



Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.)

# Empfehlungen des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels"

- Sammlung von Versuchsanleitungen
- hilfreiche Hinweise zur Auswertung
- ausführlicher als Normen

Das Buch fasst die bisher erschienenen 25 Empfehlungen des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" zusammen und bietet damit eine Arbeitshilfe für alle, die sich mit der Beprobung, Versuchsdurchführung, Auswertung und Interpretation der Eigenschaften von Festgesteinen befassen.



2022 · 374 Seiten · 20 Tabellen

Hardcover

ISBN 978-3-433-03350-0

€89\*

eBundle (Softcover + ePDF)

ISBN 978-3-433-03351-7 € 119\*

## ÜBER DAS BUCH

Der Arbeitskreis AK 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. erarbeitet Empfehlungen für felsmechanische Labor- und Feldversuche sowie Messungen im Gebirge und an geotechnischen Bauwerken. Das vorliegende Buch fasst die bisher erschienenen 25 Empfehlungen des Arbeitskreises zusammen und bietet damit eine Arbeitshilfe für alle, die sich mit der Beprobung, Versuchsdurchführung, Auswertung und Interpretation der Eigenschaften von Festgesteinen befassen.

#### **BESTELLUNG**

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:

Tel. +49 (0)30 47031-236 Fax +49 (0)30 47031-240

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03350-0	Empfehlungen des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels"	€89*
	978-3-433-03350-07	Empfehlungen des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" (eBundle)	€ 119*

BESTELLEN +49 (0)30 470 31-236 marketing@ernst-und-sohn.de www.ernst-und-sohn.de/3350

marketing@ernst-und-sohn.de	Name, Vorname	Telefon	Fax	
108208 Free Shipping				
	Straße, Nr.			
	P17/0 / //			
	PLZ/Ort/Land	E-Mail		
www.ernst-und-sohn.de/3350	Datum / Unterschrift			

Firma, Abteilung

UST-ID Nr.

#### Vorwort

Der Arbeitskreis 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT) hat innerhalb der Fachsektion "Felsmechanik" die Aufgabe, Empfehlungen für die Durchführung von felsmechanischen Labor- und Feldversuchen sowie Messungen im Gebirge und an geotechnischen Bauwerken zu erarbeiten. In diesen Dokumenten werden Messprinzipien, die Anforderungen an Geräte sowie Vorgehensweisen für die Durchführung und Auswertung solcher Versuche und Messungen festgelegt. Damit soll erreicht werden, dass Versuchs- und Messergebnisse miteinander vergleichbar sind.

Der Arbeitskreis wurde im Jahr 1976 als Arbeitskreis 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. (DGEG) gegründet. In der Folge der Umbenennung der DGEG in DGGT im Jahre 1994 wurden die Arbeitskreise neu gegliedert und zugeordnet. Seit 1995 ist der Arbeitskreis mit AK 3.3 "Versuchstechnik Fels" der DGGT benannt und gehört zur Fachsektion 3 "Felsmechanik".

Der Arbeitskreis wird gemäß der Geschäftsordnung für Arbeitskreise der DGGT von einem Obmann geleitet. Bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Sammlung haben folgende Herren den Arbeitskreis geleitet:

1976–1993 Prof. Dr. Arno Pahl,
1993–1998 Prof. Dipl.-Ing. Axel Paul,
1998–2020 Dipl.-Ing. Thomas Mutschler,
seit 2020 Dr. Ralf J. Plinninger (Stellvertreter Dr. Thomas Frühwirt).

Die Mitglieder des Arbeitskreises bilden ein Kompetenzteam, das hinsichtlich seiner fachlichen Expertise ebenso wie bezüglich seiner beruflichen Erfahrung das Anwendungsgebiet des felsmechanischen Versuchswesens sehr weit abdeckt. Sie kommen aus den Ingenieur- und Naturwissenschaften und sind in Forschung und Lehre, in Fachbehörden sowie in Firmen, die mit der praktischen Umsetzung von geotechnischen Projekten sowie der Herstellung von Versuchs- und Messeinrichtungen befasst sind, tätig.

Der Dank der Herausgeber dieses Buches gilt den ehemaligen und aktuellen Mitgliedern und Gästen des Arbeitskreises (Mitgliederliste in alphabetischer Reihung).

Dr.-Ing. Lars Baumgarten Prof. Dr. Helmut Bock Dipl.-Ing. Winfried Bork Dr.-Ing. Horst Düllmann Dr Ian Diillmann Dr. Mandy Duda Dr.-Ing. Georg Everling Prof. Dr. Edwin Fecker Dipl.-Ing. Martin Feinendegen Prof. Dr.-Ing. Bernhard Fröhlich Dr.-Ing. Erwin Gartung Prof. Dr.-Ing. Karl F. Henke Dipl.-Ing. Peter Herzel Dr.-Ing. Jürgen Hesser Prof. Dr. Stefan Heusermann

Dr. Eberhard Jahns Dr. Heiko Käsling Dr.-Ing. Werner Kaiser Dr. Johannes R. Kiehl Dipl.-Ing. Ekkehard König Dipl.-Geophys. Eberhard Kunz

Dr. Udo Hunsche

Dr.-Ing. Wolfhard Leichnitz Dr.-Ing. Michael Lepique Dr.-Ing. Julia Leuthold Dr.-Ing. Gerhard Lögters Dr.-Ing. Wolfgang Minkley Dr. Gerhard Müller Dr.-Ing. Hans Neuber

Dr. Till Popp

Dipl.-Ing. Ulrich Priesnitz Prof. Dr. Gerhard Reik Dr.-Ing. Peter Rißler

Dipl.-Min. Götz-Peter Rosetz Prof. Dr.-Ing. Fritz Rummel Dipl.-Ing. Michael Schlebusch Dr.-Ing. Hans-Joachim Schneider Dipl.-Ing. Jürgen Schneider-Glötzl

Dr. Otto Schulze Dipl.-Ing. Ulrich Sieler Prof. Dr. Kurosch Thuro Dr. Fritz Walter

Prof. Dr.-Ing. Lutz Wichter

Gäste des Arbeitskreises:

Dr. Benedikt Ahrens Dr. Alexandra Amann Prof. Dr. Manfred Blümel Dr.-Ing. Manfred Haupt

Dr.-Ing. Maximiliano Vergara Dr. Ulrich Völter Prof Dr Gerhard Zenz

## Über dieses Buch

Die Ursprünge der Empfehlungen des Arbeitskreises 3.3 liegen meist in den Empfehlungen der Kommission für Versuchsmethoden der Internationalen Gesellschaft für Felsmechanik (Suggested Methods of the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics - ISRM). Dabei werden Themen, für die ein praktischer Bedarf im Bereich der DGGT gesehen wird, herausgegriffen und Inhalte, die mit den nationalen Erfahrungen übereinstimmen, in die deutsche Sprache übersetzt. Abweichungen zu den Suggested Methods der ISRM rühren daher, dass dort entweder im nationalen Kontext unübliche Prozeduren beschrieben werden oder Vorgehensweisen, die im deutschsprachigen Raum den Stand der Technik repräsentieren, fehlen. Die Empfehlungen des Arbeitskreis 3.3 enthalten zudem in der Regel detailliertere Angaben als die ISRM Suggested Methods. Zahlreiche Empfehlungen wurden auch auf Basis der spezifischen Expertise im Arbeitskreis neu entwickelt und haben (noch) keine Entsprechung im internationalen Kontext.

Ein Teil der Empfehlungen wurde bereits vom DIN-Arbeitsausschuss NABau 05.03.00 "Baugrund; Laborversuche" aufgegriffen und in DIN-Normen überführt. Die Empfehlungen der DGGT zum gleichen Thema bieten dem Nutzer über die DIN-Normen hinaus ergänzende praktische Hinweise zur Umsetzung der jeweiligen Versuche und werden vom Arbeitskreis daher in einem solchen Fall nicht formal zurückgezogen.

Neben der Erarbeitung von neuen Empfehlungen ist der Arbeitskreis auch zunehmend damit befasst, ältere Fassungen von Empfehlungen zu überarbeiten und an den aktuellen Stand der Technik anzupassen.

Dieses Buch enthält erstmals eine vollständige Sammlung der vom Arbeitskreis 3.3 der DGGT (bzw. seinem Vorgänger, dem Arbeitskreis 19 der DGEG) im 45-jährigen Zeitraum des Bestehens von 1976 bis 2021 erarbeiteten Empfehlungen Nummer 1 bis Nummer 25. Die Empfehlungen sind in der jeweils letzten veröffentlichten Version wiedergegeben und wurden lediglich der neuen deutschen Rechtschreibung angepasst. Normenverweise wurden nicht angepasst und entsprechen der Referenzierung zum Zeitpunkt der jeweiligen Veröffentlichung.

Um den Charakter einer "Loseblattsammlung" beizubehalten, wurde ebenfalls darauf verzichtet, im Original getrennt publizierte Empfehlungsteile zu einem - redaktionell stark überarbeiteten - Kapitel zusammenzufassen. Dies trifft u. a. auf die Neufassung der Empfehlung Nr. 14 zu, deren getrennt publizierte Teile 1 (Triaxialmesssonden) und 2 (Weggebersonden) sich auch in diesem Buch in separaten Kapiteln wiederfinden.

Für den versierten Anwender stellt dieses Kompendium damit erstmals ein kompaktes Nachschlagewerk zur Verfügung. Darüber hinaus verbinden die Herausgeber mit der vorliegenden Buchveröffentlichung aber auch die Hoffnung, die Empfehlungsarbeit des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" einem noch breiteren Fachpublikum zugänglich zu machen und damit einen Beitrag zur interdisziplinären Zusammenarbeit in der Geotechnik und zur Lösung geotechnischer Aufgabenstellungen zu leisten.

Pfinztal/Bernried/Freiberg, im Februar 2022

Thomas Mutschler Ralf Plinninger Thomas Frühwirt

## **Inhaltsverzeichnis**

Gesteinsprüfkörpern 1

#### Vorwort V

9.1 9.2

Literatur 19

Übersicht über die bisher veröffentlichten Empfehlungen des Arbeitskreis 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. XXIII

Empfehlung Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen

	Thomas Mutschler	
1	Zweck 1	
2	Kurzbeschreibung des Verfahrens 1	
3	Begriffe 2	
4	Prüfeinrichtung 6	
5	Prüfkörper und Proben 6	
5.1	Abmessungen der Prüfkörper 6	
5.2	Bearbeitung der Prüfkörper 7	
5.3	Wassergehalt der Proben und Prüfkörper 8	
5.4	Bestimmung der Abmessungen und der Dichte der Prüfkörper	8
6	Versuchsdurchführung 8	
6.1	Krafteinleitung 8	
6.2	Belastungsregelung 9	
6.3	Kraft- und Dehnungsmessung 9	
6.4	Versuche mit mehreren Lastzyklen 12	
6.5	Versuche mit Erfassung des Nachbruch-Verhaltens 13	
7	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 14	
8	Versuchsoptionen 15	
9	Anwendungsbeispiele 16	

Einaxialer Druckversuch nach Option 7 (DMS) 16

Einaxialer Druckversuch nach Option 12 (WAP) 17

•	
	Empfehlung Nr. 2: Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben 21 Peter Rißler
1	Zweck 21
2	Begriffe 21
3	Prüfeinrichtung 23
4	Prüfkörper 25
4.1	Abmessungen der Prüfkörper 25
4.2	Bearbeitung der Prüfkörper 25
4.3	Wassergehalt und Dichte der Prüfkörper 26
5	Versuchsdurchführung 26
5.1	Bestimmung der Abmessungen der Prüfkörper 26
5.2	Ablauf des Versuchs 26
5.3	Kraft- und Längenänderungsmessung 27
5.4	Zelldruck- und Porenwasserdruckmessungen 27
6	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 27
6.1	Beim Bruch wirkender Spannungszustand 27
6.2	Festigkeitsparameter $c$ und $\phi$ 27
6.3	Verformbarkeit 29
6.4	Ergänzende Angaben 29
7	Anwendungsbeispiel 30
	Function No. 7 Deciminate Development and Hilling and Co. Obst. Lance
	Empfehlung Nr. 3: Dreiaxiale Druckversuche an geklüfteten Großbohrkernen im Labor 33
	Lutz Wichter
1	Zweck der Versuche 33
2	Begriffe 33
3	Prüfeinrichtungen 34
3.1	Druckzelle 35
3.2	Zelldruck 35
3.3	Aufbringen der axialen Prüfkraft 36
3.4	Druckplatten 36
3.5	Seitliche Abdichtung des Prüfkörpers 36
3.6	Messung und Registrierung 36
4	Probenmaterial 38
4.1	Probengewinnung 38
4.2	Entnahmestellen 38
4.3	Probengröße 38
4.4	Längen-Durchmesserverhältnis 38
4.5	Probenaufbewahrung 39
4.6	Wassergehalt 39
4.7	Endflächenbearbeitung 39
5	Durchführung der Versuche 39
5.1	Dränagebedingungen 39
5.2	Wahl der Dehnungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_{ m l}$ 39
5.3	Wahl des Seitendruckes 40

6	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 40		
6.1	Spannungs-Dehnungslinien 41		
6.2	Schubspannungs-Normalspannungsdiagramme 41		
7	Anwendungsbeispiel 42		
	Empfehlung Nr. 4: Scherversuch in situ 45		
	Karl F. Henke und Werner Kaiser		
1	Zweck 45		
2	Begriffe 45		
2.1	Normal- und Scherspannung 45		
2.2	Verschiebung durch Aufbringen der Normalkraft 45		
2.3	Verschiebung in Scherkraftrichtung 45		
2.4	Verschiebung in Normalkraftrichtung nach Aufbringen		
	der Scherkraft 46		
2.5	Scherfestigkeitsparameter 46		
3	Versuchseinrichtung 47		
4	Versuchsvorbereitung 48		
4.1	Form und Größe des Prüfkörpers 48		
4.2	Bearbeitung des Prüfkörpers 49		
4.3	Trennflächengefüge, Wassergehalt und Dichte 50		
5	Versuchsdurchführung 50		
6	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 51		
6.1	Berücksichtigung der Dilatation 51		
6.2	Scherfestigkeitsparameter 51		
6.3	Versuchsprotokoll 52		
7	Anwendungsbeispiel 52		
	Empfehlung Nr. 5: Punktlastversuche an Gesteinsproben 55		
	Kurosch Thuro		
1	Zweck der Empfehlung 55		
2	Kurzbeschreibung des Verfahrens 55		
3	Begriffe und Formelzeichen 56		
4	Prüfeinrichtung 58		
4.1	Prüfrahmen und Belastungseinrichtung 59		
4.2	Kraftmesseinrichtung 60		
4.3	Längenmesseinrichtungen 60		
4.4	Geräteprüfungen 60		
5	Probekörper 61		
5.1	Eignung 61		
5.2	Probekörpergröße und -form 61		
6	Versuchsdurchführung 62		
7	Auswertung 63		
7.1	Gültige und ungültige Versuche 63		
7.2	Ermittlung des Punktlastindex und der Punktlastfestigkeit 63		
8	Darstellung der Ergebnisse 65		

9	Ableitung der einaxialen Druckfestigkeit aus der Punktlastfestigkeit 66
10	Anwendungsbeispiele 66
10.1	Versuchsoption 1: Ermittlung des Punktlastindex im Einzelversuch 66
10.2	Versuchsoption 2: Vereinfachtes Verfahren 68
10.3	Versuchsoption 3: Auswertung nach dem LOGAR-Verfahren 69
	Literatur 70
	Empfehlung Nr. 6: Doppel-Lastplattenversuch in Fels 71
	Gerhard Müller, Hans Neuber und Axel Paul
1	Zweck 71
2	Begriffe 71
3	Geräte 72
3.1	Lastplatten 73
3.2	Belastungssystem 73
3.3	Geräte zur Kraftmessung 73
3.4	Geräte zur Verschiebungsmessung 74
4	Aufbau der Versuchseinrichtung 74
5	Versuchsdurchführung 75
6	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 75
7	Anwendungsbeispiele 76
7.1	Anwendungsbeispiel I: Doppel-Lastplattenversuch mit einer
	Versuchseinrichtung 76
7.2	Anwendungsbeispiel II: Einfacher Doppel-Lastplattenversuch 78
	Literatur 81
	Empfehlung Nr. 7: Schlitzentlastungs- und Druckkissen-
	Belastungsversuche 83
	Wolfhard Leichnitz und Gerhard Müller
1	Zweck 83
2	Begriffe 83
3	Prüfeinrichtungen 85
3.1	Einrichtungen zum Herstellen und Testen großer Schlitze mit mittlerer
	und großer Weite 85
3.2	Einrichtungen zum Herstellen und Testen großer Schlitze mit kleiner
	Weite 86
3.3	Einrichtungen zum Herstellen und Testen kleiner Schlitze 87
3.4	Einrichtungen zum Aufbringen der Belastungen 88
3.5	Einrichtungen zur Bestimmung der Verschiebungen des Gebirges 88
3.6	Einrichtungen zur Messung der Druckkissenaufweitungen 88
4	Auswahl des Versuchsortes und Versuchsvorbereitung 89
4.1	Großer Schlitz 89
4.2	Kleine Schlitze 89
5	Versuchsdurchführung 89
5.1	Einrichtung der Messstrecken für die Verschiebungsmessungen 89

5.2	Entspannung durch Schlitzherstellung und Messung der Verschiebungen 90
5.3	Einbau der Druckkissen 90
5.4	
5. <del>4</del> 6	
-	Versuchsauswertung und Darstellung der Messergebnisse 91 Bestimmung einer Spannungskomponente 91
6.1	
6.2	Bestimmung des Gebirgsverformungsmoduls 91 Literatur 94
	Literatur 94
	Empfehlung Nr. 8: Dilatometerversuche in Felsbohrungen 95
	Arno Pahl
1	Zweck 95
2	Begriffe 95
3	Geräte 96
4	Versuchsvorbereitung 97
5	Versuchsdurchführung 97
6	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 98
7	Anwendungsbeispiele 98
	5 1
	Empfehlung Nr. 9: Wasserdruckversuch in Fels 103
	Peter Rißler
1	Zweck 103
2	Begriffe 103
2.1	Wasserwegigkeit 103
2.2	Durchfluss 103
2.3	Pumpendruck 103
2.4	Einpressdruck 103
2.5	Druckhöhe 104
2.6	Energieverluste 104
2.7	Durchlässigkeit des Gebirges 104
2.8	Durchlässigkeit in der Ebene einer Trennflächenschar 104
2.9	Wasseraufnahme 104
3	Versuchseinrichtung 105
3.1	Allgemeines 105
3.2	Pumpe und Zuleitung 105
3.3	Packer 105
3.4	Druckmesseinrichtung 107
3.5	Durchflussmesseinrichtung 107
3.6	Registriereinrichtung 107
4	Versuchsvorbereitung 108
5	Versuchsdurchführung 109
6	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 110
6.1	Charakteristische Ergebnisse des WD-Versuchs 110
6.2	Auswertung 111

Anwendungsbeispiel 115

7

	Empfehlung Nr. 10: Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben –
	Spaltzugversuch 117
	Michael Lepique
1	Anwendungsbereich und Zweck 117
2	Kurzbeschreibung des Verfahrens 117
3	Begriffe und Formelzeichen 117
3.1	Begriffe 117
3.2	Formelzeichen 118
4	Prüfeinrichtung 118
5	Probekörper 119
5.1	Abmessung der Probekörper 119
5.2	Bearbeiten der Probekörper 119
5.3	Richtungsabhängigkeit 120
5.4	Wassergehalt der Proben und Probekörper 121
5.5	Bestimmung der Abmessungen und der Dichte der Probekörper 121
6	Versuchsdurchführung 122
7	Auswertung 123
8	Darstellung der Ergebnisse und Prüfbericht 123
	Literatur 123
	Empfehlung Nr. 11: Quellversuche an Gesteinsproben 125
	Axel Paul
1	Vorbemerkung 125
2	Zweck 125
3	Begriffe 125
4	Prüfeinrichtung 126
5	Prüfkörper 127
6	Versuchsdurchführung 128
6.1	Kompensation des Probenahmeeinflusses 128
6.2	Quellhebungsversuch 128
6.3	Quellversuch nach Kaiser/Henke 129
6.4	Quellversuch nach Huder/Amberg 129
6.5	Quelldruckversuch 130
7	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 131
7.1	Allgemeine Angaben 131
7.2	Quellhebungsversuch 131
7.3	Quellversuch nach Kaiser/Henke 131
7.4	Quellversuch nach Huder/Amberg 131
7.5	Quelldruckversuch 132
8	Anwendungsbeispiele 132
	Literatur 135

	Empfehlung Nr. 12: Mehrstufentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen
	und direkten Scherversuchen 137
	Lutz, Wichter
1	Zweck der Empfehlung 137
2	Begriffe 137
3	Prüfeinrichtungen 137
4	Proben 138
5	Versuchsdurchführung 138
5.1	Direkte Scherversuche 138
5.2	Dreiaxiale Druckversuche 140
6	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 141
7	Beispiele 141
7.1	Direkter Scherversuch in situ 141
7.2	Dreiaxialer Druckversuch im Labor 143
	Literatur 146
	Empfehlung Nr. 13: Laborscherversuch an Felstrennflächen 147
	Wolfhard Leichnitz
1	Zweck 147
2	Begriffe 147
2.1	Scherverhalten 147
2.2	Belastung 148
2.3	Kraft- und Wegmessgrößen 148
2.4	Trennflächenkennwerte 150
3	Versuchseinrichtung 151
3.1	Schermaschine 151
3.2	Messeinrichtungen 151
3.3	Eingießvorrichtung 152
3.4	Versuchssteuerung, Messwerterfassung 152
4	Prüfkörper 153
4.1	Probenentnahme 153
4.2	Prüfkörpergröße 153
5	Versuchsdurchführung 154
6	Auswertung und Darstellung der Messergebnisse 155
7	Anwendungsbeispiel 156
	Literatur 156
	Empfehlung Nr. 14: Bestimmung von Gebirgsspannungen mit dem Überbohrverfahren – Teil 1: Triaxialmesssonden $159$
	Johannes R. Kiehl und Stefan Heusermann
1	Anwendungsbereich und Zweck 159
2	Begriffe 159
2.1	Gebirgsspannungszustand 159
2.2	Triaxialmesssonde 160

3

Versuchsprinzip 160

1					
ı	nn	nite	vor	7010	hnis

4	Messgeräte 161
5	Versuchsdurchführung 163
5.1	Allgemeine Anforderungen, Festlegung der Testlokationen
	und Versuchsvorbereitung 163
5.2	Herstellen des Hauptbohrlochs 164
5.3	Herstellen des Pilotbohrlochs 164
5.4	Einbau der Triaxialmesssonde 164
5.5	Überbohren 165
5.6	Fangen, Lösen und Ziehen des Gesteinskerns 165
6	Ermittlung der Elastizitätskennwerte 165
6.1	Biaxialversuch am überbohrten Gesteinskern 165
6.2	Einaxiale Druckversuche 168
7	Ermittlung des Gebirgsspannungszustands 170
8	Dokumentation der Bohr- und Messarbeiten 173
9	Anwendungsbeispiele 173
9.1	Triaxialmesssondenversuch in isotropem Fels 173
9.2	Triaxialmesssondenversuch in anisotropem Fels 176
	Literatur 178
	Empfehlung Nr. 14: Bestimmung von Gebirgsspannungen mit dem
	Überbohrverfahren – Teil 2: Weggebersonden 181
	Stefan Heusermann und Johannes R. Kiehl
1	Anwendungsbereich und Zweck 181
2	Begriffe 181
2.1	Gebirgsspannungszustand 181
2.2	Weggebersonde 182
3	Versuchsprinzip 182
4	Messgeräte 183
5	Versuchsdurchführung 186
5.1	Allgemeine Anforderungen, Festlegung der Testlokationen
	und Versuchsvorbereitung 186
5.2	Herstellen des Hauptbohrlochs 187
5.3	Herstellen des Pilotbohrlochs 187
5.4	Einbau der Weggebersonde 188
5.5	Überbohren 188
5.6	Ziehen der Sonde 189
5.7	Fangen, Lösen und Ziehen des Gesteinskerns 189
6	Ermittlung der Elastizitätskennwerte 189
6.1	Biaxialversuch am überbohrten Gesteinskern 189
6.2	Einaxiale Druckversuche 192
7	Ermittlung des Gebirgsspannungszustands 193
7.1	Isotropes Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Gebirges 193
7.2	Transversal isotropes Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Gebirges 195
8	Dokumentation der Bohr- und Messarbeiten 197
9	Anwendungsbeispiele 198
_	

9.1	Überbohrversuch in isotropem Fels 198		
9.2	Überbohrversuch in anisotropem Fels 200		
	Literatur 201		
	Empfehlung Nr. 15: Verschiebungsmessungen längs der Bohrlochachse –		
	Extensometermessungen 203		
	Axel Paul und Erwin Gartung		
1	Zweck und Anwendungsgebiet 203		
2	Begriffe und Messprinzip 203		
2.1	Allgemeines 203		
2.2	Stangen- und Drahtextensometer 205		
2.3	Sondenextensometer 206		
3	Messgeräte 207		
3.1	Allgemeines 207		
3.2	Stangen- und Drahtextensometer 207		
3.3	Sondenextensometer 210		
3.4	Genauigkeitsanforderungen 213		
4	Extensometerbohrungen und -einbau 214		
4.1	Allgemeines 214		
4.2	Herstellen des Bohrlochs 214		
4.3	Einbau der Extensometer 215		
4.4	Extensometerschächte 215		
5	Durchführung der Messungen 216		
6	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 217		
7	Dokumentation 217		
8	Anwendungsbeispiele 218		
8.1	Stangenextensometer 218		
8.2	Sondenextensometer 220		
	Empfehlung Nr. 16: Ein- und dreiaxiale Kriechversuche		
	an Gesteinsproben 223		
	Udo Hunsche		
1	Zweck 223		
2	Begriffe 223		
3	Prüfeinrichtung 225		
3.1	Einaxiale Versuche 225		
3.2	Dreiaxiale Versuche 225		
3.3	Krafteinleitung 225		
4	Prüfkörper 226		
4.1	Prüfkörperabmessungen 226		
4.2	Bearbeitung der Proben 226		
4.3	Wassergehalt der Prüfkörper 226		
5	Versuchsdurchführung 227		

Bestimmung der Abmessungen der Prüfkörper 227

Ablauf des Versuchs 227

5.1

5.2

XVIII	Inhaltsverz	zeichnis
	5.3	Berechnung der Axialspannung 227
	5.4	Kraft-, Temperatur- und Längenänderungsmessung 228
	6	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 228
	7	Anwendungsbeispiele 231
	7.1	Beispiel 1 231
	7.2	Beispiel 2 232
		Literatur 234
		Empfehlung Nr. 17: Einaxiale Relaxationsversuche an Gesteinsproben 235
		Manfred Haupt und Thomas Mutschler
	1	Zweck 235
	2	Begriffe 235
	3	Prüfeinrichtung 236
	4	Prüfkörper 237
	4.1	Prüfkörperabmessungen 237
	4.2	Bearbeitung der Prüfkörper 237
	4.3	Wassergehalt der Prüfkörper 237
	5	Versuchsdurchführung 238
	5.1	Bestimmung der Abmessungen der Prüfkörper 238
	5.2	Ablauf des Versuchs 238
	5.3	Kraft- und Längenänderungsmessung 238
	6	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 238
	7	Anwendungsbeispiel 239
		Empfehlung Nr. 18: Konvergenz- und Lagemessungen 243
		Gerhard Reik und Ulrich Völter
		Teil I: Messung von Abstandsänderungen mit
		Konvergenzmessgeräten 243
	1	Allgemeines 243
	2	Messgeräte 243
	3	Einbau der Konvergenzbolzen und Durchführung der Messungen 247
	4	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse, Qualitätskontrolle 249
	5	Dokumentation 250
	6	Anwendungsbeispiele von Konvergenzmessungen 250
	1	Teil II: Geodätische Lagemessungen 254
	1	Allgemeines 254
	2	Messgeräte 254
	3	Durchführung der Messung 255
		Empfehlung Nr. 19: Messung der Spannungsänderung im Fels

## und an Felsbauwerken mit Druckkissen 261 Axel Paul und Fritz Walter

- Zweck und Anwendungsbereich 261 1
- Grundlagen und Begriffe 261 2
- Messprinzip 263 3

3.1	Allgemeines 263
3.2	Spannungsgeber nach dem Deformationsmessprinzip 264
3.3	Spannungsgeber nach dem Kompensationsmessprinzip 264
3.4	Steifigkeit der Spannungsgeber 266
4	Druckkissen 267
5	Messgenauigkeit 269
6	Einbau der Spannungsgeber 269
6.1	Gebirgsspannungsgeber 269
6.2	Kontaktspannungsgeber 270
6.3	Betonspannungsgeber 270
6.4	Herstellung von Spannungsmessquerschnitten 272
7	Durchführung der Messungen 272
8	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 274
9	Dokumentation 274
10	Anwendungsbeispiel 275
10.1	Einbauprotokoll 275
10.2	Ergebnisse: Station 409 275
	Weiterführende Literatur 278
	Empfehlung Nr. 20: Zerfallsbeständigkeit von Gestein –
	Siebtrommelversuch 279
	Peter Herzel
1	Zweck 279
2	Begriffe 279
2.1	Verwitterung 279
2.2	Zerfallsbeständigkeit 280
3	Prüfeinrichtung 280
4	Proben 281
4.1	Prüfbare Gesteine 281
4.2	Probenvorbereitung 281
5	Versuchsdurchführung 282
6	Versuchsauswertung, Darstellung und Bewertung der Ergebnisse 283
6.1	Auswertung 283
6.2	Darstellung und Bewertung der Ergebnisse 283
7	Anwendungsbeispiel 284
	Literatur 286
	Empfehlung Nr. 21: Verschiebungsmessungen quer zur Bohrlochachse –
	Inklinometer- und Deflektometermessungen 287
	Helmut Bock und Axel Paul
1	Zweck und Anwendungsgebiet 287
2	Grundlagen, Begriffe und Messprinzip 288
2.1	Mechanische Grundlagen und Bezugssystem 288
2.2	Begriffe 289
2.3	Messprinzip 291

α	Inhaltsverzeichnis
---	--------------------

3	Messgeräte 294
3.1	Allgemeines 294
3.2	Stationäre Messgeräte 294
3.3	Mobile Messgeräte 296
3.4	Genauigkeitsanforderungen und Kalibrierung 299
4	Bohrungen für den Einbau der Messketten bzw.
	der Messverrohrung 300
4.1	Allgemeines 300
4.2	Herstellen des Bohrlochs 300
4.3	Einbau der stationären Messgeräte 300
4.4	Wahl und Einbau der Messverrohrung für mobile Sonden 301
5	Durchführung der Messungen 303
6	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 304
7	Dokumentation 306
8	Anwendungsbeispiele 306
8.1	Verlaufsmessung einer Vertikalbohrung: Vertikalitätsprüfung einer
	Schwimmlotbohrung bei einer Talsperre 306
8.2	Verlaufsmessung einer Schrägbohrung: Überprüfung
	der Richtungsgenauigkeit einer Ankerbohrung 307
8.3	Bestimmung der Horizontalverschiebungen eines Gebirges vor einer
	Tunnelortsbrust 308
8.4	Verschiebungsmessungen in einem Kriechhang 310
	Weiterführende Literatur 311
	Empfehlung Nr. 22: Schlitzentlastungs- und Kompensationsmethode
	zur Messung der Druckspannungen im Randbereich geotechnischer
	Bauwerke 313
	Bernhard Fröhlich <sup>†</sup> und Michael Schlebusch
1	Zweck 313
2	Kurzbeschreibung des Verfahrens 313
3	Grundlagen und Begriffe 313
3.1	Messprinzip 313
3.2	Begriffe 314
4	Versuchseinrichtung 314
4.1	Druckkissen und Pumpe 314
4.2	Verschiebungsmesseinrichtung 315
5	Versuchsdurchführung 316
5.1	Anforderungen an den Messort 316
5.2	Vorbereitung des Messorts 317
5.3	Nullmessung 317
5.4	Herstellung des Sägeschlitzes 318
5.5	Temperaturmessungen 319
5.6	10mporatarmessangen 517
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
6	Phasen der Messung 319 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 321

6.2	Darstellung der Ergebnisse 324
7	Ergänzende Hinweise 325
7.1	Erweiterte Versuchsdurchführung zur Abschätzung der Festigkeit 325
7.2	Dauermesseinrichtung zur Messung von Spannungen und deren
_	Änderungen 325
8	Anwendungsbeispiel 325
8.1	Auswertung des Anwendungsbeispiels: 327
	Literatur 328
	Empfehlung Nr. 23: Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen mit dem
	CERCHAR-Versuch 331
	Heiko Käsling und Ralf J. Plinninger
1	Zweck 331
2	Kurzbeschreibung des Verfahrens 331
3	Begriffe 332
4	Prüfeinrichtung 333
4.1	Prüfgeräte 333
4.2	Prüfstifte 333
4.3	Messeinrichtung 334
5	Probekörper 335
5.1	Bearbeitung der Probekörper 335
5.2	Probekörperabmessungen 335
5.3	Anzahl und Anordnung der Prüfstrecken 335
6	Versuchsdurchführung 336
7	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 337
8	Einfluss sägerauer Oberflächen 340
	Literatur 340
	Empfehlung Nr. 24: Bestimmung der Abrasivität von Festgesteinen
	mit dem LCPC-Versuch 343
	Heiko Käsling, Jan Düllmann und Ralf J. Plinninger
1	Zweck 343
2	Kurzbeschreibung des Verfahrens 343
3	Begriffe 344
3.1	Ausgangsprobe 344
3.2	Versuchsprobe 344
3.3	Abrasivitätsindex 344
3.4	Brechbarkeit 344
4	Prüfeinrichtung 344
4.1	Geräte zur Probenvorbereitung 344
4.2	Versuchsgerät 345
4.3	Prüfflügel 346
5	Zu prüfendes Material 346
5 1	Prohenmasse 346

5.2

Probenvorbereitung 346

6	Versuchsdurchführung 347
6.1	Montieren des Prüfflügels 347
6.2	Einbau der Versuchsprobe 347
6.3	Versuchsdurchführung 347
6.4	Siebung der verwendeten Versuchsprobe 348
7	Versuchsauswertung 348
7.1	Abrasivitätsindex $A_{\rm BR}$ 348
7.2	Brechbarkeit $B_{\rm R}$ 348
8	Darstellung der Ergebnisse 348
9	Klassifizierung 349
10	Anwendungsbeispiel 350
	Literatur 350
	Empfehlung Nr. 25: Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen
	mit mineralogisch-petrografischen Verfahren 351
	Ralf J. Plinninger, Heiko Käsling und Till Popp
1	Zweck 351
2	Kurzbeschreibung der Verfahren 351
3	Begriffe 352
3.1	Messgrößen 352
3.2	Abrasivitätsindizes 352
4	Versuchsoptionen 353
5	Prüfeinrichtungen 353
5.1	Geräte zur Herstellung von Dünnschliffen 353
5.2	Durchlichtmikroskop 355
5.3	Geräte zur Herstellung von Röntgen-Pulverpräparaten 355
5.4	Pulverröntgendiffraktometer 356
6	Herstellung der Probekörper 356
6.1	Anforderungen an das Probenmaterial 356
6.2	Dünnschliffherstellung 356
6.3	Probenherstellung für Pulverröntgendiffraktometrie 358
7	Versuchsdurchführung 358
7.1	Dünnschliffmikroskopie 358
7.2	Pulverröntgendiffraktometrie 362
8	Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 364
9	Härtekennwerte zur Ableitung von Indexwerten 365
10	Klassifizierung von Abrasivitätsindizes 366
11	Beispiel für einen Untersuchungsbericht 368
	Literatur 372

# Übersicht über die bisher veröffentlichten Empfehlungen des Arbeitskreis 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.

## Stand: 04/2022

- Mutschler, T. (2004): Neufassung der Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern, Bautechnik, 81, Heft 10: S. 825–834. Berlin: Ernst & Sohn.
- Rißler, P. (1979): Empfehlung Nr. 2 des Arbeitskreis 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben, Bautechnik, 56, Heft 7: S. 221–224, Berlin: Ernst & Sohn.
- Wichter, L. (1979): Empfehlung Nr. 3 des Arbeitskreis 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Dreiaxiale Druckversuche an geklüfteten Großbohrkernen im Labor, Bautechnik, 56, Heft 7: S. 225–228, Berlin: Ernst & Sohn.
- Henke, K.F. und Kaiser, W. (1980): Empfehlung Nr. 4 des Arbeitskreis 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Scherversuch in situ, Bautechnik, 57, Heft 10: S. 325–32, Berlin: Ernst & Sohn.
- Thuro, K. (2010): Empfehlung Nr. 5 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Punktlastversuche an Gesteinsproben, Bautechnik, 87, Heft 6: S. 322–330, Berlin: Ernst & Sohn.
- Müller, G., Neuber, H. und Paul, A. (1980): Empfehlung Nr. 6 des Arbeitskreis 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Doppel-Lastplattenversuch in Fels, Bautechnik, 62, Heft 3: S. 102–106, Berlin: Ernst & Sohn.
- Leichnitz, W. und Müller, G. (1984): Empfehlung Nr. 7 des Arbeitskreises 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Schlitzentlastungs- und Druckkissenbelastungsversuche, Bautechnik, 61, Heft 3: S. 89–93, Berlin: Ernst & Sohn.
- Pahl, A. (1984): Empfehlung Nr. 8 des Arbeitskreises 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Dilatometerversuche in Felsbohrungen, Bautechnik, 61, Heft 4: S. 109–111, Berlin: Ernst & Sohn.
- Rißler, P. (1984): Empfehlung Nr. 9 des Arbeitskreises 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Wasserdruckversuch im Fels, Bautechnik, 61, Heft 4: S. 112–117, Berlin: Ernst & Sohn.

- Lepique, M. (2008): Neufassung der Empfehlung Nr. 10 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben Spaltzugversuch, Bautechnik, 62, Heft 6: S. 197–199, Berlin: Ernst & Sohn.
- Paul, A. (1986): Empfehlung Nr. 11 des Arbeitskreises 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Quellversuche an Gesteinsproben.- Bautechnik, 63, Heft 3: S. 100–104, Berlin: Ernst & Sohn.
- Wichter, L. (1987): Empfehlung Nr. 12 des Arbeitskreises 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Mehrstufentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen, Bautechnik, 64, Heft 11: S. 382–385, Berlin: Ernst & Sohn.
- Leichnitz, W. (1988): Empfehlung Nr. 13 des Arbeitskreises 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Laborscherversuch an Felstrennflächen, Bautechnik, 65, Heft 9: S. 301–305, Berlin: Ernst & Sohn.
- Kiehl, J.R. und Heusermann, S. (2021): Neufassung der Empfehlung Nr. 14 des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Bestimmung von Gebirgsspannungen mit dem Überbohrverfahren – Teil 1: Triaxialmesssonden, geotechnik, 44, Heft 4, S. 290–301.
- Heusermann, S. und Kiehl, J.R. (2022): Neufassung der Empfehlung Nr. 14 des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Bestimmung von Gebirgsspannungen mit dem Überbohrverfahren – Teil 2: Messung mit Weggebersonden, geotechnik, 45, Heft 1, S. 51–62.
- Paul, A. und Gartung, E. (1991): Empfehlung Nr. 15 des Arbeitskreis 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.: Verschiebungsmessungen längs der Bohrlochachse Extensometermessungen, Bautechnik, 68, Heft 2: S. 41–48, Berlin: Ernst & Sohn.
- Hunsche, U. (1994): Empfehlung Nr. 16 des Arbeitskreises 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Ein- und dreiaxiale Kriechversuche an Gesteinsproben, Bautechnik, 71, Heft 8, S. 500–505, Berlin: Ernst & Sohn
- Haupt, M. und Mutschler, T. (1994): Empfehlung Nr. 17 des Arbeitskreises 19 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Einaxiale Relaxationsversuche an Gesteinsproben, Bautechnik, 71, Heft 8: S. 506–509, Berlin: Ernst & Sohn.
- Reik, G. und Völter, U. (1996): Empfehlung Nr. 18 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Konvergenzund Lagemessungen, Bautechnik, 73, Heft 10: S. 681–690, Berlin: Ernst & Sohn.
- Paul, A. und Walter, F. (2004): Empfehlung Nr. 19 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Messung der Spannungsänderung im Fels und an Felsbauwerken mit Druckkissen, Bautechnik, 81, Heft 8: S. 639–647, Berlin: Ernst & Sohn.
- Herzel, P. (2002): Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Zufallsbeständigkeit von Gestein – Siebtrommelversuch, Bautechnik, 79, Heft 2: S. 101–105, Berlin: Ernst & Sohn.

- Bock, H. und Paul, A. (2002): Empfehlung Nr. 21 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Verschiebungsmessungen quer zur Bohrlochachse Inklinometer- und Deflektometermessungen, Bautechnik, 79, Heft 4: S. 243–256, Berlin: Ernst & Sohn
- Fröhlich, B. und Schlebusch, M. (2021): Empfehlung Nr. 22 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Schlitzentlastungs- und Kompensationsmethode zur Messung der Druckspannungen im Randbereich geotechnischer Bauwerke, geotechnik, 44, Heft 3: S. 198–208, Berlin: Ernst & Sohn.
- Käsling, H. und Plinninger, R.J. (2016): Empfehlung Nr. 23 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen mit dem CERCHAR-Versuch, Bautechnik, 93. Heft 6: S. 409–415. Berlin: Ernst & Sohn.
- Käsling, H., Düllmann, J. und Plinninger, R.J. (2022): Empfehlung Nr. 24 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Bestimmung der Abrasivität von Festgesteinen mit dem LCPC-Versuch, angekündigt für die geotechnik 2/22.
- Plinninger, R.J., Käsling, H. und Popp, M. (2021): Empfehlung Nr. 25 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen mit mineralogisch-petrographischen Verfahren. geotechnik, 44, Heft 2: S. 123–135, Berlin: Ernst & Sohn.

## 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.

## 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:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{1}$$

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

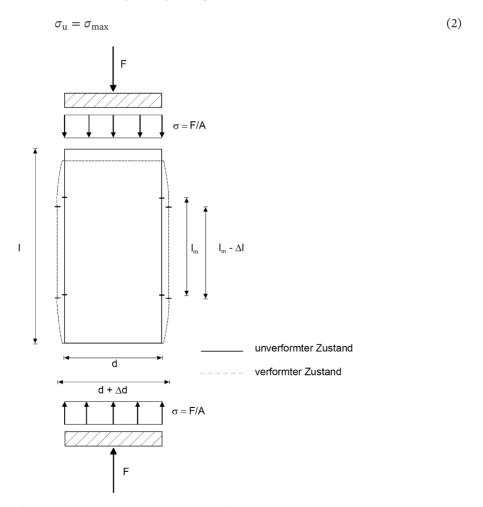


Bild 1 Schematische Darstellung eines Prüfkörpers.

formt wird. Die Dehnungsgeschwindigkeit ist so zu wählen, dass ein gleichgearteter Prüfkörper im einaxialen Druckversuch frühestens nach fünf Minuten zu Bruch gehen würde. Die gewählte Dehnungsgeschwindigkeit ist im Protokoll festzuhalten. Sie darf während des Versuchs um nicht mehr als 10 % schwanken.

Die Dehnungsgeschwindigkeit sollte für alle aus dem gleichen Gestein gewonnenen Prüfkörper gleich sein.

Im Falle ausgeprägt rheologischer Eigenschaften des Gesteins sind gesonderte Überlegungen bezüglich der Dehnungsgeschwindigkeit anzustellen. Gleiches gilt für Gesteine geringer Durchlässigkeit, bei denen der Aufbau von Porenwasserdrücken eine Rolle spielt.

#### Kraft- und Längenänderungsmessung

Während des Versuchs sind Axialkraft und Längenänderung des Prüfkörpers etwa in Abständen von 1/2 min, nach Möglichkeit jedoch kontinuierlich aufzuzeichnen. Die Kraft ist mit einer Genauigkeit von 1 % der Bruchlast zu messen. Längenänderungen müssen mit einer Genauigkeit von mindestens 1/100 mm erfasst werden können.

#### Zelldruck- und Porenwasserdruckmessungen

Der Zelldruck und - bei undrainierten Versuchen - der Porenwasserdruck sind während der Versuchsdurchführung kontinuierlich abzulesen.

#### Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 6

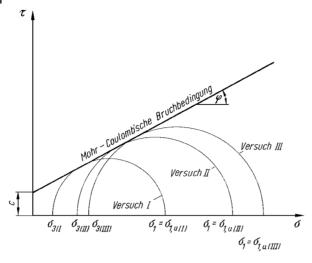
Die Versuchsergebnisse sind in SI-Einheiten auszuwerten.

## Beim Bruch wirkender Spannungszustand

Den im Bruch wirkenden Spannungszustand  $\sigma_1 = \sigma_{1,u}, \sigma_2 = \sigma_3$  erhält man durch eine Auswertung der Axialverformungen des Prüfkörpers. Trägt man die während des Versuchs wirkenden Spannungsdifferenzen  $\sigma_1 - \sigma_3$  über den axialen Dehnungen  $\varepsilon_1$  auf, ergibt sich eine Kurve der in Bild 3 dargestellten Art. Als Bruchpunkt kann mit hinreichender Genauigkeit derjenige Punkt der Kurve angesehen werden, an welchem die Tangente horizontal verläuft (Bild 3).

## Festigkeitsparameter c und $\phi$

Aus den im Augenblick des Bruches des Prüfkörpers wirkenden Spannungen  $\sigma_1$  =  $\sigma_{1,u},\,\sigma_2=\sigma_3$  kann der Mohr'sche Spannungskreis gemäß Bild 1 konstruiert werden. Für mehrere Versuche mit unterschiedlichen Seitendrücken erhält man unterschiedliche Kreise (Bild 5). Da all diese Spannungszustände Bruchzustände charakterisieren, ergibt sich die Bruchbedingung als Einhüllende an diese Kreise.



**Bild 5** Bestimmung der Festigkeitsparameter c und  $\phi$  aus den Ergebnissen von drei Dreiaxialversuchen.

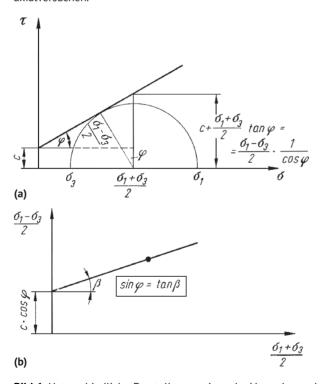
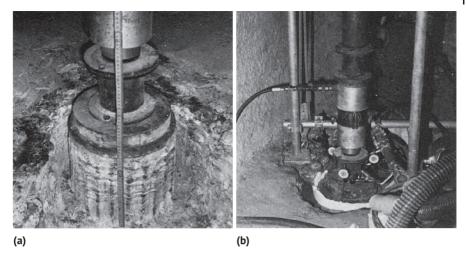


Bild 6 Unterschiedliche Darstellungsweisen der Versuchsergebnisse.

In Bild 5 ist die Mohr-Coulomb'sche Bruchbedingung dargestellt. Obwohl für ihre Konstruktion prinzipiell nur zwei Versuche erforderlich sind, sollten immer mehrere, mindestens drei Versuchsergebnisse zugrunde gelegt werden.



**Bild 6** (a) und (b): Ausgearbeiteter Prüfkörper und Versuchsanordnung beim Scherversuch in situ.

Scherfläche und der Scherrichtung richtet sich nach dem Trennflächensystem und nach der Aufgabenstellung. Die Lage der Scherfläche zum Trennflächensystem ist anzugeben.

Die Größe des Prüfkörpers richtet sich nach dem Abstand der Haupttrennflächen bzw. nach der Größe der Kluftkörper. Das Verhältnis der Prüfkörpergröße zur Kluftkörpergröße bzw. zum Abstand der Haupttrennflächen sollte mindestens 10 zu 1 sein. Von der ISRM¹¹ werden folgende Maße als Prüfkörpergröße empfohlen:  $700 \times 700 \times 350$  mm; diese Maße können als Anhaltswerte dienen. Wegen der genannten Richtungsabhängigkeit empfiehlt es sich in den meisten Fällen, Scherversuche in situ in mindestens zwei Richtungen auszuführen. Es können zylindrische und rechteckige Prüfkörper gewählt werden.

## 4.2 Bearbeitung des Prüfkörpers

An der Untersuchungsstelle wird vor dem Herausarbeiten des Prüfkörpers zunächst die Gebirgsoberfläche mit geeigneten Werkzeugen eingeebnet und parallel zur vorgesehenen Scherfläche ausgearbeitet.

Die Lastverteilungsplatte wird mit einer geeigneten schnell härtenden Masse (Mörtel, Kunststoff oder dgl.) aufgezogen. Mit der Presse in Normalkraftrichtung wird ein Druck aufgegeben, damit der Prüfkörper bei der Bearbeitung nicht zerstört oder aufgelockert wird.

Mit entsprechenden Werkzeugen (Bohrmaschine, Motorsäge usw.) wird der Prüfkörper derart bearbeitet, dass zwischen Prüfkörper und anstehendem Gebirge ein Ringraum oder Spalt von mindestens 50 mm Breite und von Prüfkörpertiefe entsteht. An der Seite, an der die Presse für die Scherkraft angesetzt wird, ist dieser

<sup>1)</sup> International Society for Rock Mechanics: Suggested Methods for Determining Shear Strength. Committee on Field Tests. Doc. Nr. l. Febr. 1974.

Ringraum oder Spalt bis zum Widerlager hin zu erweitern. Je nach Form und Beschaffenheit des Prüfkörpers wird ein Scherrahmen mit Schuh, der zuvor an der Presse für die Normalkraft aufgehängt wurde, über den Prüfkörper gesetzt oder die Lastverteilungsplatte für die Scherkraft angebracht.

Zum Ausgleich von Unebenheiten am Prüfkörper wird der Ringraum zwischen Prüfkörper und Scherrahmen mit einer schnell härtenden Masse ausgegossen bzw. wird die Lastverteilungsplatte mit dieser aufgezogen. Die schnell härtende Masse (Mörtel, Kunststoff oder dgl.) muss eine hinreichend hohe Festigkeit und eine hinreichend geringe Verformbarkeit aufweisen.

#### Trennflächengefüge, Wassergehalt und Dichte

Das Trennflächengefüge des Gebirges ist nach Lage, Ausprägung und Beschaffenheit zu erfassen (DIN 4021, Teil 2, in Vorbereitung).

Wassergehalt und Dichte haben einen maßgebenden Einfluss auf die Scherfestigkeit. Es ist daher unbedingt erforderlich, von jedem Prüfkörper geeignete Proben zu entnehmen, an denen der Wassergehalt nach DIN 18121, Teil 1, und die Dichte nach DIN 18125, Teil 1, festgestellt wird.

#### Versuchsdurchführung 5

Damit die Lastverteilungsplatte für die Normalkraft möglichst dicht anliegt, benötigt man einen gewissen Anpressdruck. Dieser Druck sollte 10 % der vorgesehenen Normalspannung nicht überschreiten. Zur Ermittlung der weiteren Verschiebungen werden die Messuhren bzw. Weggeber in Scherkraftrichtung auf der Zug- und Druckseite installiert.

Die vorgesehene Normalspannung wird über eine Lastverteilungsplatte in den Prüfkörper eingeleitet, Der Scherversuch kann erst beginnen, wenn die Verschiebung  $\Delta h$ , die nach dem Aufbringen der Normalkraft eintritt, abgeklungen ist.

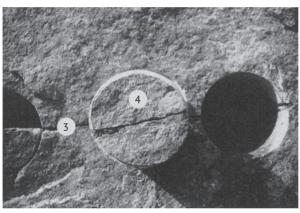
Bei dem hier beschriebenen Scherversuch in situ mit stufenweiser Belastung wird die Scherkraft stufenweise in acht bis zehn Laststufen – anfangs zum Erkennen etwaiger Mängel der Versuchsanordnung in besonders kleinen Stufen - gesteigert. Die Laststufen sind so zu wählen, dass sich die Lastverschiebungslinie einwandfrei darstellen lässt (Bild 7).

Nach Aufbringen jeder Laststufe ist die Scherkraft so lange konstant zu halten, bis die Verschiebungen annähernd zur Ruhe gekommen sind. Dies lässt sich aus der Zeit-Verschiebungs-Kurve (Bild 8) entnehmen. Sobald die Verschiebungen größer werden, sind die Laststufen zu verkleinern, um ein zu schnelles Abscheren des Prüfkörpers zu verhindern. Die Scherkraft ist so weit zu steigern, bis die Grenzlast erreicht ist.



- (1) Bohrmaschine
- (2) Diamantbohrkrone
- (3) Granitkluft

Bild 6 Entnahme der natürlichen Granittrennflächen in situ.



- (3) Granitkluft
- (4) Bohrkern

Bild 7 Parallel überbohrte Felstrennfläche.

Der Restreibungsbeiwert ist nicht maßstabsabhängig. Soll nur der Restreibungsbeiwert ermittelt werden, so kann die Größe des Prüfkörpers nahezu beliebig gewählt werden, sollte aber in einem vernünftigen Verhältnis zur Scherbox stehen, damit Einbauungenauigkeiten nicht das Messergebnis verfälschen (beispielsweise durch Verkantung).

## 5 Versuchsdurchführung

Aus den in Abschn. 2.3 genannten Gründen werden alle Scherversuche mit konstanter Normalkraft gefahren. Der Vorschub erfolgt weggeregelt. Die Vortriebsgeschwindigkeit hat im Allgemeinen nur geringen Einfluss auf das Ergebnis. Als sinnvoll hat sich  $\nu=2$  mm/min bei natürlichen Felstrennflächen herausgestellt. Sind im Einzelfall die Trennflächenkennwerte zeitabhängig (z. B. bei Tonstein), so ist eine kleinere Vortriebsgeschwindigkeit zu wählen.