

## **Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern**

*Thomas Mutschler*

### **1 Zweck**

Zweck dieser Empfehlung ist es, Verfahren und Geräte zur labormäßigen Bestimmung der Druckfestigkeit und der Verformungseigenschaften von Gesteinsproben unter einem einaxialen Belastungszustand so zu vereinheitlichen, dass Versuchsergebnisse miteinander vergleichbar sind. Die Versuchsergebnisse dienen der Charakterisierung und Klassifizierung von Festgesteinen sowie der Ableitung von Kennwerten für geotechnische Fragestellungen, insbesondere geostatische Berechnungsverfahren. Die Empfehlung ist gegenüber der DIN EN 1926 [1], die allein die Bestimmung der Druckfestigkeit unter schneller einaxialer Belastung ohne Verformungsmessung regelt, weiter gefasst. Die DIN 18136 [2] regelt den einaxialen Druckversuch an Bodenproben. In Anlehnung an die Empfehlung der Internationalen Gesellschaft für Felsmechanik (ISRM) „Suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression“ [3] wird die Vorgehensweise zur Erfassung des Nachbruch-Verhaltens von Gesteinsproben eingeschlossen.

### **2 Kurzbeschreibung des Verfahrens**

Ein zylindrischer Prüfkörper wird in einer Druckprüfmaschine einer axial wirkenden Druckbelastung unterworfen. Die Belastung wird, gegebenenfalls unter Einschaltung von Entlastungs-Wiederbelastungs-Zyklen, solange gesteigert, bis der Bruch eintritt. Eine Erfassung des Nachbruch-Verhaltens ist optional möglich. Die wesentlichen aus dem Versuch gewinnbaren Kennwerte sind die einaxiale Druckfestigkeit sowie der Verformungs- und der Elastizitätsmodul und die zugehörige Querdehnungszahl.

2 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern

### 3 Begriffe

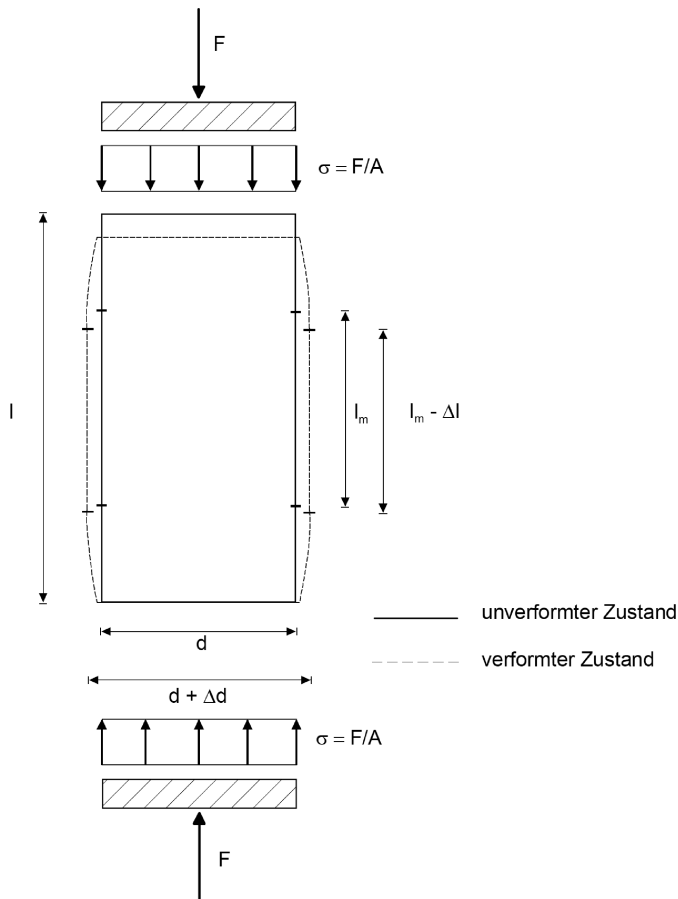
Bild 1 zeigt die schematische Darstellung eines Prüfkörpers mit den Bezeichnungen der Abmessungen, der einwirkenden Kraft  $F$  und der daraus resultierenden Spannung  $\sigma$ .

Die **axiale Spannung**  $\sigma$  ist der Quotient aus einer Kraft  $F$  und der anfänglichen Prüfkörperquerschnittsfläche  $A$ . Druckkräfte und Druckspannungen haben positives Vorzeichen:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Die **einaxiale Druckfestigkeit**  $\sigma_u$  ist der Höchstwert der axialen Spannung  $\sigma$ , die von einem Gesteinsprüfkörper aufgenommen werden kann:

$$\sigma_u = \sigma_{\max} \quad (2)$$

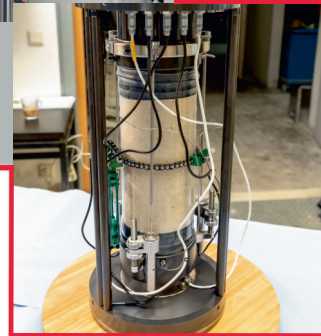
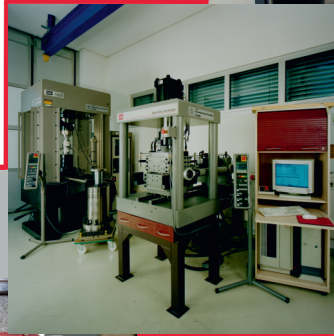
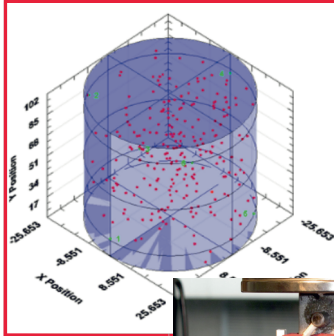


**Bild 1** Schematische Darstellung eines Prüfkörpers.

### Felsmechanische Versuche

Zug-, Druck-, Triax-, Scher-, Indexversuche

- Fest- und Übergangsgesteine (HSSR, Hard Soil-Soft Rock)
- Trennflächeneigenschaften



### Versuchsanlagen

Universalprüfanlage für Zug-, Druck-, und Triaxialversuche  
Direkt Schergerät  
HSSR Triaxversuchsstand



NAWI Graz  
GEOCENTER

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau  
Rechbauerstraße 12, 8010 Graz

Mail: tunnel@tugraz.at

Telefon: +43 (0) 316 / 873 - 8114

Fax: +43 (0) 316 / 873 - 8618



Liebherr-Werk Nenzing GmbH (Hrsg.)  
**Kompodium Spezialtiefbau**  
**Teil 1: Bohren**  
Verfahren, Geräte, Anwendungen, IT-Lösungen

- einige Themen werden erstmals in dieser Form dargestellt (Lufthebebohren, Imlochhammerbohren, IT-Lösungen)
- anschauliche Illustrationen und hochwertige Renderings

**BESTELLEN**  
+49 (0)30 470 31-236  
marketing@ernst-und-sohn.de  
[www.ernst-und-sohn.de/3279](http://www.ernst-und-sohn.de/3279)

Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.



2019 · 280 Seiten ·

150 Abbildungen · 20 Tabellen

Hardcover

ISBN 978-3-433-03279-4

€ 98\*



Jörn M. Seitz / Heinz Günter Schmidt

# Bohrpfähle

**Klassiker des Bauingenieurwesens**

- **Hilfestellung bei Berechnung und Bemessung**
- **praxisnahe Hinweise zur Ausführung**
- **unveränderter Nachdruck der 1. Auflage von 2000**

Der unveränderte Nachdruck des Buches aus dem Jahr 2000 enthält eine umfassende Darstellung aller bei Planung und Bauausführung von Bohrpfehlgründungen zu beachtenden Aspekte einschließlich Schadensfälle, Sanierungen und zahlreiche Musterprojekte.



2021 · 496 Seiten

Hardcover

**ISBN 978-3-433-03370-8**

€ 69\*

## **BESTELLEN**

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

[www.ernst-und-sohn.de/3370](http://www.ernst-und-sohn.de/3370)

Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.



Die **Längsdehnung**  $\varepsilon_\ell$  ist der Quotient aus einer axialen Längenänderung  $\Delta\ell_m$  und der Messlänge  $\ell_m$ . Die Messlänge ist gleich oder kleiner als die Prüfkörperlänge  $\ell$ . Verkürzungen und Stauchungen haben positives Vorzeichen:

$$\varepsilon_\ell = \frac{\Delta\ell_m}{\ell_m} \quad (3)$$

Die **Bruchdehnung**  $\varepsilon_{\ell,u}$  ist die Längsdehnung, die beim Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit  $\sigma_u$  eingetreten ist:

$$\varepsilon_{\ell,u} = \varepsilon_\ell(\sigma_u) \quad (4)$$

Die **Querdehnung**  $\varepsilon_q$  ist der Quotient aus einer Längenänderung normal zur Prüfkörperachse und der Anfangslänge. Verkürzungen haben positives Vorzeichen. Als Längen normal zur Prüfkörperachse sind der Durchmesser  $d$  oder der Umfang  $U$  gebräuchlich:

$$\varepsilon_q = \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta U}{U} \quad (5)$$

Die Dehnungen  $\varepsilon_i$  ( $i = \ell, q$ ) von Gesteinen setzen sich in der Regel aus einem **reversiblen** (elastischen) Anteil  $\varepsilon_i^{\text{el}}$  und einem **irreversiblen** (nicht elastischen) Anteil  $\varepsilon_i^{\text{ne}}$  zusammen:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^{\text{el}} + \varepsilon_i^{\text{ne}} \quad (6)$$

Aus der Steigung des Erstbelastungsastes der Spannungs-Dehnungs-Linie in einem Spannungsbereich  $\Delta\sigma$  lässt sich an der Sekante ein Erstbelastungsmodul  $V$  des Gesteins bestimmen:

$$V = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_\ell} \quad (7)$$

Aus der Steigung eines Entlastungs- bzw. Wiederbelastungsastes der Spannungs-Dehnungs-Linie lassen sich an den Sekanten ein Entlastungsmodul  $E_E$  und ein Wiederbelastungsmodul  $E_B$  ermitteln. Für viele Gesteinsarten ist der Unterschied zwischen dem Entlastungsmodul  $E_E$  und dem Wiederbelastungsmodul  $E_B$  von untergeordneter Bedeutung. Der im mittleren Bereich des Entlastungsastes ermittelte Entlastungsmodul  $E_E$  (siehe Abschn. 6) kommt erfahrungsgemäß dem E-Modul des Materials sehr nahe und wird im Rahmen dieser Empfehlung als Elastizitätsmodul  $E$  bezeichnet:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_\ell^{\text{el}}} \quad (8)$$

Die negative Verhältniszahl eines Inkrements der Querdehnung  $\Delta\varepsilon_q$  zu dem zugehörigen Inkrement der Längsdehnung  $\Delta\varepsilon_\ell$  wird als **Querdehnungszahl**  $\nu$  bezeichnet:

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_q}{\Delta\varepsilon_\ell} \quad (9)$$

4 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern

Aus den elastischen Anteilen der Dehnungsinkremente in Längs- und Querrichtung wird die **elastische Querdehnungszahl**  $\nu^{\text{el}}$  bestimmt:

$$\nu^{\text{el}} = -\frac{\Delta\varepsilon_{\text{q}}^{\text{el}}}{\Delta\varepsilon_{\ell}^{\text{el}}} \quad (10)$$

(**Anmerkung:** Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von natürlichen Gesteinen weisen häufig einen nichtlinearen Verlauf auf. Daher sind die Angaben der Verformungskenngrößen  $V$ ,  $E$ ,  $\nu$  und  $\nu^{\text{el}}$  immer auf einen Spannungsbereich  $\Delta\sigma$  zu beziehen.)

Die **Längsdehnungsrate**  $\dot{\varepsilon}_{\ell}$  gibt die Längsdehnungsänderung  $\Delta\varepsilon_{\ell}$  im Zeitintervall  $\Delta t$  an:

$$\dot{\varepsilon}_{\ell} = \frac{\Delta\varepsilon_{\ell}}{\Delta t} \quad (11)$$

Die **Querdehnungsrate**  $\dot{\varepsilon}_{\text{q}}$  gibt die Querdehnungsänderung  $\Delta\varepsilon_{\text{q}}$  im Zeitintervall  $\Delta t$  an:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{q}} = \frac{\Delta\varepsilon_{\text{q}}}{\Delta t} \quad (12)$$

Die **Spannungsrate**  $\dot{\sigma}$  gibt die Spannungsänderung  $\Delta\sigma$  im Zeitintervall  $\Delta t$  an:

$$\dot{\sigma} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta t} \quad (13)$$

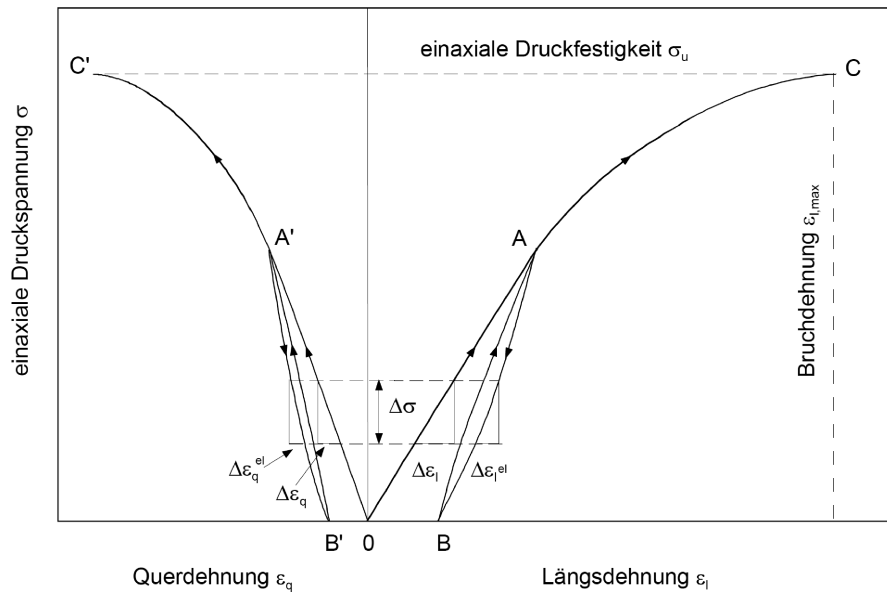
Die **vollständige Spannungs-Dehnungs-Linie** setzt sich aus einem Abschnitt im **Vorbruch-Bereich** (Bild 2) und einem Abschnitt im **Nachbruch-Bereich** zusammen. Im Nachbruch-Bereich ist die Spannungs-Dehnungs-Linie eine Grenzlinie, die fortlaufende Bruchzustände nach Überschreiten der einaxialen Druckfestigkeit kennzeichnet. Dabei treten die beiden in Bild 3 dargestellten charakteristischen Kurvenverläufe I und II auf (siehe [7]), nach denen zwischen den Materialklassen I und II unterschieden wird.

**Materialien der Klasse I** zeigen nach dem Erreichen der Bruchspannung  $\sigma_{\text{u}}$  einen Abfall der Druckspannung  $\sigma$  bei ansteigender Längsdehnung  $\varepsilon_{\ell}$ , während bei denen der Klasse II der Druckspannungsabfall mit einem Rückgang der Längsdehnung verbunden ist. Im Falle der Klasse I muss dem Prüfkörper zur Verformung im Nachbruch-Bereich über die Prüfmaschine fortlaufend Energie zugeführt, im Falle der Klasse II potentielle Energie entzogen werden.

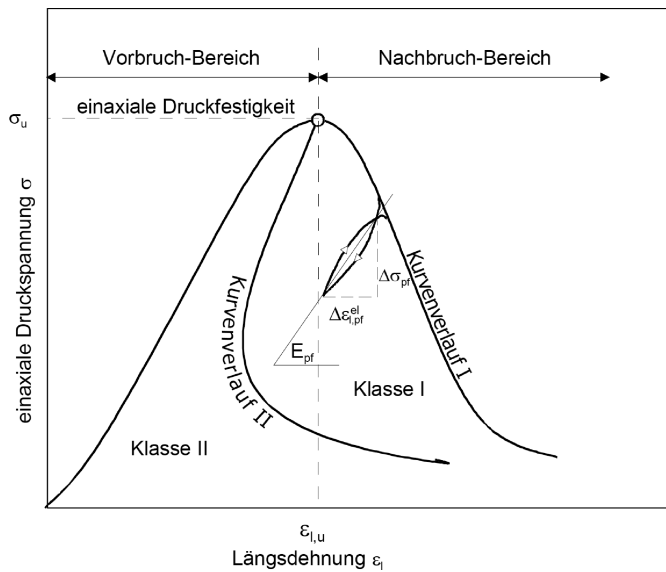
**Anmerkung:** Die Steigung  $B$  der abfallenden Grenzlinie im Nachbruch-Bereich wird nach [4] als **Sprödigkeit** bezeichnet:

$$B = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_{\ell}} \quad (14)$$

Werden im Nachbruch-Bereich Lastzyklen eingelegt, so lassen sich analog zur Vorgehensweise im Vorbruch-Bereich (vgl. Gl. (7)) aus den Steigungen der Entlastungs-



**Bild 2** Schematische Darstellung des Vorbruch-Bereichs der Spannungs-Dehnungs-Linie eines einaxialen Druckversuchs mit Querdehnungsmessung.



**Bild 3** Schematische Darstellung der Spannungs-Längsdehnungs-Kurve eines einaxialen Druckversuches mit Erfassung des Nachbruch-Bereichs. Klasse-I-Kurve und Klasse-II-Kurve nach [7].



6 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern

und Wiederbelastungsäste die entsprechenden Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln  $E_{\text{pf}}$  bestimmen:

$$E_{\text{pf}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{pf}}}{\Delta\varepsilon_{\ell,\text{pf}}^{\text{el}}} \quad (15)$$

Die Verformungsarbeit  $W$  wird aus der Fläche unter der Spannungs-Längsdehnungs-Linie bestimmt (siehe [6]).

## 4 Prüfeinrichtung

Für das Aufbringen der Axiallast auf den Prüfkörper ist eine Prüfmaschine mit einer Kraftmesseinrichtung der Güteklasse 2 nach DIN EN ISO 7500-1 [8] oder besser zu verwenden, deren Kapazität ausreicht, um den Gesteinsprüfkörper bis zum Bruch zu belasten. Der Kraftmessbereich der Prüfmaschine muss der Bruchkraft des Prüfkörpers angepasst sein.

Die obere Druckplatte ist in einer Kugelkalotte zu lagern und muss leicht einstellbar sein, um unvermeidbare Abweichungen von der Planparallelität der Prüfkörperendflächen ausgleichen zu können. Während des Versuches sollte sich der Druckplattenwinkel nicht mehr verstellen. Die Abmessungen der Druckplatte, der Kalottenradius und der Prüfkörperdurchmesser sollen aufeinander abgestimmt sein.

Die Prüfmaschine muss die Durchführung der Versuche in Weg- oder Kraftregelung gestatten. Eine Kompensation der Verformungen der Prüfmaschine ist bei der Regelung der Vorschubgeschwindigkeit nicht erforderlich, da viskos reagierende Gesteine im Vergleich zur Prüfmaschine normalerweise eine geringe Steifigkeit aufweisen und somit die Maschinenverformungen klein gegenüber den Prüfkörperverformungen sind. Gesteine hoher Steifigkeit, bei denen die Maschinenverformungen größer als die Prüfkörperverformungen sein können, haben in der Regel vernachlässigbar geringe viskose Eigenschaften. Zur Ermittlung der Prüfkörperverformungen sind Längenänderungs-Messeinrichtungen erforderlich, die die Anforderungen der Güteklasse 1 nach DIN EN ISO 9513 Beiblatt 1 [9] oder besser erfüllen. Die Verwendung von Dehnungsmessstreifen (DMS) ist ebenfalls möglich.

Für Versuche mit Erfassung des Nachbruch-Verhaltens sind weitere Regelungsmöglichkeiten erforderlich, die sich aus der in Abschn. 6.5 erläuterten Vorgehensweise für diese Versuchsoption ergeben.

## 5 Prüfkörper und Proben

### 5.1 Abmessungen der Prüfkörper

Der einaxiale Druckversuch wird an zylindrischen Prüfkörpern durchgeführt, deren Länge  $\ell$  etwa dem 2-Fachen des Durchmessers  $d$  entsprechen soll. Prüfkörper mit einer Länge im Bereich  $1,5d < \ell < 2,5d$  sind gut geeignet.

**Tab. 1** Prüfkörperschlankheit.

Schlankheit $\ell/d$	Festigkeit	Verformbarkeit	Bemerkung
$\ell/d > 2,5$	Nicht zulässig	Nicht zulässig	Knickgefahr
$2,0 \leq \ell/d \leq 2,5$	Zulässig	Zulässig	Ideale Schlankheit
$1,5 \leq \ell/d \leq 2,0$	Abminderung nach Gl. (16)	Zulässig	—
$1,0 \leq \ell/d \leq 1,5$	Abminderung nach Gl. (16)	Nicht zulässig	—
$\ell/d \leq 1,0$	Nicht zulässig	Nicht zulässig	Brikettiergefahr

Es ist zu beachten, dass aufgrund des Einflusses der Endflächenreibung zu hohe Festigkeitswerte ermittelt werden können, wenn das Verhältnis der Länge  $\ell$  des Prüfkörpers zu seinem Durchmesser  $d$  kleiner als 2 ist. In solchen Fällen ist die an zu kurzen Prüfkörpern bestimmte Druckfestigkeit  $\sigma_u$  gemäß Gl. (16) auf den Wert  $\sigma_{u(2)}$  abzumindern [5]:

$$\sigma_{u(2)} = \frac{8 \cdot \sigma_u}{7 + 2 \frac{d}{\ell}} \quad (16)$$

Einaxiale Druckversuche zur Bestimmung der Druckfestigkeit an Prüfkörpern, bei denen das Verhältnis  $\ell/d < 1$  ist, sind nicht zulässig. Spannungs-Dehnungs-Beziehungen sollen nur an Prüfkörpern ermittelt werden, bei denen  $\ell/d \geq 1,5$  ist. Die Tab. 1 gibt eine Übersicht der Grenzen der Prüfkörperschlankheiten.

Der Durchmesser des Prüfkörpers soll mindestens das Zehnfache des größten Einzelkorndurchmessers des Gesteins betragen und nicht kleiner als 30 mm sein. Größere Prüfkörper sind kleineren vorzuziehen. Etwaige Abweichungen von diesen Regeln, die in der Praxis durch die Unzulänglichkeit des Materials oder durch die Gewinnung zu kleiner Proben bedingt sind, müssen im Versuchsprotokoll vermerkt werden.

**Anmerkung:** Diese Empfehlung ist auf kreiszylindrische Prüfkörper abgestimmt. Sofern anders geformte (z. B. prismatische) Prüfkörper verwendet werden sollen, ist dies im Protokoll ausdrücklich zu vermerken.

**Sonderfall:** Dient die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit der Ermittlung von Schneidleistung und Meißelverbrauch von Tunnelvortriebsmaschinen, so werden Obergrenzen der Festigkeitswerte des Gesteins benötigt. Dazu können Versuche an eher kleinen und gedrunenen Prüfkörpern mit einem Verhältnis von  $\ell/d \approx 1$  durchgeführt werden.

## 5.2 Bearbeitung der Prüfkörper

Zur Erzielung der zylindrischen Form sind die Proben möglichst schonend durch Bohren, Schneiden, Drehen, Schleifen oder andere geeignete Verfahren zu bearbeiten, wobei darauf zu achten ist, dass Wärmeeintrag und dabei eingesetzte Spül- oder Kühlmittel die Eigenschaften des Materials möglichst wenig verändern.

Die Mantelflächen der Prüfkörper sollen glatt und frei von Unregelmäßigkeiten sein. Die Endflächen sollen eben sein und mit der Prüfkörperachse rechte Winkel

8 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern

**Tab. 2** Toleranzen der Bearbeitung von Gesteinsprüfkörpern für einaxiale Druckversuche.

Unebenheit der Endflächen	$\pm 0,1$ mm
Abweichungen der Endflächen von der Planparallelität	$\pm 3'$

bilden. Ungenauigkeiten bei der Bearbeitung bewirken Störungen des angestrebten gleichförmigen einaxialen Spannungszustandes im Prüfkörper und führen in der Regel zur Ermittlung einer zu geringen Festigkeit. Derartige Fehler wirken sich bei sehr festen Gesteinen (z. B. Quarzit) stärker aus als bei weniger festen Gesteinen (z. B. Tonstein). Sie sind gering, wenn die in Tab. 2 genannten Toleranzen eingehalten werden.

Die Auftragung aushärtender Ausgleichsmittel zur Erzielung einwandfreier planparalleler Prüfkörperendflächen ist dann sinnvoll, wenn sich die Endflächen am natürlichen Material nicht oder nur unzulänglich bearbeiten lassen. Die Ausgleichsschicht soll möglichst dünn sein. Im Versuchsprotokoll ist bei Verwendung von Ausgleichsmitteln ein entsprechender Vermerk aufzunehmen.

### 5.3 Wassergehalt der Proben und Prüfkörper

Der Wassergehalt kann auf die Verformungseigenschaften und die Festigkeit von Gesteinsproben einen Einfluss haben. Daher ist bei der Probengewinnung nach DIN 4021, Teil 2, darauf zu achten, dass Proben, die für Laborversuche ausgewählt werden, so versiegelt, verpackt und aufbewahrt werden, dass sich ihr Wassergehalt nicht weiter verändert. Auch bei der Probenbearbeitung soll möglichst eine Veränderung des Wassergehaltes vermieden werden. Nach Beendigung jedes einaxialen Druckversuchs sollte der Wassergehalt des Prüfkörpers bestimmt werden.

### 5.4 Bestimmung der Abmessungen und der Dichte der Prüfkörper

Der Durchmesser der Prüfkörper ist am oberen und unteren Ende sowie in der Mitte jeweils in zwei zueinander senkrechten Richtungen mit einer Genauigkeit von 0,1 mm zu bestimmen. Für die Ermittlung der Querschnittsfläche ist das Mittel aus den Messungen anzusetzen. Die Prüfkörperlänge ist mit einer Genauigkeit von 0,1 mm zu messen.

Aus den Abmessungen und der Masse des Prüfkörpers vor der Versuchsdurchführung ist die Dichte  $\rho$  zu bestimmen.

## 6 Versuchsdurchführung

### 6.1 Krafteinleitung

Die Krafteinleitung in den Prüfkörper soll über ebene, geschliffene Druckplatten aus Stahl mit der Mindesthärte HRC 58 erfolgen. Die Abmessungen der Druckplatten müssen größer sein als der Prüfkörperdurchmesser, der sich einschließlich der Querdehnung im Laufe des Versuches einstellt. Die Dicke der Druckplatten muss



so groß sein, dass diese sich nicht infolge der Kraftaufbringung wölben. Die Gefahr der Wölbung besteht insbesondere dann, wenn der Durchmesser des Prüfkörpers größer ist als der Durchmesser des Prüfmaschinenkolbens oder der Kraftmessdose, an denen die Druckplatten in der Regel befestigt sind. Der Prüfkörper ist auf der unteren Druckplatte zu zentrieren.

Eine Endflächenschmierung oder andere Maßnahmen sind bei Standardversuchen nicht vorgesehen. Ihre Anwendung in Sonderfällen ist im Versuchsprotokoll zu erwähnen.

## 6.2 Belastungsregelung

Die Belastung des Prüfkörpers kann wahlweise dehnungs- oder kraftgeregelt erfolgen.

Bei Dehnungsregelung ist der Prüfkörper mit einer konstanten Dehnungsrate zu belasten. In der Regel soll die Dehnungsrate im Bereich  $0,5 \leq \dot{\epsilon}_1 \leq 1,0 \text{ mm}/(\text{m min})$  liegen. Sie ist jedoch so zu wählen, dass die Versuchsdauer bis zum Erreichen der maximalen Spannung mindestens 5 min beträgt.

Bei Kraftregelung ist der Prüfkörper mit einer konstanten Spannungsrate zu belasten. In der Regel soll die Spannungsrate im Bereich  $2,0 < \dot{\sigma} < 10,0 \text{ MN}/(\text{m}^2 \text{ min})$  liegen. Sie ist jedoch so zu wählen, dass die Versuchsdauer bis zum Erreichen der maximalen Spannung mindestens 5 min beträgt.

Für Gesteine, die ausgeprägte zeitabhängige Eigenschaften besitzen, oder für die Erfassung des Nachbruch-Verhaltens (Abschn. 6.5) sind besondere Überlegungen bezüglich der Belastungsregelung anzustellen.

**Anmerkung:** Dient die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit der Ermittlung von Schneidleistung und Meißelverbrauch von Tunnelvortriebsmaschinen, so ist die Belastung den Vorgängen in-situ angepasst kraftgeregelt und mit hoher Spannungsrate (z. B.  $\dot{\sigma} = 60 \text{ MN}/(\text{m}^2 \text{ min})$ ) vgl. DIN EN 1926) aufzubringen.

## 6.3 Kraft- und Dehnungsmessung

Die Messung der Kraft und der Deformationen des Prüfkörpers soll kontinuierlich erfolgen. Eine versuchsbegleitende Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Linie ist zur Versuchsüberwachung dienlich.

### 6.3.1 Kraftmessung

Entsprechend der Güteklasse 2 nach DIN EN ISO 7500-1 wird die Kraft mit einer relativen Anzeigeabweichung besser als  $\pm 2\%$  gemessen.

### 6.3.2 Längsdehnungsmessung

Bei der Längsdehnungsmessung mittels Längenänderungsmessung wird unterschieden in

- Messung der Änderung  $\Delta \ell_m$  einer Anfangsmesslänge  $\ell_m$  über Probenwegaufnehmer,

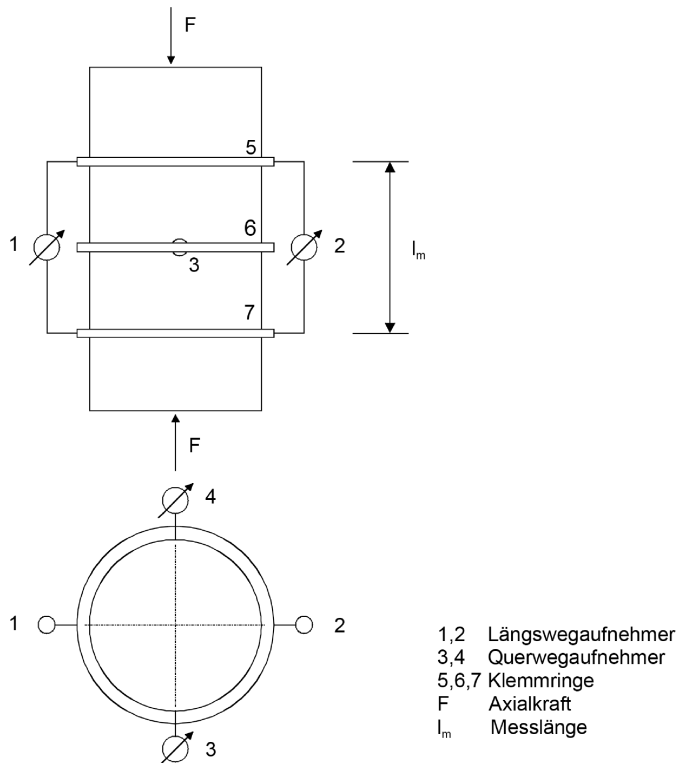
10 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern

- Messung der Änderung  $\Delta\ell$  der Anfangslänge  $\ell$  des Prüfkörpers über Wegaufnehmer zwischen den Druckplatten,
- Messung der Änderung  $\Delta\ell$  der Anfangslänge  $\ell$  des Prüfkörpers über den Maschinenwegaufnehmer (Kolbenwegaufnehmer).

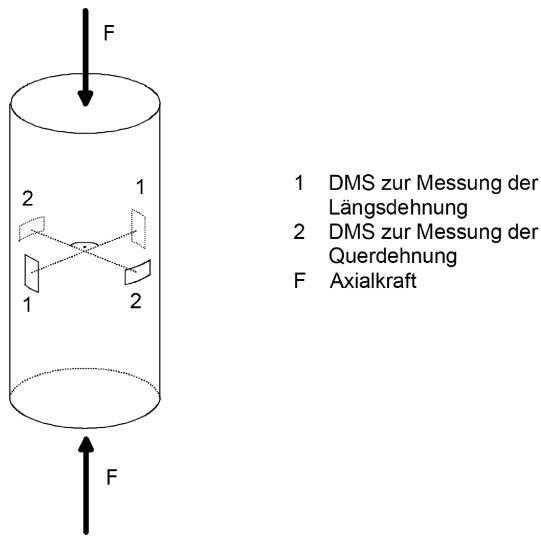
Die Verfahren mit einer Längenänderungsmessung ermitteln eine mittlere Dehnung über der Messlänge  $\ell_m$  bzw.  $\ell$ . Das Bild 4 stellt das Prinzip der Messung über eine Messlänge  $\ell_m$  dar.

**Anmerkung:** Längenänderungsmesssysteme, die über eine Messlänge  $\ell_m < \ell$  messen, sind weitgehend frei von Endflächeneinflüssen. Es lassen sich damit präzise Messungen im Vorbruch-Bereich durchführen. Sie versagen beim Überschreiten des Bruchzustandes (siehe Abschn. 6.5). Längenänderungsmessungen über die gesamte Prüfkörperlänge  $\ell$  sind nicht frei von Endflächeneinflüssen. Wird über den Kolbenwegaufnehmer gemessen, so werden zusätzlich noch Eigenverformungen der Prüfmaschine erfasst. Endflächeneinflüsse sind umso größer, je steifer das Gestein ist.

Weiterhin ist die direkte Messung über Dehnungsmessstreifen (DMS) möglich. Dehnungsmessstreifen ermitteln die Dehnung lokal über eine kurze Messstrecke. Sie sind daher nur bei hinreichend feinkörnigen, homogenen Gesteinsarten an-



**Bild 4** Prinzip der Messung der Längs- und Querdehnung mit geklemmten Wegaufnehmern über eine Messlänge  $\ell_m$ .



**Bild 5** Beispiel einer Anordnung von Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Messung der Längs- und Querdehnung.

wendbar. Die Länge der DMS muss mindestens dem 10-Fachen des Korndurchmessers der Probe entsprechen. Das Bild 5 zeigt eine mögliche Anordnung von DMS zur Messung der Längs- und Querdehnung.

Die verwendeten Messsysteme müssen der Messaufgabe angepasst sein. Je steifer das Gestein und je geringer die erwartete Bruchdehnung ist, desto höher muss die Auflösung des Messsystems und desto kleiner muss der Messbereich sein. Die Anordnung der Systeme zur Längsdehnungsmessung muss so erfolgen, dass geringfügige Verkippungen der Druckplatten keine Auswirkung auf die Messung haben.

### 6.3.3 Querdehnungsmessung

Bei der Querdehnungsmessung wird unterschieden in

- Messung der Änderung  $\Delta d$  des Anfangsdurchmessers  $d$  des Prüfkörpers über Wegaufnehmer und
- Messung der Änderung  $\Delta U$  des Anfangsumfangs  $U$  des Prüfkörpers über Wegaufnehmer.

Die Verfahren mit einer Durchmesser- oder Umfangsänderungsmessung bestimmen eine mittlere Dehnung über der Messlänge  $d$  bzw.  $U$ . Bild 4 stellt das Prinzip der Messung der Durchmesseränderung dar.

Die Messsysteme zur Querdehnungserfassung sind in der Probenmitte anzuordnen. Soll eine Anisotropie nicht berücksichtigt werden, so genügt die einfache Querdehnungsmessung. Soll eine Anisotropie berücksichtigt werden, so sind voneinander unabhängige Querdehnungsmesssysteme in zwei Achsen anzuordnen. Die Lage der Achsen ist so zu wählen, dass sie parallel und normal zum Gefüge des Gesteins (Schichtungs- oder Schieferungsebenen) orientiert sind. Die Erfassung der Quer-



12 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern

dehnungsanisotropie mit Umfangsänderungsmessungen ist nicht möglich. Bezüglich der Genauigkeitsanforderungen der Querdehnungsmessung gelten die im Abschn. 6.3.2 genannten Anforderungen analog.

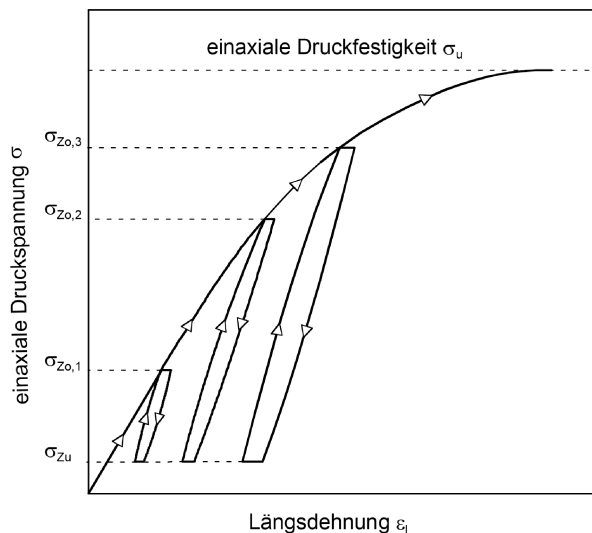
Weiterhin ist die direkte Messung über Dehnungsmessstreifen (DMS) möglich. Bild 5 zeigt eine Möglichkeit der Anordnung von DMS zur Messung der Längs- und Querdehnung.

Längs- und Querdehnungsmessungen sollten denselben Probenbereich erfassen. Nicht zulässig sind Kombinationen verschiedenartiger Messsysteme wie DMS und Wegaufnehmer.

#### 6.4 Versuche mit mehreren Lastzyklen

Um Kennwerte des elastischen Verhaltens von Gestein zu bestimmen, ist es erforderlich, den Prüfkörper in mehreren Zyklen zu be- und entlasten (Bild 6). Die Anzahl der erforderlichen Lastzyklen, die zu untersuchenden Spannungsbereiche und die Interpretation der Versuchsergebnisse müssen im Einzelfall festgelegt werden. Lastzyklen werden durch eine Oberspannung  $\sigma_{z0}$  und eine Unterspannung  $\sigma_{zu}$  begrenzt. Für Standarduntersuchungen haben sich drei Lastzyklen mit Oberspannungen  $\sigma_{z0}$  von 25, 50 und 75 % der erwarteten Bruchspannung bewährt. Die Unterspannung  $\sigma_{zu}$  ergibt sich in der Regel aus der maschinentechnisch bedingten Einspannlast bei Versuchsbeginn. Ist das für die geotechnische Fragestellung relevante Spannungsniveau bekannt, so empfiehlt es sich, den Bereich der Ober- und Unterspannungen so zu wählen, dass das relevante Spannungsniveau abgedeckt wird.

Zur Einschätzung einer eventuell vorhandenen Kriechtendenz des Gesteins können Lasthaltezeiten  $t_{z0}$  und  $t_{zu}$  in den Lastumkehrpunkten der Zyklen eingeschaltet werden. In einer Lasthaltezeit wird die Last für eine bestimmte Zeit konstant gehalten und die dabei eintretende Dehnung gemessen.



**Bild 6** Einaxialer Druckversuch mit drei Lastzyklen und Lasthaltepausen (Prinzipiskizze).

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen wird eine Lasthaltezeit von  $t_{Z0} = t_{Zu} = 5$  min im mittleren Zyklus empfohlen. Als Ergebnis können die Kriechdehnungen  $\varepsilon_{kr}$  in den Kriechzeiten  $t_0$  und  $t_u$  im Versuchsprotokoll angegeben werden.

### 6.5 Versuche mit Erfassung des Nachbruch-Verhaltens

Versuche mit Erfassung des Nachbruch-Verhaltens stellen besonders hohe Anforderungen an die Steifigkeit, die Regelung und die Datenerfassung der Prüfmaschine, die über das hinausgehen, was in Abschn. 3 ausgeführt wurde. Die folgenden vom Materialverhalten abhängigen Vorgehensweisen lassen sich nur auf speziell für diese Anforderungen ausgelegten Prüfmaschinen durchführen:

#### Gesteine der Klasse I

Bei Gestein der Klasse I (siehe Bild 3) erfolgt die Belastung in Dehnungsregelung unter konstanter Längsdehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_l$  oder konstanter Querdehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_q$ .

#### Gesteine der Klasse II

Bei Gestein der Klasse II (siehe Bild 3) muss die Belastung im Bruch- und Nachbruch-Bereich unter Querdehnungsregelung erfolgen. Für den Anfangsbereich ist auch eine kraftgeregelte Belastung möglich.

Eine weitere Möglichkeit bietet eine kombinierte Dehnungsregelung wie folgt:

1. Dehnungsregelung unter einer konstanten Längsdehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_l$  im Vorbruch-Bereich ( $\varepsilon_\ell < \varepsilon_\ell(\sigma = \sigma_u)$ ;  $0 < \sigma < 0,7\sigma_u$ ),
2. Dehnungsregelung unter einer konstanten Querdehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_q$  im Vorbruch-Bereich  $\sigma > 0,7\sigma_u$  über den Bruch hinweg bis in den Nachbruch-Bereich, solange  $\sigma > 0,5\sigma_u$  ist,
3. Dehnungsregelung unter einer konstanten Längsdehnungsrate  $\dot{\varepsilon}_l$  im Nachbruch-Bereich ( $\dot{\varepsilon}_\ell < \varepsilon_\ell(\sigma = \sigma_u)$ ;  $0 < \sigma < 0,5\sigma_u$ ).

Als Abbruchkriterium können gewählt werden:

1. Es treten keine neuen Brüche mehr auf.
2. Die Spannungs-Dehnungs-Linie verläuft annähernd horizontal.

**Anmerkung:** Die Längenänderungsmessung kann dabei entweder über den Maschinenwegaufnehmer (Kolbenwegaufnehmer) oder über Wegaufnehmer zwischen den Druckplatten, nicht jedoch über Probenwegaufnehmer erfolgen. Wegen der Bruchvorgänge im Nachbruch-Bereich kann es bei am Prüfkörper befestigten Wegaufnehmern zu spontanen Längenänderungen kommen, die die Steuerung negativ beeinflussen und sogar die Messaufnehmer beschädigen können.

14 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern

## 7 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse

Aus dem mittleren Prüfkörperdurchmesser wird die maßgebende Querschnittsfläche  $A$  berechnet, mit der sich gemäß Gl. (1) aus der Prüfkraft  $F$  die Spannung  $\sigma$  berechnen lässt.

Eine Korrektur der Querschnittsfläche  $A$ , die die unter der Spannung  $\sigma$  eingetretene Querdehnung  $\varepsilon_q$  berücksichtigt, ist in der Regel nicht erforderlich.

Die einaxiale Druckfestigkeit ist gemäß Gl. (2) gleich der maximalen im Versuch erreichten Spannung. Für alle Ablesungen können die Werte der Dehnungen  $\varepsilon_\ell$  und  $\varepsilon_q$  nach den Gln. (3) und (4) ermittelt werden. Bei der Verwendung von Dehnungsmessstreifen werden die Dehnungen  $\varepsilon_\ell$  und  $\varepsilon_q$  direkt gemessen. Durch Auftragung entsprechender Wertepaare  $(\sigma, \varepsilon_\ell)$  und  $(\sigma, \varepsilon_q)$  erhält man die Spannungs-Längsdehnungs-Kurve und die Spannungs-Querdehnungs-Kurve. Die Verformungskennwerte  $V$ ,  $E$ ,  $\nu$  und  $\nu^{\text{el}}$  sind gemäß den Gln. (7)–(10) zu ermitteln. Für die Standardauswertung sollte der Spannungsbereich  $0,4 \cdot \sigma_u \leq \sigma \leq 0,6 \cdot \sigma_u$  gewählt werden. Die zugehörigen Verformungskennwerte werden mit  $V_{40-60}$ ,  $E_{40-60}$ ,  $\nu_{40-60}$  und  $\nu_{40-60}^{\text{el}}$  bezeichnet.

Ist ein Versuch mit Erfassung des Nachbruch-Verhaltens durchgeführt worden, so kann die Verformungsarbeit  $W$  z. B. nach [6] ermittelt werden. Wurden im Nachbruch-Bereich Zyklen eingeschaltet, so können Elastizitätsmodule  $E_{\text{pf}}$  nach Gl. (15) ermittelt werden.

Bei vielen Anwendungen ist die Angabe von Verformungskennwerten für einen vorgegeben Lastbereich gewünscht (vgl. Abschn. 4). In diesen Fällen ergibt sich der Spannungsbereich direkt aus den gewählten Ober- und Unterspannungen der Zyklen. Die Verformungskennwerte werden mit dem Index  $\sigma_{Zu}/\sigma_{Zo}$  gekennzeichnet und lauten  $V_{\sigma_{Zu}/\sigma_{Zo}}$ ,  $E_{\sigma_{Zu}/\sigma_{Zo}}$ ,  $\nu_{\sigma_{Zu}/\sigma_{Zo}}$  und  $\nu_{\sigma_{Zu}/\sigma_{Zo}}^{\text{el}}$ .

Mit dem Ergebnis des einaxialen Druckversuchs sind noch folgende Angaben zu protokollieren:

- Beschreibung des untersuchten Gesteins
- Herkunft der Probe, Tiefe unter GOK, Orientierung, Zeitpunkt der Entnahme
- eventuell vorhandene Schieferung, Schichtung oder sonstige erkennbare Anisotropie und deren Lage zur Belastungsrichtung (gegebenenfalls Skizzen, Fotos von Längs- und Querschnitt)
- Probenlagerungsbedingungen und -dauer
- Zeitpunkt der Versuchsdurchführung
- Wassergehalt zur Zeit der Versuchsdurchführung
- Dichte der Probe
- Prüfkörperabmessungen
- Art und Durchführung der Verformungsmessung
- Dehnungs- bzw. Spannungsrate bei der Versuchsdurchführung
- eventuelle Abweichungen von den hier gegebenen Empfehlungen
- Form des Bruches (Skizze oder Foto)
- Angaben zur Prüfmaschine (Lastbereich, Wegmesssystem, Güteklassen etc.)

## 8 Versuchsoptionen

Je nach Untersuchungsziel und Probenqualität kann es sinnvoll sein, nur einen Teil der oben genannten Optionen der Versuchsdurchführung anzuwenden. In Tab. 3 sind häufig angewandte Versuchsoptionen zusammengestellt. Die Optionen können durch folgende Zusätze hinsichtlich des verwendeten Wegmesssystems weiter spezifiziert werden:

- WAP: Messung über Probenwegaufnehmer an der Probe ( $\ell_m < \ell$ )
- WAD: Messung über Wegaufnehmer zwischen den Druckplatten
- WAK: Messung über Kolbenwegaufnehmer
- DMS: Messung über Dehnungsmessstreifen

**Tab. 3** Standardoptionen für einaxiale Druckversuche (1DV).

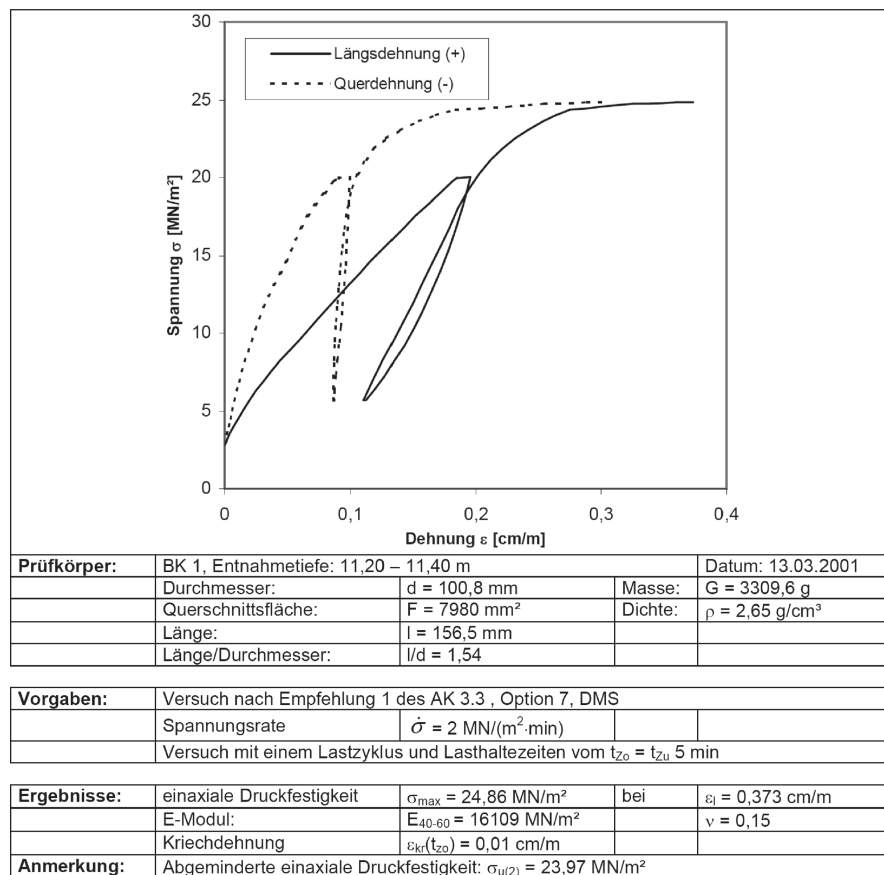
Option	Kurzbeschreibung	Erzielbare Ergebnisse
1	1DV ohne Verformungsmessung	$\sigma_u$
2	1DV mit Längsdehnungsmessung ohne Zyklen	$\sigma_u, V$
3	1DV mit Längsdehnungsmessung mit Zyklen	$\sigma_u, V, E$
4	1DV mit Längsdehnungsmessung mit Zyklen und Lastumkehrpausen	$\sigma_u, V, E, \dot{\epsilon}(t_u)$
5	1DV mit Längs- und einfacher Querdehnungsmessung ohne Zyklen	$\sigma_u, V, \nu$
6	1DV mit Längs- und einfacher Querdehnungsmessung mit Zyklen	$\sigma_u, V, E, \nu$
7	1DV mit Längs- und einfacher Querdehnungsmessung mit Zyklen und Lastumkehrpausen	$\sigma_u, V, E, \nu, \nu^{el}, \dot{\epsilon}(t_u)$
8	1DV mit Längs- und zweifacher Querdehnungsmessung mit Zyklen und Lastumkehrpausen	$\sigma_u, V, \nu_{min}, \nu_{max}, E, \nu_{min}^{el}, \nu_{max}^{el}, \dot{\epsilon}(t_u)$
9	1DV mit Längsdehnungsmessung und Erfassung des Nachbruch-Verhaltens ohne Zyklen im Nachbruch-Bereich	Wie Option 2, jedoch zusätzlich Nachbruch-Bereich mit $W$
10	1DV mit Längsdehnungsmessung und Erfassung des Nachbruch-Verhaltens mit Zyklen im Nachbruch-Bereich	Wie Option 2, jedoch zusätzlich Nachbruch-Bereich mit $E_{pf}$
11	1DV mit Längsdehnungsmessung, einfacher Querdehnungsmessung und Erfassung des Nachbruch-Verhaltens ohne Zyklen im Nachbruch-Bereich	Wie Option 5, jedoch zusätzlich Nachbruch-Bereich mit $W$
12	1DV mit Längsdehnungsmessung, einfacher Querdehnungsmessung und Erfassung des Nachbruch-Verhaltens mit Zyklen im Nachbruch-Bereich	Wie Option 5, jedoch zusätzlich Nachbruch-Bereich mit $E_{pf}$

16 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern

## 9 Anwendungsbeispiele

### 9.1 Einaxialer Druckversuch nach Option 7 (DMS)

Bild 7 zeigt das Beispiel eines einaxialen Druckversuchs mit Längs- und Querdehnungsmessung sowie einem Entlastungs-Wiederbelastungs-Zyklus mit Lasthaltezeiten  $t_{z0} = t_{zu} = 5$  min in den Lastumkehrpunkten. Die Belastung erfolgte spannungsgeregelt mit einer Spannungsrate von  $\dot{\sigma} = 2 \text{ MN}/(\text{m}^2 \text{ min})$ . Tabelle 4 gibt ein Beispiel des Versuchsprotokolls eines einaxialen Druckversuches.



**Bild 7** Einaxialer Druckversuch mit einem Lastzyklus und Lasthaltepausen.



**Tab. 4** Versuchsprotokoll eines einaxialen Druckversuchs mit einem Lastzyklus und Lasthaltepausen.

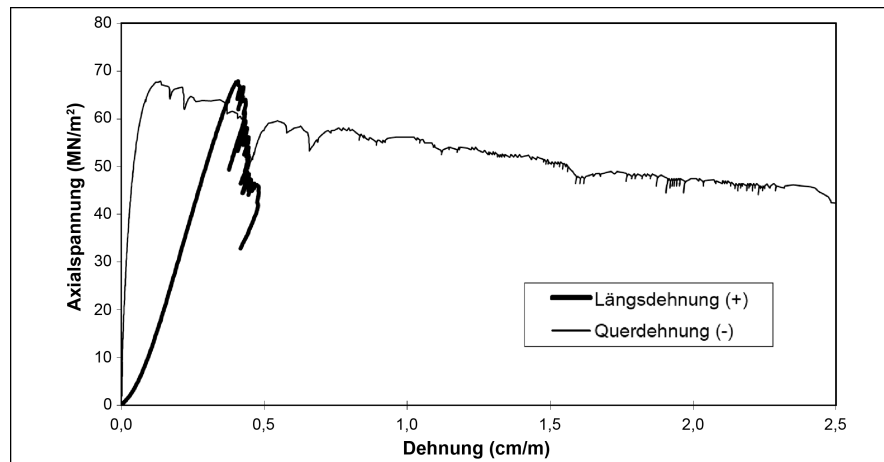
<b>Bezeichnung des Labors:</b>	<b>Bauvorhaben:</b>	<b>Az: 303 Datum: 13.03.2001</b>
Einaxialer Druckversuch an Gesteinsproben – Option 7, DMS nach DGGT, AK 3.3, E 1		
Gestein: Tonstein, grau Bohrung Nr.: BK 1 Entnahmetiefe: 11,20–11,40 m Angaben zur Bohrung: Kernbohrung mit Doppelkernrohr, vertikal Kerndurchmesser $d_k = 101$ mm, Wasserspülung Zeitpunkt der Entnahme: 13.01.2001 Anisotropie: Schichtung horizontal, d. h. senkrecht zur Kernachse Probenlagerung: in Aluminiumfolie mit Wachsüberzug Datum der Probenanlieferung: 17.01.2001 Datum der Versuchsdurchführung: 13.03.2001 Verformungsmessung: induktiver Wegaufnehmer für Längsdehnungen, DMS-Messspange für Querdehnungsmessungen		
Spannungsrate: $\dot{\sigma} = 2$ MN/(m <sup>2</sup> min) Prüfkörperlänge: 156,5 mm Prüfkörperdurchmesser: 100,8 mm Masse vor Versuchsdurchführung: 3309,6 g Dichte der Probe: $\rho = 2,65$ g/cm <sup>3</sup> Wassergehalt: $w = 6,18$ % Sonstiges: Prüfkörperschlankheit $h/d = 1,54 < 2,0$ Druckfestigkeit: $\sigma_u = 24,9$ MN/m <sup>2</sup>		
Moduln: $E_{40-60} = 16\,100$ MN/m <sup>2</sup> Querdehnungszahlen: $\nu_{40-60}^{el} = 0,15$ Angaben zur Prüfmaschine: Güteklasse 1	$V_{40-60} = 8670$ MN/m <sup>2</sup> $\nu_{40-60} = 0,45$ Lastkapazität: 1000 kN, Serien-Nr.: 45237/98	
Versuchsdurchführung:	Laborleiter:	

## 9.2 Einaxialer Druckversuch nach Option 12 (WAP)

Bild 8 zeigt das Beispiel eines einaxialen Druckversuches mit Längsdehnungs- und einfacher Querdehnungsmessung sowie einem Entlastungs-Wiederbelastungs-Zyklus ohne Lasthaltezeiten im Nachbruch-Bereich. Die Belastung erfolgte querdehnungsgeregelt mit einer Umfangsänderungsrate von  $\dot{d} = 0,005$  mm/min.

Tabelle 5 gibt ein Beispiel des Versuchsprotokolls eines einaxialen Druckversuches.

18 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern



<b>Prüfkörper:</b>	BK 1, Entnahmetiefe: 121,70 – 121,90 m	Datum: 15.07.2001
Durchmesser:	d = 50,23 mm	Masse: G = 513,3 g
Querschnittsfläche:	F = 1981,6 mm <sup>2</sup>	Dichte: ρ = 2,51 g/cm <sup>3</sup>
Länge:	l = 103,21 mm	
Länge/Durchmesser:	l/d = 2,05	

<b>Vorgaben:</b>	Versuch nach Empfehlung 1 des AK 3.3, Option 12, WAD		
Querdehnungsrate	$\dot{\epsilon}_t = 0,01$ cm/(m·min)		
Versuch mit Lastzyklen im Nachbruch-Bereich			

<b>Ergebnisse:</b>	einaxiale Druckfestigkeit	$\sigma_{max} = 67,88$ MN/m <sup>2</sup>	bei	$\epsilon_t = 0,373$ cm/m
	V-Modul:	$V_{40-60} = 20660$ MN/m <sup>2</sup>		$v_{40-60} = 0,24$
	$E_{pf} = 17600$ MN/m <sup>2</sup>			
<b>Anmerkung:</b>	$E_{pf}$ wurde im Spannungsintervall $60 > \sigma > 50$ MN/m <sup>2</sup> bestimmt.			

**Bild 8** Einaxialer Druckversuch mit Messung des Nachbruch-Verhaltens einschließlich Lastzyklen.

**Tab. 5** Versuchsprotokoll eines einaxialen Druckversuchs mit Messung des Nachbruch-Verhaltens einschließlich Lastzyklen.

**Bezeichnung des Labors:** Bauvorhaben: **Az: 303 Datum: 23.05.2001**

Einaxialer Druckversuch an Gesteinsproben – Option 10, WAD, nach DGGT, AK 3.3, E 1

Gestein: Sandstein, rot  
 Entnahme als Handstück im Steinbruch  
 Entnahmetiefe: Geländeoberfläche  
 Angaben zur Bohrung: Laborbohrgerät, Einfachkernrohr,  $\varnothing_{innen} = 51$  mm, senkrecht zur Schichtung gebohrt, Wasserspülung  
 Kerndurchmesser  $d_k = 50,5$  mm  
 Zeitpunkt der Entnahme: 17.05.2001  
 Anisotropie: Schichtung horizontal, d. h. senkrecht zur Kernachse  
 Probenlagerung: offen  
 Datum der Probenanlieferung: 17.05.2001  
 Datum der Versuchsdurchführung: 23.05.2001

**Tab. 5** (Fortgesetzt). Versuchsprotokoll eines einaxialen Druckversuchs mit Messung des Nachbruch-Verhaltens einschließlich Lastzyklen.

<b>Bezeichnung des Labors:</b>	<b>Bauvorhaben:</b>	<b>Az: 303 Datum: 23.05.2001</b>
Verformungsmessung: elektronische Wegaufnehmer für Längsdehnungen, elektronische Umfangsmessung für Querdehnungsmessungen		
Umfangsänderungsrate: $d = 0,005 \text{ mm/min}$ Prüfkörperlänge: 103,21 mm Prüfkörperdurchmesser: 50,23 mm Masse vor Versuchsdurchführung: 513,3 g Dichte der Probe: $\rho = 2,51 \text{ g/cm}^3$ Wassergehalt: keine Angabe Sonstiges: Prüfkörperschlankheit $h/d = 2,05$ Druckfestigkeit: $\sigma_u = 67,9 \text{ MN/m}^2$		
Moduln: $E_{40-60} = (\text{nicht best.})$ $V_{40-60} = 20\,660 \text{ MN/m}^2$ $E_{pf} = 17\,600 \text{ MN/m}^2$ Querdehnungszahlen: $\nu_{40-60}^{el} = (\text{nicht best.})$ $\nu_{40-60} = 0,24$		
Angaben zur Prüfmaschine: Güteklasse 1		Lastkapazität: 1000 kN, Serien-Nr.: 123/96
Versuchsdurchführung:	Laborleiter:	

**Anmerkung:** Bezüglich der Kalibrierung der Prüfmaschine sind die Festlegungen der DIN 51220 „Allgemeines zu Anforderungen an Werkstoffprüfmaschinen und zu deren Kalibrierung“ zu beachten. Insbesondere sind die Zeitintervalle für die Kalibrierungen einzuhalten.

## Literatur

- 1 DIN EN 1926 (1999). Ausgabe:1999-05: *Prüfverfahren von Naturstein – Bestimmung der Druckfestigkeit*. Deutsche Fassung EN 1926:1999.
- 2 DIN 18136 (1996). Ausgabe:1996-08: *Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Einaxialer Druckversuch*.
- 3 ISRM (1999). Commission on Testing Methods: Suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 36: 279–289.
- 4 Jaeger, J.C. und Cook, N.G.W. (1969). *Fundamentals of Rock Mechanics*. London: Methuen.
- 5 Obert, L. und Duvall, W.I. (1967). *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*. New York: John Wiley & Sons.
- 6 Thuro, K. (1996). Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Geologisch-fels-mechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. *Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie B1*: 1–145, I–XII.

20 | Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern

- 7 Wawersik, W.R. und Fairhurst, C. (1970). A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 13: 16–67.
- 8 DIN EN ISO 7500-1 (1999). Ausgabe:1999-11: *Metallische Werkstoffe – Prüfung von Prüfmaschinen für statische einachsige Beanspruchung – Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen; Prüfung und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtungen* (ISO 7500-1:1999), Deutsche Fassung EN ISO 7500-1:1999.
- 9 DIN EN ISO 9513 Beiblatt 1 (2003). Ausgabe:2003-05: *Metallische Werkstoffe – Kalibrierung von Längenänderungs-Messeinrichtungen für die Prüfung mit einachsiger Beanspruchung – Beispiele für mechanische Wegaufnehmer-Systeme und deren Kalibrierung*.