

Vorstellung von praktikablen geotechnischen Klassifikationen der Festgesteine und Festgebirge an Beispielen aus der Praxis des Fels- und Tunnelbaues

Presentation of practicable geotechnical classifications of rock and rock mass at examples of rock construction and tunnel construction

Bernd Müller¹, Uwe Pippig²

¹ Dr. Ing. habil., Dipl. Geol. Bernd Müller, Geotechnisches Sachverständigenbüro Dr. Müller, dr.b.mueller@t-online.de,

² Dipl.-Geoph. Uwe Pippig, Geotechnisches Sachverständigenbüro Dr. Müller

Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurde ein praktikables, geotechnisches Klassifikationssystem auf der Grundlage von gut erfassbaren, zerstörungsfreien Prüf- und Messmethoden für das Bauwesen und den Bergbau entwickelt. Die teilweise statistisch gesicherten, quantitativen Zusammenhänge wichtiger Eigenschaften von Festgesteinen und Festgebirgen gestatten eine objektive Einstufung nach Abrasivität, Festigkeit, Verwitterungszustand, Verwitterungsbeständigkeit, Trennflächenhäufigkeit und Teilbeweglichkeit. Die felsbaulich-tunnelbaugeologischen Klassifikationen werden hinsichtlich Verwendungsfähigkeit, Wasserdurchlässigkeit, Tragfähigkeit, Gewinnungs-, Ausbruchfestigkeit, Sprengbarkeit und Standfestigkeit vorgenommen. An ausgewählten Beispielen werden die vorteilhaften Beurteilungskriterien aufgezeigt.

Schlagwörter: Klassifikation, Festgestein, Festgebirge, akustische Impedanz, einaxiale Druckfestigkeit, Verwitterungszustand, Porosität, Wasseraufnahme, Standsicherheit, Tragfähigkeit, Sprengbarkeit, Ausbruchfestigkeit

Abstract

In recent years, a practicable, geotechnical classification system on the basis of well detectable, non-destructive testing and measurement methods for the construction industry and mining was developed. The partially statistically significant, quantitative relationships of important properties of rock and rock mass allow to make an objective classification regarding abrasiveness, strength, state of weathering, weathering resistance, fissure frequency and part movability. The rock and tunneling geological classifications are made regarding usability, water permeability, load bearing capacity, excavation strength, breakout strength, blastibility and stability. Using specific examples, the advantageous evaluation criteria are presented.

Keywords: classification, rock, rock mass, acoustic impedance, unconfined compressive strength, weathering condition, porosity, water absorption, stability, load bearing capacity, blastibility, breakout strength

1 Veranlassung

Die verfügbaren Beschreibungen und Klassifikationen von Festgesteinen (Fels) sowie deren natürliches Vorkommen im Festgebirge sind empirisch oder sporadisch mit statistischen Abhängigkeiten durchsetzt [BIENAWSKI (1989), DIN EN ISO 14689-1 (2004); ISRM 1981)]. Seit vielen Jahren bemüht man sich weltweit um eine im Bauwesen und Bergbau objektiv anwendbare Einstufung [MÜLLER & PIPPIG 2011]. Zum Erstellen von geotechnischen Gutachten und zur fundierten Erarbeitung felsmechanischer Nachweise von Felsbaumaßnahmen sind quantitative, naturnahe Zuordnungen der wichtigsten Festgesteins- und Festgebirgeigenschaften und deren Zusammenhänge zwingend erforderlich. Das Fehlen solcher Klassifikationen führte in der Fels- und Tunnelbaupraxis zu erheblichen Mängeln und Fehlein-

schätzungen der sicherheitlichen sowie tunnelbaugeologischen Bewertung. Insbesondere die Beurteilung der Gesteinsfestigkeiten von diagenetisch wenig verfestigten Sedimentgesteinen weist drastische Fehler auf. Das vollständige Klassifikationssystem ist in [MÜLLER & PIPPIG 2011] veröffentlicht. Im folgenden Beitrag werden die wesentlichsten Merkmale verkürzt aufgeführt und beispielhafte Nachbewertungen von Tunnelbaumaßnahmen vorgestellt.

2 Ingenieurgeologisch-felsmechanische Klassifikationen der Festgesteine

2.1 Verwitterungszustand (V)

Die qualitative Beschreibung des Verwitterungszustandes von Festgesteinen und deren quantitative Beurteilung mit gesteinsphysikalischen Eigenschaften ist objektiv nur mög-



lich, wenn man ein nicht verwittertes Festgestein des gleichen Bauraumes zum Vergleich gegenüberstellen kann. Die Einordnung der Festgesteine in den Verwitterungszustand erfolgt nach Tabelle 1. Der Verwitterungszustand lässt sich durch einfache Korrelationen gemessener Werte der Rohdichte und Wasseraufnahme statistisch gesichert für jedes Festgestein ermitteln. Im Abb. 1 wird beispielhaft der Zusammenhang der gesteinsphysikalischen Parameter Rohdichte und Wasseraufnahme nach DIN EN 1097 - 6 (2001) von einem Schluff- und Feinsandstein aufgezeigt. Die Ergebnisse weisen gesichert nach, dass eindeutige Korrelationen beider Eigenschaften bezogen auf einzelne Festgesteine gleicher Bildungsweise bestehen und zur Beurteilung der Qualität und des Verwitterungszustandes geeignet sind. Die universelle Bedeutung der beiden quantitativen Klassifikationsmerkmale Rohdichte und Wasseraufnahme für die Bewertung der Festgesteine zeigt sich darin, dass der allmähliche Übergang zum Lockergestein quantitativ belegbar ist (Abb. 1). Nur aus dem Vergleich der Rohdichte und Wasseraufnahme zwischen nicht verwitterten zum verwitterten Festgestein kann der tatsächliche Verwitterungszustand zugeordnet werden. Mit der Wasseraufnahme von mehr als 5 bis 15 M.-% beginnt je nach Festgesteinsbeschaffenheit allmählich der Übergang zum Lockergestein.

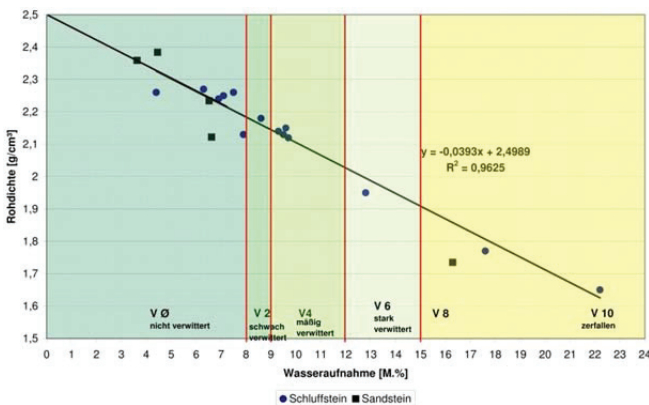


Abb. 1: Beispielhafter, statistisch gesicherter Zusammenhang von Rohdichte und Wasseraufnahme von Ton-, Schluff- sowie Feinsandsteinen mit geringer diagenetischer Verfestigung (V0 bis V10 – Verwitterungszustände).

Fig. 1: Example of a statistically significant relationship of raw density and water saturation of clay-, silt- and sandstone with low diagenetic consolidation (V0 bis V10 - weathering conditions).

2.2 Festigkeit (F)

Als Parameter für die Festigkeit wird weltweit vorwiegend die einaxiale Druckfestigkeit verwendet. Diese zur Regelung des Korngefüges richtungsabhängige Größe eines Festgesteins ist infolge der verschiedenen Versuchsbedingungen deutlich fehlerbehaftet, was bei einer Verwendung für Sicherheitsanalysen und felsmechanischen Berechnungen zu falschen geotechnischen Schlussfolgerungen führen kann. Bei der Beurteilung der einaxialen Druckfestigkeit von Festgesteinen ist es somit zwingend erforderlich, die wesentlichsten Prüfbedingungen der Versuchsdurchführung, die vorhandenen Gefügemerkmale, mögliche Rissbildungen und die Prüfkörperbehandlung zu beschreiben sowie aktenkundig zu dokumentieren. Ansonsten können die Festigkeitswerte untereinander nicht verglichen werden oder sind,

wegen der erheblichen Fehler und Streuung der Daten, für weitere geotechnische Fragestellungen nicht verwertbar [MÜLLER & PIPPIG 2011].

Tab. 1: Klassifikation des Verwitterungszustandes von Festgesteinen (V).

Tab. 1: Classification of the weathering condition of rocks (V).

Tabelle 1: Klassifikation des Verwitterungszustandes von Festgesteinen (V)

Verwitterungszustand	qualitative, makroskopische Feldprüfungen		quantitative Laborprüfung		Code
	Farbänderungen des Korngefüges	mit dem Hammer zerschlagbar	Differenz der vom nicht verwitterten zum verwitterten Festgestein ermittelten Porosität Vol.-%	Wasseraufnahme M.-%	
nicht verwittert	Korngefüge fest verwachsen oder verkittet, Minerale unverändert	je nach Gesteinsart schwer bis leicht	Porosität je nach Festgestein	Wasseraufnahme je nach Festgestein	V 0
schwach verwittert	flecken- bis leicht flächenhafte Verfärbungen, beginnende Veränderungen der Minerale	je nach Gesteinsart in große Stücke zerschlagbar	bis 3 Vol.-%	bis 1 M.-%	V 2
mäßig verwittert	deutlich flächenhafte und beginnende, durchdringende Verfärbung, Mineraleinbildung im Teilgefüge	je nach Gesteinsart leicht in mittlere Stücke zerschlagbar	3 - 5 Vol.-%	1 - 3 M.-%	V 4
stark verwittert	durchgreifende Verfärbungen und deutliche bis verbreitete Mineraleinbildung, Auflösung Korngefüge	leicht bis sehr leicht in kleine bis kleinste Stücke zerschlagbar	5 - 8 Vol.-%	3 - 5 M.-%	V 6
nichtbindig/zersetzt (Lockergestein)	ehemaliges Korngefüge nebußlos sichtbar, in Wasser zerdrückbar, zerfallend	Lockergestein beim Anschlagen feinkörniger Zerfall	[genaue Grenze nicht möglich]	[genaue Grenze nicht möglich]	VR V 10

Um diesen vielen Einflüssen und Fehlerquellen der einaxialen Druckfestigkeit zu entgehen, wurde bereits 1988 die akustische Impedanz - Produkt aus Rohdichte und der P- oder S-Wellengeschwindigkeit einer Gesteinsprobe - als zerstörungsfreier Festigkeitskennwert zur Kennzeichnung der Festgesteine verwendet [FACHBEREICHSTANDARD TGL 11460/01]. Zwischen der fehlerfrei bestimmten einaxialen Druckfestigkeit und der akustischen Impedanz (P) besteht ein linearer, statistisch nachweisbarer Zusammenhang (Abb. 2). Wegen dieser, an allen Festgesteinen und Baustoffen generell nachweisbaren Abhängigkeit ist die akustische Impedanz (P) als Klassifikationsparameter zur Kennzeichnung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens für Festgesteine objektiv geeignet. Die akustische Impedanz (P) wird als Produkt aus Rohdichte und P-Wellengeschwindigkeit definiert, die akustische Impedanz (S) ist das Produkt aus Rohdichte und S-Wellengeschwindigkeit. Die Klassifikation der Festigkeit (F) erfolgt nach Tabelle 2. Die akustische Impedanz (P) zeigt ferner gesicherte Beziehungen zur Porosität und Wasseraufnahme, so dass man nahezu alle Fest- und Lockergesteine, gleich welcher Entstehung, im Abb. 3 zusammenfassend vergleichen und objektiv bewerten kann. Der Übergangsbereich vom Fest- zum Lockergestein lässt sich gesteinsphysikalisch auf diese Weise ohne weiteres zuordnen und die Vielfalt der natürlichen Bedingungen hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Verhaltensweisen einschätzen. Damit wird die praktische Bedeutung von zerstörungsfreien Ultraschallmessungen mit modernen Geräten verdeutlicht, die die genaue Bestimmung der akustischen Impedanz (P) und (S), des dynamischen E-Moduls, des G-Moduls und der Poisson-Zahl ermöglichen. Die Druck- und Scherfestigkeit der Festgesteine können erforderlichenfalls über diese Größe abgeschätzt werden (Abb. 2).

Tab. 2: Klassifikation der Festigkeit von Festgesteinen (F).

Tab. 2: Classification of the strength of rocks (F).

Festigkeit nach der Bestimmung der				Festigkeit nach Abschätzung		Code		
akustischen Impedanz (P)		einaxialen Druckfestigkeit		Wasseraufnahme	des Klanges			
Benennung	$10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$		MPa	M.-%	Zerschlagbarkeit			
extrem schallhart	> 15	extrem fest	> 260	< 0,38	< 0,36	schwer	sehr hoch	F 0
sehr schallhart	12 - 15	sehr fest	160 - 260	0,38 - 1,0	0,36 - 1	schwer	hell bis hoch	F 2
schallhart	9 - 12	fest	60 - 160	1,0 - 2,2	1 - 2	mäßig	tief bis hell	F 4
mittel schallhart	6 - 9	mittel fest	30 - 60	2,2 - 5,0	2 - 5	gut	gedämpft bis tief	F 6
gering schallhart	4 - 6	gering fest	30 - 10	5,0 - 10,0	5 - 8	leicht	dumpf bis gedämpft	F 8
sehr gering schallhart	2 - 4	sehr gering fest	10 - 1	10,0 - 11,6	8 - 10	sehr leicht	äußerst dumpf	F 10
extrem gering schallhart	< 2	extrem gering fest	< 1	> 11,6	> 10	Lockergestein	-	F 12

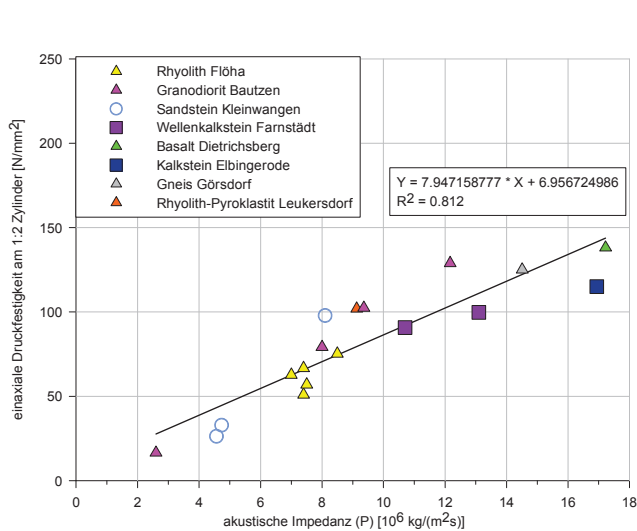


Abb. 2: Statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen der einaxialen Druckfestigkeit (ungestörte Proben) und der akustischen Impedanz P-Wellengeschwindigkeit.

Fig. 2: Statistically significant relationship between the unconfined compressive strength (undisturbed samples) and the acoustic impedance P-wave velocity.

2.3 Abrasivität (A)

Für die Beurteilung des Verschleißes von mechanischen Werkzeugen, Bohrkronen und Festgesteinsbearbeitungsmaschinen und beim maschinellen Tunnelvortrieb ist es erforderlich, den Schneid-, Bohr- oder Schleifprozess zu beurteilen. Die Abrasivität (A) eines Festgesteines ist der Widerstand gegen ein schleifendes, sägendes oder/und bohrendes Werkzeug, der 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. Die Abrasivität A wird in Auswertung der Korngefügebilder wie folgt berechnet:

$$A = S_G + \frac{T_{H1} + T_{H2}}{2} \quad [\text{kNm/cm}^3] \quad (1)$$

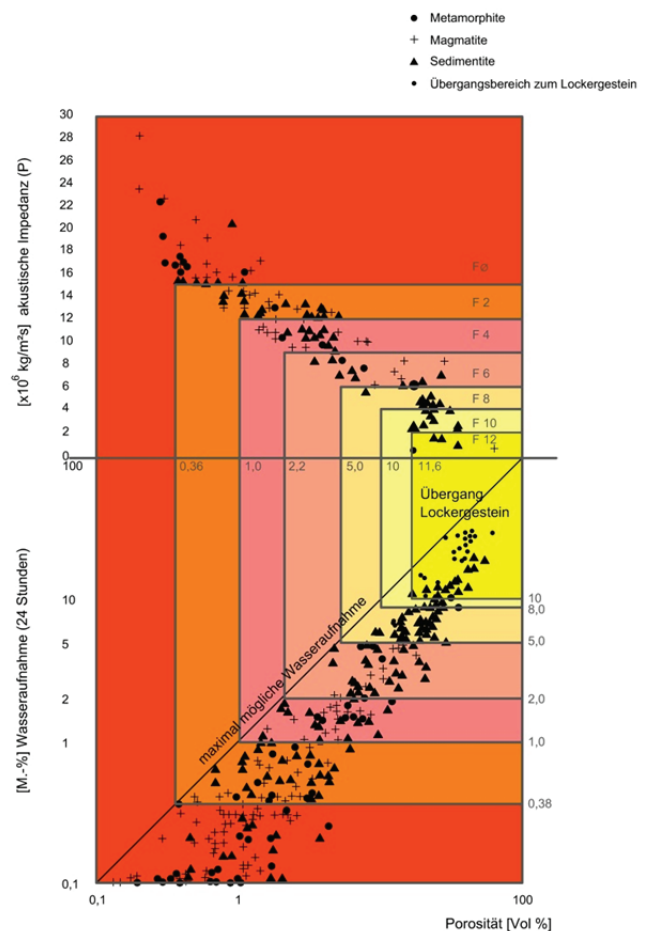
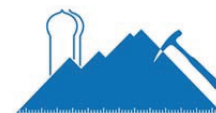


Abb. 3: Einteilungsmöglichkeiten der Festgesteine der akustischen Impedanz (P) $[10^6 \text{ kg/(m}^2\text{s)}]$ und deren Zusammenhänge mit der Porosität [Vol.-%] und Wasseraufnahme [M.-%].

Fig. 3: Dividing options of rocks regarding acoustic impedance (P) $[10^6 \text{ kg/(m}^2\text{s)}]$ and their relationships to the porosity [Vol.-%] and water absorption [M.-%].

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 (Tropieverhältnis der Minerale zueinander)

Die Tabelle 3 enthält die Klassifikationen der Festgesteine hinsichtlich der Abrasivität aus Untersuchungen von mehr als 150 verschiedenen Varietäten.

Tab. 3: Klassifikation der Abrasivität (A) der Festgesteine.

Tab. 3: Classification of the abrasiveness of rocks (A).

Abrasivität	Festgesteine (Beispiele)	Abrasivität [kNm/cm ²]	Code
extrem abrasiv	sehr quarzreiche, grobkörnige (mit Netzgefüge) Granite, grobkörnige, granatführende Gneise, Quarzite, grobkörnige Granitgneise, Gneise, grobkörnige Granite	≥ 36	A 1
stark abrasiv	gleichkörnige, mittelkörnige Granite, feinkörnige Granitgneise, Konglomerate	32 - 36	A 2
mäßig abrasiv	Granodiorite, feinkörnige – schlierige Granite; wenig grob- bzw. ungleichkörnige Basite	24 - 32	A 4
gering abrasiv	Granitporphyre, Rhyolithe, Quarzporphyre; feinkörnige Basite, Gabbros, Norite, Diorite; Schiefer, Fruchtschiefer, Sandsteine (quarzitisch)	14 - 24	A 6
sehr gering abrasiv	Sandsteine, Tuffe, Pikrite, Basalte, Labradorite, Larwikite; Dolomitmarmore, unreine silikatische Kalksteine und Marmore	4 - 14	A 8
extrem gering abrasiv	Kalzitmarmore, Hartkalksteine (3 - 4 kNm/cm ²); Muschelkalke, Travertine, oolithische Kalke usw. (< 3 kNm/cm ²)	< 4	A 10

3 Ingenieurgeologisch-felsmechanische Klassifikation des Festgebirges mittels der Trennflächenhäufigkeit (T)

Die Trennflächenhäufigkeit, ausgedrückt durch den mittleren Trennflächenabstand der einzelnen Kluftscharen resp. die durchschnittliche Kluftkörperkantenlänge, kennzeichnet die Festgebirgsfestigkeit und die Teilbeweglichkeit. Je intensiver ein Festgebirge durch Trennflächen zerbrochen ist, umso teilbeweglicher, verformbarer, geringer belastbarer, leichter gewinnbarer und wasserdurchlässiger wird es. Die Trennflächen stellen somit in der Größenordnung des Festgebirges und in mechanischer Hinsicht das wichtigste Merkmal dar. Die Einteilung nach Trennflächenhäufigkeit erfolgt gemäß Tabelle 4. Der Übergang zum Lockergebirge ist darin enthalten.

4 Die geotechnisch-felsbauliche Klassifikation der Sprengbarkeit und Gewinnungsfestigkeit von Festgebirgen

Mit dem Festigkeitsparameter (F), „Akustische Impedanz“ (P) der Festgesteine und der Häufigkeit der Trennflächen (T) des Festgebirges sind die Gewinnungs- oder Ausbruchfestigkeit und die Sprengbarkeit gleichermaßen quantitativ bewertet und ermittelt nach Abb. 4.

Der Zusammenhang der Abb. 4 mit der DIN 18300 und 18312/02 ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tab. 4: Klassifikation der Festgebirge nach der Trennflächenhäufigkeit (T).

Tab. 4: Classification of rock mass regarding fissure frequency (T).

Trennflächenhäufigkeit/Gebirge	mittlerer Trennflächenabstand bzw. durchschnittliche Kluftkörperkantenlänge		Code
	m	mm	
sehr massives Gebirge (nicht geklüftet)	> 20	> 20.000	T 0
mittel massives Gebirge	6,3 - 20	6.300 - 20.000	T 2
gering massives Gebirge	2 - 6,3	2.000 - 6.300	T 4
sehr geringe Trennflächenhäufigkeit	0,63 - 2	630 - 2.000	T 6
geringe Trennflächenhäufigkeit	0,2 - 0,63	200 - 630	T 8
mittlere Trennflächenhäufigkeit	0,063 - 0,2	63 - 200	T 10
Beginn Übergang Lockergebirge			
große Trennflächenhäufigkeit	0,02 - 0,063	20 - 63	T 12
sehr große Trennflächenhäufigkeit	0,0063 - 0,02	6,3 - 20	T 14
Grenzbereich zum Lockergebirge			
zerriebenes Lockergebirge	0,002 - 0,0063	2,0 - 6,3	T 16
stark zerriebenes Lockergebirge	< 0,002	< 2,0	T 18

Tab. 5: Zusammenhang der (GS) und (AB) mit der DIN 18300 und 18312/02.

Tab. 5: Relationship of (GS) and (AB) with the DIN 18300 and 18312/02.

Sprengbarkeit (Gewinnungsfestigkeit) - über Tage - (GS)	Bodenklasse (Felsklasse) nach DIN 18300	Code	Ausbruchfestigkeit - unter Tage - (AB)	Vortriebsklassen nach DIN 18312/02	Code
extrem schwer sprengbar	7	GS 10	standfest	1	AB 0
			nachbrüchig	2	AB 2
sehr schwer sprengbar		GS 8	sehr nachbrüchig	3	AB 4
			gebräch	4	AB 6
schwer sprengbar		GS 6	sehr gebräch	5	AB 8
			druckhalt	6	AB 10
mittelschwer sprengbar	6	GS 4	sehr druckhalt	7	AB 12
leicht sprengbar			GS 2	rollig	Sonderfall
baggerbar (ripperbar)	1 - 5	GS 0	fließend	Sonderfall	AB 16

Man beachte bei der Gegenüberstellung von GS und AB in Tab. 5, dass der spezifische Bohr- und Sprengaufwand auch für die Untertagesprengungen mit steigender Ausbruchfestigkeit und kleinerer Ausbruchfläche zunimmt. Die vorgestellte Einteilung in die Gewinnungsfestigkeit, Ausbruchfestigkeit bzw. Sprengbarkeit hat sich bisher in der Felsbaupraxis mehrfach bewährt und zu objektiven Vergleichen verschiedener Festgebirge geführt.

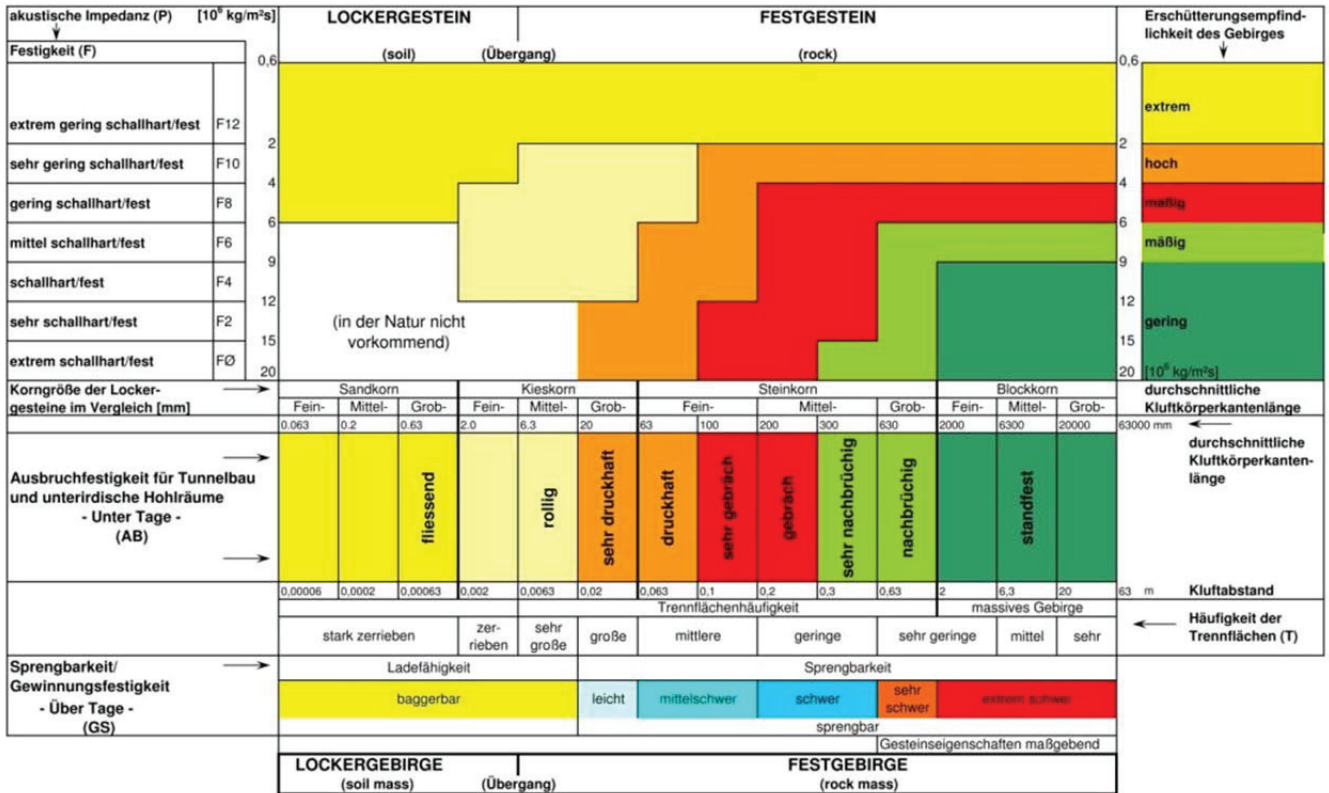


Abb. 4: Klassifikation von Festgesteinen und Festgebirgen zur Einstufung der Gewinnungsfestigkeit, Ausbruchfestigkeit bzw. Sprengbarkeit über und unter Tage sowie der Erschütterungsempfindlichkeit des Gebirges mittels der Festigkeit (F) und der Trennflächenhäufigkeit (T).

Fig. 4: Classification of rocks and rock mass for classifying the excavation strength, breakout strength and blastability above and below ground as well as the vibration sensitivity of rock mass by the strength (F) and the fissure frequency (T).

5 Anwendungsbeispiele aus dem Fels- und Tunnelbau

5.1 Festigkeitsbeurteilung und Verwitterungszustand

Bei der Versuchsdurchführung zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit von Festgesteinen müssen folgende Randbedingungen beachtet werden:

Größe und Schlankheitsgrad der Prüfkörper; Beschaffenheit der Endflächen, Lastverteilung; Belastungsgeschwindigkeit; Orientierung der Prüfkörper zum Korn- und Flächengefüge bzw. Beachtung der Tropie- und Genitätsverhältnisse; Vorbehandlung der Prüfkörper wie trocken, nass, gefrosten usw. Die Prüfkörper dürfen keine Rissbildungen aufweisen. Damit beginnt die Schwierigkeit bei stark klüftigen Gesteinen, diagenetisch wenig verfestigten Sedimentgesteinen bzw. bei Klastiten mit Wechsellagerung und variierenden Bindemittel maßgerechte Stücke anzufertigen. Ultraschallmessungen können an kleinen Prüfkörpern problemlos ausgeführt werden.

Nicht zuletzt wird häufig die geringe, diagenetisch bedingte Festigkeit von Gesteinen mit dem Verwitterungszustand verwechselt, d. h. geringfeste Gesteine werden als mäßig bis stark verwittert eingestuft. Diese Verhältnisse können mit den Untersuchungen gemäß Kapitel 2.1 eindeutig ermittelt werden. Bei stark wechselnder Korngrößenzusammensetzung

helfen Analysen der Sand-, Schluff- und Tonkornanteile, damit die Streubreite der Gesteinsbeschaffenheit abgegrenzt werden kann (Abb. 5).

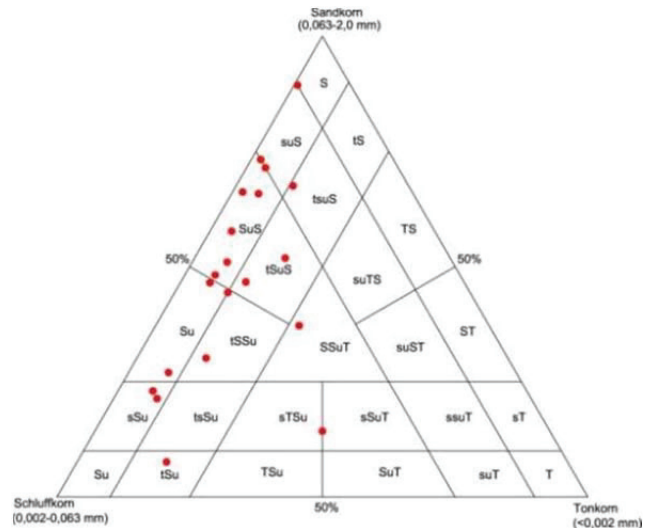


Abb. 5: Auswertung der untersuchten Gesteinsproben hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung im Sand-, Schluff- und Tonkorn-Dreieck für den Tunnelabschnitt (Mittlerer Tunnelabschnitt).

Fig. 5: Analysis of the investigated rock samples regarding the particle size distribution in the sand, silt and clay particle size triangle for the tunnel section (Middle portion of the tunnel).

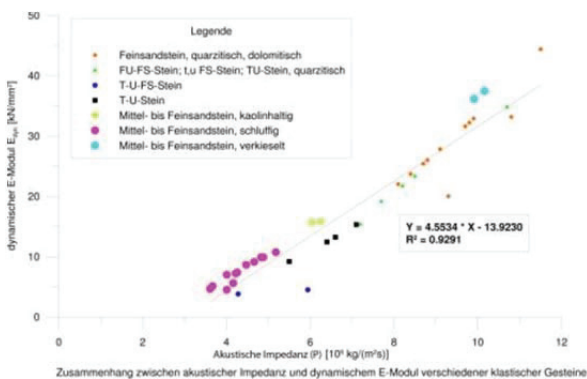
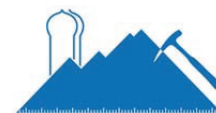


Abb. 6: Die Streuung der Festigkeiten der Wechsellagerung von Klastiten des Mittleren Buntsandsteines im dynamischen E-Modul versus akustische Impedanz (P)-Diagramm.

Fig. 6: The strength dispersion of the alternation of the clastic sediments of middle bunter sandstone in dynamic Young's modulus versus acoustic impedance (P) diagram.

Mit genauen Druckfestigkeitsuntersuchungen kann bei Erfordernis die Beziehung zur akustischen Impedanz vorge-nommen werden (Abb. 7).

Die objektive Bestimmung der tatsächlichen Festigkeitsver-hältnisse der anstehenden Gesteine im Tunnelprofil ermög-licht eine genauere Dimensionierung des Ausbaues und Vortriebes.

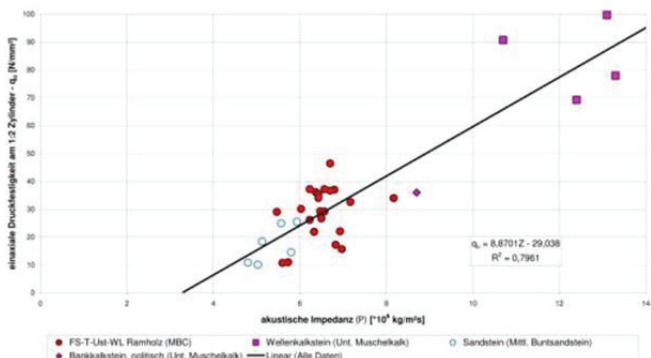


Abb. 7: Beziehung zwischen der akustischen Impedanz (P) und der einaxialen Druckfestigkeit am 1 : 2 Zylinder verschiedener Sedimentgesteine.

Fig. 7: Relationship between the acoustic impedance (P) and the unconfined compressive strength at 1 : 2 cylinder of various sedimentary rocks.

5.2 Einstufung in die Ausbruchfestigkeit oder Vortriebsklasse

Die aufgezeigten, statistisch gesicherten Zusammenhänge und Abhängigkeiten gestatten eine praktikable Zuordnung der jeweils vorhandenen geotechnischen Verhältnisse in die Ausbruchfestigkeit bzw. Sprengbarkeit nach Abb. 4. Eine inzwischen große Datenmenge ermöglicht eine rasche Beurteilung der Gesteinsfestigkeiten (Abb. 8).

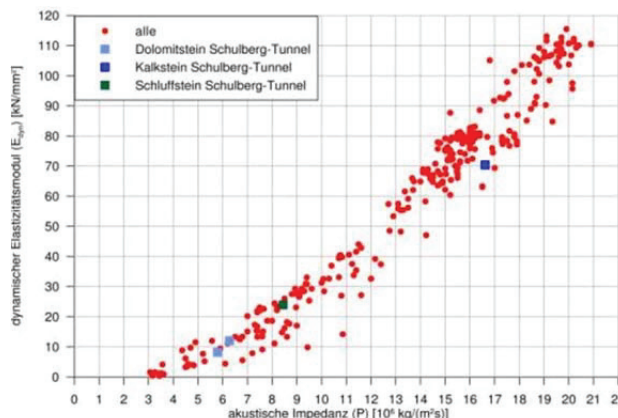


Abb. 8: Beziehung zwischen dynamischem E-Modul und akustischer Impedanz (P) von unterschiedlichen Festgesteinen.

Fig. 8: Relationship between dynamic Young's modulus and acoustic impedance (P) of various rocks.

Zwischen den Trennflächenabständen bzw. Kluftkörpergrößen der Festgebirge und dem spezifischen Sprengstoffverbrauch besteht eine statistisch gesicherte Beziehung, die für den Tunnelbau unter Beachtung des Ausbruchquerschnittes anzupassen ist. In Abb. 9 kann bei Kenntnis der Ausbruchfestigkeit nach Abb. 4 und der Ausbruchfläche der spezifische Sprengstoffaufwand abgeschätzt werden. Auf diese Weise wird es möglich, den Sprengvortrieb den Gebirgsverhältnissen weitestgehend anzupassen.

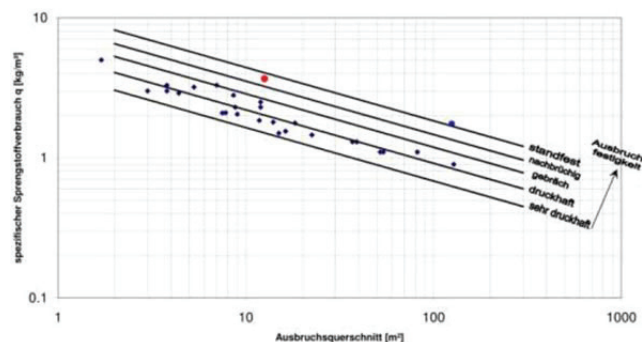


Abb. 9: Abhängigkeit des spezifischen Sprengstoffverbrauches vom Ausbruchquerschnitt und der Ausbruchfestigkeit (nach Abb. 4).

Fig. 9: Dependence of the specific explosive consumption from breakout section and the breakout strength (according to figure 4).

Auf der Grundlage der beispielhaft dargestellten Klassifikation von Festgesteinen und Festgebirgen ist es möglich, die Beurteilung des Verwitterungszustandes, der Festigkeitsverhältnisse und der jeweiligen Ausbruchsbedingungen objektiv und naturnah vorzunehmen. Die nach bisheriger Vorgehensweise ermittelten Vortriebsklassen wurden nach den neueren Untersuchungen meist höher, in die günstigere Klasse eingestuft und mit praktischen Aussagen zum spezifischen Sprengstoffverbrauch bzw. zur Tragfähigkeit und Standsicherheit des Gebirges ergänzt.

Literatur

- BIENAWSKI, Z. T. (1989): Engineering Rock Mass Classification. - J. Wiley & Sons.
- DIN EN ISO 14689-1 (2004): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels - Teil 1: Benennung und Beschreibung; Deutsche Fassung EN ISO 14689-1:2003, NA Bauwesen.
- FACHBEREICHSTANDARD TGL 11460/01 (1988): Baugrunduntersuchungen, Bestimmung der Gesteinsarten, Festgestein. - Verlag für Standardisierung DDR.
- ISRM (1981). Basic Geotechnical Description of Rock Mass (BGD). - Int. J. Rock Mech. Min Sci. Geomech. Abstr. Vol. 18, pp 85-110.
- MÜLLER, B. & PIPPIG, U. (2011): Praktikable geotechnische Klassifikationen von Festgesteinen und Festgebirgen für das Bauwesen und den Bergbau. - Felsbaumagazin, H1, S. 10-31.