

Geotechnische Aspekte der repräsentativen Beprobung von Festgesteinen

Referent:

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat. Ralf J. Plinninger
Dr. Plinninger Geotechnik, Kirchweg 16, D-94505 Bernried
email: rp@plinninger.de

Co-Autoren:

Dipl.-Geol. Thorsten Bruelheide
DYWIDAG International GmbH, Klausenburger Straße 9, D-81677 München
email: Thorsten.Bruehlheide@dywidag.com

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat. Marion Nickmann
Technische Universität München, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Arcisstraße 21, D-80290 München
email: marion.nickmann@mytum.de

Zusammenfassung

Im Labor ermittelte felsmechanische Parameter sind wesentliche Grundlage für die Charakterisierung von Festgesteinen in der Planungs- und Realisierungsphase von Spezialtiefbaumaßnahmen, Stollen, Tunneln oder Kavernen im Fels. In Anbetracht einer stets präziser werdenden Messtechnik ist der angepassten Probenahme im Feld eine immer wichtigere Bedeutung für das Ergebnis der Laboruntersuchungen und damit der Planungsgrundlagen beizumessen. Dieser wesentliche Bereich wird derzeit von den gültigen Normen und Empfehlungen nur unzureichend abgedeckt, so dass unscharf definierte Begriffe wie „fachgerechte“ oder „repräsentative“ Beprobung häufig verwendete Worthülsen bleiben, die oft über die tatsächliche Problematik einer angepassten Probenahme hinwegtäuschen. Der vorgestellte Beitrag stellt auf Basis langjähriger Erfahrungen praxisorientierte Ansätze und Hintergründe der Probenahme und Probenbehandlung in Festgesteinen zusammen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die angepasste Beprobung und Behandlung anisotroper und veränderlich fester Gesteine sowie Erfahrungen bei der Entnahme von Haufwerksproben gelegt.

1 Einleitung / Problemstellung

Im Labor ermittelte felsmechanische Parameter (wie Druck-, Zug- und Scherfestigkeit, Verformungseigenschaften, Wassergehalt, Veränderlichkeit, Abrasivität, Petrographie) sind wesentliche Grundlage für die Charakterisierung von Festgesteinen. Ihre Bedeutung als Leitwerte für die Planung, Ausschreibung, Kalkulation und Ausführung von Gebirgslösungs- und Gebirgssicherungsmaßnahmen von Felshohlraumbauten (Stollen, Tunneln, Kavernen) führt dazu, dass entsprechende Untersuchungsprogramme integrale Bestandteile der Voruntersuchungs- und Bauausführungsphase sind (Abbildung 1).

Die hierbei angewandten Laborverfahren, wie z. B. einaxiale und triaxiale Druckversuche, indirekte und direkte Zugversuche, Punktlastversuche, Abrasivitätstests oder Dünnschliffuntersuchungen sind durch zahlreiche Versuchsempfehlungen und Normen internationaler (z. B. ISRM) und nationaler (z. B. DIN, SIA, ÖNORM, DGGT) Organisationen reglementiert und führen in aller Regel zu reproduzierbaren Messungen.



Abbildung 1: Durchschlag einer Hartgesteins-Tunnelbohrmaschine (TBM): Der Ermittlung zutreffender ingenieurgeologischer Kennwerte für Planung und Ausführung anspruchsvoller Felsbauwerke kommt nicht nur bei großen Infrastrukturprojekten mehr denn je eine entscheidende Bedeutung zu.

Gerade in Anbetracht einer stets präziser werdenden Messtechnik und aufwändiger Versuchsabläufe ist einer den geotechnischen Fragestellungen und dem anstehenden Gebirge angepasste Probenahme ein stetig wachsender Einfluss auf das Ergebnis der Laboruntersuchungen beizumessen. Gerade dieser wesentliche Bereich ist aber aus Sicht der Verfasser derzeit von den gültigen Normen und Empfehlungen nur unzureichend abgedeckt, so dass unscharfe Begriffe wie „fachgerechte“ oder „repräsentative“ Beprobung häufig verwendete Worthülsen bleiben, die oft über die tatsächliche Problematik einer repräsentativen Probenahme hinwegtäuschen.

Der nachfolgende Beitrag stellt auf Basis langjähriger Erfahrungen praxisorientierte Ansätze und Hintergründe der Probenahme und Probenbehandlung in Festgesteinen zusammen. Ziel dieses Aufsatzes ist dabei die Darstellung „handwerklicher“ Probleme und die Erarbeitung von praxisnahem „best practice“.

2 Vorhandene Regelwerke

Grundsätzliche Festlegungen der Probenahme in Boden und Fels werden im Entwurf für den Eurocode 7, Teil 3: „Felduntersuchungen für die geotechnische Bemessung“ (DIN EN 1997-3; [2]) dargestellt. Aus dem Bereich der Natursteinindustrie werden Vorgaben für die Probenahme in DIN 52101 „Prüfverfahren für Gesteinskörnungen. Probenahme“ (Entwurf August 2004; [5]) zusammengefasst.

Technische Aspekte der Probekörpervorbereitung und Prüfung sind Gegenstand gängiger Normen und Empfehlungen. Hinweise zur Prüfkörperlagerung oder zu definierten Prüfzuständen (z. B. hinsichtlich des Wassergehalts) werden in diesen Regelwerken jedoch nur teilweise gegeben.

Es ist hierbei festzustellen, dass derzeit im AK 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der DGGT in Bearbeitung befindliche Versuchsempfehlungen (z. B. Neufassung der Empfehlung 5 „Punktlastversuch“ oder Neufassung der Empfehlung Nr. 10 „Spaltzugversuch“) explizit Hinweise für definierte Prüfbedingungen bei anisotropen (d. h. geschichteten oder geschieferten) Gesteine enthalten werden.

3 Anforderungen an die Probenahme

Eine zutreffende Definition der Anforderungen an die Probenahme stellt EC7 T3 vor: „Ziel der Probenahme in Fels ist, angemessene Proben zur Benennung und Beschreibung von Fels und für Laborversuche für die Ableitung zuverlässiger felsmechanischer Informationen über die Felsformation zu erhalten“ ([2], S. 73).

Die tatsächlichen Anforderungen an Art, Anzahl und Geometrie der Proben erwachsen dabei einerseits aus den rein technischen Anforderungen der weiteren Be-

arbeitung und Prüfung („Technische Anforderungen“, siehe Kap. 3.1) und andererseits aus den geologischen Anforderungen an die Repräsentativität der Ergebnisse (siehe Kap. 3.2, 3.3).

3.1 Technische Anforderungen

Gemäß EC7 T3 [2] werden drei Laborgüteklassen von Proben (A, B, C) unterschieden:

- Laborgüteklasse A – keine oder leichte Störung der Felsstruktur
- Laborgüteklasse B – nicht oder leicht gestörte Felsstücke in ansonsten gestörtem Gebirge
- Laborgüteklasse C – völlig veränderte Felsstruktur (z. B. Bohrklein, Gesteinschips)

Bei den hier betrachteten Untersuchungsverfahren (siehe auch Abs. 1) müssen die gewonnenen Proben in aller Regel den Anforderungen der Güteklassen A oder B entsprechen. Sie sollten darüber hinaus ausreichende Größe und ggf. geeignete Orientierung besitzen und frei von makroskopischen Rissen sein, an denen ein vorzeitiges Versagen eintreten kann (siehe u. a. [16]).

Profunde Kenntnisse über die vorgesehenen Versuche und den weiteren Bearbeitungsvorgang sind wesentlich für eine angepasste und der späteren Bearbeitung genügende Probenahme. Hierbei sind generell die fünf aufeinander folgenden Arbeitsschritte Entnahme – Transport – Lagerung – Probenvorbereitung („Formatierung“) – Prüfung zu unterscheiden, die jeder für sich Einfluss auf das Prüfergebnis nehmen (Abbildung 2).

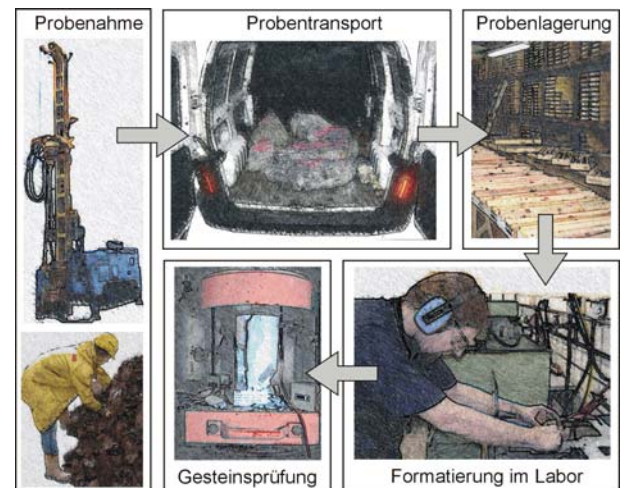


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bearbeitungsschritte bei der Prüfung von Festgesteinen.

3.2 Anforderungen an die Repräsentativität

Unter „Repräsentativität“ versteht man die Übertragbarkeit der Ergebnisse einer Untersuchung an einer Stichprobe auf die Grundgesamtheit. Eine Stichprobe ist dann repräsentativ, wenn sie als Teilmenge in allen

relevanten Strukturmerkmalen und in den Proportionen der relevanten Strukturmerkmale zueinander die Struktur der Grundgesamtheit widerspiegelt, also ein verkleinertes Abbild derselben darstellt.

In DIN 52101 [5] wird eine den Anforderungen an die Repräsentativität genügende Probenahme wie folgt definiert: „Zweck der Probenahme ist es, eine Teilmenge zu erhalten, die zur Ermittlung eines oder mehrerer Merkmale einer Grundgesamtheit geeignet ist. Es ist beabsichtigt, anhand dieser Teilmenge die durchschnittliche Beschaffenheit oder Abweichungen von der durchschnittlichen Beschaffenheit der Grundgesamtheit zu ermitteln.“ ([5], Abs. 1, S. 3).

3.3 „best practice“-Beispiel: ÖGG-Richtlinie (2001)

Die 2001 in Österreich eingeführte „Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb“ der ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK [14] fasst den Stand der Technik zusammen und stellt einen guten Leitfaden für die methodische und technische Bearbeitung von Planungsaufträgen für Untertagebaumaßnahmen zusammen. Die Empfehlung gibt u. a. auch Hinweise auf wesentliche bestimmende Gesteins- und Gebirgseigenschaften sowie anwendbare Versuchsverfahren und heranziehbare Fachpublikationen.

Die hieraus entnommene Abbildung 3 zeigt eine beispielhafte tabellarische Charakterisierung eines geologischen Homogenbereichs.

GA 4			
Lithologie	Kalk-/Dolomitmarmor		
Schieferung/Anisotropie	60 - 20 cm / gering anisotrop		
Kluftkörpergröße	20 - 6 cm		
TF-Beschaffenheit	sf: rau; K: rau, evt. tonig-schluffige Füllungen		
Trennflächenausbisslänge	überwiegend niedrig		
Öffnung	geöffnet		
Gesteinskennwerte	Mittelwert	Standardabweichung	Versuchszahl
UCS [MPa]	102,6	29,0	26
m_i [-]	13,4	6,2	20
c [MPa]	24,2	8,2	20
ϕ [°]	40,7	4,9	20
E [GPa]	68,3	17,9	23
ν [-]	0,19	0,05	23
CAI [-]	1,4	0,4	18
Trennflächenkennwerte			
Reibungswinkel [°]	10-20		
Restreibungswinkel [°]	10-20		
Gebirgskennwerte	Mittelwert	Standardabweichung	
GSI [-]	40	10	
σ_{UCS} [MPa]	13,9	4,9	
c [MPa]	3,9	1,3	
ϕ [°]	30,5	4,5	
E [GPa]	6,2	3,4	

..... schattiert unterlegte Werte sind Schätzwerte

Abbildung 3: Beispiel für die zusammenfassende Darstellung der geotechnischen Eigenschaften eines Homogenbereichs („Gebirgsart“), aus: [14], Tab. B-4.

In Abbildung 3 wird eine mustergültige, gleichmäßige Abdeckung der verschiedenen Versuchsverfahren mit einer ausreichenden Anzahl von Einzelproben deutlich. Nach eigener Erfahrung ist dabei mindestens sicherzustellen, dass für jeden gebildeten Homogenbereich (entspricht dem Begriff der „Gebirgsart“ im Sinne der

ÖGG-Richtlinie [14]) mindestens 5-10 Einzelversuche aller relevanten Verfahren durchgeführt werden können.

Neben der ausreichenden Abdeckung der Kennwerte innerhalb eines Homogenbereichs ist darauf zu achten, dass auch eine dem Anteil und Auftreten des Gesteins angepasste Abdeckung der ausgeschiedenen Homogenbereiche untereinander stattfindet.

Bisweilen in der Vergangenheit praktizierte, aus Sicht der Verfasser unzulässige Verschiebung des baugrundbezogenen Risikos stellen jedenfalls Fälle dar, in denen im Zuge der Planung und Ausschreibung Homogenbereiche gebildet werden, denen keine oder nur unzureichende Kennwerte zugeordnet werden. Der Begriff der Repräsentativität wird in diesem Fall ad absurdum geführt.

4 Überblick: Probenahmetechniken

Die prinzipiellen Möglichkeiten einsetzbarer Probenahmetechniken werden im EC7 T3 [2] beschrieben. Hierbei wird unterschieden zwischen:

- Probenahme durch **Rotationskernbohrung** zur Gewinnung von Proben der Laborgüteklassen A, B
- Probenahme in stark oder völlig verwittertem Fels durch **Rammbohrung** zur Gewinnung von Proben der Laborgüteklassen A, B
- Probenahme mit **Schappen oder Schnecken** zur Gewinnung von Proben der Laborgüteklasse C
- Probenahme durch **Schneiden** zur Gewinnung von Proben der Laborgüteklasse C
- Entnahme von **Sonderproben** der Laborgüteklasse A (z. B. in Versuchsgrube oder Schacht)

Wesentlich ist dabei die im EC7 T3 [2] enthaltene Feststellung: „Die Auswahl der Technik muss im Einklang mit der Probengüte erfolgen, die für die Klassifizierung des Fels und für die durchzuführenden Laborversuche gefordert wird.“ ([2], S. 74).

Da in aller Regel für die hier behandelten felsmechanischen Versuche Proben der Güteklasse C nicht ausreichend sind (siehe Kap. 3.1), beschränkt sich die Auswahl der Probenahmetechnik in der Praxis meist auf die Entnahme von Bohrproben oder Sonderproben. Die gegenwärtige Vorgehensweise kann bei diesen beiden Verfahren wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei der **Bohrprobung von der Oberfläche** aus wird ein Mindestmaß an Repräsentativität durch einen den Vorgaben der DIN 4020 [4] genügenden Bohrpunktabstand (für Linienbauwerke z. B. 50-200 m) und die Entnahme von Bohrproben gewährleistet, die hinsichtlich Lithologie, Entnahmetiefe und Abstand zum Bauwerk übertrag-

bare Ergebnisse erwarten lassen. Da der hohe Kostenaufwand dieser Aufschlussmaßnahmen in der Regel nur die Gewinnung sehr begrenzter Probemengen für ein und denselben geologischen Homogenbereich erlaubt, ist eine Beprobung nach statistischen Gesichtspunkten erfahrungsgemäß nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich.

- b) Bei der **direkten Entnahme von Felsproben** (z. B. aus einem Steinbruch, Versuchsschacht oder dem Haufwerk eines laufenden Tunnel- oder Stollenvortriebs) steht meist ein Überangebot an Proben zur Verfügung, so dass bei gleichzeitiger Beachtung geologischer Aspekte (Vergleichbarkeit der Lithologie, Verwitterungseinfluss etc.) statistische Verfahren durchaus sinnvoll einsetzbar sind. In Anlehnung an die Vorgaben des FGSV-Merkblatts ZTVE-StB 94 [7] ist z. B. die Anwendung eines hinsichtlich Probenahmeort / Probenahmezeitpunkt und Probenmenge definierten Prüfplans durchaus anwendbar, um eine statistisch untermauerte Repräsentativität der Proben zu gewährleisten (siehe auch Kap. 6).

5 Geotechnische Aspekte der Probenahme

5.1 Probengröße und -geometrie

Bereits bei der Planung der Probenahme (Wahl der Probenabmessung bzw. -durchmessers) und der Auswahl von Proben (Bohrkerne / Sonderproben) müssen für eine fachgerechte Beprobung Inhomogenitäten, so genannte „Maßstabeffekte“ (siehe zusammenfassende Darstellungen in [19], [20]) und geometrische Effekte berücksichtigt werden. Viele der nachstehend für Einaxiale Druckprüfungen dargestellten Erfahrungen sind in dieser oder ähnlicher Form auch bei der Ermittlung anderer felsmechanischer Kennwerte zu berücksichtigen:

- Bei makroskopisch stark **inhomogenen** Gesteinen (z.B. Grauwacken, Konglomeraten, porphyrischen Gneisen) ist das Größenverhältnis zwischen Einzelkomponente und Probekörper ein relevanter Einflussfaktor. Es sollte die auch in DGGT-Empfehlung 1 [1] dargestellte Faustformel herangezogen werden, nach der die Abmessung der Probe mindestens dem Zehnfachen des größten Einzelkorndurchmessers entsprechen sollte ([1], S. 828, Abs. 2).
- Die in Abbildung 4 exemplarisch dargestellten Ergebnisse zeigen beispielhaft den Einfluss des „**Schlankheitsgrads**“ (Längen-Durchmesser-Verhältnis) auf die Prüfergebnisse des Einaxialen Druckversuchs bei Verwendung zylindrischer Proben.

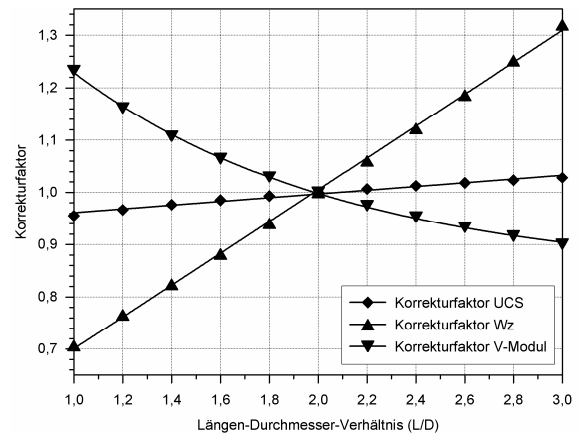


Abbildung 4: Abhängigkeit von Einaxialer Gesteinsdruckfestigkeit (UCS), Zerstörungsarbeit (Wz) und Verformungsmodul vom Längen-Durchmesser-Verhältnis gebohrter Zylinder (nach: [19]).

- Anders als der Schlankheitsgradeffekt wird der Einfluss der **absoluten Probekörpergröße** auf das Ergebnis von Festigkeitsprüfungen dagegen kontrovers diskutiert. Zahlreiche Autoren (u. a. [8], [9]) führen Ergebnisse an, die den Schluss zulassen, dass kleinere Proben zu höheren Messergebnissen der Gesteinsdruckfestigkeit führen. In den [19] zu Grunde liegenden Reihenuntersuchungen an homogen-isotropen Kristallingesteinen konnten derartige, klare Abhängigkeiten in einem üblichen Durchmesserbereich zwischen 45 und 110 mm nicht nachgewiesen werden.
- Hinsichtlich der generellen Probengeometrie stellt der **Formeffekt** bei der durchaus üblichen Verwendung prismatischer und zylindrischer Probekörper einen weiteren relevanten Teilaspekt der Festigkeitsprüfung dar. Es können hierbei Erfahrungen herangezogen werden, die aus dem Bereich der Betonprüfung stammen (DIN EN 206 [3]) und die scheinbar im Zylinder zu niedrig bestimmte Festigkeit quantifizieren (Abbildung 5).

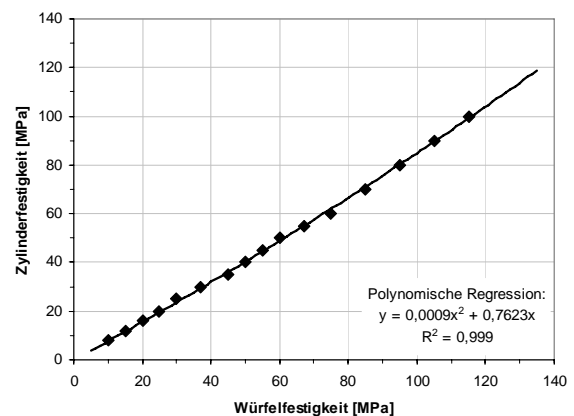


Abbildung 5: Aus den Festigkeitsklassen der DIN EN 206 [3] abgeleitete Korrelation zwischen Würfel- und Zylinderdruckfestigkeit

5.2 Beprobung veränderlich fester Gesteine

Bei der Beprobung veränderlich fester Gesteine (z. B. Mergelsteine, Tonsteine, tonig gebundene Sandsteine) muss berücksichtigt werden, dass die mechanischen Eigenschaften und die Abrasivität derartiger Gesteine erheblich vom Feuchtegehalt und eventuellen Gefügeveränderungen durch Trocknungs-/Wiederbefeuchtungsvorgänge beeinflusst werden können (siehe u. a. auch [11], [12], [13], [15], [17]).

Jüngste Untersuchungen [12] haben nachgewiesen, dass für Schwächungen des Gefüges bis hin zum vollständigen Zerfall durch Änderung des Wassergehaltes bereits „gering veränderliche“ Gesteine der Veränderlichkeitsklasse 1 anfällig sein können.

Der Erhalt des natürlichen Wassergehalts bei der Probenahme ist daher für die Klassifizierung und Untersuchung ausschlaggebend. So zeigen z.B. zahlreiche veränderlich feste Gesteine bei natürlichem Wassergehalt kaum eine Reaktion im Wasserlagerungsversuch nach DIN EN 14689-1, reagieren jedoch bereits nach einmaliger Trocknung auf einen erneuten Wasserzutritt mit spontanem Zerfall (Abbildung 6).



Abbildung 6: Beispiel für einen Trocknungs-Befeuchtungs-Versuch an einem Mergelstein. Bei einmaliger Wasserlagerung (a) zeigt das Gestein keine Reaktion, zerbricht jedoch nach 2-maliger Trocknung und Wiederbefeuchtung in Einzelaggregate (b), aus: [12].

Der Grund für dieses Verhalten ist vermutlich in der Ausbildung von Mikrorissen während der Trocknungsphase zu sehen, so dass bei der nachfolgenden Wiederbefeuchtung zusätzliche Wasserwegigkeiten im geschwächten Gestein eine effektive Befeuchtung und nachhaltige Zerstörung des Gesteins ermöglichen. Aufgrund dieser Beobachtungen empfiehlt [12] zur Bestimmung der Veränderlichkeit eines Gesteins sowohl die Prüfung des naturfeuchten Materials als auch eine Untersuchung des Zerfallsverhaltens im Verlauf mehrerer Trocknungs-Befeuchtungs-Wechsel.

Daneben zeigt v.a. die Einaxiale Druckfestigkeit veränderlich fester Gesteine eine deutliche Abhängigkeit vom Wassergehalt, wie die Beispiele in Abbildung 7 zeigen. Im vorliegenden Beispiel wurde an einem kreidzeitlichen Sandmergelstein durch eine gezielte Beeinflussung des natürlichen Wassergehalts („bergfeucht“) einerseits durch schonende Ofentrocknung („getrocknet“) die Druckfestigkeit bei der Prüfung erhöht, andererseits durch Lagerung in destilliertem Wasser über 24 Stunden („wassergelagert“) deutlich verringert.

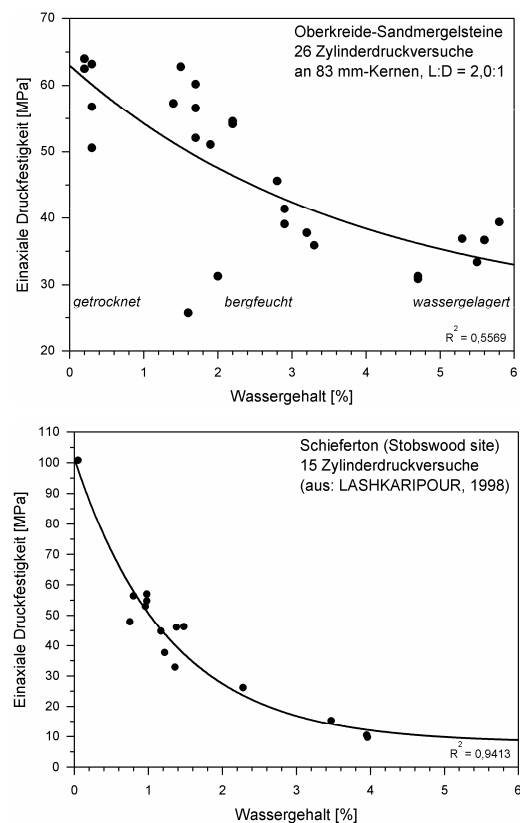


Abbildung 7: Zwei Beispiele für die Abhängigkeit der Einaxialen Druckfestigkeit vom Wassergehalt der Proben; oben: Prüfergebnisse an einem kretazischen Sandmergelstein [15], unten Prüfergebnisse an einem Tonschiefer [11].

Dieser Effekt wurde z.T. bereits bei Gesteinen mit geringer Veränderlichkeit beobachtet [12], zu denen neben den „klassischen“ veränderlich festen Gesteinen auch ursprünglich dauerhaft feste, jedoch angewitterte Gesteinsarten (W1 nach ISRM [10]) zu stellen sind.

Nachstehende Abbildung 8 zeigt, dass der Festigkeitsfaktor F , der das Verhältnis der Einaxialen Druckfestigkeit bei natürlichem Wassergehalt im Vergleich zur Trockenfestigkeit beschreibt, innerhalb der Ton-Schluff-Steine bereits in Veränderlichkeitsklasse VK1 auf max. 75% absinkt. Innerhalb der Sandsteine ist eine Reduzierung der Druckfestigkeit im feuchten Zustand ab Veränderlichkeitsklasse VK2 („langsam veränderlich“) zu beobachten, in der häufig eine Erhöhung des Tongehaltes stattfindet.

Für beide Gesteinsgruppen wurden in [12] Festigkeitsänderungen von bis zu 90 % zwischen getrockneter und bergfeuchter Probe ermittelt, wobei v.a. mäßig veränderliche Gesteine (VK3) eine große Diskrepanz aufweisen.

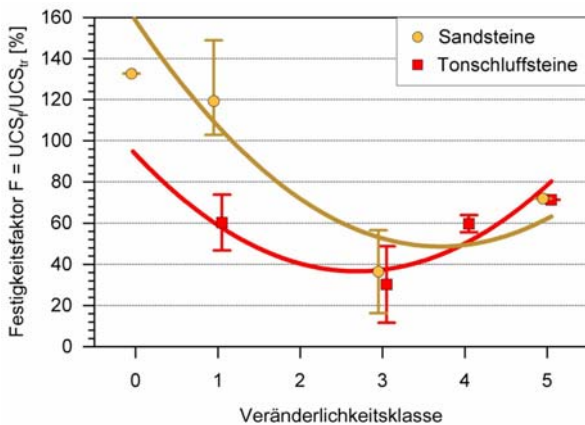


Abbildung 8: Festigkeitsänderung, ausgedrückt durch den Festigkeitsfaktor F , zwischen naturfeuchten und getrockneten veränderlich festen Gesteinen (Sandsteine, Tonschluffsteine).

Bei der Prüfung aller dieser Gesteine würde eine einmalige Austrocknung (z.B. im Zuge der Probenahme) somit zu deutlich höheren Festigkeitswerten als im natürlichen Gebirgsverband führen. Ein mehrmaliger Wechsel aus Trocknung und Wiederbefeuchtung führt hingegen zum sukzessiven Zerfall und somit zu einer Reduzierung der Druckfestigkeit.

Die Einschätzung der Verfasser, dass diesen durchaus relevanten Effekten immer noch keine systematische Beachtung geschenkt wird, wird u. a. auch durch jüngste Erfahrungen in [17] bestätigt, der für die Beprobung veränderlich fester Keupergesteine feststellt: „Der Schutz der Proben vor einer Veränderung des Wassergehalts wird in der Regel vernachlässigt...“ ([17], S. 174).

Um möglichst repräsentative Aussagen über das Gesteinsverhalten und Eigenschaften unter natürlichen Bedingungen zu ermitteln, muss das Ziel einer fachgerechten Probenahme und Probenbehandlung somit sein, den natürlichen Feuchtegehalt des Gesteins nach Möglichkeit zu erhalten sowie Trocknungs-/Wiederbefeuchtungsvorgänge während der gesamten Entnahme-, Transport- und Lagerungskette (siehe Schema der Abbildung 2) zu verhindern oder zumin-

dest zu minimieren. Die Art der Probenahme führt hier erfahrungsgemäß zu unterschiedlichen Einflüssen:

- Bei der Entnahme von **Sonderproben**, also z. B. größervolumiger, bergfeuchter Kluft- oder Haufwerksblöcke ist eine Veränderung des Feuchtegehalts in der Regel nicht zu befürchten, sofern bei darauffolgendem Transport und Formatierung auf eine Erhaltung des natürlichen Wassergehalts geachtet wird.

Hierbei ist allerdings zu bedenken, dass gerade in stärker durchlässigen veränderlich festen Gesteinen (z.B. tonig gebundene Sandsteine, Schluffsteine), die ursprünglich im Grundwasserbereich liegen, eine relativ rasche „Teilaustrocknung“ des gesättigten Material im Zuge einer der Baumaßnahme voraussetzenden Grundwasserabsenkung erfolgen kann [12].

- Vor allem bei mittels **Einfachkernrohr** und mit **Wasserspülung** gebohrten Proben sind dagegen nennenswerte Veränderungen und Trocknungs-/Wiederbefeuchtungsvorgänge v.a. in teilgesättigten Gesteinen der ungesättigten Gebirgsbereiche bereits während der Probenahme zu befürchten. Die Verwendung von Mehrfachkernrohren oder der Einsatz von Luftspülung stellen hier sinnvolle, jedoch extrem kostenintensive Optimierungsmöglichkeiten der Beprobung dar.

Nach Gewinnung der Proben hat sich eine sorgfältige Umhüllung z. B. mit mehrlagiger, selbsthaftender Kunststofffolie oder Alufolie als baustellenpraktikable Methode bewährt. Bei sowieso mit Mehrfachkernrohr und Kunststoff-Inliner gewonnenen Bohrproben verhindern einfache Silikonplomben an beiden Enden des Rohrabchnitts sicher das Austrocknen der Proben (Abbildung 9).



Abbildung 9: Setzen einer Silikonplombe unmittelbar nach Probenauswahl bei einem veränderlich festen Mergelstein, der mittels Mehrfachkernrohr und Kunststoff-Inliner gewonnen wurde.

Mit derartigen Verpackungen kann einer raschen Austrocknung während Transport und Lagerung entgegen gewirkt werden, sie ist aber dennoch kein Ersatz für einen bei solchen Gesteinen notwendigen zügigen

Ablauf von Transport, Probenformatierung und Probenprüfung.

Im Labor selbst sollte eine möglichst schonende Formatierung durchgeführt werden, bei der Wasser als Kühl- und Spülmedium nur äußerst sparsam verwendet werden sollte. Bei einigen Forschungsarbeiten wurden daher in Abweichung zu den üblicherweise verwendeten Zylinderproben z. B. auch vollständig trocken formatierte prismatische Proben [12] verwendet. Dieses Vorgehen stellt aber sicherlich (noch) keinen Standard dar und ist mit zahlreichen technischen Problemen verbunden.

5.3 Beprobung anisotroper Gesteine

Der Begriff der Anisotropie beschreibt das unterschiedliche mechanische Verhalten eines Gesteins in verschiedenen Raumrichtungen.

Besteht Grund zur Annahme, dass anisotrope Eigenschaften in bautechnisch relevanter Größenordnung vorliegen, wird von zahlreichen Versuchsempfehlungen die Untersuchung von Probekörpern mit definierten Orientierungen (üblicherweise rechtwinklig und parallel) hinsichtlich der Strukturelemente vorgeschlagen. Eine Extrapolation dieser Eckdaten aus ausschließlich schiefwinklig geprüften Proben ist aufgrund des gesteinspezifischen Grads anisotroper Effekte nur in Ausnahmesituationen möglich (Abbildung 10). Ziel einer angepassten Probenahme muss also die Gewinnung möglichst ideal orientierter Proben sein.

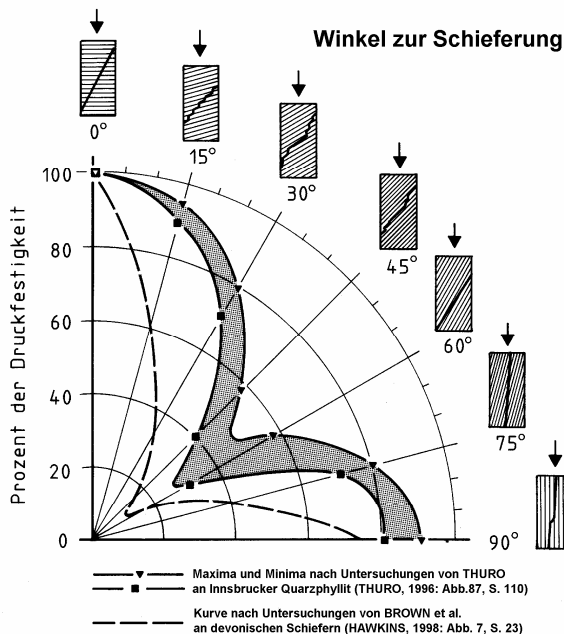


Abbildung 10: Beispiel für die Winkelabhängigkeit und Varianz der Einaxialen Druckfestigkeit bei ausgeprägt anisotropen Gesteinen [15].

Bei Kluft- oder Haufwerksproben ist die Gewinnung eindeutig orientierter Proben in der Regel problemlos möglich, da bei der Formatierung im Labor eine mehr oder minder freie Orientierung des Probekörpers statt-

finden kann und auch die bestimmenden Strukturelemente meist gut über den gesamten Probekörper verfolgbar sind.

In Anlehnung an DIN 52101 ([5], Abs. 7.2.1, S. 5) ist ergänzend zu empfehlen, ausgezeichnete Gefügerichtungen erforderlichenfalls an der Probe zu kennzeichnen, falls diese nicht ohne Weiteres erkennbar sind.

Ist die orientierte Entnahme von Bohrproben bei horizontaler Schichtung/Schieferung technisch noch problemlos möglich (Abbildung 11, links), so stellt die Ausführung von in zwei Raumrichtungen geneigten Schrägbohrungen bei schiefwinkligem Einfallen zum Entnahmeort (Abbildung 11, rechts) eine technische Herausforderung an die Bohrmannschaft dar (Abbildung 12).

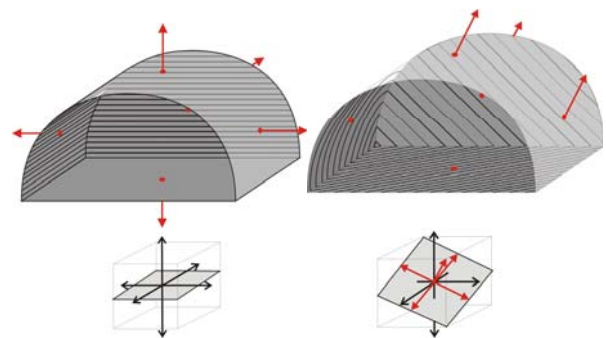


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Probleme bei der Gewinnung definierter orientierter Proben. Mit roten Pfeilen dargestellt mögliche Bohrrichtungen für Proben mit definierter Orientierung zur Schieferung/Schichtung.

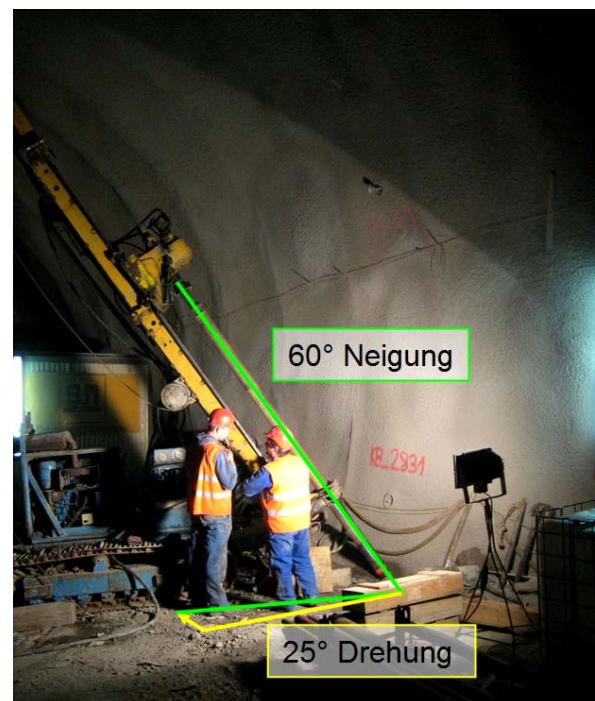


Abbildung 12: Entnahme von orientierten Kernproben in alpinen Molassegesteinen aus einem Tunnel heraus mittels rechtwinklig zur Schichtung ausgerichtetem Mehrfachkernrohr (mit Inliner).

Zusätzliche Probleme ergeben sich, wenn sich die Orientierung der Schichtung/Schieferung im Verlauf des Bohrlochs verändert – derartige Winkeldiskrepanzen sind meist auch durch Überbohren im Labor nicht mehr zu korrigieren.

6 Erfahrungen bei der Entnahme von Sonderproben/Sprenghaufwerk

6.1 Vorgehensweise

Eine Entnahme von „Sonderproben“ in Anlehnung an EC7 T3 ist z. B. in Form von Kluftkörpern in künstlichen oder natürlichen Aufschlüssen (Böschungen, Steinbrüche, Anrisse) meist problemlos möglich.

Auch bei Tunnel- oder Stollenvortrieben bietet sich diese Art der Probenahme dann an, wenn die Gebirgslösung nicht mit mechanischen Verfahren (Teilschnitt, TBM) sondern mit konventionellen Verfahren (Baggervortrieb, Sprengvortrieb) erfolgt. Bei diesen Gebirgslösungsverfahren werden bereits angelegte Trennflächen aktiviert bzw. neue Flächen gebildet, so dass in Abhängigkeit vom Zerlegungsgrad eine Entnahme ausreichend großer Proben aus dem Haufwerk meist bequem möglich ist (Abbildung 13, Abbildung 14).

DIN 52101 [5] gibt hinsichtlich der Entnahmeprozedur brauchbare Hinweise: „Die Probelöcke müssen mindestens 30 cm x 20 cm x 20 cm groß sein. Bei grobkörnigem und großporigem Gestein sind sie entsprechend größer zu wählen. Die Probelöcke sind möglichst vorsichtig zu lösen. Es sollten vorzugsweise Probelöcke aus größeren Gesteinsblöcken entnommen werden, die von der Sprengung wenig beansprucht worden sind. Dabei ist darauf zu achten, dass ... die Probelöcke ... keine vom Lösen herrührenden Haarrisse haben.“ ([5], Abs. 7.2.3, S.5).

Diese Blöcke werden meist als Ganzes zur weiteren Bearbeitung ins Labor transportiert (Abbildung 13). Zur Minimierung des erforderlichen Transportraums können aber insbesondere bei homogen-isotropen und dauerhaft festen Gesteinen noch vor Ort Kerne mittels Betonkernbohrgerät gewonnen werden (Abbildung 14).

6.2 Diskussion der Repräsentativität

Hinweise darauf, dass eine Beprobung von Sprenghaufwerk oder Kluftkörpern zu nicht repräsentativen Ergebnissen führt, finden sich weder in EC7 T3 [2] noch in DIN 52101 [5].

Dennoch wurden bei zahlreichen in der Vergangenheit ausgeführten Tunnelbaumaßnahmen (meist im Zuge der Beweissicherung) eine Vielzahl von Faktoren ins Feld geführt, um Ergebnisse an aus Sprenghaufwerk gewonnenen Proben wahlweise als Maxima, Minima oder Mittelwerte des aufgefahrenen Gebirges zu interpretieren. Ausschlaggebend für die Bewertung ist dabei

nach Auffassung der Autoren meist weniger die Art und der Umfang zu Grunde gelegter geotechnischer Daten als vielmehr die individuellen Zielsetzungen der Projektbeteiligten.



Abbildung 13: Entnahme frischer Tonschieferproben von Zwischendeponie bei einem Sprengvortrieb.



Abbildung 14: Entnahme von Syenit-Bohrproben mit Betonkernbohrgerät aus Haufwerksblöcken eines Sprengvortriebs.

Empirische Erfahrungen mit Sprenghaufwerkbeprobungen werden u. a. von [18] geschildert. Folgende mit der Sprengwirkung zusammenhängende Einflüsse werden dabei angeführt:

1. Die Sprengwirkung führt zu einer tendenziell selektiven Zerlegung des anstehenden Gesteins, d. h. festere, kompaktere Partien bleiben im Sprenghaufwerk eher erhalten (und ergeben für die darauf folgende Probenahme eher geeignete Haufwerksblöcke) als stärker zerlegte oder weniger feste Gebirgsbereiche.
2. Durch die Sprengwirkung werden selbst in makroskopisch rissfreien Haufwerksblöcken Mikrorisse erzeugt, die eine tendenzielle Schwächung der Proben darstellen und damit zu tendenziell niedrigeren Festigkeitswerten führen.

Die Arbeit kommt auf Basis von vergleichenden Untersuchungen zu dem Schluss, dass sich beide Effekte im Mittel gegenseitig aufheben. Bei vergleichenden Untersuchungen lagen „... die Unterschiede immer im Bereich der normalen Streuung der felsmechanischen Kennwerte.“ ([18], S. 46).

Auch eigene Erfahrungen aus Projekten, bei denen beide Probenahmetechniken parallel eingesetzt wurden (Abbildung 15), bestätigen die generelle Vergleichbarkeit von direkt aus dem Anstehenden gebohrten und aus Kluff- oder Haufwerksproben gewonnenen Proben.

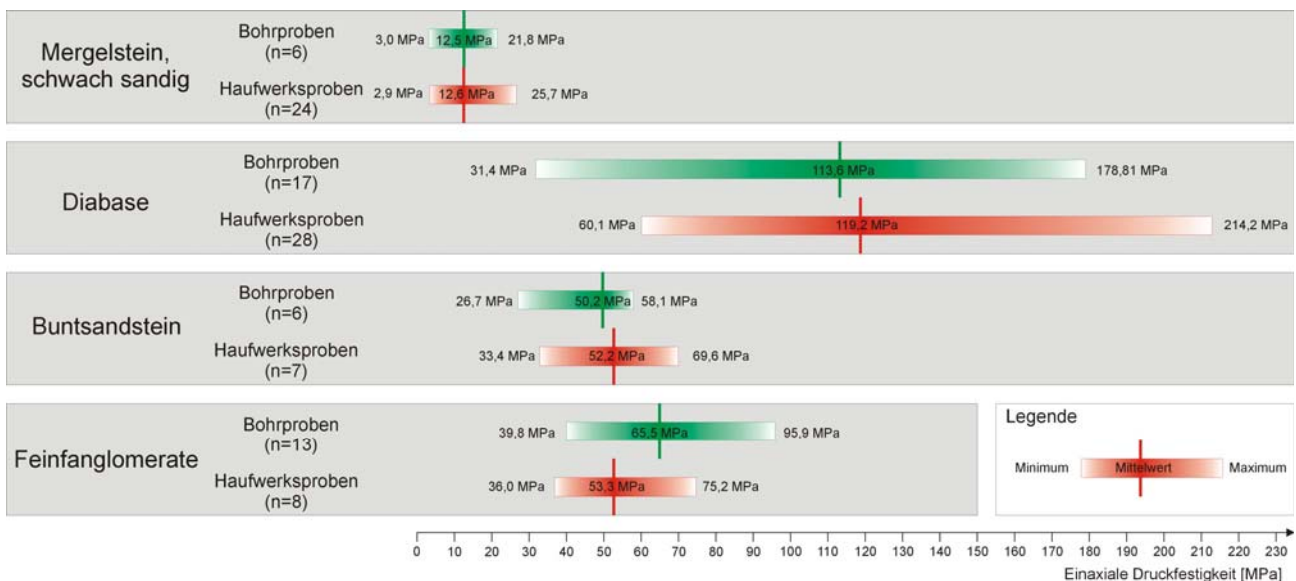


Abbildung 15: Direkter Vergleich einaxialer Gesteinsdruckfestigkeit von aus Haufwerks- und Bohrproben gewonnenen Probekörpern (3 Tunnelprojekte).

Für eine Haufwerksbeprobung sprechen nach [18] (S. 47) neben wirtschaftlichen Aspekten (hohe Rüst- und Personalkosten und evtl. Vortriebsbehinderungen durch Kernbohrungen) unter anderem auch die Tatsache, dass Trennflächen bei Bohrungen im Vorhinein nicht erkennbar sind, so dass die Ausbeute an rissfreien, ausreichend langen Gesteinszylindern tendenziell niedriger ausfällt als bei Haufwerksbeprobungen.

6.3 Umsetzung eines statistischen Prüfplans

Die Umsetzung sog. „statistischer Prüfpläne“ hat zum Ziel, eine mögliche subjektive Beeinflussung der Prüfergebnisse durch den Probenehmer dort wirksam zu minimieren, wo eine freie Wahl von Proben oder Probenahmelokalitäten möglich ist. Eine derartige Vorgehensweise stellt z. B. im Straßenbau bei der Überwachung der Bodenverdichtung ein gängiges Verfahren dar. Grundzüge eines derartigen Verfahrens (Methode „M1“) werden z. B. in den ZTVE-StB 94 [7] dargestellt.

Ziel der Prüfung mittels derartigen Prüfplans ist die Bewertung der Gesamtheit („Prüflos“) mit Hilfe von Stichproben, wobei die Prüfpunkte vor Probenahme nach Zufallsauswahlverfahren zu bestimmen sind. Eine entsprechende beispielhafte Umsetzung für einen Tunnelvortrieb ist in Abbildung 16 dargestellt.

Kennwerte, die auf diese Weise unter Anwendung eines statistischen Verfahrens gewonnen wurden, erheben – sofern andere relevante Einflussfaktoren entsprechend berücksichtigt wurden – einen hohen Anspruch auf Repräsentativität. Die Umsetzung derartiger Vorgehensweisen empfiehlt daher insbesondere für bauvertragsrelevante Beweissicherungsuntersuchungen.

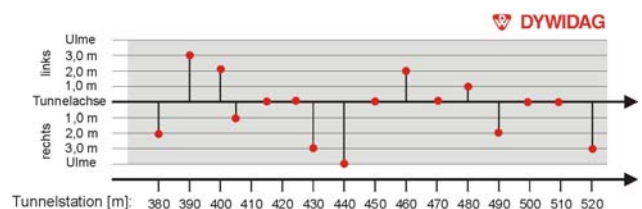


Abbildung 16: Ausschnitt eines vorlaufend erstellten Prüfplans zur Sprenghaufwerksbeprobung mit statistisch ermittelter Angabe der Probekörperentnahme (Station und Lage des Probekörpers bezüglich der Tunnelachse).

7 Fazit

Auf Basis der vorstehend geschilderten Erfahrungen ist in nachstehender Abbildung 17 ein schematisches Flussdiagramm dargestellt, das eine Arbeitshilfe für die Berücksichtigung wesentlicher geotechnischer Aspekte bei Probenahmekampagnen in Festgestein bietet. Das Diagramm kann dabei bei weitem nicht alle Aspekte berücksichtigen, die bei der individuellen Planung einer repräsentativen Beprobung und der damit zusammenhängenden geologisch-geotechnischen Modellbildung eine Rolle spielen.

Die Erarbeitung einer ersten Arbeitshypothese, die Bildung geologischer Homogenbereiche, die Interpretation der schließlich gewonnenen Kennwerte und die Validierung des geologischen Modells werden daher auch in Zukunft Aufgaben darstellen, welche die Fachkompetenz eines erfahrenen Ingenieurgeologen erfordern.

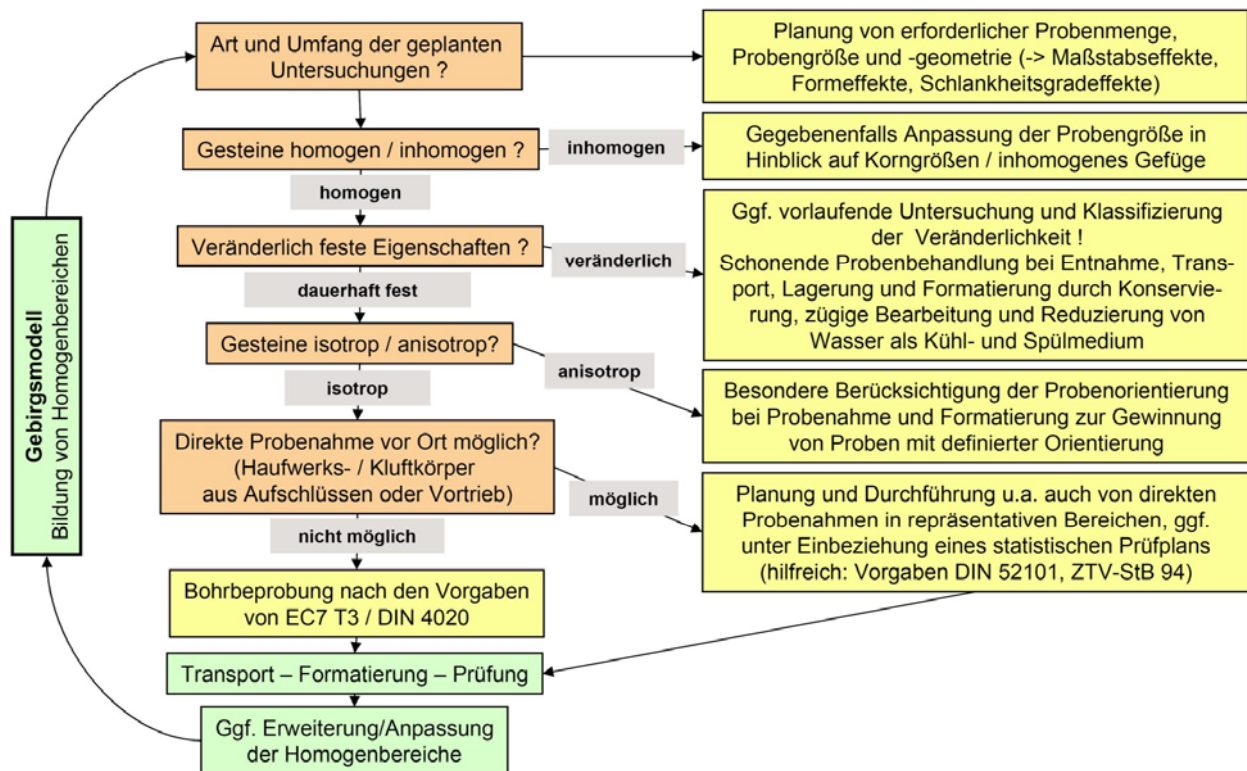


Abbildung 17: Entscheidungshilfe/Flussdiagramm für die angepasste Probenahme von Festgesteinen.

8 Literatur

- [1] 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: 825 - 834.
- [2] DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1999): DIN EN 1997-3: 1999 – Vornorm Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 3: Felduntersuchungen für die geotechnische Bemessung, Deutsche Fassung 1999, 113 S., Berlin (Beuth).
- [3] DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2001): DIN EN 206 - Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000,
- [4] DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2003): DIN 4020 - Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke, 37 S., Berlin (Beuth).
- [5] DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2004): DIN 52101 – Entwurf August 2004: Prüfverfahren für Gesteinskörnungen. Probenahme, Vorgesehen als Ersatz für DIN EN 52101:2002-09, 12 S., Berlin (Beuth).
- [6] DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2004): DIN EN ISO 14689-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels - Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14689-1:2003); Deutsche Fassung EN ISO 14689-1:2003, Berlin (Beuth)
- [7] FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN - ARBEITSGRUPPE ERD- UND GRUNDBAU (1997): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – ZTVE-StB 94, Fassung 1997 (Köln).
- [8] HOEK, E. & BROWN, E.T. (1980): Underground excavations in rock.- Institution of Mining and Metallurgy 527 pages, London (Chapmann & Hall).
- [9] HAWKINS, A.B. (1998): Aspects of rock strength.- Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57: 17-30 (Springer).
- [10] ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978): Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses.- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts, 15, 6: 319-368.
- [11] LASHKARIPOUR, G.R. (1998): The effect of water content on the mechanical behaviour of mudrocks.- in: MOORE, D.P. & HUNGR, O. (eds.): Proceedings 8th International IAEG Congress 1998, Vancouver. Vol. I, Theme 1: New developments in site investigations: 289-305, Rotterdam, Brookfield (Balkema).
- [12] NICKMANN, M. (2007): Abgrenzung und Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten. Diss. TU München, 180 S., 99 Abb., 40 Tab.
- [13] NICKMANN, M., SPAUN, G. & THURO, K. (2005): Untersuchungen zur Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten.- in: MOSER, M. (2005, ed.): Veröffentlichungen v.d. 15. Tagung f. Ingenieurgeologie, Erlangen, 06.-09. April 2005: S. 157-163.
- [14] ÖGG – ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK (2001): Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb.- 30 S., 2 Anhänge.
- [15] PLINNINGER, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein.- Münchner Geologische Hefte, Reihe B, 17, 146 S., 99 Abb., 36 Tab, München (Hieronymus).
- [16] PRINZ (1997) Abriss der Ingenieurgeologie - mit Grundlagen der Boden- und Felsmechanik, des Erd-, Grund- und Tunnelbaus sowie der Abfalldeponien, 3. Aufl. 1997, 560 S., 415 Abb. (Enke)
- [17] SIELER, U. (2005): Keuper als geotechnisches Material.- in: MOSER, M. (2005, ed.): Veröffentlichungen von der 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Erlangen, 06.-09. April 2005: S. 173-177.
- [18] THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb.- Münchner Geologische Hefte, Reihe B, 1, 145 S., 115 Abb., 39 Tab. München (Hieronymus).
- [19] THURO, K., PLINNINGER, R.J., ZÄH, S. & SCHÜTZ, S. (2001): Scale effects in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test. - in: SÄRKKÄ, P. & ELORANTA, P. (eds.): Rock Mechanics – A Challenge for Society, Proceedings ISRM Eurock Symposium 2001, Espoo: 169-174, Lisse (Balkema/Swets & Zeitlinger),
- [20] THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (2001): Scale effects in rock strength properties. Part 2: Point load test and point load strength index. - in: SÄRKKÄ, P. & ELORANTA, P. (eds.): Rock Mechanics - A Challenge for Society, Proceedings ISRM Eurock Symposium 2001, Espoo: 175-180, Lisse (Balkema/Swets & Zeitlinger).