

Geologisch-felsmechanische Aspekte der Gebirgslösung im Tunnelbau: Bohren, Sprengen, Fräsen

K. THURO

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz

R. J. PLINNINGER

Technische Universität München, Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

In vorliegender Arbeit werden die technischen Grundlagen für drei wichtige Tunnelvortriebsarten in Festgestein – Bohr- und Sprengvortrieb, Vortrieb mit Teilschnittmaschinen und Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen (Vollschnittmaschinen) – beschrieben und die erfaßbaren Leistungsparameter (Bohr-, Frä- und Schneidgeschwindigkeit sowie Sprengstoffverbrauch) und Verschleißparameter (Bohrkronenstandzeit, Rundschafftmeißelverbrauch sowie Diskenrollweg) vorgestellt. Bei der sog. „Basis-Gebirgslösbarkeit“ werden die felsmechanischen und petrographischen Kennwerte, insbesondere die spezifische Zerstörungsarbeit, die einaxiale Druckfestigkeit und der äquivalente Quarzgehalt, auf ihre Korrelation mit diesen technischen Parametern hin untersucht. Die wichtigsten geologischen Faktoren, welche sowohl steuernd als auch limitierend für Vortriebsleistung und Werkzeugverschleiß wirken, werden aufgeführt und schließlich ihre Einflüsse auf die Prozesse bei der Gebirgslösung beschrieben. Für einige – jedoch längst nicht alle – Faktoren lassen sich Leitparameter definieren, mit denen auch eine Quantifizierung möglich ist.

1 LEISTUNGSKRITERIEN BEI DER GEBIRGSLÖSUNG

1.1 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 Fräfsfortschritt
- und einem Materialverbrauchskriterium, i.d.R. dem Materialverschleiß – z.B. dem Verbrauch von Werkzeugen wie Bohrkronen, Meißel oder auch Sprengstoff.

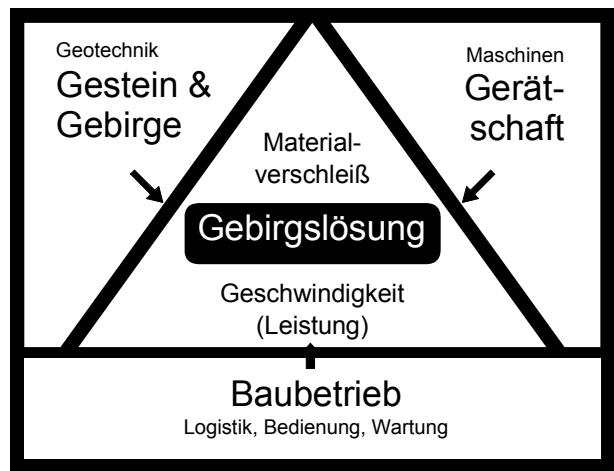


Bild 1: Konzeptionelle Übersicht der drei Haupteinflussbereiche der „Gebirgslösung“.

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 Ineinander greifen 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 Bohrkrone, 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 Erschwerisse kommen, die sich durch das Gebirge beim Ausbruchsvorgang 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 Gesamt vortrieb aus. Wird z.B. beim Fräsen ein veränderlich festes Gestein (Tonschluffstein) mit dem zutretenden Wasser (z.B. aus einer Sandsteinlage) vermengt, kann dies zu einer Schlammbildung führen. Dadurch wird das mechanische Abfordern des Fräsgutes mit einem Scherenladetisch und Kettenförderer praktisch unmöglich. Die Folge ist eine Unterbrechung des Fräsvorganges und möglicherweise händisches Abschaufeln des breiigen Materials [1], [2]. Diese Erschwerisse 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 Ineinander greifen des gesamten Systems, bestehend aus Gebirge, Maschine und Bauablauf.

1.2 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 besondes aussagekräftig erwiesen [3], [4]: Die (Netto-) Bohrgeschwindigkeit in Meter pro Minute für den Bohrfortschritt, welche aus der Einzelbohrzeit der Herstellung eines Sprengloches ermittelt wird und die Standzeit der Bohrkrone (Gesamtstandlänge) als Lebensdauer einer Bohrkrone stellvertretend für den Verschleiß in einem Gestein oder Gebirge. Qualitativ kann nach [5] 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 Haufwerksgrößen 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 Munitions mengen und damit eine große Streuung der Werte des spez. Sprengstoffverbrauchs.

Der Begriff der **Fräsbareit** wird hier für den Vortrieb mit Teilschnittmaschinen benutzt. Grundsätzlich gelten die folgenden Ausführungen allerdings auch für die technisch sehr ähnlich ausgelegten Grabenfräsen (Leistungsfräsen und Dredger, vgl. [6] und [7]) oder Straßenbelagsfräsen. Analog zur Erfassung der Bohrbarkeit werden zwei Leitparameter zur Beschreibung der Fräsbareit herangezogen [8], [9]): Es sind dies die Fräseistung (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 [5] noch qualitativ zwischen verschiedenen Verschleisstypen oder Verschleissklassen unterschieden werden.

Obwohl der Begriff Fräsbareit und Schneidbarkeit in der Baupraxis sehr häufig synonym verwendet werden, wird im Folgenden der Begriff der **Schneidbarkeit**

durchgängig nur auf den Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen (TBMs) 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.

2 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-, Fräse & Schneidgeschwindigkeit) und Verschleißparametern (Bohrkronen, Meißel-, Diskenverbrauch, Sprengmittelverbrauch) lassen sich direkt erstellen.

Tabelle 1: Quantifizierbare Faktoren der Gebirgslösung und deren Auswirkung auf Leistung L und / oder Verschleiß V.

Einfach quantifizierbare Parameter, die an Gesteinsproben im Labor bestimmt werden können		Auswirkung auf	
Einaxiale Druckfestigkeit	UCS [MPa]	L	(V)
Zerstörungsarbeit	Wz [kJ/m ³]	L	(V)
Elastizitätsmodul	E [GPa]	(L)	(V)
Spaltzugfestigkeit	SPZ [MPa]	L	(V)
Trockenrohdichte, Porosität	D [g/cm ³], P [%]	L	V
Aquivalenter Quarzgehalt	EQu [%] (im Vergleich zu Quarz; THURO 1996)	--	V
Gesteinsabrasivitäts-Index - Rock Abrasivity Index	Index-Wert; RAI = EQu x UCS (PLINNINGER 2001)	--	V
Abrasivitätsbeiwerte aus Modellversuchen	Cerchar Abrasivitäts-Index CAI, LCPC-Abrasimetertest ABR	--	V
Einfach quantifizierbare Parameter, deren Einfluß (noch) nicht quantifiziert werden kann		Auswirkung auf	
Primärer Spannungszustand	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ [MPa], φ [°]	L	(V)
Wasserzufluss & Wasserchemismus	Mengen, Chemische Signatur	L	(V)
Quellvermögen (Quellhebung, Quelldruck)	h [%], σ [MPa]	L	(V)
Semiquantitativ erfassbare Parameter, deren Werte keine physikalischen Parameter darstellen		Auswirkung auf	
Abstände / Dichte der Trennflächen, Zerbrechungsgrad	Klüftigkeitsziffer (Stini), Zerlegungsgrad (ÖNORM 4401 T1), Rock Quality Designation RQD [%], (DEERE 1963) Scanlines (PRIEST 1993), Kluftabstände [cm]	L	--
Anisotropie / Schieferung	Winkel [°] zur Arbeitsrichtung (Tunnel- / Bohrachse)	L	--
Qualitativ erfassbare Parameter, die indirekt mit → quantitativen Kennwerten oder Verfahren in Zahlen gefaßt werden können		Auswirkung auf	
Verzahnungsgrad im Mikrogefüge	→ Zerstörungsarbeit, Einaxiale Druckfestigkeit, RAI	L	V
Qualität des Bindemittels	→ Zerstörungsarbeit, Einaxiale Druckfestigkeit, RAI, Trockenrohdichte, Porosität	L	V
Verwitterung & hydrothermale Alteration (Zersetzung)	→ Trockenrohdichte, Porosität	L	V
Einfluß veränderlich fester Gesteine	→ Gehalt z.B. an Ton-Schluffsteinen	L	(V)
Einfluß der Inhomogenität	→ Prozentualer Anteil an der Ortsbrust (Fläche) oder im Abschlag (Volumen), Mächtigkeiten, Orientierung	L	V

Ausnahmen bilden Parameter, deren Einfluß zwar augenscheinlich ist, wie der primäre Spannungszustand [12], 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 physi-

kalischen 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], [3].

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 IAEG [13] und ISRM [14]). Eine indirekte Möglichkeit zur Quantifizierung ist durch die Verwendung von quantifizierbaren Parametern gegeben, wie z.B. von Festigkeitsparametern oder dem Rock Abrasivity Index [5] für Verzahnungsgrad und Bindemittelqualität. Die Verwendung der Trockenrohdichte und der Porosität eines Gesteins als Leitparameter für die Verwitterung [15] 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.

3 FELSMECHANISCHE PARAMETER FÜR DIE LÖSELEISTUNG

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. Gleches gilt für die petrographischen (Äquivalenter Quarzgehalt [3]) oder Indexparameter (Rock Abrasivity Index [5]) mit den Verschleißparametern.

Bereits in früheren Arbeiten wurde auf Eignung verschiedener felsmechanischer Kennwerte für die Korrelation mit der Bohrgeschwindigkeit eingegangen [3], [4].

Die unten aufgeführten felsmechanischen bzw. petrographischen Parameter haben sich zur Korrelation mit den Leistungs- und Verschleißparametern als besonders geeignet erwiesen:

- Die *spezifische Zerstörungsarbeit* erwies sich als hochsignifikanter Parameter bezüglich der Bohrgeschwindigkeit, dem spezifischen Sprengstoffverbrauch, der Frä- und der Schneidgeschwindigkeit. Dabei müssen – wie bei allen Korrelationen mit felsmechanischen oder petrophysikalischen Kenn-

werten – die Leistungsdaten der verwendeten Gerätschaften berücksichtigt werden.

- Die *einaxiale Druckfestigkeit* erwies sich als signifikanter Parameter bezüglich der oben genannten Leistungsparameter. Als günstig hat sich herausgestellt, daß die Zerstörungsarbeit und die einaxiale Druckfestigkeit im selben Versuch ermittelt werden können. Kommt der einaxiale Druckversuch z.B. wegen niedriger Bohrkernqualität nicht in Frage, so können Druckfestigkeitswerte über den Punktlastversuch abgeschätzt werden [16].
- Die *indirekte Zugfestigkeit (Spaltzugfestigkeit)* erwies sich ebenfalls als signifikanter Parameter bezüglich der oben genannten Leistungsparameter. Da sich bisher jedoch kein Unterschied zum Signifikanzniveau der *einaxialen Druckfestigkeit* ergab, wurde häufig aus praktischen (Kosten-) Gründen auf die Ermittlung von indirekten Zugfestigkeiten verzichtet.
- Geotechnische Verschleißindizes (z.B. der Äquivalente Quarzgehalt, der Gesteinsabrasivitätsindex RAI, Schimatzek-Index F_{Schim}) erwiesen sich als hochsignifikanter Parameter bezüglich der Standzeit der Bohrkronen. Leider liegen zur Korrelation des Meißelverbrauchs von Teilschnittmaschinen immer noch zu wenige Daten für stichhaltige Korrelationen vor [5]. Ähnliches gilt für Tunnelbohrmaschinen: Hier sind die Verschleißwerte durch die üblicherweise langen Rollstrecken und die damit zu geringe Auflösung i.d.R. nicht zur Charakterisierung von kurzfristig wechselnden Gebirgsverhältnissen verwendbar.

Im folgenden Abschnitt sollen die wesentlichen Ergebnisse dieser Korrelationen von Leistungs- und Verschleißparametern mit den felsmechanischen und petrographischen Parametern vorgestellt werden.

3.1 Bohrgeschwindigkeit

In Bild 3 ist die Bohrgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zerstörungsarbeit aufgetragen. Der hohe Wert des Bestimmtheitsmaßes ($R^2=85\%$) belegt die hohe Güte der Korrelation. Den am häufigsten verwendeten Parameter zur Korrelation mit der Bohrgeschwindigkeit stellt jedoch nach wie vor die einaxiale Druckfestigkeit dar. Die einaxiale Druckfestigkeit hat den Vorteil, daß sie auch über indirekte Versuche, insbesondere den Punktlastversuch, ermittelt werden kann [16]. Deshalb erscheint es nach wie vor wichtig, Korrelationsdiagramme mit der einaxialen Druckfestigkeit aufzustellen. Allerdings ist der Zusammenhang in Bild 4 wesentlich weniger signifikant als beim Diagramm der Zerstörungsarbeit.

Möchte man das Diagramm der einaxialen Druckfestigkeit beispielsweise als Prognoseinstrument verwenden, so zeigen die deutlichen Ausreißer an, daß die Druckfestigkeit nicht optimal geeignet ist, die Bohrgeschwindigkeit vorherzusagen.

In den Diagrammen der Bild 2 ist die Bohrgeschwindigkeit gegen einige weitere felsmechanische Parameter

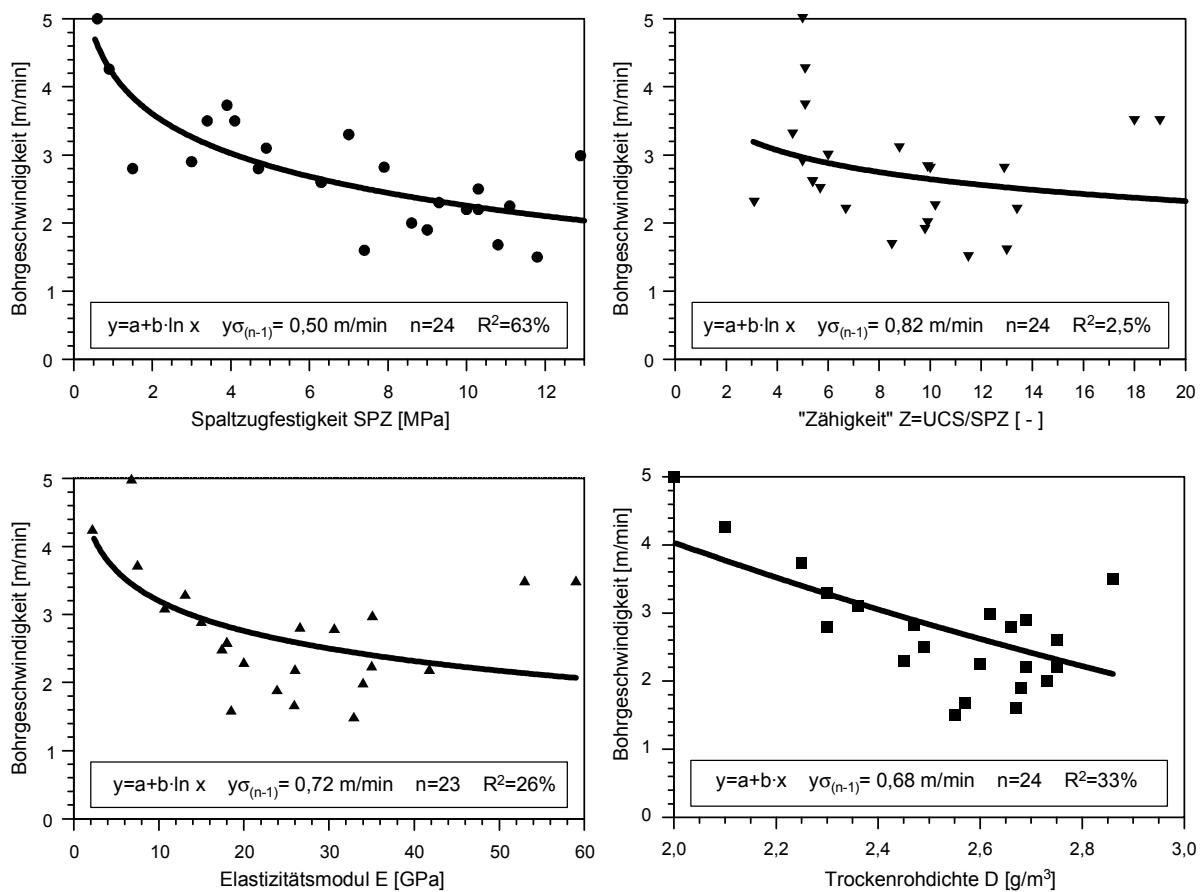


Bild 2: Bohrgeschwindigkeit (mit dem 20 kW-Bohrhammer COP 1440), aufgetragen gegen die Spaltzugfestigkeit, das Verhältnis von Druck- zur Zugfestigkeit („Zähigkeit“), den Elastizitätsmodul und die Trockenrohdichte. Zusätzlich angegeben sind einige statistische Parameter ($y_{\sigma(n-1)}$ = Standardabweichung, n = Anzahl der Werte, R^2 = Bestimmtheitsmaß) nach [3].

für den 20 kW-Bohrhammer COP 1440 aufgetragen. Dabei zeigt nur die Spaltzugfestigkeit eine ähnlich gute Signifikanz der Korrelation wie die einaxiale Druckfestigkeit. Sowohl das Verhältnis von Druck- zur Zugfestigkeit – in der Literatur oft als „Zähigkeit“ bezeichnet – als auch der Elastizitätsmodul ergeben schlechtere Werte für das Bestimmtheitsmaß und damit keine Signifikanz. Demgegenüber zeigt die Trockenrohdichte der Gesteine sogar noch eine bessere Korrelation.

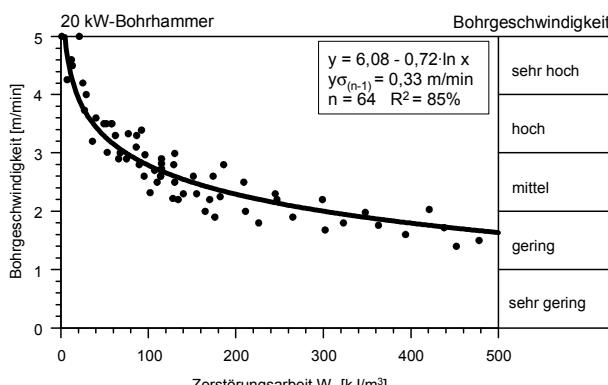


Bild 3: Bohrgeschwindigkeit, aufgetragen gegen die Zerstörungsarbeit [17].

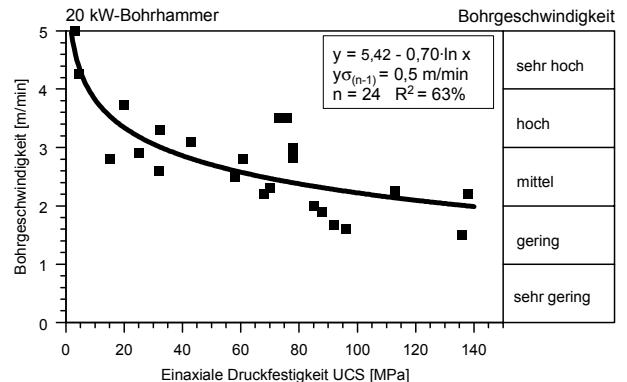


Bild 4: Bohrgeschwindigkeit, aufgetragen gegen die einaxiale Druckfestigkeit [17].

Obwohl viele Autoren aufgrund bruchmechanischer Überlegungen zu dem Schluß kommen, daß die Zugfestigkeit eine weit größere Rolle spielen müsse als die einaxiale Druckfestigkeit [18], [19], ließ sich diese Behauptung bisher weder durch unsere Arbeiten noch durch die anderer Bearbeiter [20], die bereits über mehrere Jahrzente Versuchserfahrung verfügen, experimentell bestätigen.

3.2 Sprengstoffverbrauch

Beim Sprengvortrieb ergibt sich ebenfalls eine brauchbare Korrelation der spezifischen Zerstörungsarbeit 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).

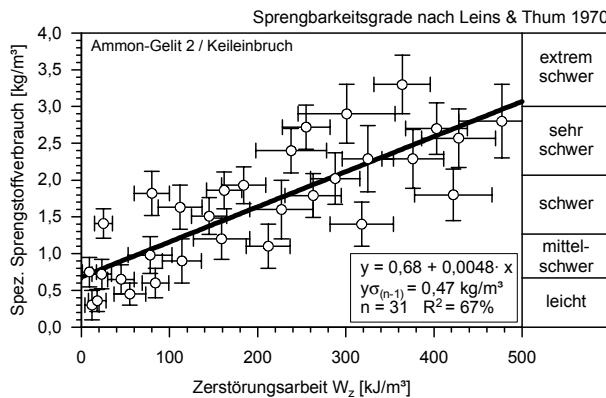


Bild 5: Spezifischer Sprengstoffverbrauch aufgetragen gegen die Zerstörungsarbeit (31 Homogenbereiche aus 8 Tunnelprojekten). Standardabweichungen der Werte als Fehlerbalken [21].

3.3 Frägeschwindigkeit

Auch bei der Untersuchung von Vortrieben mit Teilschnittmaschinen stellte sich heraus, daß die Zerstörungsarbeit (Integral der Spannungs-Längsdehnungskurve beim einaxialen Druckversuch inclusive dem Post-failure-Bereich) die besten Korrelationen mit der Fräseleistung ergibt (Bild 6). Die Signifikanz der errechneten Abhängigkeit mit der einaxialen Druckfestigkeit ist demgegenüber weniger befriedigend. (Bild 7).

Die einaxiale Druckfestigkeit stellt zum gegenwärtigen Stand der Technik beim TSM-Vortrieb immer noch den am weitesten verbreiteten Parameter für die Prognose der Fräseleistung dar. Allerdings ist die Fräseleistung ganz besonders vom Zerlegungsgrad des Gebirges abhängig.

In den Fräseleistungsdigrammen, welche die Maschinenhersteller für ihre Teilschnittmaschinen liefern, wird deshalb immer eine maximale und eine minimale Leistungskurve angegeben. Aller Erfahrung nach korrelieren diese Kurven mit dem Durchtrennungsgrad des Gebirges, da – wenn das Gebirge entsprechend „vorzerkleinert“ ist – die Fräseleistung entsprechend ansteigt. Bild 8 zeigt ein solches Fräseleistungsdigramm einer schweren Teilschnittmaschine mit 300 kW installierter Leistung, Bild 9 eines für eine leichte Teilschnittmaschine mit 132 kW. Das letztere Diagramm entspricht dem von Bild 7 mit vertauschten Achsen; die Datenpunkte sind zur Information eingetragen.

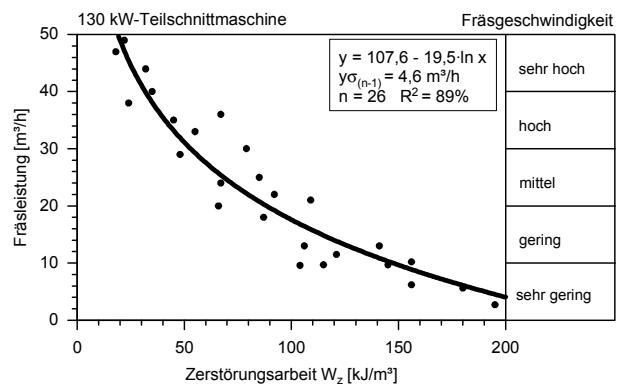


Bild 6: Fräseleistung, aufgetragen gegen die Zerstörungsarbeit (Tonschiefer und Quarzite, Abwassertunnel Zeulenroda [9]).

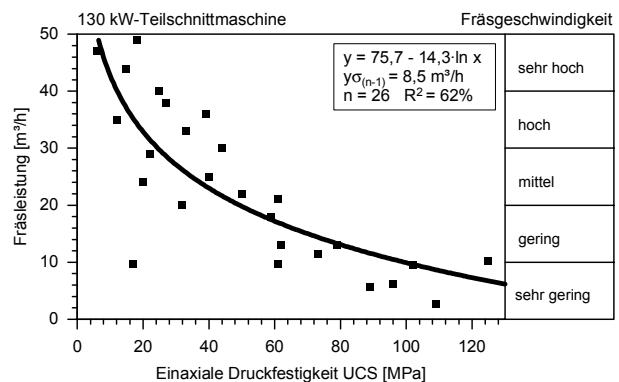


Bild 7: Fräseleistung, aufgetragen gegen die einaxiale Druckfestigkeit [9].

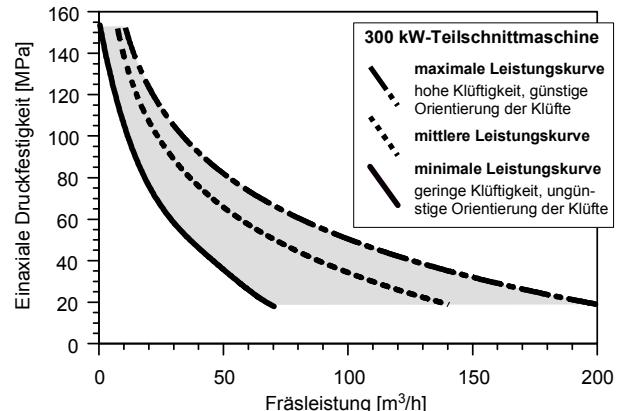


Bild 8: Fräseleistungsdigramm einer Teilschnittmaschine mit 300 kW Leistung in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit und des Zerlegungsgrades (Paurat E-242B) nach [2].

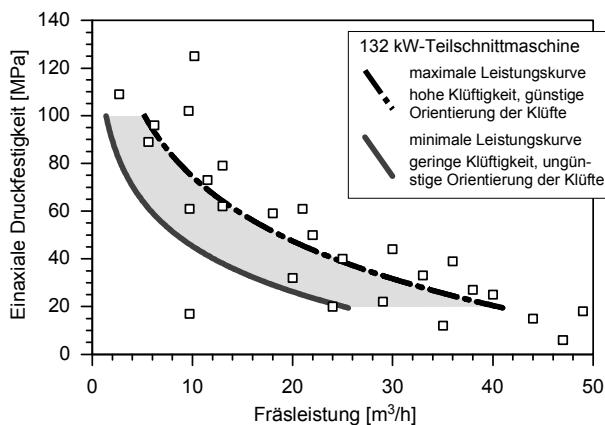


Bild 9: Fräseleistungsdiagramm einer Teilschnittmaschine mit 132 kW Leistung in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit und des Zerlegungsgrades (AC-ET 120) nach [2].

3.4 Spezifische Penetration

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Schneidbarkeit mit einer Hartgestein-Tunnelbohrmaschine (Bild 11), wenn man nur Maschinenhübe in wenig zerlegtem Gebirge und bei gleicher Orientierung der Schieferung miteinander korreliert.

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.

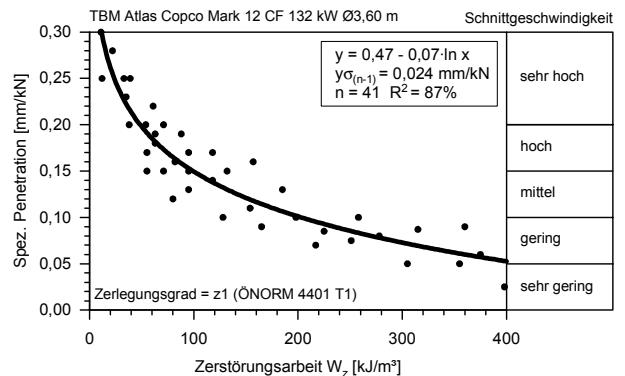


Bild 11: Spezifische Penetration aufgetragen gegen die Zerstörungsarbeit (Phyllite und Karbonatschiefer, Schönbergtunnel, Schwarzach). Atlas Copco Mark 12 CF Ø 3,60 m [21].

3.5 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 [22], [23].

Den Betrachtungen liegt die Einteilung in Verwitterungsgrade [13], [14] zugrunde, deren Verwitterungsreihe in Bild 10 gegeben ist. Ein zusätzlicher Verwitterungsgrad II-III „leicht verwittert“ wurde eingeführt, um die Lücke zwischen einer nur randlichen Einfärbung

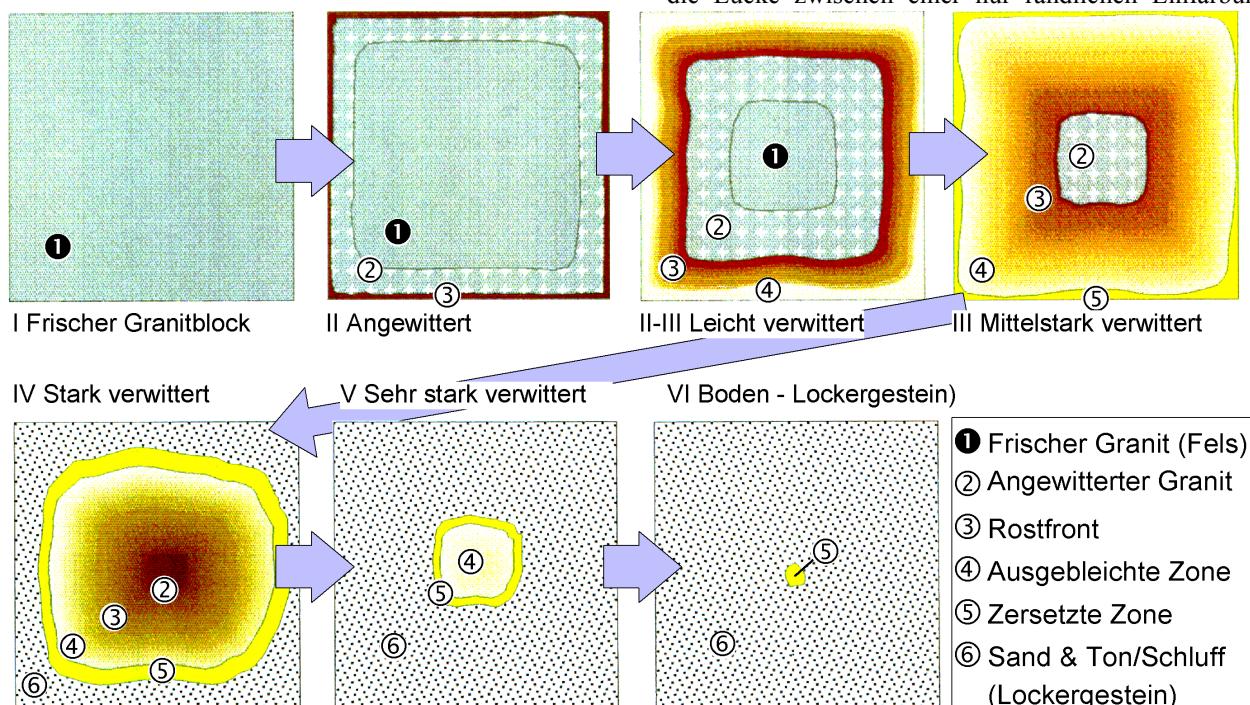


Bild 10: Schematische Darstellung der Verwitterung eines Kluftkörpers in Granit nach der Verwitterungsklassifizierung von IAEG [13] und ISRM [14] (aus [22], verändert).

bzw. Gesteinsanwitterung und einem bereits zu 40-50% zersetzenem Gebirge zu schließen. In den weiteren Diagrammen wurden die „neuen“ Verwitterungsgrade deshalb mit arabischen Zahlen durchnummertiert, d.h. VI = 7, V = 6, IV = 5, III = 4, II-III = 3 und II = 2. Frischer, unverwitterter Granit wurde nicht angetroffen.

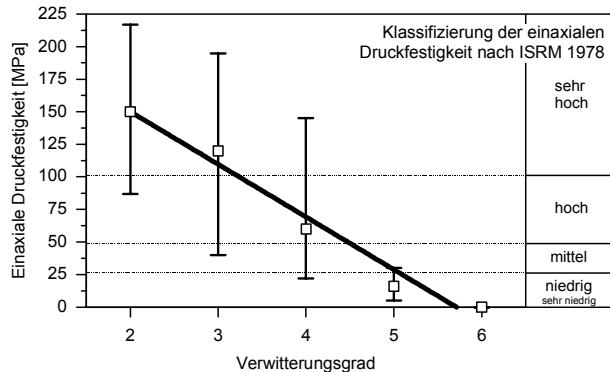


Bild 12: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades (Max./Mittelwert/Min) nach [21].

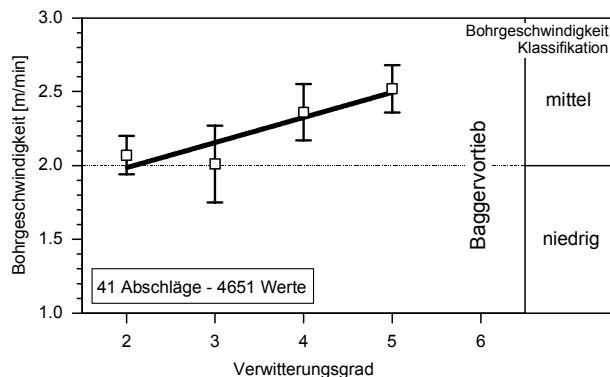


Bild 13: Bohrgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades (mit Standardabw.) nach [21].

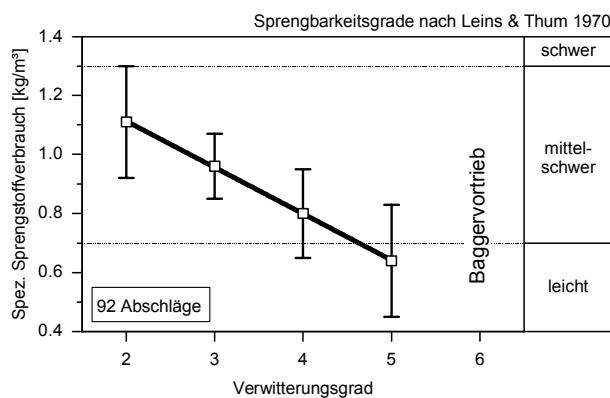


Bild 14: Spezifischer Sprengstoffverbrauch in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades (St.abw.) nach [21].

Setzt man die felsmechanischen (hier die einaxiale Druckfestigkeit) und technischen Kennwerte (Bohrgeschwindigkeit, spez. Sprengstoffverbrauch) den Verwitterungsgraden gegenüber (Bild 12, Bild 13, Bild 14), 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.

Doch an welchem Kennwert lässt sich das Stadium des physikalisch-chemischen Verwitterungsprozesses ablesen, welcher Kennwert kann damit als Leitparameter dienen? Bild 15 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 Mineraldichte. Die einhergehende Gefügeauflockerung und Erhöhung der Mikroporosität führt dabei zur Öffnung von Mikrorissen und damit insgesamt zur Volumenvergrößerung. Damit lässt sich die Verwitterung als Abnahme der Trockenrohdichte des Gesteins bzw. als Zunahme der Gesamtporosität erfassen (Bild 16) und mit den Verwitterungsgraden korrelieren.

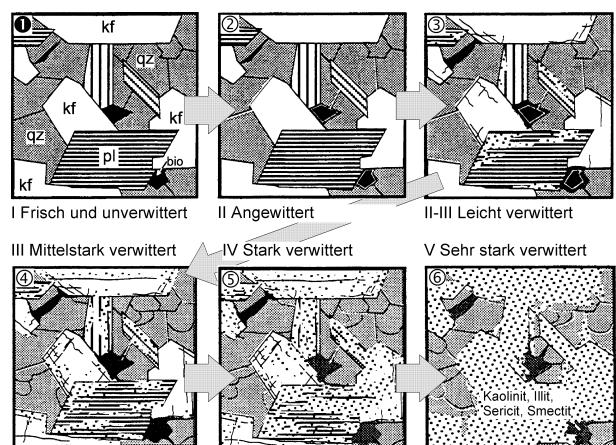


Bild 15: Verwitterungsgrade im Mikrogefüge eines Granits aus Dünnschliffuntersuchungen (nach [22], verändert) ohne VI – Völlig verwittert (Boden). kf – K-Feldspat, pl – Plagioklas, qz – Quarz, bio – Biotit.

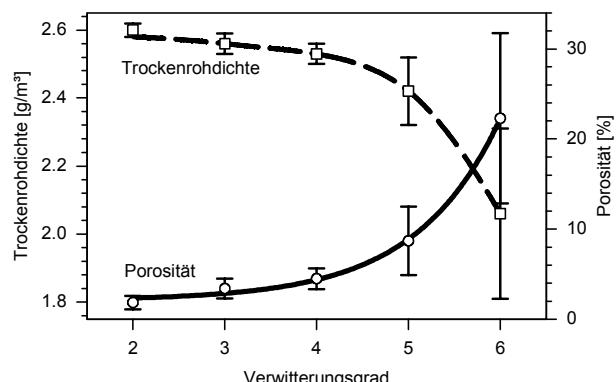


Bild 16: Verwitterungsgrad in Abhängigkeit der Trockenrohdichte bzw. der Porosität (des Porenvolumens) mit Maximum/Mittelwert/Minimum nach [21].

Nimmt man statt der ungenauen Verwitterungsgrade die Werte der Trockenrohdichte bzw. die der Porosität zur Korrelation mit den Werten der einaxialen Druckfestigkeit, so ergibt sich ein wesentlich ausgeglicheneres Bild (Bild 17). Für das Diagramm wurden die Ergebnisse

von Zylinderdruckversuchen und Punktlastversuchen verwendet. Die zum Vergleich eingeblendete Porositätskala ist für die Diagramme vereinfachend auf eine Dichte von $2,65 \text{ g/cm}^3$ ($= 0\%$) normiert.

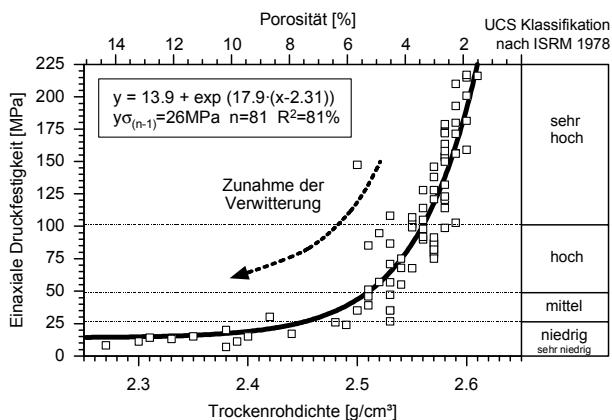


Bild 17: Einaxiale Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Trockenrohdichte bzw. Porosität nach [21].

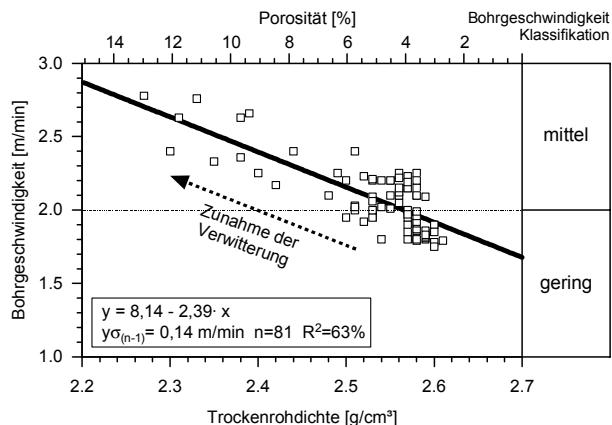


Bild 18: Bohrgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Trockenrohdichte bzw. Porosität nach [21].

Durch den nachgewiesenen Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und Festigkeit lässt sich die Bohrgeschwindigkeit auch direkt mit der Trockenrohdichte korrelieren (Bild 18). Das Ergebnis ist eine gute Signifikanz der errechneten Regressionsgerade und damit eine echte Quantifizierung der Verwitterung bezüglich der Bohrgeschwindigkeit mit einem Leitparameter.

4 WERKZEUGVERSCHLEISS IM TUNNELBAU

Der Kontakt mit dem zu lösenden oder bereits gelösten Gestein kann bei einer ganzen Reihe von Bauabläufen Verschleiß an den eingesetzten Fahr- und Werkzeugen verursachen. Bei der ingenieurgeologischen Betrachtung des Verschleißes gilt der Hauptaugenmerk dem Verschleiß der zur Gebirgslösung eingesetzten Werkzeuge (Baggerzahn-, Bohrkronen-, Meißel- oder Diskenverschleiß). Die Ursachen hierfür liegen einerseits darin, dass der Verschleiß der Lösewerkzeuge in der Regel das kostenintensivste Verschleißphänomen darstellt, andererseits aber auch darin, dass gerade hierfür geologische Faktoren eine maßgebliche Rolle spielen. Andere Ver-

schleißteile, wie beispielsweise Bohrstangen, Muffen sowie Einstechenden (Bohr/Sprengverfahren), Meißelhalter (Teilschnittmaschine), Diskenlager (TBM) oder Fahrwerke (Gleisketten / Reifen) besitzen in der Regel die mehrfache Lebensdauer eines Lösewerkzeuges. Zudem spielen für deren Verschleiß oft bau- und maschinentechnische sowie menschliche Faktoren eine weitaus größere Rolle als Gesteins- und Gebirgseigenschaften.

Dennoch ist nicht zu erkennen, dass auch die Lebensdauer solcher Bauteile durch die spezifischen Eigenschaften des Gebirges stark beeinflusst werden kann: So können z.B. Bohrstangen durch das Zufallen der abgebohrten Löcher verschlissen werden, durch häufiges Abweichen der Bohrung von der Bohrrichtung vermehrt brechen oder Fahrzeuggbereifung und Baugruppen von Fördereinrichtungen von erheblichem - geologisch bedingtem - Verschleiß betroffen sein.

4.1 Verschleißparameter und Einflußfaktoren

Anders als andere Materialgrößen, wie z.B. Druckfestigkeit oder Zugfestigkeit, stellt der Verschleiß keine „stoffbezogene“ Größe dar, für die ein physikalischer Kennwert ermittelt werden kann. Bei Verschleißvorgängen handelt es sich vielmehr um generell sehr komplexe zusammengesetzte tribologische Systeme mit Wechselbeziehungen zwischen mehreren Komponenten (Bild 19). Der Verschleiß am Werkzeug ist dabei nur eines von vielen Resultaten des Verschleißvorgangs.

Zwei Kenngrößen können dabei zur Beschreibung des Verschleißes eingesetzt werden: Die Werkzeugverschleißform, auch als qualitativer Verschleiß bezeichnet, sowie die Werkzeugverschleißrate oder quantitativer Verschleiß:

- Die Werkzeugverschleißform beschreibt die zu beobachtende, spezifische Ausbildung des Verschleißes am Werkzeug. Sie kann einfach mit Hilfe spezifischer Klassifizierungsbilder (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4) bestimmt werden.
- Die Werkzeugverschleißrate beschreibt die Geschwindigkeit des Materialverlustes am Werkzeug. Dieser Kennwert wird üblicherweise als Kubatur- oder längenbezogene Verschleißrate angegeben. Übliche Kennwerte für die verschiedenen Gebirgslösungsarten stellen die Bohrkronenstandlänge (gebohrte Laufmeter / Krone), der spezifische Meißelverschleiß (Meißel / gefräste m^3 fest) bzw. die Diskenlauflänge oder der Rollweg (km / Diske) dar. Die Werkzeugverschleißrate stellt einen grundlegenden Faktor für die Kostenermittlung im Hohlräumbau dar. Während der Bauausführung wird die Werkzeugverschleißrate mittels Messungen an Einzelwertzeugen oder aber durch auf Lager- und Lieferlisten gestützte Berechnungen ermittelt.

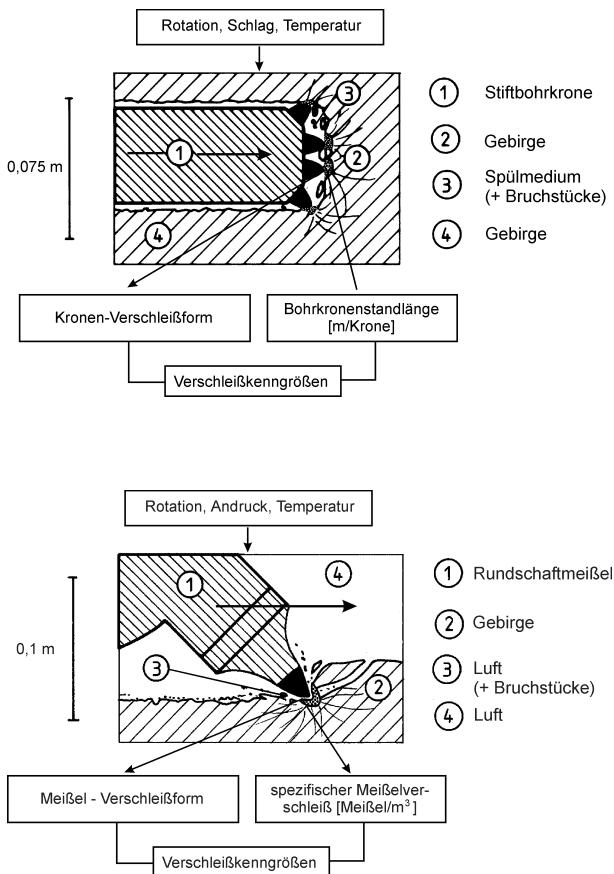


Bild 19: Beispiele für die komplexen Systembedingungen beim Verschleiß von Stiftbohrkronen und Rundschafftmeißeln [5].

Die komplexe Struktur der Verschleißsysteme führt dazu, daß eine ganze Reihe von Faktoren aus den Bereichen Geologie, Maschinen / Werkzeuge sowie Logistik / Baubetrieb erheblichen Einfluß auf Art und Werkzeugverschleißrate nehmen können (vgl. Bild 1). Eine vollständige Aufzählung aller Faktoren, die sich in entscheidender Weise auf den Werkzeugverschleiß auswirken können, würde bei weitem den Rahmen dieses Beitrags sprengen [5].

4.2 Klassifikation von Werkzeugverschleiß

4.2.1 Qualitativer Verschleiß: Die Werkzeugverschleißform

Bei der Gebirgslösung unterteage ist unter realen Verhältnissen eine genaue Beobachtung des Vorgangs und exakte Bestimmung der Systembedingungen des Tribosystems unmöglich. Die Beurteilung der Verschleißvorgänge ist in der Regel nur auf theoretischer Basis möglich, gestützt auf Beobachtungen während des Lösungsvorgangs, nachträgliche Untersuchungen am Werkzeug und - in seltenen Fällen - nachträgliche Beobachtungen am Gebirge. Vereinfacht werden von [5] vier Kategorien von Verschleißvorgängen zusammengefasst:

- **Abrasivverschleiß** als „herkömmlicher“, mechanischer Verschleiß infolge von gleitenden Kontaktten zwischen Werkzeug- und Gesteinsoberfläche bzw.

Partikeln. Abrasivverschleiß stellt einen mehr oder minder kontinuierlichen Materialabtrag vor allem durch mikroskopische Abrasions- und Adhäsionsvorgänge dar.

- **Verschleiß durch Sprödbruch** von Werkzeugmaterialien infolge hoher Spannungen, z.B. bei schlagender Beanspruchung (Prall- und Stoßverschleiß). Sprödbrüche führen oft zu einem katastrophalen Versagen von Teilen des Lösewerkzeuges (Sprödbruch von HM-Stiften, Bruch des Kronenkörpers oder Meißelschafts).
- **Thermischer Verschleiß** infolge hoher Temperaturen am Lösewerkzeug. Er repräsentiert keine eigenen Verschleißarten, sondern wird lediglich dann ausgewiesen, wenn durch hohe Werkzeugtemperaturen herkömmliche Verschleißvorgänge mit unverhältnismäßig hoher Verschleißrate ablaufen. Hierdurch kann sowohl kontinuierlicher Materialabtrag, als auch katastrophales Versagen forcier werden. Thermischer Verschleiß tritt nach eigener Erfahrung nur bei der Gebirgslösung durch Teilschnittmaschine auf und ist für das drehschlagende Bohren bei Einsatz eines effektiven Spülsystems zu vernachlässigen.
- **Sonderformen des Verschleißes** fassen nicht klassifizierbare Verschleißbilder jeglicher Ursache (Totalverschleiß) sowie technisch bedingte oder durch Kontakte zwischen Werkzeugoberfläche und Zwischenstoffen (Spülmedien und mitgeführte Stoffe) hervorgerufenen Verschleiß zusammen. Neben den o.a. Verschleißarten des Abrasiv-, Sprödbruch- und thermischen Verschleißes zusätzlich auch Erosionsverschleiß und Kavitationserosion beteiligt. Erosionsverschleiß und Kavitationserosion rufen kontinuierlichen Materialabtrag hervor und sind in höchstem Maße von maschinenbedingten Parametern, wie z.B. Art, Menge und Fließgeschwindigkeiten des eingesetzten Spülmediums abhängig.

Diese Verschleißkategorien können näher unterteilt und in Form aussagekräftiger Schemata dargestellt werden. Die Begutachtung der qualitativen Verschleißform gibt als „Fingerabdruck“ des Verschleißvorgangs Hinweise auf die Ursache des Werkzeugverschleißes und lässt Rückschlüsse auf das gebohrte / gefräste Gebirge oder spezifische Probleme beim Maschinen- und Werkzeugeinsatz zu. Die geschilderten Phänomene gelten dabei strenggenommen nur für Werkzeuge, die aus einem Stahlgrundkörper und eingesetzten Hartmetallspitzen aufgebaut sind (Stiftbohrkronen, Rundschafftmeißel). Eine Übertragung auf Rollenmeißel und Disken ist aufgrund der Andersartigkeit des Gebirgslösungsvorgangs und der Werkzeugbeanspruchungen nicht direkt möglich. Nach den bisherigen Erfahrungen lassen sich verallgemeinernd folgende typische Ursachen für die einzelnen Verschleißformen aufzählen:

Normaler Verschleiß (A1) ist Folge eines mehr oder minder gleichmäßigen, Hartmetall als auch Werkzeugträger betreffenden Abrasivverschleißes. Er tritt in der Regel bei festen, abrasiven Gesteinen, wie z.B. unverwitterten Quarziten, Gneisen, Graniten und sehr gut zementierten Quarzsandsteinen, auf. Bei diesen Gesteinen

dringt das Werkzeug nur in geringem Maße in das Gebirge ein, so dass vor allem der Hartmetallstift in direkten 2-Körper-Kontakt mit dem Gebirge tritt. Obwohl Minerale, die als abrasiv gegenüber Hartmetall gewertet werden müssen, gesteinsbildend nicht oder nur sehr untergeordnet auftreten, werden die Hartmetalleinsätze dennoch - bei niedrigen Verschleißraten - auch durch weniger abrasive Minerale abgenutzt.

Bevorzugter *Verschleiß des Werkzeugträgermaterials* (A2) mit der Gefahr von *Stiftausbrüchen infolge Bettungsverlust* (A3) ist ein typisches Phänomen beim Lösen wenig fester Gesteine. Häufig (und hier mit z.T. hohen Verschleißraten verbunden) ist dieser Verschleißtyp bei wenig festen Gesteinen mit hohem Gehalt an schleißscharfen Mineralen, wie z.B. mürben Quarzsandsteinen, sandigen Mergelsteinen, verwitterten oder hydrothermal zersetzen Graniten oder Gneisen, anzutreffen. Auch bei wenig festen Gesteinen mit geringer Abrasivität ist (bei entsprechend niedrigen Verschleißraten) vor allem der Werkzeugträger vom Abrasivverschleiß betroffen. Ursache für diesen Verschleißtyp ist die Tatsache, dass bei identischer Exposition gegenüber Abrasivverschleiß die verschleißresistenteren Hartmetallstifte einer geringeren Verschleißrate unterworfen sind als das „weichere“ Werkzeugträgermaterial. Da in den angesprochenen Gesteinen auch eine größere Eindringtiefe der Werkzeuge und ein großer Andrang gelösten Materials anzutreffen sind, tritt andererseits auch der Werkzeugträger vermehrt in Kontakt mit Partikeln und Bruchstücken. Eine fehlende oder schlechte Verbindung zwischen Hartmetallstift und Werkzeugträger forciert vollständige Stiftausbrüche (A3).

Kaliberverschleiß von Bohrkronen (K-A4, K-A5) ist typisch für instabile Gebirgsverhältnisse in abrasivem Gebirge, wenn das erstellte Bohrloch innerhalb kürzester Zeit deformiert wird und/oder einzelne "Keile" in den Hohlraum gedrückt werden. Damit kann abrasives Gestein auf die Mantelfläche der Krone einwirken. Häufig kann als Frühstadium ein seitliches "Anschmiegen" der peripheren Hartmetallstifte an die Bohrlochwandung beobachtet werden, bei fortschreitendem Kaliberverschleiß ist häufig das Ausbrechen der peripheren Hartmetallstifte infolge hoher Scherbeanspruchung zu erkennen, während die stirnseitigen Stifte oftmals noch wenig Verschleiß zeigen. Dieser Verschleißtyp kann bis hin zu „papierdünnen“ Kronenaußenseiten gehen, wie sie von THURO vom Inntaltunnel beschrieben werden [17].

Makroskopisches Sprödbruchversagen von Hartmetallstiften (S1, S2) ist primär unabhängig von der Abrasivität des zu lösenden Gesteins und hängt vor allem von der Gesteinsfestigkeit, dem Gesteinsgefüge, dem Gebirgsverband sowie zahlreichen Begleitumständen, wie Maschinen- und Werkzeugeigenschaften, Sicherungsmitteln etc. ab. Hierbei treten Abrasion und Adhäsion als Verschleißvorgänge gegenüber Prall- und Stoßbeanspruchungen oder thermischen Belastungen zurück. Vor allem die Verschleißform S2 (vollständiger Ausbruch des Hartmetallstifts) kann ihre Hauptursache auch in einer schlechten Einpassung und Verbindung von Hartmetallstift und Werkzeugträger haben. Folgende

metallstift und Werkzeugträger haben. Folgende geologische Verhältnisse sind typische Ursachen für vorrangigen Verschleiß durch Sprödbruchversagen von Hartmetallstiften:

- Drehschlagendes Bohren: feste Gesteine mit Trennflächen, wie geöffneten oder mit Lockergestein gefüllten Klüften; stark inhomogen zusammengesetzte Gesteine mit sehr harten Komponenten > ca. 2 cm, wie Konglomerate und Fanglomerate.
- Teilschnittmaschine: stark inhomogene Gebirgsverhältnisse mit festen und wenig festen Partien in Wechsellagerung, wie z.B. Konkretionslagen (bei Rundschaftmeißeln).
- Teilschnittmaschine: Hohe Werkzeugtemperaturen können zur Veränderung der Materialeigenschaften und in der Folge zu vermehrtem Sprödbruchversagen führen.
- Drehschlagendes Bohren + Teilschnittmaschine: Vor allem beim Bohren von Spießen durch bestehende Ausbaubögen, aber auch beim Erstellen von Ankerlöchern durch bzw. Fräsen von stahlarmierter Sicherung kommt es vermehrt zu Sprödbruchversagen durch Ausschlagen oder Bruch von Hartmetallstiften.

Sprödbruchversagen von Meißel- oder Kronenschaft (S3) ist in der Regel Gewaltschaden oder Materialdefekt und lässt kaum Rückschlüsse auf geologische Ursachen zu. Insbesondere bei Rundschaftmeißeln können jedoch nicht nur fehlerhafte Werkzeuge sondern auch verschlissene Meißelhalterungen am Schneidkopf zum Schaftbruch führen.

Thermischer Verschleiß (M-T) an Rundschaftmeißeln ist in seinem äußeren Erscheinungsbild ähnlich dem der Kategorien M-A und M-S, was daran liegt, dass thermischer Verschleiß keine eigene Verschleißart darstellt sondern durch die Erhitzung lediglich anderen Verschleißarten Vorschub geleistet wird. Zur Diagnose von thermischem Verschleiß und entstehenden Temperaturen können jedoch unter Umständen die charakteristischen Anlassfarben herangezogen werden, die nachstehend im relevanten Bereich von bis zu ca. 360°C (Tabelle 2) für niedrig legierte Werkzeugstähle (Werkzeugträgermaterial) aufgeführt sind.

Tabelle 2: Anlassfarben für niedrig legierte Stähle [24].

Farb-Oberbegriff	Einzelfarben	Temperatur
gelb	weißgelb-strohgelb-goldgelb	200-230 °C
braun/rot	gelbbraun-braunrot-rot-purpurrot	240-270 °C
violett/blau	violett-dunkelblau-kornblumenblau-hellblau	280-320 °C
grau	blaugrau-grau	340-360 °C

Tabelle 3: Einteilung der Verschleißform von Stiftbohrkronen in 10 Verschleißklassen.

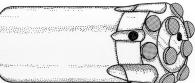
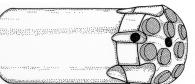
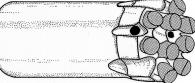
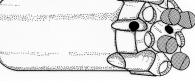
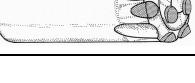
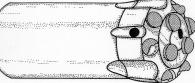
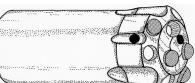
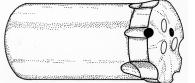
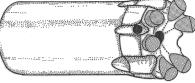
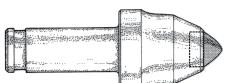
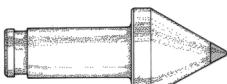
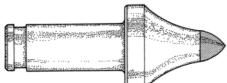
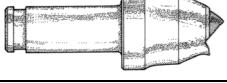
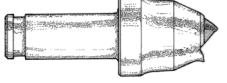
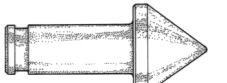
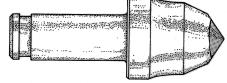
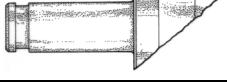
Verschleißart	Kürzel	Beschreibung
Verschleißbild		
Neues Werkzeug		
	K-0	<u>Fabrikneue</u> , unbenutzte Stiftbohrkrone.
Abrasivverschleiß		
	K-A1	„Normaler“ Verschleiß: Mehr oder minder gleichmäßiger Abtrag von Hartmetallstift und Werkzeugträgermaterial. Werkzeugwechsel nach Abnutzung bis auf sinnvolles Niveau.
	K-A2	Bevorzugter <u>Abtrag des Werkzeugträgers</u> . Bei ungenügender Werkstoffverbindung an der Basis des Hartmetallstifts besteht Gefahr eines A3-Verschleißes.
	K-A3	Ausbruch von Hartmetallstiften aufgrund fehlender Bettung und ungenügender Werkstoffverbindung an der Basis der Stifte.
	K-A4	Kaliberverschleiß: "Anschniegen" der Hartmetallstifte, Reduzierung des Kronendurchmessers.
	K-A5	Fortgeschrittener Kaliberverschleiß: Überaus deutliche Reduzierung des Kronendurchmessers. Bruch und Ausbruch peripherer Hartmetallstifte.
Verschleiß durch Sprödbruch		
	K-S1	<u>Sprödbrüche innerhalb der Hartmetallstifte</u> , die zur teilweisen Zerstörung führen.
	K-S2	Vollständiger Ausbruch von Hartmetallstiften durch Versagen der Verbindung zwischen Werkzeugträger und Hartmetall.
	K-S3	<u>Bruch des Kronenschafts</u> unterhalb des mit Stiften besetzten Bereiches.
Sonder- und Mischformen		
	K-So1	<u>Totalverschleiß</u> . Zuordnung zu Verschleißklassen nur bedingt möglich.
	K-So2	<u>Erweiterung der Spülkanäle</u> , u.U. bis hin zum Ausfall der zentralen Hartmetallstifte und vollständigen Abtragung der Kronenstirn. In Kombination mit anderen Verschleißklassen möglich.

Tabelle 4: Einteilung der Verschleißform von Rundschaftmeißeln in 11 Klassen.

Verschleißart	Kürzel	Beschreibung
Verschleißbild		
Neues Werkzeug		
	M-0	Fabrikneuer, unbenutzter Rundschaftmeißel.
Abrasivverschleiß		
	M-A1	„Normaler“ Verschleiß: Gleichmäßiger Abtrag von Hartmetall und Werkzeugträgermaterial. Werkzeugwechsel nach Abnutzung bis auf sinnvolles Niveau.
	M-A2	Bevorzugter <u>Abtrag des Werkzeugträgers</u> . Bei ungenügender Werkstoffverbindung an der Basis des Hartmetallstifts besteht Gefahr eines M-A3 (Ausbruch des Stiftes).
	M-A3	<u>Ausbruch des Hartmetallstifts</u> aufgrund fehlender seitlicher Bettung und ungenügender Werkstoffverbindung an der Basis des Hartmetallstifts.
Verschleiß durch Sprödbruch		
	M-S1	<u>Sprödbrüche innerhalb des Hartmetallstifts</u> , die zur teilweisen oder vollständigen Zerstörung führen.
	M-S2	Vollständiger Ausbruch des Hartmetallstifts durch Versagen der Verbindung zwischen Werkzeugträger und Hartmetall.
	M-S3	<u>Bruch des Meißelschafts</u> .
Thermischer Verschleiß		
	M-T	Verschleißbild entspricht dem der Kategorien A+S, eventuell sind charakteristische Anlauffarben im Werkzeugträger erkennbar (Tabelle 2)
Sonder- und Mischformen		
	M-So1	<u>Totalverschleiß</u> . Zuordnung zu Verschleißklassen nicht oder nur bedingt möglich.
	M-So2	Ausgeprägte Verflachung des Hartmetallstifts.
	M-So3	Ausgeprägt einseitige Abnutzung des Rundschaftmeißels.

Als *Sonder- und Mischformen* werden Verschleißformen bezeichnet, deren Ursachen meist nicht direkt mit den Eigenschaften des gelösten Gebirges zusammenhängen:

- *Totalverschleiß* (So1) wird dann unterschieden, wenn aufgrund des fortgeschrittenen Verschleißes tatsächlich keine klare Aussage mehr über die Verschleißform getroffen werden kann.
- Die *Erweiterung von Spülkanälen* von Bohrkronen (K-So2) ist ein Phänomen, das vor allem auf abrasive Schwebstofffracht oder aggressive Bestandteile im Spülwasser zurückzuführen ist.
- Ausgeprägt *einseitige Abnutzung* von Rundschaftmeißeln (M-So3) tritt meist dann auf, wenn die Rotation des Rundschaftmeißels in seiner Fassung behindert ist. Als geologische Ursache ist meist das Eindringen feinkörnigen Gesteinsmehls in den Ringspalt zwischen Meißel und Meißelhalter zu erwägen. Vor allem Ton-Schluffsteine führen in Verbindung mit Wasserzutritten zum Verschmieren und Verkleben des Schneidkopfs und Meißelhalters. Einseitiger Verschleiß kann auch durch Bruch des Hartmetallstifts eingeleitet werden [25] und kann in solchen Fällen mit den bei den Verschleißformen M-S1 und M-S2 beschriebenen geologischen Ursachen zusammenhängen. Auf maschinentechnischer Seite kann eine fehlerhafte Meißelstellung oder falsche Dimensionierung des Meißelschafts zu asymmetrischer Abnutzung führen. In allen Fällen werden durch die fehlende Meißelrotation die Vorteile zunichte gemacht, die den Rundschaftmeißel gegenüber anderen Bauformen auszeichnen. Da das Grundprinzip des Werkzeuges außer Kraft gesetzt ist und zudem das am Meißel zur Verfügung stehende Verschleißvolumen nicht ausgenutzt werden kann, sind mit der einseitigen Abnutzung zwangsläufig höhere Werkzeugverschleißraten verbunden.

Ausgeprägte *Verflachung des Hartmetallstifts* bei Rundschaftmeißeln (M-So2) kann Folge von falsch angeordneten (zu steil eingreifenden) oder mit zu geringem Vorschub eingesetzten Meißeln sein. Wegen der Bauform der Diskenmeißel und der i.d.R. lediglich spanend-schneidenden Gebirgslösung ist die Varianz der Verschleißformen weniger groß als diejenige bei Stiftbohrkronen und Rundschaftmeißeln. Trotzdem lassen sich auch über das Auftreten der drei Verschleiß-Grundformen oder deren Kombination

- Verschleiß der Hartmetallringe (Höhenverschleiß)
- Verschleiß des Trägermaterials und
- Brechen von Hartmetallringen

wichtige Aussagen über die Art und Weise der Gebirgslösung treffen und mögliche technische Fehler oder geologische Probleme ableiten. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Verschleißtypen von Diskenmeißeln. In Bild 20 sind zwei charakteristische Verschleißbilder von Schneidringen der Diskenmeißel im Bereich der Brust und im Bereich des Kalibers dargestellt. Typischerweise werden Brustummeißel symmetrisch „abgefahren“, Kali-

bermeißel – bedingt durch ihre Randposition – asymmetrisch.

Tabelle 5: Verschleißtypen. Verschleißcharakteristik von TBM-Diskenmeißeln. Es können sieben Verschleißtypen unterschieden werden.

Verschleißtypen von Diskenmeißeln	
1	Normaler Verschleiß
2	Trägerverschleiß
3	Sprödbruch
4	Totalausbruch
5	Totalverschleiß
6	Lagerschaden
7	Asymmetrischer Verschleiß

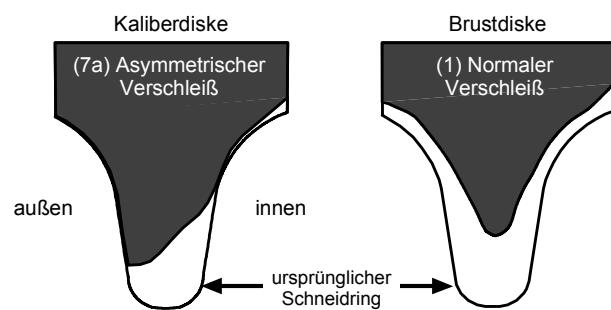


Bild 20: Charakteristische Verschleißbilder von Diskenmeißeln an Kaliber und Brust des Bohrkopfes (7a) Asymmetrischer Verschleiß der Kaliberdisken und (1) Normaler Verschleiß an der Brust.

4.2.2 Quantitativer Verschleiß: Die Werkzeugverschleißrate

Eine Bewertung, d.h. Klassifizierung des Werkzeugverschleißes kann für die begriffliche Fassung des quantitativen Verschleißes sinnvoll sein. Für das drehschlagende Bohren mit üblichen Stiftbohrkronen-Durchmessern von 43 - 48 mm stellt [17] die nachfolgend dargestellte Standlängenklassifizierung (Tabelle 6) vor. Diese Klassifizierung hat sich mittlerweile in der Praxis bei einer Vielzahl von Projekten bewährt.

Tabelle 6: Einteilung der Standlänge von Stiftbohrkronen Ø 43 - 48 mm [17].

Verschleiß-Bezeichnung	Bohrkronen-standlänge [m/Krone]	Bohrkronen-standlänge Bezeichnung
sehr gering	> 2000	sehr hoch
gering	1500-2000	hoch
mittel	1000-1500	mittel
hoch	500-1000	niedrig
sehr hoch	200-500	sehr niedrig
extrem hoch	< 200	extrem niedrig

In nachstehender Tabelle 7 ist - analog zur Verschleißklassifizierung bei Stiftbohrkronen - der quantitative

Verschleiß an Rundschaftmeißeln numerisch und begrifflich gefasst worden. Diese Klassifizierung entstand auf Basis der untersuchten Projekte in Zusammenarbeit mit Ingenieuren und Geologen der Bauunternehmungen und Maschinenhersteller und unter Verwendung von Literaturangaben [26]. Analog zur Bohrkronenstandzeit wurde der Rollweg von Diskenmeißel numerisch und begrifflich gefasst (Tabelle 8).

Tabelle 7: Einteilung der Standlänge von Rundschaftmeißeln.

Verschleiß-Bezeichnung	Spezifischer Meißelverbrauch [Meißel/m ³ (fest)]	Meißelstandzeit Bezeichnung
sehr gering	< 0,01	sehr hoch
gering	0,01-0,05	hoch
mittel	0,05 – 0,15	mittel
hoch	0,15-0,3	niedrig
sehr hoch	0,3-0,5	sehr niedrig
extrem hoch	> 0,5	extrem niedrig

Tabelle 8: Einteilung des Rollwegs von Diskenmeißeln.

Verschleiß-Bezeichnung	Rollweg [km/Diske]	Diskenstandzeit Bezeichnung
sehr gering	> 2000	sehr hoch
gering	1500-2000	hoch
mittel	1000-1500	mittel
hoch	500-1000	niedrig
sehr hoch	200-500	sehr niedrig
extrem hoch	< 200	extrem niedrig

4.3 Die Vorhersage von Werkzeugverschleiß

4.3.1 Ein Überblick über Verschleißprognoseverfahren

Zur Untersuchung eines Verschleißvorgangs sind zunächst eine Vielzahl von Prüfverfahren denkbar, die - abhängig von Zielsetzung und Kostenaufwand - unterschiedlich aussagekräftige Prognosekennwerte liefern können. Dabei kann zwischen verschiedenen Kategorien der Verschleißprüfung unterschieden werden, die vom Betriebsversuch bis hin zum Modellversuch mit einfachen Prüfkörpern und mineralogischen oder chemischen Untersuchungen reichen. Die nachstehende Aufzählung, geordnet nach dem Größenmaßstab der Untersuchungsverfahren - stellt einige der am häufigsten angewandten Methoden dar:

- Vor-Ort-Versuche (Maßstab 1:1) am Gebirge oder Versuche an m³-großen Blöcken unter Verwendung der originalen Maschinen und Werkzeuge.
- Modellversuche mit vereinfachten Werkzeugen (Indextests), z.B. Siever's Miniatur-Bohrversuch und Abrasion-Value-Test zur Bestimmung des Bit Wear Index, BWI oder Cutter Life Index CLI [27], [28], der CERCHAR-Ritztest zur Bestimmung des Cerchar Abrasiveness Index, CAI [29] oder der LCPC-Abroy-Versuch zur Bestimmung des Abrasivitätsindex ABR (Laboratoire Central des Ponts et Chausées).

- Geologisch-geotechnische Methoden zur Bestimmung von Verschleißindices, wie der SiO₂- und Al₂O₃-Gehalt, der Abrasive mineral content AMC, auch als Mean hardness bezeichnet [30], der Äquivalenter Quarzgehalt [17], die Vickers hardness number of the rock VHNR [28], der Schimatzek-Verschleißindex [31], der auf dieser Basis erweiterte modifizierte Schimatzek-Verschleißindex von [19], der Cutting Wear Index [26], DEKETHS Specific wear equation SPW [6] oder der von [5] eingeführte Rock Abrasivity Index RAI.

Nach Untersuchung einzelner Verfahren und dem Vergleich mit tatsächlich angetroffenen Verschleißraten für insgesamt 17 Projekte durch [5] sind folgende Schlussfolgerungen zu ziehen:

- *Vor-Ort-Versuche* oder Versuche an größeren Steinsblöcken stellen bei repräsentativer und entsprechend umfassender Wahl von Probestrecke bzw. Probenmaterial eine verlässliche Möglichkeit für eine Lösbarkeitsbeurteilung (Verschleiß und Löseleistung) dar. Die meisten geologischen und maschinentechnischen Einflussfaktoren werden hierbei berücksichtigt. Die Verfahren sind jedoch mit erheblichen Versuchskosten durch hohen materiellen und personellen Aufwand verbunden.
- *Modellversuche*, wie das Cerchar-Verfahren oder der LCPC-Versuch werden per se nicht als angemessene Verfahren zur Verschleißprognose angesehen. Die versuchstechnisch z.T. aufwendigen Verfahren berücksichtigen grundlegende geologische und maschinentechnische Einflussfaktoren nicht bzw. unterscheiden sich in Ihrer Versuchsanordnung grundlegend von den tatsächlichen Verhältnissen. Für das näher untersuchte CERCHAR-Verfahren ist eine generelle und direkte Übertragbarkeit auf tatsächlich angetroffene Verschleißraten nicht gegeben. Nur wenige Versuchsverfahren haben weite Verbreitung gefunden, auch ergibt die Anwendung verschiedener Modellverfahren nicht immer übertragbare Ergebnisse.
- *Geologisch-geotechnische Ansätze* sind relativ kostengünstig durchzuführen und verwenden überwiegend Parameter, die auch für andere Belange (z.B. Stabilitätsabschätzung, Wiederverwendbarkeit, etc.) von Relevanz sind. Die Bestimmung dieser Indices im Zuge der Vorerkundung stellt also keinen oder einen nur geringen Mehraufwand dar. Neben den bekannten und gebräuchlichen Verschleißindices Äquivalenter Quarzgehalt, VHNR und Schimatzek-Verschleißindex wird von [5] weiterer, einfach ermittelbarer Verschleißindex, der Rock Abrasivity Index (RAI) vorgeschlagen. Die vorliegenden Datensätze zeigen, dass Rock Abrasivity Index, Schimatzek-Verschleißindex und Äquivalenter Quarzgehalt als geeignete Kennwerte für die Prognose des quantitativen Bohrkronenverschleiß angesehen werden können.

Im Folgenden werden der äquivalenten Quarzanteil und der Rock Abrasivity Index als Kennwerte für die Korrelation mit dem Werkzeugverschleiss und als Prognose-Instrument vorgeschlagen.

4.3.2 Verschleiß von Bohrkronen

Die Verwendung des äquivalenten Quarzanteils zur Charakterisierung des Bohrkronenverschleißes ist nicht unproblematisch, da die Bohrkronenstandzeit im Regelfall in einem Bereich des Gebirges, der äquivalente Quarzanteil jedoch an Gesteinen ermittelt wird. Deshalb sind als Bohrkronenstandzeiten Mittelwerte über Homogenbereiche des Gebirges zu berechnen.

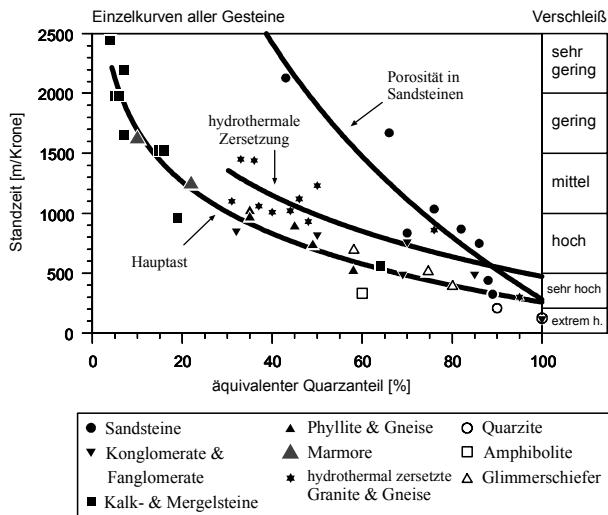


Bild 21: Standzeit der Bohrkronen, aufgetragen gegen den äquivalenten Quarzanteil. Die Werte sind in Gesteinsgruppen zusammengefaßt und in Einzelkurven gezeichnet. Werte aus 10 Tunnelprojekten [32].

Im Diagramm der Bild 21 sind Bohrkronenstandzeit und äquivalenter Quarzanteil von verschiedenen untersuchten Homogenbereichen (Gesteinen bzw. Gebirge) gegeneinander aufgetragen. Dabei wird deutlich, daß sich das Diagramm genau betrachtet aus drei Zweigen zusammensetzt, die getrennt diskutiert werden müssen:

- einem Hauptast, der aus den Werten von Kalken, Konglomeraten, Fanglomeraten, Phylliten und Gneisen besteht,
- einem dem Hauptast \pm parallelen Nebenast, der aus den Werten von hydrothermal zersetzen Gesteinen gebildet wird und
- einem steil stehenden Nebenast, der die Werte von Sandsteinen repräsentiert.

Im Diagramm der Bild 22 wurde der äquivalente Quarzanteil als Grundlage für die Klassifizierung der Gesteine des „Hauptastes“ verwendet. Die Grenzen der Klassen sind als Werte gerundet an der x-Achse angegeben. Durch die Punktestreuung sind die Bereichsgrenzen notgedrungen unscharf. Zu den Gesteinen des Hauptastes gehören Gesteine mit mineralischer Kornbindung wie beispielsweise Kalke, Mergel, Fanglomerate und Konglomerate, Phyllite, Schiefer und Gneise. Bei angegriffener Kornbindung z. B. durch Verwitterung oder hydrothermale Zersetzung, wandern die Bereichsgrenzen etwas in Richtung der höheren Standzeiten. Mit der Einstufung nach dem Hauptast ist man jedoch auf der „sicheren Seite“.

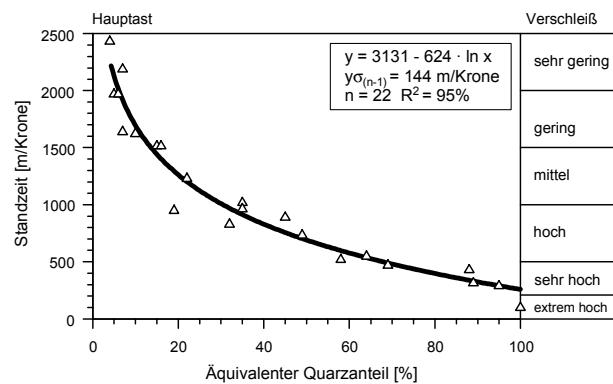


Bild 22: Einteilung des Verschleißes (Bohrkronenstandzeit) nach dem äquivalenten Quarzanteil für die Gesteine des „Hauptastes“ (Gesteine mit Korn-Korn-Bindung, [32]).

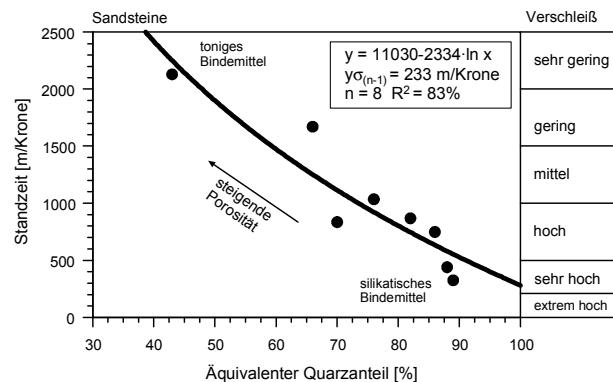


Bild 23: Einteilung des Verschleißes (Bohrkronenstandzeit) nach dem äquivalenten Quarzanteil für Sandsteine (Gesteine mit Bindemittel, [32]).

Das Diagramm der Sandsteine (Bild 23) zeigt, daß die Gefügefesteit – und damit bei Sandsteinen hauptsächlich die Porosität – den maßgeblichen Parameter für die Standzeit darstellt. Die statistischen Kennzahlen sind wegen der geringen Wertanzahl jedoch unter Vorbehalt zu sehen. Prinzipiell erlauben diese Diagramme auch eine Prognose, die den bisher ermittelten Wertebereich nicht überschreiten sollte [32].

Verwendet man den neu eingeführten Gesteinsabrasivitäts-Index RAI, so erübrigt sich die Betrachtung der verschiedenen Äste. In Bild 24 ist beispielhaft die Bohrkronenstandlänge von \varnothing 38-45 mm Stiftbohrkronen gegen den Gesteinsabrasivitäts-Index RAI aufgetragen. Der Rock Abrasivity Index zeigt eine mäßige Bestimmtheit über alle ausgewerteten Gesteine. Obwohl der RAI durch Vernachlässigung des Korngrößeneinflusses erheblich einfacher zu bestimmen ist als der modifizierte Schimatzek-Verschleißindex, zeichnet er bei Verwendung der identischen Datenbasis durch eine bessere Bestimmtheit der Kurve, geringere Streubreite und eine ausgeglichenere Punkteverteilung aus. Die Streuung der Bohrkronenstandlängen nimmt mit sinkendem RAI zu – ein Umstand, der mit dem zunehmenden Einfluss bau- und maschinentechnischer Faktoren beim Tunnelvortrieb in wenig festen Gesteinen erklärt werden kann, bei denen beispielsweise vorauselend ge-

bohrte Spieße zu vermehrten Gewaltschäden am Bohrwerkzeug führen können.

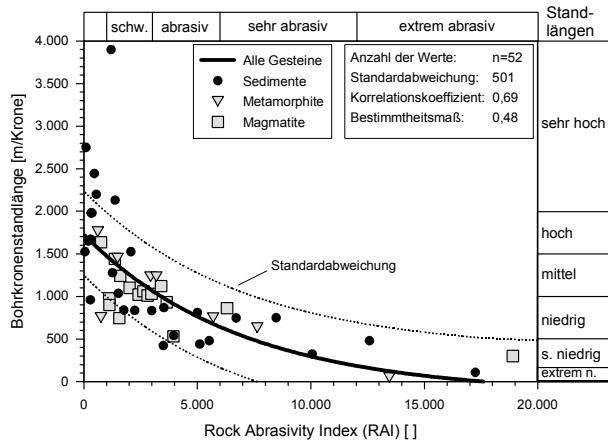


Bild 24: Bohrkronenstandlänge aufgetragen gegen den Gesteinsabrasivitätsindex RAI [5].

4.3.3 Verschleiß von Rundschaftmeißeln

Bisher konnte eine Korrelation des äquivalenten Quarzgehalts mit dem spezifischen Meißelverbrauch noch nicht auf einer gesicherten Datenbasis ermittelt werden. Zum einen liegt die Zahl von Tunnelvortrieben mit Teilschnittmaschinen mindestens um den Faktor 5 unter denjenigen mit Bohren & Sprengen. Andernteils ist die Erfassung des Meißelverbrauchs bei gleichzeitiger, exakter Erfassung der geologischen Homogenbereiche noch aufwendiger als beim Bohr- und Sprengvortrieb [5].

Deshalb bleibt momentan nur die Möglichkeit, mit den „traditionellen“ Parametern zu arbeiten. Bei den Maschinen- und Werkzeugherstellern ist der Quarzgehalt eines Gesteins neben seiner einaxialen Druckfestigkeit der wichtigste Parameter zur Erfassung des Meißelverbrauchs. Durch die große Vielfalt an Rundschaftmeißeln, Fräskopfgeometrien und Gerätetypen liegen allerdings nur sehr spärliche Daten vor. Die Bild 25 zeigt den Meißelverschleiß in Abhängigkeit von einaxialer Druckfestigkeit mit Isolinien für den Quarzgehalt („SiO₂“). Hohe Präzision ist von diesem Diagramm zwar nicht zu erwarten, es hat sich jedoch in der Praxis durchaus zur Vorhersage des spezifischen Meißelverbrauchs bewährt. Das Diagramm ergibt immerhin Anhaltspunkte für die Entwicklung des Verschleißes mit zunehmender einaxialer Druckfestigkeit und zunehmendem Quarzgehalt. Ferner wird deutlich, daß der Vortrieb mit TSM bei Druckfestigkeiten höher als 120 MPa (nach eigenen Erfahrungen jedoch bereits ab ca. 80 MPa) und einem Meißelverschleiß von mehr als 0,35 Meißel/m³ von den Werkzeugproduzenten als unwirtschaftlich erachtet wird.

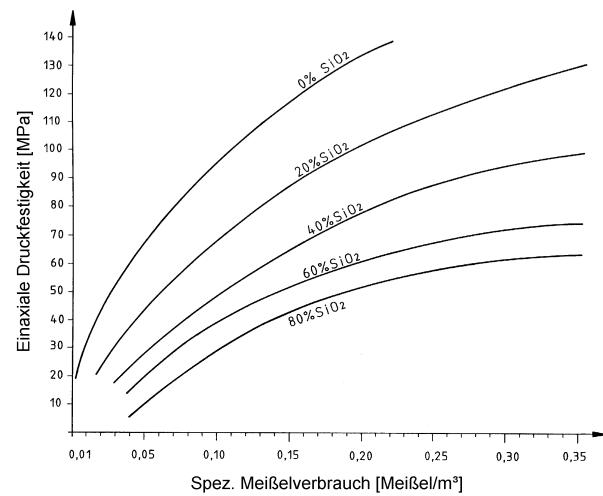


Bild 25: Verschleißdiagramm einer 300 kW Teilschnittmaschine in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit mit Isolinien für den Quarzgehalt (nach Angaben von Maschinenherstellern [32]).

4.3.4 Verschleiß von Diskenmeißeln

Bisher sind keine praxisrelevanten, signifikanten Korrelationen des Rollwegs oder des spezifischen Meißelverbrauchs von felsmechanischen Parametern in größerem Umfang veröffentlicht worden. Die Verschleißwerte sind durch die üblicherweise langen Rollstrecken wegen der zu geringen Auflösung meist nicht zur Charakterisierung von kurzfristig wechselnden Gebirgsverhältnissen verwendbar. Bild 26 gibt einen Überblick über die mittlere Meißelringstandzeit [m³/Diske] aus Erfahrungswerten eines bekannten TBM-Herstellers [33].

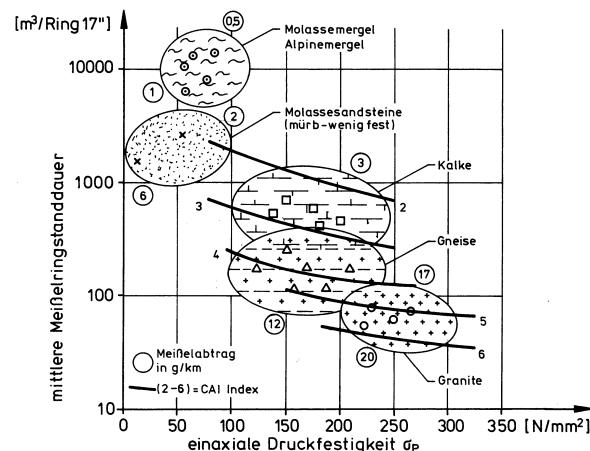


Bild 26: Mittlere Meißelringstanddauer in Abhängigkeit der Einaxialen Druckfestigkeit und des Cerchar-Abrasivitätsindex CAI [33].

Auffällig ist, daß sowohl in der einschlägigen Spezialliteratur als auch in den Veröffentlichungen der Maschinenhersteller praktisch keine verwendbaren Werkzeug-Verschleißdaten zu finden sind. Solche Daten gelten offensichtlich immer noch als vertraulich und werden nicht oder nur unter großen Vorbehalten herausgegeben.

5 SCHLUSSBEMERKUNG

Das Fallbeispiel dürfte klargestellt 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 ohne weiteres 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 ineinandergrifftes System zu erfassen und Schlüssefolgerungen für den Baubetrieb – beispielsweise für die Gebirgslösbarkeit und die Maschinenauswahl – zu wagen. Dazu ist allerdings auch in Zukunft noch sehr viel Grundlagenforschung notwendig.

Abschließend erscheint es heute möglich, mit den zusammengetragenen Diagrammen bereits eine praxistaugliche Prognose von Werkzeugverschleiss und Lösegeschwindigkeit für gängige Vortriebsverfahren (insbesondere dem Sprenglochbohren) durchzuführen.

6 LITERATUR

- [1] PLINNINGER, R.J., THURO, K. & BRUELHEIDE, TH. (2001): Erfahrungen bei Fräsvortrieben im Nürnberger U-Bahn-Bau. – *Felsbau*, 19, 1-9.
- [2] THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (1998): Geologisch-geotechnische Grenzfälle beim Einsatz von Teilschnittmaschinen. – *Felsbau*, 16, 358-366.
- [3] THURO, K. & SPAUN, G. (1996): Geologisch-felsmechanische Parameter zur Erfassung der Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. – Taschenbuch für den Tunnelbau 1997, Essen: Glückauf, 63-106.
- [4] THURO, K. (1997): Drillability prediction - geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. – *Geologische Rundschau*, 86, 426-437.
- [5] PLINNINGER, R.J. (2001): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsmethoden im Festgestein. – 147 p., Diss. TU München.
- [6] DEKETH, H.J.R. (1995): The wear of rock cutting tools. Laboratory Experiments on the abrasivity of rock. – 144 p., Rotterdam: Balkema.
- [7] VERHOEF, P.N.W. (1997): Wear of Rock Cutting Tools - Implication for the site investigation of rock dredging projects. – 340 p., Rotterdam, Brookfield: Balkema.
- [8] THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (1999): Predicting roadheader advance rates. – *Tunnels & Tunnelling International*, 6, 36-39.
- [9] THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (1999): Roadheader excavation performance – geological and geotechnical influences. – VOUILLE, G. & BEREST, P. (eds.): *Proceedings of the 9th ISRM Int. Congr. on Rock Mech.*, 1241-1244, Rotterdam, Brookfield: Balkema.
- [10] THURO, K. & BRODBECK, F. (1998): Auswertung von TBM-Vortriebsdaten - Erfahrungen aus dem Erkundungsstollen Schwarzach. – *Felsbau*, 16, 8-17.
- [11] GEHRING, K. (1997): Classification of drillability, cuttability, borability and abrasivity in tunnelling. – *Felsbau*, 15, 183-191.
- [12] THURO, K., EBERHARDT, E., GASPARINI, M. (2001 a): Ungünstige geotechnische Verhältnisse im Tunnelbau durch Hanginstabilitäten - ein „exotisches“ Fallbeispiel. – 13. Nationale Tagung Ingenieurgeologie, Karlsruhe (ed.), Sonderheft Geotechnik, 131-136.
- [13] IAEG - International Association of Engineering Geology (ed) (1981): Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. - *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 24, 235-274.
- [14] ISRM - International Society for Rock Mechanics (ed) (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Document No. 4. – *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 15, 319-368.
- [15] THURO, K., HECHT, L., PLINNINGER, R.J., SCHOLZ, M. & BIERER, S. (2000): 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. – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (ed.) *Proceedings of the Eurock 2000 Symposium*, Essen: Glückauf, 177-182.
- [16] THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (2001): Scale effects in rock strength properties. Part 2: Point load test and point load strength index. – In: SÄRKKÄ, P. & ELORANTA, P. (eds.): *Rock Mechanics - A Challenge for Society*. – 881 p., *Proceedings of the ISRM Regional Symposium Eurock 2001*, Espoo, Finland, 4-7 June 2001, Lisse (Balkema/Swets & Zeitlinger), 175-180.

[17] THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. – Münchener Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, B1, I-XII, 1-145.

[18] SANYO, H.-P. & KUTTER, H.K. (1982): Der Einfluß des geologischen Gefüges auf die Wirkungsweise von Vollschnittmaschinen im Streckenvortrieb. – 52 S., Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 82-189.

[19] EWENDT, G. (1989): Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognosen des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln. – 88 p., Bochumer geol. und geotechn. Arb., 33, Bochum.

[20] GEHRING, K. (1995): Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. – Felsbau, 13, 439-448.

[21] THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (2001): Bohren, Sprengen, Fräsen - Können die geologischen Faktoren der Gebirgslösung quantifiziert werden? – Felsbau, 19, 114-121.

[22] SCHOLZ, M. (1999): 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, unveröff.

[23] BIERER, S. (1999): 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, unveröff.

[24] STEINMÜLLER, A. (ed., 1991): Metalltechnik - Metallbau und Fertigungstechnik. – 305 p., Haan-Gruiten (Europa).

[25] HAAF, J. (1992): Das Verschleiß- und Drehverhalten von Meißeln für Teilschnitt-Vortriebsmaschinen. – Diss. TU Clausthal.

[26] MC FEAT-SMITH, I. & FOWELL, R.J. (1977): Correlation of rock properties and the cutting performance of tunnelling machines. – Proceedings Conference on Rock Engineering, University Newcastle upon Tyne: 587-602.

[27] BRULAND, A., DAHLØ, T.S. & NILSEN, B. (1995): Tunnelling performance estimation based on drillability testing. – Proceedings 8th ISRM Congress, Tokyo, 1: 123-126.

[28] BRULAND, A. (1998): Project report 13A-98 - Hard rock tunnel boring: Drillability Test methods. – 22 p., NTNU Trondheim.

[29] CERCHAR - Centre d' Etudes et Recherches de Charbonnages de France (1986): The Cerchar Abrasiveness Index. - 12 p.

[30] ATKINSON, H. (1993): Hardness tests for rock characterization. - In: HUDSON, J (ed.-in-chief): Comprehensive rock engineering. Principles, practise & projects. Vol. 3: Rock testing and site characterization. – 982 p., Oxford, New York (Pergamon)

[31] SCHIMATZEK & KNATZ (1970): Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen. – Glückauf, 106, 6, 274-278.

[32] THURO, K. (2000): Geologisch-geotechnische Grundlagen der Gebirgslösung in Fels. – In: EICHLER, K. et. al.: Fels- und Tunnelbau. Verwitterung und Verbauung, Baustoffe und Umwelt, Vortrieb und Sicherung, Abdichtung und Ankerung. – 353 p., Kontakt und Studium, Bd. 592, Renningen-Malmsheim (Expert), 87-159.

[33] MAIDL, B., SCHMID, L., RITZ, W. & HERRENKNECHT, M. (2001): Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein. – 350 p., Ernst & Sohn.