

Geotechnische Einflüsse auf den Werkzeugverschleiß beim Bohren in Festgestein

Dr. Ralf J. Plinninger¹



Kurzfassung: Der Verschleiß von Bohrwerkzeugen stellt seit jeher einen äußerst relevanten, Leistung und Unkosten beeinflussenden Faktor dar. Verschleißphänomene wirken sich dabei nicht nur direkt auf den Bauablauf aus, sondern beeinflussen in vielfältiger Weise auch indirekt Vortriebsleistung sowie Rüst- und Wartungsaufwand. Bei Verschleißvorgängen handelt es sich um sehr komplexe Systeme mit Wechselbeziehungen zwischen Werkzeug, Gebirge, Spülmedien, Luft und Gesteinsbruchstücken. Die geologischen Einflüsse auf den Werkzeugverschleiß werden dabei als „Abrasivität“ zusammengefasst. Der vorliegende Beitrag stellt langjährige Erfahrungen zu den Themenkomplexen Dokumentation, Ursachenforschung und Abrasivitätsuntersuchungsverfahren zusammen. Obwohl der Schwerpunkt der Darstellungen auf herkömmlichen Kompositwerkzeugen mit Hartmetalleinsätzen (Stiftbohrkronen, Bohrstollen) liegt, sind viele der dargestellten Ansätze und Zusammenhänge z.B. auch auf PKD- und diamantbesetzte Drehbohrwerkzeuge übertragbar.

Schlüsselwörter: Abrasivität, Werkzeugverschleiß, Laboruntersuchungen

Abstract: The wear of drilling tools represents ever since a factor which is of crucial importance to the effectiveness and costs of a drilling project. Wear phenomena not only effect the drilling process directly (i.e. by costs for drilling tools) but can in many other ways have indirectly negative impact on standstill and maintenance. Wear process represent very complex systems with interactions between tools, rock mass, flushing, air and rock particles. The geological influences are summarized under the term of “Abrasiveity”. The presented paper resumes findings and examples for wear investigation, documentation and laboratory investigations gained in many years of on-site-investigations. Even if the focus is put towards conventional drilling tools, consisting of a steel body with inserted hard metal bits (button bits, drill picks) many of the presented findings ma be also applicable to other rotary drilling tools like PDC- or diamond bits.

Key Words: Rock Abrasivity, Tool Wear, Laboratory Investigations

¹ Dr.rer.nat. Ralf J. Plinninger, Diplom-Geologe (Univ.), PG – Dr. Plinninger Geotechnik, Kirchweg 16, D-94505 Bernried, Tel.: +49 9905 7070-360, Fax: +49 9905 7070-361, email: geotechnik@plinninger.de, Website: www.plinninger.de

1 Bohrwerkzeugverschleiß – ein relevanter Leistungs- und Kostenfaktor

Ob TBM-Vortrieb, Sprenglochbohrung, Ankerbohrung, Geothermiebohrung oder Lagerstättenexploration – der Verschleiß an den zur Gebirgslösung eingesetzten Bohrwerkzeugen stellt seit jeher einen äußerst relevanten, Leistung und Unkosten beeinflussenden Faktor dar.

Verschleißphänomene wirken sich dabei 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. Insbesondere bei Tiefbohrungen stellt der mit einem Werkzeugwechsel verbundene Aus- und Wiedereinbau des z.T. mehrere hundert bis tausende Meter langen Bohrstrangs einen erheblichen Stillstandsfaktor dar.

Nachstehende Abbildung 1 zeigt einen weiteren leistungsbezogenen Aspekt fortschreitenden Verschleißes: Das Absinken der Bohrkronenpenetration – und damit Bohrgeschwindigkeit – mit fortschreitendem Verschleiß der Bohrkronen.

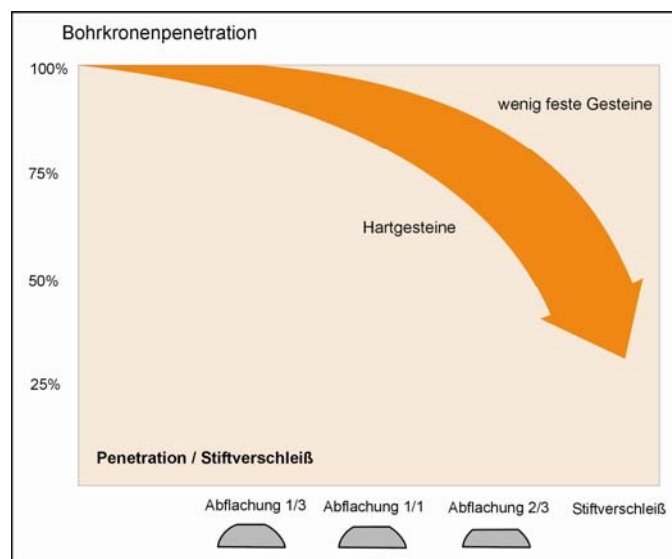


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Bohrkronenpenetration mit zunehmendem Hartmetallverschleiß (nach Atlas-Copco)

Der vorliegende Beitrag stellt langjährige Erfahrungen aus dem Bereich des Tunnel- und Spezialtiefbaus zusammen. Der Schwerpunkt der Darstellungen liegt dabei auf herkömmlichen Kompositwerkzeugen mit Hartmetalleinsätzen (Stiftbohrkronen, Bohrstollen). Viele der dargestellten Ansätze und Zusammenhänge sind dabei jedoch z.B. auf PKD- und diamantbesetzte Drehbohrwerkzeuge übertragbar.

2 Einflussfaktoren – ein Überblick

Anders als andere Materialgrößen, wie z.B. Druckfestigkeit oder Zugfestigkeit stellt Verschleiß jedoch keine „stoffbezogene“ Größe dar, für die ein physikalischer Kennwert ermittelt werden kann. Bei Verschleißvorgängen handelt es sich vielmehr um sehr komplexe Systeme mit Wechselbeziehungen zwischen Werkzeug, Gebirge, Spülmedien, Luft und Gesteinsbruchstücken. Der Verschleiß am Werkzeug ist dabei nur eines von vielen Resultaten des Verschleißvorgangs.

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. Eine vollständige Aufzählung aller Faktoren, die sich in entscheidender Weise auf den Werkzeugverschleiß auswirken können, würde bei weitem den Rahmen dieses Beitrags sprengen (siehe u.a. PLINNINGER, 2002).

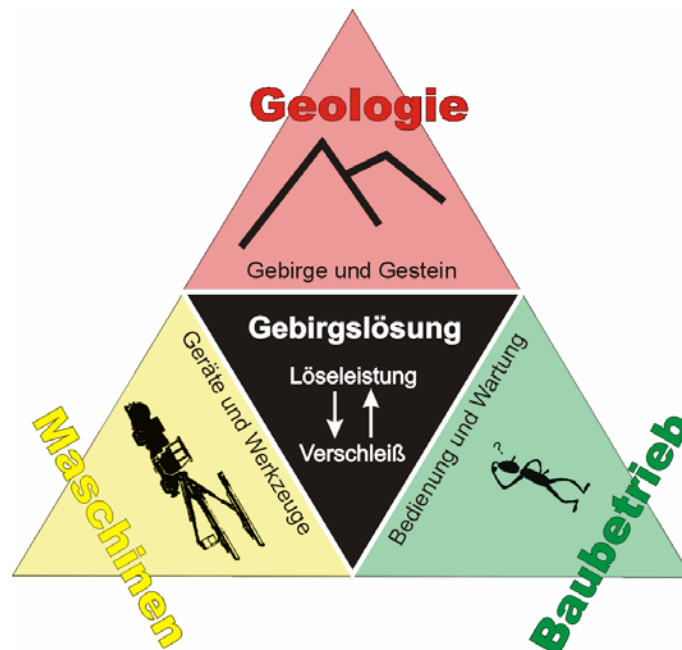


Abbildung 2: Schemazeichnung zur Komplexität des Bohrprozesses (aus PLINNINGER, 2002: Abb. 26, Seite 30)

Die geologischen Einflüsse auf den Werkzeugverschleiß werden dabei in der Fachterminologie unter dem Begriff der „Abrasivität“ zusammengefasst. Unter „Abrasivität“ versteht man also die Fähigkeit eines Gebirges bzw. Gesteins Verschleiß am Bohrwerkzeug hervorzurufen. Diese Abrasivität ist dabei keinesfalls eine absolute Größe, sondern ist auf Art und Eigenschaften des Lösewerkzeuges, als auch herrschende Systembedingungen (Druck, Temperaturzustände, etc.) zu beziehen.

3 Kenngrößen zur Verschleißfassung und -beschreibung

Im Rahmen zahlreicher Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass zwei Kenngrößen zur Beschreibung des Verschleißes am Bohrwerkzeug zielführend eingesetzt werden können: Die **Werkzeugverschleißrate** (quantitativer Verschleiß) sowie die **Werkzeugverschleißform**, auch als qualitativer Verschleiß bezeichnet:

- Die **Werkzeugverschleißrate** beschreibt die Geschwindigkeit des Materialverlustes am Werkzeug. Dieser Kennwert wird üblicherweise als kubaturbezogene (z.B. bei Bohrpfählen) oder längenbezogene (z.B. Sprengloch- oder Tiefbohrungen) Bruttoverschleißrate angegeben, d.h. er beschreibt die Einsatzdauer eines Werkzeugs gemessen vom Zeitpunkt der Bestückung mit dem fabrikneuen Werkzeug bis zum Austausch des abgenützten und nicht mehr leistungsfähigen Werkzeugs in Abhängigkeit von der Abbauleistung. Die auch in DIN 20301 verankerte Verschleißkenngröße für Bohrkronen ist üblicherweise die „Bohrkronenstandlänge“ [Bohrmeter/Krone].
- Die **Werkzeugverschleißform** beschreibt die zu beobachtende, spezifische Ausbildung des Verschleißes am Bohrwerkzeug. Sie kann einfach mit Hilfe spezifischer Klassifizierungsbilder bestimmt werden und dient vorrangig der Untersuchung und Interpretation von Verschleißursachen.

3.1 Erfassung der Werkzeugverschleißrate

In fast allen Bereichen des Bergbaus, Tunnelbaus und Spezialtiefbaus hat sich die Verwendung von praxistauglichen Bruttoverschleißangaben durchgesetzt, die beispielsweise auch verschiedenartigen Werkzeugformen und der damit verbundenen unterschiedlichen Ausnutzbarkeit bis zur Gebrauchsunfähigkeit des Werkzeugs Rechnung tragen.

In technischer Hinsicht ist die Ermittlung absoluter Nettoverschleißraten (z.B. spezifischer Materialabtrag in g/m^3) prinzipiell durchführbar, jedoch unverhältnismäßig aufwändig. Der im Rahmen eines kurzfristigen Beobachtungszeitraums am Werkzeug zu messende Materialabtrag ist – sofern nicht ein Sprödbbruchversagen eintritt – im Verhältnis zur Gesamtmasse oder Größe des Bauteils meist äußerst gering, was eine praxisorientierte Erfassung messtechnisch problematisch macht.

Zur Erfassung des Brutto-Werkzeugverbrauchs stehen nach eigenen Erfahrungen vor allem drei prinzipielle Wege der Datenerfassung zur Auswahl (Tabelle 1), die sich wie aufgeführt hinsichtlich des zusätzlichen Aufwands und Ihrer Verlässlichkeit unterscheiden.

Tabelle 1: Möglichkeiten zur Ermittlung von Werkzeugverbrauch (aus PLINNINGER, 2002, Tab. 5, S. 18).

Beschreibung der Methode	Mehraufwand	Fehler
Dokumentation von Einsatz- und Austauschzeitpunkt markierter Einzelwerkzeuge	hoch	ca. 1 %
Führen und Auswerten von Magazinlisten	gering	ca. 2 %
Auswerten von Liefer- und Bestellscheinen	kein	ca. 5-10 %

Das Führen und Auswerten von Magazinausgangslisten bei gleichzeitiger Rückstellung und Untersuchung der rückgelaufenen Werkzeuge ist dabei die am häufigsten angewandte Methode mit dem besten Verhältnis von Aufwand und Fehler.

Eine Dokumentation von Einsatz- und Austauschzeitpunkt markierter Einzelwerkzeuge stellt demgegenüber einen hohen Mehraufwand dar. Diese durchaus z.B. auf Tunnelbaustellen (z. B. Meisterntunnel Bad Wildbad; PLINNINGER (2002) im Zuge einvernehmlicher Beweissicherungsmaßnahmen durchgeführte Methode besitzt jedoch in Hinsicht auf die Transparenz der Erhebungen und der Fehlermöglichkeiten zahlreiche Vorteile.

Für zahlreiche Verfahren, wie z.B. das drehschlagende Bohren von Sprenglochbohrungen mit üblichen Stiftbohrkronen-Durchmessern von 43 – 48 mm sind Standlängenklassifizierung erarbeitet worden, die ein begriffliche Fassung z.B. „niedriger“ oder „hoher“ Verschleißraten zulassen (siehe z.B. THURO & PLINNINGER, 2003).

3.2 Erfassung der Werkzeugverschleißform

Beim Bohrvorgang eine Beobachtung des Vorgangs und exakte Bestimmung der Systembedingungen des Verschleißsystems unmöglich. Die Beurteilung der Verschleißvorgänge ist in der Regel nur auf theoretischer Basis möglich, gestützt auf Aufzeichnungen Beobachtungen an der Bohrmaschine während des Bohrvorgangs, nachträgliche Untersuchungen am Werkzeug und - in seltenen Fällen – nachträgliche Beobachtungen am Gebirge.

Die Beurteilung der eingetretenen Verschleißform am Bohrwerkzeug hat sich dabei als aufschlussreicher „Fingerabdruck“ des Verschleißvorgangs bewährt und ist in der Lage, wertvolle Hinweise auf die geologischen und werkzeugtechnischen Verschleißursachen zu liefern.

In der Praxis wird zur Beurteilung der Werkzeugverschleißform eine repräsentative Anzahl verschlissener Bohrwerkzeuge (i.d.R. 50 – 100 Stück) vor Ort rückgestellt und optisch auf deren Verschleißform hin untersucht (Abbildung 3).



Daten zur Dokumentation	
Dokumentiert am:	13.04.2007
Dokumentiert durch:	Dr. Plinninger, PG
Nr. des AZ:	-
Dokumentiertes Werkzeug:	Bohrstollen, Wechselsystem BAUER, 3x Ø115mm HM-Stifte frontal, 3x Ø115mm HM-Stifte lateral
Dokumentationsort:	Container
Einsatz durch / in Zeitraum:	ARGE Tunnel Musterstadt, 01.06.2006 - 01.03.2007
Anzahl ausgewertete Werkzeuge:	50 Stück
Methodik (siehe ankreuzen):	<input type="checkbox"/> alle vorhanden <input checked="" type="checkbox"/> statistische Entnahme einer Teilmenge

Verschleißformauswertung			
Anzahl (Stück)	Prozent (%)	Kurzform	Beschreibung der Verschleißformauswurfsursache
29	58 %	Verschleiß durch HM-Sprödbreche	Austausch aufgrund von Sprödbrechungen der Hartmetalleinsätze, v.a. frontal, z.T. nach vorherigen Abrasivverschleiß
21	42 %	Abrasivverschleiß	Abrasivverschleiß, bevorzugter Abtrag des Stahlgundkörpers, alle HM-Stifte noch vorhanden
0	0 %	CF/CAF	

Zusätzliche Beobachtungen			
Anzahl (Stück)	Prozent (%)	Kurzform	Beschreibung der Verschleißformauswurfsursache
18	36 %	-	deutliche abrasive Abnutzung der inneren geraden Hohlumfänge (Materialabnutzung von etwa 10mm auf 8 mm)

Verschleißformanteile (Tortendiagramm)

Verschleißformen Bohrstollen Typ Wechselsystem

Abrasivverschleiß 42%

Verschleiß durch HM-Sprödbreche 58%

Ort Datum: Musterstadt, 13. April 2007

Unterschrift: [Signature]

Abbildung 3: Auswertung der Bohrkronenverschleißform vor Ort (links) und Darstellung in Formblatt (rechts).

Anders als bei Werkzeugen, die homogen aus einem Material aufgebaut sind (wie Stahlmeißel, Stahldisken ohne HM-Schneide) wird das Verschleißverhalten von Kompositbohrwerkzeugen (Stiftbohrkronen, Bohrstollen) vom Zusammenspiel der Abnutzung des Werkzeugträgers und der Hartmetalleinsätze gesteuert.

Dabei ist hinsichtlich der Materialeigenschaften wesentlich, dass die WIDIA-Einsätze als Sinterhartmetalle zwar über hohe Materialhärte und Verschleißresistenz verfügen, andererseits jedoch hochspröde Werkstoffe darstellen, die anfällig für Splitterbrüche bei hohen Stoßimpulsen sind. Umgekehrt verfügt der Grundkörper aus Werkzeugstahl zwar über geringe Härte und Verschleißresistenz, jedoch über hohe Zähigkeit und Duktilität.

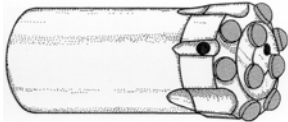
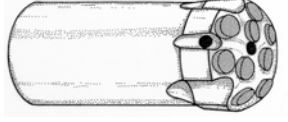
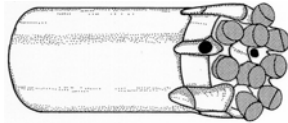
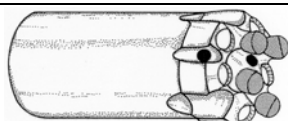
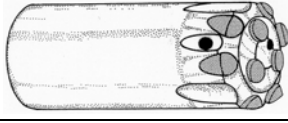

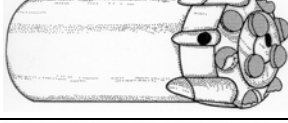




Vereinfacht werden von in PLINNINGER (2002) vier Kategorien von Verschleißvorgängen zusammengefasst:

- **Abrasivverschleiß** als „herkömmlicher“, mechanischer Verschleiß infolge von gleitenden Kontakten zwischen Werkzeug- und Gesteinsoberfläche bzw. Partikeln. Abrasivverschleiß stellt einen mehr oder minder kontinuierlichen Materialabtrag vor allem durch mikroskopische Abrasions- und Adhäsionsvorgänge dar.
- **Verschleiß durch Sprödbrechung** von Werkzeugmaterialien infolge hoher Spannungen, z.B. bei schlagender Beanspruchung (Prall- und Stoßverschleiß). Sprödbreche führen oft zu einem katastrophalen Versagen von Teilen des Lösewerkzeuges (Sprödbrechung von Hartmetalleinsätzen oder Stahlbauteilen).
- **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-, Sprödbrech- 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 evtl. eingesetzten Spülmediums abhängig.

Diese Verschleißkategorien können wie in

Tabelle 2 dargestellt näher unterteilt und in Form aussagekräftiger Schemata dargestellt werden.

Tabelle 2: Verschleißklassifizierung von Stiftbohrkronen (nach PLINNINGER, 2002).

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

4 Verschleißformen und -ursachen bei Stiftbohrkronen

Nach den bisherigen Erfahrungen lassen sich verallgemeinernd folgende typische Ursachen für die einzelnen Verschleißformen aufzählen:

Normaler Verschleiß (A1) ist Folge eines gleichmäßigen, Hartmetall und Werkzeugträger betreffenden Abrasivverschleißes. Er tritt z.B. 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 – durch Mikroabrasions- und -bruchvorgänge von weniger abrasiven Mineralen abgenutzt.

Bevorzugter Verschleiß des Werkzeugträgermaterials (A2) mit der Gefahr von *Stiftausbrüchen infolge Bettungsverlust* (A3) ist ein typisches Phänomen beim Lösen wenig fester Gesteine. Häufig ist dieser Verschleißtyp bei gleichzeitig hohem Gehalt an schleißscharfen Mineralen, wie z.B. mürben Quarzsandsteinen, sandigen Mergelsteinen, verwitterten oder hydrothermal zersetzten Graniten oder Gneisen. Auch bei Gesteinen mit geringer Abrasivität ist (bei entsprechend niedrigen Verschleißraten) vor allem der Werkzeugträger vom Abrasivverschleiß betroffen. Da in den angesprochenen Gesteinen eine tiefe Penetration der Werkzeuge und ein großer Andrang gelösten Materials anzutreffen sind, tritt auch der Werkzeugträger vermehrt in Kontakt mit Partikeln und Bruchstücken. Das typische Verschleißbild resultiert dann aus der Tatsache, dass bei identischer Exposition gegenüber Abrasivverschleiß die verschleißresistenteren Hartmetallstifte einer geringeren Verschleißrate unterworfen sind, als das „weichere“ Werkzeugträgermaterial. Die Einsätze werden zunehmend aus ihrer Bettung herauspräpariert, bis hin zum vollständigen Ausbruch von Stiften (A3), der durch fehlende oder schlechte Verbindung zwischen Hartmetallstift und Werkzeugträger noch forciert wird.

Kaliberverschleiß von Bohrkronen (K-A4, K-A5) ist typisch für hochabrasive Quarzite und instabile Gebirgsverhältnisse in abrasivem Gebirge, wenn das erstellte Bohrloch innerhalb kürzester Zeit deformiert wird und/oder einzelne „Keile“ in den Hohlraum gedrückt werden. Bei fortschreitendem Kaliberverschleiß ist häufig das Ausbrechen peripherer Hartmetallstifte zu erkennen, während die stirnseitigen Stifte oftmals noch wenig Verschleiß zeigen.

Makroskopisches Spröbruchversagen 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 Werkzeugeneigenschaften, 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.

Spröbruchversagen des Kronenschafts (S3) ist in der Regel Gewaltschaden oder Materialdefekt und lässt kaum Rückschlüsse auf geologische Ursachen zu.

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.

5 Geotechnische Verfahren der Abrasivitätsuntersuchung

5.1 Gesteinsabrasivität – Ursache für Bohrerwerkzeugverschleiß

Ein Festgestein (Fels) ist ein natürliches Gemenge eines (monomineralisch) oder mehrerer Minerale (polymineralisch) mit entweder homogener oder inhomogener Zusammensetzung und isotropen (in allen Raumrichtungen gleichen) oder anisotropen (richtungsabhängigen) Eigenschaften. Die Fähigkeit eines Gesteins, Verschleiß am Lösewerkzeug hervorzurufen, wird als „Gesteinsabrasivität“ bezeichnet. Diese Gesteinsabrasivität setzt sich aus einer Vielzahl von Gesteinseigenschaften zusammen, die alle gemeinsam - niemals eine für sich allein - die Höhe der Abrasivität steuern.

Der Frage, welche Eigenschaften eines Gesteins seine Abrasivität beeinflussen, ist in umfangreichen Feld- und Laboruntersuchungen zahlreicher Bearbeiter nachgegangen worden (PLINNINGER, 2002). Zusammenfassend können folgende Feststellungen getroffen werden:

- Die Fähigkeit eines Gesteins, **Abrasivverschleiß** am Werkzeug hervorzurufen, wird vor allem vom *Mineralinhalt* (hier vor allem der Härte der enthaltenen Einzelminerale sowie deren Anteil am Gesteinsaufbau), von der *Festigkeit des Gefügeverbandes*, den *Gefügeeigenschaften* des Gesteins sowie *Mineralkorngröße* und *Mineralkornform* bestimmt. Mit höherem Anteil an Mineralen hoher Mineralhärte, Zunahme der Festigkeit des Gefügeverbandes, Zunahme der Mineralkorngröße und eckigen Mineralkornformen steigt die Abrasivität eines Gesteins.
- Die Fähigkeit eines Gesteins, **Verschleiß durch Spröbruch** von Werkzeugmaterialien hervorzurufen, hängt von der Festigkeit und Verteilung der bei der Gebirgslösung angetroffenen Gesteinspartien ab. Die Gesteinsfestigkeit wird maßgeblich von der *Festigkeit des Gefügeverbandes*, dem *Gesteinsgefüge*, aber auch *Art und Festigkeit der Einzelkomponenten* beeinflusst. Bei sehr grobkörnigen Gesteinen, bei denen Einzelminerale und Einzelkomponenten Durchmesser im Bereich des etwa doppelten Hartmetall-Durchmessers erreichen, spielen *Korngröße* und *Festigkeit dieser Einzelkomponenten* eine bestimmende Rolle.
- Aufgrund ihrer Fähigkeit, Maschinen und Werkzeuge zu **verschmieren und zu verkleben**, können auch feinkörnige und tonmineralreiche Festgesteine einen ungünstigen Einfluss auf den Werkzeugverschleiß nehmen (PLINNINGER, THURO & BRUELHEIDE, 2001).

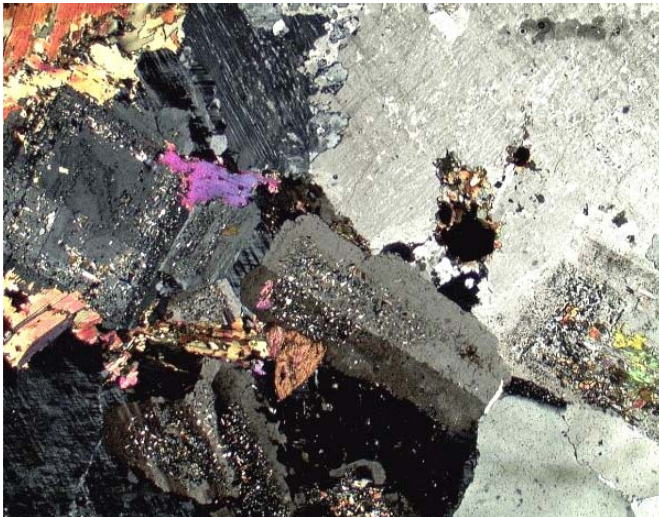


Abbildung 4: Petrographischer Dünnschliff(links) und Einaxialer Druckversuch (rechts) – Ingenieurgeologische Standardverfahren zur Bestimmung von Festgesteinseigenschaften

5.2 Ein Überblick über Verschleißprognoseverfahren und ihre Anwendung

Zur Untersuchung der Abrasivität sind 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 (Abbildung 5).

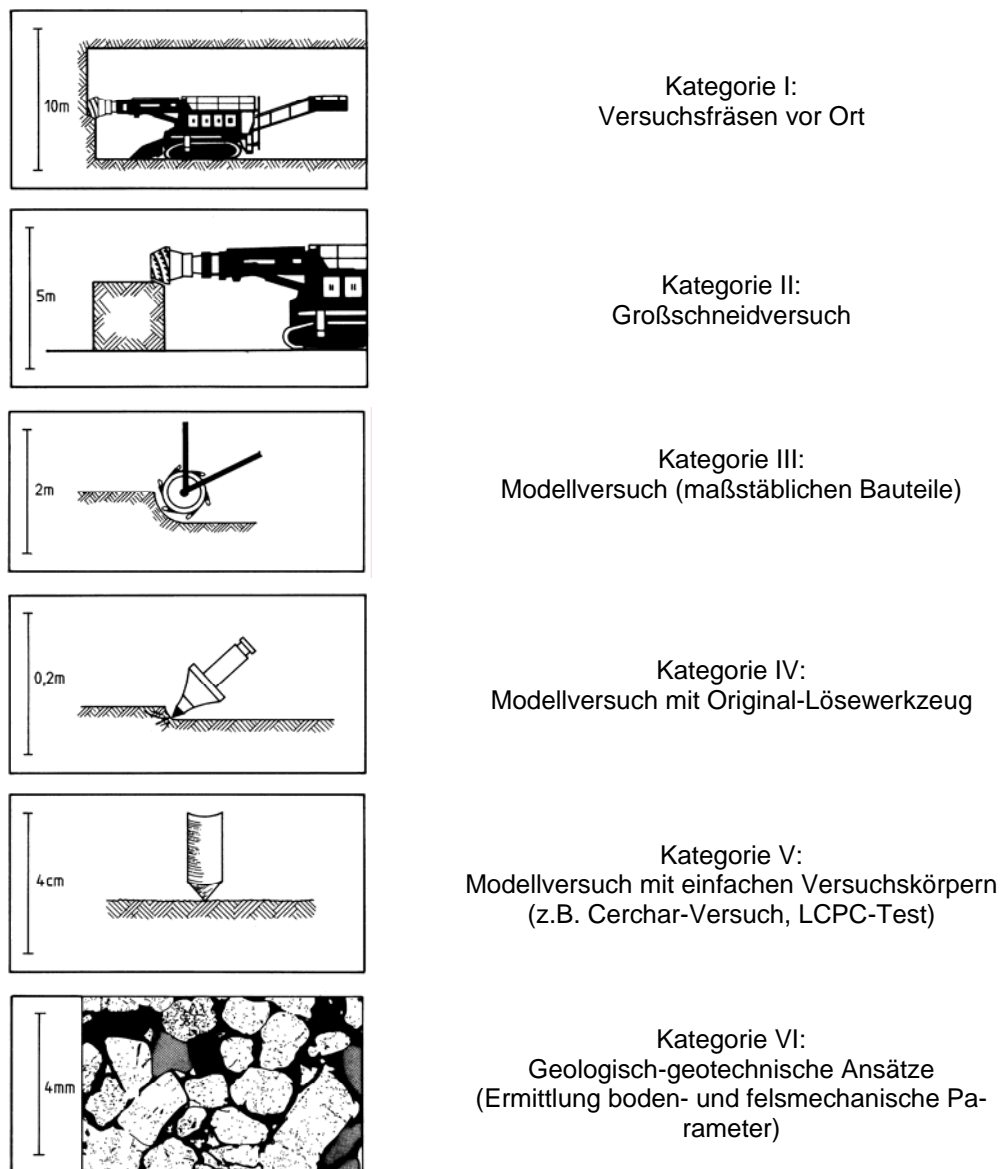


Abbildung 5: Kategorien der Verschleißprüfung am Beispiel der Gebirgslösung mit Teilschnittmaschine (in Anlehnung an DIN 50322, nach PLINNINGER, 2002).

Zum gegenwärtigen Stand der Versuchstechnik lassen sich folgende generelle Schlussfolgerungen zur Anwendung und Anwendbarkeit der Verfahren ziehen:

- *Vor-Ort-Versuche* oder Versuche an größeren Gesteinsblöcken stellen bei repräsentativer und entsprechend umfassender Wahl von Probestrecke bzw. Probenmaterial eine verlässliche Möglichkeit für eine Lösbarkeitsbeurteilung (Verschleiß und Löseleistung) dar. Die meisten geologi-

schen und maschinentechnischen Einflussfaktoren werden hierbei berücksichtigt. Die Verfahren sind jedoch mit erheblichen Versuchskosten durch hohen materiellen und personellen Aufwand verbunden und werden daher nur sehr selten durchgeführt.

- *Modellversuche*, wie das nachstehend vorgestellte Cerchar-Verfahren oder der LCPC-Versuch werden mittlerweile sehr häufig eingesetzt und liefern meist schnell zu ermittelnde, kostengünstige Indexparameter zur Verschleißabschätzung. Die z.T. aufwändigen Verfahren, berücksichtigen aber einige grundlegende geologische und maschinentechnische Einflussfaktoren nicht bzw. unterscheiden sich in Ihrer Versuchsanordnung grundlegend von den tatsächlichen Verhältnissen. Es muss berücksichtigt werden, dass die Anwendung verschiedener Versuchsverfahren zu nicht immer miteinander korrelierenden Ergebnissen. Es sind in diesem Bereich zunehmende Anstrengungen zur Normierung und Optimierung der Versuchsverfahren zu verzeichnen.
- *Geologisch-geotechnische Ansätze* sind relativ kostengünstig durchzuführen und verwenden überwiegend Parameter, die auch für andere Belange (z.B. Stabilitätsabschätzung, Weiterverwendbarkeit des Ausbruchmaterials, etc.) von Relevanz sind. Die Bestimmung dieser Indices stellt also z.B. im Zuge der Vorerkundung keinen oder einen nur geringen Mehraufwand dar. Neben den älteren Verschleißindices *Äquivalenter Quarzgehalt*, *VHNR* und *Schimazek-Verschleißindex* wird nachstehend mit dem 2002 eingeführten *Rock Abrasivity Index* (RAI) ein weiterer einfach anwendbarer Indexwert vorgeschlagen. Die vorliegenden empirischen Ergebnisse (PLINNINGER, 2002) zeigen, dass Rock Abrasivity Index, Schimazek-Verschleißindex und Äquivalenter Quarzgehalt als geeignete Kennwerte für die Prognose des quantitativen Bohrkronenverschleißes angesehen werden können.

5.3 Cerchar-Abrasivitätsversuch (CAI)

Der Abrasionsversuch nach den Prüfeempfehlungen des CERCHAR (CENTRE D'ETUDES ET RECHERCHES DE CHARBONNAGES DE FRANCE, 1986) hat in Mitteleuropa weite Verbreitung für Zwecke der Abrasivitätsbeurteilung von Festgesteinen gefunden.

Der Versuch basiert auf einem definierten Prüfstift, der bei konstanter Auflast über 10 mm eines Prüfkörpers gezogen wird (Abbildung 6). Der CERCHAR Abrasivitätsindex (CAI) errechnet sich als Mittelwert über 2-5 Einzelversuche aus der Breite der am Prüfstift entstandenen kegelstumpfförmigen Verschleißphase.



Abbildung 6: Cerchar-Abrasivitätsversuch: Typisches Prüfgerät (links) und auf Gesteinsprobe aufgesetzter Prüfstift vor dem Versuch (rechts).

Aufgrund zahlreicher erkannter versuchstechnischer Einflussfaktoren (u.a. PLINNINGER, et al. 2003, KÄSLING et al., 2007) und von Labor zu Labor differierenden Prüfgeräten und -prozeduren wird derzeit im Rahmen des AK Versuchstechnik Fels der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) eine nationale Prüfeempfehlung angestrengt, die die Vergleichbarkeit des in verschiedenen Instituten ermittelten CAI sicherstellen soll.

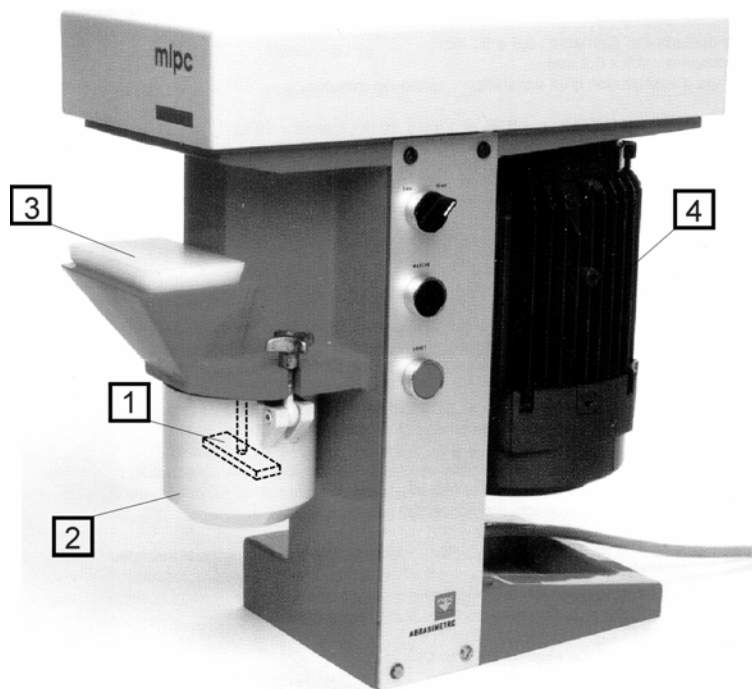
Für zahlreiche Gebirgslöseverfahren, z.B. für den Verschleiß von 45mm-Stiftbohrkronen, Rundschäftmeißeln und Einringdisken, sind mittlerweile empirische Zusammenhänge zwischen Gesteinsabrasivität (CAI) und spezifischem Werkzeugverschleiß ermittelt und publiziert worden (THURO & PLINNINGER, 2007).

Zahlreiche Arbeiten, die sich mit der Übertragung von Modellversuchen auf reale Werkzeugverschleißraten beschäftigen zeigen jedoch, dass generell Verschleißvorhersagen nach Durchführung eines einfachen Modellversuches mit erheblichen Unsicherheiten belastet sind (u.a. PLINNINGER, 2002).

5.4 LCPC-Abroy-Test (ABR)

Der als Drehflügelversuch oder LCPC-Abrasimetre (**L**aboratoire **C**entral des **P**onts et **C**haussées - LCPC) bezeichnete Test wurde in den 70er Jahren aus der Brecherindustrie als Indexversuch zur Abrasivitätsuntersuchung adaptiert und wird derzeit vor allem als Verschleißuntersuchungsverfahren für Lockergesteine propagiert (u.a. THURO et al., 2006).

Der LCPC-Test wird an 500 g gebrochenem Probenmaterial definierter Körnung (\varnothing 4 - 6,3 mm; Feinkiesbereich) durchgeführt. Die Probe wird in einen zylindrischen Behälter eingefüllt und dort 5 Minuten lang bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 4500 U/min von einem Metallflügel definierter Geometrie und Härte durchmengt, der dabei verschlissen wird.



- | | |
|-----------------------|---|
| ① Welle mit Prüflügel | ② Probenbehälter mit 500g Gesteinsprobe |
| ③ Einfülltrichter | ④ Antriebsmotor |

Abbildung 7: Ansicht des LCPC-Prüfgerätes der Fa. mlpc (Firmenunterlage mlpc)

Für die Bestimmung des Abrasivitätsindex **ABR** [g/t] wird das Ausgangs- und Endgewicht des Metallflügels herangezogen. Obwohl begriffliche Klassifizierungen der Abrasivität nach dem ABR vorliegen (siehe THURO et al., 2006 für eine Zusammenstellung), ist eine direkte Übertragung auf Bohrwerkzeugverschleißraten bisher nicht publiziert.

Insbesondere für die Anwendung auf den Bohrwerkzeugverschleiß im Festgestein erscheint es fraglich, ob eine Versuchsanordnung, die auf der Prüfung relativ feinkörnigen, gebrochenem Materials beruht, brauchbare Korrelationen ergeben kann (PLINNINGER, 2002). EWENDT (1989) führt z.B. als Nachteile, die mit der Verwendung gebrochenen Probenmaterials einhergehen, die fehlende Berücksichtigung des Kornbindungseinflusses und eventueller anisotroper Eigenschaften an.

5.5 Rock Abrasivity Index (RAI)

Als weitere, in den letzten Jahren zunehmend national (PRINZ & STRAUß, 2006) und international eingesetzter Verschleißkennwert soll im Folgenden der *Rock Abrasivity Index* (RAI, Plinninger [2]) vorgestellt werden. Er wird aus petrographisch-felsmechanischen Analysen an Gesteinsproben berechnet und zählt damit ebenso wie die *Vickers Hardness Number for the Rock* (VHNR, [43]) oder der *modifizierte Schimazek-Verschleißindex* (F_{mod} , [19]) zu den geologisch-geotechnischen Indices. Bei der Korrelation mit Standlängen sollte jedoch stets berücksichtigt werden, dass die Ermittlung dieser Kennwerte an Gesteinen durchgeführt wird, während Bohrkronenstandzeiten als Mittelwerte über Homogenbereiche des Gebirges berechnet werden.

In Abbildung 8 ist die Bohrkronenstandlänge von \varnothing 38-45 mm Stiftbohrkronen gegen den Gesteinsabrasivitäts-Index RAI aufgetragen. Obwohl der RAI einige weitere wesentliche Einflussfaktoren (wie Korngrößeneinfluss, Einfluss der Kornrundung, etc.) vernachlässigt – und damit erheblich einfacher zu bestimmen ist als z.B. der modifizierte Schimazek-Verschleißindex – zeichnet er sich gegenüber anderen Indexwerten, wie dem äquivalenten Quarzgehalt und dem Schimazek-Index durch eine bessere Bestimmtheit der Kurve, geringere Streubreiten und eine ausgeglichene Punkteverteilung aus.

Die Streuung der Bohrkronenstandlängen (Standzeit) 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 durch die Sicherung hindurch gebohrte Spieße zu vermehrten Gewaltschäden am Bohrwerkzeug führen können.

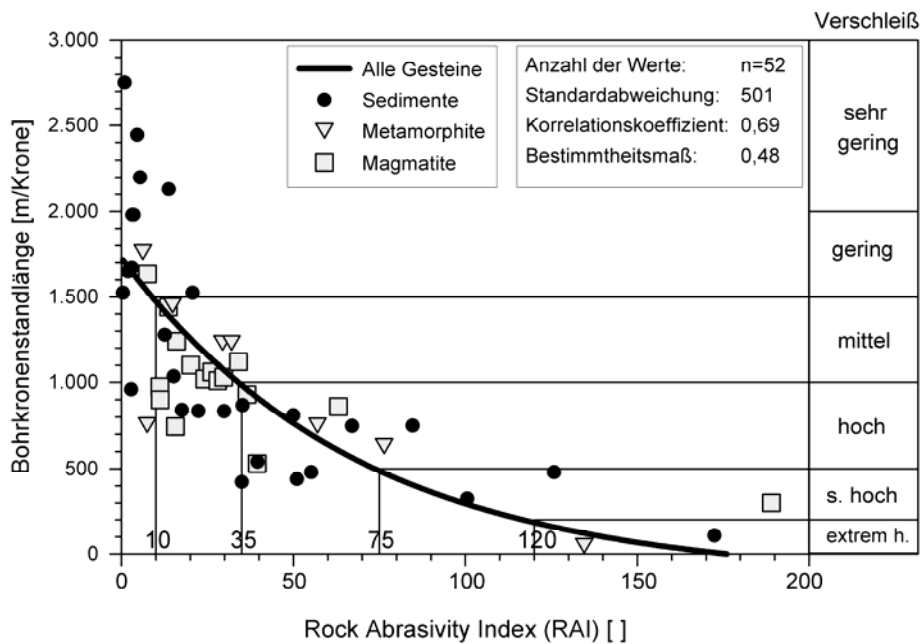


Abbildung 8: Bohrkronenstandlänge (Standzeit) und Gesteinsabrasivitätsindex RAI (PLINNINGER, 2002).

6 Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Aufsatz werden zusammenfassend die geologischen Vorgänge dargestellt, die zum Verschleiß an Bohrwerkzeugen führen. Kenngrößen für die Beschreibung von Bohrwerkzeugverschleiß stellen die Werkzeugverschleißrate und die Werkzeugverschleißform dar, für die praxistaugliche Dokumentationsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Die vier Verschleißursachen *Abrasivverschleiß*, *Verschleiß durch Sprödbruch von Werkzeugmaterialien* sowie *Sonderformen* werden als praxistaugliche Kategorien zusammengefasst und mit ihren Ursachen beschrieben. Mit Hilfe der dargestellten, spezifischen Verschleißformen erscheint eine grobe und praxistaugliche Rekonstruktion der Verschleißursachen möglich.

Der Verschleiß von Bohrwerkzeugen stellt einen äußerst komplexen Vorgang dar, bei dem eine Vielzahl von Einzelfaktoren - aus den Bereichen Geologie, Maschinen- und Werkzeugtechnik und Baubetrieb - auf ganz unterschiedliche Weise Einfluss auf den Verschleißvorgang nehmen können. Die Optimierung und Untersuchung von Bohrwerkzeugverschleiß stellt ein interdisziplinäres Feld dar, das breiten Raum für ein konstruktives Miteinander von Bauingenieur, Maschinenbauer und Geologe bietet.

Die geologisch bedingten Einflüsse werden als "Abrasiveität" des zu lösenden Gebirges zusammengefasst. Obwohl nur ein Faktor unter vielen, zeigt sich, dass der Abrasiveität von Gestein und Gebirge eine Schlüsselstellung für Qualität und Quantität des Werkzeugverschleißes zukommt. Die derzeit am häufigsten eingesetzten Verschleißuntersuchungsverfahren Cerchar-Test, LCPC-Test und geotechnisch-mineralogische Verschleißindices vorgestellt und hinsichtlich Ihrer Eignung bewertet.

7 Literaturverzeichnis

- CERCHAR - Centre d' Etudes et Recherches de Charbonnages de France (1986): The Cerchar Abrasiveness Index.- 12 S., Verneuil.
- DIN (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.) (1999): DIN 20301 – Gesteinsbohrtechnik – Begriffe, Einheiten, Formelzeichen.- 7 S., Berlin (Beuth).
- EWENDT, G. (1989): Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognose des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln.- Bochumer geol. u. geot. Arbeiten, 33, 88 S., 27 Abb., 16 Tab., Diss. Ruhrniv. Bochum.
- KÄSLING, H., THIELE, I. & THURO, K. (2007): Abrasivitätsuntersuchungen mit dem Cerchar-Test – eine Evaluierung der Versuchsbedingungen.- in: Otto, F. (Hrsg.): Veröffentlichungen von der 16. Tagung für Ingenieurgeologie, Bochum, 07 bis 10. März 2007: 229-235
- PLINNINGER, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein. – Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, B17, XI + 146 Seiten.
- PLINNINGER, R.J., KÄSLING, H., THURO, K. & SPAUN, G. (2003): Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value.-International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, 2: 259-263, (Elsevier).
- PLINNINGER, R.J., THURO, K. & BRUELHEIDE, T. (2001): Erfahrungen bei Fräsvortrieben im Nürnberger U-Bahnbau.- Felsbau, 19, 1: 8-13.
- PRINZ, H. & STRAUß, R. (2006): Abriss der Ingenieurgeologie.- 4. Auflage (Elsevier)
- THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb.- Münchner Geol. Hefte, Reihe B, 1: 45 S., 115 Abb., 39 Tab., München.
- THURO, K. & PLINNINGER, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Leistungs- und Verschleißparametern im Tunnelbau.- in: DGGT (ed.): Taschenbuch für den Tunnelbau 2003, 27: 62-126, Essen (Glückauf).
- THURO, K. & PLINNINGER, R. (2007): Geologisch-geotechnische Grundlagen der Gebirgslösung im Fels. - In: Eichler, K. et. al. (Hrsg.): Fels- und Tunnelbau II: 112-160, Kontakt und Studium, Band 684, Renningen-Malmsheim (Expert).
- THURO, K., SINGER, J. KÄSLING, H. BAUER, M. (2006): Abrasivitätsuntersuchungen an Lockergesteinen im Hinblick auf die Gebirgslösung. – In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: Beiträge zur 29. Bau- grundtagung, 27. - 29. Sept. 2006 in Bremen, 283-290.