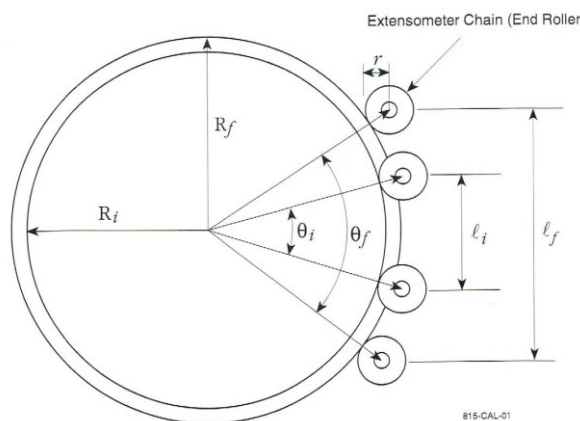


Abbildung 29: Messproblematik der Umfangsmessung (MTS Systems, 1996)

Der Extensometer kann nur die Länge der Sekante zwischen den letzten Kettengliedern messen. Für die Ermittlung der Umfangsdehnung wird aber die Zunahme der Bogenlänge benötigt. Aus diesem Grund wurde zur Ermittlung der Umfangsdehnung Formel (4) verwendet (MTS Systems, 1996):

$$\Delta C = \frac{\Delta l \cdot \pi}{\sin \frac{\theta_i}{2} + \pi - \frac{\theta_i}{2} \cdot \cos \frac{\theta_i}{2}} \quad (\text{Umfangsdehnung, 4})$$

Diese Formel beschreibt die Abhängigkeit der Umfangsvergrößerung ( $\Delta C$ ) vom Messwert des Extensometers ( $\Delta l$ ) und dem initialen Öffnungswinkel ( $\theta_i$ ) des Extensometers bezüglich der Probe. Dieser initiale Öffnungswinkel kann mithilfe Formel (5) aus den Radien von Probe ( $R_i$ ) plus Umfangskette ( $r$ ), welche vor jedem Versuch festgehalten werden, und aus der Kettenlänge ( $l_c$ ) berechnet werden. (MTS Systems, 1996)

$$\theta_i = 2\pi - \frac{l_c}{R_i + r} \quad (\text{Initialer Öffnungswinkel des Umfangsextensometers, 5})$$

Dazu kann, wie schon bei der axialen Verformung, der Graph gezeichnet werden. Abbildung 30 zeigt die axiale Spannung, aufgetragen über die Querdehnung der

Probe, BBK-282-59 für den gesamten Versuch. Dabei bedeutet ein negatives Vorzeichen eine Vergrößerung des Umfangs.

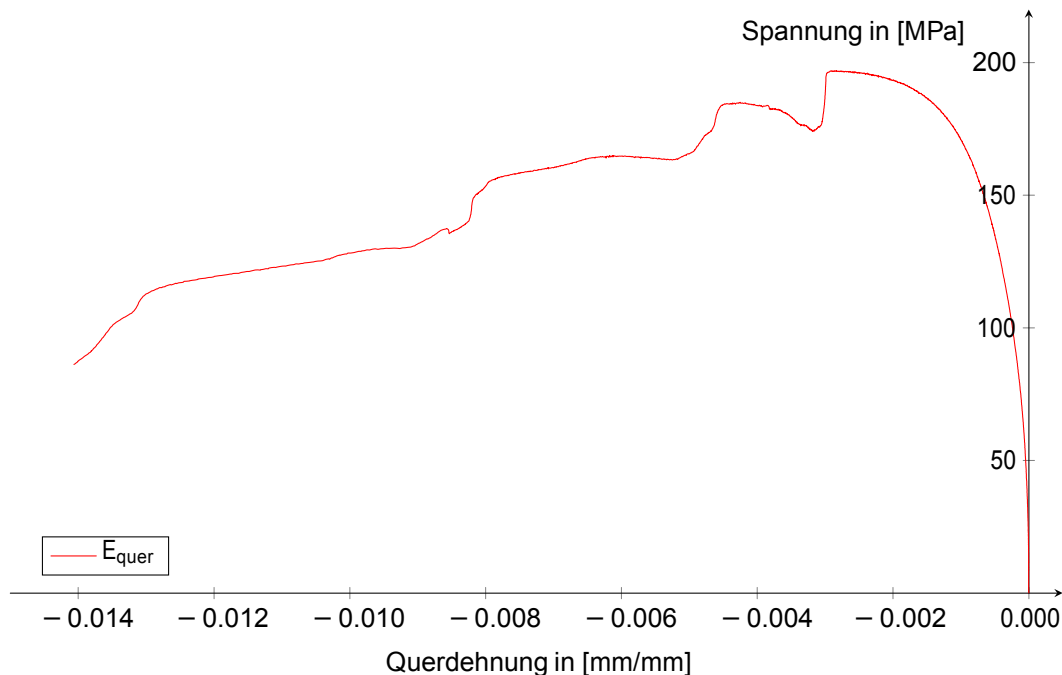


Abbildung 30: Querdehnung der Sandsteinprobe BBK-282-59

Aus Abbildung 30 ist auch zu entnehmen dass die Querdehnung der Probe über den ganzen Versuch hinweg ständig zunimmt. Die Querdehnung kann in zwei Teile aufgeteilt werden (Mutschler, 2004). Der elastische Anteil der Querdehnung kann sich im Gegensatz zum inelastischen Anteil bei Entlastung rückverformen. Der inelastische Teil wird der Entstehung von Mikrorissen zugeordnet. Die rasche Zunahme der Querdehnung vor Eintritt des Versagens ist ein Resultat von instabilem Risswachstum. (Jaeger u. a., 2011;2009;2007;; Brady und Brown, 2006)

## 5.4 Volumetrische Verformung

Aus der axialen Verformung und der radialen Verformung können nach Formel (6) die jeweiligen volumetrischen Verformungen berechnet werden.

$$e_V = e_{axial} + 2 \cdot e_{radial} \quad (\text{Volumetrische Dehnung, 6})$$

Die grafische Repräsentation dieser Berechnung ist in Abbildung 31 ersichtlich. In dieser Abbildung stellt die blaue Kurve die axiale Verformung, die schwarze Kurve die Querdehnung und die rote Kurve die volumetrische Dehnung dar. Aus der Volumsdehnung ist das Verhältnis von Querdehnung zu Längsdehnung zu erkennen. Zu Beginn des Versuches nimmt die Längsdehnung viel rascher zu als

die Querdehnung. Wenn sich die Spannung jedoch der Bruchspannung nähert überwiegt der Anteil der Querdehnung deutlich. Hallbauer u. a. (1973) sprechen von einer Zunahme der Risse um das Siebenfache bei der Erhöhung der axialen Belastung von 0,8 auf  $0,9 \cdot \sigma_{\max}$ . Ein positiver Wert der Volumsverformung bedeutet eine Volumensverkleinerung.

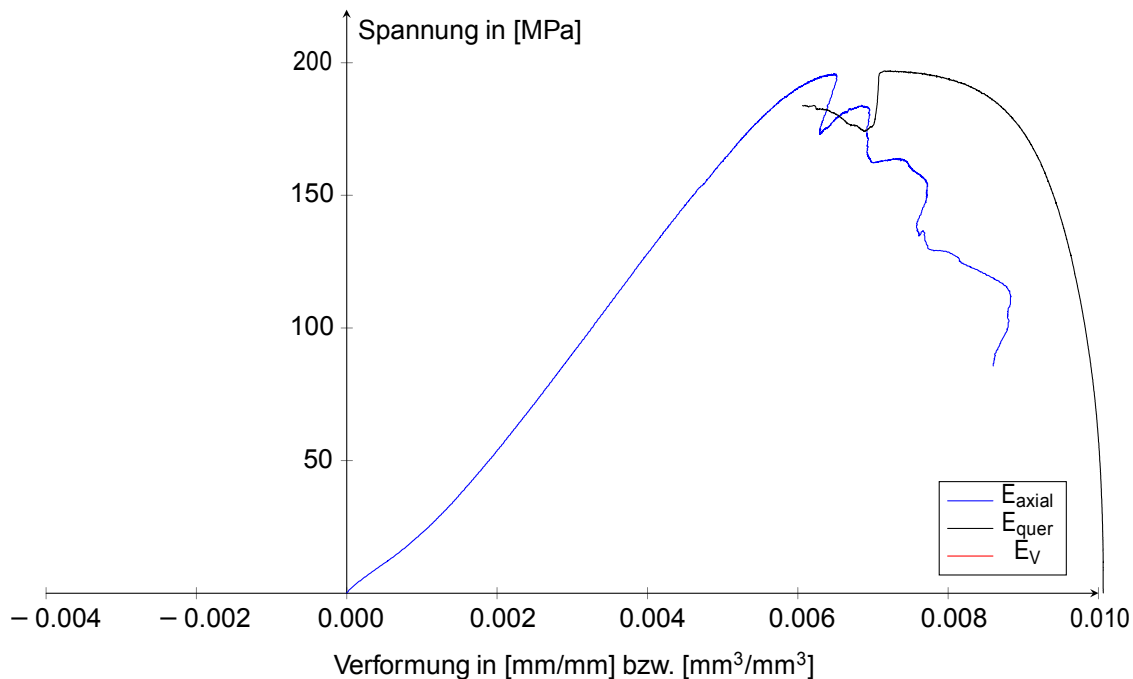


Abbildung 31: Volumsverformung der Sandsteinprobe BBK-282-59

Die Auswertungen der Volumsdehnung der Proben erfolgt in Kapitel 6.2.6.

## 5.5 Druckfestigkeit

Laut Brady und Brown (2006) ist der Test der einaxialen Druckfestigkeit die am wahrscheinlich häufigsten durchgeführte Untersuchung an Festgestein. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit wurden jedoch nicht nur die Werte der einaxialen Druckfestigkeit bestimmt, sondern auch Druckfestigkeiten im multiaxialen Spannungszustand. In dieser Arbeit werden als "Druckfestigkeit" jeweils die maximal auftretenden Werte der Spannung in axialer Richtung ( $\sigma_1$ ) bezeichnet.

Berechnet wurde die axiale Spannung ( $\sigma_1$ ) durch Division der in Achsrichtung wirkenden Kraft ( $F_{\text{axial}}$ ) durch die Querschnittsfläche ( $A_0$ ) der unverformten Probe. Dieser Zusammenhang ist in Formel (7) zu sehen.

$$\sigma_1 = \frac{F_{\text{axial}}}{A_0} \quad (\text{Druckfestigkeit, 7})$$

Der folgende Graph (Abbildung 32) zeigt die Druckfestigkeit ( $\sigma_{1;\max.}$ ) der

Sandsteinprobe BBK-282-59 eingezeichnet im Spannungs - Dehnungsdiagramm.

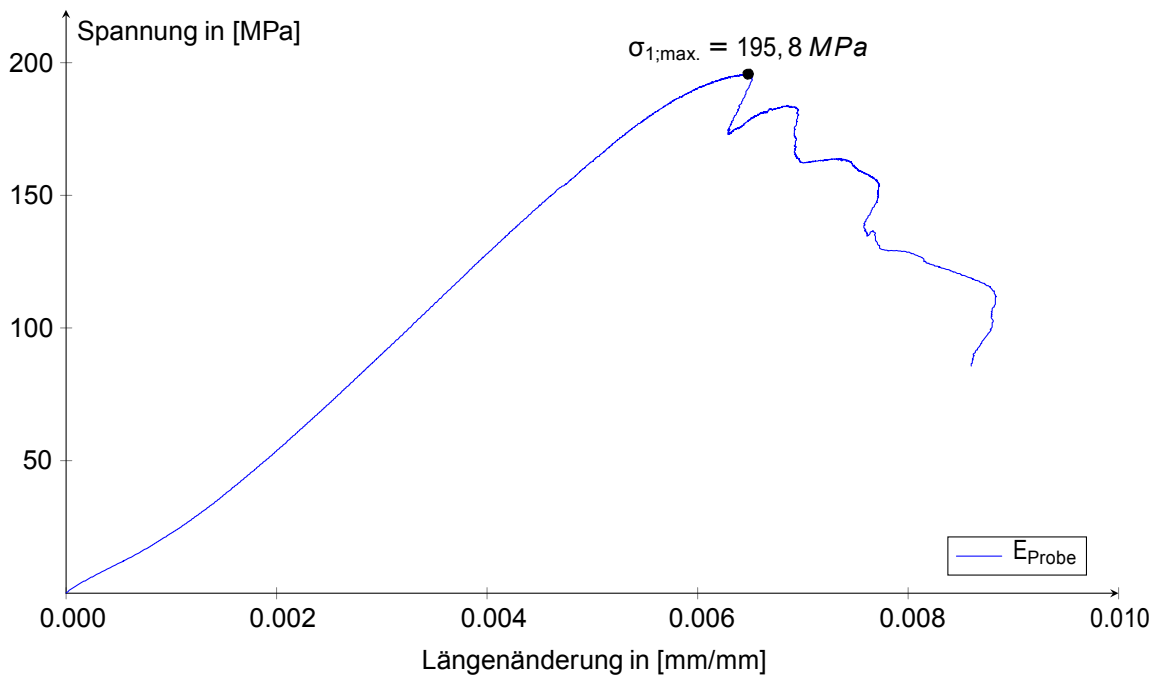


Abbildung 32: Spannungs - Dehnungsdiagramm der Sandsteinprobe: BBK-282-59

Diese Probe hatte zum Zeitpunkt der maximalen Druckfestigkeit einen Umschlingungsdruck von ca. 2,9 MPa. Die Berechnung dieses Umschlingungsdruckes beschreibt das nachfolgende Kapitel.

---

## 5.6 Umschlingungsdruck

---

Zur Berechnung des Umschlingungsdruckes wurden einige Annahmen getroffen. Diese Annahmen werden im Folgenden erläutert.

- Es wird angenommen, dass der Umschlingungsdruck ausschließlich vom Draht auf die Probe aufgebracht wird. Die Schlauchschellen an den beiden Enden der Probe werden nur zur Befestigung des Drahtes eingesetzt und werden bei der Berechnung des Umschlingungsdruckes nicht berücksichtigt.

- Es wird eine ideale Wicklung angenommen.

Geringfügige

Wicklungsungenauigkeiten müssen jedoch aufgrund des Herstellungsprozesses angenommen werden.

- Es wurde angenommen, dass die Änderung des Umfangs der Probe, der Längenänderung des Drahtes entspricht.

- über die Kesselformel (8) wurde aus der Spannung im Draht auf den Innendruck (= Umschlingungsdruck) zurückgerechnet.

$$\sigma_t = \frac{\rho_i \cdot d}{2 \cdot s} \quad (\text{Kesselformel, 8})$$

Für die Gesteinsproben entspricht hierbei  $\sigma_t$  der Spannung im Draht und  $\rho_i$  dem Umschlingungsdruck. Das  $s$  in dieser Formel symbolisiert die Wandstärke im Kessel. Als Annäherung wurde angenommen, dass die Querschnittsfläche des Drahtes der Querschnittsfläche der Kesselhöhe zugerechnet wird. Für die 3 mm Wicklung wird der Drahtquerschnitt also auf 3 mm Kesselhöhe aufgeteilt. Zu diesem Zweck wurde mit Formel (9) für beide Wicklungsabstände je eine äquivalente Wandstärke ausgerechnet. Bei einem Wicklungsabstand von 5 mm muss demnach die Drahtquerschnittsfläche je 10 mm Probenhöhe zweimal berücksichtigt werden.

$$s_{\text{aequiv. 5mm}} = \frac{2 \cdot A_0}{10 \text{ mm}} = 0,226 \text{ mm} \quad (\text{äquivalente Wandstärke, 9})$$

Anhand dieser Annahme wird die Spannung im Draht in eine entsprechende Spannung im Vergleichskessel umgewandelt. Die entsprechende Wandstärke für die engere Wicklung mit 3 mm Abstand beträgt 0,377 mm. Hierbei wird nicht berücksichtigt dass sich die Querschnittsfläche des Drahtes im Verlauf des Versuches ändert. Daraus ergibt sich die Formel zur Berechnung der Umschlingungsspannung zu:

$$\rho_i = \frac{\sigma_t \cdot 2 \cdot s_{\text{aequiv.}}}{d} \quad (\text{Formel zur Berechnung der Umschlingungsspannung, 10})$$

Somit stellt der Wicklungsabstand ein wichtiges Werkzeug zur Steuerung des Umschlingungsdruckes dar. Eine Reduzierung des Wicklungsabstandes von 5 mm auf 3 mm sorgt nach Formel (11) um einen um 67 % größeren Umschlingungsdruck bei der selben Spannung  $\sigma_t$ .

$$\left( \frac{s_{\text{aequiv.,3mm}}}{s_{\text{aequiv.,5mm}}} \right) = 167\% \quad (\text{Vergrößerung der Umschlingungsspannung, 11})$$

- Für die Berechnung der Längenänderung stellt der Umfang der Probe und nicht der Drahtmittelpunkt die Ausgangslänge des Drahtes dar. Die Spannungsverteilung über den Drahtquerschnitt wird als konstant angenommen. Eine Verjüngung der Probe infolge der Dehnung wird ebenfalls nicht berücksichtigt.
- Vom Institut für Umformtechnik wurden am Draht Zugversuche durchgeführt, deren Ergebnisse zu einer Draht-Kennlinie führten. Die Spannungsermittlung im

Draht erfolgte auf Basis dieser Kennlinie.

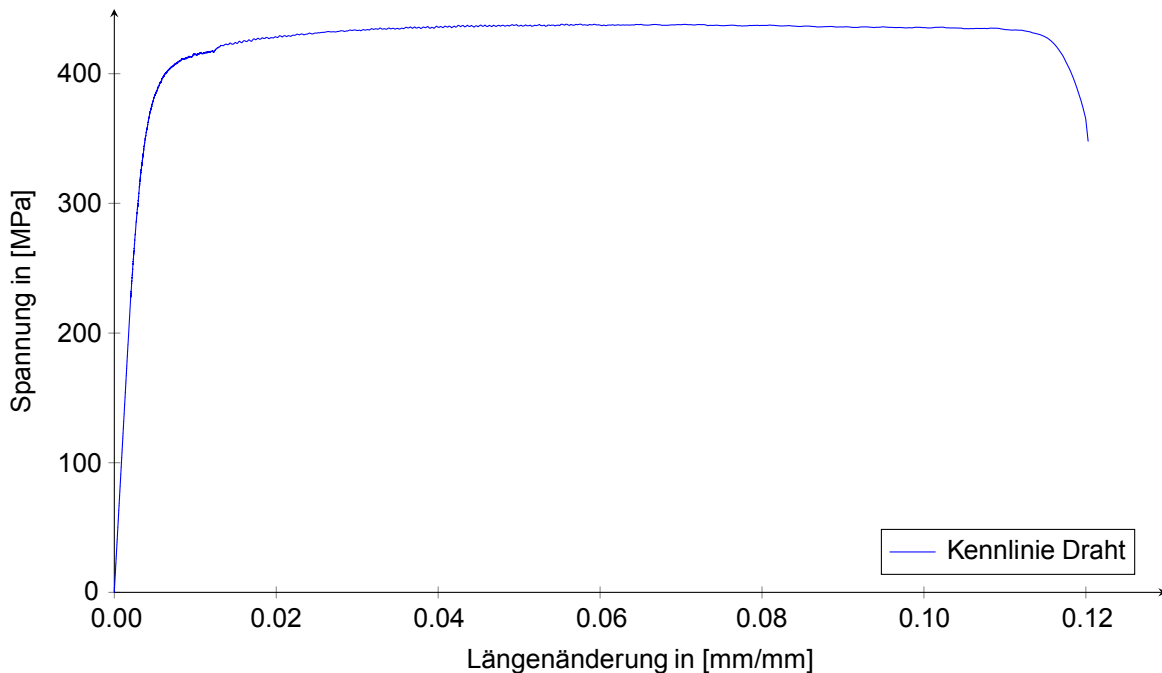


Abbildung 33: Kennlinie des Drahtes aus Zugversuchen durch das Institut für Umformtechnik in Leoben

Die Kennlinie in Abbildung 33 zeigt die Längsverformung des Drahtes bei einer entsprechenden Zugspannung. Gemäß der Annahme, dass die Querdehnung der Probe der Längsdehnung des Drahtes entspricht, lässt sich daher die Spannung im Draht bei jeder Querdehnung ablesen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Draht bei der Aufbringung auf die Probe vorgespannt ist. Daher gilt für die Berechnung der Längenänderung des Drahtes folgende Formel:

$$\epsilon_{\text{Vorsp.}} + \epsilon_{\text{quer}} = \epsilon_{\sigma_1} \quad (\text{Berücksichtigung der Vorspannung des Drahtes, 12})$$

Als Beispiel sei in Abbildung 34 die Probe BBK-351-08 angeführt:

Bei der Aufbringung des Drahtes war dieser einer Vorspannkraft von 49 N ausgesetzt. Das entspricht einer Zugspannung von  $\sigma_{\text{Vorsp.}} = 43,4 \text{ MPa}$  (Punkt **A** in Abbildung 34) und somit einer Anfangsdehnung von  $\epsilon_{\text{Vorsp.}} = 0,000385 \text{ mm/mm}$  (**C**). Bei der maximalen Druckfestigkeit von  $\sigma_1 = 187,46 \text{ MPa}$  hat diese Probe eine gemessene Querdehnung von  $\epsilon_{\text{quer}} = 0,00453 \text{ mm/mm}$ . Addiert man diese Dehnungen so ergibt sich die Dehnung des Drahtes zum Zeitpunkt der maximalen Druckfestigkeit mit  $\epsilon_{\sigma_1} = 0,00491 \text{ mm/mm}$  (**D**) bei der der die Probe umschlingende Draht somit unter einer Zugspannung von 381,54 MPa steht (**E**). Setzt man diese Spannung als  $\sigma_t$  in Formel (10) ein, erhält man daraus die Umschlingungsspannung



mit 3,45 MPa.

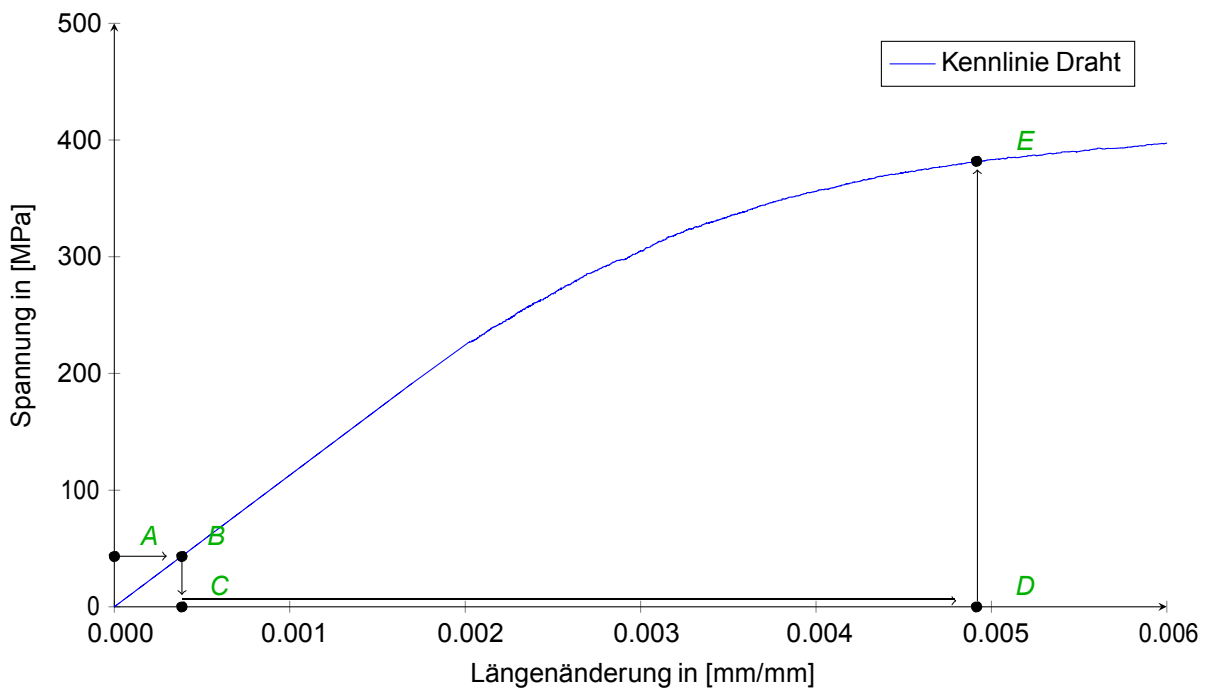


Abbildung 34: Spannung im Draht der Probe BBK-351-01

---

## 5.7 Durchschnittskurven

---

Da die Ergebnisse der einzelnen Versuche nicht sehr stark voneinander abweichen, wurden jeweils drei Einzelversuche zu einem repräsentativen Versuch zusammengefasst. Als "Kontrollvariable" wurde zu diesem Zweck die Querdehnung herangezogen. Das heißt es wurden die Mittelwerte jener Werte gebildet, die eine ähnliche Querdehnung aufweisen. Dieses Vorgehen ist insbesondere für den Nachbruchbereich bedeutend. Die Querdehnung wurde deshalb zu diesem Zweck herangezogen, da dies die einzige Variable ist, welche (theoretisch) ständig zunimmt. Durch das Sensorrauschen ist auch der Messwert der Querdehnung nicht monoton steigend. Diese Abweichungen sind aber vernachlässigbar klein. Dadurch kann jedem x-Wert ein eindeutiger y-Wert zugeordnet werden. Der einzige andere Wert der monoton steigend ist, ist die Zeit. Dieser Wert ist allerdings versuchsunabhängig und daher nicht als Kontrollvariable geeignet.

---

## 5.8 Zerstörungsarbeit

---

Unter der Zerstörungsarbeit wird die Energie verstanden die benötigt wird um eine Gesteinsprobe bis zu einem bestimmten Punkt zu verformen. Dieser Zusammenhang ist in Formel (13) beschrieben.

$$W_{\text{Zerst.}} = \int_0^s F_{\text{axial}} ds \quad (\text{Zerstörungsarbeit, 13})$$

Dabei ist  $F_{\text{axial}}$  die Kraft die in axialer Richtung auf die Probe einwirkt, und  $s$  der Weg um den die Probe verformt wird. Abbildung 35 stellt eine grafische Repräsentation dieses Zusammenhangs dar. Dabei entspricht die blau gefärbte Fläche unter der Kurve im Kraft - Wegdiagramm der Energie die notwendig ist um eine Marmorprobe um 0,15 mm zu verformen.

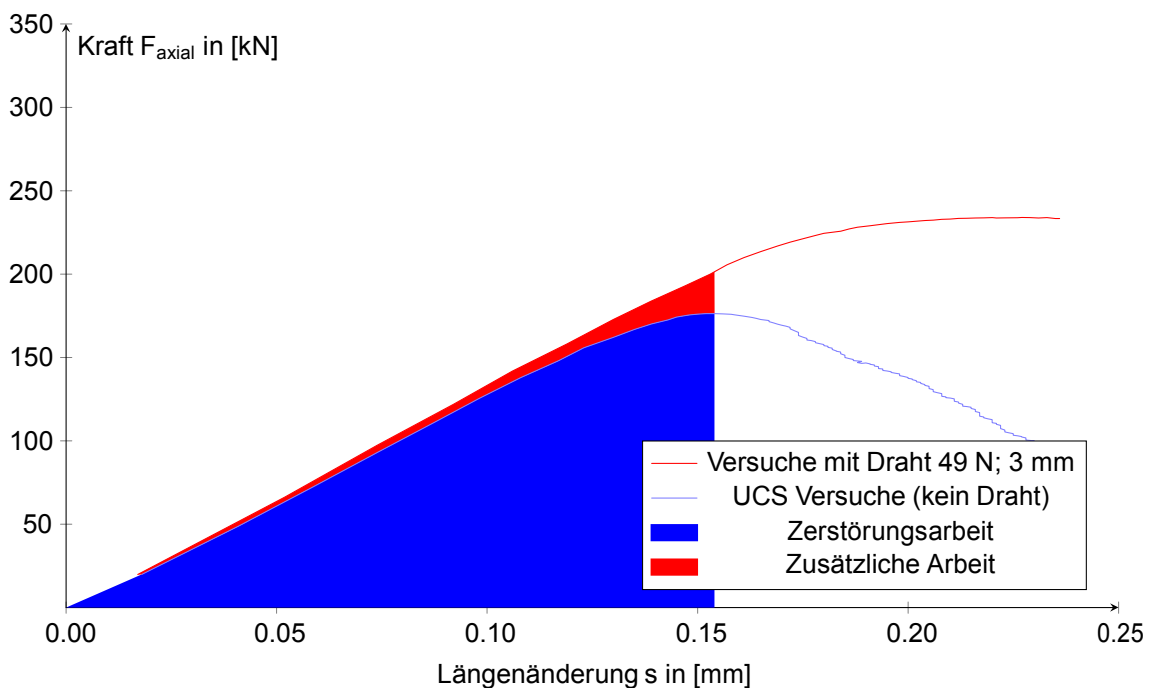


Abbildung 35: Zerstörungsarbeit Marmor im Spannungs - Dehnungsdiagramm

In diesem Diagramm sind zusätzlich zu den blau eingezeichneten Einaxialen Druckversuchen auch Versuche eingezeichnet die mit Draht umwickelt waren. In der Abbildung ist zu sehen dass für diese Versuche mehr Energie aufgewendet werden muss um die Proben zu verformen. Diese zusätzliche Energie ist als rote Fläche dargestellt. Wenn die Zerstörungsarbeit wie in Abbildung 36 als Summenkurve gezeichnet wird, kann daraus sofort die Energie abgelesen werden, die benötigt wird um eine Probe bis zu einem bestimmten Punkt zu verformen.

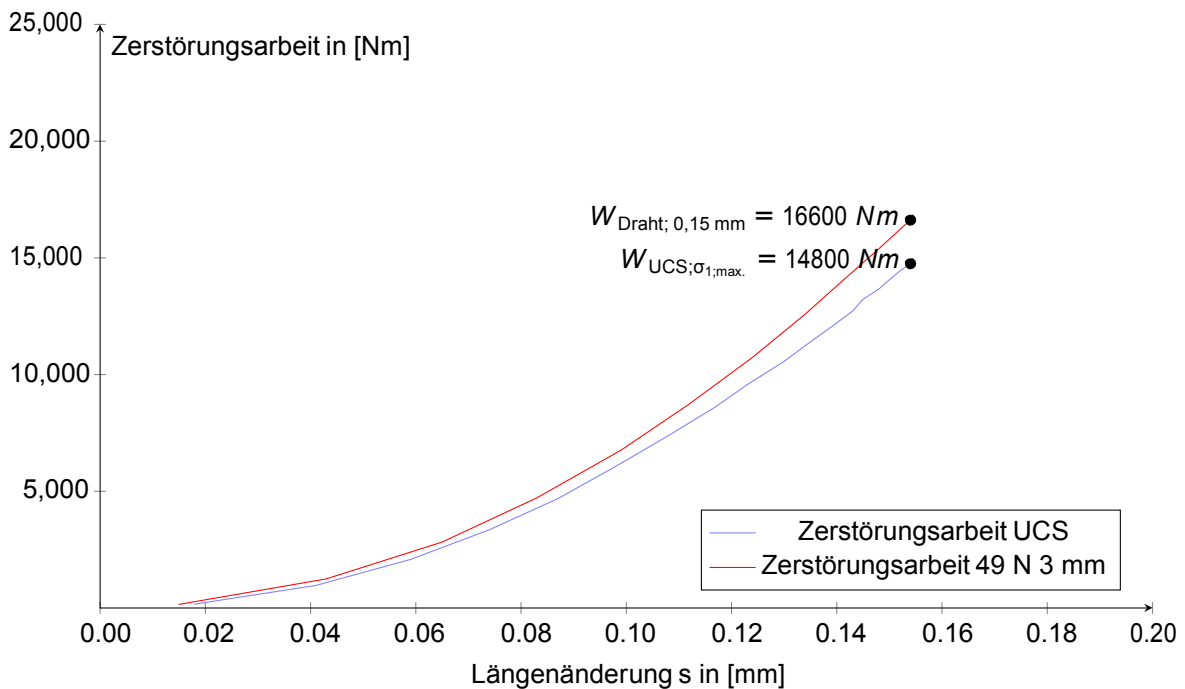


Abbildung 36: Summenkurve der Zerstörungsarbeit

Um eine Marmorprobe bis zum Bruch (bei  $\epsilon_{\text{axial}} = 0,15 \text{ mm}$ ) zu verformen ist bei einem einaxialen Test somit eine Energie von 14800 Nm nötig. Um eine mit Draht umwickelte Probe bis zu diesem Punkt (0,15 mm) zu verformen sind hingegen 16600 Nm notwendig. Es ist davon auszugehen, dass bei den mit Draht umschlungenen Proben ein Teil der Energie verwendet werden muss um den Draht zu verformen. Um diese Arbeit zu ermitteln wird wieder auf Formel (13) zurückgegriffen. Die zur Berechnung der Arbeit benötigte Spannung im Draht ist bereits von der Berechnung der Umschlingungsspannung bekannt. Die Arbeit die für die Verformung des Drahtes aufgewendet werden muss ergibt sich also zu:

$$W_{\text{Zerst.}} = \int_0^s F_{\text{Draht}} ds \quad (\text{Arbeit im Draht, 14})$$

Dabei ist  $F_{\text{Draht}}$  die Zugkraft im Draht, und  $s$  die Gesamtlänge um die der Draht gezogen wird. Für die Ermittlung dieser Länge wird angenommen, dass sich die Probe gleichmäßig verformt und rund 80mm der Probe umwickelt sind. Der Einfluss der Schlauchschellen wurde auch hier vernachlässigt. Für die Proben mit 5 mm Wicklungsabstand wurde mit 16 Umwicklungen, für diejenigen mit 3 mm Wicklungsabstand mit 27 Wicklungen gerechnet. Die Längenänderung je Umwicklung wurde wie bei der Umschlingungsspannung aus der Querdehnung ermittelt. Wenn man diese Arbeit, die als Verformungsarbeit am Draht verrichtet wird, von der Zerstörungsenergie abzieht welche in das System Probe + Draht fließt, erhält man die Arbeit die als Verformungsenergie in die Probe fließt. Diese Arbeit ist

in Abbildung 37 zu sehen.

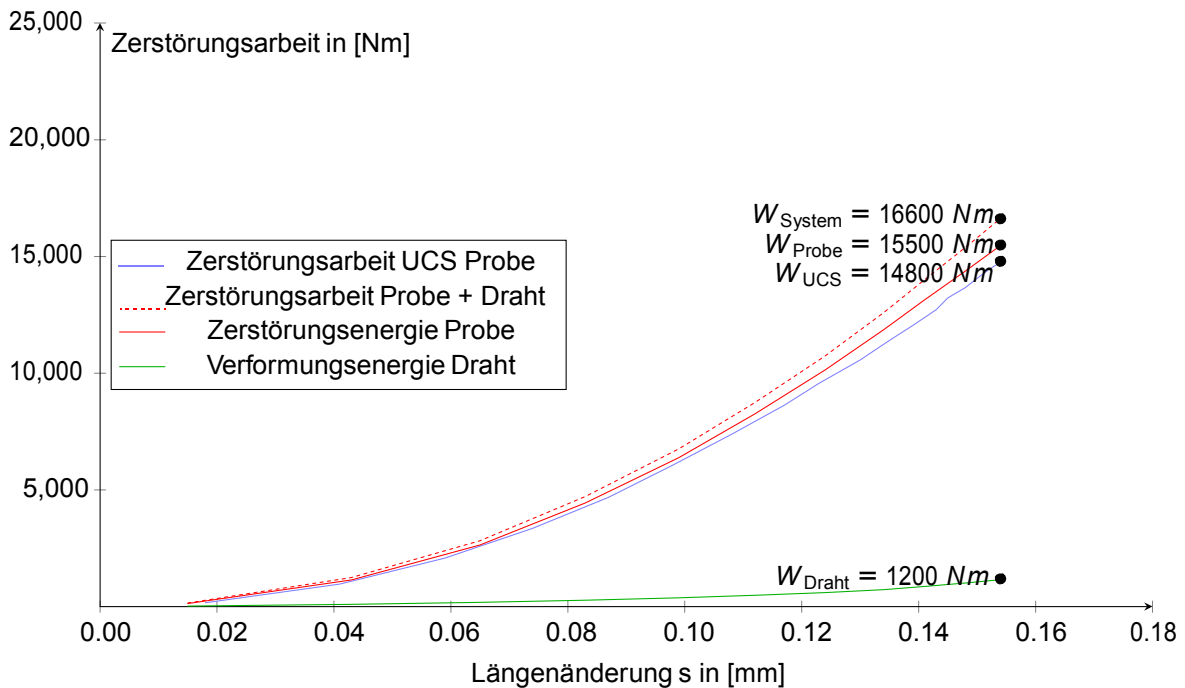


Abbildung 37: Summenkurve Zerstörungsarbeit, Verformungsarbeit Draht, Verformungsarbeit Probe [Marmor, UCS und 49 N 3 mm]

Diese Berechnung der Zerstörungsenergie erfolgte nur bis zur Druckfestigkeit ( $\sigma_1 = \text{max.}$ ). Nach diesem Punkt entsprechen die Messwerte der Umfangsdehnungskette nicht mehr ausschließlich der Querdehnung, sondern auch der Verschiebung der Teilstücke der gebrochenen Probe. Die Zerstörungsenergie ist somit nicht mehr ausschließlich dem Verformen der Probe zuzuordnen.

---

## 5.9 Rissauswertung

---

Die Auswertung der Risse erfolgte in zwei Phasen. In der ersten Phase wurden die makroskopisch sichtbaren Risse fotografisch festgehalten. Um auch die Mikrorisse quantitativ zu erfassen wurden in einer zweiten Phase Dünnschliffe hergestellt, anhand derer die Verteilung der Mikrorisse über den Querschnitt bestimmt werden konnte.

---

### 5.9.1 Makroskopische Rissauswertung

---

Die Proben wurden nach der Versuchsdurchführung und anschließender Fotodokumentation in Epoxidharz eingebettet. Um die Risse makroskopisch besser erkennen zu können, wurde das Harz mithilfe eines fluoreszierenden Sprays eingefärbt. Nach der Aushärtedauer des Harzes von 48 Stunden wurden die zylindrischen Proben mit der Gesteinssäge halbiert. Der Schnitt wurde dabei so gelegt, dass die Schnittebene normal auf die Rissebene stand. (Siehe Abbildung 38)

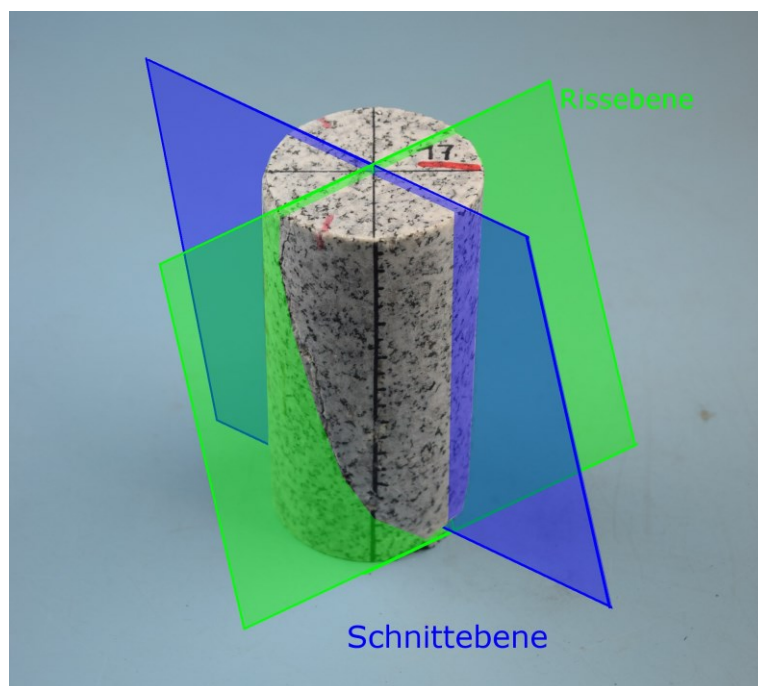


Abbildung 38: Riss- und Schnittebene

---

## 5.9.2 Auswertung der Mikrorisse

---



Abbildung 39: Rissauswertung der Probe BBK-351-07

### Herstellung der Dünnschliffe

Die Dünnschliffe wurden vom Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre angefertigt. Dazu wurden von den halbierten Prüfkörpern jeweils zwei Stücke (Abmessungen ca. 20mm x 50 mm) herausgeschnitten. Diese wurden dann zur Glättung der Oberfläche zuerst auf einer 74  $\mu\text{m}$  Diamantschleifscheibe plangeschliffen und anschließend in zwei Stufen zuerst mit 15  $\mu\text{m}$  und dann mit 9  $\mu\text{m}$  großen Siliziumkarbidkörnern geläppt. Anschließend wurden die Proben mittels eines Epoxidharzes (Araldite) auf ein Glasplättchen aufgeklebt. Nach dem Aushärten des Harzes wurden die Probestücke mittels Gesteinssäge vom Glasplättchen abgetrennt. Dann wurde der auf dem Plättchen verbliebene Dünnschliff auch auf der zweiten Seite geläppt. Dies erfolgte in den gleichen zwei Stufen wie vor dem Aufkleben.

## Quantitative Risserfassung

Um die Mikrorisse quantitativ erfassen zu können erfolgten für die betrachteten Seiten der Dünnschliffe entsprechende Digitalisierungen. Die Bilder wurden im Labor des IZR mit dem sich dort befindlichen Mikroskop (Olympus BX51), welches über eine 5 Megapixel Digitalkamera verfügt, festgehalten. Die Auflösung betrug dabei 2576 x 1932 Pixel. Die Bilder wurden anschließend zu einem Gesamtbild zusammengefügt und wie in Abbildung 40 zu sehen, mit einem 1 mm Raster überlagert.

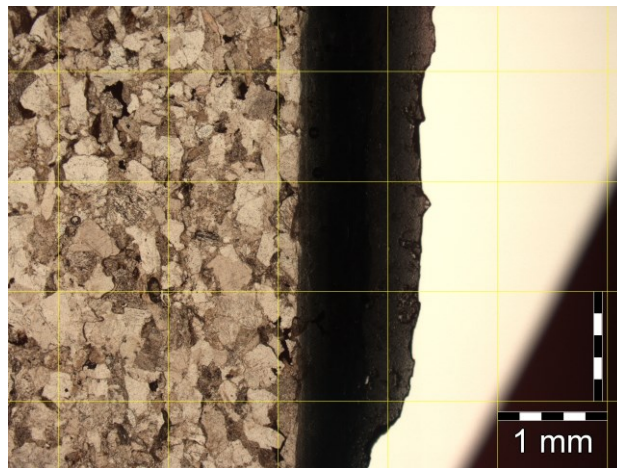


Abbildung 40: Dünnschliff der Sandsteinprobe BBK-282-59; Hälfte 1; Stück b; obere Kante

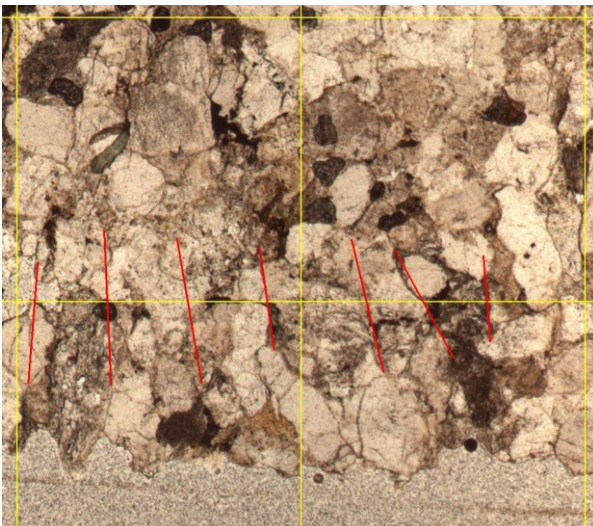


Abbildung 41: Dünnschliff der Probe BBK-282-59; Mit markierten Mikrorissen

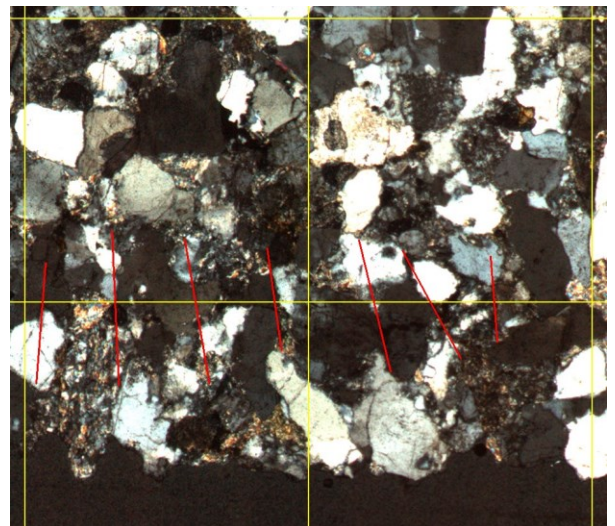


Abbildung 42: Dünnschliff der Probe BBK-282-59; Durch Polarisator betrachtet

Nach dieser Überlagerung wurden jene sichtbaren Mikrorisse gezählt welche eine bestimmte horizontale Linie des Rasters kreuzten. Diese Referenzlinie wurde so gewählt dass ihr Abstand zum Rand des Dünnschliffes 1mm nicht überschritt. Abbildungen 41 und 42 zeigen den selben Ausschnitt der Probe BBK-282-59. Beide Bilder wurden mit 50 facher optischer Vergrößerung aufgenommen. Diese Vergrößerung ergibt sich aus der Multiplikation der einzelnen Vergrößerungsstufen von Okular und Objektiv. (Okular 10x, Objektiv 5x). Abbildung 41 zeigt die Probe im normalen Durchlicht. Abbildung 42 zeigt den selben Ausschnitt der Probe mit zwischengeschaltetem Polarisator.



---

## 6 Diskussion der Ergebnisse

---

Die Aufteilung der Ergebnisdiskussion gliedert sich in die Teile: Druckfestigkeit, Vorspannkraft, Wicklungsabstand, Querdehnung, Volumsdehnung und Risse. Das Kapitel beschreibt die Ergebnisse der durchgeführten Versuche und deren Interpretation.

---

### 6.1 Auswirkungen des Wicklungsabstandes des Drahtes auf die maximale Druckfestigkeit

---

Wie schon bei der Berechnung der Umschlingungsspannung aus dem Wicklungsabstand in Kapitel 5.6 "Umschlingungsdruck" festgestellt, wirkt sich die Verringerung des Abstands der einzelnen Wicklungen stark auf die Steifigkeit des Systems Probe + Draht aus. Demnach erhöht sich, wie bereits in Formel (11) gezeigt, der Umschlingungsdruck bei einer Verringerung des Wicklungsabstandes von 5 mm auf 3 mm um 67 %. Der Wicklungsabstand stellt also ein wichtiges Werkzeug zur Steuerung der Umschlingungsspannung  $\sigma_3$  dar. Im linearen Bereich des Drahtes ( $\epsilon_{\text{quer}} \leq 0,002$  mm/mm) beträgt die Steigerung der Umschlingungsspannung für den Draht mit 5 mm Wicklungsabstand 2,04 MPa je mm Durchmesserergrößerung. Für den Wicklungsabstand 3 mm steigt bei gleicher Querdehnung  $\sigma_3$  um 3,40 MPa. Dieser Einfluss ist daher auch stark von der Eigenschaft der geprüften Gesteine abhängig, sich unter Belastung in radialer Richtung zu verformen. Deshalb werden die Auswirkungen der Wicklungsabstände für jedes Gestein separat betrachtet.

---

### 6.1.1 Auswirkungen der Variation des Wicklungsabstandes auf die maximale Druckfestigkeit beim Sandstein

---

Die Auswirkungen der Veränderung der Wicklungsabstände auf die Druckfestigkeit lassen sich am Besten anhand Abbildung 43 beschreiben.

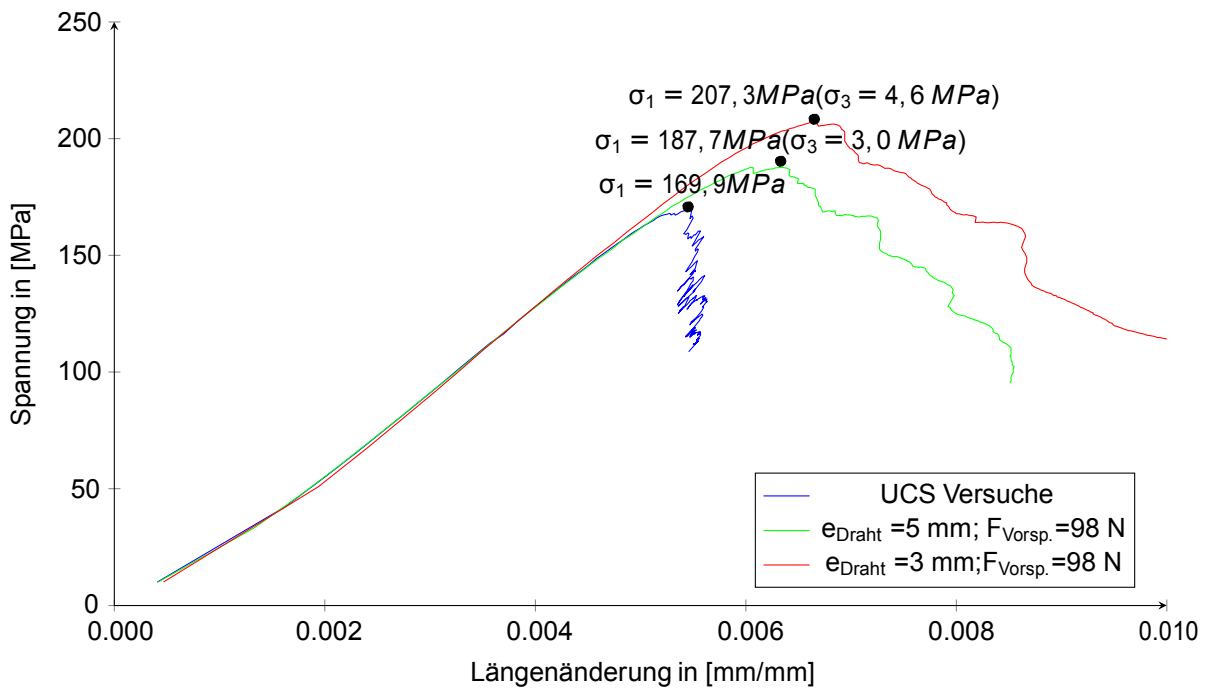


Abbildung 43: Spannungs - Dehnungsdiagramme Sandstein: UCS und umwickelte Proben mit 98 N Vorspannkraft

Aus diesem Diagramm lässt sich herauslesen, dass die Druckfestigkeit der mit Draht umwickelten Proben deutlich ansteigt. Während die einaxiale Druckfestigkeit (UCS) 169,9 MPa beträgt, steigt die Druckfestigkeit bei den Proben mit 5 mm Wicklungsabstand um 10,5 % auf 187,7 MPa und bei den Proben mit 3 mm Wicklungsabstand um 22,0 % auf 207,3 MPa. Aus dieser höheren Druckfestigkeit resultiert auch eine deutlich größere axiale Verformung.

## 6.1.2 Auswirkungen auf die maximale Druckfestigkeit beim Granit

Die Festigkeitssteigerung der Drahtumwicklung wird auch im Falle des Granit Betrachtung der maximalen Druckfestigkeit, wie hier in Abbildung 44 gezeigt, deutlich sichtbar.

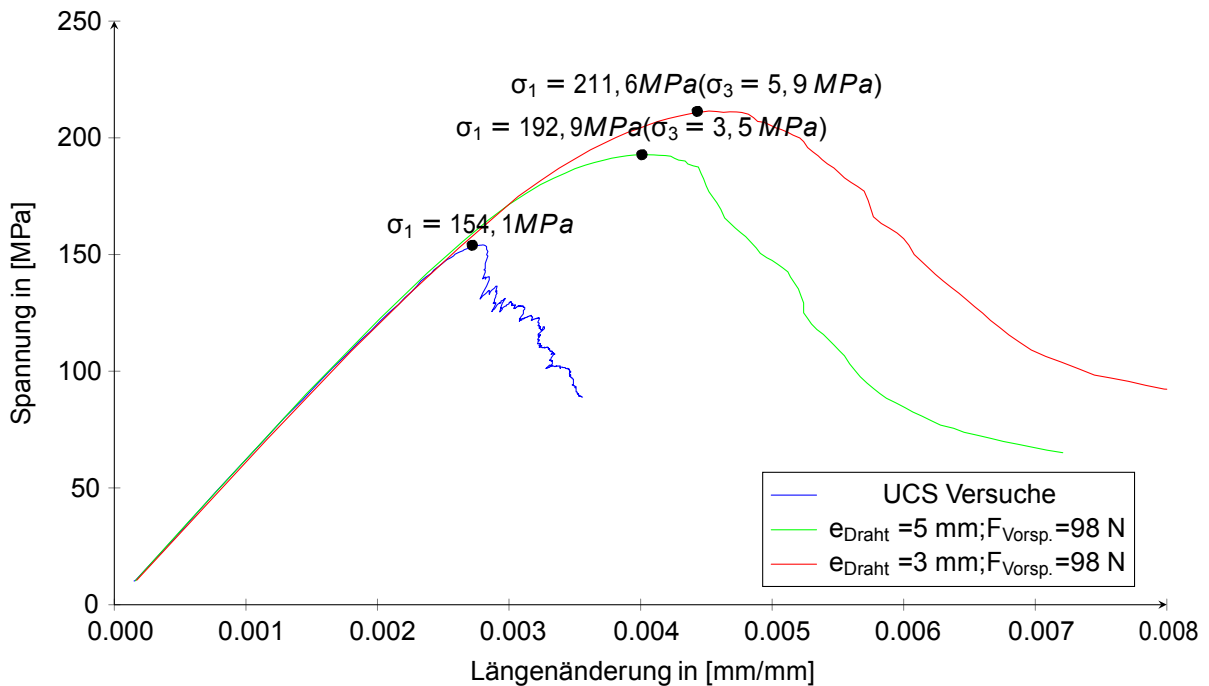


Abbildung 44: Spannungs - Dehnungsdiagramme Granit: UCS und umwickelte Proben mit 98 N Vorspannkraft

Durch die Umwicklung mit Draht steigt bei den Granitproben die maximale Druckfestigkeit von durchschnittlich 154,0 MPa bei den Proben ohne Einspannung, um 25,2 % auf 192,8 MPa bei den Proben mit Wicklungsabstand 5 mm und um 37,6 % auf 211,4 MPa bei den Proben mit 3 mm Abstand zwischen den Drahtwicklungen. Dabei ist anzumerken, dass die Festigkeitssteigerung von UCS auf die weitere Wicklung fast doppelt so groß ist wie der Unterschied von 5 mm auf 3 mm, während beim Sandstein die Festigkeitssteigerung jeweils ungefähr gleich groß ist. Das hängt damit zusammen, dass die Umschlingungsspannung  $\sigma_3$  durch die größere Querdehnung im Falle der Granitproben schon voll aktiviert ist. Der Draht befindet sich zum Zeitpunkt des Versagens bereits im überwiegend plastischen Bereich. Bei den Sandsteinproben hingegen ist der Draht beim Versagen noch im Übergangsbereich zwischen elastisch und plastisch und der Umschlingungsdruck ist somit noch nicht maximal. Die Spannungspfade der Durchschnittskurven sind in Kapitel 6.4.1 genauer beschrieben.

---

### 6.1.3 Auswirkungen auf die maximale Druckfestigkeit beim Marmor

---

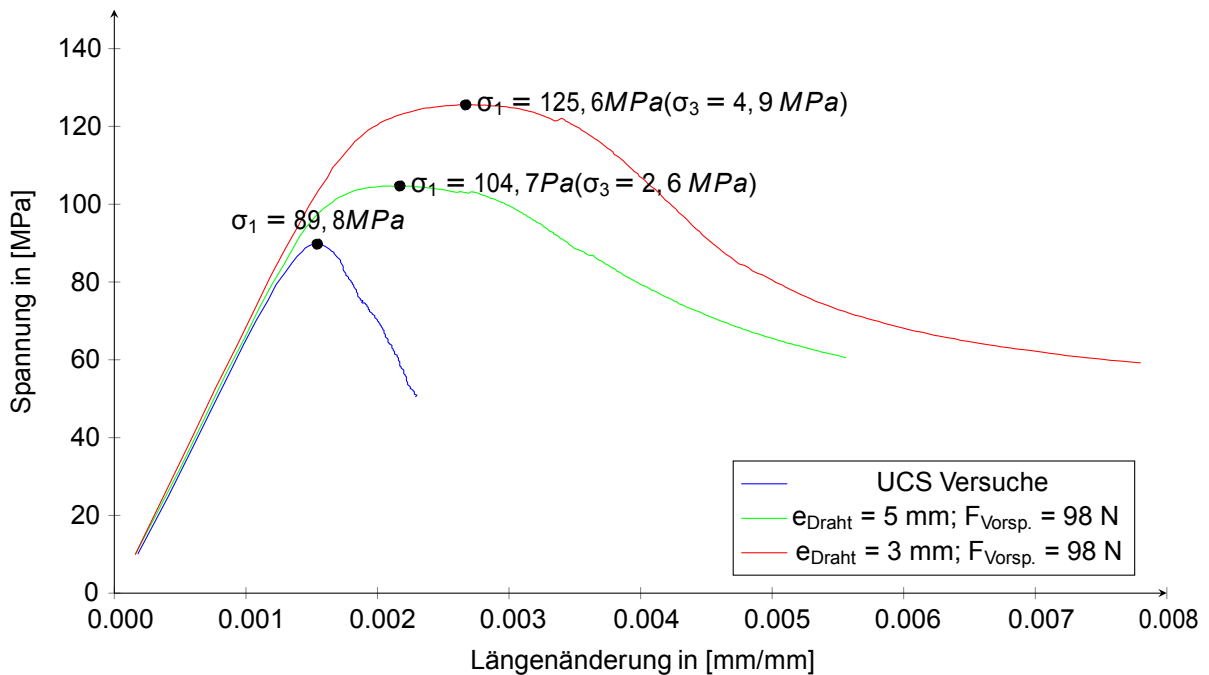


Abbildung 45: Spannungs - Dehnungsdiagramme Marmor: UCS und umwickelte Proben mit 98 N Vorspannkraft

Ähnlich wie beim Granit ist auch beim Marmor der Sprung von UCS auf 5 mm Wicklungsabstand deutlich größer als der Unterschied von 5 mm Wicklung auf 3 mm Wicklung.

---

### 6.2 Auswirkungen der Variation der Vorspannkraft

---

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Gesteine hinsichtlich des Querdehnungsverhaltens führen auch zu unterschiedlich starken Auswirkungen der Veränderung der Vorspannkraft. Aus diesem Grund werden die drei Materialien separat betrachtet.

## 6.2.1 Auswirkung der Variation der Vorspannkraft auf die Druckfestigkeit beim Sandstein

Durch eine Erhöhung der Vorspannkraft von 49 N auf 98 N werden beim Sandstein nur geringfügig höhere Druckfestigkeiten erzielt.

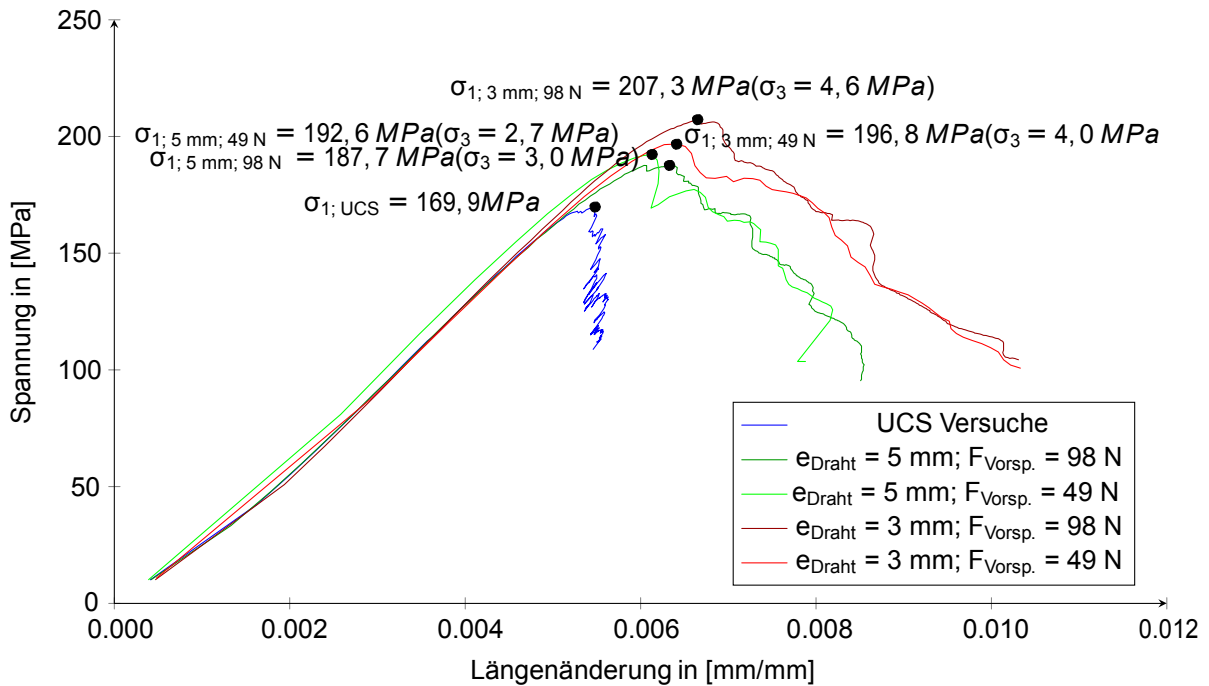


Abbildung 46: Spannungs-Dehnungsdiagramme Sandstein: UCS und umwickelte Proben mit 98 N Vorspannkraft

Die Eckpunkte der Grafik sind in Tabelle 1 angeführt.

Material	Wicklungsabstand	Vorspannkraft	$\sigma_1$	$\sigma_1$
Sandstein	-	-	169.85 MPa	100.00 %
Sandstein	5 mm	49 N	192.36 MPa	113.3 %
Sandstein	5 mm	98 N	187.65 MPa	110.5 %
Sandstein	3 mm	49 N	196.78 MPa	115.9 %
Sandstein	3 mm	98 N	207.29 MPa	122.0 %

Tabelle 1: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Vorspannkraft beim Sandstein

## 6.2.2 Auswirkung der Variation der Vorspannkraft auf die Druckfestigkeit beim Granit

Da die Querdehnung der Proben beim Granit durchwegs so groß ist dass sich der Draht beim Versagen der Probe bereits im überwiegend plastischen Bereich der Verformungskennlinie befindet, hat eine Vergrößerung der Vorspannkraft nur in einem begrenztes Rahmen Einfluss auf die Steifigkeit der Einspannung. Als Resultat erhöht sich die Druckfestigkeit dadurch kaum. Durch das Erreichen der Streckgrenze kann der Draht auch bei einer Zunahme der Querdehnung keine weitere Spannung mehr aufnehmen. Als Ergebnis bleibt die Spannung im Draht, und somit der Seitendruck  $\sigma_3$  ab erreichen einer Längsdehnung des Drahtes von 0,006 mm/mm annähernd konstant. Als maximaler Umschlingungsdruck ergibt sich für die 3 mm Wicklung 6,61 MPa und für die 5 mm Wicklung 3,96 MPa.

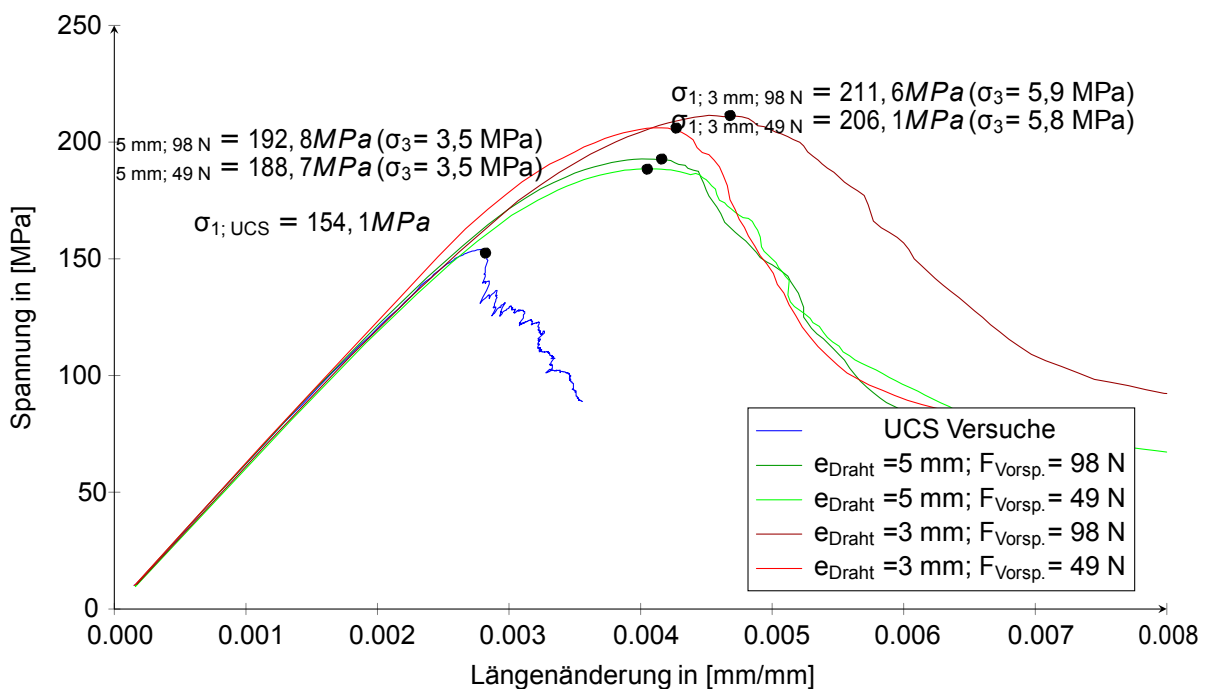


Abbildung 47: Spannungs - Dehnungsdiagramme Granit: UCS und umwickelte Proben mit 49 N bzw. 98 N Vorspannkraft

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 2

Material	Wicklungsabstand	Vorspannkraft	$\sigma_1$	$\sigma_1$
Granit	-	-	154.04 MPa	100.00 %
Granit	5 mm	49 N	188.50 MPa	122.4 %
Granit	5 mm	98 N	192.82 MPa	125.2 %
Granit	3 mm	49 N	206.09 MPa	133.8 %
Granit	3 mm	98 N	211.45 MPa	137.6 %

Tabelle 2: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Vorspannkraft beim Granit

### 6.2.3 Auswirkung der Variation der Vorspannkraft auf die Druckfestigkeit beim Marmor

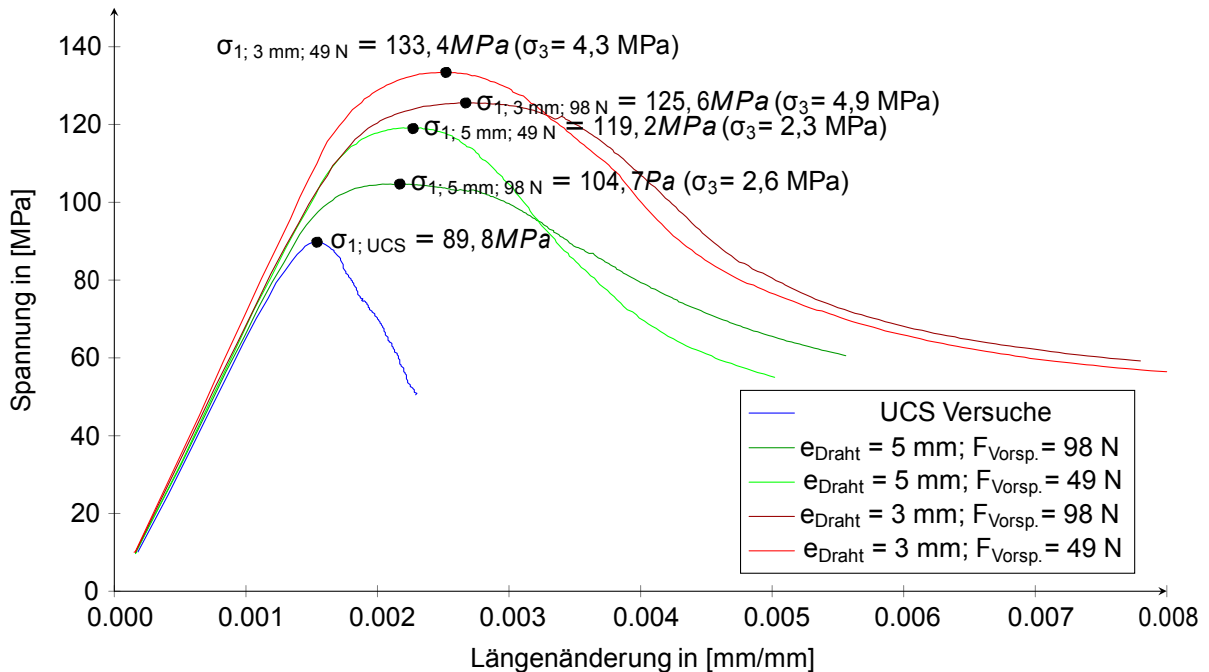


Abbildung 48: Spannungs - Dehnungsdiagramme Marmor: UCS und Umwickelte Proben mit 49 N Vorspannkraft

Bei den Marmorproben sinkt mit der größeren Vorspannkraft die Druckfestigkeit. Dieses Ergebnis steht damit konträr zu den Ergebnissen beim Granit und beim Sandstein. Eine mögliche Ursache ist, dass der Marmor aufgrund seiner geringeren Festigkeit beim Aufwickeln des Drahtes schon vorgeschwächt wird. Für diese Annahme spricht auch, dass die einzelnen Kurven weiter streuen als die Kurven der anderen Versuche. Die Daten der Durchschnittskurven finden sich in Tabelle 3

Material	Wicklungsabstand	Vorspannkraft	$\sigma_1$	$\sigma_1$
Marmor	-	-	89.78 MPa	100.0 %
Marmor	5 mm	49 N	119.17 MPa	132.7 %
Marmor	5 mm	98 N	104.73 MPa	116.7 %
Marmor	3 mm	49 N	133.38 MPa	148.6 %
Marmor	3 mm	98 N	125.56 MPa	139.9 %

Tabelle 3: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Vorspannkraft beim Marmor



---

## 6.2.4 Verhalten der Querdehnung der Proben in Abhängigkeit des Wicklungsabstandes

---

Dieses Unterkapitel behandelt die Frage inwiefern die Umwicklung der Proben mit einem Draht vom Durchmesser von 1,2 mm ausreichend ist um die Querdehnung infolge axialer Beanspruchung zu behindern und wie groß dabei der Einfluss des Wicklungsabstandes ist. Dazu wird die Querdehnung der Proben bei bestimmten Spannungsniveaus verglichen. Die Spannungsniveaus wurden dabei gleichmäßig über den gesamten Spannungsbereich gewählt. Dabei zeigen sich erst bei höheren Spannungsniveaus Unterschiede in der Querdehnung der Proben. Daraus kann gefolgert werden, dass die für den plastischen Anteil der Querdehnung verantwortlichen Mikrorisse erst bei höheren axialen Belastungen entstehen.

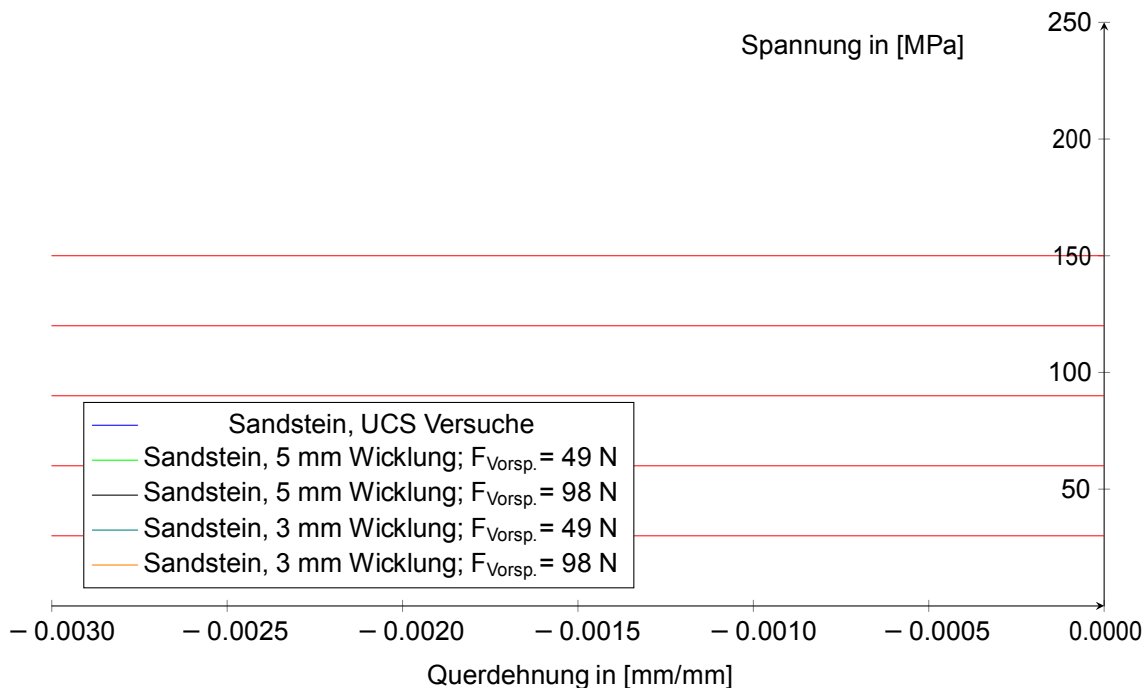


Abbildung 49: Abhängigkeit der Querdehnung vom Abstand der Wicklungen beim Sandstein

Eine Einschränkung der Querdehnung ist beim Sandstein besonders im oberen Spannungsbereich ab 100 MPa recht gut zu sehen. Die Querdehnung der unwickelten Proben ist beim selben Spannungsniveau durchwegs geringer als die der UCS Proben.

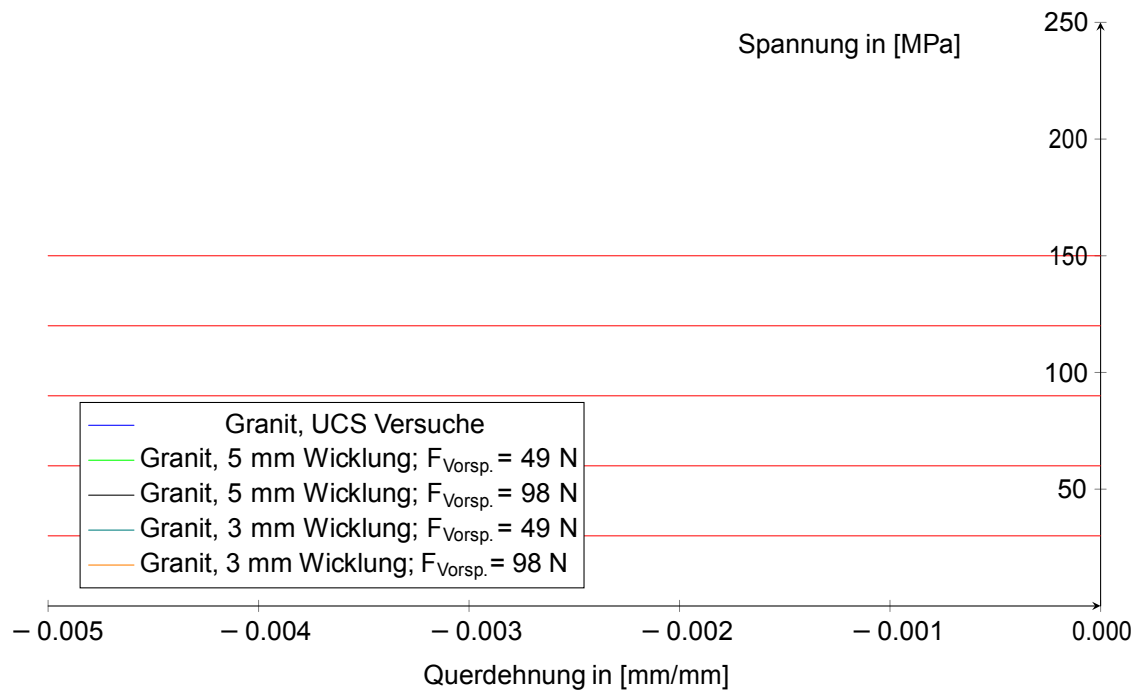


Abbildung 50: Abhängigkeit der Querdehnung vom Abstand der Wicklungen beim Granit

Die Querdehnung der umschlungenen Gesteinsproben unterscheidet sich erst ab ca. 120 MPa maßgeblich von der Querdehnung der UCS Proben. Die Steifigkeit der Umschlingung wirkt sich erst ab 150 MPa aus.

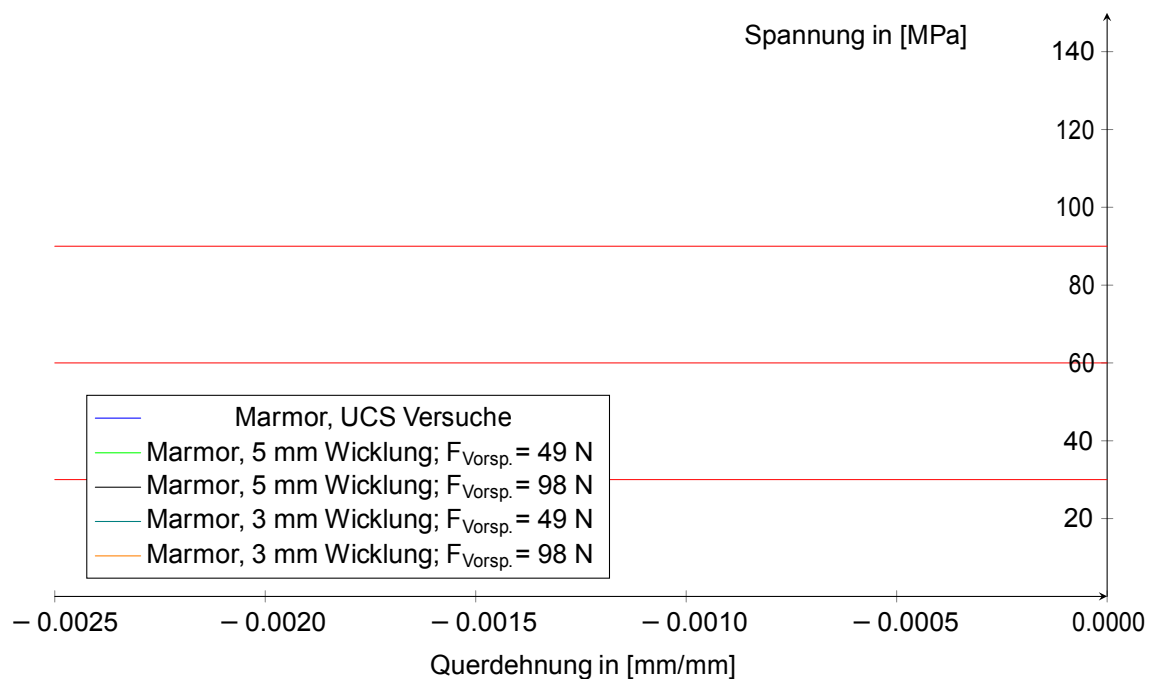


Abbildung 51: Abhängigkeit der Querdehnung vom Abstand der Wicklungen beim Marmor

---

## 6.2.5 Auswirkung der Drahtumwicklung auf das Verhalten nach dem Bruch

---

Das Verformungsverhalten der Proben nach dem Bruch spielt eine entscheidende Rolle. Aus den Ergebnissen zeigt sich, dass die mit Draht umwickelten Proben im post-failure Bereich mehr Spannung aufnehmen können als die Proben, welche nur einem einaxialen Spannungszustand ausgesetzt waren. Dieses Verhalten nach dem Bruch wird sehr stark vom Draht beeinflusst. Wie in Abbildung 52 zu sehen ist kommt es im Bereich der Risse zu lokalen Einschnürungen und Verformungen im Draht.

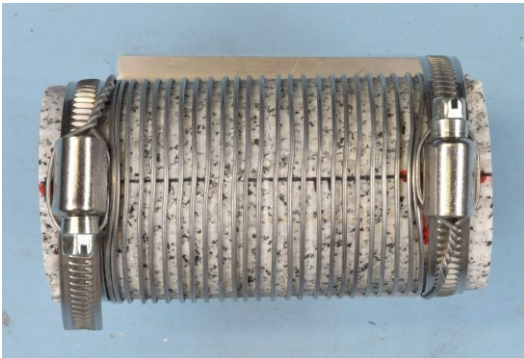


Abbildung 52: Probe BBK-351-14



Abbildung 53: Deformationen im Draht über dem Riss

Das deutet darauf hin dass es in diesem Bereich größere Verformungen gibt als an anderen Stellen. Wie bereits im Kapitel 5.1 "Berechnungen" angemerkt, ist es deshalb nicht zulässig nach dem Bruch die Arbeit, die in die Verformung des Drahtes geht, aus der Querdehnung der Probe zu berechnen.

---

## 6.2.6 Auswirkungen des Wicklungsabstandes auf die Volumsverformung beim Sandstein

---

Ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen war das Verhalten bezüglich Volumsverformung. Die Volumsverformung wurden nach Formel (6) berechnet. Die drei betrachteten Materialien zeigen auch diesbezüglich deutliche Unterschiede. Wie in Abbildung 54 zu sehen, trat die maximale Festigkeit im Falle des Sandsteins erst im positiven Bereich der Volumsverformung auf. In der Abbildung ist die Volumsverformung zur Übersichtlichkeit nur bis zum Maximum von  $\sigma_1$  eingezeichnet.

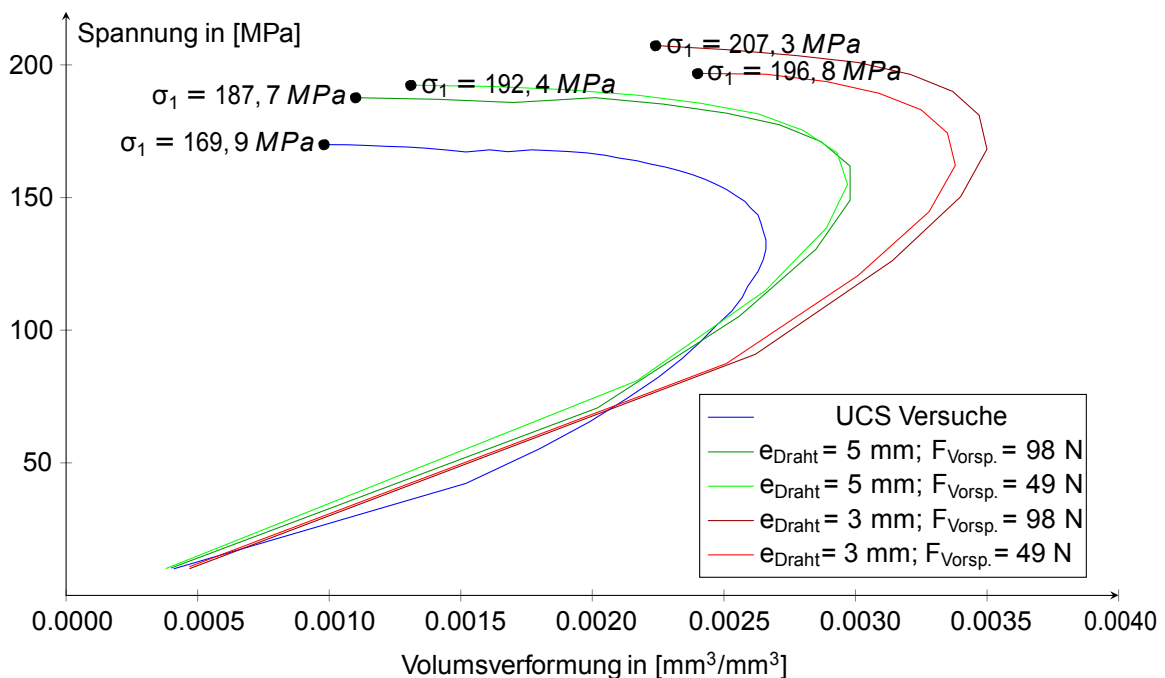


Abbildung 54: Spannungs-Dehnungsdiagramme Sandstein; UCS und umwickelte Proben mit 49 N beziehungsweise 98 N Vorspannkraft

Aus Abbildung 54 ist ersichtlich, dass bei den Sandsteinproben die maximale Druckfestigkeit noch auf der volumsnegativen Seite erreicht wird. Das hängt auch damit zusammen, dass der Sandstein von den drei getesteten Materialien die niedrigste Querdehnung aufweist.

## 6.2.7 Auswirkungen des Wicklungsabstandes auf die Volumsverformung beim Granit

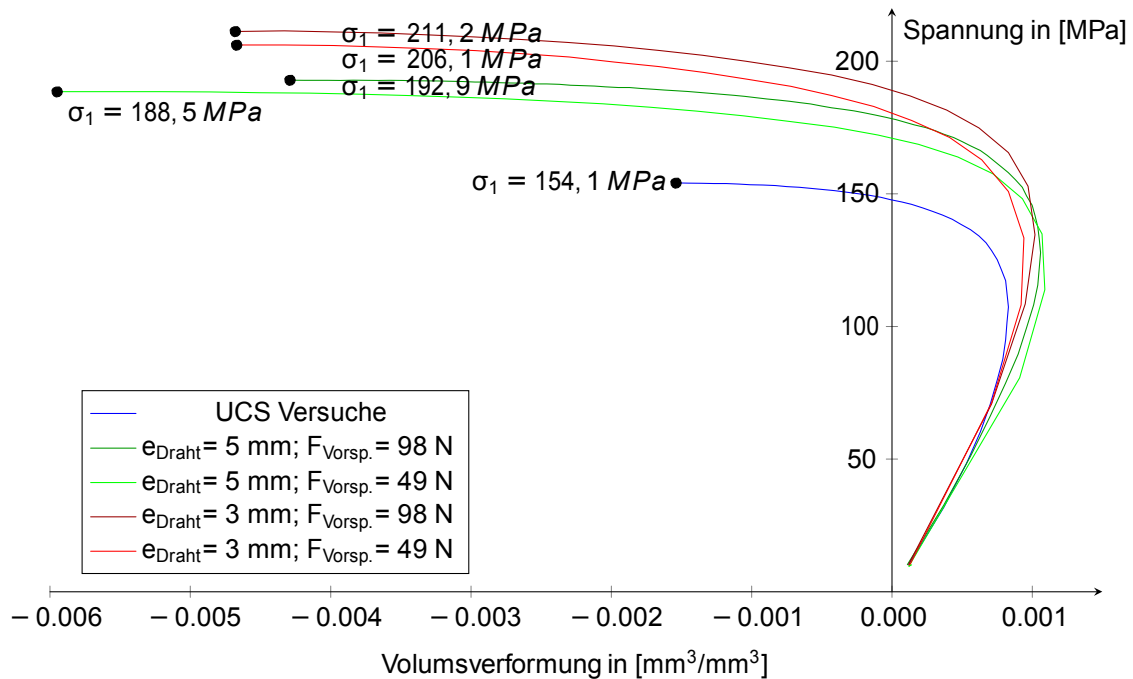


Abbildung 55: Spannungs-Dehnungsdiagramme Granit; UCS und umwickelte Proben mit 49 N beziehungsweise 98 N Vorspannkraft

In Abbildung 55 ist zu erkennen, dass die maximale Festigkeit des Granit im negativen Bereich der Volumsdehnung auftritt. Das bedeutet, dass zum Zeitpunkt der maximalen Festigkeit die Querdehnung bereits größer war als die halbe Längsdehnung. Oder anders ausgedrückt: Die Volumenzunahme infolge Querdehnung war bereits größer als die Volumsverkleinerung infolge axialer Stauchung. Grund für diese rapide Zunahme des Volumens ist die Ausbildung von Mikrorissen kurz vor dem Erreichen der maximalen Festigkeit.

---

## 6.2.8 Auswirkungen des Wicklungsabstandes auf die Volumsverformung beim Marmor

---

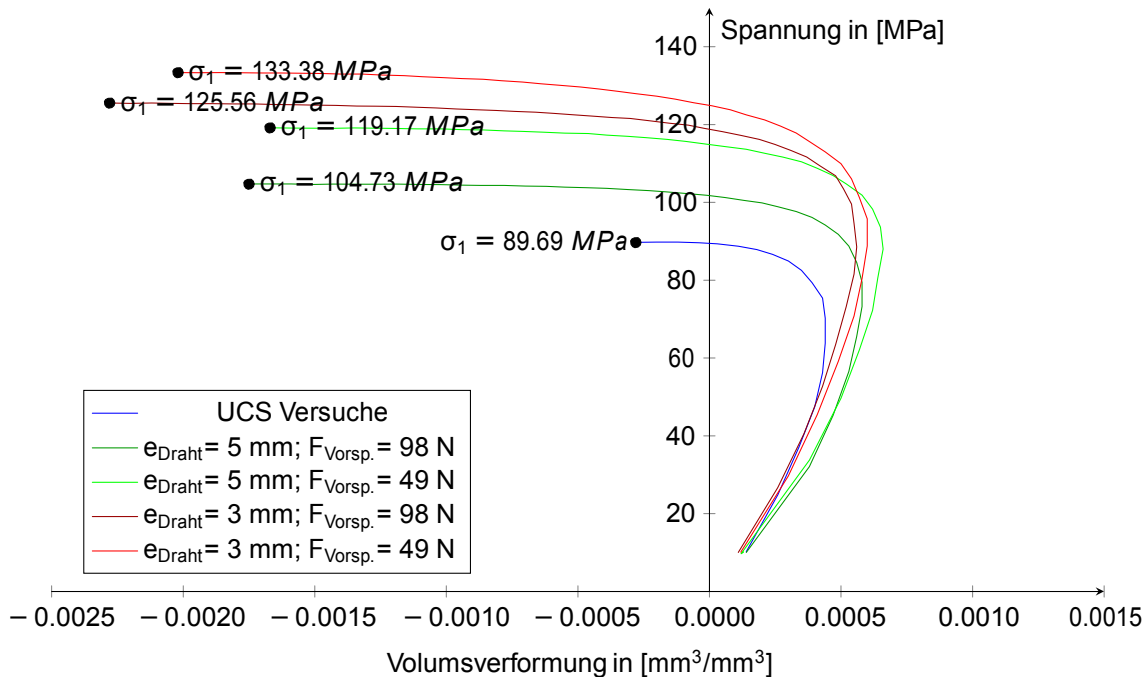


Abbildung 56: Spannungs-Dehnungsdiagramme Marmor; UCS und umwickelte Proben mit 49 N beziehungsweise 98 N Vorspannkraft

Die Marmorproben weisen eine bereits stark negative Volumsverformung auf. Dies ist auf die große Querdehnung und auf die geringe Druckfestigkeit, die in weiterer Folge eine kleine Längsdehnung bedingt, zurückzuführen.

---

## 6.2.9 Auswirkungen auf die Steifigkeit

---

Durch die Umwicklung der Proben mit Draht wird auch die Steifigkeit erhöht. Da die Querschnittsfläche der Proben annähernd gleich ist, beschränkt sich dieses Kapitel auf einen Vergleich der E-Moduln. Für die Ermittlung der E-Moduln wurde eine Gerade in die Spannungs-Dehnungskurve gelegt. Dabei wurden als Unterspannung  $\sigma_U = 30 \text{ MPa}$  und als Oberspannung  $\sigma_O = 70 \text{ MPa}$  gewählt. Die Wahl dieser Spannungen begründet sich dadurch, dass sich die Spannungs-Dehnungskurven aller drei Gesteine in diesem Bereich annähernd linear verhalten.

<b>Material</b>	<b>Bemerkung</b>	<b>E Modul [GPa]</b>
Sandstein	UCS	33.6
Sandstein	5 mm; 49 N	34.8
Sandstein	3 mm; 49 N	33.6
Sandstein	5 mm; 98 N	33.5
Sandstein	3 mm; 98 N	34.2
Granit	UCS	61.4
Granit	5 mm; 49 N	60.4
Granit	3 mm; 49 N	61.9
Granit	5 mm; 98 N	61.9
Granit	3 mm; 98 N	60.6
Marmor	UCS	66.5
Marmor	5 mm; 49 N	70.8
Marmor	3 mm; 49 N	74.3
Marmor	5 mm; 98 N	68.5
Marmor	3 mm; 98 N	70.2

Tabelle 4: Auswirkung der Umwicklung auf die Steifigkeit

Aus dieser Tabelle ist zu erkennen, dass die E-Moduln der umschlungenen Proben geringfügig höher sind als jene der UCS Proben. Die Steigerung des E-Moduls ist im Falle der Marmorproben am Auffälligsten, da hier die Oberspannung für die Bestimmung des E-Moduls nahe am Versagen liegt und die Drahtumschlingung dafür sorgt dass bei der selben axialen Belastung die Längsdehnung kleiner ausfällt als bei den UCS Proben. Der so bestimmte E-Modul ist nicht der E-Modul der Gesteine sondern des Systems Probe und Draht.

---

### 6.2.10 Auswirkungen auf die Zerstörungsarbeit

---

Die Zerstörungsarbeit wurde für die einzelnen Versuche bis zur einaxialen Druckfestigkeit des jeweiligen Probenamaterials berechnet.

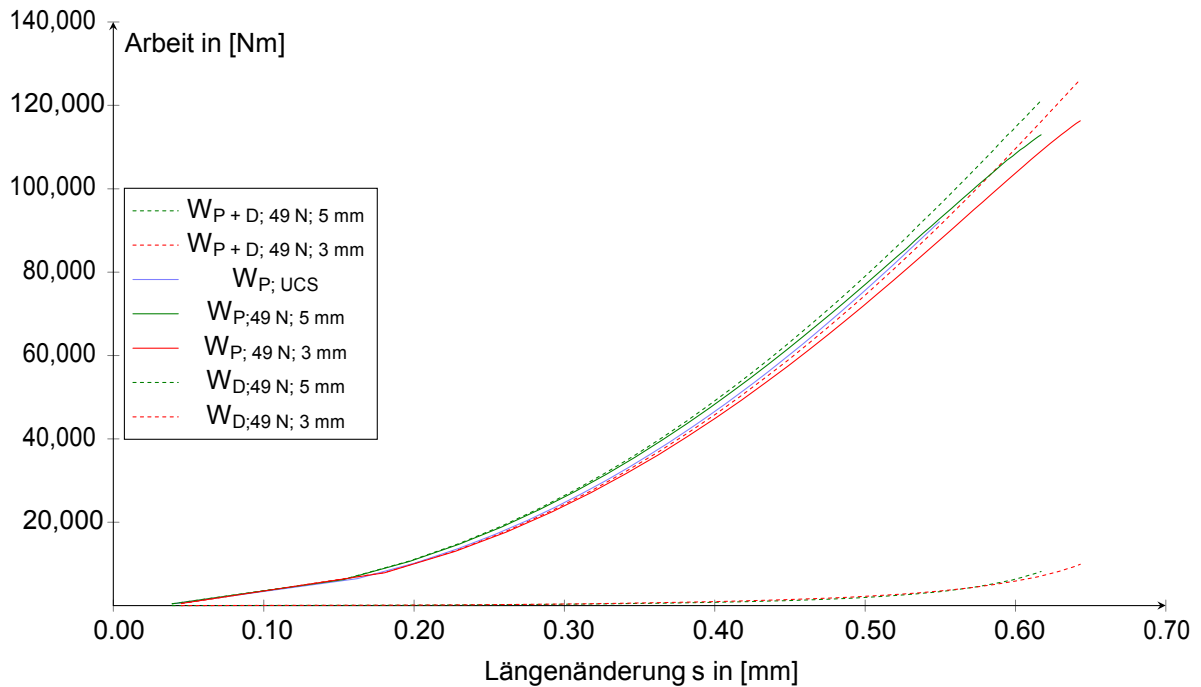


Abbildung 57: Zerstörungsarbeit Sandstein

Im Vergleich der Zerstörungsarbeit in Abbildung 57 mit den folgenden Zerstörungsarbeiten für den Granit und den Marmor erweist sich die Zerstörungsarbeit im Fall des Sandsteins als am Höchsten. Das ist einerseits ein Resultat der hohen Druckfestigkeit, andererseits auch der Längsstauchung, die beim Sandstein am größten ist. Die Verformungsarbeit die in den Draht fließt ist hingegen geringer als beim Marmor oder beim Granit. Grund dafür ist die geringe Querdehnung des Sandstein.



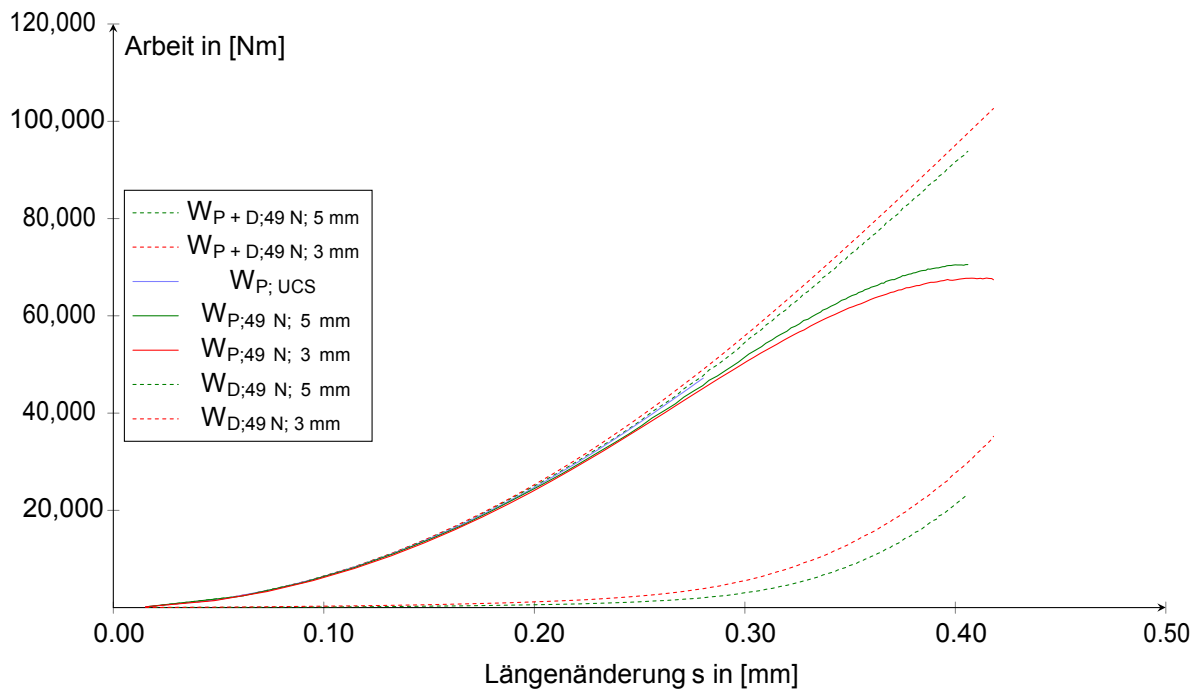


Abbildung 58: Zerstörungsarbeit Granit

Wie deutlich aus dem Diagramm in Abbildung 58 zu erkennen ist, ist die Zerstörungsarbeit bei den Granitproben um einiges höher als bei jenen aus Sandstein. Dies begründet sich in der größeren Querdehnung des Granits. Dadurch steigt auch die Arbeit die in die Verformung des Drahtes fließt.

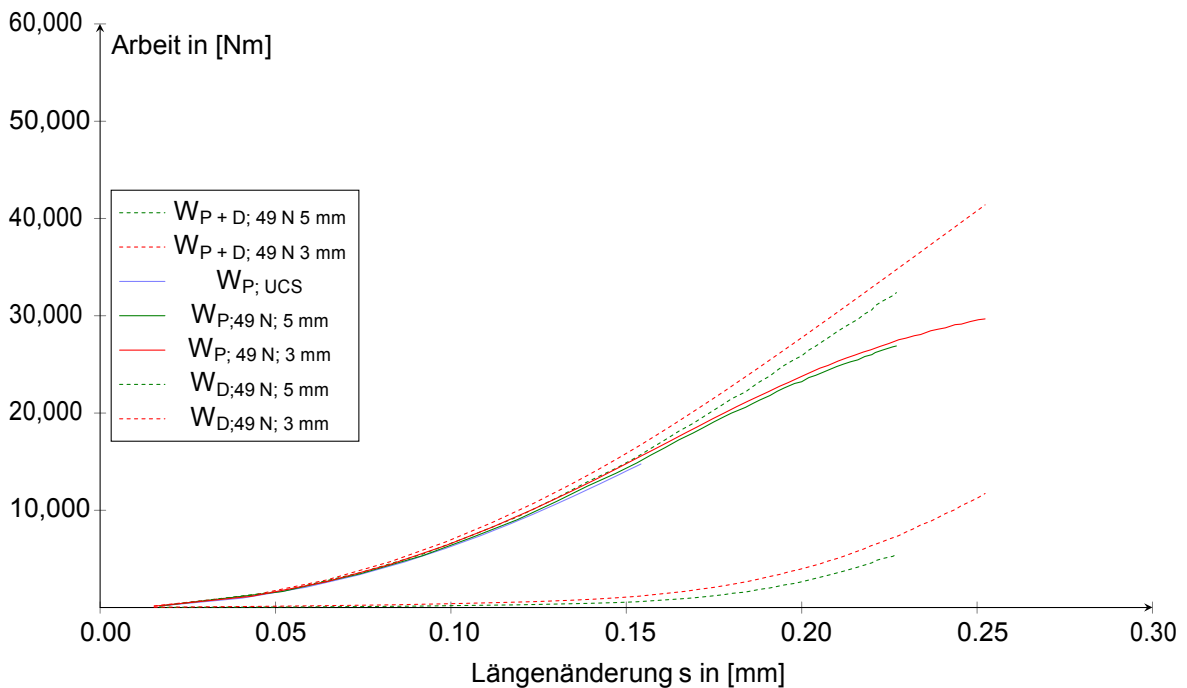


Abbildung 59: Zerstörungsarbeit Marmor

Bei genauerer Betrachtung zeigt sich dass die Kurvenverläufe der Zerstörungsarbeiten von Granit und Marmor annähernd gleich sind. Da der Marmor im Vergleich zum Granit die geringere Druckfestigkeit aufweist, ist auch die resultierende Zerstörungsarbeit entsprechend kleiner. Im Vergleich der Abbildungen Abbildung 58 und Abbildung 59 ist dieser Zusammenhang deutlich zu erkennen.

---

## 6.3 Risse

---

Dieses Kapitel behandelt die Mikrorisse der getesteten Proben. Die gezählten Mikrorisse wurden in einem Balkendiagramm über die Schnittbilder gelegt. Die Zählungen erfolgten an jeweils einer UCS Probe, sowie je einer Probe mit 5 mm und einer Probe mit 3 mm Wicklungsabstand des Drahtes.

---

### 6.3.1 Sandstein

---



Abbildung 60: UCS

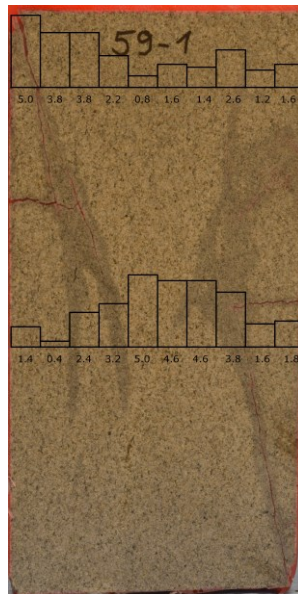


Abbildung 61: 5 mm; 49 N

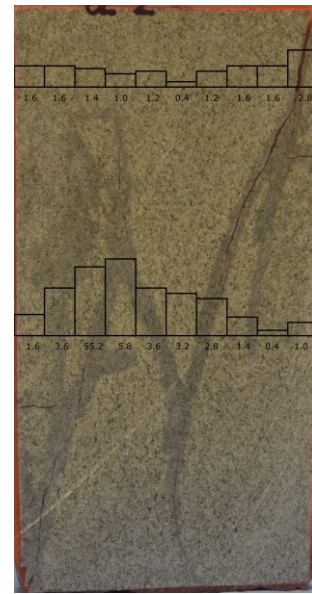


Abbildung 62: 3 mm; 49 N

Aus den Rissbildern ist zu erkennen dass sich mit steigendem Umschlingungsdruck die Mikrorisse stärker in der Probenmitte bei den makroskopisch sichtbaren Rissen konzentrieren. Bei dem ausgewerteten Dünnschliff des UCS Versuches war die Rissverteilung über den gesamten Querschnitt zum Großteil homogen.

---

### 6.3.2 Granit

---

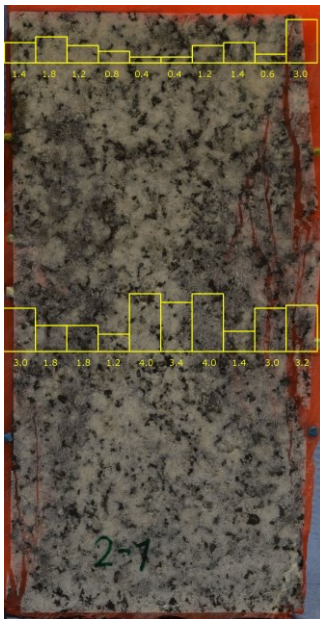


Abbildung 63: UCS

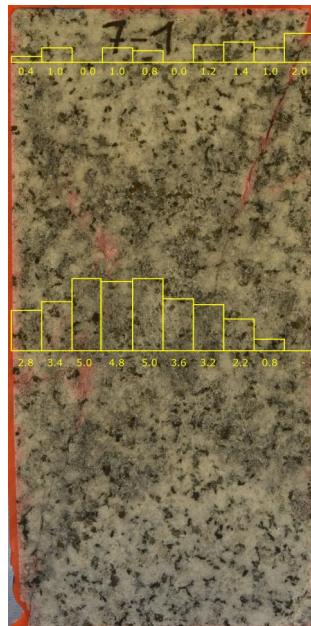


Abbildung 64: 5 mm; 49 N



Abbildung 65: 3 mm; 49 N

Die Umschlingung sorgt auch beim Granit für Konzentrationen der Mikrorisse im Zentrum der Probe. Bei der Auswertung am Rand ist der Einfluss der Reibung in der Kontaktfläche Probe-Prüfmaschine gut zu sehen. Es bildet sich ein Kegel aus, in dem ein dreidimensionaler Spannungszustand herrscht, in welchem die Anzahl der ausgebildeten Mikrorisse geringer ist als im Rest der Probe. Dieser Kegel ist besonders in Abbildung 64 im unteren Drittel des Bildes gut zu erkennen. Die dunklere Färbung des Granit ist ein Resultat der Mikrorisse. Das hellere Dreieck zeigt den unzerstörten Teil der Probe.

---

### 6.3.3 Marmor

---

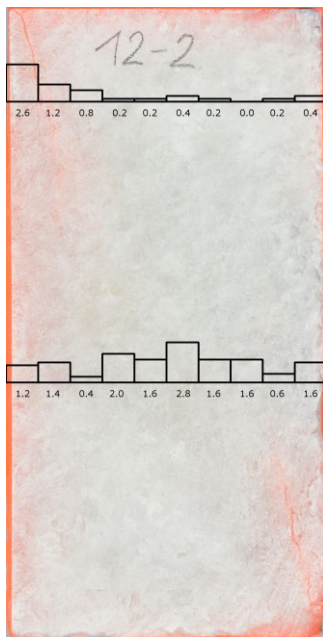


Abbildung 66: UCS

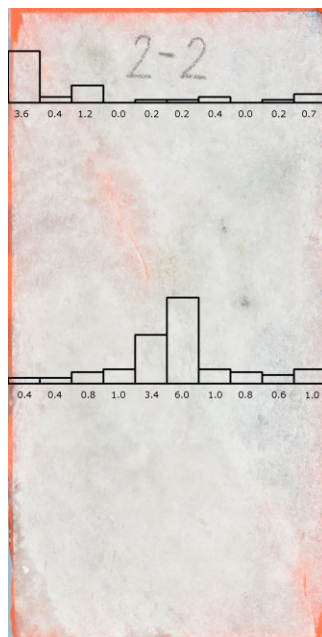


Abbildung 67: 5 mm; 49 N

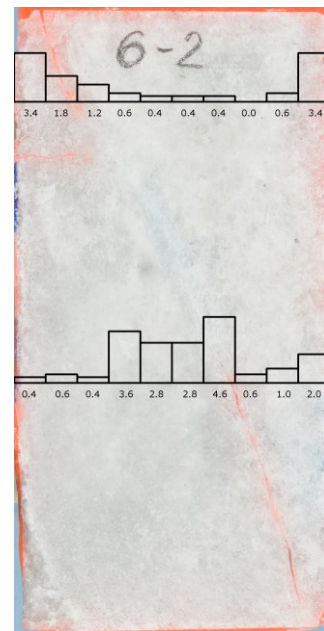


Abbildung 68: 3 mm; 49 N

Im mittleren Bereich der Probe ist auch beim Marmor eine Konzentration der Mikrorisse in der Mitte des Querschnittes zu beobachten. Bei Betrachtung der Rissdichte im Randbereich ist auch hier die Ausbildung des unzerstörten Kegels aufgrund der Reibungskräfte zu erkennen. Die Ausbildung der Scherfläche erfolgt entlang der Mantelfläche dieses Kegels durch die stirnseitigen Kanten der Proben.

---

### 6.3.4 Zusammenfassung

---

Durch den Vergleich der UCS Proben mit den umschlungenen Proben ist für alle Gesteine ein gemeinsamer Trend erkennbar. Bei den UCS Versuchen treten die Risse im mittleren Bereich der Probe gleichmäßiger auf als bei den umschlungenen Proben. Die relative Häufigkeit der Mikrorisse ist dabei jedoch geringer. Mit steigendem Umschlingungsdruck gibt es eine zunehmende Konzentration der Mikrorisse im Zentrum der Proben. Am ausgeprägtesten ist die Risskonzentration beim Marmor. Im mittleren Bereich treten außerhalb dieser Zonen kaum Mikrorisse auf, während sie beim Sandstein und beim Granit über den gesamten Querschnitt zu erkennen sind. Dabei ist anzumerken dass die maximale Druckbeanspruchung beim Marmor nur ca. halb so groß war, wie beim Sandstein oder beim Granit. Ein Grund für die zunehmende Risskonzentration bei steigendem Umschlingungsdruck könnte in der Tatsache zu finden sein, dass sobald

eine durchgehende Rissebene ausgebildet ist, außerhalb dieser keine zusätzlichen Mikrorisse ausgebildet werden.

## 6.4 Ermittlung der Hoek-Brown Parameter aus den Laborversuchen

Um anhand der Ergebnisse der Laborversuche das Versagen der Gesteinsproben zu charakterisieren, erfolgte eine Berechnung der Parameter für das Hoek-Brown Kriterium nach der von Hoek und Brown vorgeschlagenen Formeln (16) und (17). Dabei wird Formel (1) umgeformt zu Formel (15). (Hoek und Brown, 1997)

$$y = m\sigma_{ci}x + s\sigma_{ci} \quad (\text{Hoek-Brown Kriterium umgeformt (Hoek und Brown, 1997), 15})$$

Dabei gilt  $x = \sigma_{3;i}$  und  $y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2$ . Anhand von diesem Zusammenhang können mittels einer Regressionsanalyse die Werte für  $m_i$  und  $\sigma_{ci}$  berechnet werden. (Hoek und Brown, 1997)

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} \frac{\sum xy - (\sum x \sum y / n)}{\sum x^2 - (\sum x)^2 / n} \quad (\text{m}_i\text{-Wert Berechnung (Hoek und Brown, 1997), 16})$$

$$\sigma_{ci} = \frac{\sum y - \frac{\sum xy - (\sum x \sum y / n)}{\sum x^2 - (\sum x)^2 / n} \sum x}{n} \quad (\text{Berechnung von } \sigma_{ci} \text{ (Hoek und Brown, 1997), 17})$$

Material	$m_i$ Wert	$\sigma_{ci}$	$r^2$	Hoek & Brown	Mostyn & Douglas
Sandstein	14.53	170.0	0.908	19	2 - 40
Granodiorit	19.02	156.1	0.978	30	10 - 26
Marmor	16.22	92.5	0.672	9	2 - 26

Tabelle 5: Hoek-Brown Parameter

Der Korrelationskoeffizient  $r^2$ , wird nach Formel (18) berechnet:

$$r^2 = \frac{[\sum xy - (\sum x \sum y / n)]^2}{\sum x^2 - (\sum x)^2 / n - \sum y^2 - (\sum y)^2 / n} \quad (\text{Korrelationskoeffizient } r^2 \text{ (Hoek und Brown, 1997), 18})$$

Dadurch ist es möglich den  $m_i$ -Wert für die verschiedenen Materialien zu berechnen. In Tabelle 5 sind diese Werte in der zweiten Spalte zu sehen. In den letzten beiden

Spalten finden sich die Werte aus der Literatur nach Hoek und Brown bzw. Mostyn u. a..

Wie in Tabelle 5 zu sehen ist, ist der Korrelationskoeffizient für die Marmorproben sehr niedrig. Dieses Ergebnis bedeutet dass die Werte nur schwach miteinander korrelieren und reflektiert die stark streuenden Laborergebnisse beim Marmor. Die  $m_i$ -Werte für Sandstein und Granit liegen unter den in der Literatur von Hoek und Brown angegebenen, aber im Bereich der von Mostyn u. a. publizierten Werte. Mit 0,91 bzw. 0,98 sind die Korrelationskoeffizienten für die ermittelten Ergebnisse auch recht hoch. Ein Wert von 1 bedeutet dass sich alle x-y-Wertepaare genau auf der Regressionsgeraden befinden. Der Unterschied zu den von Hoek und Brown angegebenen Werten könnte daran liegen, dass die getesteten Seitendrucke recht niedrig sind. Nach Hoek und Brown sollten Seitendrucke im Bereich von 0 bis  $0,5 \cdot \sigma_{UCS}$  getestet werden. Da sich die vorliegende Prüfmethode auch vom Triaxversuch unterscheidet, sollten vergleichende Untersuchungen angestellt werden um den Einfluss der Prüfmethode auf die Ergebnisse zu eruieren.

---

### 6.4.1 Spannungspfad des Sandstein im Hoek-Brown Diagramm

---

Im Folgenden finden sich die Spannungspfade der Durchschnittskurven der einzelnen Gesteine. Dabei wurden die Kurven im linearen Bereich des Drahtes durchgehend gezeichnet, im Übergangsbereich wurden sie strichliert, und im plastischen Bereich des Drahtes wurden die Kurven gepunktet dargestellt.

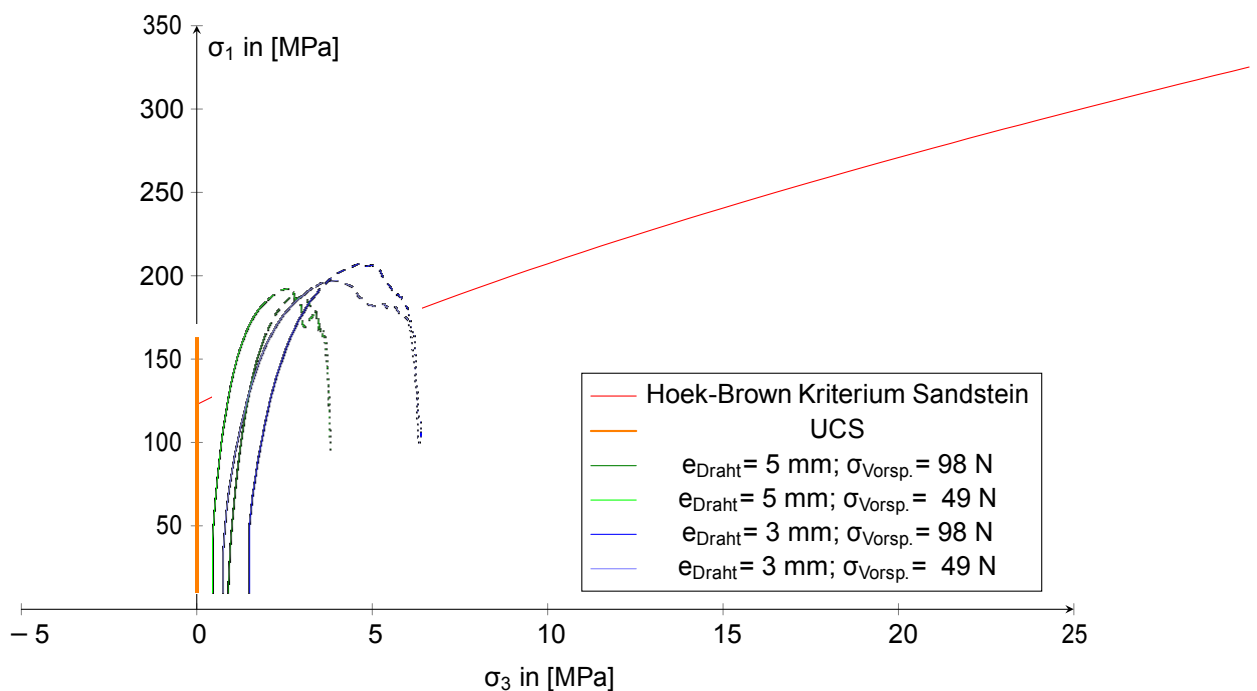


Abbildung 69: Spannungspfad des Sandstein im Hoek-Brown Diagramm

Abbildung 69 zeigt den Spannungspfad der Durchschnittskurven des Sandstein im  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Diagramm. In diesem Diagramm ist das Hoek-Brown Kriterium als rote Linie eingezeichnet. Die einaxialen Druckversuche sind in orange direkt auf der y-Achse zu finden. Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass der Spannungspfad nicht wie bei einem konventionellen triaxialen Versuch ausschließlich vertikal oder ausschließlich horizontal verläuft. Der Grund dafür ist, dass die Umschlingungsspannung  $\sigma_3$  eine Funktion der Querdehnung der Probe ist und zwischen Querdehnung und axialer Belastung ein nichtlinearer Zusammenhang besteht. Für die Sandsteinproben mit 3 mm Wicklungsabstand und 98 N Vorspannkraft bedeutet das, dass der Umschlingungsdruck und die axiale Belastung gleichzeitig zunehmen und der Spannungspfad der Probe bei  $\sigma_3 = 4,8 \text{ MPa}$  und  $\sigma_1 = 207,3 \text{ MPa}$  auf das Hoek-Brown Kriterium trifft.



---

## 6.4.2 Spannungspfad des Granit im Hoek-Brown Diagramm

---

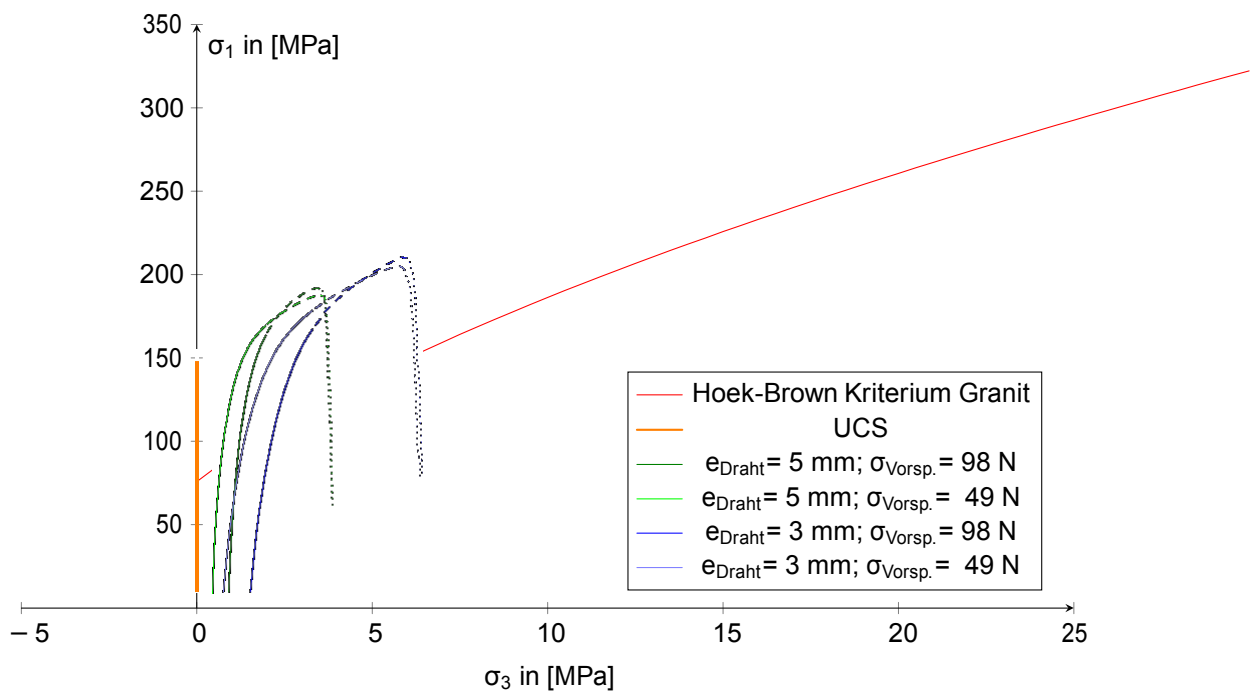


Abbildung 70: Spannungspfad der Durchschnittskurve des Granit im Hoek-Brown Diagramm

In Abbildung 70 sieht man den Spannungspfad der Durchschnittskurven des Granit. Hier ist zu erkennen dass beim Granit  $\sigma_1$  nach Erreichen der maximalen Festigkeit rasch abnimmt. Der Granit weist die höchsten Werte für  $\sigma_1$  beim Erreichen der maximalen Umschlingungsspannung auf. Das, und der Verlauf des Spannungspfades deuten darauf hin, dass sich der Granit über einen längeren Bereich im Zustand des Versagens befindet. Die Probe versagt infolge der axialen Belastung, bildet Mikrorisse aus, die ihrerseits für die Erhöhung des Umschlingungsdruckes sorgen, welcher der Probe zusätzliche Festigkeit verschafft. Dieser Vorgang verläuft bis zur Ausreizung des Drahtes. Bei der engeren Wicklung ist das bei einer Umschlingungsspannung von 6,61 MPa, bei der weiteren Wicklung bei 3,96 MPa. Ab diesem Punkt kann auch bei Zunahme der Querdehnung die Spannung im Draht nicht weiter erhöht werden.

---

### 6.4.3 Spannungspfad des Marmor im Hoek-Brown Diagramm

---

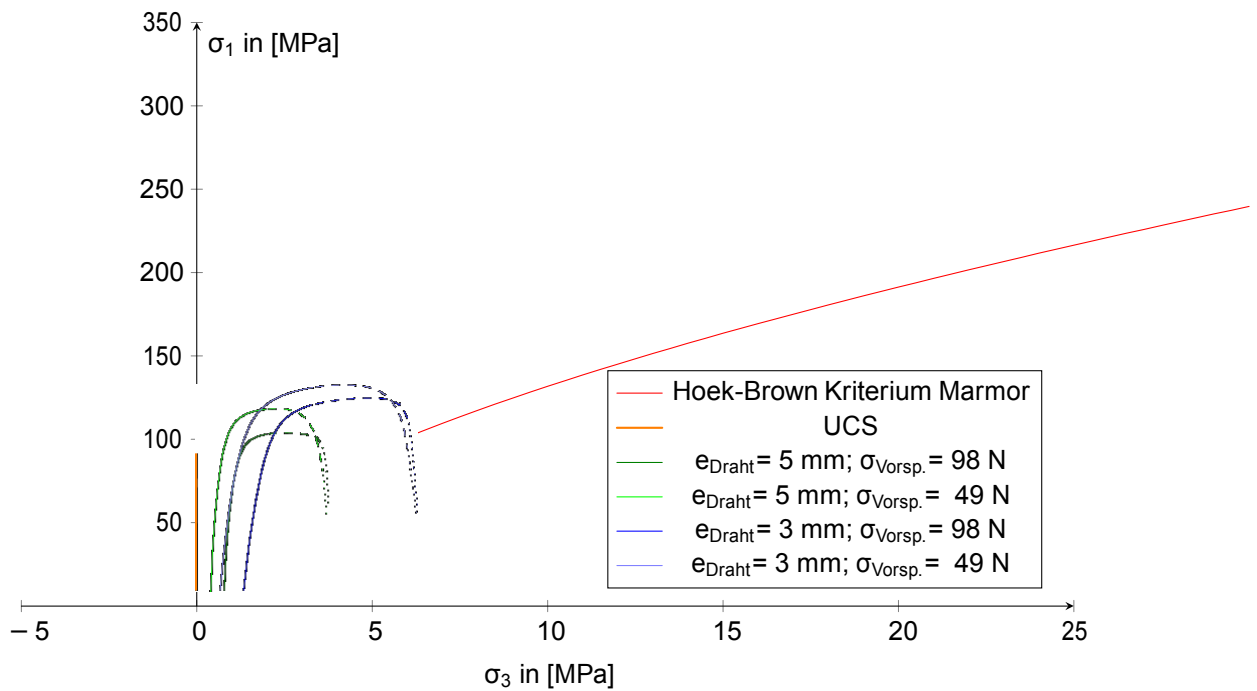


Abbildung 71: Spannungspfad der Durchschnittskurve des Marmor im Hoek-Brown Diagramm

Wie schon zuvor diskutiert, weichen die Ergebnisse der Laborversuche stark von den Erwartungen ab. So auch bei den Spannungspfaden im  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Diagramm.







[Wawersik u. a. 1997] WAWERSIK, W.R. ; CARLSON, L.W. ; HOLCOMB, D.J. ;  
WILLIAMS, R.J.: New method for true-triaxial rock testing. In: *International*

*Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34 (1997), Nr. 3–4, S. 330.e1 – 330.e14. – URL [http://www.elsevier.com/locate/jrme](#)  
 \* \* \* \* \* [ISRM] International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium. – ISSN 1365-1609

[Wiebols und Cook 1968] WIEBOLS, G.A. ; COOK, N.G.W.: An energy criterion for the strength of rock in polyaxial compression. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* 5 (1968), Nr. 6, S. 529 – 549. – URL [http://www.elsevier.com/locate/jrme](#)  
 \* \* \* \* \* ISSN 0148-9062

[Yang und Jing 2013] YANG, Sheng-Qi ; JING, Hong-Wen: Evaluation on strength and deformation behavior of red sandstone under simple and complex loading paths. In: *Engineering Geology* 164 (2013), S. 1 – 17. – URL [http://www.elsevier.com/locate/enggeo](#)  
 \* \* \* \* \* ISSN 0013-7952

[Yumlu und Ozbay 1995] YUMLU, M. ; OZBAY, M.U.: A study of the behaviour of brittle rocks under plane strain and triaxial loading conditions. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 32 (1995), Nr. 7, S. 725 – 733. – URL [http://www.elsevier.com/locate/jrme](#)  
 \* \* \* \* \* ISSN 0148-9062

[Zheng u. a. 1990] ZHENG, Ziqiong ; G.W.COOK, Neville ; R.MYER, Larry: Stress induce microcrack geometry at failure in unconfined and confined axial compressive tests : Rock Mechanics as a Guide for Efficient Utilization of Natural Resources: Proc 30th U.S. Symposium, Morgantown, 19–22 June 1989 P749–756. Publ Rotterdam: A A Balkema, 1989. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 27 (1990), Nr. 4, S. 204 –. – URL [http://www.elsevier.com/locate/jrme](#)  
 \* \* \* \* \* ISSN 0148-9062