

Gebirgsmaßstäbliche Einflussfaktoren auf den Werkzeugverschleiß im Felstunnelbau – baupraktisch relevant und wissenschaftlich vernachlässigt?

Ralf J. Plinninger & Jan Düllmann
Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried, Deutschland

Zusammenfassung

Die Untersuchung der Abrasivität des anstehenden Gebirges und die Bewertung des zu erwartenden Werkzeugverschleißes stellen heute im Vorfeld jeglicher Tunnelbaumaßnahme eine wichtige Aufgabe dar. Dies gilt insbesondere für jegliche Form des maschinellen Tunnelvortriebs, bei dem die Auswirkungen von Verschleiß an Lösewerkzeuge besondere Relevanz für Arbeitszyklus, Bauzeit und –kosten besitzen. Ausgehend von einem normativen „Vakuum“ in diesem Bereich haben mit zunehmendem Erkenntniszuwachs und dem Einsetzen entsprechender Gremien- und Normenarbeit auf Laboruntersuchungen basierende Kennwerte, wie der CERCHAR-Abrasivitätsindex CAI oder der Abrasivitätsindex RAI zunehmend Eingang in entsprechende Regelwerke gefunden. Dennoch ist festzustellen, dass über den Maßstab des intakten Gesteins hinaus auch größermaßstäbliche geologische Faktoren, wie z.B. Trennflächengefüge, Gebirgsaufbau, oder Spannungszustand in erheblicher Weise Einfluss auf den Verschleiß von zur Gebirgslösung eingesetzten Werkzeugen haben können. Die Folgen dahingehend widriger Einsatzumstände können um ein Vielfaches gravierendere Auswirkungen haben, als eine Erhöhung der Abrasivität des intakten Gesteins. Der vorgeschlagene Beitrag stellt praxisorientiert den derzeitigen Stand der Erkenntnisse zu verschleißrelevanten Gebirgseigenschaften dar und gibt Anregungen für die Erkundung, Bewertung und bauvertragliche Berücksichtigung derartiger Situationen im Felstunnelbau.

1. Werkzeugverschleiß – bauvertragliches Konfliktpotenzial

Unabhängig von der Art des Bauverfahrens - maschiner oder konventioneller Tunnelvortrieb – stellt der Verschleiß an den zur Gebirgslösung eingesetzten Werkzeugen seit jeher einen äußerst relevanten, Leistung und Unkosten beeinflussenden Faktor dar. Verschleißphänomene wirken sich aber nicht nur direkt (über die mit der Werkzeugneubestückung verbundenen Lohn- und Stoffkosten) auf den Bauablauf aus, sondern beeinflussen in vielfältiger Weise auch indirekt Vortriebsleistung sowie Rüst- und Wartungsaufwand.

Bei Arbeiten, die auf Werkverträgen zwischen einem Auftraggeber (Bauherrn) und einem Auftragnehmer (i.d.R. Bauunternehmung) beruhen, kommt daher der möglichst zutreffenden Beschreibung der geologisch-geotechnischen Verschleißursachen und einer fairen Zuordnung der diesbezüglichen Risikosphären eine

sehr wesentliche Bedeutung für einen reibunglosen Ablauf anspruchsvoller Tief- Tunnel- und Spezialtiefbaumaßnahmen zu.

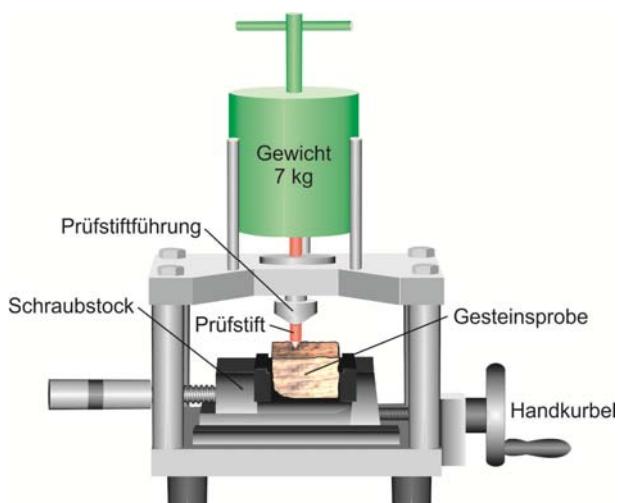


Bild 1: Prüfgerät zur Ermittlung des in der VOB 2015 referenzierten Gesteinsabrasivitätsindex CAI.

Ausgehend von einem normativen „Vakuum“ in diesem Bereich haben mit zunehmendem Erkenntniszuwachs und dem Einsetzen entsprechender Gremien- und Normenarbeit Laborverfahren, wie der CERCHAR-Versuch (siehe Bild 1) oder mineralogisch-geotechnische Indices, wie der Rock Abrasivity Index (RAI) Eingang in die Erkundung, Ausschreibung und Vergütung der entsprechenden Gewerke gefunden. Das CERCHAR-Verfahren und der dabei ermittelte CERCHAR-Abrasivitätsindex CAI ist z.B. mit Einführung der VOB 2015 als Standardverfahren für die Bewertung der Abrasivität von Festgesteinen in den Allgemeinen Technischen Vertragsbedingungen der deutschen VOB/C bzw. den DIN-Normen der 18300er Reihe verankert.

Auch wenn die labormaßstäbliche Erfassung und Beschreibung der „Gesteinsabrasivität“ als wichtiger und richtiger Schritt in Richtung einer optimierten Verschleißprognose und einer fairen bauvertraglichen Risikoverteilung bewertet werden muss, so ist doch festzustellen, dass mit der Bereitstellung solcher Kennwerte das Ziel noch nicht erreicht ist, da relevante Einflussfaktoren des Gebirges mit diesen Verfahren zwangsläufig nicht erfasst und abgebildet werden können.

2. Begriffsdiskussion: „Werkzeugverschleiß“ und „Abrasivität“

In Anlehnung an die mittlerweile zurückgezogene – da nicht mehr aktualisierte - DIN 50320 kann der Begriff „**Werkzeugverschleiß**“ als fortschreitender Materialverlust aus der Bearbeitungsoberfläche des Werkzeugs definiert werden, der durch mechanischen Kontakt und Relativbewegungen des Werkzeuges zum Gebirge hervorgerufen wird (u.a. Plinniger, 2002). Dieser Verschleiß kann durch verschiedene Vorgänge hervorgerufen werden, die in der Regel ein Zusammenwirken verschiedener, sowohl kontinuierlicher, tendenziell schleifender Prozesse (→ „Abrasivverschleiß“) als auch schlagartig auftretender Ereignisse mit oft katastrophaler Folge (→ „Verschleiß durch Sprödbruchversagen“) darstellen.

Ein dahingehendes Verständnis, dass unter „Werkzeugverschleiß“ ausschließlich kontinuierlich stattfindende Prozesse zu verstehen sind, ist aus der einschlägigen Normung und Literatur nicht ableitbar. Vielmehr legen die im Tief- und Tunnel- und Spezialtiefbau üblicherweise verwendeten Brutto-Verschleißkenngrößen, wie z.B. die „Bohrkronenstandlänge“ nach DIN 20301 [Bohrmeter/Krone], der „spezifische Meißelverschleiß“ [$\text{Meißel}/\text{m}^3(\text{fest})$] oder die „Diskenstandzeit“ [$\text{m}^3(\text{fest})/\text{Diske}$] nahe, dass darunter die tatsächliche Lebensdauer eines Werkzeugs von der Neubestückung bis zum notwendigen Aus-

tausch verstanden werden muss – und zwar unabhängig von der Art des stattgefundenen Verschleißvorgangs.

Während der Werkzeugverschleiß also als Ergebnis (Wirkung) des tribologischen Kontakts zwischen Werkzeug und Gebirge gesehen werden muss, wird der Begriff der „**Abrasivität**“ zur Beschreibung der geogenen Verschleißursachen verwendet (Bild 2). Nach Plinniger (2002) versteht man darunter die Fähigkeit eines Gebirges, Gesteins oder Minerals, Verschleiß am Lösewerkzeug hervorzurufen.

Die Gebirgs-, Gesteins- oder Mineralabrasivität ist dabei keinesfalls eine absolute Größe, sondern ist auf Art und Eigenschaften des Lösewerkzeuges, als auch herrschende Systembedingungen (Druck, Temperaturzustände, etc.) zu beziehen.

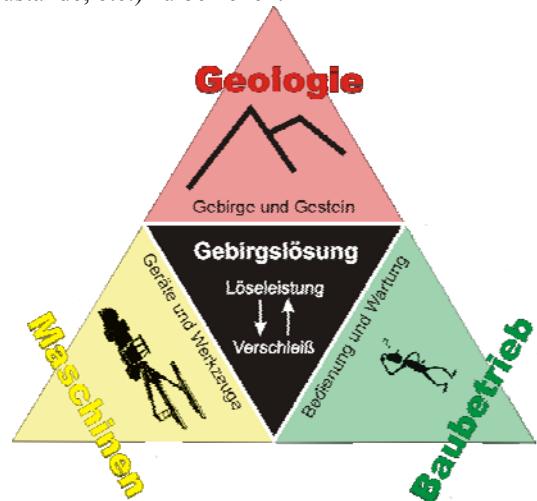


Bild 2: Wirkungs- und Einflussdiagramm für Verschleiß und Löseleistung (aus: Plinniger, 2002).

Obwohl die Zielsetzung und Definition des Abrasivitätsbegriffs (unter ausdrücklicher Einbeziehung der Gebirgseigenschaften) eindeutig für eine gesamtheitliche Bedeutung des Begriffs sprechen, ist dennoch festzustellen, dass plötzliches, katastrophales Sprödbruchversagen von Werkzeugen und Werkzeugbestandteilen vielfach bei der Bewertung der „Abrasivität“ ausgeklammert wird.

Diese Vorgangsweise trägt zwar dazu bei, dass der (so bereinigte) Verschleiß zwar relativ gut mit den Ergebnissen kleinmaßstäblicher Laborversuche erklärt und prognostiziert werden kann, führt aber andererseits zu einer offensichtlichen Unterbewertung der wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Bedeutung katastrophaler Verschleißvorgängen, die oft mit größermaßstäblichen Gebirgseigenschaften zusammenhängen.

3. Gebirgsmaßstäbliche Einflussfaktoren auf den Werkzeugverschleiß

3.1 „Mixed face“ Verhältnisse

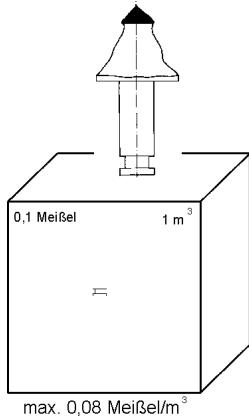
Der Begriff der sogenannten „mixed face condition“ zu Deutsch „Mischbrust“ wird im Bereich des maschinellen Tunnelvortriebs spätestens seit den 1980er Jahren verwendet (Beckmann & Simons, 1982). Während in den einschlägigen deutschen Regelwerken keine Definition zu finden ist, wird der Begriff in den österreichischen Werkvertragsnormen ÖNORM B 2203-1 (Zyklischer Vortrieb) und ÖNORM B 2203-2 (Kontinuierlicher Vortrieb) wie folgt beschrieben:

- für den zyklischen Vortrieb: „Bedingungen bei einem Abschlag, in dem gleichzeitig Gesteine mit sehr unterschiedlichem Löseverhalten auftreten und ein Lösen mit Sprengarbeit einerseits und Bagger oder Teilschnittmaschine (TSM) andererseits erforderlich ist“.
- für den kontinuierlichen Vortrieb: „Vortrieb bei gleichzeitigem Auftreten zusammenhängender Pakete von Gesteinsarten mit sehr unterschiedlichem Löseverhalten“.

Auch wenn diese Definitionen insbesondere im Bereich der maschinellen Vortriebsverfahren einen erheblichen Interpretationsspielraum für die konkrete Anwendung lassen, sind die Folgen derartiger Verhältnisse für verschiedene Gebirgslösungsverfahren anhand publizierter Einsatzverfahren eindrucksvoll zu belegen:

So werden Auswirkungen typischer „mixed-face“-Verhältnisse auf den **Vortrieb mit Teilschnittmaschinen** u.a. in Plinninger, Thuro & Bruehl (2001) oder Plinninger (2011) dargestellt.

Verschleiß der Klasse 3
Werkzeugträgerverschleiß
in wenig festen Sandsteinen mit wenigen Quackenlagen



Verschleiß der Klasse 4
Sprödbruch des Hartmetallstifts
in Wechselfolge von wenig festen Sandsteinen mit sehr harten Quackenlagen

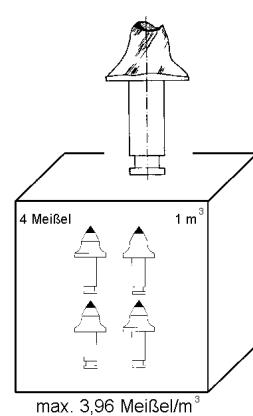


Bild 3: Gegenüberstellung von Verschleißformen und Verschleißraten für homogene und „mixed-face“-Verhältnisse bei Teilschnittvortrieben im Nürnberger Sandsteinkeuper (aus: Alber, 1999, Abb. 4.12, S. 59).

Untersuchungen bei Teilschnittauffahrungen für die U-Bahn Nürnberg in Wechselfolgen von mürben Sandsteinen und festen konkretionären Horizonten zeigten z.B. klare Zusammenhänge zwischen der Mächtigkeit und Häufigkeit der Konkretionen einerseits und der angetroffenen Verschleißform / Verschleißrate andererseits (Bild 3).

Dabei ist festzustellen, dass dieses Gebirge im Sinne der ÖNORM B2203-1 erst dann eine „mixed face“-Situation darstellen würde, wenn ein kombiniertes Lösen mittels Sprengen UND Teilschnittmaschine erforderlich würde!

Im Bereich der **maschinellen Vortriebsverfahren** beschreibt Alber (1999) das Durchörtern einer „mixed-face“-Situation infolge eines schleifenden Übergangs von rd. 35 MPa festen Dolomiten zu rd. 13 MPa festen Tonschiefern. Zur Vermeidung von Diskenschäden und Vibrationen musste in diesem Abschnitt die Anpresskraft soweit reduziert werden, bis die unterschiedlichen Penetrationen schadlos von der TVM aufgenommen werden konnten (Bild 4). Nach Durchfahren dieser Zone konnte die Anpresskraft dann wieder auf ein „normales Niveau“ von 0,145 MN/Diske gesteigert werden.

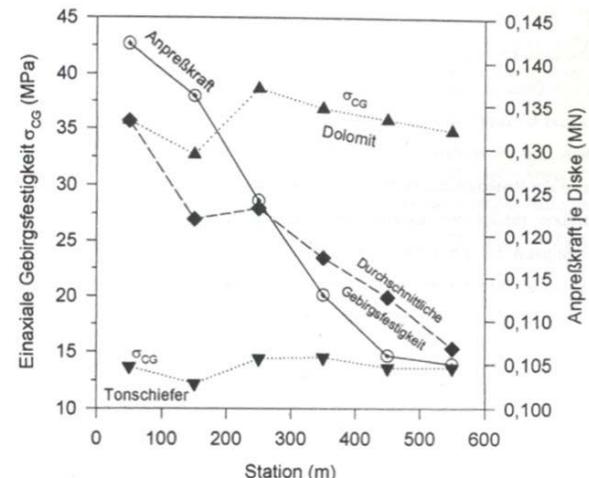


Bild 4: Schemazeichnung zur Reduktion der Anpresskraft bei einem TVM-Vortrieb unter „mixed-face“-Bedingungen (aus: Alber, 1999, Abb. 4.12, S. 59).

Vergleichbare Verhältnisse zeigen auch die relativ neuen Messergebnisse von Entacher, et al. (2013) aus **Kraftmessungen an TVM-Einringdisken** in einem kristallinem Gebirge mit verschiedenen Zerlegungsgraden. Bei diesen zeigen die peak-Beanspruchungen der Disken signifikante Übereinstimmungen mit den Grenzen verschieden zerlegter Zonen (A/B-Grenzlinien in Bild 5).

Bei solchen heterogenen Gebirgsverhältnissen kann die von einer TVM auf den Bohrkopf aufgebrachte Anpresskraft nicht gleichmäßig auf die Disken verteilt werden. Die ungleichmäßigen Diskenbelastungen und damit verbundenen hohen Spitzendrücke sind Auslöser

für die bereits von Alber (1999) beschriebenen Meiβelschäden und Vibratonen der TVM.

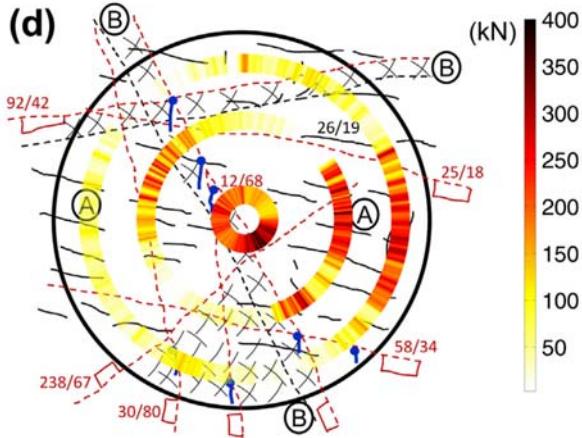


Bild 5: Messergebnisse von Diskenkräften zur Variation der Nomalkräfte in Abhängigkeit der Lage an der Ortsbrust (aus: Entacher et al., 2013, Fig. 24, S. 495).

Eine geometrische Betrachtung des „mixed-face“-Phänomens zeigt, dass hierfür der Bearbeitungsmaßstab des Lösewerkzeuges eine ausschlaggebende Rolle spielt. Dieser liegt beim Sprenglochbohren im Zentimeter-Bereich und damit eher auf der Maßstabsebene des Gesteins. Beim Einsatz einer Teilschnittmaschine, erst recht aber bei Vollschnitt-Tunnelvortriebsmaschinen, bei denen Flächen von bis zu rd. 150 m² in einem Arbeitsgang bearbeitet werden, spielt die Abfolge verschiedener Gesteinshorizonte beim Aufbau des Gebirges dagegen eine wesentliche Rolle.

Nach Plinninger (2002) ergibt sich bei Annahme eines aus zwei konkordant abwechselnden Gesteinen zusammengesetzten Gebirgsverbandes mit der Mächtigkeit m der einzelnen Gesteinslagen der prozentuale Anteil homogener Gesteinsverhältnisse (keine „mixed-face“) gemäß Gleichung 1 bzw. Bild 6.:

$$H = \left(1 - \frac{d}{m}\right) \cdot 100$$

mit: H Anteil homogener Gesteinsverhältnisse [%]
 d Bearbeitungsdurchmesser [m]
 m Mächtigkeit der Gesteinslagen [m]
Anmerkung: Für alle Fälle $d \geq m$ ist $H = 0\%$

Anhand dieser Überlegungen wird deutlich, dass die Thematik von „mixed-face-Verhältnissen“ keine absolute Größe darstellt, sondern stets auf das vorgesehene Gebirgslösungsverfahren bezogen werden muss. Daraus folgt, dass für Abbauverfahren, die größere Gebirgspartien in einem Arbeitsgang lösen, die Thematik inhomogener Gebirgsverhältnisse und „mixed-face“-Verhältnisse eine wesentlich größere Bedeutung besitzt, als beispielsweise für Sprengloch- oder Erkundungsbohrungen.

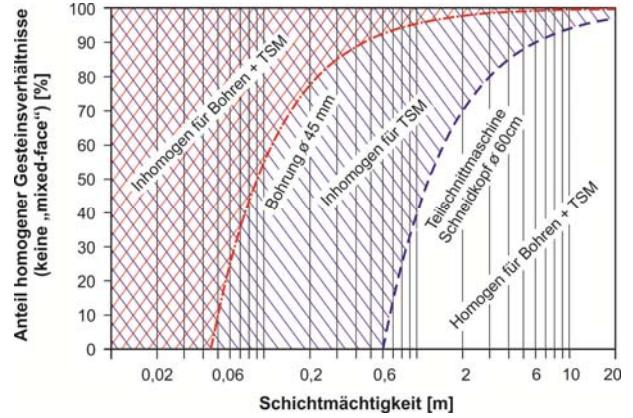


Bild 6: Zusammenhang zwischen der Größenordnung von Inhomogenitäten (z.B. Schichtmächtigkeit) und dem Anteil inhomogener bzw. homogener Verhältnisse bei der Gebirgslösung durch Bohren ($\varnothing 45\text{mm}$) bzw. Fräsen (nach: Plinniger, 2002, Abb.27, S. 32).

3.2. Instabile Ortsbrust / Blockigkeit

Mit den Begriffen der „instabilen“, „blockigen“ oder „voreilenden“ Ortsbrust bzw. „Blockigkeit“ werden im maschinellen Tunnelvortrieb Verhältnisse beschrieben, bei denen es nicht oder nicht nur zur Bildung von Steinsschips unter den Disken kommt, sondern zu einem Ausbrechen größerer Gesteinskörpern vor dem Bohrkopf (u.a. ÖNORM B2203-2). Derartige Blöcke oder Platten können Volumina von bis zu mehreren m³ Größe erreichen (Bild 7).



Bild 7: Kubikdezimeter bis Kubikmeter-große, aus der Ortsbrust ausgebrochene Gneisblöcke vor dem Bohrkopf einer Hartgestein-TVM. Disken und Bohrkopf sind an der rechten Bildkante erkennbar.

In Abhängigkeit der intakten Gesteinsfestigkeit des anstehenden Gebirges und dessen Abrasivität können derartige Verhältnisse eine besondere Beanspruchung für die Tunnelvortriebsmaschine und ihre Werkzeuge darstellen, da sie im Zwischenraum zwischen der Ortsbrust und dem Bohrkopf so lange zerkleinert werden müssen, bis sie klein genug sind um durch die Räumeröffnungen ins Innere des Bohrkopfs zu gelangen. Da der Bohrkopf für diese „Brecher“-Arbeit a priori

nicht ausgelegt ist, werden Bohrkopf und Werkzeuge dabei immer wieder mit punktuellen und z.T. hohen Schlag- und Stoßbelastungen anstelle der eigentlich vorgesehenen, kontinuierlichen Abrollbewegung beansprucht. Die Folgen sind vermehrtes Auftreten von Sprödbruchversagen von Werkzeugen und Werkzeugbestandteilen (Ringbrüche, Absplitterungen, Schraubenbrüche etc.).

Geologische Ursachen für eine „instabile“, „blockige“ oder „voreilende“ Ortsbrust sind in erster Linie vorhandene, mechanisch wirksame Trennflächen (Schicht-, Schieferungs- und Kluftflächen), die bei ungünstiger Orientierung oder ungünstigem Verschnitt zu gefügebedingten Ausbrüchen führen können. Zusätzlich können auch hohe Gebirgsspannungsverhältnisse dazu führen, dass sich an der Ortsbrust Neubrüche mit oft typischem, konkavem oder bogenförmigem Verlauf ausbilden, die ebenfalls zu – meist plattigen – Ausbrüchen führen.

Auch wenn eine streng deterministische Bewertung der quantitativen Auswirkungen derartiger Verhältnisse auf die Lebensdauer der Werkzeuge derzeit nur schwer möglich erscheint, so zeigen die Projekterfahrungen vergangener Projekte eine eindeutige Korrelation von blockigen Verhältnissen an der Ortsbrust und dem vermehrten Auftreten von Sprödbrüchen an Werkzeugen und Werkzeugteilen (u.a. Weh, 2007).

3.3 Gebirgsspannungen

Auch der jeweilige Spannungszustand im Gebirge nimmt Einfluss auf die Gebirgslösung und den Werkzeugverschleiß. Da primärer und sekundärer Spannungszustand vor Ort nur mit großem Aufwand bestimmbar sind und der Einfluss auf den Lösevorgang allenfalls indirekt zu identifizieren ist, wird das Thema des Spannungseinflusses in der Fachwelt nach wie vor kontrovers und zumeist anhand von Modellrechnungen (siehe Bild 8) diskutiert.

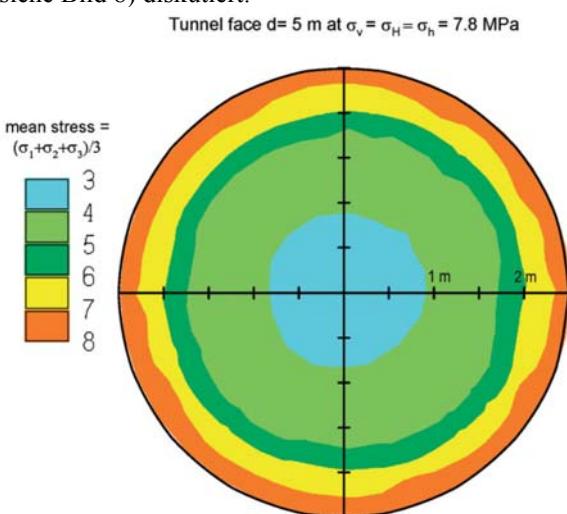


Bild 8: Modellierung der Spannungsverteilung an einer TBM-Ortsbrust (aus: Alber, 2008, Bild 7, S. 35) In der Literatur existieren Überlegungen (u.a. Rutschmann, 1974, Alber, 2008, Lagger, et al, 2015), die postulieren, dass sich Spannungszustände im Gebirge je nach Höhe und Gebirgseigenschaften sowohl positiv (über die Schaffung neuer, vorgezeichneter Trennflächen), neutral, als auch negativ (durch die Erhöhung des Abbauwiderstands) auf den Gebirgslösungsvorgang und den Werkzeugverschleiß auswirken können.

4. „Sprödbruchversagen“ von Werkzeugen als Folge ungünstiger Gebirgseinflüsse.

Aufgrund der erheblichen bautechnischen und wirtschaftlichen Relevanz erscheint es aus Sicht der Autoren notwendig, im Detail auf das vorwiegend durch die herrschenden Gebirgsverhältnissen beeinflusste Phänomen des „Sprödbruchversagens“ von Werkzeugen und Werkzeugbauteilen einzugehen. In den folgenden Absätzen werden daher Ausbildung und Bedeutung näher erläutert.

4.1 Sprödbruch von Hartmetalleinsätzen

Bei Stiftbohrkronen als auch Rundschaftmeißeln stellen Hartmetalleinsätze den zentralen Bestandteil des Lösewerkzeuges dar. Diese Sinterhartmetalle besitzen zwar eine hohe Materialhärte und ein damit verbundenes, hohes Widerstandsvermögen gegen abrasive Beanspruchung, zeichnen sich andererseits aber auch durch hohe Materialsprödigkeit aus. Dies hat zur Folge, dass bereits bei weitgehend kontinuierlichen Abrasionsvorgängen Materialabtrag vor allem durch „microcracking“, also mikroskopische Ausbrüche aus der Metalloberfläche erfolgt.

Ist das Werkzeug beim Lösungsvorgang hohen Schlagimpulsen ausgesetzt, so besteht die Gefahr, dass große Teile des Einsatzes absplittern oder der gesamte Hartmetallstift durch Bruch der Bettung aus dem Werkzeug gerissen wird. Der fehlende Hartmetallstift ist nun nicht mehr in der Lage, den Werkzeugträger effektiv vor Abnutzung - auch durch weniger abrasive Gesteine - zu schützen, wodurch in aller Regel ein Austausch erforderlich wird. Obwohl Sprödbrüche dieser Kategorie definitionsgemäß bereits makroskopisch klar erkennbar sind, lässt das Rasterelektronenmikroskop das Ausmaß der weiteren Schädigung deutlich erkennen (Bild 9).

Die sich meist entlang einer Vielzahl unterschiedlich orientierter, muschelförmiger Bruchflächen ereignenden Sprödbrüche können auch das verbliebene Hartmetall schwächen. Da solche bereits vorgezeichneten Bruchflächen bei darauffolgenden Belastungen umso leichter aktivierbar sind, kann ein einmal auf diese Art geschädigter Stift bereits nach kurzer Einsatzdauer vollständig abgenutzt werden.

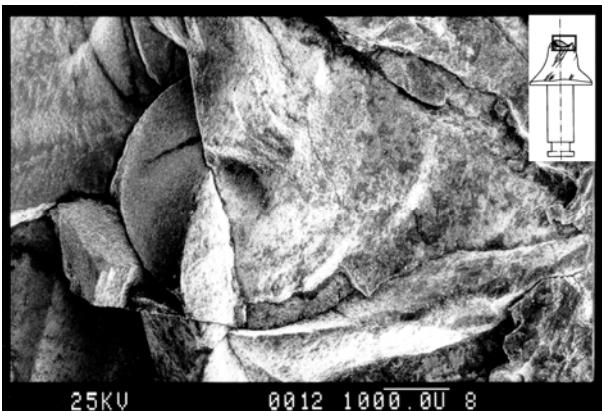


Bild 9: Muschelförmige Sprödbrüche im Hartmetallstift eines Rundschafftmeißels, etwa 16-fache Vergrößerung. Der Materialverlust (bezogen auf das Volumen des Hartmetalleinsatzes) betrug in diesem Fall etwa 40 % (aus: Plinninger, 2002, Abb. 23, S. 23).

4.2 Sprödbruch von Stahlkörpern

Auch homogen aus Stahl aufgebaute Werkzeuge, wie Einringdisken, aber auch stählerne Werkzeugträger von Bohrkronen und Rundschafftmeißel können im Einsatz von Sprödbruchversagen betroffen sein - auch wenn Stahl deutlich zäher reagiert, als Hartmetalle und daher in dieser Hinsicht über gutmütigere Eigenschaften verfügt. Derartige Phänomene, wie z.B. der Bruch einer Einringdiske (siehe Bild 10) zählen nach eigener Einschätzung insbesondere beim Einsatz von Hartsteins-Tunnelvortriebsmaschinen zu einem der kostenintensivsten Probleme, die bei der maschinellen Bearbeitung einer Ortsbrust auftreten können.



Bild 10: Gesplitterter 17“-Meißelring einer Hartsteins-Tunnelvortriebsmaschine.

Die Häufigkeit des Auftretens von Sprödbrüchen jeglicher Art (Hartmetallstift oder Werkzeugträger) wird in geologischer Hinsicht vor allem von der Gesteinsdruckfestigkeit und dem Trennflächengefüge, auf Maschinenseite durch Anordnung, Art und Qualität des Werkzeuges, Art des Lösevorgangs und angewandte Kräfte beeinflusst.

4.3 Bedeutung von „Sprödbruchversagen“ für die Verschleißprognose

Während der mehr oder minder kontinuierliche, „abrasive“ Materialabtrag aus der Werkzeugoberfläche auf Basis von Laborverfahren verhältnismäßig gut prognostiziert werden kann, spielen für makroskopisches Sprödbruchversagen nach den voranstehend beschriebenen Erkenntnissen Faktoren eine Rolle, die von diesen Verfahren nicht erfasst werden können. Bei Vorhandensein entsprechender Ursachen für Sprödbruchversagen (u.a. „mixed face“, „Blockigkeit“, o.ä.) wird eine auf der Annahme kontinuierlichen Materialabtrags basierende Verschleißprognose daher zwangsläufig zu falschen – zu optimistischen – Ergebnissen führen, was anhand der nachstehenden Grafiken (Bild 11 und Bild 12) erläutert werden soll.

Bild 11 stellt die hypothetische Abnahme der Meißelgesamtmasse eines Rundschafftmeißels für einen Meißel dar, der ausschließlich durch kontinuierlichen Abrasivverschleiß verschlissen wird und gegen Ende seiner Einsatzdauer durch Ausfallen des HM-Stifts unbrauchbar wird. Bild 12 stellt demgegenüber einen Meißel dar, der zu einem beliebigen Zeitpunkt durch katastrophales Sprödbruchversagen des Hartmetallstifts aus dem Einsatz genommen werden muss.

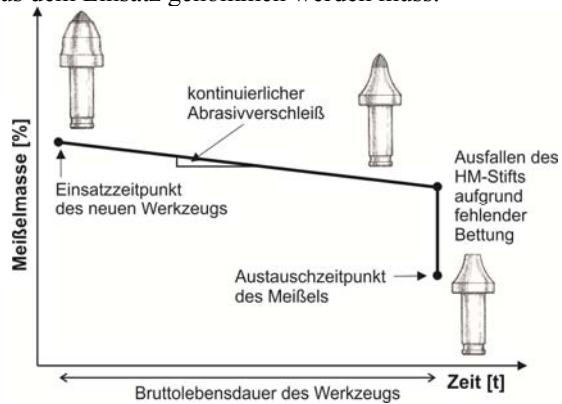


Bild 11: Hypothetische Massenabnahme für einen ausschließlich durch Abrasivverschleiß verschlissenen Rundschafftmeißel („Fall A“).

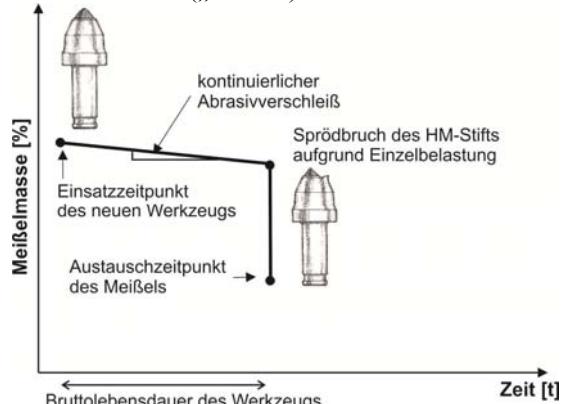


Bild 12: Hypothetische Massenabnahme für einen durch Sprödbruch des HM-Einsatzes verschlissenen Rundschafftmeißel („Fall B“).

In beiden Fällen werden bei Betrachtung eines rein abrasiven Verschleißes dieselben Verschleißraten ermittelt. Diese sind zwar für den entsprechenden, linearen Zeitraum der Verschleißkennlinie deterministisch aus Gesteinskennwerten, wie dem CAI ableitbar, lassen jedoch im „Fall B“ keinen Rückschluss auf die tatsächliche Einsatzdauer („Bruttolebensdauer“) des Werkzeugs zu. Wesentlich für die Beurteilung des tatsächlichen Werkzeugverschleißes im Fall B ist daher eine probabilistische Bewertung der Eintretenswahrscheinlichkeit und -häufigkeit von Einzelbelastungen, die zum Sprödbruchversagen und unmittelbaren Austausch des Werkzeugs führen.

6. Ausblick und Empfehlungen

Aus den voranstehenden Erwägungen und Erfahrungen lassen sich aus Sicht der Autoren folgende Schlüsse ziehen:

1. Der Begriff der „Abrasivität“ sollte die Fähigkeit des Gebirges umfassen, jegliche Form von Werkzeugverschleiß hervorzurufen. Ihn alleine auf die Fähigkeit eines Gesteins zu beschränken, mehr oder minder kontinuierlichen Materialabtrag am Werkzeug zu verursachen, wird der Aufgabe des Geologen und Geotechnikers zur Beschreibung bautechnisch relevanter Baugrundparameter nicht gerecht.
2. Über den Maßstab des Gesteins hinausgehende, verschleißrelevante Gebirgsverhältnisse, wie z.B. „mixed-face“-Verhältnisse, „Blockigkeit“ oder ungewöhnliche Spannungsverhältnisse können nach Stand der Technik einen signifikanten Einfluss auf Gebirgslösung und Werkzeugverschleiß ausüben.
3. Derartige Gebirgsverhältnisse sind ebenfalls in der Risikosphäre des Bauherrn anzusiedeln.
4. Angaben zu Art, Auftretenswahrscheinlichkeit und Auftretenshäufigkeit derartiger gebirgsmaßstäblicher Phänomene sollten im Sinne einer fairen Risikoverteilung Eingang in das projektspezifische Baugrundgutachten und die Leistungsbeschreibung finden bzw. sich in Form eindeutiger LV-Positionen im Bauvertrag niederschlagen.
5. Der Verschleiß von Werkzeugen als Folge von katastrophalem Sprödbruchversagen ist nichtsdestotrotz „Werkzeugverschleiß“, auch wenn es sinnvoll sein kann, derartige Phänomene gesondert zu beschreiben und von mehr kontinuierlichem Abrasivverschleiß zu trennen.

Ein Blick über die Landesgrenzen zeigt, dass einige der angesprochenen Phänomene andernorts bereits Eingang in die Normung gefunden haben. So definiert die österreichische Werkvertragsnorm ÖNORM B2003-2 gebirgsmaßstäbliche Phänomene, wie „mixed-face-Verhältnisse“ oder „Blockigkeit“ konsequenterweise als „Erschwernisse“, welche einen höheren Aufwand verursachen oder die erzielbare Vortriebsgeschwindigkeit des eingesetzten Vortriebssystems reduzieren. Für

solche Erschwernisse sind gemäß ÖNORM Prognosen zu Verteilung, Bandbreiten und örtlicher Zuordnung zu erarbeiten.

Literaturverzeichnis

- [1] Alber, M. (1999): Geotechnische Aspekte einer TBM-Vertragsklassifikation.- Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Dezember 1998, 116 S, Berlin.
- [2] Alber, M. (2008): Stress dependency of the Cerchar Abrasivity Index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools.- in: Tunneling and Underground Space Technology, 23, 4: 351 - 359.
- [3] Beckmann , U & Simons, H. (1982): Tunnel-boring machine payment on basis of actual rock quality effect.- Tunnelling '82: 261-264, Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [4] Lagger, M. & Henzinger, M., Radončić, N. & Schubert, W, (2015): Influence of the primary stress state on the disc cutter penetration.- in: Schubert, W. (2015, Hrsg.), Proceedings EU-ROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium: 1139 – 1144, Salzburg.
- [5] ÖNORM B 2203-1: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 1: Zyklischer Vortrieb. Ausgabe vom 01.12.2001.
- [6] ÖNORM B 2203-2: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb. Ausgabe vom 01.01.2005.
- [7] Plinninger, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein.- Münchner Geologische Hefte, Reihe B, 17 - Angewandte Geologie, XI + 146 S., München.
- [8] Plinninger, R.J. (2011): Teilschnittmaschinen als alternatives Vortriebsverfahren im innerstädtischen Tunnelbau – Chancen und Risiken.- in: Tiedemann, J. (Hrsg., 2011): Veröffentlichungen zur 18. Tagung für Ingenieurgeologie, Berlin: 139-145.
- [9] Plinninger, R.J., Thuro, K. & Bruelheide, T. (2001): Erfahrungen bei Fräsvortrieben im Nürnberger U-Bahn-Bau. - Felsbau 19,1: 1-8, Essen (Glückauf).
- [10] Rutschmann, W. (1974): Mechanischer Tunnelvortrieb im Festgestein.- 200 S., Düsseldorf (VDI).

- [11] Weh, M (2007): TBM-Hartgesteinenvortriebe auf den Abschnitten Raron und Steg am Lötschberg: Erfahrungen und vertragliche Konsequenzen,- Kolloquium „Anspruchsvolle maschinelle Vortriebe im Fels“, ETH Zürich, 31.05.2007