

## **Bohren, Sprengen, Fräsen – Können die geologischen Faktoren der Gebirgslösung quantifiziert werden?**

### **Drilling, blasting and cutting – Is it possible to quantify geological parameters of excavatability?**

Dr. rer. nat. K. Thuro<sup>1</sup> & Dipl.-Geol. R. J. Plinninger<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Ingenieurgeologie

<sup>2</sup>Technische Universität München, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie

#### **Abstract**

Is it possible to put numbers to geological parameters concerning excavatability? Are there only rock mechanical properties which really can be quantified? Is a classification system possible for excavation by drilling & blasting or cutting, including all necessary geological and geotechnical parameters? These questions arise when the behaviour of rock mass material has to be considered during underground excavation. Determining tunnel stability is a key issue during preliminary site investigation. In contrast, problems of excavatability have been mainly ignored. While the choice of an economic tunnelling method is admitted a certain priority in the planning stage, special investigations for rock fragmentation - e.g. drilling or cutting performance, rock mass blastability or tool wear - are carried out quite rarely. This contribution explores possibilities to quantify key parameters for rock mass excavatability in drilling, blasting and cutting by TBMs and roadheaders. Although rock mechanical properties play a key role, geological parameters are rarely fully included in most projects. In some cases, the influence of geological features on rock fragmentation can be much higher than varying rock properties. Geological difficulties can have a high impact on the economics of an underground construction project, especially when the chosen excavation system turns out to be unsuitable for the conditions encountered. Thus it can be argued that the geological and petrological characteristics of the rock mass should be evaluated with the same degree of effort as that for the geotechnical prognosis. Furthermore, mechanical parameters are of limited value, if the rock mass is composed of anisotropic and inhomogeneous material. Inhomogeneity and anisotropy obviously play a key role during the process of rock fragmentation.

#### **Zusammenfassung**

Können die geologischen Faktoren für die Gebirgslösung – also für den Ausbruch oder die Gewinnung – in Zahlen gefasst werden? Sind es vielleicht nur die felsmechanischen Kennwerte, die tatsächlich quantifiziert werden können? Ist ein Klassifizierungssystem für die Gebirgslösung durch Bohren, Sprengen und Fräsen sinnvoll und möglich, welches alle geologische und geotechnische Faktoren berücksichtigt? Diese Fragen stellen sich, wenn es darum geht, Gestein und Gebirge bezüglich seines Verhaltens beim Ausbruch im Untertagebau zu beurteilen. Bei den geotechnischen Voruntersuchungen zu Grossprojekten steht allerdings fast ausschliesslich die Vorhersage der Stabilität des auszubrechenden Hohlraums im Vordergrund. Probleme der Gebirgslösung werden dagegen meist ignoriert. Während der Wahl der wirtschaftlichen Vortriebsmethode bei der Planung meistens noch eine gewisse Priorität eingeräumt wird, werden detaillierte Überlegungen zum erzielbaren Bohr- & Fräsfortschritt, zum Sprengmittelverbrauch und zum Verschleiß der zu verwendenden Werkzeuge heutzutage nur selten durchgeführt. In vorliegender Arbeit wird auf die Möglichkeit eingegangen, wesentliche Leitparameter für die Gebirgslösung zu quantifizieren. Dabei kommt den felsmechanischen Kennwerten eine bedeutende, jedoch nicht die alleinige Rolle zu. Meist sind es die geologischen Faktoren, die bei Projekten zu wenig berücksichtigt werden. Der Einfluß der Phänomene des Gebirges auf das Lösen und Zerkleinern von Fels kann ungleich größer sein als der Einfluß der felsmechanischen Kennwerte des Gesteins. Geologische Probleme können

die Wirtschaftlichkeit eines Vortriebs sehr schnell in Frage stellen, insbesondere dann, wenn es sich herausstellt, daß für die vorliegenden (nicht vorhergesehenen) Untergrundverhältnisse ein ungeeignetes Vortriebsverfahren gewählt worden ist. Deshalb sollte bei einer Prognose den geologisch-petrographischen Aspekten das gleiche Gewicht beigemessen werden wie der Ermittlung der geotechnischen Kennwerte des zu durchörternden Gebirges. Felsmechanische Kennwerte versagen immer dann als Basis eines Prognosemodells, wenn Gestein oder Gebirge – wie so häufig – inhomogen und anisotrop aufgebaut sind. Inhomogenität und Anisotropie spielen beim Zerkleinerungsprozess im Gestein ganz offensichtlich eine massgebende Rolle.

## Gebirgslösung – eine Begriffsdefinition

Der Begriff „Gebirgslösung“ ist nicht streng definiert. Im allgemeinen wird darunter der mechanische Ausbruchsvorgang von Locker- und Festgestein bzw. Gebirge für bautechnische Zwecke verstanden. Dieser Begriff wird dabei für das Baggern, Reissen, Abschieben über Tage z.B. in einer Baugrube oder an einer Böschung genauso gebraucht wie für das Bohren, Sprengen, Fräsen oder Schneiden mit geeigneten Geräten unter Tage z.B. in einem Tunnel oder in einer Kaverne.

Die nachfolgenden Erläuterungen des Begriffes „Gebirgslösung“ beziehen sich auf die Anwendung im Untertagebau, hauptsächlich im Tunnel- und Stollenbau.

Unter dem Begriff der Gebirgslösung verbirgt sich ein komplexes Wirkungsgefüge aus Ursachen und Wirkungen. Bei der Beschreibung wird üblicherweise unterschieden

- zwischen einem Leistungskriterium – z.B. der Vortriebsleistung oder dem Bohr- oder Fräsfortschritt
- und einem Materialverbrauchskriterium, i.d.R. dem Materialverschleiß – z.B. dem Verbrauch von Werkzeugsätzen wie Bohrkronen, Meißel oder auch Sprengstoff.

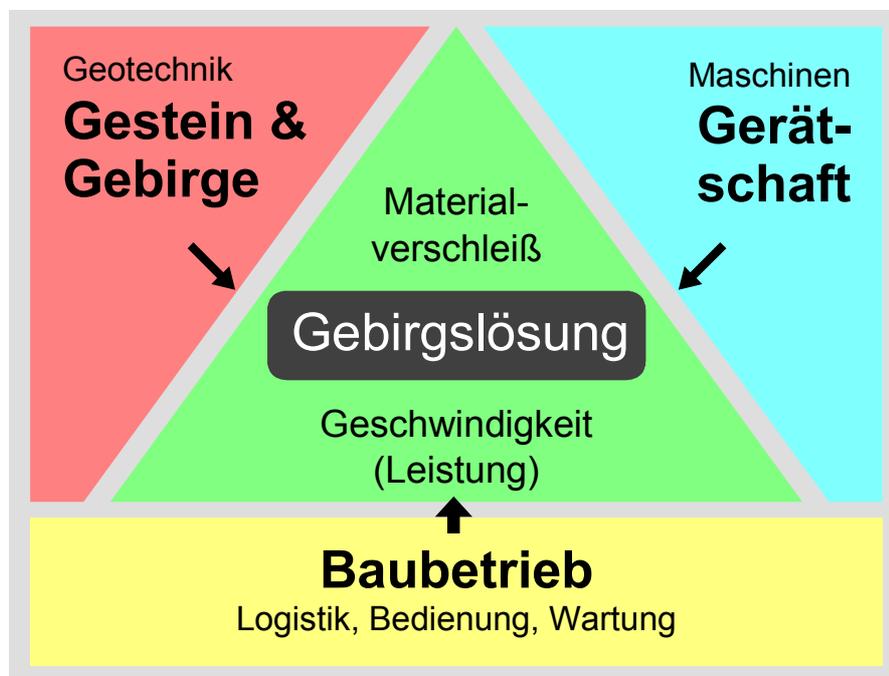


Bild 1 Konzeptionelle Übersicht der drei Haupteinflussbereiche der „Gebirgslösung“.

Fig. 1 Conceptual overview of the three main parameters influencing excavatability.

Es lassen sich nach Bild 1 drei Haupteinflußbereiche unterscheiden, welche die Gebirgslösung steuern:

1. Gestein und Gebirge mit ihrer Ausbildung und ihren geologisch-petrographischen und felsmechanischen Parametern, die hier zusammenfassend unter dem Begriff „Geotechnik“ laufen.
2. Die Gerätschaft bzw. die Maschinen mit denen der Ausbruch erfolgt und ihre technischen Daten.
3. Der Baubetrieb und die Baulogistik, das Ineinandergreifen der Bauabfolgen und letztlich die Mannschaft, die die Geräte bedient und wartet.

Die erzielbare Ausbruchsgeschwindigkeit und ebenso der Verschleiß der Geräte und Werkzeuge ist zunächst von der verwendeten Ausrüstung abhängig: von System und Leistung des Bohrhammers, der Teilschnittmaschine oder der Tunnelbohrmaschine, und von Materialgüte und Bauform der Bohrkronen, des Rundschaft- oder des Diskenmeißels. Die Auswahl der Ausrüstung wird entscheidend von den geologischen Gegebenheiten beeinflusst.

Gestein und Gebirge bestimmen durch ihre geologisch-geotechnischen Materialeigenschaften (Mineralzusammensetzung, felsmechanische Eigenschaften, Ausbildung des Gesteins im Gebirgsgefüge) entscheidend die Vortriebsleistung, den Verschleiß und eventuelle Probleme bei der Anwendung des gewählten Vortriebsverfahrens.

Der dritte Faktor ist der Mensch, dem bei Betrachtungen der Gebirgslösung oft zu wenig Beachtung zukommt, obwohl es schließlich die Mineure sind, welche die Geräte bedienen und instand halten. Ohne eine eingespielte Mannschaft können trotz modernster und effektivster technischer Verfahren keine hohen Vortriebsleistungen erzielt werden – von unsachgemäßer oder nachlässiger Bedienung gar nicht zu reden.

Zu den beschriebenen Faktoren können noch Erschwernisse kommen, die sich durch das Gebirge beim Ausbruchvorgang selbst oder erst beim Fördern des Materials ergeben. Instabile Sprengbohrlöcher in einer Störungszone können beispielsweise das Besetzen mit Sprengstoff behindern, quellfähiges Gebirge kann bei Wasserzutritt so schnell reagieren, dass das Gestänge nicht mehr ohne Probleme gezogen werden kann. Durch den Kreislaufprozess im Tunnelvortrieb wirken sich Probleme, die bei einem einzelnen Vorgang auftreten, immer negativ auf den nachfolgenden Arbeitsschritt und damit auch auf den Gesamtvortrieb aus. Wird z.B. beim Fräsen ein veränderlich festes Gestein (Tonschluffstein) mit dem zutretenden Wasser (z.B. aus einer Sandsteinlage) vermischt, kann dies zu einer Schlammabfuhr führen. Dadurch wird das mechanische Abfördern des Fräsgutes mit einem Scherenladetisch und Kettenförderer praktisch unmöglich. Die Folge ist eine Unterbrechung des Fräsvorganges und möglicherweise händisches Abschaufeln des breiigen Materials (vgl. 1, 2). Diese Erschwernisse werden häufig bei der Diskussion der Gebirgslösung außer acht gelassen, können jedoch unter ungünstigen Bedingungen für die Wirtschaftlichkeit ausschlaggebend sein.

Wesentlich ist es also, nicht nur den einzelnen Prozess zu untersuchen, sondern darüber hinaus das Ineinandergreifen des gesamten Systems, bestehend aus Gebirge, Maschine und Bauablauf.

## Arten der Gebirgslösung

Für die weiteren Erläuterungen werden die Begriffe der Gebirgslösbarkeit für die einzelnen Vortriebsarten kurz umrissen:

Der Begriff der **Bohrbarkeit** wird hier im Zusammenhang mit der Erstellung kleinkalibriger Löcher im Durchmesserbereich zwischen 32 mm und ca. 100 mm verwendet. Diese Löcher werden im Untertagebau für das Besetzen mit Sprengstoff beim konventionellen Bohr- und Sprengvortrieb und für den Einbau von Ankern hergestellt. An Untersuchungen vor Ort haben sich zwei Leitparameter als besonders aussagekräftig erwiesen (4, 5): Die (Netto-) Bohrgeschwindigkeit in Meter pro Minute für den Bohrfortschritt, welche aus der Einzelbohrzeit der Herstellung eines Sprengloches ermittelt wird und die Standzeit der Bohrkronen (Gesamtstandlänge) als Lebensdauer einer Bohrkrone stellvertretend für den Verschleiß in einem Gestein oder Gebirge. Qualitativ kann nach (3) noch zwischen verschiedenen Verschleisstypen oder Verschleissklassen unterschieden werden.

Auf den Begriff der **Sprengbarkeit** wird hier nur in Bezug auf den Bohr- und Sprengvortrieb und den Verbrauch von Sprengstoff eingegangen. Ausführungen zur Qualität des Sprengergebnisses und zur Steuerung der Haufwerksgröße werden ausgeklammert. Als Maß für die Sprengbarkeit der einzelnen Gebirgstypen wurde der spezifische Sprengstoffverbrauch in der Kalotte ausgewertet. Er berechnet sich aus der Summe der Sprengstoffmasse geteilt durch das gesprengte Volumen (=Sprengquerschnitt mal Abschlagstiefe). Als rein statistischer Wert gibt der spez. Sprengstoffverbrauch nur an, wieviel Munition aufgewendet werden muß, um einen Abschlag vorgegebener Dimension auszubrechen. Da der Sprengmeister allein mit seiner Erfahrung abschätzen muß, wieviel Sprengkraft in die Trennflächen nutzlos verpuffen wird, ergibt sich erfahrungsgemäß eine relativ große Varianz der verwendeten Munitionsmengen und damit eine große Streuung der Werte des spez. Sprengstoffverbrauchs.

Der Begriff der **Fräsbarkeit** wird hier für den Vortrieb mit Teilschnittmaschinen benutzt. Grundsätzlich gelten die folgenden Ausführungen allerdings auch für die technisch sehr ähnlich ausgelegten Grabenfräsen (Leitungsfräsen und Dredger, vgl. 6 und 7) oder Strassenbelagsfräsen. Analog zur Erfassung der Bohrbarkeit werden zwei Leitparameter zur Beschreibung der Fräsbarkeit herangezogen (8, 9): Es sind dies die Fräsleistung (Schneidleistung), gemessen in gelösten Festkubikmeter Fels pro Arbeitsstunde und der Meißelverschleiß quantitativ als Verbrauch von (Rundschaft-) Meißeln pro Festkubikmeter gelösten Fels (spezifischer Meißelverbrauch). Auch hier kann nach (3) noch qualitativ zwischen verschiedenen Verschleisstypen oder Verschleissklassen (3) unterschieden werden.

Obwohl der Begriff Fräsbarkeit und Schneidbarkeit in der Baupraxis sehr häufig synonym verwendet werden, wird im Folgenden der Begriff der **Schneidbarkeit** durchgängig nur auf den Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen angewandt, um die beiden Vortriebsarten auch sprachlich voneinander zu unterscheiden. Auch hier werden zwei Leitparameter verwendet (10, 11): Die Bohrkopf-Penetration, definiert als mittleres Eindringen in ein Gestein oder Gebirge bei einer einzigen Umdrehung des Bohrkopfes, gilt allgemein als Maß für den Bohrfortschritt (oft gleichgesetzt mit der Bohrbarkeit). Das Verhältnis der Bohrkopf-Penetration zur Eindringkraft wird als spezifische Penetration bezeichnet und gilt als Vergleichsmaß für TBMs verschiedener Durchmesser und Bohrkopfauslegung. Der Verschleiß der Diskenmeißel wird als Rollstrecke einer Diske in Kilometern erfaßt oder als Verbrauch von (Disken-) Meißeln pro Festkubikmeter gelösten Fels (spezifischer Meißelverbrauch). Durch die üblicherweise langen Rollstrecken und Anordnungsgeometrien am Schneidrad sind die Verschleißwerte wegen der zu geringen Auflösung meist jedoch nicht zur Charakterisierung von kurzfristig wechselnden Gebirgsverhältnissen verwendbar.

## Quantifizierbare Faktoren von Gestein und Gebirge

Im Vergleich zu den geotechnischen Parametern wie der einaxialen Druckfestigkeit oder der Zerstörungsarbeit ist es schwer, die geologischen Faktoren in Zahlen zu fassen. Dazu kommt, daß die geotechnischen Kennwerte praktisch ausschließlich an Gesteinen bestimmt werden und nur sehr selten an Teilen des i.d.R. geklüfteten und meist wassergesättigten Gebirges. Die Problematik von Großversuchen (z.B. Scher- oder Triaxversuchen an geklüfteten Prüfkörpern) ist in der Literatur vielfach diskutiert worden. Indirekte Verfahren zur Bestimmung von Gebirgskennwerten wie z.B. bohrlochgeophysikalische Untersuchungen, werden selten und zumeist nur für Forschungszwecke durchgeführt, da eine geeignete Kalibrierung der erhaltenen Daten mit bekannten Gesteins- oder Gebirgskennwerten zum großen Teil fehlt (eine Ausnahme bildet z.B. die Bestimmung der Dichte). Nach Auffassung der Autoren bildet diese Wissenslücke eine interessante Möglichkeit für zukünftige Forschungsprojekte.

Um trotzdem wichtige geologische Faktoren quantifizieren zu können wird häufig versucht, die geotechnischen Parameter des Gesteins im Labor zu erfassen und diese Kennwerte mit qualitativ oder semiquantitativ erhaltenen geologischen Parametern zu vergleichen oder sogar Korrelationen zu erhalten.

Es wird deshalb in der Tabelle 1 zunächst unterschieden in einfach quantifizierbare Parameter, die an Gesteinsproben im Labor bestimmt werden können, und solchen, deren Einfluß auf die Gebirgslösung (noch) nicht quantifiziert werden kann. Korrelationen von diesen felsmechanischen und petrographischen Kennwerten mit Leistungsparametern (Bohr-, Fräs & Schneidgeschwindigkeit) und Verschleißparametern (Bohrkronen, Meißel-, Diskenverbrauch, Sprengmittelverbrauch) lassen sich direkt erstellen. Ausnahmen bilden Parameter, deren Einfluß zwar augenscheinlich ist, wie der primäre Spannungszustand

(13), oder behindernd wirken wie hohe Wasserzuflüsse und quellfähige Gesteine, mit denen jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine direkten Korrelationen zu Leistung oder Verschleiß bekannt sind.

Einige wenige Gebirgskennwerte können semiquantitativ erfaßt werden, auch wenn diese Werte keine physikalischen Parameter darstellen. Deren Einfluss auf die Leistung bei der Gebirgslösung läßt sich direkt in Diagrammen darstellen (Kluftabstände, Zerlegungsgrad, Orientierung der Schieferung). Allerdings ist die erhaltene Streuung der Werte entsprechend hoch (2, 4).

Eine Reihe von geologischen und petrographischen Faktoren lassen sich praktisch nur qualitativ (Verzahnungsgrad im Mikrogefüge oder Qualität des Bindemittels im Gestein), selten wenigstens in Kategorien fassen (Verwitterung, hydrothermale Alteration nach 14, 15). Eine indirekte Möglichkeit zur Quantifizierung ist durch die Verwendung von quantifizierbaren Parametern gegeben, wie z.B. von Festigkeitsparametern oder dem Rock Abrasivity Index (3) für Verzahnungsgrad und Bindemittelqualität. Die Verwendung der Trockenrohddichte und der Porosität eines Gesteins als Leitparameter für die Verwitterung (16) wird in dieser Arbeit näher ausgeführt.

Der Einfluß von veränderlich festen Gesteinen wie beispielsweise Tonschluffsteinen läßt sich als Anteil im Gebirge über die geologische Dokumentation erfassen und direkt mit dem Vortriebsgeschwindigkeit korrelieren (1). Äußerst schwierig erscheint die Quantifizierung des Einflusses der Inhomogenität der Ortsbrust, beispielsweise einer Sandstein-Tonschluffstein-Wechselfolge, da hier nicht nur die absolute Zusammensetzung sondern auch die Mächtigkeit der Einzelbänke und ihre Orientierung zur Vortriebsrichtung maßgebend ist. Hier ist eigentlich nur die Sammlung von Erfahrungswerten als Tendenzen möglich.

Tabelle 1 Quantifizierbare Faktoren der Gebirgslösung.

Table 1 Parameters that can be quantified concerning excavatability.

<b>Einfach quantifizierbare Parameter, die an Gesteinsproben im Labor bestimmt werden können</b>		<b>Auswirkung auf</b>	
Einaxiale Druckfestigkeit	UCS [MPa]	Leistung	(Verschleiß)
Zerstörungsarbeit	Wz [kJ/m <sup>3</sup> ]	Leistung	(Verschleiß)
Elastizitätsmodul	E [GPa]	(Leistung)	(Verschleiß)
Spaltzugfestigkeit	SPZ [MPa]	Leistung	(Verschleiß)
Trockenrohddichte, Porosität	D [g/cm <sup>3</sup> ], P [%]	Leistung	Verschleiß
Äquivalenter Quarzgehalt	Equ [%] (im Vergleich zu Quarz)	-	Verschleiß
Gesteinsabrasivitäts-Index, Rock Abrasivity Index	Index-Wert; RAI = Equ x UCS	-	Verschleiß
<b>Einfach quantifizierbare Parameter, deren Einfluß (noch) nicht quantifiziert werden kann</b>		<b>Auswirkung auf</b>	
Primärer Spannungszustand	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ [MPa], $\varphi$ [°]	Leistung	(Verschleiß)
Wasserzufluss & Wasserchemismus	Mengen, Chemische Signatur	Leistung	(Verschleiß)
Quellvermögen (Quellhebung, Quelldruck)	h [%], $\sigma$ [MPa]	Leistung	(Verschleiß)
<b>Semiquantitativ erfassbare Parameter, deren Werte keine physikalischen Parameter sind</b>		<b>Auswirkung auf</b>	
Abstände / Dichte der Trennflächen, Zerbrechungsgrad	Klüftigkeitsziffer (Stini), Zerlegungsgrad (ÖNORM 4401 T1), Rock Quality Designation RQD [%], Scanlines (Priest), Kluftabstände [cm]	Leistung	-
Anisotropie / Schieferung	Winkel [°] zur Arbeitsrichtung (Tunnel- / Bohrachse)	Leistung	-
<b>Qualitativ erfassbare Parameter, die indirekt mit → quantitativen Kennwerten oder Verfahren in Zahlen gefaßt werden können</b>		<b>Auswirkung auf</b>	
Verzahnungsgrad im Mikrogefüge	→ Zerstörungsarbeit, Einaxiale Druckfestigkeit, RAI	Leistung	Verschleiß
Qualität des Bindemittels	→ Zerstörungsarbeit, Einaxiale Druckfestigkeit, RAI, Trockenrohddichte, Porosität	Leistung	Verschleiß
Verwitterung & hydrothermale Zersetzung	→ Trockenrohddichte, Porosität	Leistung	Verschleiß
Einfluss veränderlich fester Gesteine	→ Gehalt z.B. an Ton-Schluffsteinen	Leistung	(Verschleiß)
Einfluss der Inhomogenität	→ Prozentualer Anteil an der Ortsbrust (Fläche) oder im Abschlag (Volumen), Mächtigkeiten, Orientierung	Leistung	Verschleiß

## Basis-Gebirgslösbarkeit – die felsmechanischen Parameter

Für die Untersuchung der Gebirgslösung muß zwischen der gesteinsbedingten „Basis-Gebirgslösbarkeit“ und deren Beeinflussung durch den Gebirgscharakter unterschieden werden, welcher vor allem durch das Trennflächengefüge bestimmt wird. Bei einem möglichst homogenen und isotropen Gebirge können die felsmechanischen Kennwerte direkt mit den Leistungsparametern korreliert werden. Gleiches gilt für die petrographischen (Äquivalenter Quarzgehalt, 4) oder Indexparameter (Rock Abrasivity Index, 3) mit den Verschleißparametern.

Bereits in früheren Arbeiten wurde auf Eignung verschiedener felsmechanischer Kennwerte für die Korrelation mit der Bohrgeschwindigkeit eingegangen (4, 5). Auch bei der Untersuchung von Vortrieben mit Teilschnittmaschinen stellte sich heraus, daß die Zerstörungsarbeit (Integral der Spannungs-Längsdehnungskurve beim einaxialen Druckversuch inklusive dem Post-failure-Bereich) die besten Korrelationen mit der Fräsleistung ergibt (Bild 2). Die Signifikanz der errechneten Abhängigkeit mit der einaxialen Druckfestigkeit ist demgegenüber weniger befriedigend. (Bild 3).

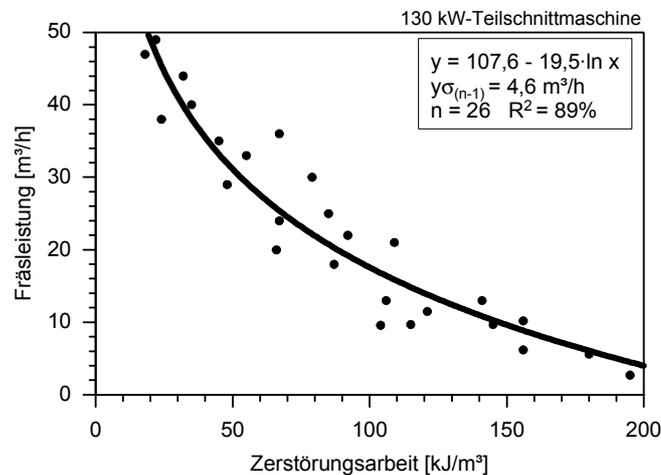


Bild 2 Fräsleistung in Abhängigkeit der Zerstörungsarbeit (Tonschiefer und Quarzite, Abwassertunnel Zeulenroda). Statistische Parameter:  $y\sigma_{(n-1)}$  - Standardabweichung,  $n$  - Anzahl der Werte,  $R^2$  - Bestimmtheitsmaß.

Fig. 2 Cutting performance, correlated with destruction work (Slates and quartzites, Sewage tunnel Zeulenroda). Statistic parameters:  $y\sigma_{(n-1)}$  - standard deviation,  $n$  - number of values,  $R^2$  - square of correlation coefficient.

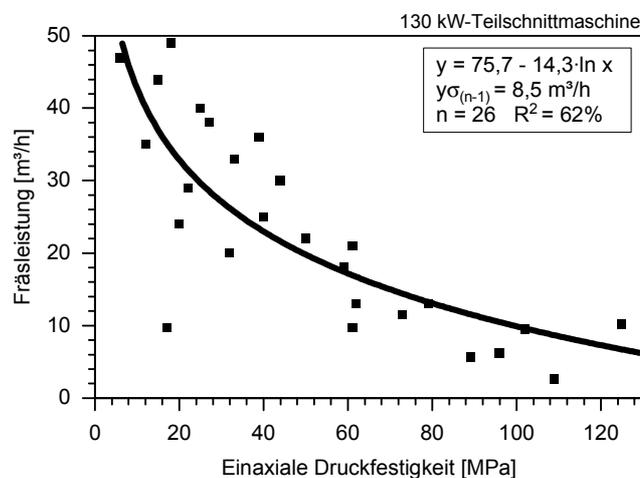


Bild 3 Fräsleistung in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit (Tonschiefer und Quarzite, Abwassertunnel Zeulenroda).

Fig. 3 Cutting performance, correlated with compressive strength (Slates and quartzites, Sewage tunnel Zeulenroda).

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Schneidbarkeit mit einer Hartgesteins-Tunnelbohrmaschine (Bild 4), wenn man nur Maschinenhübe in wenig zerlegtem Gebirge und bei gleicher Orientierung der Schieferung miteinander korreliert.

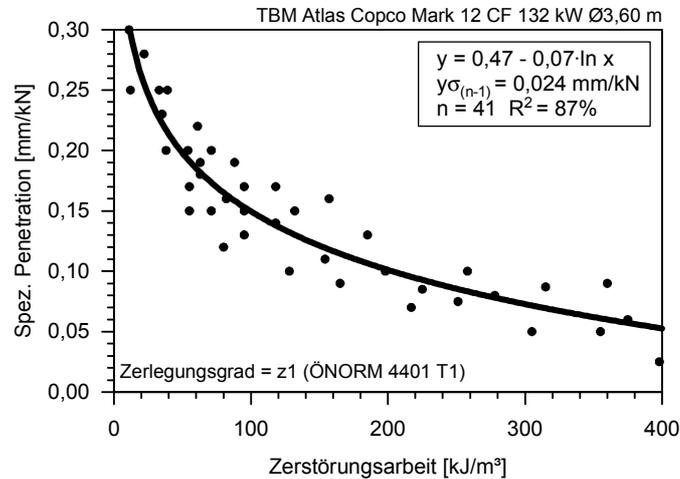


Bild 4 Spezifische Penetration in Abhängigkeit der Zerstörungsarbeit (Phyllite & Karbonatschiefer, Schönbergtunnel, Schwarzach).

Fig. 4 Specific penetration, correlated with destruction work (Phyllites & carbonate schists, Schönberg tunnel, Schwarzach).

Beim Sprengvortrieb ergibt sich ebenfalls eine brauchbare Korrelation mit dem spezifischen Sprengstoffverbrauch (Bild 5). Wesentliche Voraussetzung ist eine möglichst hohe Homogenität des betrachteten Gebirgsabschnittes, vergleichbare Detonationsgeschwindigkeit der verwendeten Sprengmittel und vergleichbare Vortriebsweise (Querschnittsfläche & -volumen, Sprengleitbild bzw. Einbruch).

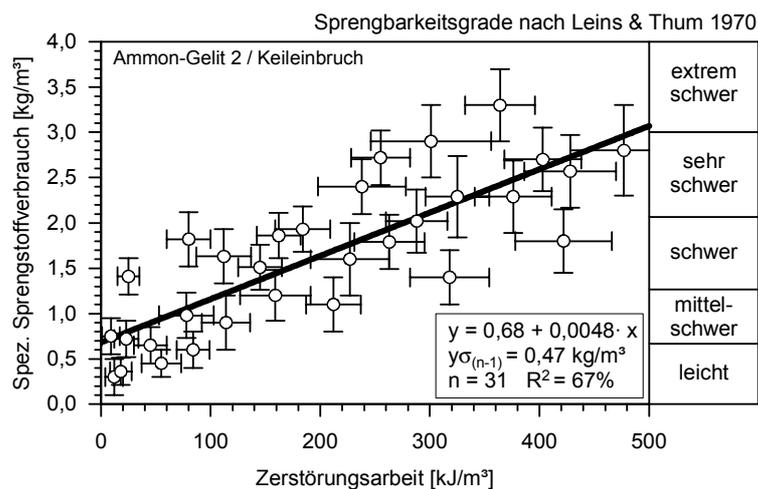


Bild 5 Spezifischer Sprengstoffverbrauch in Abhängigkeit der Zerstörungsarbeit (31 Homogenbereiche aus 8 Tunnelprojekten). Standardabweichungen der Werte als Fehlerbalken.

Fig. 5 Specific consumption of explosives, correlated with compressive strength (31 case studies from 8 tunnel projects). Standard deviation as error margins.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die felsmechanischen Parameter, insbesondere die Zerstörungsarbeit, zwar sehr gute Korrelationen mit Leistungsparametern ergeben, die Voraussetzung - homogenes Gebirge möglichst ohne störende geologische Einflüsse - jedoch nur selten anzutreffen ist.

### Das Problem der Quantifizierung – ein Fallbeispiel

Im Gegensatz zu anderen Autoren, die versuchten, die Vielfalt der geologischen Faktoren für ein Klassifizierungssystem in einem Punktesystem zu fassen, wird hier weiterhin der Weg verfolgt, mit Parametern zu arbeiten, die noch möglichst nahe an den physikalischen Prozessen liegen. Im Folgenden wird ein Beispiel ausgeführt, das die Verwitterung in Graniten zum Gegenstand hat und dessen Daten während des Vortriebs des Tunnels Königshainer Berge, BAB A4, Ostsachsen gesammelt wurden (17, 18).

Den Betrachtungen liegt die Einteilung in Verwitterungsgrade (14, 15) zugrunde, deren Verwitterungsreihe in Bild 6 gegeben ist. Ein zusätzlicher Verwitterungsgrad II-III „leicht verwittert“ wurde eingeführt, um die Lücke zwischen einer nur randlichen Einfärbung bzw. Gesteinsanwitterung und einem bereits zu 40-50% zersetztem Gebirge zu schließen. In den weiteren Diagrammen wurden die „neuen“ Verwitterungsgrade deshalb mit arabischen Zahlen durchnummeriert, d.h. VI = 7, V = 6, IV = 5, III = 4, II-III = 3 und II = 2. Frischer, unverwitterter Granit wurde nicht angetroffen.

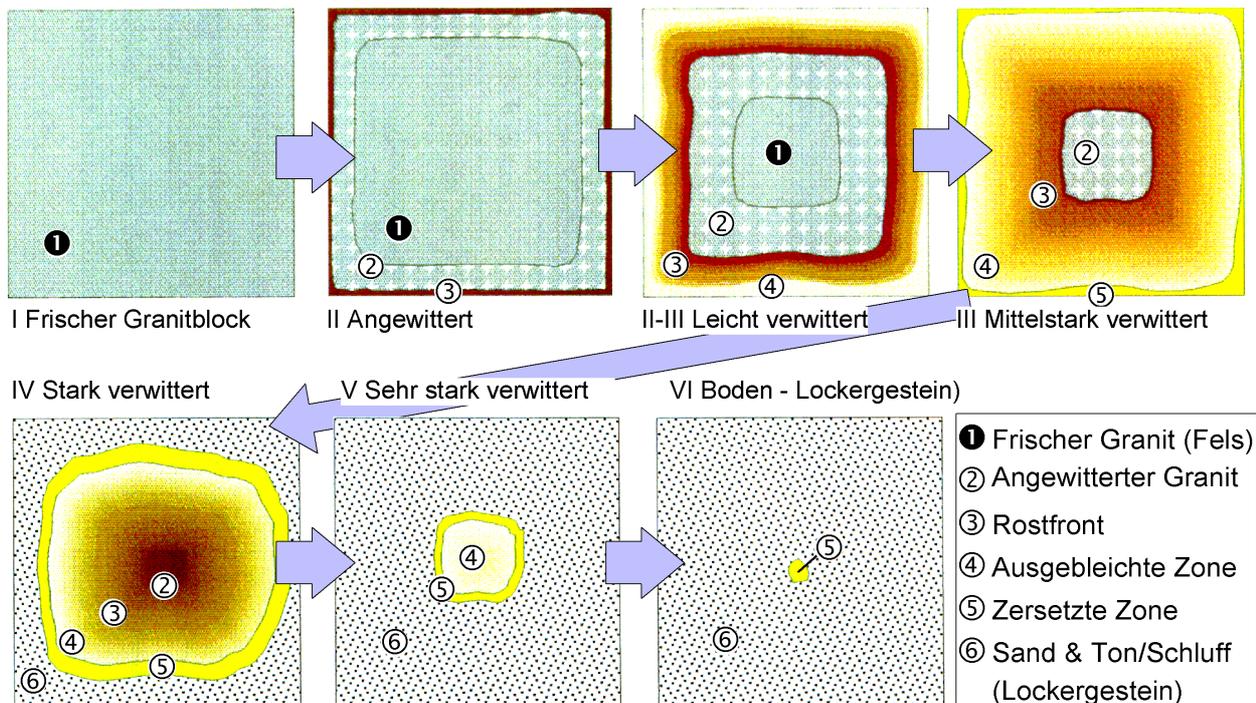


Bild 6 Verwitterungsgrade nach (14, 15) in einem Granitblock (nach 17, verändert).

Fig. 6 Grades of weathering according to (14, 15) in a granite block (after 17, changed).

Setzt man die felsmechanischen (hier die einaxiale Druckfestigkeit) und technischen Kennwerte (Bohrgeschwindigkeit, spez. Sprengstoffverbrauch) den Verwitterungsgraden gegenüber (Bild 7, Bild 8, Bild 9), so ergeben sich große Streubereiche, die durch die relativ grobe und manuelle Klasseneinteilung begründet sind. Die Trendlinien sind für eine Statistik nicht verwendbar und von einer echten Quantifizierung der Verwitterung kann hier noch nicht gesprochen werden.

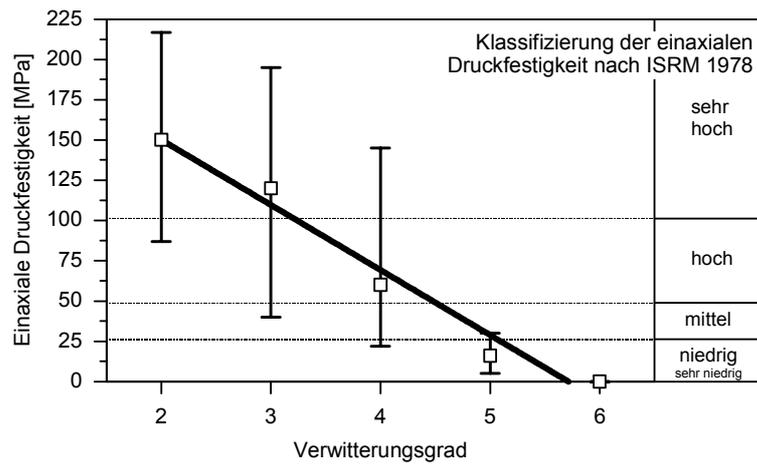


Bild 7 Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades (Maximum/Mittelwert/Minimum).

Fig. 7 Unconfined compressive strength versus weathering grade (high/mean/low value).

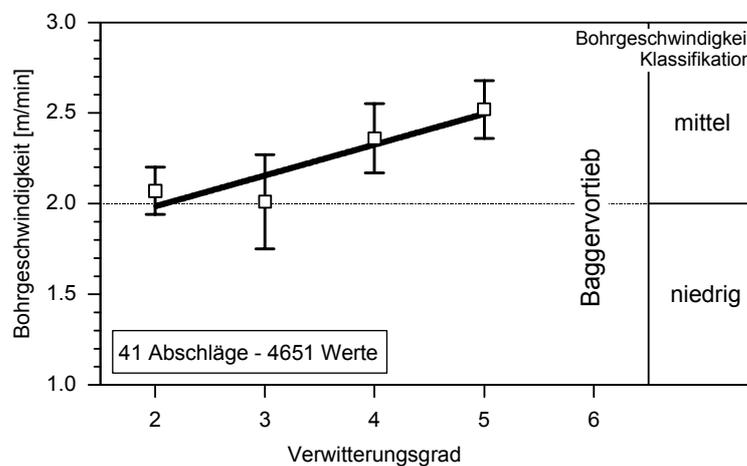


Bild 8 Bohrgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades (mit Standardabweichung).

Fig. 8 Drilling rates of blastholes versus granite weathering grade (with standard deviation).

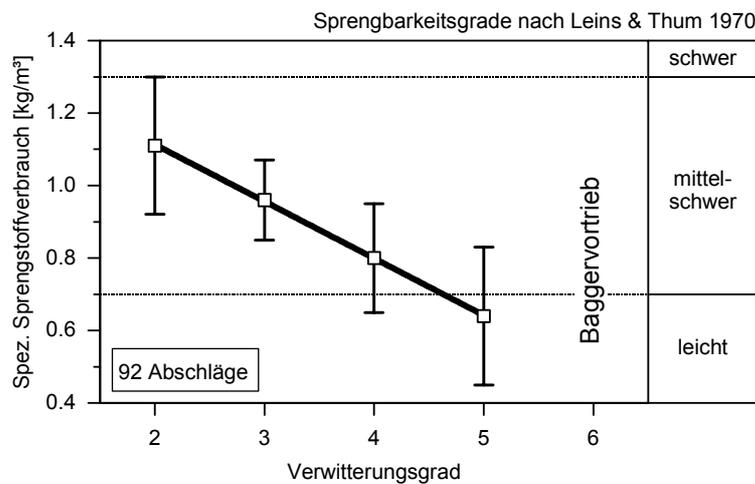


Bild 9 Spezifischer Sprengstoffverbrauch in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades (mit Standardabweichung).

Fig. 9 Specific consumption of explosives versus granite weathering grade (with standard deviation).

Doch an welchem Kennwert läßt sich das Stadium des physikalisch-chemischen Verwitterungsprozesses ablesen, welcher Kennwert kann damit als Leitparameter dienen? Bild 10 zeigt die einzelnen Verwitterungsgrade im Mikrogefüge als typische Dünnschliffbilder. Auffällig ist eine kontinuierlich fortschreitende Zersetzung an Korngrenzen und Mikrorissen, beginnend bei den Feldspäten und beim Biotit, übergreifend auf den Quarz, jeweils unter Bildung von Tonmineralien mit geringer Mineraleichte. Die einhergehende Gefügauflockerung und Erhöhung der Mikroporosität führt dabei zur Öffnung von Mikrorissen und damit insgesamt zur Volumenvergrößerung. Damit läßt sich die Verwitterung als Abnahme der Trockenrohichte des Gesteins bzw. als Zunahme der Gesamtporosität erfassen (Bild 11) und mit den Verwitterungsgraden korrelieren.

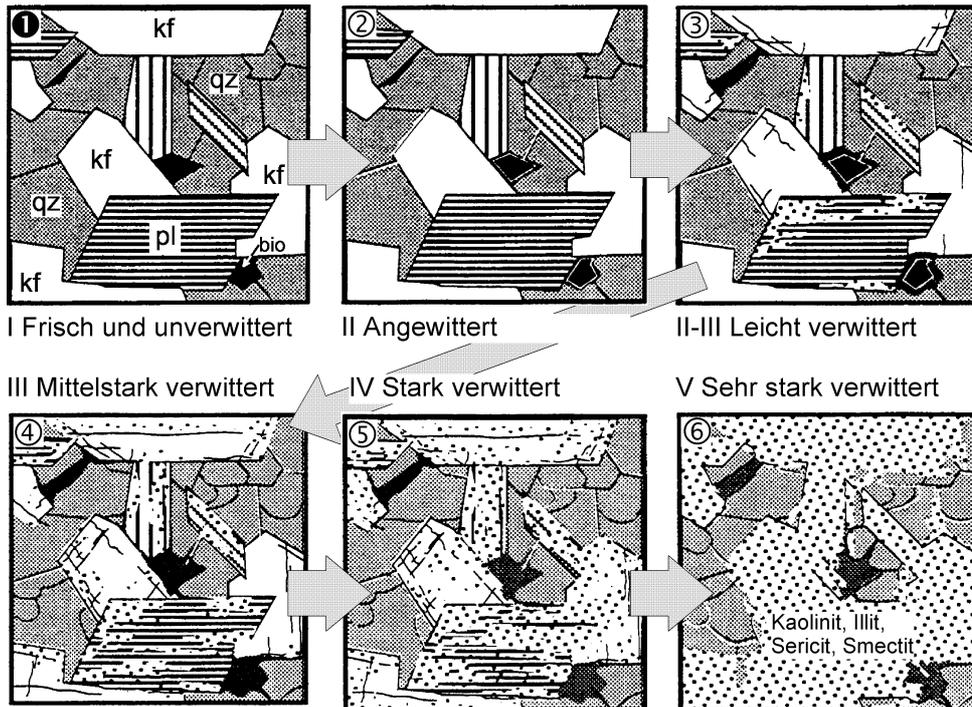


Bild 10 Verwitterungsgrade im Mikrogefüge (ohne VI Residualboden). kf – K-Feldspat, pl – Plagioclas, qz – Quarz, bio – Biotit.

Fig. 10 Weathering grades in the microfabric (omitting VI residual soil). kf – K-feldspar, pl – plagioclase, qz – quartz, bio – biotite.

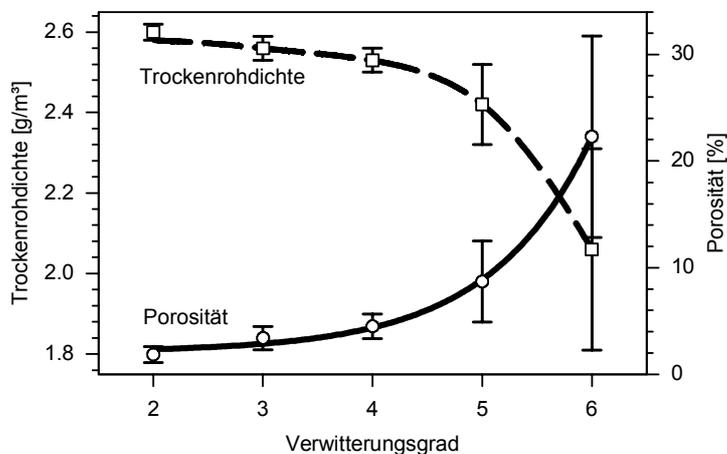


Bild 11 Zusammenhang zwischen Verwitterungsgrad und Trockenrohichte bzw. Porosität (Maximum/Mittelwert/Minimum).

Fig. 11 Connection of the weathering grade with dry density and porosity (high/mean/low value).

Nimmt man statt der ungenauen Verwitterungsgrade die Werte der Trockenrohichte bzw. die der Porosität zur Korrelation mit den Werten der einaxialen Druckfestigkeit, so ergibt sich ein wesentlich ausgeglicheneres Bild (Bild 12). Für das Diagramm wurden die Ergebnisse von Zylinderdruckversuchen und Punktlastversuchen verwendet. Die zum Vergleich eingeblendete Porositätsskala ist für die Diagramme vereinfachend auf eine Dichte von 2,65 g/cm<sup>3</sup> (= 0%) normiert.

Durch den nachgewiesenen Zusammenhang zwischen Trockenrohichte und Festigkeit läßt sich die Bohrgeschwindigkeit auch direkt mit der Trockenrohichte korrelieren (Bild 13). Das Ergebnis ist eine gute Signifikanz der errechneten Regressionsgerade und damit eine echte Quantifizierung der Verwitterung bezüglich der Bohrgeschwindigkeit mit einem Leitparameter.

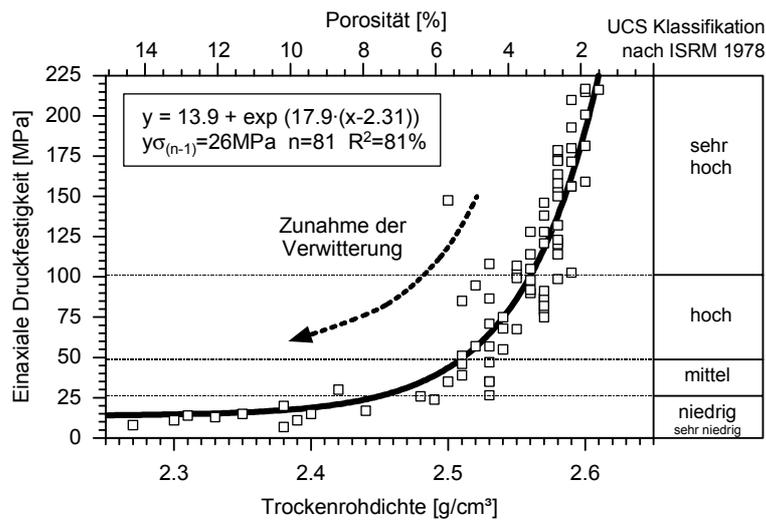


Bild 12 Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Trockenrohichte bzw. Porosität (Einzelwerte).

Fig. 12 Unconfined compressive strength versus dry density and porosity (single values).

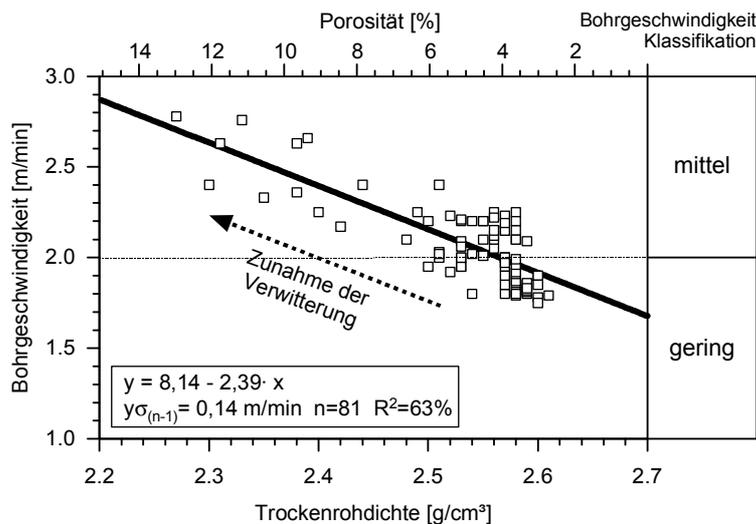


Bild 13 Bohrgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Trockenrohichte bzw. Porosität (Einzelwerte).

Fig. 13 Drilling rates versus dry density and porosity (single values).

## Schlußbemerkung

Das Fallbeispiel dürfte klargemacht haben, daß eine echte Quantifizierung von Gesteins- oder Gebirgseigenschaften sehr arbeitsaufwendig und sicher auch nicht in jedem Fall durchführbar ist. Die im Falle der Verwitterung noch gut herstellbare Verknüpfung mit einem Leitparameter – der Porosität – ist für viele der in Tabelle 1 angesprochenen Gebirgseigenschaften nicht so einfach möglich. Noch dazu ist nicht nachgewiesen, ob die Verhältnisse und nachgewiesenen Korrelationen aus einem Fallbeispiel auch auf andere geologische Verhältnisse übertragbar sind – sowohl innerhalb der Gruppe von „Granitgebirgen“, als auch darüber hinaus für andere Gesteins- bzw. Gebirgsgruppen, die beispielsweise andere physikalisch-chemische Verwitterungspfade durchlaufen.

Trotzdem sollte das Augenmerk weiterhin darauf gerichtet sein, echte physikalisch-mechanische Grundzusammenhänge zu erarbeiten. Nur durch die Kenntnis der Prozesse und Resultate ist es möglich, die Abhängigkeiten und Unwägbarkeiten der geologischen Faktoren als ineinandergreifendes System zu erfassen und Schlußfolgerungen für den Baubetrieb – beispielsweise für die Gebirgslösbarkeit und die Maschinenauswahl – zu wagen. Dazu ist allerdings auch in Zukunft noch sehr viel Grundlagenforschung notwendig.

## Literatur

1. Plinninger, R.J.; Thuro, K.: Erfahrungen bei Fräsvortrieben im Nürnberger U-Bahn-Bau. In: Felsbau 19 (2001), Nr. 1, S. 1-9.
2. Thuro, K.; Plinninger, R.J.: Geologisch-geotechnische Grenzfälle beim Einsatz von Teilschnittmaschinen. In: Felsbau, 16 (1998), Nr. 5, S. 358-366.
3. Plinninger, R. J.: Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein. Dissertation TU München, 2001.
4. Thuro, K.; Spaun, G.: Geologisch-felsmechanische Parameter zur Erfassung der Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 1997, S. 63-106, Essen: Glückauf, 1996.
5. Thuro, K.: Drillability prediction - geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. In: Geologische Rundschau, 86 (1997), S. 426-437.
6. Deketh, H.J.R. (1995): The wear of rock cutting tools. Laboratory Experiments on the abrasivity of rock. Rotterdam: Balkema, 1995.
7. Verhoef, P.N.W.: Wear of Rock Cutting Tools - Implication for the site investigation of rock dredging projects. Rotterdam, Brookfield: Balkema, 1997.
8. Thuro, K.; Plinninger, R.J.: Predicting roadheader advance rates. In: Tunnels & Tunnelling International (1999), Nr. 6, S. 36-39.
9. Thuro, K.; Plinninger, R.J.: Roadheader excavation performance – geological and geotechnical influences. In: Vouille, G.; Berest, P. (eds.): Proceedings of the 9th ISRM Int. Congr. on Rock Mech., S. 1241-1244, Rotterdam, Brookfield: Balkema, 1999.
10. Thuro, K.; Brodbeck, F.: Auswertung von TBM-Vortriebsdaten - Erfahrungen aus dem Erkundungsstollen Schwarzach. In: Felsbau 16 (1998), Nr. 1, S. 8-17.
11. Gehring, K.: Classification of drillability, cuttability, borability and abrasivity in tunnelling. In: Felsbau 15 (1997), Nr. 3, S. 183-191.
12. Leins, W.; Thum, W.: Ermittlung und Beurteilung der Sprengbarkeit von Gestein auf der Grundlage des spezifischen Sprengenergieaufwandes. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, 2118, 1970.
13. Thuro, K.; Eberhardt, E.; Gasparini, M.: Ungünstige geotechnische Verhältnisse im Tunnelbau durch Hanginstabilitäten – ein „exotisches“ Fallbeispiel. In: 13. Nationale Tagung Ingenieurgeologie, Karlsruhe (ed), Sonderheft Geotechnik (2001), S. 131-136.

14. IAEG - International Association of Engineering Geology (ed): Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. In: Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 24 (1981), S. 235-274.
15. ISRM - International Society for Rock Mechanics (ed): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Document No. 4. In: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15 (1978), S. 319-368.
16. Thuro, K.; Hecht, L.; Plinninger, R.J.; Scholz, M.; Bierer, S.: Geotechnische Aspekte von verwitterten und alterierten Graniten beim Tunnelprojekt Königshainer Berge. Geotechnical aspects of weathered and hydrothermally decomposed granite in the Königshainer Berge tunnel project. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (ed) Proceedings of the Eurock 2000 Symposium, S. 177-182, Essen: Glückauf, 2000.
17. Scholz, M.: Über die Verwitterung im Königshainer Granitmassiv und ihre Auswirkungen auf den Vortrieb beim Bau der Tunnelanlage Königshainer Berge. Petrographische, fels- und bodenmechanische Untersuchungen. Diplomarbeit TU München, 1999.
18. Bierer, S.: Gefügekundliche Untersuchungen an Graniten des Tunnelprojekts „Königshainer Berge“ unter besonderer Berücksichtigung der Verwitterung und Betrachtungen zur Bohrbarkeit und Sprengbarkeit in verwitterten Graniten beim konventionellen Sprengvortrieb. Diplomarbeit TU München, 1999.