

Praxisorientierte Untersuchung und Klassifizierung anisotroper Festigkeitseigenschaften von Festgesteinen

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat. Ralf J. Plinninger, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried
Prof. Dr.-Ing. Michael Alber, Ruhr-Universität Bochum
M.Sc. Dr.rer.nat. Jan Düllmann, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried

Der Begriff der "Anisotropie" beschreibt in der Ingenieurgeologie und Felsmechanik richtungsabhängige geomechanische Eigenschaften - ein Verhalten das für viele Sediment- und metamorphe Gesteine, die eingeregelter Schichtsilikate enthalten, typisch ist. Für praktische Anwendungen im Tief-, Tunnel- und Spezialtiefbau stellt die Erkennung und Beschreibung anisotroper Eigenschaften von Festgesteinen daher insbesondere im Kontext der Festigkeitsbewertung eine herausfordernde Aufgabe dar. Eine Vernachlässigung anisotroper Effekte bei der Untersuchung birgt das Risiko irreführender (üblicherweise zu niedrig ermittelter) Gesteinsfestigkeitswerte, die folgenreiche Konsequenzen, nicht zuletzt hinsichtlich der Leistungsbeurteilung bei der Gebirgslösung, nach sich ziehen können. Der vorliegende Beitrag stellt den aktuellen Kenntnisstand zur Festigkeitsuntersuchung anisotroper Gesteine vor. Für Zwecke der Klassifizierung des spezifischen Grads anisotroper Festigkeitseigenschaften wird der "Anisotropie-Index" (AI) als praxistauglicher Index vorgeschlagen, sowie Empfehlungen zu Probenahme- und Untersuchungsstrategien aus praktischen Projektanwendungen vorgestellt.

1 Relevanz anisotroper Eigenschaften

1.1 Definition und Ursachen

Im Kontext der Ingenieurgeologie und Geotechnik kann „Anisotropie“ als richtungsabhängiges geomechanisches Verhalten definiert werden. Der Begriff wird üblicherweise im Gegensatz zum „isotropen“ Verhalten verwendet, das ein Material mit einheitlichen, richtungsunabhängigen Eigenschaften kennzeichnet.

In der Felsmechanik wird der Begriff „Anisotropie“ häufig auf die Definition von JAEGER (1969) zurückgeführt, der den Begriff für die Auswirkung einer einzelnen Trennfläche auf die Festigkeit einer zylindrischen Probe verwendete. Das (geologisch wohl häufiger zutreffende) Modell, auf das im vorliegenden Beitrag Bezug genommen wird, unterscheidet sich davon insofern, als es sich auf das Modell eines Probekörpers mit parallelen Gefügeelementen in theoretisch unendlich dichtem Abstand bezieht.

Mechanisch anisotropes Verhalten beruht auf der Mineralzusammensetzung des Gesteins und den geologischen Prozessen, die zu dessen Bildung geführt haben. Sofern Minerale mit signifikant anisotropen Eigenschaften in einem Gestein enthalten sind, können sie dann anisotropes Gesteinsverhalten verursachen, wenn sie nicht willkürlich verteilt sind, sondern

eine Vorzugsverteilung und/oder -orientierung aufweisen. Übliche Mineralien, die zu Gesteinsanisotropie führen können, sind Schichtsilikate wie Ton- oder Glimmerminerale, die primär durch Sedimentation (→ Schichtung, Lamination) oder sekundär durch ein spezifisches Spannungsregime während der Metamorphose (→ Schieferung) eingeregelt wurden (siehe Abbildung 1-1).

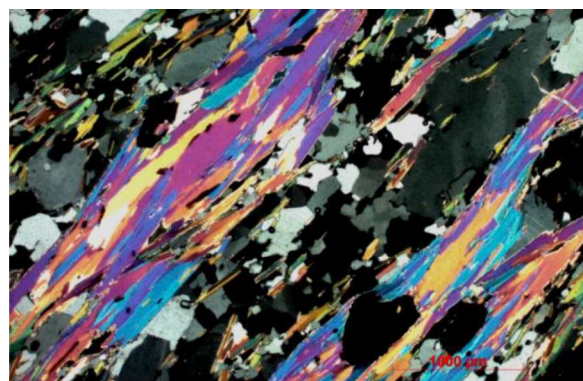


Abbildung 1-1: Mikroskopische Ansicht eines Glimmerschiefers im Dünnschliff unter polarisiertem Licht. Deutlich erkennbar das unter rd. 45° geneigte Schieferungsgefüge aus blättrigen Glimmermineralen (Muskovit) mit bunten Interferenzfarben und grau erscheinenden Schichten aus Quarz und Feldspat.

Sedimentgesteine und metamorphe Gesteinsarten weisen daher häufig anisotrope Eigenschaften auf. Auch wenn magmatische Gesteinsarten wie Granit

oder Diorit häufig als Beispiele für isotropes Verhalten herangezogen werden, sollte beachtet werden, dass auch in diesen Gesteinsarten fluidmagmatische Strukturen existieren können, die Anisotropie verursachen können.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Beurteilung anisotroper Eigenschaften zwingend mit einem bestimmten Untersuchungsmaßstab verknüpft werden muss: Ein geologischer Körper kann erheblich variierendes richtungsabhängiges Verhalten aufweisen, je nachdem, ob diese Eigenschaften im Maßstab des Minerals (wenige mm), Gesteins (cm - dm) oder Gebirges (m - dam) betrachtet werden. Daher ist anzumerken, dass die in diesem Beitrag vorgestellten Erfahrungen und Daten sich allgemein auf den Maßstab des „Gesteins“ in der Größe üblicher Probekörper für Einaxiale und Triaxiale Druckversuche oder Spaltzugversuche (\varnothing 50 – 150 mm) beziehen.

1.2 Der Einfluss anisotroper Verhaltens auf die Bewertung der intakten Gesteinsfestigkeit

Die Einaxiale Druckfestigkeit (UCS) stellt einen der wichtigsten felsmechanischen Kennwerte dar. Anisotrope Gefügeeigenschaften stellen einen signifikanten Einfluss auf die Ermittlung der Einaxialen Druckfestigkeit dar, der nicht nur empirisch belegt ist (siehe Kapitel 2), sondern auch aus theoretischen felsmechanischen Überlegungen (WITTKKE, 2014) oder numerischen Modellen, wie dem von SCHORMAIR entwickelten Particle Flow Code (PFC) - Modellen ableitbar ist (siehe Abbildung 1-2).

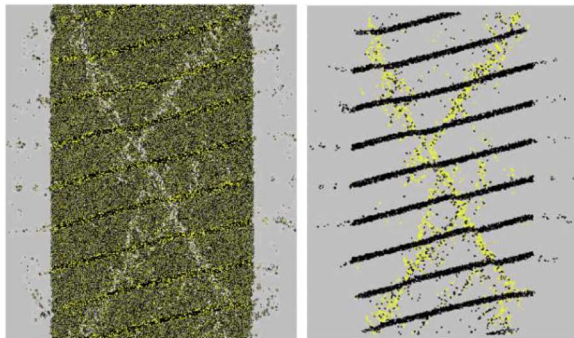


Abbildung 1-2: Beispiel für ein PFC-Modell eines Einaxialen Druckversuchs an einer anisotropen Gesteinsprobe mit einem unter $\beta = 75^\circ$ einfallendem Set von Diskontinuitäten (aus: SCHORMAIR, THURO & PLINNINGER, 2006, Abb. 11, S. 10).

Aus diesen Abhängigkeiten ist ersichtlich, dass die Interpretation derartiger Ergebnisse, die Beurteilung des gesteinspezifischen Anisotropiegrades und die Beurteilung der maximalen Gesteinsfestigkeit bei einem Winkel von 90° zwischen Belastungsachse und

anisotropem Element eine Kernaufgabe felsmechanischer Untersuchungen darstellt, um dem Baugrundgutachter eine nachvollziehbare Ermittlung repräsentativer Kennwerte zu ermöglichen.

Eine Vernachlässigung anisotroper Effekte bei der Probenahme, Prüfung, Berichterstattung und Dateninterpretation in relevanten Gesteinsarten birgt das Risiko irreführender (normalerweise zu niedriger) Gesteinsfestigkeiten, die kosten- und zeitintensive Fehlinterpretationen z.B. hinsichtlich der Anwendung spezifischer Löseverfahren oder der Kalkulation von Löseleistung und Verschleiß verursachen können.

2 Untersuchungsergebnisse

2.1 Referenzbedingungen

Die im folgenden Abschnitt dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Proben mit einem Längen : Durchmesser-Verhältnis von etwa 2,0 bis 2,5 : 1 gemäß den Prüfeempfehlungen der ISRM (1979), DGGT (2004), bzw. der DIN 18141-1 (2014). Im Zusammenhang mit den Testbedingungen und der Probengeometrie ist zu beachten, dass Tests an prismatischen Proben oder Zylindern mit einem l:d-Verhältnis von $< 1,0$ zu signifikant anderen Winkelbeziehungen führen.

Die Orientierung anisotroper Gefügeelemente (Winkel β) wird üblicherweise entweder als Winkel zwischen der Belastungsachse und der Orientierung des anisotropen Merkmals oder als Winkel zwischen Belastungsachse und der Normalen der Gefügeebene definiert. Im vorliegenden Beitrag beziehen sich alle angegebenen Winkel β auf den Winkel zwischen Belastungsachse und anisotropen Gefügeelementen gemäß Abbildung 2-1.

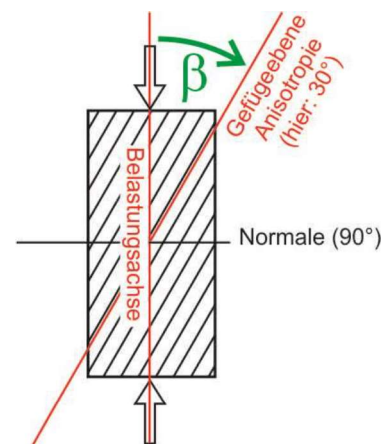


Abbildung 2-1: Definition des Gefügewinkels β zwischen Belastungsebene und Gefügeebene.

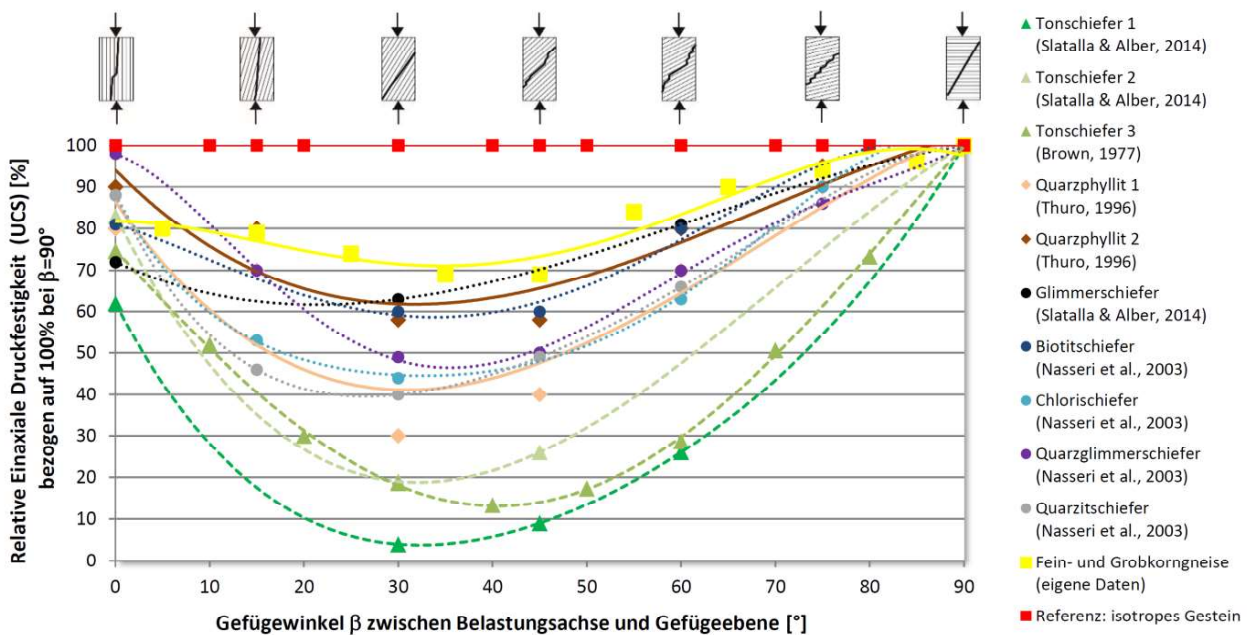


Abbildung 2-2: Zusammenstellung Einaxialer Druckversuche, die die Variation der relativen Druckfestigkeit (y-Achse) bei variierenden Winkeln zwischen Belastungsachse und Orientierung der anisotropen Merkmale (x-Achse) zeigen. Dargestellt sind Ergebnisse von 11 Gesteinsarten (plus Referenzlinie isotropes Gestein), die durch polynomielle Regressionslinien beschrieben werden.

2.2 Untersuchungsergebnisse

In Abbildung 2-2 sind Untersuchungsergebnisse für 11 Gesteinsarten mit signifikant unterschiedlichem anisotropem Verhalten zusammengestellt, darunter Ergebnisse von drei Tonschiefern (BROWN ET AL., 1977; SLATALLA & ALBER, 2014), zwei Quarzphylliten (THURO, 1996), fünf Schiefern mit unterschiedlichen Glimmergehalten aus verschiedenen Projektstandorten (SLATALLA & ALBER, 2014; NASSERI ET AL., 2003) sowie Messergebnisse für Gneise des Koralmkristallins. Als Referenz wurde das hypothetische Verhalten eines ideal isotropen Gesteins mit Datenpunkten und Linien in roter Farbe ergänzt.

Die Daten in Abbildung 2-2 zeigen, dass für alle getesteten Gesteine die minimale Druckfestigkeit bei einem Winkel von $30^\circ < \beta < 50^\circ$ ermittelt wurde, während die maximale Druckfestigkeit bei $\beta = 90^\circ$ ermittelt wurde (diese wurde als 100 % - Referenz verwendet). Die relative Druckfestigkeit unter einem Winkel von 0° (Tests parallel zur Gefügee Ebene) beträgt rd. 60 bis 98 % der maximalen Festigkeit, was zu einer ausgeprägt asymmetrischen Form der polynomischen Regressionskurven führt.

Das auffallendste Merkmal dieser Zusammenstellung ist die große Variation der minimalen Druckfestigkeit, die Werte von minimal 4 % (Schiefer) bis maximal 69 % (Gneis) abdeckt. Es zeigt sich, dass der Relativwert dieses Minimums charakteristisch für die mechanische Relevanz der Anisotropie ist.

3 Klassifizierung anisotroper Eigenschaften

Um definierte Grenzkriterien für die Unterscheidung von „isotropem“ und „anisotropem“ Verhalten und nachvollziehbare Grundlagen für weit verbreitete Begriffe wie „stark anisotropes“ Verhalten zu finden, wurden in der Literatur eine Reihe von Methoden vorgestellt:

BROCH (1983) ermittelt einen Anisotropieindex (I_a) aus dem Punktlastversuch, der sich auf die maximalen und minimalen Punktlastindizes bezieht, die aus Tests normal und parallel zum Gefüge ermittelt werden.

SINGH ET AL. (1989) stellen das sogenannte "Anisotropieverhältnis" (R_c) vor, das als Quotient $\sigma_{c,90} : \sigma_{c,min}$ definiert wurde, wobei $\sigma_{c,90}$ die Festigkeit ist, die normal zur Gefügee Ebene ermittelt wird (Tabelle 1).

Tabelle 1: Klassifikation des "Anisotropieverhältnisses" R_c (SINGH ET AL. 1989)

R_c	Klassifizierung
1,0 – 1,1	isotrop
1,11 – 2,0	gering anisotrop
2,01 – 4,0	mäßig anisotrop
4,01 – 6,0	hoch anisotrop
> 6,0	sehr hoch anisotrop

PLINNINGER (2002) stellt auf Basis derselben Eingangsparameter den so genannten „Anisotropieindex“ (AI) vor, der als Quotient aus $\sigma_{c \min} : \sigma_{c \max}$ ermittelt wird und damit den Reziprokwert des R_c darstellt. Eine Klassifizierung der spezifischen Anisotropie, die auf einer gleichmäßigen Abstufung in 20%-Schritten beruht ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Klassifizierung des "Anisotropieindex" AI mit Beispielen (nach PLINNINGER 2002, modifiziert).

AI $\sigma_{c \min} : \sigma_{c \max}$	Klassifizierung
< 0,19	extrem anisotrop
0,20 – 0,39	sehr anisotrop
0,40 – 0,59	ausgeprägt anisotrop
0,60 – 0,79	mäßig anisotrop
0,80 – 0,99	gering anisotrop
1,0	isotrop

Aufgrund dieser Definition wird der AI als einfach anzuwendender und leicht zu interpretierender Indexwert für die Klassifizierung der Anisotropie eingestuft.

Als Anwendungsbeispiel wurden in nachstehender Tabelle 3 die in Absatz 2.2 dieses Beitrags dargestellten Gesteine gemäß ihrem AI klassifiziert. Aus dieser Zusammenstellung wird deutlich, dass die aus der Anwendung des AI abgeleitete Klassifizierung gut in der Lage ist, die verschiedenen Grade anisotropen Verhaltens zu unterscheiden und plausible verbale Begriffe für deren Beschreibung zu liefern.

Tabelle 3: Beispiel für die Klassifizierung der dargestellten Gesteine mithilfe des „Anisotropieindex“ AI

Gestein	AI	Klassifizierung
Tonschiefer 1	0,04	extrem anisotrop
Tonschiefer 3	0,13	extrem anisotrop
Tonschiefer 2	0,19	extrem anisotrop
Quarzphyllit 1	0,30	sehr anisotrop
Quarzschiefer	0,40	ausgeprägt anisotrop
Chloritschiefer	0,44	ausgeprägt anisotrop
Quarzglimmerschiefer	0,49	ausgeprägt anisotrop
Quarzphyllit 2	0,58	ausgeprägt anisotrop
Biotitschiefer	0,60	mäßig anisotrop
Glimmerschiefer	0,63	mäßig anisotrop
Gneis	0,69	mäßig anisotrop

4 Erfahrungen zur orientierten Probenahme und Prüfung

Zur Gewinnung orientierter Proben können in der Praxis grundsätzlich drei verschiedene Verfahren angewandt werden:

1. Durchführung orientierter Aufschlussbohrungen, um Kernproben mit definierter Orientierung und beliebigem Durchmesser zu gewinnen (siehe Abbildung 4-1). Diese Vorgehensweise stößt allerdings gerade bei größeren Teufen in Formationen mit wechselnder Orientierung an ihre Grenzen.
2. Durchführung unorientierter Kernbohrungen (üblicherweise vertikal) mit nachträglicher Gewinnung orientierter Proben durch Überbohren. Aus eigener Erfahrung sind Bohrkern mit einem Durchmesser von ≥ 120 mm ausreichend groß für die Herstellung von zylindrischen Proben mit einem normgemäßen Durchmesser von ≥ 48 mm in beliebiger Ausrichtung (siehe Abbildung 4-2).
3. Gewinnung größerer Sonder- bzw. Blockproben mit nachträglicher Gewinnung orientierter Proben durch Überbohren vor Ort oder im Labor (siehe Abbildung 4-3).

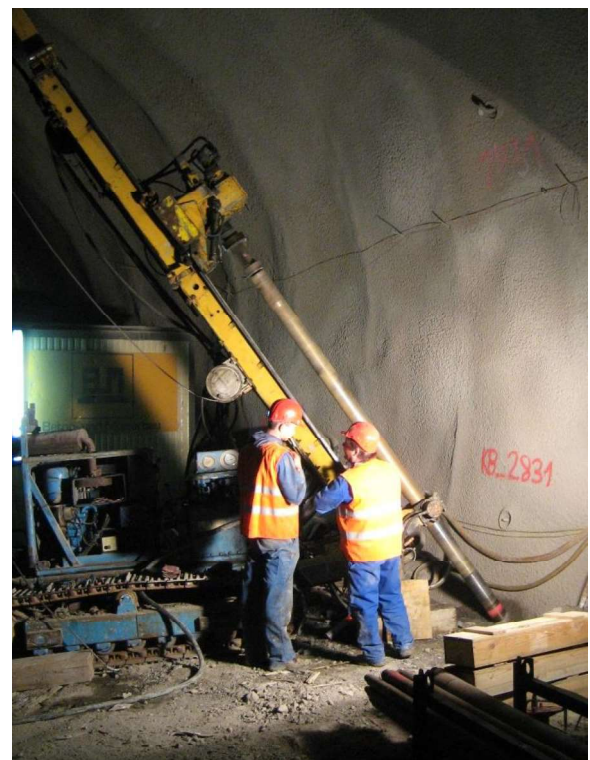


Abbildung 4-1: Beispiel für eine orientierte Kernbohrung zur Gewinnung von Bohrkernen normal auf die Schichtung (Achraintunnel, 2005).

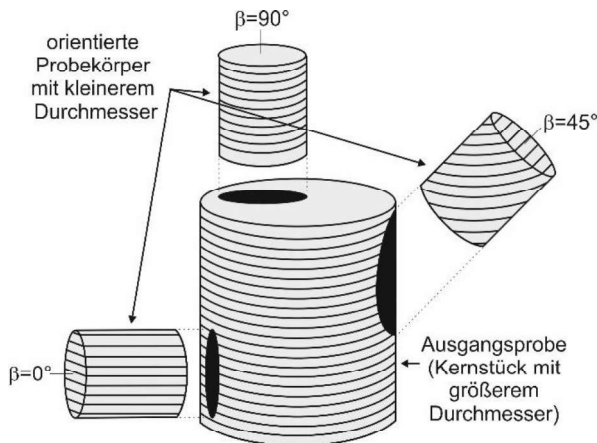


Abbildung 4-2: Konzeptzeichnung zur Gewinnung orientierter Probekörper mit kleinerem Durchmesser aus einer größeren Ausgangsprobe



Abbildung 4-3: Beispiel für die Gewinnung orientierter Proben durch Überbohren einer Blockprobe vor Ort mittels tragbarer Betonkernbohrausrüstung (Schwarzkopftunnel, 2015).

Gemäß den einschlägigen Prüfnormen und -empfehlungen (z.B. DIN 18141-1, ISRM 1979, DGGT 2004) ist die Dokumentation der Ausrichtung von relevanten Gefügeelementen (u.a. Schichtung, Schieferung) im Prüfprotokoll aus offensichtlichen Gründen für Prüfungen an anisotropem Gestein vorgeschrieben. Hierbei ist auf eine einheitliche und eindeutige Verwendung von Winkelangaben (siehe auch Absatz 2.1) zu achten.

Eine zusätzliche fotografische Dokumentation des Probekörpers vor und nach dem Versuch sollte in solchen Fällen ebenfalls standardmäßig erfolgen, um gegebenenfalls nachträgliche Analysen zu ermöglichen.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Eine Vernachlässigung anisotroper Effekte bei der Probenahme, Prüfung, Berichterstattung und Dateninterpretation in relevanten Gesteinsarten birgt das Risiko irreführender (normalerweise zu niedriger) Gesteinsfestigkeiten, die kosten- und zeitintensive verursachen können.

Die im Bereich der Geotechnik angewendeten Prüfnormen und -empfehlungen enthalten keine spezifischen Vorgaben für die Probenahme und Prüfung potenziell anisotroper Gesteine. Die Berücksichtigung der hier dargestellten Effekte liegt also formal im Ermessen des Prüfinstituts, bzw. des verantwortlichen Baugrundgutachters.

Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse erscheint es nach Überzeugung der Verfasser dennoch unabdingbar, für eine zutreffende Charakterisierung der Festigkeitseigenschaften anisotroper Gesteine ein Untersuchungsprogramm durchzuführen, das zumindest die Einschätzung der folgenden Eigenschaften erlaubt:

- Bewertung der Gesteinsfestigkeit „normal“ zur Gefügeebene (d.h. $\sigma_{c\max} / \sigma_{c90}$ bei $\beta=90^\circ$);
- Charakterisierung und Klassifizierung des gesteinspezifischen Anisotropiegrades (z.B. über den Anisotropieindex AI);

Um diese Voraussetzungen zu erfüllen, können folgende praktische Grundsätze empfohlen werden:

1. Oberste Priorität sollte die Durchführung eines Großteils der Versuche senkrecht zur Schichtung / Schieferung ($\beta = 90^\circ$) sein, um die maximale Druckfestigkeit ($\sigma_{c\max} / \sigma_{c90}$) zu ermitteln. Diese Versuche sind alternativlos, da eine Extrapolation dieser Eigenschaft aus Versuchen unter anderen Gefügewinkeln unmöglich, bzw. mit hoher Unsicherheit behaftet ist.
2. Eine weitere Priorität sollte die Durchführung einer statistisch ausreichenden Anzahl von Tests in einem Winkelbereich von $30^\circ < \beta < 50^\circ$ sein, um die minimale Festigkeit ($\sigma_{c\min}$) zu erfassen, die zur Charakterisierung des gesteinspezifischen Anisotropiegrades verwendet werden kann.
3. Zusätzliche Tests unter anderen Winkeln können optional durchgeführt werden, mit dem Ziel, die gesteinspezifische Anisotropie im gesamten Winkelbereich von $\beta=0^\circ$ bis 90° zu erfassen.



Auf diese Weise ermittelten Kennwerte erlauben dem Baugrundgutachter eine sichere, nachvollziehbare und auf die jeweilige Fragestellung angepasste Bewertung der Festigkeit auch bei anisotropen Gesteinseigenschaften.

So kann es z.B. im Rahmen einer Pfahlgründung sinnvoll sein, bei Vorliegen entsprechend detaillierter Ergebnisse die normal zur Schichtung/Schieferung ermittelte Festigkeit für die Bewertung des Bohrwiderstands anzusetzen, während die Ermittlung der Tragfähigkeit bei schiefwinkliger Schichtneigung auf einem winkelabhängig abgeminderten Festigkeitskennwert beruht.

Literaturverzeichnis

Broch, E. (1983). *Estimation of Strength Anisotropy using the Point-Load Test*. Int. J Rock Mech. Min Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 4, S. 181-187.

Brown, E.T., Richards, L.R., Barr, M.V. (1977). *Shear strength characteristics of the Delabole Slates*. Proc. Conf. Rock Engineering Newcastle upon Tyne, S. 35-51.

DIN – Deutsches Institut für Normung e.V (2014): DIN 18141-1, *Baugrund – Untersuchung von Gesteinsproben, Teil 1: Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit*, Ausgabe 05/2015, 14 Seiten, Berlin (Beuth).

DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2004). *Neufassung der Empfehlung Nr. 1. des Arbeitskreises 3.3. „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern*. Bautechnik, 81, 10, S. 825 - 834.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1979). *Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., 16, 2, S. 135-140 (Elsevier)

Jaeger, J. (1960). *Shear failure of anisotropic rocks*. Geol. Mag., 97, S. 65-72.

Plinninger, R.J. (2002): *Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein*. Münchner Geol. Hefte, Reihe B, 17 - Angewandte Geologie, XI + 146 S., 99 Abb., 36 Tab., München (Hieronymus).

Ramamurthy, T. (1993). *Strength, modulus responses of anisotropic rocks*. Hudson J. A., (ed.). Comprehensive Rock Engineering, vol. 1. S. 313–29, Oxford (Pergamon).

Schormair, N., Thuro, K. & Plinninger, R.J. (2006). *The influence of anisotropy on hard rock drilling and cutting*. paper No. 491.- Engineering geology for tomorrow's cities - 10th IAEG Congress, Nottingham, United Kingdom, 6.-10. September 2006.

Singh, J., Ramamurthy, T. & Rao, G.V. (1989). *Strength anisotropies in rocks*. Indian Geotech J, 19, S. 147–166.

Slatalla, N. & Alber, M. (2014). *Failure behaviour and acoustic emission pattern of slate and mica schist in uniaxial loading*. Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses – Alejano, Peruchó, Olalla & Jiménez (Eds.), S. 205-210, London (Taylor & Francis).

Thuro, K. (1996). *Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb*. Münchner Geol. Hefte, Reihe B, 1, - Angewandte Geologie, 45 S., 115 Abb., 39 Tab., München (Hieronymus).

Witke, W. (2014): *Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*, 875 S., Berlin (Ernst & Sohn Verlag)