

Empfehlungen des Arbeitskreises „Versuchstechnik Fels“



**Empfehlungen des Arbeitskreises
Versuchstechnik Fels**

Empfehlungen des Arbeitskreises Versuchstechnik Fels

*Herausgegeben von der
Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT)*

Herausgegeben von**Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT)**Hollestr. 1g
45127 Essen**Redaktionelle Bearbeitung durch****Dipl.-Ing. Thomas Mutschler**

(Ehemaliger Obmann AK 3.3)

Dr. Ralf Plinninger

(Obmann AK 3.3)

Dr. Thomas Frühwirt

(Stellvertretender Obmann AK 3.3)

Titelbild

links oben: Plinninger (PG)

links unten: Frühwirt (TU BAF)

rechts: Mutschler (KIT Karlsruhe)

Alle Bücher von Ernst & Sohn werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2023 Ernst & Sohn GmbH, Rotherstraße 21,
10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Umschlaggestaltung Design pur GmbH, Berlin**Satz** le-tex publishing services GmbH, Leipzig**Druck und Bindung****Print ISBN** 978-3-433-03350-0**ePDF ISBN** 978-3-433-61092-3**ePub ISBN** 978-3-527-61091-6**oBook ISBN** 978-3-527-61090-9

Gedruckt auf säurefreiem Papier

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. Jan Düllmann
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 Herzl
Dr.-Ing. Jürgen Hesser
Prof. Dr. Stefan Heusermann
Dr. Udo Hunsche
Dr. Eberhard Jahns
Dr. Heiko Käsling
Dr.-Ing. Werner Kaiser
Dr. Johannes R. Kiehl
Dipl.-Ing. Ekkehard König
Dipl.-Geophys. Eberhard Kunz

Dr.-Ing. Wolfhard Lechnitz
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 Emp-

fehlungen 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.

Pfanztal/Bernried/Freiberg, im Februar 2022

*Thomas Mutschler
Ralf Plinninger
Thomas Frühwirt*

Inhaltsverzeichnis

Vorwort [V](#)

**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
Gesteinsprüfkörpern [1](#)**

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](#)
- 9.1 Einaxialer Druckversuch nach Option 7 (DMS) [16](#)
- 9.2 Einaxialer Druckversuch nach Option 12 (WAP) [17](#)
- Literatur [19](#)

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 ϕ 27
- 6.3 Verformbarkeit 29
- 6.4 Ergänzende Angaben 29
- 7 Anwendungsbeispiel 30

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-Durchmesser Verhältnis 38
- 4.5 Probenaufbewahrung 39
- 4.6 Wassergehalt 39
- 4.7 Endflächenbearbeitung 39
- 5 Durchführung der Versuche 39
- 5.1 Drainagebedingungen 39
- 5.2 Wahl der Dehnungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_1$ 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

Kuroschi Thuro

- 1 Zweck der Empfehlung 55
- 2 Kurzbeschreibung des Verfahrens 55
- 3 Begriffe und Formelzeichen 56
- 4 Prüfeinrichtung 58
- 4.1 Prüfraumen 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 Lechnitz 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 Aufbringen der Last und Messung der Verformungen 90
- 6 Versuchsauswertung und Darstellung der Messergebnisse 91
- 6.1 Bestimmung einer Spannungskomponente 91
- 6.2 Bestimmung des Gebirgsverformungsmoduls 91
- 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

Empfehlung Nr. 9: Wasserdruckversuch in Fels 101

Peter Rifßler

- 1 Zweck 101
- 2 Begriffe 101
- 2.1 Wasserwegigkeit 101
- 2.2 Durchfluss 101
- 2.3 Pumpendruck 101
- 2.4 Einpressdruck 101
- 2.5 Druckhöhe 102
- 2.6 Energieverluste 102
- 2.7 Durchlässigkeit des Gebirges 102
- 2.8 Durchlässigkeit in der Ebene einer Trennflächenschar 102
- 2.9 Wasseraufnahme 102
- 3 Versuchseinrichtung 103
- 3.1 Allgemeines 103
- 3.2 Pumpe und Zuleitung 103
- 3.3 Packer 103
- 3.4 Druckmesseinrichtung 105
- 3.5 Durchflussmesseinrichtung 105
- 3.6 Registriereinrichtung 105
- 4 Versuchsvorbereitung 106
- 5 Versuchsdurchführung 107
- 6 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 108
- 6.1 Charakteristische Ergebnisse des WD-Versuchs 108
- 6.2 Auswertung 109
- 7 Anwendungsbeispiel 113

Empfehlung Nr. 10: Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben – Spaltzugversuch 115

Michael Lepique

- 1 Anwendungsbereich und Zweck 115
 - 2 Kurzbeschreibung des Verfahrens 115
 - 3 Begriffe und Formelzeichen 115
 - 3.1 Begriffe 115
 - 3.2 Formelzeichen 116
 - 4 Prüfeinrichtung 116
 - 5 Probekörper 117
 - 5.1 Abmessung der Probekörper 117
 - 5.2 Bearbeiten der Probekörper 117
 - 5.3 Richtungsabhängigkeit 118
 - 5.4 Wassergehalt der Proben und Probekörper 119
 - 5.5 Bestimmung der Abmessungen und der Dichte der Probekörper 119
 - 6 Versuchsdurchführung 120
 - 7 Auswertung 121
 - 8 Darstellung der Ergebnisse und Prüfbericht 121
- Literatur 121

Empfehlung Nr. 11: Quellversuche an Gesteinsproben 123

Axel Paul

- 1 Vorbemerkung 123
 - 2 Zweck 123
 - 3 Begriffe 123
 - 4 Prüfeinrichtung 124
 - 5 Prüfkörper 125
 - 6 Versuchsdurchführung 126
 - 6.1 Kompensation des Probenahmeeeinflusses 126
 - 6.2 Quellhebungsversuch 126
 - 6.3 Quellversuch nach Kaiser/Henke 127
 - 6.4 Quellversuch nach Huder/Amberg 127
 - 6.5 Quelldruckversuch 128
 - 7 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 129
 - 7.1 Allgemeine Angaben 129
 - 7.2 Quellhebungsversuch 129
 - 7.3 Quellversuch nach Kaiser/Henke 129
 - 7.4 Quellversuch nach Huder/Amberg 129
 - 7.5 Quelldruckversuch 130
 - 8 Anwendungsbeispiele 130
- Literatur 133

Empfehlung Nr. 12: Mehrstufentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen 135

Lutz Wichter

- 1 Zweck der Empfehlung 135
- 2 Begriffe 135
- 3 Prüfeinrichtungen 135
- 4 Proben 136
- 5 Versuchsdurchführung 136
- 5.1 Direkte Scherversuche 136
- 5.2 Dreiaxiale Druckversuche 138
- 6 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 139
- 7 Beispiele 139
- 7.1 Direkter Scherversuch in situ 139
- 7.2 Dreiaxialer Druckversuch im Labor 141
- Literatur 144

Empfehlung Nr. 13: Laborscherversuch an Felstrennflächen 145

Wolfhard Lechnitz

- 1 Zweck 145
- 2 Begriffe 145
- 2.1 Scherverhalten 145
- 2.2 Belastung 146
- 2.3 Kraft- und Wegmessgrößen 146
- 2.4 Trennflächenkennwerte 148
- 3 Versuchseinrichtung 149
- 3.1 Schermaschine 149
- 3.2 Messeinrichtungen 149
- 3.3 Eingießvorrichtung 150
- 3.4 Versuchssteuerung, Messwerterfassung 150
- 4 Prüfkörper 151
- 4.1 Probenentnahme 151
- 4.2 Prüfkörpergröße 151
- 5 Versuchsdurchführung 152
- 6 Auswertung und Darstellung der Messergebnisse 153
- 7 Anwendungsbeispiel 154
- Literatur 154

Empfehlung Nr. 14: Bestimmung von Gebirgsspannungen mit dem Überbohrverfahren – Teil 1: Triaxialmesssonden 157

Johannes R. Kiehl und Stefan Heusermann

- 1 Anwendungsbereich und Zweck 157
- 2 Begriffe 157
- 2.1 Gebirgsspannungszustand 157
- 2.2 Triaxialmesssonde 158
- 3 Versuchsprinzip 158

4	Messgeräte	159
5	Versuchsdurchführung	161
5.1	Allgemeine Anforderungen, Festlegung der Testlokationen und Versuchsvorbereitung	161
5.2	Herstellen des Hauptbohrlochs	162
5.3	Herstellen des Pilotbohrlochs	162
5.4	Einbau der Triaxialmesssonde	162
5.5	Überbohren	163
5.6	Fangen, Lösen und Ziehen des Gesteinskerns	163
6	Ermittlung der Elastizitätskennwerte	163
6.1	Biaxialversuch am überbohrten Gesteinskern	163
6.2	Einaxiale Druckversuche	166
7	Ermittlung des Gebirgsspannungszustands	168
8	Dokumentation der Bohr- und Messarbeiten	171
9	Anwendungsbeispiele	171
9.1	Triaxialmesssondenversuch in isotropem Fels	171
9.2	Triaxialmesssondenversuch in anisotropem Fels	174
	Literatur	176

Empfehlung Nr. 14: Bestimmung von Gebirgsspannungen mit dem Überbohrverfahren – Teil 2: Weggebersonden 179

Stefan Heusermann und Johannes R. Kiehl

1	Anwendungsbereich und Zweck	179
2	Begriffe	179
2.1	Gebirgsspannungszustand	179
2.2	Weggebersonde	180
3	Versuchsprinzip	180
4	Messgeräte	181
5	Versuchsdurchführung	184
5.1	Allgemeine Anforderungen, Festlegung der Testlokationen und Versuchsvorbereitung	184
5.2	Herstellen des Hauptbohrlochs	185
5.3	Herstellen des Pilotbohrlochs	185
5.4	Einbau der Weggebersonde	186
5.5	Überbohren	186
5.6	Ziehen der Sonde	187
5.7	Fangen, Lösen und Ziehen des Gesteinskerns	187
6	Ermittlung der Elastizitätskennwerte	187
6.1	Biaxialversuch am überbohrten Gesteinskern	187
6.2	Einaxiale Druckversuche	190
7	Ermittlung des Gebirgsspannungszustands	191
7.1	Isotropes Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Gebirges	191
7.2	Transversal isotropes Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Gebirges	193
8	Dokumentation der Bohr- und Messarbeiten	195
9	Anwendungsbeispiele	196

- 9.1 Überbohrversuch in isotropem Fels 196
- 9.2 Überbohrversuch in anisotropem Fels 198
- Literatur 199

**Empfehlung Nr. 15: Verschiebungsmessungen längs der Bohrlochachse –
Extensometermessungen 201**

Axel Paul und Erwin Gartung

- 1 Zweck und Anwendungsgebiet 201
- 2 Begriffe und Messprinzip 201
 - 2.1 Allgemeines 201
 - 2.2 Stangen- und Drahtextensometer 203
 - 2.3 Sondenextensometer 204
- 3 Messgeräte 205
 - 3.1 Allgemeines 205
 - 3.2 Stangen- und Drahtextensometer 205
 - 3.3 Sondenextensometer 208
- 3.4 Genauigkeitsanforderungen 211
- 4 Extensometerbohrungen und -einbau 212
 - 4.1 Allgemeines 212
 - 4.2 Herstellen des Bohrlochs 212
 - 4.3 Einbau der Extensometer 213
 - 4.4 Extensometerschächte 213
- 5 Durchführung der Messungen 214
- 6 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 215
- 7 Dokumentation 215
- 8 Anwendungsbeispiele 216
 - 8.1 Stangenextensometer 216
 - 8.2 Sondenextensometer 218

**Empfehlung Nr. 16: Ein- und dreiaxiale Kriechversuche
an Gesteinsproben 221**

Udo Hunsche

- 1 Zweck 221
- 2 Begriffe 221
- 3 Prüfeinrichtung 223
 - 3.1 Einaxiale Versuche 223
 - 3.2 Dreiaxiale Versuche 223
 - 3.3 Krafteinleitung 223
- 4 Prüfkörper 224
 - 4.1 Prüfkörperabmessungen 224
 - 4.2 Bearbeitung der Proben 224
 - 4.3 Wassergehalt der Prüfkörper 224
- 5 Versuchsdurchführung 225
 - 5.1 Bestimmung der Abmessungen der Prüfkörper 225
 - 5.2 Ablauf des Versuchs 225

- 5.3 Berechnung der Axialspannung 225
- 5.4 Kraft-, Temperatur- und Längenänderungsmessung 226
- 6 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 226
- 7 Anwendungsbeispiele 229
- 7.1 Beispiel 1 229
- 7.2 Beispiel 2 230
- Literatur 232

Empfehlung Nr. 17: Einaxiale Relaxationsversuche an Gesteinsproben 233

Manfred Haupt und Thomas Mutschler

- 1 Zweck 233
- 2 Begriffe 233
- 3 Prüfeinrichtung 234
- 4 Prüfkörper 235
- 4.1 Prüfkörperabmessungen 235
- 4.2 Bearbeitung der Prüfkörper 235
- 4.3 Wassergehalt der Prüfkörper 235
- 5 Versuchsdurchführung 236
- 5.1 Bestimmung der Abmessungen der Prüfkörper 236
- 5.2 Ablauf des Versuchs 236
- 5.3 Kraft- und Längenänderungsmessung 236
- 6 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 236
- 7 Anwendungsbeispiel 237

Empfehlung Nr. 18: Konvergenz- und Lagemessungen 241

Gerhard Reik und Ulrich Völter

Teil I: Messung von Abstandsänderungen mit
Konvergenzmessgeräten 241

- 1 Allgemeines 241
- 2 Messgeräte 241
- 3 Einbau der Konvergenzbolzen und Durchführung der Messungen 245
- 4 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse, Qualitätskontrolle 247
- 5 Dokumentation 248
- 6 Anwendungsbeispiele von Konvergenzmessungen 248

Teil II: Geodätische Lagemessungen 252

- 1 Allgemeines 252
- 2 Messgeräte 252
- 3 Durchführung der Messung 253

**Empfehlung Nr. 19: Messung der Spannungsänderung im Fels
und an Felsbauwerken mit Druckkissen 259**

Axel Paul und Fritz Walter

- 1 Zweck und Anwendungsbereich 259
- 2 Grundlagen und Begriffe 259
- 3 Messprinzip 261

- 3.1 Allgemeines 261
- 3.2 Spannungsgeber nach dem Deformationsmessprinzip 262
- 3.3 Spannungsgeber nach dem Kompensationsmessprinzip 262
- 3.4 Steifigkeit der Spannungsgeber 264
- 4 Druckkissen 265
- 5 Messgenauigkeit 267
- 6 Einbau der Spannungsgeber 267
- 6.1 Gebirgsspannungsgeber 267
- 6.2 Kontaktspannungsgeber 268
- 6.3 Betonspannungsgeber 268
- 6.4 Herstellung von Spannungsmessquerschnitten 270
- 7 Durchführung der Messungen 270
- 8 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 272
- 9 Dokumentation 272
- 10 Anwendungsbeispiel 273
- 10.1 Einbauprotokoll 273
- 10.2 Ergebnisse: Station 409 273
- Weiterführende Literatur 276

**Empfehlung Nr. 20: Zerfallsbeständigkeit von Gestein –
Siebtrommelversuch 277**

Peter Herzel

- 1 Zweck 277
- 2 Begriffe 277
- 2.1 Verwitterung 277
- 2.2 Zerfallsbeständigkeit 278
- 3 Prüfeinrichtung 278
- 4 Proben 279
- 4.1 Prüfbare Gesteine 279
- 4.2 Probenvorbereitung 279
- 5 Versuchsdurchführung 280
- 6 Versuchsauswertung, Darstellung und Bewertung der Ergebnisse 281
- 6.1 Auswertung 281
- 6.2 Darstellung und Bewertung der Ergebnisse 281
- 7 Anwendungsbeispiel 282
- Literatur 284

**Empfehlung Nr. 21: Verschiebungsmessungen quer zur Bohrlochachse –
Inklinometer- und Deflektometermessungen 285**

Helmut Bock und Axel Paul

- 1 Zweck und Anwendungsgebiet 285
- 2 Grundlagen, Begriffe und Messprinzip 286
- 2.1 Mechanische Grundlagen und Bezugssystem 286
- 2.2 Begriffe 287
- 2.3 Messprinzip 289

- 3 Messgeräte 292
- 3.1 Allgemeines 292
- 3.2 Stationäre Messgeräte 292
- 3.3 Mobile Messgeräte 294
- 3.4 Genauigkeitsanforderungen und Kalibrierung 297
- 4 Bohrungen für den Einbau der Messketten bzw. der Messverrohrung 298
- 4.1 Allgemeines 298
- 4.2 Herstellen des Bohrlochs 298
- 4.3 Einbau der stationären Messgeräte 298
- 4.4 Wahl und Einbau der Messverrohrung für mobile Sonden 299
- 5 Durchführung der Messungen 301
- 6 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 302
- 7 Dokumentation 304
- 8 Anwendungsbeispiele 304
- 8.1 Verlaufsmessung einer Vertikalbohrung: Vertikalitätsprüfung einer Schwimmlochbohrung bei einer Talsperre 304
- 8.2 Verlaufsmessung einer Schrägbohrung: Überprüfung der Richtungsgenauigkeit einer Ankerbohrung 305
- 8.3 Bestimmung der Horizontalverschiebungen eines Gebirges vor einer Tunnelortsbrust 306
- 8.4 Verschiebungsmessungen in einem Kriechhang 308
- Weiterführende Literatur 309

Empfehlung Nr. 22: Schlitzentlastungs- und Kompensationsmethode zur Messung der Druckspannungen im Randbereich geotechnischer Bauwerke 311

Bernhard Fröhlich[†] und Michael Schlebusch

- 1 Zweck 311
- 2 Kurzbeschreibung des Verfahrens 311
- 3 Grundlagen und Begriffe 311
- 3.1 Messprinzip 311
- 3.2 Begriffe 312
- 4 Versuchseinrichtung 312
- 4.1 Druckkissen und Pumpe 312
- 4.2 Verschiebungsmesseinrichtung 313
- 5 Versuchsdurchführung 314
- 5.1 Anforderungen an den Messort 314
- 5.2 Vorbereitung des Messorts 315
- 5.3 Nullmessung 315
- 5.4 Herstellung des Sägeschlitzes 316
- 5.5 Temperaturmessungen 317
- 5.6 Phasen der Messung 317
- 6 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 319
- 6.1 Versuchsauswertung 319

- 6.2 Darstellung der Ergebnisse 322
- 7 Ergänzende Hinweise 323
- 7.1 Erweiterte Versuchsdurchführung zur Abschätzung der Festigkeit 323
- 7.2 Dauermesseinrichtung zur Messung von Spannungen und deren Änderungen 323
- 8 Anwendungsbeispiel 323
- 8.1 Auswertung des Anwendungsbeispiels: 325
 - Literatur 326

Empfehlung Nr. 23: Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen mit dem CERCHAR-Versuch 329

Heiko Käsling und Ralf J. Plinninger

- 1 Zweck 329
- 2 Kurzbeschreibung des Verfahrens 329
- 3 Begriffe 330
- 4 Prüfeinrichtung 331
 - 4.1 Prüfgeräte 331
 - 4.2 Prüfstifte 331
 - 4.3 Messeinrichtung 332
- 5 Probekörper 333
 - 5.1 Bearbeitung der Probekörper 333
 - 5.2 Probekörperabmessungen 333
 - 5.3 Anzahl und Anordnung der Prüfstrecken 333
- 6 Versuchsdurchführung 334
- 7 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 335
- 8 Einfluss sägerauer Oberflächen 338
 - Literatur 338

Empfehlung Nr. 24: Bestimmung der Abrasivität von Festgesteinen mit dem LCPC-Versuch 341

Heiko Käsling, Jan Düllmann und Ralf J. Plinninger

- 1 Zweck 341
- 2 Kurzbeschreibung des Verfahrens 341
- 3 Begriffe 342
 - 3.1 Ausgangsprobe 342
 - 3.2 Versuchsprobe 342
 - 3.3 Abrasivitätsindex 342
 - 3.4 Brechbarkeit 342
- 4 Prüfeinrichtung 342
 - 4.1 Geräte zur Probenvorbereitung 342
 - 4.2 Versuchsgerät 343
 - 4.3 Prüfflügel 344
- 5 Zu prüfendes Material 344
 - 5.1 Probenmasse 344
 - 5.2 Probenvorbereitung 344

- 6 Versuchsdurchführung 345
- 6.1 Montieren des Prüflügels 345
- 6.2 Einbau der Versuchsprobe 345
- 6.3 Versuchsdurchführung 345
- 6.4 Siebung der verwendeten Versuchsprobe 346
- 7 Versuchsauswertung 346
- 7.1 Abrasivitätsindex A_{BR} 346
- 7.2 Brechbarkeit B_R 346
- 8 Darstellung der Ergebnisse 346
- 9 Klassifizierung 347
- 10 Anwendungsbeispiel 348
- Literatur 348

Empfehlung Nr. 25: Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen mit mineralogisch-petrografischen Verfahren 349

Ralf J. Plinninger, Heiko Käsling und Till Popp

- 1 Zweck 349
- 2 Kurzbeschreibung der Verfahren 349
- 3 Begriffe 350
- 3.1 Messgrößen 350
- 3.2 Abrasivitätsindizes 350
- 4 Versuchsoptionen 351
- 5 Prüfeinrichtungen 351
- 5.1 Geräte zur Herstellung von Dünnschliffen 351
- 5.2 Durchlichtmikroskop 353
- 5.3 Geräte zur Herstellung von Röntgen-Pulverpräparaten 353
- 5.4 Pulverröntgendiffraktometer 354
- 6 Herstellung der Probekörper 354
- 6.1 Anforderungen an das Probenmaterial 354
- 6.2 Dünnschliffherstellung 354
- 6.3 Probenherstellung für Pulverröntgendiffraktometrie 356
- 7 Versuchsdurchführung 356
- 7.1 Dünnschliffmikroskopie 356
- 7.2 Pulverröntgendiffraktometrie 360
- 8 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse 362
- 9 Härtekennwerte zur Ableitung von Indexwerten 363
- 10 Klassifizierung von Abrasivitätsindizes 364
- 11 Beispiel für einen Untersuchungsbericht 366
- Literatur 370

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.
- Reißler, 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.
- Reißler, 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.
- Leichnetz, 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 Arbeitskreises 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.: Konvergenz- und 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.

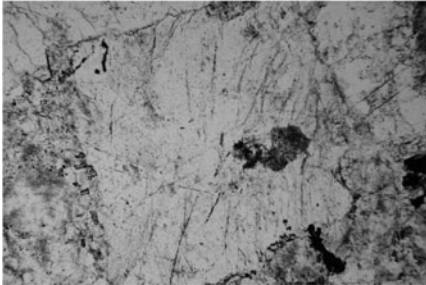
Petrographische Beschreibung des Dünnschliffs P04

Schliffbilder im Durchlicht

P04_9

Leicht getrübt Alkalifeldspat-Korn im Zentrum des Bildes

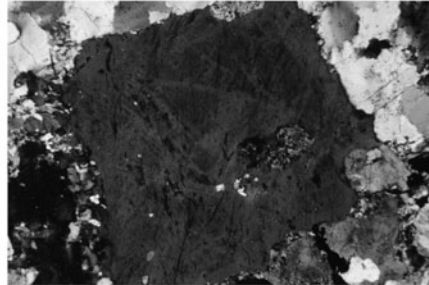
Bb: 4mm



P04_10

Feldspat mit geringer Doppelbrechung (dunkelgraue Interferenzfarbe), im Bild oben hellgraue bis gelbliche Quarzkörner (Schliff ist geringfügig zu dick)

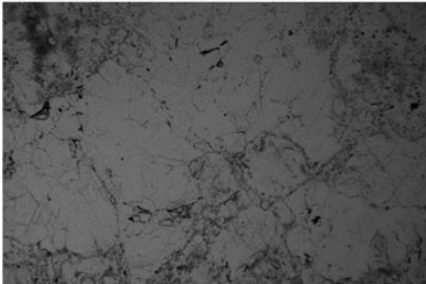
+ Nicols



P04_11

Granoblastische Quarz- (klare Korn-Aggregate) und Feldspat-Aggregate (leicht getrübt Bereiche)

Bb: 4mm



P04_12

Wie P04_17 unter gekreuzten Polarisatoren

+ Nicols

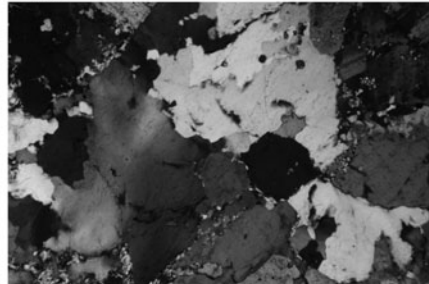


Bild 10 Beispiel eines Laborformblattes für die Dünnschliffauswertung. Hier: Fotodokumentation der Dünnschliffanalyse.

Literatur

- 1 DIN 22021:1985-07 (1985). *Rohstoffuntersuchungen im Steinkohlenbergbau; Unterteilung der Nebengesteine aufgrund mikroskopischer Untersuchungen zur Kennzeichnung technologischer Eigenschaften*. Berlin: Beuth-Verlag.
- 2 DIN EN 12407:2019-12 (2019). *Prüfverfahren für Naturstein – Petrographische Prüfung*. Deutsche Fassung EN 12407:2019. Berlin: Beuth-Verlag.
- 3 ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978). Suggested method for petrographic description of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 15 (2): 41–45.
- 4 Thuro, K. (1996). Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. *Münchener Geologische Hefte, Reihe B, Angewandte Geologie*, B1: 145 S. München: Hieronymus.
- 5 Bruland, A. (1998). *Project Report 13A-98 – Hard Rock Tunnel Boring: Drillability Test Methods*. Trondheim: NTNU.
- 6 Plinninger, R.J. (2002). Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirglösungsverfahren im Festgestein. *Münchener Geologische Hefte, Reihe B, Angewandte Geologie* B17: 146 S. München: Hieronymus.
- 7 DIN 18141-1:2014-05 (2014). *Baugrund – Untersuchung von Gesteinsproben – Teil 1: Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit*. Berlin: Beuth-Verlag.
- 8 Schimazek, J. und Knatz, H. (1970). Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen. *Glückauf* 106 (6): 274–278.
- 9 Schimazek, J. und Knatz, H. (1976). Die Beurteilung der Bearbeitbarkeit von Gesteinen durch Schneid- und Rollenbohrwerkzeuge. *Erzmetall* 29 (3): 113–119.
- 10 Lepique, M. (2010). Empfehlung Nr. 10 des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben – Spaltzugversuch. *Bautechnik* 85 (9): 623–627.
- 11 DIN EN ISO 14689:2018-05 (2018). *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels (ISO 14689:2017)*; Deutsche Fassung EN ISO 14689:2018. Berlin: Beuth-Verlag.
- 12 DIN ISO 8037-1:2003-05 (2003). *Optik und optische Instrumente – Mikroskope; Objektträger – Teil 1: Maße, optische Eigenschaften und Kennzeichnung*; Deutsche Fassung ISO 8037-1:1986. Berlin: Beuth-Verlag.
- 13 ISO 8255-1:2017-06 (2017). *Mikroskope – Deckgläser – Teil 1: Maßtoleranzen, Dicke und optische Eigenschaften*. Berlin: Beuth-Verlag.
- 14 DIN EN 13925-3:2005-07 (2005). *Zerstörungsfreie Prüfung – Röntgendiffraktometrie von polykristallinen und amorphen Materialien – Teil 3: Geräte*; Deutsche Fassung EN 13925-3:2005. Berlin: Beuth-Verlag.
- 15 Ney, P. (1986). *Gesteinsaufbereitung im Labor*. Stuttgart: Enke.
- 16 Tröger, W.E. (2017). *Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale, Teil 1: Bestimmungstabellen*. 5. neu bearbeitete Aufl., 188 S., Stuttgart: Schweizerbart.
- 17 Tröger, W.E. (1969). *Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale, Teil 2: Textband*. 2. Aufl., 822 S., Stuttgart: Schweizerbart.

- 18 Raith, M.M., Raase, P. und Reinhardt, J. (2011). *Leitfaden zur Dünnschliffmikroskopie*. 125 S. ISBN 978-3-00-036420-4 (PDF via Internet frei verfügbar).
- 19 Pettijohn, F.J., Potter, P.E. und Siever, R. (1987). *Sand and Sandstone*, 553 S. Springer, New York: Springer.
- 20 DIN EN 13925-1:2003-07 (2003). *Zerstörungsfreie Prüfung – Röntgendiffraktometrie von polykristallinen und amorphen Materialien – Teil 1: Allgemeine Grundlagen*; Deutsche Fassung EN 13925-1:2003. Berlin: Beuth-Verlag.
- 21 DIN EN 13925-2:2003-07 (2003). *Zerstörungsfreie Prüfung – Röntgendiffraktometrie von polykristallinen und amorphen Materialien – Teil 2: Verfahrensabläufe*; Deutsche Fassung EN 13925-2:2003. Berlin: Beuth-Verlag.

