

Geotechnische Aspekte repräsentativer Probenahme von Festgesteinen

Geotechnical aspects of representative hardrock sampling

Ralf J. Plinninger¹ & Thorsten Bruelheide²

Zusammenfassung

Im Labor ermittelte felsmechanische Parameter sind wesentliche Grundlage für die Charakterisierung von Festgesteinen. Der Laboruntersuchung von Festgesteinen kommt daher in der Planungs- und Realisierungsphase von Felshohlraumbauten (Stollen, Tunneln, Kavernen) eine wesentliche Rolle zu. Gerade in Anbetracht einer stets präziser werdenden Messtechnik und aufwändiger Versuchsabläufe ist jedoch 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 den anstehenden Gesteinen und Fragestellungen 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.

Schlüsselworte: Felsbau, Tunnelbau, Festgestein, Festgesteinsprüfung, Probenahme

Abstract

Rock mechanical parameters gained from laboratory investigations are key values for the mechanical description and classification of any hardrock type. Consequently such investigations are of crucial importance in the course of any preliminary site investigation program conducted for infrastructure projects in hardrock conditions. Especially under the aspect of increasing measuring accuracy and increasingly complex hardrock testing methods the fact has to be faced, that the accuracy of the gained parameters is not only connected to the (precisely defined) testing setup and (precisely defined) testing circumstances but in an increasingly manner influenced by the process of sample taking and sample formatting. Especially for non-durable rock types (claystones, siltstones, marl) or anisotropic materials (slates, schist, gneiss) the sampling method, sample orientation or formatting procedure may have a much higher impact on the gained parameters than the testing setup and testing conditions itself. Since unfortunately the field of sampling is not covered by national or international standards or recommendations, terms like “representative” or “competent” sampling remain vague phrases that often underestimate the problems that arise on site. The presented paper resumes lessons learned in many years of rock investigation not by means of geostatistical approaches but by presenting “best practice” methods.

Key words: rock engineering, tunnelling, hardrock, hardrock testing, sampling

¹ Dipl.-Geol. (Univ.) Dr.rer.nat. Ralf J. Plinninger, PG - Dr. Plinninger Geotechnik, Kirchweg 16, D-94505 Bernried, email: geotechnik@plinninger.de

² Dipl.-Geol. (Univ.) Thorsten Bruelheide, DYWIDAG Bau GmbH, Ingenieurbau-Tunnelbau, Mies-van-der-Rohe-Straße 6, D-80807 München, email: Thorsten.Bрюelheide@dywidag.com

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 (Abb. 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, DGEG) Organisationen reglementiert und führen in aller Regel zu reproduzierbaren Messungen.



Abb. 1: Ingenieurgeologe und Tunnel: Der Ermittlung zutreffender ingenieurgeologischer Kennwerte für Planung und Ausführung anspruchsvoller Felsbauwerke kommt mehr denn je eine entscheidende Bedeutung zu.

Fig. 1: Engineering geologist and tunnel: The investigation of representative hardrock parameters in the phases of preliminary site investigation and project realization becomes an increasingly important task in geotechnical engineering.

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 nicht die Behandlung des Problemkreises unter Bezug auf geostatistische Hilfsmittel, sondern vielmehr 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 ENV 1997-3) dargestellt. Aus dem Bereich der Natursteinindustrie werden Vorgaben für die Probenahme in DIN 52101 „Prüfverfahren für Gesteinskörnungen. Probenahme“ (Entwurf August 2004) 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 DGEG in Bearbeitung befindliche Versuchsempfehlungen (z. B. Neufassung Empfehlung 5 „Punktlastversuch“ oder Neufassung Empfehlung Nr. 10 „Spaltzugversuch“) Hinweise für definierte Prüfbedingungen bei anisotropen (d. h. geschichteten oder geschiefernden) Gesteinen 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“ (DIN ENV 1997-3, S. 73).

Die tatsächlichen Anforderungen an Art, Anzahl und Geometrie der Proben erwachsen dabei einerseits aus den rein technischen Anforderungen der weiteren Bearbeitung und Prüfung („Technische Anforderungen, siehe Kap. 3.1) und andererseits aus den geologischen Anforderungen an die Repräsentativität der Ergebnisse (Kap. 3.2, 3.3).

3.1 Technische Anforderungen

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

- Laborgütekasse A – keine oder leichte Störung der Felsstruktur
- Laborgütekasse B – nicht oder leicht gestörte Felsstücke in ansonsten gestörtem Gebirge
- Laborgütekasse 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. PRINZ, 1997).

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 (Abb. 2).

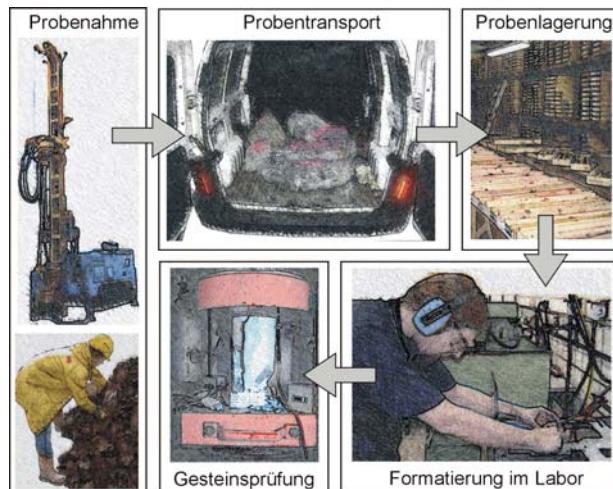


Abb. 2: Schematische Darstellung der Bearbeitungsschritte bei der Prüfung von Festgestein.

Fig. 2: Scheme of the five working steps (sampling – transportation – storage – formatting – testing) in hard-rock investigation.

3.2 Anforderungen an die Repräsentativität

Unter „Repräsentativität“ versteht man in der empirischen Forschung 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 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.“ (Abs. 1, S. 3).

3.3 Umsetzung: „best practice“-Beispiel

Die 2001 in Österreich eingeführte „Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb“ der ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK (ÖGG, 2001) fasst den Stand der Technik zusammen und stellt einen guten Leitfaden für die methodische und technische Bearbeitung von Planungsaufträgen für Untertagebaumaßnahmen zusam-

men. Die Empfehlung gibt u. a. auch Hinweise auf wesentliche bestimmende Gesteins- und Gebirgseigenschaften sowie anwendbare Versuchsverfahren und heranziehbare Fachpublikationen.

Die hieraus entnommene Abb. 3 zeigt eine beispielhafte tabellarische Charakterisierung eines geologischen Homogenbereichs (hier als „Gebirgsart“ bezeichnet).

GA 4			
Lithologie	Kalk-/Dolomitmarmor		
Schieferung/Anisotropie	60 - 20 cm / gering anisotrop		
Kluftkörpergröße	20 - 6 cm		
TF-Beschaffenheit	sf: rau; K: rau, evtl. 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
$\phi [^\circ]$	40,7	4,9	20
E [GPa]	68,3	17,9	23
v [-]	0,19	0,05	23
CAI [-]	1,4	0,4	18
Trennflächenkennwerte			
Reibungswinkel [°]	10-20		
Restreibungswinkel [°]	10-20		
Gebirgskennwerte	Mittelwert	Standardabweichung	
GSI [-]	40	10	
- UCS [MPa]	13,9	4,9	
c [MPa]	3,9	1,3	
$\phi [^\circ]$	30,5	4,5	
E [GPa]	6,2	3,4	

..... schattiert unterlegte Werte sind Schätzwerte

Abb. 3: Beispiel für die zusammenfassende Darstellung der geotechnischen Eigenschaften eines Homogenbereichs („Gebirgsart“), aus: ÖGG-Richtlinie (2001), Tab. B-4.

Fig. 3: Example of a summary of a rock type's relevant geotechnical properties, from: ÖGG recommendation (2001), Tab. B-4.

In Abb. 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, 2001) 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 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 Laborgüteklassen C
- Probenahme durch **Schneiden** zur Gewinnung von Proben der Laborgüteklassen C
- Entnahme von **Sonderproben** der Laborgüteklassen A (z. B. in Versuchsgrube oder Schacht)

Wesentlich ist dabei die im EC7 T3 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.“ (DIN ENV 1997-3, S. 74).

Da in aller Regel für die hier behandelten Versuche Proben der Güteklassen 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 **Bohrbeprobung von der Oberfläche** aus wird ein Mindestmaß an Repräsentativität durch einen den Vorgaben der DIN 4020 genügenden Bohrpunktabstand (für Linienbauwerke z. B. 50-200 m) und die Entnahme von Bohrproben gewährleistet, die hinsichtlich Lithologie, Entnahmetiefe und Abstand zum Bauwerk übertragbare 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.
- 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 (1997) 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 -form

Bereits bei der Planung der Probenahme (Wahl des Bohrdurchmessers) und der Auswahl von Proben (aus Bohrkernen oder Haufwerk) müssen für eine fachgerechte Beprobung Inhomogenitäten und so genannte „Maßstabseffekte“ berücksichtigt werden:

- Bei makroskopisch stark **inhomogenen** Gesteinen (Beispiele: Grauwacke, Konglomerat, porphyrischer Gneis) sollte die auch in DGQT-Empfehlung 1 (2004) dargestellte Faustformel herangezogen werden, nach der der Durchmesser der Probe mindestens dem Zehnfachen des größten Einzelkondurchmessers entsprechen sollte (S. 828, Abs. 2).
- Maßstabseffekte** beschreiben empirisch ermittelte Zusammenhänge zwischen Probendimension und Prüfergebnis. Eine zusammenfassende Diskussion von Maßstabseffekten für den Einaxialen Druckversuch, Spaltzugversuch und Punktlastversuch wird in THURO, PLINNIGER, ZÄH & SCHÜTZ (2001) sowie THURO & PLINNIGER (2001) dargestellt.

Die in Abb. 4 exemplarisch dargestellten Ergebnisse zeigen z. B. einen eindeutigen Einfluss des „Schlankheitsgrads“ (Längen-Durchmesser-Verhältnis) auf die Prüfergebnisse des Einaxialen Druckversuchs.

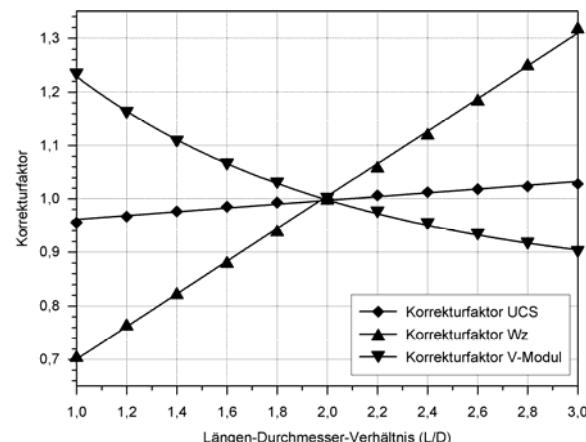


Abb. 4: Abhängigkeit der Einaxialen Gesteinsdruckfestigkeit (UCS), Zerstörungsarbeit (Wz) und Verformungsmodul vom Längen-Durchmesser-Verhältnis gebohrter Zylinder (nach: THURO, PLINNIGER, ZÄH & SCHÜTZ, 2001).

Fig. 4: Example of the influence of the height-diameter ratio on the Unconfined Compressive Strength (UCS), destruction work (Wz) and Young's modulus when testing cylindrical samples (acc. to THURO, PLINNIGER, ZÄH & SCHÜTZ, 2001).

Anders als der Schlankheitsgradeffekt wird der Einfluss der absoluten Probekörpergröße auf das Ergebnis von Festigkeitsprüfungen dagegen kontrovers diskutiert. Zahlreiche Autoren (u. a. HAWKINS, 1998; HOEK & BROWN, 1980) führen Ergebnisse an, die den Schluss zulassen, dass kleinere Proben zu höheren Messergebnissen der Gesteinsdruckfestigkeit führen. In den THURO, PLINNIGER, ZÄH &

SCHÜTZ (2001) zu Grunde liegenden Reihenuntersuchungen an homogen-isotropen Kristallingesteinen konnten derartige, klare Abhängigkeiten in einem üblichen Durchmesserbereich zwischen 45 und 110 mm nicht nachgewiesen werden.

5.2 Beprobung veränderlich fester Gesteine

Bei der Beprobung veränderlich fester Gesteine (z. B. Mergelsteine, Tonsteine, tonig gebundene Sandsteine) sollte berücksichtigt werden, dass die mechanischen Eigenschaften derartiger Gesteine erheblich vom Feuchtegehalt und eventuellen Gefügeveränderungen durch Trocknungs-/Wiederbefeuhtungsvorgänge beeinflusst werden können (siehe u. a. auch LASHKARIPOUR, 1998; PLINNINGER, 2002; SIELER, 2005; NICKMANN, SPAUN & THURO, 2005).

Nachstehende Abb. 5 stellt Beispiele für Messergebnisse der Einaxialen Druckfestigkeit an identischen Gesteinen mit unterschiedlichen Wassergehalten dar. Bei den oben abgebildeten Ergebnissen von kreidezeitlichen Sandmergelsteinen wurde z. B. eine gezielte Beeinflussung des Wassergehalts durch Konservierung („bergfeuchte Proben“) bzw. schonende Ofentrocknung („getrocknete“ Proben) oder Lagerung über 24 h in destilliertem Wasser („wassergelagerte“ Proben) durchgeführt.

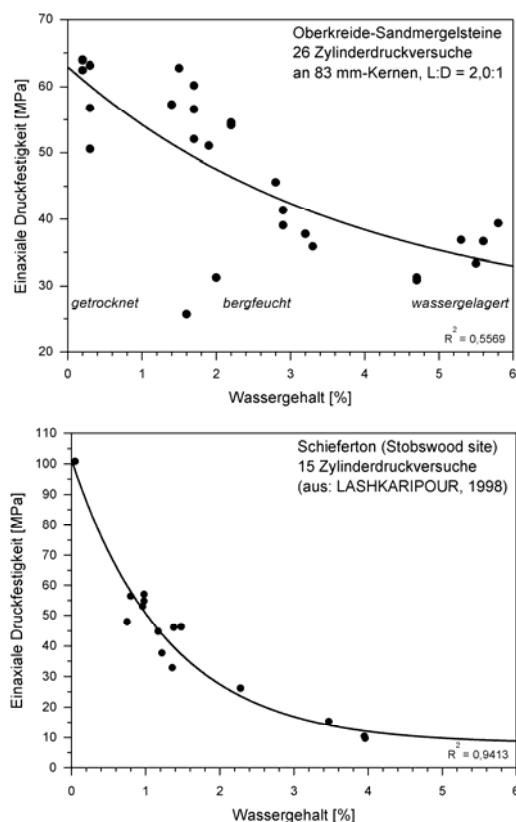


Abb. 5: Zwei Beispiele für die Abhängigkeit der Einaxialen Druckfestigkeit vom Wassergehalt der Proben; oben: Prüfergebnisse an einem kretazischen Sandmergelstein (PLINNINGER, 2002), unten Prüfergebnisse an einem Tonschiefer (LASHKARIPOUR, 1998)

Fig. 5: Two examples of the influence of water content on the Unconfined Compressive Strength of cretaceous sandy marlstone (above; acc. to PLINNINGER, 2002) and slate (below; LASHKARIPOUR, 1998)

Die Einschätzung der Verfasser, dass diesen durchaus relevanten Effekten immer noch keine systematische Beachtung geschenkt wird, wird u. a. auch durch jüngste Erfahrungen von SIELER (2005) bestätigt, der für die Beprobung veränderlich fester Keupergesteine feststellt: „Der Schutz der Proben vor einer Veränderung des Wassergehalts wird in der Regel vernachlässigt...“ (S. 174).

Ziel einer fachgerechten Probenahme und Probenbehandlung muss sein, den natürlichen Feuchtegehalt des Gesteins nach Möglichkeit zu erhalten sowie Trocknungs-/Wiederbefeuhtungsvorgänge während der gesamten Entnahm-, Transport- und Lagerungskette (siehe Schema der Abb. 2) zu verhindern oder zumindest 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 Formatisierung auf eine Erhaltung des natürlichen Wassergehalts geachtet wird.
- Vor allem bei mittels **Einfachkernrohr** und mit **Wasserspülung** gebohrten Proben sind dagegen nennenswerte Veränderungen und Trocknungs-/Wiederbefeuhtungsvorgänge 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. Mit einer derartigen dichten Umhüllung kann einer raschen Austrocknung während Transport und Lagerung entgegengewirkt 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 Formatisierung 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 (NICKMANN, SPAUN & THURO, 2005) 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 Orientierun-

gen (üblicherweise rechtwinklig und parallel) hinsichtlich der Strukturelemente vorgeschlagen. Eine Extrapolation dieser Eckdaten aus ausschließlich schiefwinklig geprüften Proben ist aufgrund des gesteinsspezifischen Grads anisotroper Effekte nur in Ausnahmesituationen möglich (Abb. 6). Ziel einer effektiven Probenahme muss also die Gewinnung möglichst ideal orientierter Proben sein.

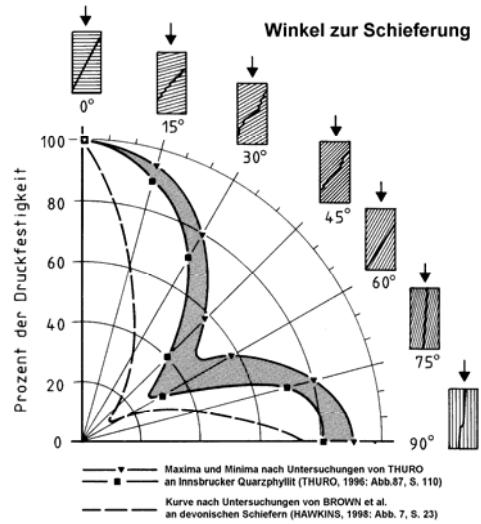


Abb. 6: Beispiel für die Winkelabhängigkeit und Varianz der Einaxialen Druckfestigkeit bei ausgeprägt anisotropen Gesteinen (PLINNINGER, 2002).

Fig. 6: Example of the relationship between the Unconfined Compressive Strength and the angle of foliation for highly anisotropic rock (PLINNINGER, 2002).

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

In Anlehnung an DIN 52101 (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.



Abb. 7: Entnahme von orientierten Kernproben aus Gneisen mittels rechtwinklig zur Schieferung ausgerichtetem Einfachkernrohr (Pumpspeicherwerk Kops II/Österreich). Fig. 7: Core drilling, orientated exactly in a right angle to the foliation of gneiss in order to gain samples with defined orientation (Kops II power plant project/Austria).

Ist die orientierte Entnahme von Bohrproben bei horizontaler Schichtung/Schieferung technisch noch problemlos möglich (Abb. 8, links), so stellt die Ausführung von in zwei Raumrichtungen geneigten Schrägböhrungen bei schiefwinkligem Einfallen zum Entnahmestandort (Abb. 8, rechts) eine technische Herausforderung an die Bohrteamschaft dar (Abb. 7).

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.

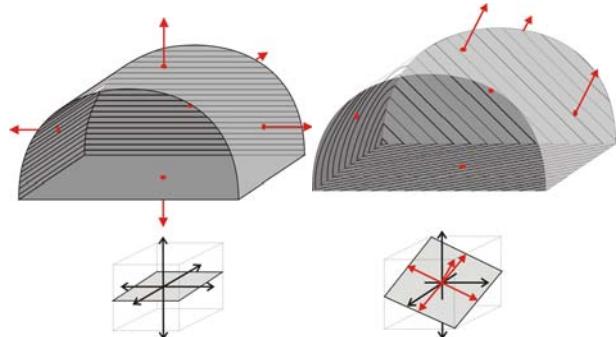


Abb. 8: Schematische Darstellung der Probleme bei der Gewinnung definierter orientierter Proben. Mit roten Pfeilen dargestellt mögliche Bohrrichtungen für Proben mit definierter Orientierung zur Schieferung/Schichtung.

Fig. 8: Scheme of problems arising from sampling orientated samples with core drillings. Red arrows show possible drilling directions, where samples with defined orientation to schist bedding planes may be gained.

6 Erfahrungen bei der Entnahme von Sonderproben/Sprenghaufwerk

6.1 Vorgehen

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 (Teilschnittverfahren, 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 (Abb. 9, Abb. 10).

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

Diese Blöcke werden meist als Ganzes zur weiteren Bearbeitung ins Labor transportiert (Abb. 9). Zur Minimierung des erforderlichen Transportraums können aber insbesondere bei homogen-isotropen und dauerhaft festen Gesteinen noch vor Ort Kerne mittels Betonkernbohrgerät gewonnen werden (Abb. 10).



Abb. 9: Entnahme von frischen Tonschieferproben von Zwischendeponie (Schlossbergtunnel, Dillenburg).
Fig. 9: Sampling of fresh slate from the muck pile (Schlossberg tunnel, Dillenburg/Germany).



Abb. 10: Entnahme von Bohrproben mit Betonkernbohrgerät aus Syenit-Haufwerksblöcken auf Deponie (Tunnel Döhlzschen, Dresden).
Fig. 10: Core sampling from blasted rock debris (syenite) with concrete core drilling device (Döhlzschen tunnel, Dresden/Germany).

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 noch in DIN 52101.

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.

Empirische Erfahrungen mit Sprenghaufwerkbepröbungen werden u. a. von THURO (1996) geschildert. Folgende mit der Sprengwirkung zusammenhängende Einflüsse werden dabei angeführt:

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

THURO (1996) 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.“ (S. 46).

Auch eigene Erfahrungen aus Projekten, bei denen beide Probenahmetechniken parallel eingesetzt wurden (Abb. 11), bestätigen zumindest für isotrope, nicht veränderlich feste Gesteine, wie Diabase, Sandsteine und Fanglomerate, die generelle Vergleichbarkeit von direkt aus dem Anstehenden gebohrten und aus Kluft- oder Haufwerksproben gewonnenen Proben.

Für eine Haufwerksbepröfung sprechen nach THURO (1996, 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 rissefreien, ausreichend langen Gesteinszylindern tendenziell niedriger ausfällt als bei Haufwerksbepröfungen.

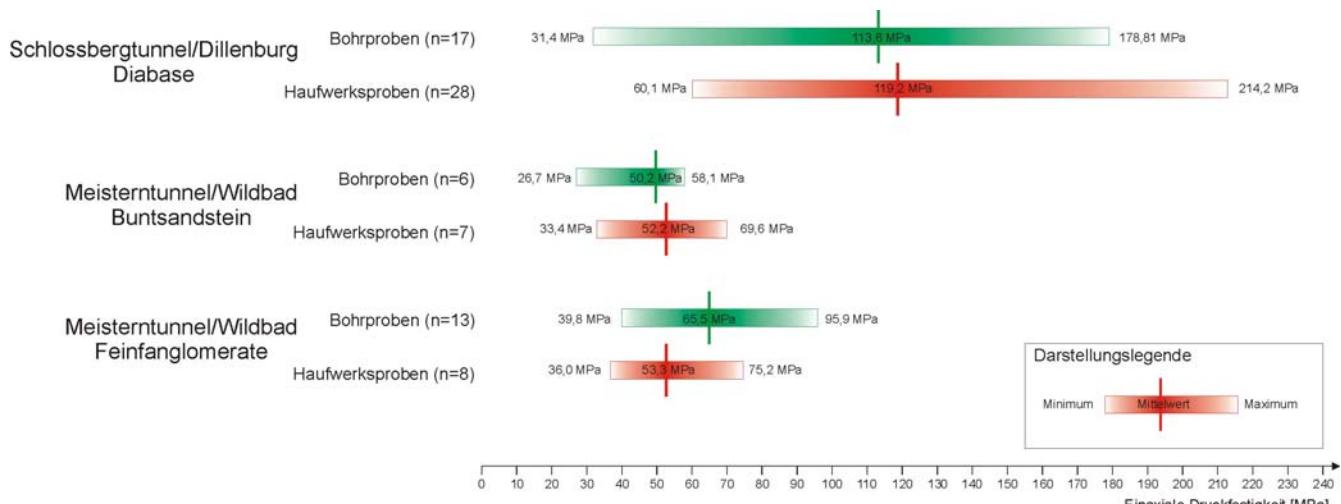


Abb. 11: Direkter Vergleich einaxialer Gesteinsdruckfestigkeit von Diabasen, Sandsteinen und Fanglomeraten an aus Haufwerk (rot) und Bohrproben (grün) gewonnenen Probekörpern.

Fig. 11: Direct comparison of UCS values measured for diabase, sandstone and fanglomerates on muckpile samples (red) and core drillings (green).

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 Probenahmekontrollen 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 der FGSV (1997) dargestellt.

Ziel der Prüfung mittels derartigen Prüfplans ist die Bewertung der Gesamteinheit („Prüflos“) mit Hilfe von Stichproben, wobei die Prüfpunkte vor Probenahme nach Zufallsauswahlverfahren zu bestimmen sind. Eine entsprechende beispielhafte Umsetzung für einen Tunnelvortrieb ist in Abb. 12 dargestellt.

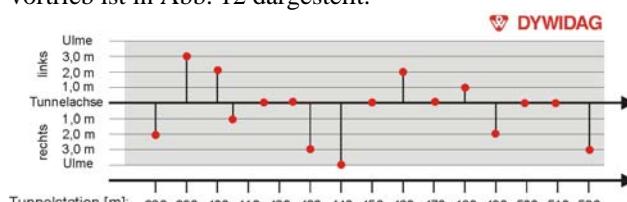


Abb. 12: Ausschnitt eines vorläufig erstellten Prüfplans zur Sprenghaufwerksbeprobung mit statistisch ermittelter Angabe der Probekörperentnahme (Station und Lage des Probekörpers bezüglich der Tunnelachse).

Fig. 12: Example of a statistical sampling schedule, defined prior to sampling. The plan shows the scheduled sampling locations (tunnel meter plus location of block relative to the tunnel axis).

7 Fazit

Auf Basis der vorstehend geschilderten Erfahrungen ist in umseitiger Abb. 13 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

8 Literatur

DGQT e.V. – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2004): Empfehlung Nr. 1

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1999): DIN ENV 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).

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2003): DIN 4020 - Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke, 37 S., Berlin (Beuth).

DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2004): DIN 52101 – Entwurf August 2004: Prüfverfahren für Gesteinskörnungen. Probenahme, Vorgesehen als Ersatz für DIN 52101:2002-09, 12 S., Berlin (Beuth).

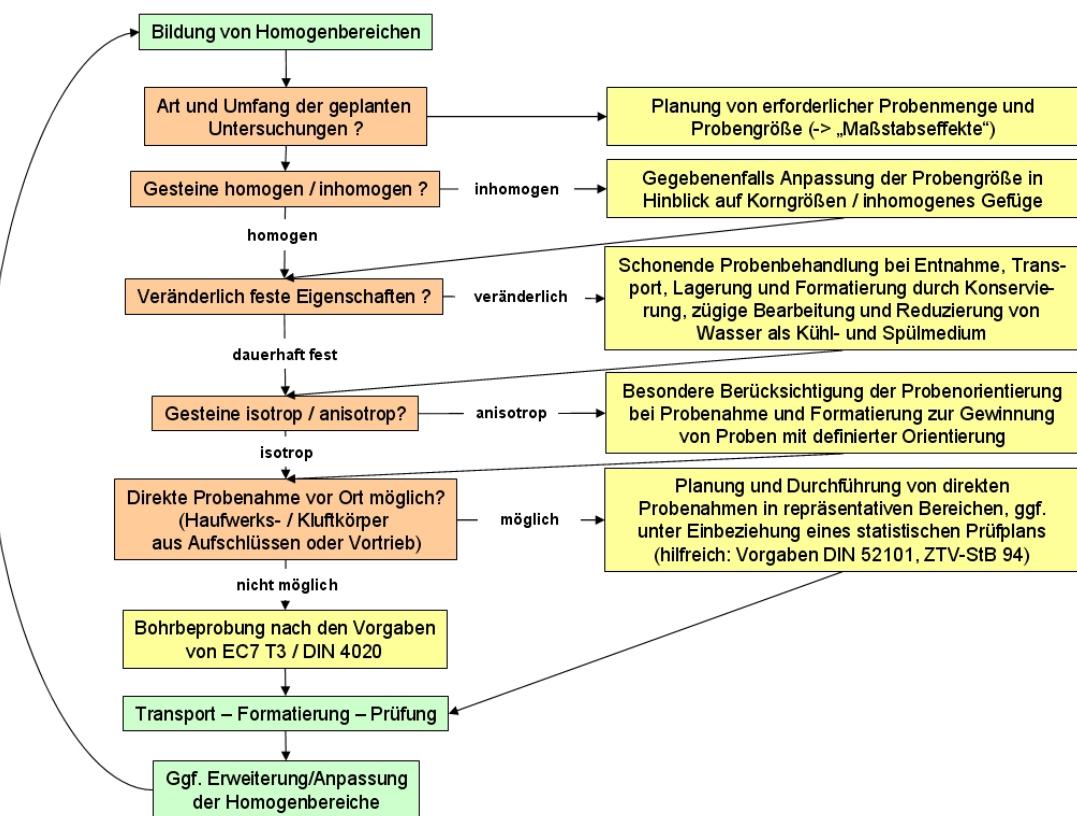


Abb. 13: Entscheidungshilfe/Flussdiagramm für die angepasste Probenahme von Festgesteinen.
 Fig. 13: Geotechnical flow chart for representative sampling of hardrock.

FGSV – FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRÄßen- UND VERKEHRSWESEN - ARBEITSGRUPPE ERD- UND GRUNDBAU (1997): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – ZTVE-StB 94, Fassung 1997 (Köln).

HOEK, E. & BROWN, E.T. (1980): Underground excavations in rock.- Institution of Mining and Metallurgy 527 pages, London (Chapmann & Hall).

HAWKINS, A.B. (1998): Aspects of rock strength.- Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57: 17-30 (Springer).

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, Canada. Vol. I, Theme 1: New developments in site investigations: 289-305, Rotterdam, Brookfield (Balkema).

NICKMANN, M., SPAUN, G. & THURO, K. (2005): Untersuchungen zur Klassifizierung veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten.- in: MOSER, M. (2005, ed.): Veröffentlichungen von der 15. Tagung für Ingenieurgeologie, Erlangen, 06.-09. April 2005: S. 157-163.

ÖGG – ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK (2001): Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten mit zyklischem Vortrieb - Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung.- 30 S, 2 Anhänge.

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

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)

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.

THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb.- Münchener Geologische Hefte, Reihe B, 1, 145 S., 115 Abb., 39 Tab.

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: SÄRKÄ, P. & ELORANTA, P. (eds.): Rock Mechanics – A Challenge for Society. - 881 p., Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001, Espoo, Finland, 4-7 June 2001, Lisse (Balkema/Swets & Zeitlinger), 169-174.

THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (2001): Scale effects in rock strength properties. Part 2: Point load test and point load strength index. - in: SÄRKÄ, P. & ELORANTA, P. (eds.): Rock Mechanics - A Challenge for Society. - 881 p., Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001, Espoo, Finland, 4-7 June 2001, Lisse (Balkema/Swets & Zeitlinger), 175-180.