

Empfehlungen von geotechnisch-felsmechanischen Klassifikationen des Festgesteines und Festgebirges für den Felsbau

Recommendations on geotechnical-rock mechanical classifications of rock and rock masses in
respect of rock works

B. Müller

Geotechnisches Sachverständigenbüro Dr. Ing. habil. B. Müller
- Movement and Blasting Consulting -
Wiesenring 2, D-04159 Leipzig

Zusammenfassung

In dem Beitrag wird nach klarstellender Definition von Begriffen für den Felsbau aufgezeigt, dass folgende gesteintechnisch-physikalische Parameter der Gesteine zur geotechnisch-felsmechanischen Klassifikation geeignet sind:

- akustische Impedanz anstelle der einaxialen Druckfestigkeit
- Porosität
- Wasseraufnahme.

Zwischen diesen Eigenschaften gibt es statistisch gesicherte Zusammenhänge.

Die Kluftabstände, durchschnittliche Kluftkörperkantenlänge bzw. die Häufigkeit der Trennflächen der Festgebirge auf der Abszisse und die akustische Impedanz der Festgesteine auf der Ordinate gestatten aus einem langjährig bewährten Diagramm die Ausbruchfestigkeit unter Tage und die Sprengbarkeit über Tage objektiv einzuordnen. Die Ergänzung der Gebirgsklassifizierung kann durch die Ableitung der Bohrbarkeit aus der Festigkeitseinteilung und Abrasivität der Festgesteine erfolgen.

Abstract

Beginning with necessary clarifications of defining terms according to rock works, this article will focus on the applicability of the geotechnical and physical parameters

- acoustic impedance (in place of compressive strength),
- porosity and
- water absorption

for geotechnical and rock mechanical classifications of rock. These rock properties show statistically proofed interrelations.

The classification is displayed as diagram, where the acoustic impedance on the ordinate represents the rock properties, while joint spacing, average length of rock fragments respectively frequency of joints defines the rock mass along the abscissa. With this, an objective determination of solidity for excavation below ground and blastability above ground is possible.

The rock mass classification may be completed by derivation of drillability and abrasiveness of rock.

1 Einführung

Die zur Zeit gültigen Normen und Klassifikationsangebote für die bautechnische Beurteilung von Festgesteinen (Fels) und Festgebirge führen zu unterschiedlichen sowie widersprüchlichen Auffassungen, die zum einen auf den Felsbaustellen oft zu erheblichen Nachtragsforderungen führen. Zum anderen werden für die verschiedensten felsbaulichen Aufgabenstellungen genaue, naturnahe Parameter sowie Kennzeichnungen der Festgesteine und -gebirge benötigt, die insbesondere für die Erarbeitung von realistischen Berechnungsmodellen und Anwendung moderner Berechnungsverfahren geeignet sind.

Es ist daher das Anliegen dieses Beitrages, auf der Grundlage langjähriger Erfahrungen im Umgang mit gesteinsphysikalischen und felsmechanischen Kennwerten der verschiedensten Festgesteine bzw. -gebirge Zusammenhänge wichtiger Parameter aufzuzeigen sowie diese zur Klassifizierung für verschiedene felsbauliche Fragestellungen zu nutzen. Derartige Einteilungsprinzipien waren bereits Gegenstand früherer Veröffentlichungen und Inhalt eigens bearbeiteter Standards [3, 4, 5, 10, 11, 12, 13]. Diese Klassifikationsvorschläge wurden ständig vervollkommen und weiteren Anforderungen angepasst [1, 9, 14].

2 Begriffe und Definitionen

Im neuen Standard DIN EN ISO 14689-1 (2004) werden eine Reihe von Begriffen aufgeführt, die offenbar durch Übersetzungsfehler oder fachliches Missverständnis zu einer sprachlich, begrifflichen Verwirrung führen können [2]. Es werden deshalb unter Einbeziehung der wichtigsten und grundlegendsten Arbeiten zu dieser Problematik folgende Definitionen und Zusammenhänge zur Diskussion gestellt [1, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 15, 16, 18]:

Gestein (als geologischer Begriff): Gemenge von einem oder mehreren Mineralen mit und ohne organischen Beimengungen bzw. Gesteinsbruchstücken als fester Bestandteil der Erdkruste, der durch geologische Prozesse entstanden ist.

Im Bauwesen und der Geotechnik, die den Erd-, Grund-, Fels- und Tunnelbau sowie die Grundlagen Ingenieurgeologie, Boden- sowie Felsmechanik einschließt, werden die Gesteine wegen ihrer deutlichen Unterschiede im mechanischen Verhalten unterteilt in Lockergesteine (Böden) und Festgesteine (Fels).

Festgestein (Fels) = ein Gemenge miteinander verkitteter oder verwachsener Minerale und/oder Gesteinsbruchstücke mit/ohne organische Beimengungen so fester Bindung, dass mindestens eine einaxiale Druckfestigkeit von 1 MPa gegeben ist bzw. durch Kneten oder Schütteln in Wasser kein Zerfall eintritt.

Lockergestein (Boden) = ein Gemisch von locker gelagertem oder/und aneinanderhaftenden Korngrößen aus Mineralen, Gesteinsteilchen oder/und organischen Beimengungen, welches in Wasser durch Kneten und Schütteln zerfällt.

Festgebirge (Festgesteinsverband) = zusammenhängendes Vorkommen der Festgesteine in der Natur, welches sowohl durch das Vorhandensein von Trennflächen als auch durch die geologisch bedingten Bildungsbedingungen und Lagerungsverhältnisse gekennzeichnet ist.

Lockergebirge (Lockergesteinsverband) = zusammenhängendes Vorkommen der Lockergesteine in der Natur, welches durch die Lagerungsverhältnisse, geologische Bildungsbedingungen und Vorgeschichte geprägt ist.

Gefüge = ist die Ausbildung, räumliche Anordnung sowie die flächenhafte und lineare Orientierung aller Einzelbestandteile der geologischen Kategorien Mineral - Gestein - Gebirge - Geologische Einheit. Die Minerale haben ein Kristallgefüge, die

Gesteine ein Korngefüge, die Gebirge ein Flächengefüge und die regionalgeologische Einheit ein tektonisches Störungsgefüge. Die Gefügemerkmale sind in mechanischer Hinsicht wichtiger als stoffliche Eigenschaften [14, 15].

Korngefüge = Ausbildung, Anordnung sowie Orientierung der Gemengteile eines Gesteines und ist maßgebend zur Benennung.

Diskontinuitäten = alle Verformungs-, Brucherscheinungen, Hohlräume, verborgene Spaltebenen und Risse, die das mechanische Verhalten beeinflussen. Schichtung, Schieferung und mineralische Regelungen sind Diskontinuitäten.

Trennflächen (syn. Klüfte, Rupturen) = sind natürliche Brüche oder Bruchsysteme, entlang derer der Zusammenhalt des Festgesteines aufgehoben ist und die genetisch bedingte gesetzmäßige Raumstellung aufweisen. Brüche parallel zur Schichtung sind Schichtflächen, zur Schieferung Schieferungsflächen sowie entlang von Bewegungsbahnen Störungsflächen.

Trennflächenschar = annähernd parallele Trennflächen einer Richtung und Genese. Die Festgebirge haben in der Regel drei richtungskoordinierte Trennflächenscharen.

Trennflächengefüge = umfasst die Ausbildung, Anordnung, Verteilung und Orientierung der Trennflächen bzw. Kluffkörper eines Homogenbereiches im Festgebirge gleicher Entstehung.

Trennflächenabstand = kürzester Abstand zwischen Trennflächen gleicher Größenordnung und Trennflächenschar.

Trennflächen- oder Kluffkörper = ein Raumteil des Festgebirges bestimmter Form und Größe, der allseitig von Trennflächen begrenzt wird und völlig oder teilweise von benachbarten Kluffkörpern getrennt ist.

Übersicht zu den Klassifikationsvorschlägen und deren Zusammenhänge

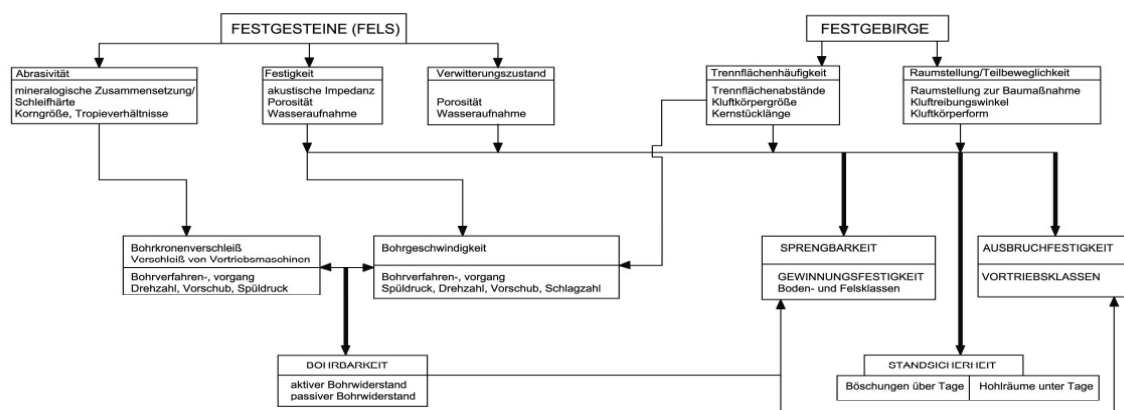


Bild 1: Übersicht zu den Klassifikationsvorschlägen und deren Zusammenhänge.

Fig. 1: Overview of the recommended classification with interrelations.

Diese begrifflichen Inhalte der im weiteren verwendeten Definitionen stellen die Grundlage für die Empfehlungen der einzelnen Klassifikationen dar und dienen zum besseren Verständnis der gefundenen Zusammenhänge mit ihren hierarchischen Strukturen. Im folgenden werden geotechnisch-felsmechanische Klassifikationen für die Kategorien Festgestein (Fels) und Festgebirge erarbeitet, aus denen letztlich die grundlegenden Zusammenhänge und Eigenschaften zur Definition der

- Bohrbarkeit
- Sprengbarkeit über und unter Tage
- Ausbruchfestigkeit/Vortriebsklassen für unterirdische Hohlräume

abgeleitet werden können (Bild 1). Hierzu werden ausschließlich eindeutig beschreibbare und messtechnisch erfassbare, weitestgehend naturgegebene Parameter verwendet, die ihrerseits untereinander deutliche Abhängigkeiten aufweisen. Auf empirische Faktoren, Koeffizienten, Indexgrößen oder physikalisch-geotechnisch nicht eindeutig erklärbare, subjektive Bewertungen von Festgestein und Festgebirge wird bewusst verzichtet.

3 Zusammenhänge gesteintechnischer und -physikalischer Kennwerte von Gesteinen

Es ist bekannt, dass es zwischen verschiedenen gesteintechnischen und -physikalischen Parametern statistisch gesicherte Abhängigkeiten gibt, mit denen verschiedene Einteilungsprinzipien beispielsweise für den Verwitterungszustand abgeleitet wurden [u. a. 4, 11, 12, 14, 17, 19, 21]. Im Bild 2 werden die grundlegenden Zusammenhänge der Rohdichte und der Wasseraufnahme deutlich. Aus den verschiedenen Festgebirgen, die aus vulkanischen Gesteinen aufgebaut sind, wurden an jeweils gleichen Proben sowohl die richtungsunabhängigen Größen Rohdichte als auch die Wasseraufnahme bestimmt.

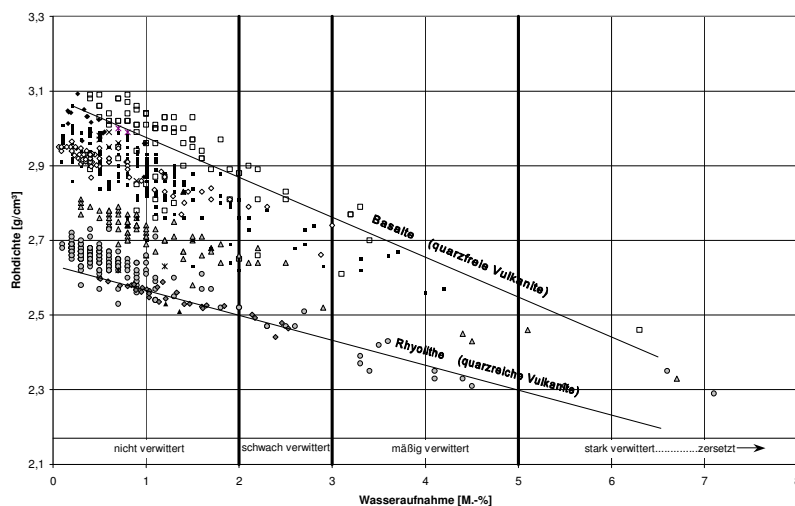


Bild 2: Beziehung zwischen den Rohdichten und Wasseraufnahmen von sauren - intermediären - bis basischen Vulkaniten mit einer Empfehlung zur quantitativen Einstufung des Verwitterungszustandes.

Fig. 2: Interrelation of gross density and water absorption of acid, intermediate and basic volcanic rocks including a quantitative scaling of decomposition [after].

Die Ergebnisse aus 11 Festgebirgen weisen gesichert nach, dass diese einfachen gesteinsphysikalischen Parameter zur Beurteilung der Qualität und des Verwitterungszustandes geeignet sind. Nur aus dem Vergleich der Rohdichte und Wasseraufnahme zwischen nicht verwittert und dem verwitterten Gestein kann der eigentliche Verwitterungszustand recht überschaubar zugeordnet werden. Die Verwitterungszustände sind gemäß Bild 2 mit der Größe der Wasseraufnahme zu bestimmen [4, 11, 12, 14, 19]. Bei einer Wasseraufnahme von weit mehr als 5 M.-% beginnt je nach Gesteinsbeschaffenheit

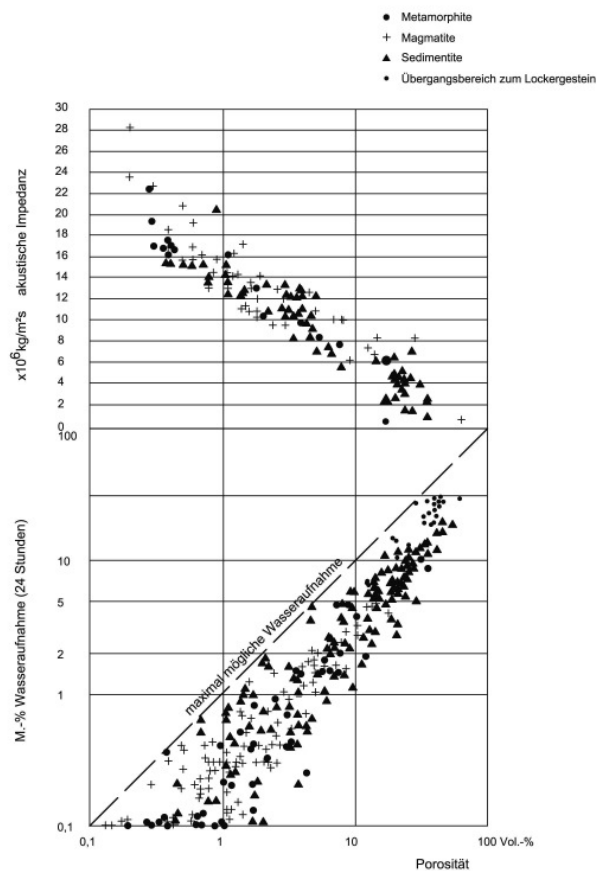


Bild 3: Zusammenhang zwischen Porosität (Vol.-%), Wasseraufnahme (M.-% nach 24 Stunden Wasserlagerung) und akustischer Impedanz ($10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$) [aus 11].

Fig. 3: Relation of porosity (% by volume), water absorption (% by mass after 24 h) and acoustic impedance ($10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$) [after 11].

der Übergang zum Lockergestein. Der Verwitterungszustand „zerstört“ kennzeichnet ein zu Lockergestein zerfallenes Festgestein mit den bekannten bodenmechanischen Eigenschaften (Bild 3, unterer Teil). Die gesteinsphysikalische Größe der Porosität bedingt zwangsläufig die mögliche Wasseraufnahme, die ihrerseits nicht größer als die Porosität des Gesteins sein kann. Im oberen Bereich von > 10 M.-% Wasseraufnahme findet sich der Übergang vom Fest- zum Lockergestein. Zur Kennzeichnung der Festigkeit von Gesteinen wird weltweit vorwiegend die einaxiale Druckfestigkeit verwendet. Diese richtungsabhängige Größe hängt von den Versuchsbedingungen ab wie [1, 11, 15, 17]:

- Größe und Schlankheitsgrad der Prüfkörper (Bild 4)
- Beschaffenheit der Endflächen und Lastverteilung
- Belastungsgeschwindigkeit
- Orientierung der Prüfkörper zum Korn- und Trennflächengefüge
- Vorbehandlung der Prüfkörper (trocken, nass, gefrostet ...)

Diese und weitere Nachteile sollten trotz der Beliebtheit dieses Kennwertes nicht übersehen werden:

- bei der Bestimmung der Druckfestigkeit können mehr als 50 % Fehler entstehen
- durch die Zerstörung der Probe bei der Bestimmung des Wertes lassen sich mögliche Prüffehler nicht durch Wiederholungen korrigieren
- die Größe der Druckfestigkeit eignet sich infolge der definierten Prüfbedingungen nur indirekt zur Beurteilung anderer geotechnischer Fragestellungen, weil die Belastungsbedingungen des Zerstörungsprozesses anders geartet sind als beispielsweise beim Bohren oder Sprengen in Festgebirgen

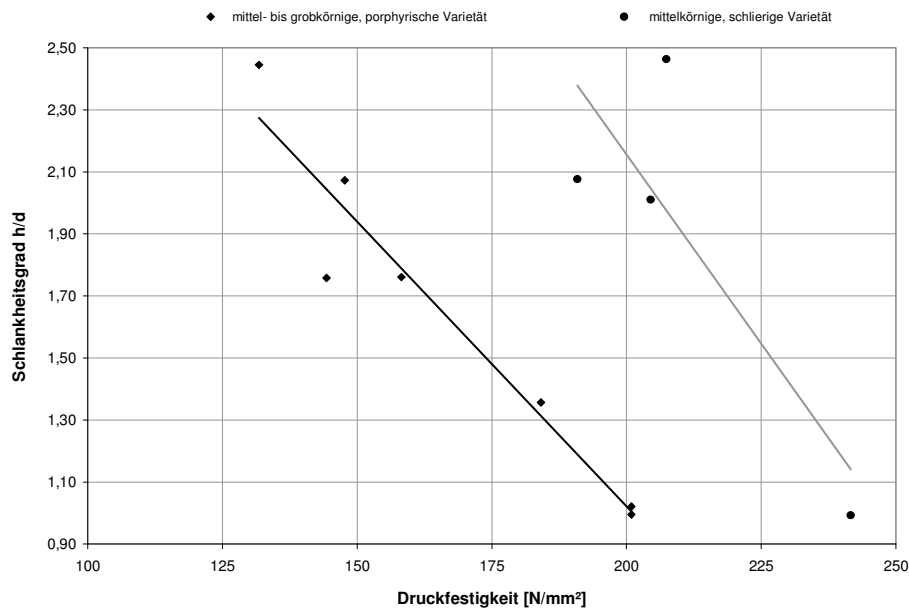


Bild 4: Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit eines Monzogranites vom Schlankheitsgrad des Prüfkörpers und der Korngefügeausbildung innerhalb einer Felsbaustelle.

Fig. 4: Dependence of compressive strength on test piece thickness ratio and grain structure. Monzo-granite specimen gained from a single engineering site.

Die im Bild 4 am Beispiel eines Monzogranites dargestellte Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit vom Schlankheitsgrad und dem Korngefüge verdeutlicht die Unsicherheiten, die dieser Kennwert beinhalten kann.

Bei der Beurteilung der einaxialen Druckfestigkeit von Festgesteinen ist es somit zwingend erforderlich, die wesentlichsten Prüfbedingungen der Versuchsdurchführung, die vorhandenen Gefügemerkmale und die Prüfkörperbehandlung zu beschreiben sowie aktenkundig zu dokumentieren. Ansonsten können die Festigkeitswerte untereinander nicht verglichen oder für weitere geotechnische Fragestellungen verwendet werden.

Um diesen vielen Einflüssen, Fehlerquellen und der Unbrauchbarkeit der Druckfestigkeit für bestimmte geotechnische Problemstellungen zu entgehen, wurde seit langem vorgeschlagen, die akustische Impedanz - Produkt aus Rohdichte und Ultraschallwellengeschwindigkeit einer Gesteinsprobe - als zerstörungsfreier Festigkeitskennwert einer allgemeingültigen Klassifikation zugrunde zu legen (Bild 3 - oberes Diagramm). Die akustische Impedanz zeigt einen statistisch gesicherten Zusammenhang zur Porosität (Korrelationskoeffizient = 88 %) für alle Gesteine gleich welcher Entstehung. Über die Porosität oder/und Wasseraufnahme kann nach Bild 3 die akustische Impedanz wegen der gesicherten Zusammenhänge abgeschätzt werden [11]. Das Diagramm des Bildes 5 verdeutlicht, dass man mit dem Parameter akustischer Impedanz ohne weiteres den Übergang vom Fest- zum Lockergestein markieren kann [11, 21].

Aus der akustischen Impedanz bzw. deren Eingangswerte Ultraschallgeschwindigkeit sowie Rohdichte lässt sich für die Beurteilung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens vom Festgebirge sowie für die Anwendung moderner felsmechanischer Berechnungsverfahren der wichtige dynamische Elastizitätsmodul berechnen [8].

Die einaxiale Druckfestigkeit weist infolge der verfügbaren, nicht am gleichen Prüfkörper bestimmten, durch die genannten Einflüsse breit streuenden Werte einen nur tendenziellen Zusammenhang zur akustischen Impedanz auf (Bild 6). An anderer Stelle wurden eindeutige Beziehungen zwischen der einaxialen Druckfestigkeit und der akustischen Impedanz nachgewiesen, so dass der letztere Parameter zur Klassifizierung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens für Festgesteine gut geeignet ist [3, 4, 8, 9, 11, 12, 14, 19] (Bild 10).

Die Ermittlung der akustischen Impedanz hat den großen Vorteil der zerstörungsfreien Prüfung und kann auf einfache Weise mehrfach sowie statistisch gesichert unter definierten Bedingungen bestimmt werden. Die Eingangsparmeter sind für viele moderne Berechnungsverfahren im Felsbau nutzbar [8, 9, 11, 16, 19].

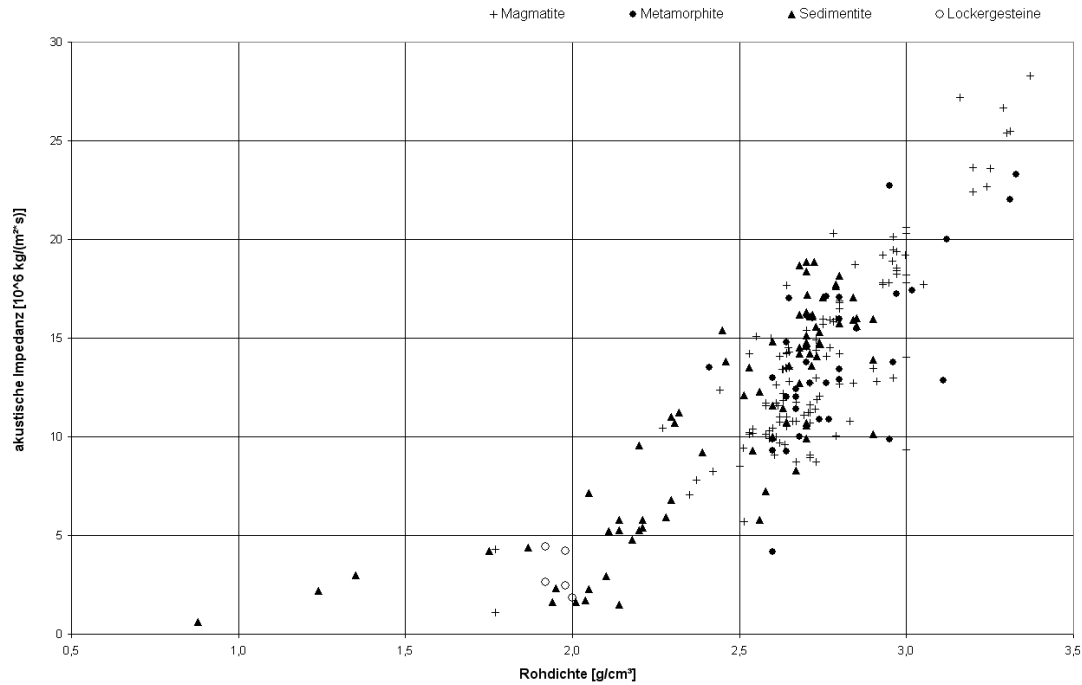


Bild 5: Verteilung der Kennwerte akustischer Impedanz und Rohdichte für die wichtigsten Gesteine.
Fig. 5: Distribution of gross density and acoustic impedance of important rock types..

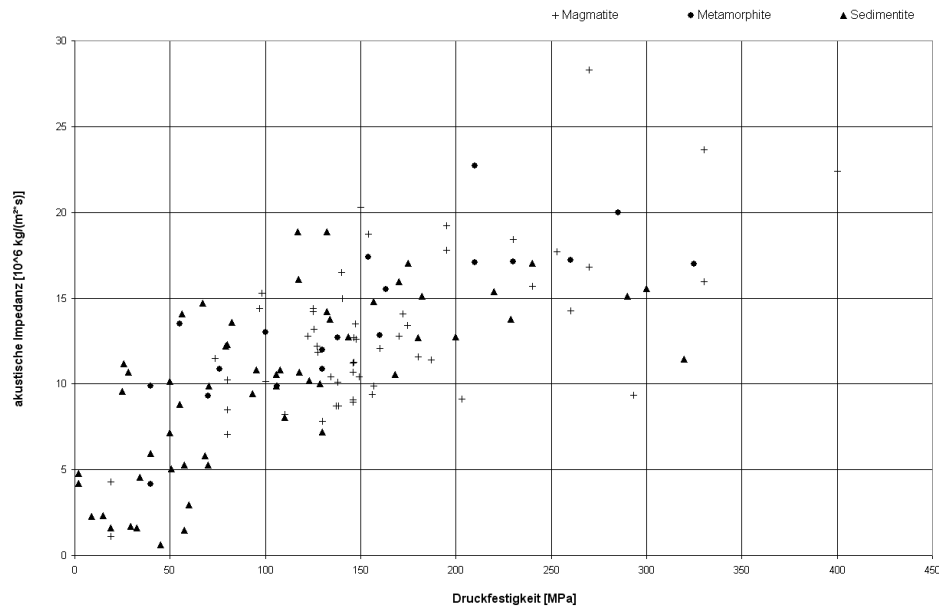


Bild 6: Breit streuende Beziehung der akustischen Impedanz zur einaxialen Druckfestigkeit der wichtigsten Festgesteine.
Fig. 6: Broadly scattered relation of acoustic impedance and compressive strength of important rock types.

Nach den Empfehlungen zur bautechnischen Kennzeichnung der Festgesteine reduziert sich die Zuordnung der geotechnisch bedeutsamen Eigenschaften auf die Parameter

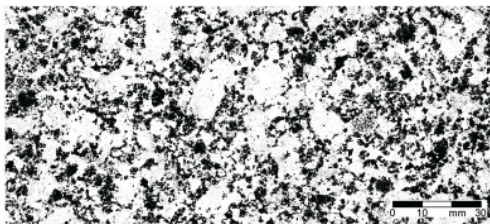
- Rohdichte
 - Wasseraufnahme
 - Porosität
- } als richtungsunabhängige Kennwerte
-
- akustische Impedanz
 - Ultraschallwellengeschwindigkeit
- } als richtungs- und spannungsabhängige Kennwerte

mit denen die Festigkeit, der Verwitterungszustand und weitere geotechnische Einstufungen möglich sind (Bilder 1, 2, 3 und 10).

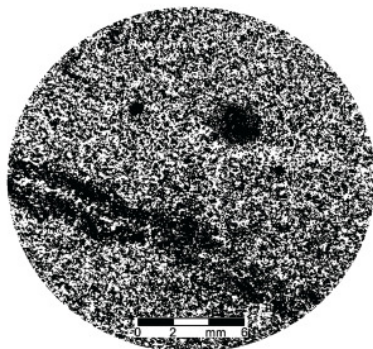
4 Ermittlung der Abrasivität von Festgesteinen

Für die Beurteilung des Verschleißes von Bohrkronen, Tunnelbohrmaschinen und anderer Werkzeuge zur Gesteinsbearbeitung ist es erforderlich, andere Eigenschaften für die Kennzeichnung der Abrasivität von Festgesteinen heranzuziehen. Seit vielen Jahren wird zwischen einem aktiven und passiven Bohr-, Vortriebs- oder Schneidwiderstand unterschieden [9, 11, 22]. Der aktive Widerstand der einem Bohr-, Schneid- oder Schleifwerkzeug entgegenwirkt wird durch die Abrasivität eines Gesteines beeinflusst, die insbesondere von der mineralogischen Zusammensetzung und dem Korngefüge bestimmt wird. Der aktive Widerstand aus Festgestein gegen ein angreifendes Werkzeug lässt sich als Verschleiß desselben erkennen und verringert dessen Wirkung. Der passive Widerstand des Gesteins kennzeichnet die Höhe des Energieaufwandes, die zum Lösen der Gesteinsteilchen durch das Werkzeug unmittelbar aufgebracht wird und mit dem Festigkeitsverhalten des Festgesteines und -gebirges

Beispiel von Lackfilmbzügen silikatischer Gesteine



Granit (sw-aufbereitet)



Basalt (sw-aufbereitet)

Bild 7: Beispiel von Lackfilmbzügen silikatischer Gesteine oben: Abzugeines mittelkörnigen Granodiorites; Quarzteilgefüge = schwarz unten: Abzug eines Olivin-Basaltes; Pyroxen- teilgefüge/Olivine = schwarz.

Fig. 7: Example of lacquer reprints of siliceous rocks: up: medium grained granodiorite; quartz texture (= black) below: olivine-basalt; pyroxene texture/olivine (= black).

in Verbindung gebracht werden muss [18, 19, 22]. Die Abrasivität eines Festgesteines ist der Widerstand gegen ein schleifendes, sägendes oder/und bohrendes Werkzeug, die als spezifische Arbeit in kNm/cm^3 angegeben wird.

Als Maß für die Abrasivität der Minerale hat sich die Schleifhärte nach ROSIWAL seit Jahrzehnten als Kenngröße bewährt [20]. Nach den Untersuchungen von TERTSCH [23] hängen die Ätzbarkeit und die Schleifhärte von Mineralen eng zusammen. Ätzt man eine polierte Gesteinsoberfläche mit einer entsprechenden Säure in einer definierten Zeiteinheit an, so lassen sich weniger schleifharte von deutlich schleifharten Mineralen unterscheiden. Das Bild 7 zeigt einen Granit (oberer Teil), dessen Quarzteilgefüge sich als schwarze Kornhaufen verschiedener Korngröße abhebt und einen Basalt (unterer Teil), bei dem sich der schwarzkörnige Olivin- und Pyroxenanteil gegenüber dem weißen Plagioklasanteil scharf abbildet.

Weniger schleifharte Minerale werden stark geätzt, harte halten dagegen länger ihre Politur und werden kaum verändert. Auf diese Weise werden auch die einzelnen Mineralkörner und das Korngefüge regelrecht herauspräpariert. Das Korngefüge kann in feinste Korngrößen aufgelöst und quantitativ statistisch, mit hoher Genauigkeit ausgewertet werden. Die geätzte Fläche selbst muss zur quantitativen Bewertung abgebildet werden. Dazu hat sich die sogenannte Lackfilmmethode von E. VOIGT (1936) und H. J. BEHR (1966) [in 11] angeboten (vergleiche Bild 7). Der auf die geätzte Gesteinsoberfläche in mehreren dünnen Schichten aufgebraachte Lackfilm wird nach dem Trocknen abgezogen und kann wie ein Negativ fototechnisch behandelt oder gescannt werden. Das Bild 7 enthält gescannte Lackfilmabzüge, die mit einer herkömmlichen Foto-Software bearbeitet sind.

Die Abrasivität A wird in Auswertung der Korngefügebilder wie folgt berechnet:

$$A = S_G + \frac{T_{H1} + T_{H2}}{2} \text{ [kNm/cm}^3\text{]}$$

Es bedeuten:

- S_G = Schleifhärte Gestein = \sum %-Anteil Minerale x Schleifhärte ROSIWAL
 T_{H1} = max. Anteil des schleifhärtesten Mineralen x Schleifhärte minus min. Anteil des schleifhärtesten Mineralen x Schleifhärte (Tropieverhältnis schleifhartes Material)
 T_{H2} = durchschnittlicher Anteil des schleifhärtesten Mineralen x Schleifhärte minus durchschnittlicher Anteil des folgenden schleifharten Mineralen x Schleifhärte

In der Tabelle 1 ist ein Klassifikationsvorschlag der Abrasivität aus Untersuchungen von mehr als 150 verschiedenen Festgesteinen zusammengestellt.

Tabelle 1: Die Abrasivität von Festgesteinen der Natursteine - Klassifikationsvorschlag -

Klassifikationsstufe	Festgesteine (Beispiele)	Abrasivität [$\text{kNm/cm}^3 \cdot 10^4$]
extrem schleifhart	sehr quarzreiche, grobkörnige (mit Netzgefüge) Granite, grobkörnige, granitführende Gneise, Quarzite, grobkörnige Granitgneise, Gneise, grobkörnige Granite	≥ 36
stark schleifhart	gleichkörnige, mittelkörnige Granite, feinkörnige Granitgneise, Konglomerate	32 - 36
mäßig schleifhart	Granodiorite, feinkörnige – schlierige Granite; wenig grob- bzw. ungleichkörnige Dolorite und Basite	24 - 32
gering schleifhart	Granitporphyre, Rhyolithe, Quarzporphyre; feinkörnige Dolorite, Gabbros, Norite, Diorite; Schiefer, Fruchtschiefer, Sandsteine (quarzitisch)	14 - 24
sehr gering schleifhart	Sandsteine, Tuffe, Pikrite, Basalte, Labradorite, Larwikite; Dolomitmarmore, unreine silikatische Kalksteine und Marmore	4 - 14
extrem gering schleifhart	Kalzitmarmore, Hartkalksteine ($3 - 4 \text{ kNm/cm}^3$); Muschelkalke, Travertine, oolithische Kalke usw. ($< 3 \text{ kNm/cm}^3$)	< 4

Der tendenzielle Zusammenhang zwischen der auf den Quarz bezogenen Größe von T_{H1} und der durchschnittlichen Korngröße von Quarz in Bild 8 zeigt, dass die Korngefügeausbildung und Tropieverhältnisse der Teilgefüge einen Einfluss auf die Abrasivität haben. Letztlich wird mit dem Bild 9 vermittelt, dass die Größe der Abrasivität von Festgesteinen mit der Abriebfestigkeit korreliert und somit eine brauchbare, objektive Beurteilung der Bohrbarkeit, Schleifbarkeit und des Schneidens von Naturstein hinsichtlich des Verschleißes der Werkzeuge gestattet (Bild 1).

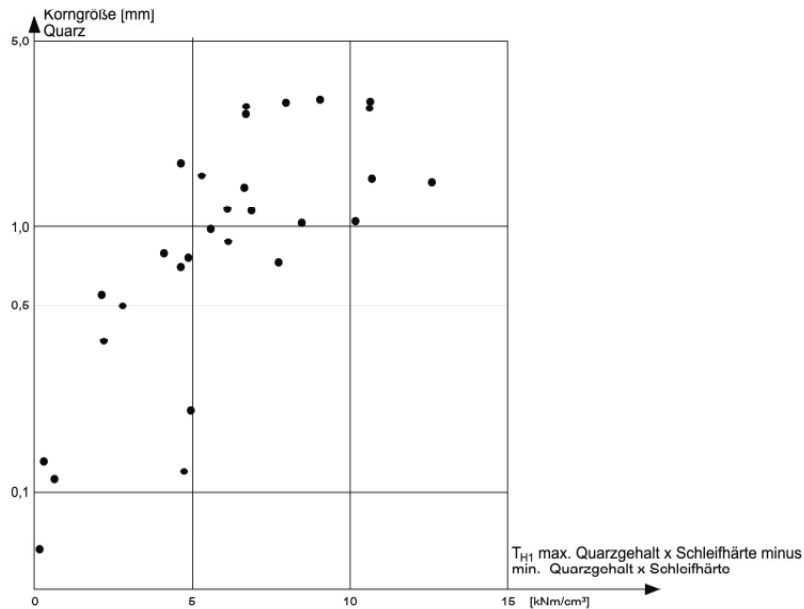


Bild 8: Einfluss der durchschnittlichen Korngröße von Quarz auf den Wert
(maximaler Quarzgehalt x Schleifhärte ROSIWAL) - minimaler Quarzgehalt x Schleifhärte ROSIWAL

Fig. 8: Influence of quartz grain size on
(*max. quartzfraction · grinding hardness ROSIWAL*) - (*min. quartz fraction · grinding hardness ROSIWAL*).

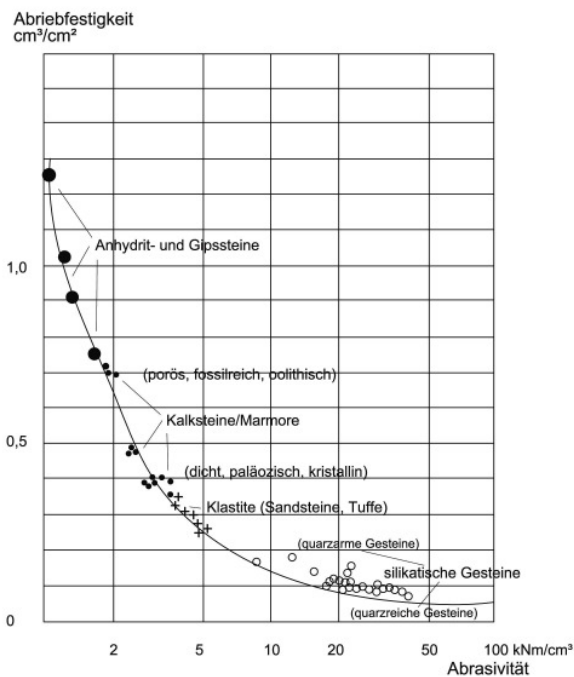


Bild 9: Zusammenhang zwischen Abriebfestigkeit (cm^3/cm^2) und der Abrasivität (kNm/cm^3) der wichtigsten Festgesteine.

Fig. 9: Dependence of abrasion resistance (cm^3/cm^2) and abrasiveness (kNm/cm^3) of important rock types.

5 Vorschlag einer komplexen geotechnisch-felsmechanischen Klassifikation des Festgebirges

L. MÜLLER (1963) stellte in seinem grundlegenden Werk „Felsbau“ fest, dass die Trennflächen das Hauptmerkmal des Festgebirges sind. Es wurde in zahlreichen Arbeiten nachgewiesen, dass die Trennflächenhäufigkeit bzw. Kluftkörpergröße und deren Verteilungen im Festgebirge neben der bedeutsamen Gesteinseigenschaft akustische Impedanz die wesentlichsten Einflussgrößen für geotechnisch-felsmechanische Fragestellungen sind [1, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 19]. In diesem Zusammenhang konnte bei festigkeitsmechanischen Untersuchungen zur Trennflächenhäufigkeit aufgezeigt werden, dass mit fallender akustischer Impedanz der Festgesteine die Bruchbildung abnimmt bzw. die Kluftabstände erheblich größer werden. Schallweiche Gebirge wie beispielsweise die Sandsteine der Sächsischen Schweiz brechen weniger häufig, d. h. die Kluftabstände sind äußerst groß oder auf Dichtkluftzonen beschränkt. In schallharten Festgebirgen mit spröden Gesteinen sind die primären Trennflächen häufiger und engständiger [11, 14].

Somit bilden die voneinander abhängigen Gesteins- und Gebirgsparameter

- akustische Impedanz
- Trennflächenabstand/Kluftkörpergröße

die optimale Grundlage zur Klassifikation der Fest- und Lockergebirge für geotechnisch-felsmechanische Zwecke (Bild 10).

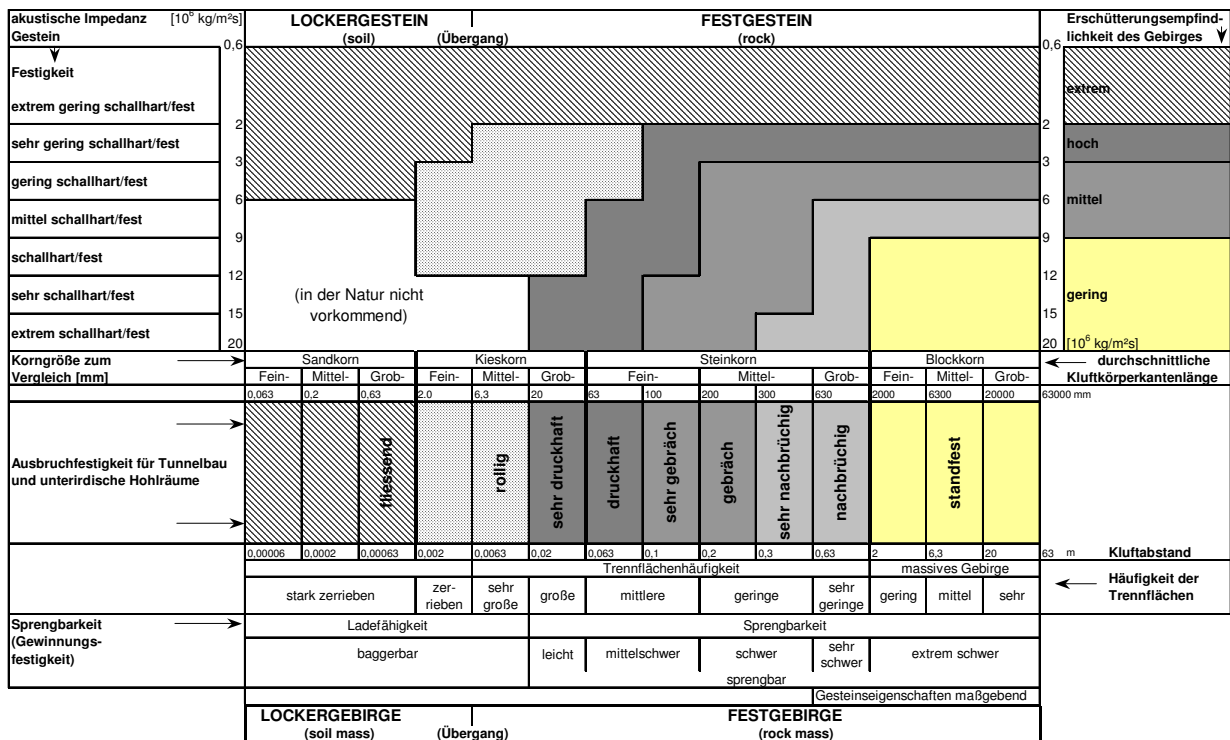


Bild 10: Empfehlung einer Klassifikation von Festgesteinen und Festgebirgen zur objektiven Einstufung der Sprengbarkeit (über Tage), der Ausbruchfestigkeit (unter Tage) und der Erschütterungsempfindlichkeit von Festgebirgen mittels der akustischen Impedanz, der Häufigkeit der Trennflächen bzw. der durchschnittlichen Kluftkörperkantenlänge.

Fig. 10: Recommended classification of rocks and rock masses for objective rating of blastability (above ground), solidity against exploitation under ground and sensitivity against vibration by acoustic impedance, average length of rock fragments respectively frequency of joints.

Mit dem komplexen Einteilungsvorschlag können verschiedene Aufgabenbereiche des Felsbaues und im Übergangsbereich zum Lockergebirge objektiver zugeordnet werden.

Die Sprengbarkeit von Gebirgen über Tage wird entsprechend der akustischen Impedanz der Gesteine und der Trennflächenhäufigkeit des Festgebirges in Bild 10 eingestuft. Leicht sprengbare Festgebirge haben eine große Trennflächenhäufigkeit und sind in den unterschiedlichsten Gesteinsmassiven zu finden. Der bohr- und sprengtechnische Aufwand ist gering. Je weniger Trennflächen im Festgebirge auftreten, um so größer werden die Kosten für die Bohr-, Spreng- und Zündtechnik über Tage [9, 11, 14]. Der erforderliche spezifische Sprengstoffverbrauch ist für jede Klassifikationsstufe in den Größenordnungen bekannt. Die Stufen leicht und mittelschwer sprengbar entsprechen der „Bodenklasse 6“ nach DIN 18300. Der übrige Bereich gehört zur „Bodenklasse 7“.

Die Ausbruchfestigkeit für Gebirge unter Tage ist in Anlehnung an die gebräuchliche Benennung durch LAUFFER mit den beiden genannten Merkmalen durchschnittliche Kluftkörperkantenlänge und akustischen Impedanz im zentralen Teil des Bildes 10 aufgeführt. Von links nach rechts nimmt die Standfestigkeit des Gebirges zu, der Aufwand zur Sicherung des Ausbruches ab und die Vortriebsleistungen können in Richtung zum standfesten Gebirge deutlich gesteigert werden. Jedem Einstufungsbereich der Ausbruchfestigkeit kann für den Vortrieb mit Bohr- und Sprengtechnik der spezifische Sprengstoffverbrauch zugeordnet werden. Dieser nimmt in Richtung massives Gebirge deutlich zu.

Zum Vergleich der ungewohnten Bezeichnungen der Trennflächenhäufigkeit wird die geläufige Korngrößenbenennung von Lockergesteinen im Mittelteil des Bildes 10 angegeben zumal derartig große Kornaggregate in der Natur vorkommen. In den Hochgebirgsregionen ist die Zuordnung von Blockfeldern aus Verwitterungsschutt wegen fehlender Angaben in der DIN 18196 bisher nur beschreibend möglich.

Nicht zuletzt ist aus dem komplexen Zusammenhang des Bildes 10 die Erschütterungsempfindlichkeit des Baugrundes oder Bauraumes abschätzbar, die es bei Tunnelbaumaßnahmen oder in der Nähe von Natursteintagebauten resp. Steinbrüchen oft im Zusammenhang mit der Beurteilung von Sprengerschütterungen gutachterlich zu beurteilen gilt.

Die Einstufung der Ausbruchfestigkeit kann bei Einsatz von Tunnelbohrmaschinen und die der Sprengbarkeit durch die Empfehlung der Beurteilung der Bohrbarkeit ergänzt werden (Bild 1).

6 Ausblick

Die angeführten Empfehlungen der einzelnen Klassifikationen, die vorgestellten Zusammenhänge der verschiedenen Parameter und die Ableitung von Aufwendungen bei Bohr- und Sprengarbeiten sowie beim Tunnelvortrieb haben sich vielfältig in der Praxis unseres Sachverständigenbüros mit der betreuten Kundschaft aus der Felsbaubranche bewährt. Hinweise, Anregungen und kritische Anmerkungen sind erwünscht, damit diese Empfehlungen weiter verbessert werden können.

Der Verfasser steht dem interessierten Leser gern als Berater oder Dienstleister zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

- [1] BIENAWSKI, Z. T. (1989) : Engineering Rock Mass Classification. J. Wiley & Sons.
- [2] DIN EN ISO 14689-1 (APRIL 2004): 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, NA Bauwesen im DIN.
- [3] FACHBEREICHSTANDARD TGL 11482/01 (1983): Erdarbeiten, Allgemeine Forderungen. Verlag für Standardisierung DDR.
- [4] FACHBEREICHSTANDARD TGL 11460/1 (1988): Baugrunduntersuchungen, Bestimmung der Gesteinsarten, Festgestein. Verlag für Standardisierung DDR.
- [5] FACHBEREICHSTANDARD TGL 11482/09 (1989): Erdarbeiten, zusätzliche Forderungen für Felsarbeiten. Verlag für Standardisierung DDR.

- [6] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßENWESEN (1980): Merkblatt über Felsgruppenbeschreibung für bautechnische Zwecke im Straßenbau. Köln.
- [7] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (1984): Merkblatt für die gebirgsschonende Ausführung von Spreng- und Abtragsarbeiten an Felsböschungen. Köln.
- [8] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (1992): Merkblatt zur Felsbeschreibung für den Straßenbau. Köln.
- [9] HEINZE, H. (HRSG.) (1993): Sprengtechnik - Anwendungsgebiete und Verfahren. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Stuttgart - Leipzig.
- [10] ISRM (1981): Basic Geotechnical Description of Rock Mass (BGD). Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol. 18, p. 85 - 110.
- [11] MÜLLER, B. (1986): Grundsätze für den Felsbau im Bauwesen. Habilschrift, Fakultät für Technik und Naturwissenschaften Hochschule für Verkehrswesen „F. List“ Dresden.
- [12] MÜLLER, B. (1988): Kommentar zum Standard TGL 114620/01 „Baugrunduntersuchungen; Bestimmung der Gesteinsarten; Festgestein“ Stand. Bauwesen 230, S. 2639 – 2654.
- [13] MÜLLER, B. (1990): Kommentar zum Standard TGL 11482/09 „Erdarbeiten; zusätzliche Forderungen für Felsarbeiten. Stand. Bauwesen 238, S. 2873 - 2883.
- [14] MÜLLER, B. (1998): Das Phänomen der Trennflächen und ihre Bedeutung für geotechnische Aufgabenstellungen. Freiburger Forschungsheft, C 475, Freiberg 1998, S. 173 - 200.
- [15] MÜLLER, L. (1963): Der Felsbau. Band 1. F. Enke Verlag Stuttgart, 624 Seiten.
- [16] PAUL, A. (1996): Kriterien zur Felsklassifizierung gemäß DIN 18300 Straße und Autobahn 10, S. 585 - 592.
- [17] PESCHEL, A. (1977): Natursteine. Leipzig, Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 390 S.
- [18] PRINZ, H. (1997): Abriss der Ingenieurgeologie. 3. Auflage. F. Enke Verlag Stuttgart.
- [19] REUTER, F., KLENGEL, K. J. UND PASEK, J. (1992): Ingenieurgeologie. 3. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig - Stuttgart.
- [20] ROSIWAL, A. (1916): Neuere Ergebnisse der Härtebestimmung von Mineralien und Gesteinen. - Ein absolutes Maß für die Härte spröder Körper. Verl. KK, geologische Reichsanstalt, Wien, Nr. 5 und 6, S. 117 - 147.
- [21] SCHÖN, J. (1983): Petrophysik - Akademie Verlag, Berlin, 405 Seiten.
- [22] SCHÖNE, D. (1965): Die Bedeutung und die Definition der Begriffe „Bohrbarkeit“ und „Bohrwiderstand“ und die grundsätzlichen Verfahren zur Ermittlung der bohrtechnischen Eigenschaften der Gesteine. Bergakademie, 17, H 3, S. 146 - 151.
- [23] TERTSCH, H. (1949): Die Festigkeitserscheinungen der Kristalle. Springer Verlag, Wien.