

Abrasivitätsuntersuchung von Boden und Fels auf Basis der neuen VOB/C

Dipl.-Geol. (Univ.) Dr.rer.nat. Ralf J. PLINNINGER
Ingenieurbüro Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried

KURZFASSUNG

Mit Erscheinen des Ergänzungsbands 2015 zur VOB 2012 ergeben sich in Deutschland für die Baugrundkundung im Erd-, Grund-, Tief- und Spezialtiefbau umfassende Änderungen. Dies betrifft nicht nur das Konzept der geotechnischen „Homogenbereiche“, sondern auch die hierfür zu ermittelnden Kennwerte. Im Bereich der Abrasivitätsbewertung werden mit Erscheinen des Ergänzungsbands in Deutschland erstmals „Standards“ gesetzt. Der für Fels referenzierte „CERCHAR-Versuch“ stellt dabei ein aussagekräftiges, reproduzierbares und wirtschaftliches Verfahren dar, mit dem national und international umfangreiche Erfahrungen vorliegen. Eine sinnvolle Weiterentwicklung könnte dennoch in der Einbeziehung mineralogisch-petrographischer Ansätze für die Untersuchung von Fels bestehen. Im Gegensatz dazu stellt der für Boden referenzierte „LCPC-Versuch“ ein Versuchsverfahren dar, das durch die Verwendung stark vereinfachter Modellkörper und stark vereinfachter Versuchsrahmenbedingungen mutmaßlich zahlreiche neue, versuchstechnische Probleme implizieren wird. Böden in Ton-, Schluff- und Sandfraktion können bei normgemäß Anwendung des Verfahrens nicht untersucht werden. Ebenso werden durch Probenahme und Probenvorbereitung eine Vielzahl verschleißrelevanter Bodenparameter verändert. Diese Aspekte lassen es zumindest fraglich erscheinen, ob das Ziel einer auch bauvertraglich belastbaren Bewertung der Abrasivität von Böden mit dieser Versuchsvorgabe erreicht wurde. Auch im Bereich der Lockergesteine könnte daher eine sinnvolle Weiterentwicklung in der Berücksichtigung geologisch-geotechnischer Prognoseindizes bestehen, die auf herkömmlichen, „intrinsischen“, bodenmechanischen Kennwerten beruhen.

1. ABRASIVITÄTSUNTERSUCHUNGEN GEMÄß VOB/C (ERGÄNZUNG 2015)

Mit Erscheinen des Ergänzungsbands 2015 zur deutschen VOB 2012 [DIN, 2015a] ergeben sich für die Ausschreibung und Vergütung von Bauleistungen im Tiefbau sowie die dafür erforderliche Baugrundkundung umfassende Änderungen. Dies betrifft nicht nur die Umstellung von den bis dato gültigen gewerkespezifischen Boden- und Felsklassifizierungen hin zum Konzept der geotechnischen „Homogenbereiche“, sondern betrifft auch die für diese Homogenbereiche zu ermittelnden Kennwerte. So enthält jede der „neuen“ „ATVen“ der VOB/C nicht nur eine Zusammenstellung der für das jeweilige Gewerk in Boden und Fels als maßgeblich erachteten Kennwerte, sondern ebenfalls eine eindeutige Vorgabe der anzuwendenden Prüfnormen- bzw. -empfehlungen.

Auch im Bereich der Untersuchung und Bewertung der Abrasivität werden für Boden und Fels erstmals „Standards“ gesetzt. In den Allgemeinen Technischen Vertragsbedingungen (ATVen) für Bohrarbeiten (DIN 18301; [DIN, 2015b], Untertagebauarbeiten (DIN 18312; [DIN, 2015c], Rohrvortriebsarbeiten (DIN 18319; [DIN 2015d] und Horizontalspülbohrarbeiten (DIN 18324; [DIN 2015e]) werden für die Anwendung im Boden die französische Norm AFNOR NF P18-579 [AFNOR, 1990], beziehungsweise der sogenannte „LCPC-Test“ und für die Anwendung im Fels

die AFNOR NF P94-430-1 [AFNOR, 2000], beziehungsweise der sogenannte „CERCHAR-Test“ referenziert.

Diese Vorgaben ersetzen die bis dato allenfalls in Absatz 0 „Hinweise für das Aufstellen der Leistungsbeschreibung“ aufgeführten, unspezifischen Forderungen der ATVen nach „Angaben zur Abrasivität“, die sich in der Praxis als wenig zielführend erwiesen haben.

In den folgenden Absätzen sollen nicht nur die beiden in der VOB/C verankerten Prüfverfahren „CERCHAR-Test“ und „LCPC-Test“ vorgestellt und diskutiert werden, sondern darüber hinaus ein breiterer Überblick über die Thematik der Abrasivitätsuntersuchung und den aktuellen Stand der Normung und Entwicklung gegeben werden.

2. BEGRIFFSDEFINITION „ABRASIVITÄT“

Unter „Abrasivität“ wird in der Ingenieurgeologie und Geotechnik die Fähigkeit des Baugrunds verstanden, Verschleiß an einem in Boden oder Fels eingesetzten Werkzeug hervorzurufen [8], [9]. Abrasivität und Werkzeugverschleiß stellen im komplexen, sog. „tribologischen System“ des Werkzeugverschleißes also Ursache und Wirkung beim Lösen, Laden und Transportieren von Boden und Fels dar (siehe Abb. 1).

Vor dem Hintergrund der bauvertraglichen Risikoverteilung der VOB dient die Bestimmung und Beschreibung der Abrasivität des Baugrunds durch den Auftraggeber (Bauherrn) dem Zweck, dem Auftragnehmer (Bauunternehmung) Prognosen zum Verschleiß der von ihm eingesetzten Baumaschinen und Werkzeuge zu ermöglichen.

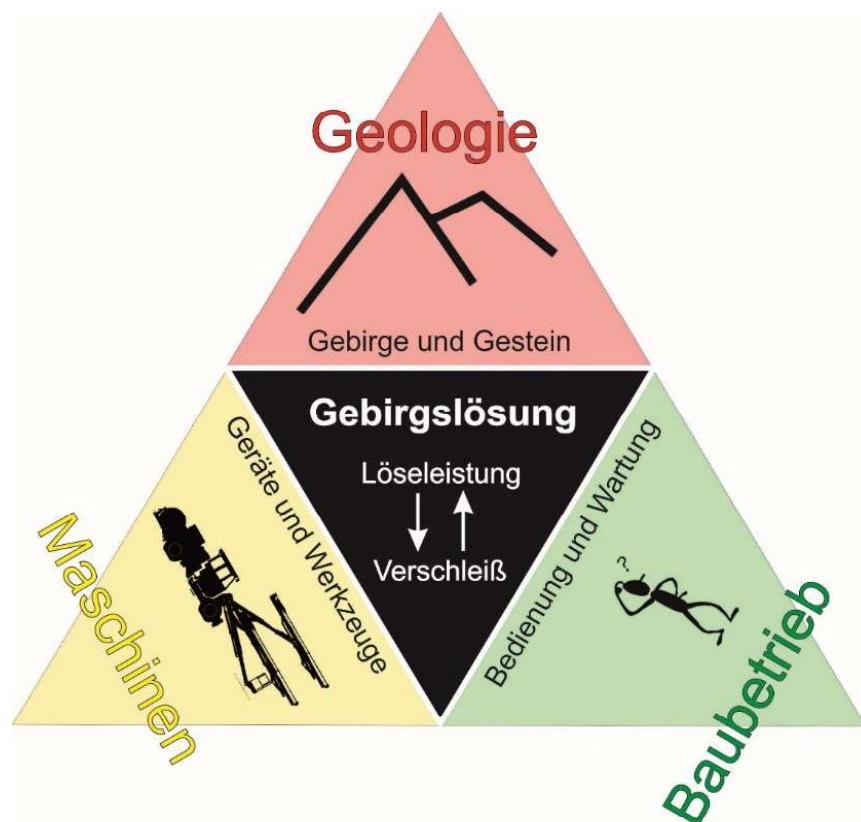


Abb. 1 Wirkungs- und Einflussdiagramm für Verschleiß und Löseleistung (aus: Plinninger, 2002, Abb. 26, S. 30)

3. ABRASIVITÄTS-UNTERSUCHUNGSVERFAHREN IM FESTGESTEIN

3.1. Der CERCHAR-Test (AFNOR NF P94-430-1)

Der sogenannte „CERCHAR-Test“ wurde in den 1980er Jahren am französischen Centre d’Etudes et Recherches de Charbonnages de France (Kürzel: CERCHAR) für den Steinkohlebergbau entwickelt. Der Versuch basiert auf einem hinsichtlich Material, Härte und Geometrie definierten Prüfstift aus Stahl, der bei konstanter Auflast über eine Strecke von 10 mm über die Oberfläche eines Gesteinsprobekörpers gezogen wird. Der Cerchar Abrasivitätsindex (CAI) errechnet sich als Mittelwert über meist 5 Einzelversuche aus der Breite der am Prüfstift entstandenen kegelstumpfförmigen Verschleißphase. Typische Prüfgeräte sind in Abb. 2 dargestellt.

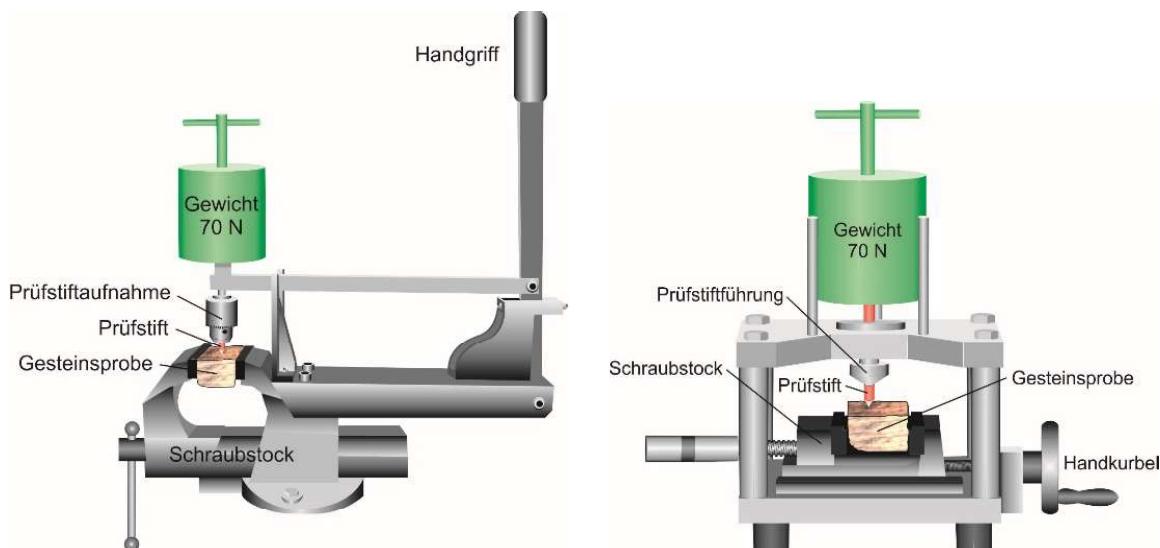


Abb. 2 Gebräuchliche Prüfgeräte für die Durchführung des CERCHAR-Versuchs; links: ursprünglicher Versuchsaufbau nach CERCHAR, rechts: Versuchsgerät nach WEST

Die im Ergänzungsband 2015 zur VOB 2012 referenzierte Norm NF P94-430-1 [AFNOR, 2000] stellt zwar nach wie vor die Ausgangsnorm für die Anwendung des Verfahrens dar, gibt aber wesentliche Erkenntnisse und Entwicklungen der letzten 16 Jahre nicht zeitgemäß wieder. Neuere Richtlinien, wie die 2013 erschienene ISRM Suggested Method [Alber et al, 2013] und die 2016 erschienene Empfehlung Nr. 23 des AK 3.3. „Versuchstechnik Fels“ der DGQT [Käsling & Plinninger, 2016] werden zu einer weiteren Vereinheitlichung der Prüfbedingungen und zur besseren Vergleichbarkeit von an verschiedenen Instituten ermittelten Prüfergebnissen beitragen. Kernpunkte der beiden weitestgehend harmonisierten Prüfempfehlungen der ISRM und DGQT sind dabei insbesondere:

- die Vorgabe einheitlicher Prüfstifte in Bezug auf Stahlsorte (Werkzeugstahl 115CrV4; Werkstoff-Nr. 1.2210 nach DIN EN 10027-2, 1992) und Härte (HRC 55±1), verbunden mit der Vorgabe, die tatsächliche Härte eines jeden Prüfstiftes mindestens einmal vor der ersten Benutzung zu bestimmen und zu dokumentieren;
- der Bezug auf eine bruchraue Prüfoberfläche als Standardfall, mit der Möglichkeit, in besonderen Fällen auch auf die Prüfung sägerauer Oberflächen zurückgreifen zu können (Sonderfallregelung), inkl. einer Empfehlung für die Umrechnung auf sägerauen Oberflächen ermittelter Messwerte;

- eindeutige Vorgaben für die Auswertung der Prüfstiftabnutzung in Draufsicht und Seitenansicht, inklusive der Abgrenzung „gültiger“ und „ungültiger“ Versuche;
- Empfehlung für die Prüfung anisotroper Gesteine.
- Harmonisierte Klassifizierung in 7 Klassen, von „extrem niedrig“ / „extremely low“ (CAI < 0,4) bis „extrem hoch“ / „extremely high“ (CAI ≥ 5) klassifiziert.

Mit dem CERCHAR-Versuch liegt national und international eine Fülle von Erfahrungen vor. Das Verfahren zeigt eine baupraktisch sinnvolle Auflösung der relativen Abrasivitätsunterschiede von Festgesteinen, wie anhand entsprechender der dargestellten Zusammenstellung von Prüfergebnissen (Abb. 3) deutlich wird.

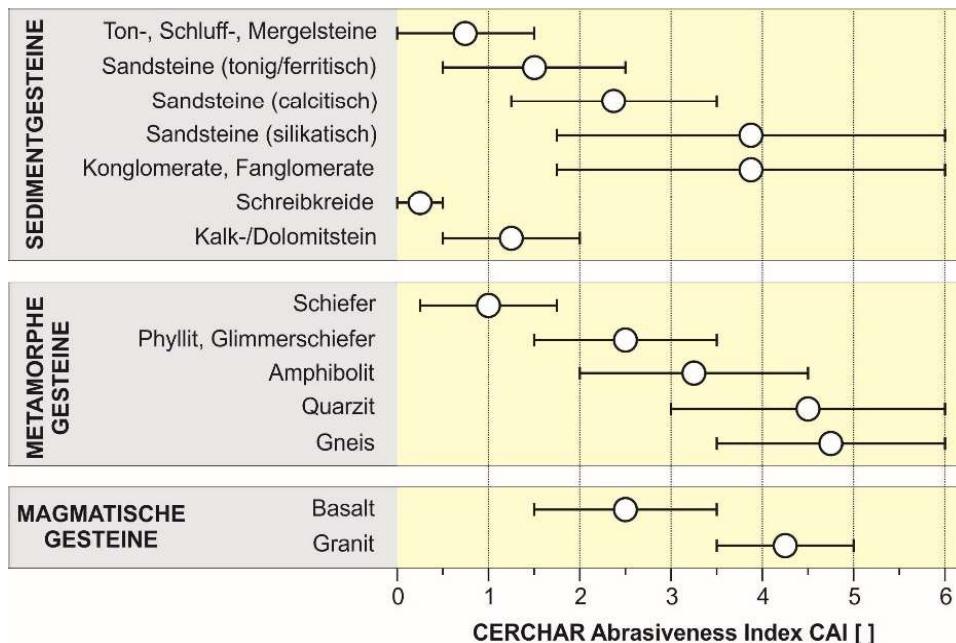


Abb. 3 Typische CAI-Werte und Bandbreiten für einige weit verbreitete Gesteinsarten (nach: Plinninger & Restner, 2008, Bild 4, S. 64, deutsche Bezeichnungen ergänzt)

Bei der Interpretation des CAI ist zu beachten, dass der Modellversuchsindex nur Einflussgrößen im Maßstabsbereich des intakten Gesteins wiedergeben kann, also strenggenommen nur das Potential des Gesteins für mehr oder minder kontinuierlichen Abrasivverschleiß am Werkzeug beschreibt. Gebirgsseinflüsse, wie Wechsellagerungen verschiedener Gesteine (sog. „mixed-face“-Bedingungen), „blockige“ Verhältnisse bei maschinellen Tunnelvortrieben oder Spannungseinflüsse bleiben bei der Ermittlung des CAI unter „Laborbedingungen“ unberücksichtigt. Insbesondere bei anspruchsvollen geotechnischen Bauvorhaben, wie z.B. maschinellen Tunnelvortrieben, kann es daher sinnvoll sein, probabilistische Bewertungen zur Wahrscheinlichkeit solcher Phänomene durchzuführen [Plinninger & Düllmann, 2016].

3.2. Petrographisch-geotechnische Verschleißindices

Die Verwendung herkömmlicher geologisch-felsmechanischer Kennwerte zur Beurteilung der Abrasivität von Festgesteinen hat eine lange Tradition im Felsbau, die sich bis auf das 19. Jahrhundert zurückverfolgen lässt: So weist bereits Franz von Rziha in seinem 1867 erschienenen „Lehrbuch der gesammten Tunnelbaukunst“ [Rziha, 1867] auf den Zusammenhang zwischen der Gesteinsfestigkeit und dem Verbrauch an „Gezähe“ bei der „Gewinnung der Berge“ hin (S. 219). In mineralogischer Hinsicht beziehen sich ältere Ansätze, wie die von Schimazek &

Knatz aus den 1970er Jahre [Schimazek & Knatz, 1970, 1976] vor allem auf den Quarzgehalt eines Gesteins, dessen wesentliche Rolle als schleißscharfes und gleichzeitig sehr weit verbreitetes gesteinsbildendes Mineral bereits früh erkannt wurde.

Zur Bestimmung des modalen Mineralbestands von Festgesteinen stellt die petrographische Dünnschliffanalyse ein altbewährtes Standardverfahren dar. Hierzu wird aus dem Gesteinsprobekörper ein in der Regel etwa 25 μm dicker Dünnschliff mit einer Standardgröße von 28 mm x 48 mm präpariert, sodass die das Gestein aufbauenden Einzelminerale durchsichtig erscheinen und einer optischen Analyse zugänglich sind. Die Dünnschliffanalyse selbst wird im petrographischen Mikroskop in einem Vergrößerungsbereich von etwa 5- bis 1000-facher Vergrößerung durchgeführt (Abb. 4).

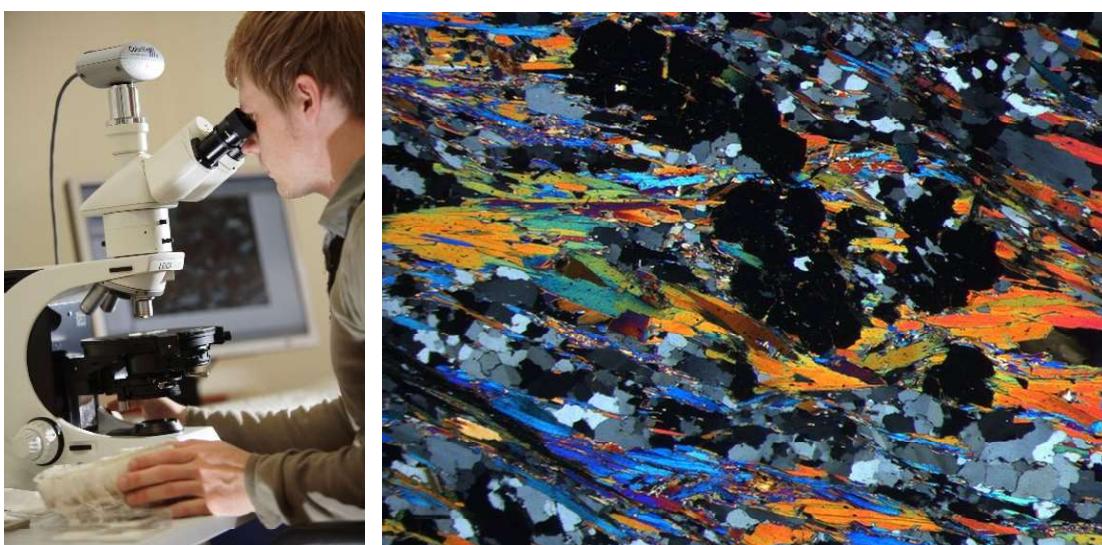


Abb. 4 Die mikroskopische Dünnschliffanalyse, Standardverfahren der Geologie und Mineralogie; links: Petrographisches Mikroskop (Foto: TU Graz/Bergmann), rechts: Foto eines Glimmerschiefers unter polarisiertem Licht

Zur Bestimmung des Mineralbestands bei feinkörnigen und optisch nicht mehr auflösbaren Gesteinen kann ggf. auf andere mineralogische Verfahren, wie z.B. die Röntgendiffraktometrie zurückgegriffen werden. Bei diesem Verfahren erfolgt die Bestimmung des Mineralinhalts anhand der spezifischen Beugungerscheinungen bei Bestrahlung einer Probe mit Röntgenstrahlung.

Durch die Einbeziehung der spezifischen Mineralhärte ist es möglich, neben Quarz auch andere Minerale bei der Bewertung des Verschleißpotentials zu berücksichtigen, indem diese entsprechend ihrer jeweiligen Härte gewichtet und miteinander zu einem einzigen Leitparameter für das gesamte Gestein verrechnet werden. Als Härtekennwerte werden nach wie vor die bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts entwickelten Systeme der Mohs'schen Ritzhärte [Mohs, 1822], der Rosiwal'schen Schleifhärte [Rosiwal, 1902, 1916] oder die mit einem statischen Eindringversuch ermittelte Vickers-Härte [Smith & Sandland, 1922] verwendet. Es entstanden auf dieser Basis auch heute noch übliche geotechnische Verschleißindices wie der auf der Mohs-Härte basierende „Abrasiv Mineral Content“ [Al-Ameen & Waller, 1994], der vor allem in Mitteleuropa weit verbreitete „Äquivalente Quarzgehalt“, der die auf Quarz bezogene Rosiwal-Schleifhärte verwendet [Thuro, 1996], oder die vor allem im skandinavischen Raum angewandte „Vickers Hardness Number of the Rock“ („VHNR“), die auf der Vickers-Mineralhärte beruht [Bruland, 1998].

Die Verwendung der bisher vorgestellten (einfachen) Indexwerte besitzt jedoch auch Auflösungsschwächen, da ausschließlich Quantität und Qualität des Mineralinhalts berücksichtigt werden. Andere die Abrasivität (mit)beeinflussende Parameter – wie vor allem die Festigkeit des Gefügeverbands, aber auch die Kornformen und Korngrößen der schleißscharfen Minerale – bleiben hierbei zunächst unberücksichtigt. Die mögliche Tragweite dieser Feststellung wird deutlich, wenn auf Basis dieser Indexwerte die Abrasivität eines rezenten Strandsands (Lockergestein), zweier mittelfester Sandsteine und eines hochfesten Quarzits mit ansonsten identischem Mineralanteil bewertet werden soll (Abb. 5) – allen drei Gesteinen werden identische Quarzäquivalent-Gehalte, VHNR oder AMC-Werte zugeordnet!

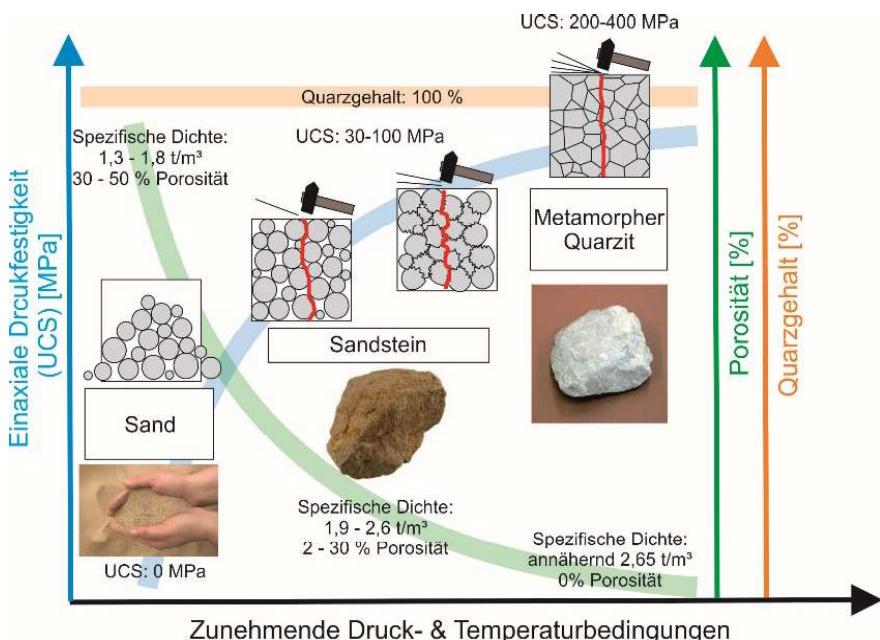


Abb. 5 Schematische Darstellung der Entwicklung wesentlicher Gesteinsparameter eines Quarzsands (links), Sandsteins (Mitte) und Quarzits (rechts) mit zunehmender Diagenese und Metamorphose

3.3. Der Rock Abrasivity Index RAI

Ein Beispiel für einen Ansatz zur Überwindung der vorgenannten methodischen Schwächen stellt der Gesteinsabrasivitäts-Index RAI („Rock Abrasivity Index“) dar, eine 2002 eingeführte Weiterentwicklung des Äquivalenten Quarzgehalts [Plinninger, 2002, 2010]. Der RAI stellt einen einfachen und mit im Felsbau weit verbreiteten Kennwerten bestimmmbaren geologisch-geotechnischen Index dar. Er berücksichtigt den vor allem für den Abrasivverschleiß relevanten Gehalt schleißscharfer Minerale sowie die Festigkeit des Gefügeverbands, die sowohl für Abrasivverschleiß als auch für Verschleiß durch Sprödbruch relevant ist. In die Berechnung gehen der zum Äquivalenten Quarzanteil verrechnete modale Mineralbestand sowie die Einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins gemäß Gleichung 1 ein.

$$RAI = \bar{A}Qu \cdot UCS \quad (Gl. 1)$$

mit:

RAI	Rock Abrasivity Index	[·]
$\bar{A}Qu$	Äquivalenter Quarzgehalt	[·]
UCS	Einaxiale Druckfestigkeit	[MPa]

Der RAI besitzt theoretisch die Einheit [MPa], aufgrund des empirischen Charakters des Ansatzes sollte der Indexwert aber stets als dimensionslos betrachtet werden. Der höchste bisher bestimmte RAI liegt bei ca. 360 (Quarzite mit rd. 360 MPa Einaxiale Druckfestigkeit und rd. 100 % Quarzgehalt), Werte bis ca. 500 erscheinen für baurelevante Gesteine möglich [Plinninger, 2010]. Am Übergang zu Lockergesteinen werden die minimal bestimmmbaren Werte nur technisch (insbesondere durch die Auflösung der Druckfestigkeitsprüfung) begrenzt.

Die im Laufe der Anwendung gemachten Erfahrungen haben gezeigt, dass sich der RAI im Festgestein empirisch mit dem CERCHAR-Abrasivitätsindex CAI korrelieren lässt. Schumacher (2004) stellt hierzu eine praxistaugliche, quadratische Korrelation vor (Gleichung 2):

$$CAI = 0,9 \cdot \sqrt[3]{RAI} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit:

CAI CERCHAR Abrasivitäts Index [-]

RAI Rock Abrasivity Index [-]

4. ABRASIVITÄTS-UNTERSUCHUNGSVERFAHREN IM LOCKERGESTEIN

4.1. Der LCPC-Test (AFNOR NF P18-579)

Der meist als „LCPC-Test“ bezeichnete Drehflügelversuch (Abb. 6) des französischen Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Kürzel: LCPC) eignet sich – im Gegensatz zu den in Kapitel 3 angeführten Verfahren – grundsätzlich zur Prüfung von Lockergestein, weswegen er seit Mitte der 2000er-Jahre als Verschleißuntersuchungsverfahren für Lockergesteine propagiert (u.a. [Thuro & Käsling, 2009]) und in dieser Funktion auch in der deutschen VOB/C referenziert wurde.

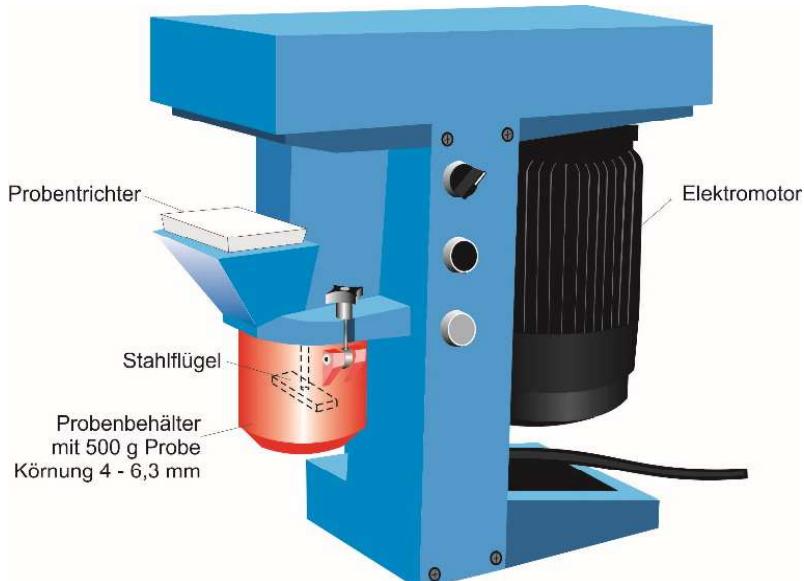


Abb. 6 Ansicht des LCPC-Prüfgerätes (nach: Plinninger & Restner, 2008, Bild 8, S. 66, deutsche Bezeichnungen ergänzt)

Der LCPC-Test wird an 500 g gebrochenem Probenmaterial definierter Körnung (\varnothing 4 - 6,3 mm; entspricht Feinkies) 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. Das Ergebnis des Versuchs ist der ABR-Index, der sich aus dem Massenverlust [g] des Flügels bezogen auf die

Probenmenge [t] errechnet und in üblicherweise 5 Klassen von „nicht abrasiv“ ($< 50 \text{ g/t}$) bis „extrem abrasiv“ ($> 1250 \text{ g/t}$) eingeteilt wird.

Der AK 3.3. „Versuchstechnik Fels“ der DGTT hat mit der Arbeit an einer entsprechenden Versuchsempfehlung begonnen, was angesichts der ungenügenden Spezifikationen in der AFNOR NF P18-579 [AFNOR, 1990] erforderlich sein wird, um vergleichbare Versuchsergebnisse sicherzustellen. So werden insbesondere folgende Faktoren zu berücksichtigen sein:

- Durch die Bezugnahme auf die Probenmenge in Tonnen [t] wirkt sich der Messfehler beim Wiegen des Stahlflügels vor und nach dem Versuch sehr stark auf die Ermittlung des ABR-Wert aus: Ein Messfehler von 0,01 g führt beispielsweise zu einer Veränderung des ABR-Wertes von 20 g/t.
- Dieser Umstand hat auch entsprechende Auswirkungen auf die Anforderungen bezüglich der Homogenität der Prüfflügel-Oberfläche. Hier wird insbesondere ein Augenmerk auf die Entfernung eventueller Zunderschichten zu legen sein, die zu weiteren Messungsgenauigkeiten führen können.
- Einem weiteren versuchstechnischen Einflussfaktor stellt die Formgebung des Prüfflügels dar, insbesondere die Ausbildung der Kanten. In Reihenuntersuchungen konnte z.B. festgestellt werden, dass die Verwendung von Flügeln mit „scharfen“ Kanten (z.B. Flügel aus Präzisionsstahl) zu einem scheinbar höheren ABR-Wert führte, als entsprechende Flügel, bei denen die Kanten „runder“ ausgeführt waren (z.B. Flügel aus herkömmlichen Walzstahl), [Düllmann, et al. 2014].
- Problematisch ist auch die Wahl der Stahlsorte, auch wenn diese die geforderte Rockwell-Härte B (60 – 75) aufweist. So wiesen Küpferle et al. (2015) nach, dass je nach Werkstoff der ABR-Wert um 216 g/t variieren kann.

Bei der Planung von Versuchen und der Interpretation von LCPC-Indexwerten ist zudem zu berücksichtigen, dass durch eine normgemäße Probenfraktion von 4 – 6 mm feinkörnige Böden in Ton-, Schluff- und Sandfraktion nicht untersucht werden können. Grobkörnige Böden (Fraktion Grobkies und größer) müssen vor Prüfung entweder verworfen oder gebrochen und klassiert werden. Die Probenahme und Probenvorbereitung durch Trocknen, Sieben und ggf. Brechen und erneutes Sieben führt dazu, dass zusätzlich eine Vielzahl verschleißrelevanter Parameter, wie z.B. die natürliche Lagerungsdichte, der Wassergehalt, der Feinkornanteil (und damit zusammenhängende bindige Eigenschaften), Kornform oder geringfügige Verkittungen oder Zementierungen des Bodens bereits vor dem eigentlichen Versuch verworfen bzw. in signifikanter Weise verändert werden. Diese Faktoren bleiben daher bei der Ermittlung des ABR stets unberücksichtigt und stellen aus Sicht der Verfasser die Eignung des Verfahrens als Standardverfahren für die Bewertung von Boden grundsätzlich in Frage.

4.2. Das TU Wien Abrasimeter

Das sog. „TU Wien Abrasimeter“ stellt einen bis dato prototypischen Versuchsstand dar, der im Rahmen eines Forschungsvorhabens [Drucker, 2011, 2013] an der Technischen Universität Wien entwickelt worden ist. Das Abrasimeter (Abb. 7) ähnelt hinsichtlich seiner Grundauslegung dem vorangehend beschriebenen LCPC-Verfahren und umfasst einen rechteckigen Stahlflügel definierter Geometrie und Härte, der in einem zylinderförmigen Versuchsaufbau insbesondere durch folgende Modifizierungen:

- deutlich vergrößerter, zylinderförmigen Versuchsbehälter mit 25 cm Durchmesser für bis zu 10 kg Probenmaterial;
- damit verbunden die Möglichkeit, auch grobkörnige Lockergesteine in ihrer originalen Zusammensetzung zu prüfen, Korngrößen bis zu 32 mm Durchmesser wurden bereits erfolgreich getestet;
- Verwendung eines Auflastrings, der eine „mittlere Lagerungsdichte“ simulieren soll.

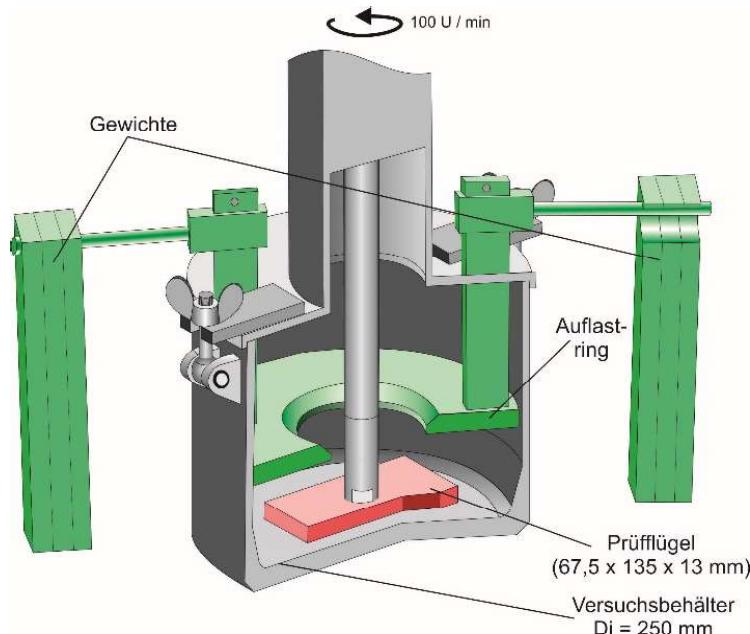


Abb. 7 Schnittzeichnung des TU Wien „Abrasimeters“ (nach Drucker, 2011, umgezeichnet)

Das Verfahren ist in einem 2013 veröffentlichten Merkblatt der Österreichischen Bautechnik-Vereinigung verankert [ÖBV, 2013].

4.3. Geologisch-geotechnische Ansätze

Jüngere Untersuchungen mit dem LCPC-Verfahren [Düllmann et al., 2014] und dem TU Wien Abrasimeter [Drucker, 2011, 2013] haben bestätigt, dass das Prüfergebnis von „Verschleißtopf-Versuchen“, wie den in Absatz 4.1 bis 4.3 vorgestellten Verfahren, maßgeblich von der mineralogischen Zusammensetzung der Komponenten abhängig ist, sofern andere abrasivitäts(mit)bestimmende Eigenschaften unverändert bleiben. Einen weitaus geringeren, aber immer noch feststellbaren Einfluss auf das Prüfergebnis haben Kornform und Korngröße der Komponenten gezeigt.

Da Parameter zur Charakterisierung der Mineralogie, Korngröße und Kornform als „herkömmliche“ geotechnische Parameter im Zuge standardisierter Baugrundkundungen ermittelt werden können, ist daher die Frage zu stellen, ob ein Bezug der Abrasivitätsbewertung auf diese „herkömmlichen“ Kennwerte nicht von vornherein einen ökonomischeren und reproduzierbareren Ansatz darstellt, der ohne die Anschaffung aufwändiger Spezialversuchsgeräte und die damit verbundenen, versuchstechnischen Unwägbarkeiten auskommt.

Ein derartiger, vielsprechender Ansatz wurde jüngst von Köppl (2014, 2016) veröffentlicht. Analog zum Konzept des „Rock Abrasivity Index (RAI)“ (siehe Absatz 3.3) wird bei diesem Verfahren ein als „Soil Abrasivity Index (SAI)“ bezeichneter Kennwert bestimmt, der neben dem Äquivalenten Quarzgehalt und der Korngröße (als Maß für die Wirksamkeit des Mechanismus) auch den

Abbauwiderstand (als Maß für die Größe der Beanspruchung) in Form einer theoretisch berechneten Scherfestigkeit des anstehenden Bodens berücksichtigt (Gleichung 3).

$$SAI = \left(\frac{\bar{A}Qu}{100} \right)^2 \cdot \tau_c \cdot D_{60} \quad (\text{Gl. 3})$$

mit:

SAI	Soil Abrasivity Index	[\cdot]
$\bar{A}Qu$	Äquivalenter Quarzgehalt	[\cdot]
τ_c	Scherfestigkeit	[kN/m^2]
D_{60}	Korndurchmesser D60	[mm]

Der SAI besitzt theoretisch die Einheit [N/m]; aufgrund des empirischen Charakters des Ansatzes sollte der Indexwert aber stets als dimensionslos betrachtet werden. Zusätzlich ist festzustellen, dass der in Gleichung 3 verwendete Kennwert der Scherfestigkeit in der vorliegenden Form auf einer idealisierten Annahme der Überlagerungshöhe basiert und daher ggf. von den natürlichen Verhältnissen abweichen kann. Eine Verbesserung der Aussagekraft ist allerdings zu erwarten, wenn anstatt einer theoretischen Scherfestigkeit reale Kennwerte und Zustandsgrößen benutzt werden können.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Beurteilung der Abrasivität – d.h. des spezifischen Potentials eines Locker- oder Festgestein, Verschleiß an einem zur Bearbeitung eingesetzten Werkzeug zu verursachen – ist zur Prognose von Werkzeugverschleiß, zur Preisbildung und zur Abgrenzung bauvertraglicher Risikosphären ein zunehmend relevantes Thema der Baugrundkundung. Mit Erscheinen des Ergänzungsbands 2015 zur VOB 2012 [DIN, 2015a] sind in Deutschland hier erstmals „Standards“ gesetzt worden.

Der in der VOB-Ergänzung 2015 für Fels referenzierte „CERCHAR-Versuch“ ist ein Modellversuch, der spätestens seit Verabschiedung der nationalen DGGT-Empfehlung [Käsling & Plinninger, 2016] und der internationalen ISRM-Empfehlung [Alber, et al., 2014] im Felsbau als „Standardverfahren“ angesehen werden muss. Die umfangreichen Erfahrungen mit diesem Verfahren in Hinblick auf versuchstechnische Einflussfaktoren und auch hinsichtlich üblicher Kennwertebandbreiten lassen einen effektiven und sicheren baupraktischen Einsatz zu. Nach Überzeugung der Verfasser könnte dennoch eine sinnvolle Weiterentwicklung einer zukünftigen VOB/C in der Einbeziehung mineralogisch-petrographischer Verfahren bestehen. Diese Ansätze beruhen auf der Ermittlung „herkömmlicher“ Felseigenschaften wie Mineralgehalt oder einaxialer Gesteinsdruckfestigkeit und zeigen daher auf Basis bereits vorhandener Normen und Empfehlungen meist gute Reproduzierbarkeit. Der AK 3.3. „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) e.V. hat diese Entwicklung aufgegriffen und mit der Bearbeitung einer derartigen Versuchsempfehlung begonnen.

Der in der VOB-Ergänzung 2015 [DIN, 2015a] für Boden referenzierte „LCPC-Versuch“ ist ein Modellversuch, der durch die Verwendung stark vereinfachter Modellkörper und stark vereinfachter Versuchsräumenbedingungen vermutlich mehr versuchstechnische Probleme implizieren wird, als dass er Klarheit für das Verschleißpotential von Lockergesteinen schaffen wird. So können Böden in Ton-, Schluff- und Sandfraktion bei normgemäßer Durchführung mit diesem Verfahren prinzipiell nicht untersucht werden. Grobkörnige Böden mit Kornfraktionen

Grobkies oder größer müssen vor Prüfung verworfen oder gebrochen und klassiert werden. Die Probenahme und Probenvorbereitung durch Trocknen, Sieben und ggf. Brechen führt dazu, dass eine Vielzahl verschleißrelevanter Parameter, wie z.B. natürliche Lagerungsdichte, Wassergehalt, Feinkornanteil, Kornform oder geringfügige Verkittungen und Zementierungen bereits vor dem eigentlichen Versuch verworfen, bzw. in signifikanter Weise verändert werden. Auch im Bereich der Lockergesteine könnte daher eine sinnvolle Weiterentwicklung in der Berücksichtigung geologisch-geotechnischer Prognoseindices bestehen, die auf herkömmlichen, „intrinsischen“, bodenmechanischen Kennwerten beruhen. Diese Verfahren besitzen den Vorteil, dass die Einzelparameter einer empirischen fachlichen Bewertung leichter zugänglich sind und sich deren Ermittlung auf vorhandene Normen und Regelwerke abstützen kann. Neue Entwicklungen, wie der „Soil Abrasivity Index“ (SAI) [Köppl, 2014, 2016] stellen vor diesem Hintergrund vielsprechende und zukunftsweisende Ansätze dar.

LITERATUR

AFNOR - Association française de normalisation (1990): Granulats: Essai d'abrasivité et de broyabilité (P 18-579). Paris (AFNOR).

AFNOR - Association française de normalisation (2000): Détermination du pouvoir abrasive d'une roche – Partie 1: Essai de rayure avec une pointe (NF P 94-430-1). Paris (AFNOR).

Al-Ameen, S.I. & Waller, M.D. (1994): The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index. *Engineering Geology*, 36 (1994): S. 293-301.

Alber, M., Yarah, O., Dahl, F., Bruland, A., Käsling, H., Michalakopoulos T.N., Cardu, M., Hagan, P., Aydin, H. & Özarslan, A. (2014): ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test. In: *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 47, S. 261-266. Elsevier Verlag.

Bruland, A. (1998): Project report 13A-98 - Hard rock tunnel boring: Drillability Test methods, NTNU Trondheim.

DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2015a): VOB 2012: Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Ausgabe 2012, Ergänzungsband 2015. Beuth Verlag, Berlin, 2015.

DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2015b): VOB Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV): Bohrarbeiten – DIN 18301. Ausgabe August 2015. Beuth Verlag, Berlin, 2015.

DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2015c): VOB Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV): Untertagebauarbeiten – DIN 18312. Ausgabe August 2015. Beuth Verlag, Berlin, 2015.

DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2015d): VOB Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV): Rohrvortriebsarbeiten – DIN 18319. Ausgabe August 2015. Beuth Verlag, Berlin, 2015.

DIN – Deutsches Institut für Normung e.V. (2015e): VOB Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV): Horizontalspülbohrarbeiten – DIN 18324. Ausgabe August 2015. Beuth Verlag, Berlin, 2015.

Drucker, P. (2011): Abrasivität von Lockergestein und der Werkzeugverschleiß im Tief- und Tunnelbau, Österr. Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 156, Heft 1-6 und Heft 7-12/2011, S. 1 – 7.

Drucker, P. (2013): Über die Abrasivität von Lockergestein und den Werkzeugverschleiß im Spezialtiefbau, Dissertation, TU Wien.

Düllmann, J., Alber, M. & Plinninger, R.J. (2014): Determining soil abrasiveness by use of index tests versus using intrinsic soil parameters.- *Geomechanics and Tunnelling*, 7, Heft 1, S. 87 – 97, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Käsling, H. & Plinninger, R.J. (2016): Empfehlung Nr. 23 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V: Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen mit dem CERCHAR-Versuch.- Bautechnik, 93, 6: S. 409 – 415, (Ernst und Sohn).

Köppl, F. (2014): Abbauwerkzeugverschleiß und empirische Verschleißprognose beim Vortrieb mit Hydroschild TVM in Lockergesteinen, Dissertation, Technische Universität München.

Köppl, F. (2016): Abbauwerkzeugverschleiß und empirische Verschleißprognose beim Vortrieb mit Hydroschild-TVM in Lockergesteinen. Taschenbuch für den Tunnelbau 2016, S. 135-184, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Küpferle, J., Röttger, A., Alber, M. & Theisen, W. (2015): Assessment of the LCPC abrasiveness test from the view of material science. Geomechanics and Tunnelling, 8, Heft 3, S. 211-220, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Mohs, F. (1822): Grund-Riß der Mineralogie. Erster Theil. Terminologie, Systematik, Nomenklatur, Charakteristik, Dresden.

ÖBV - Österreichische Bautechnik Vereinigung (2013): Merkblatt zur Abrasivitätsbestimmung von grobkörnigem Lockergestein.

Plinninger, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein. Münchener Geologische Hefte, Reihe B, Angewandte Geologie, B17, München.

Plinninger, R.J. (2010): Abrasivitätsbewertung in Festgesteinen mit dem „Rock Abrasivity Index“ (RAI) – Erfahrungen aus 8 Jahren Anwendung. geotechnik, 33, Heft 2, S. 185-189, Verlag Glückauf, Essen.

Plinninger, R.J. & Düllmann, J. (2016): Gebirgsmaßstäbliche Einflussfaktoren auf den Werkzeugverschleiß im Felstunnelbau – baupraktisch relevant und wissenschaftlich vernachlässigt? In: Vogt, C. & Moormann, C. (Hrsg., 2016): Tagungshandbuch zum 10. Kolloquium "Bauen in Boden und Fels" der TA Esslingen, 19. und 20. Januar 2016, S. 279 - 286 (Technische Akademie Esslingen).

Plinninger, R.J. & Restner, U. (2008): Abrasiveness testing, quo vadis? - a commented overview of abrasivity testing methods. In: Geomechanics and Tunnelling, 1, Heft 1, S. 61-70. Verlag Ernst und Sohn, Berlin.

Rosiwal, A.K. (1902): Quarz als Standardmaterial für die Abnutzbarkeit. Verhandlungen der k. k. Geolog. Reichsanstalt, Heft 5/6, Wien.

Rosiwal, A.K. (1916): Neuere Ergebnisse der Härtebestimmung von Mineralien und Gesteinen. Verhandlungen der k. k. Geolog. Reichsanstalt, Heft 9, Wien.

Rziha, F. (1867): Lehrbuch der gesammten Tunnelbaukunst, Erster Band, Verlag von Ernst & Kor, Berlin.

Schimazek, J. & Knatz, H. (1970): Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen. Glückauf, 106, Heft 6, S. 274-278.

Schimazek, J. & Knatz, H. (1976): Die Beurteilung der Bearbeitbarkeit von Gesteinen durch Schneid- und Rollenbohrwerkzeuge. Erzmetall, 29, Heft 3, S. 113-119.

Schumacher, L. (2004): Auslegung und Einsatzbedingungen von Tunnelvortriebsmaschinen im Hartgestein.- Felsbau, 22, Heft 3, S. 21-28, Verlag Glückauf, Essen.

Smith, R.L. & Sandland, G.E. (1922): An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals, with Particular Reference to Those of a High Degree of Hardness. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. I, S. 623–641.

Thuro, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. Münchener Geologische Hefte, Reihe B, Angewandte Geologie, B1, München.

Thuro, K & Käsling, H (2009): Classification of the abrasiveness of soil and rock. Geomechanics and Tunnelling, 2, Heft 2, S. 179 – 188. Verlag Ernst und Sohn, Berlin.