

Abrasivitätsuntersuchung von Boden und Fels im Kontext der neuen VOB/C

R. Plinninger, M. Alber

200

Geotechnik • Normen • Versuche • Baugrunderkundung

Zusammenfassung Mit Erscheinen des Ergänzungsbands 2015 zur VOB 2012 ergeben sich für die Baugrunderkundung 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 Abrasivitätsuntersuchung von Boden und Fels 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 der VOB/C 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 normgemäßer 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.

Assessment of rock and soil abrasivity relating to the new VOB/C standard

Abstract The publication of the 2015 supplement for the German VOB 2012 standard will result in major changes for the ground investigation for geotechnical engineering. This relates not only to the concept of geotechnical „homogeneous areas“ but also to the rock and soil properties to be determined. In the field of abrasivity investigation of soil and rock the supplement dated from 2015 sets „standards“ in Germany. The „CERCHAR test“ referred to for

hardrock application represents a valuable, reproducible and economical procedure with an extensive background of national and international experiences. However, for application in hard rock, further development could include the application of mineralogical-petrographical approaches for abrasivity assessment. In contrary, the „LCPC-test“ referred to for soil application features highly simplified testing conditions that may imply a number of new testing related problems. For instance, clay, silt, and sand fractioned soils generally cannot be analysed by this method, if the referred standard is applied. Additionally, a variety of quite relevant wear-related soil parameters are neglected or changed significantly during sampling and sample preparation. These aspects give rise to the question, whether the objective of a reliable determination of the abrasiveness of soils has already been achieved by referring to the LCPC testing procedure. For application in soils a significant advance could be a focus on geological and geotechnical approaches and indices based on conventional „intrinsic“ soil properties.

1 Abrasivitätsuntersuchungen gemäß VOB/C (Ergänzung 2015)

Mit Erscheinen des Ergänzungsbands 2015 zur VOB 2012 [1] ergeben sich für die Ausschreibung und Vergütung von Bauleistungen im Tiefbau sowie die dafür erforderliche Baugrunderkundung 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- und -empfehlungen.

Im Bereich der Untersuchung und Bewertung der Abrasivität von Boden und Fels werden mit Erscheinen des Ergänzungsbands 2015 zur VOB 2012 in Deutschland erstmals „Standards“ gesetzt. In den Allgemeinen Technischen Vertragsbedingungen (ATVen) für Bohrarbeiten (DIN 18501; [2]), Untertagebauarbeiten (DIN 18512; [3]), Rohrvortriebsarbeiten (DIN 18519; [4]) und Horizontalspülbohrarbeiten (DIN 18524; [5]) werden für die Anwendung im Boden die französische Norm AFNOR NF P18-579 [6], beziehungsweise der sogenannte „LCPC-Test“ und für die Anwendung im Fels die AFNOR NF P94-430-1 [7], 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 The-

Dipl.-Geol. (Univ.) Dr. rer. nat Ralf J. Plinninger

Dr. Plinninger Geotechnik
Kirchweg 16, 94505 Bernried
geotechnik@plinninger.de
Tel. 09905 7070-360
Fax: 09905 7070-361

Prof. Dr.-Ing. Michael Alber

Ruhr-Universität Bochum
Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie/Felsbau
Universitätsstr. 150, 44780 Bochum
michael.alber@rub.de
Tel. 0234 3223296
Fax: 0234 3214120

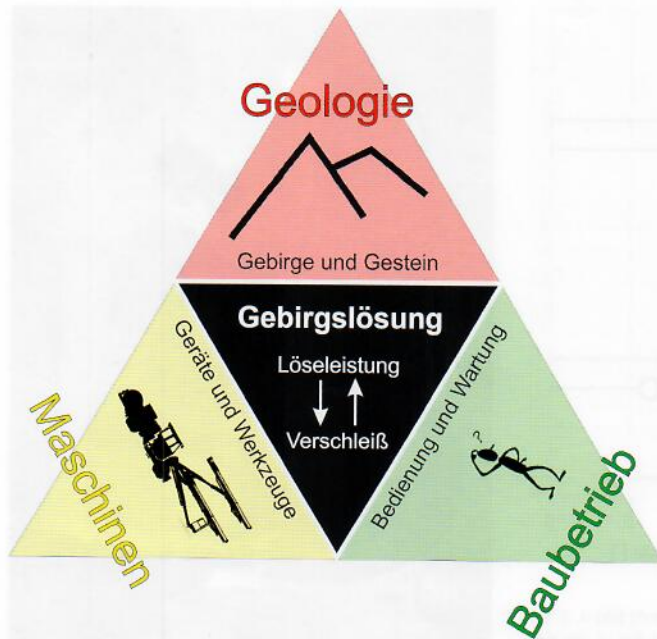


Bild 1. Wirkungs- und Einflussdiagramm für Verschleiß und Löseleistung
 ([8], Abb. 26, S. 30)
 Fig. 1. Effects and influencing factors for tool wear and excavation rate
 ([8], Fig. 26, p. 30)

matik 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, sogenannten „tribologischen System“ des Werkzeugverschleißes also Ursache und Wirkung beim Lösen, Laden und Transportieren von Boden und Fels dar (Bild 1). Vor dem Hintergrund der bauvertraglichen Risikoverteilung der VOB dient die Bestimmung und Be-

schreibung 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.

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. Typische Prüfgeräte sind in Bild 2 und Bild 3 dargestellt. Der Cerchar Abrasivitätsindex (CAI) errechnet sich als Mittelwert über meist fünf Einzelversuche aus der Breite der am Prüfstift entstandenen kegelförmigen Verschleißphase.

Die im Ergänzungsband 2015 zur VOB 2012 referenzierte, französische Norm AFNOR NF P94-430-1 [7] (Erscheinungsjahr: 2000) stellt zwar nach wie vor die Ausgangsempfehlung für die Anwendung des Verfahrens dar, gibt aber dennoch wesentliche Erkenntnisse und Entwicklungen der letzten 15 Jahre nicht zeitgemäß wieder. Neuere Richtlinien, wie die 2013 erschienene ISRM Suggested Method [10] und die in Druck befindliche Empfehlung Nr. 23 des AK 3.5. „Versuchstechnik Fels“ der DGGT [11] werden zu einer weiteren Vereinheitlichung der Prüfbedingungen und zur besseren Vergleichbarkeit von an verschiedenen Instituten ermittelten Prüfergebnissen beitragen. Kernpunkte der beiden weitestgehend harmonisierten Prüfeempfehlungen der ISRM [10] und DGGT [11] sind dabei insbesondere:

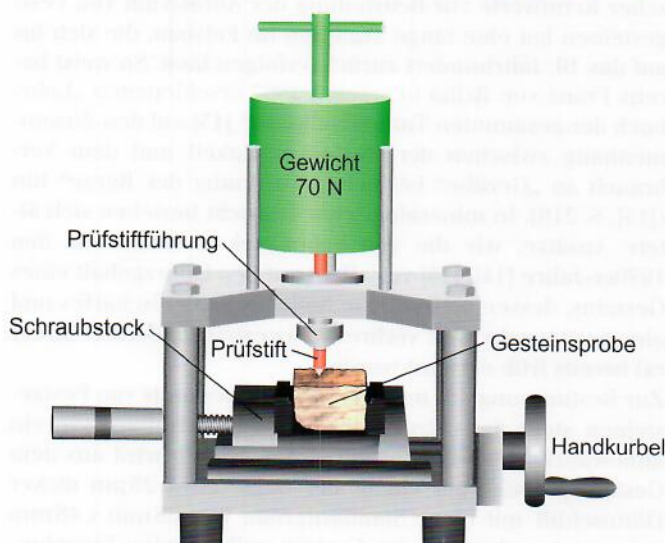


Bild 2. Gebräuchliche Prüfgeräte für die Durchführung des CERCHAR-Versuchs; Versuchsgerät nach WEST.
 Fig. 2. Typical testing setups for the CERCHAR Abrasivity test; setup according to WEST

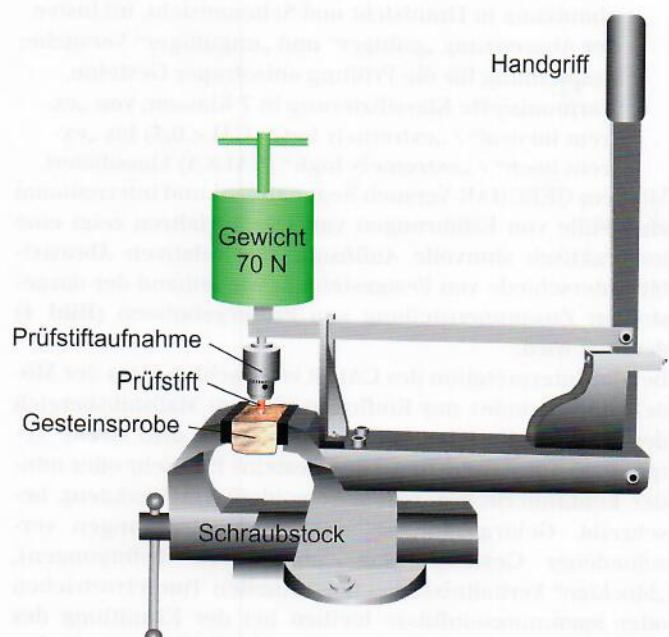


Bild 3. Gebräuchliche Prüfgeräte für die Durchführung des CERCHAR-Versuchs; ursprünglicher Versuchsaufbau nach CERCHAR.
 Fig. 3. Typical testing setups for the CERCHAR Abrasivity test; original setup as introduced by CERCHAR.

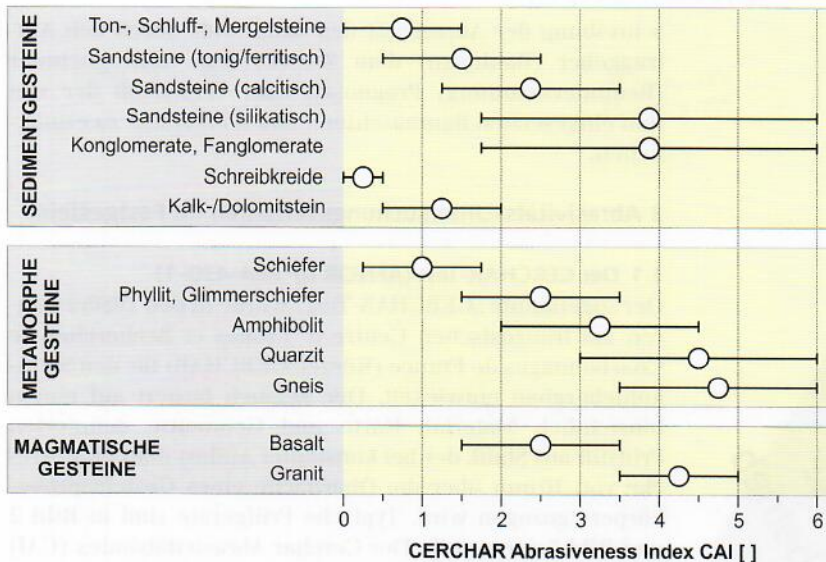


Bild 4. Typische CAI-Werte und Bandbreiten für einige weit verbreitete Gesteinsarten
 ([9], deutsche Bezeichnungen ergänzt) Bild 4, S. 64
 Fig. 4. Typical CAI values and value ranges for some common rock types
 ([9], Fig. 4, pp. 64)

- die Vorgabe einheitlicher Prüfstifte in Bezug auf Stahl-sorte (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), inklusive der Darstellung einer Empfehlung für eine Umrechnung der auf sägerauen Oberflächen gemessenen Kennwerte;
- 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, die anhand der dargestellten Zusammenstellung von Prüfergebnissen (Bild 4) deutlich wird.

Bei der Interpretation des CAI ist zu beachten, dass der Modellversuchsindex nur Einflussgrößen im Maßstabsbereich des intakten Gesteins wiedergeben kann, also streng genommen nur das Potenzial des Gesteins für mehr oder minder kontinuierlichen Abrasivverschleiß am Werkzeug beschreibt. Gebirgseinflüsse, 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 zum Beispiel maschinellen Tunnelvortrieben, kann es daher sinnvoll sein, ergänzend zu einer deterministischen Prognose des Werkzeugverschleißes auf Basis solcher Ge-

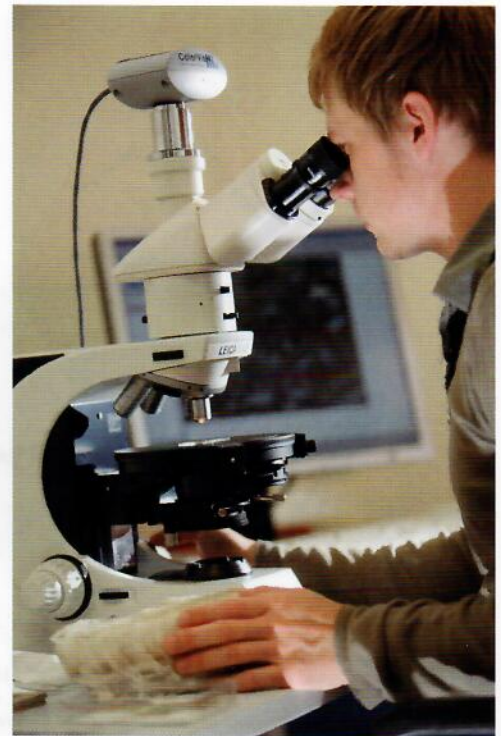


Bild 5. Die mikroskopische Dünnschliffanalyse, Standardverfahren der Geologie und Mineralogie; Petrographisches Mikroskop.
 (Foto: TU Graz/Bergmann)
 Fig. 5. Microscopical Thin Section Analysis of rocks, a standard testing procedure in the field of Geology and Mineralogy. Petrographical Microscope. (Photo by TU Graz/Bergmann)

steinskennwerte auch eine probabilistische Bewertung der Eintretenswahrscheinlichkeit und -häufigkeit von Einzelbelastungen, die zum Sprödbbruchversagen und unmittelbaren Austausch des Werkzeugs führen, durchzuführen [12].

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 gesamten Tunnelbaukunst“ [15] auf den Zusammenhang zwischen der Gesteinsfestigkeit und dem Verbrauch an „Gezähe“ bei der „Gewinnung der Berge“ hin ([15], S. 219). In mineralogischer Hinsicht beziehen sich ältere Ansätze, wie die von Schimazek & Knatz aus den 1970er-Jahre [14], [15] 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. Unter Zuhilfenahme von Sondermaßnahmen, wie zum Beispiel einer Vakuumimprägnierung mit Kunstharz lassen sich dabei auch Dünnschliffe von ver-

änderlich festen Festgesteinen technisch realisieren. Die Dünnschliffanalyse selbst wird im petrographischen Mikroskop in einem Vergrößerungsbereich von etwa 5-facher bis 1.000-facher Vergrößerung durchgeführt (Bild 5).

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

Durch die Einbeziehung der spezifischen Mineralhärte ist es möglich, neben Quarz auch andere Minerale bei der Bewertung des Verschleißpotenzials 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 [16], der Rosiwal'schen Schleifhärte [17], [18] oder die mit einem statischen Eindringversuch ermittelte Vickers-Härte [19] verwendet.

Es entstanden auf dieser Basis auch heute noch übliche geotechnische Verschleißindices wie der auf der Mohs-Härte basierende „Abrasive Mineral Content“ [20], der im anglo-amerikanischen Raum auch als „Mean Hardness“ bezeichnet wird, der vor allem in Mitteleuropa weit verbreitete „Äquivalente Quarzgehalt“ (auch „Quarzäquivalent-Gehalt“), der die auf Quarz bezogene Rosiwal-Schleifhärte verwendet [21], oder die vor allem im skandinavischen Raum angewandte „Vickers Hardness Number of the Rock“ („VHNR“), bei der die Einzelminerale mit ihren entsprechenden Vickers-Mineralhärten verrechnet werden [22]. 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 (Bild 6) – allen drei Gesteinen werden dabei identische Quarzäquivalent-Gehalte, VHNR oder AMC-Werte zugeordnet.

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 [8], [23]. Der RAI stellt einen einfachen und mit im Felsbau weit verbreiteten Kennwerten bestimmbar

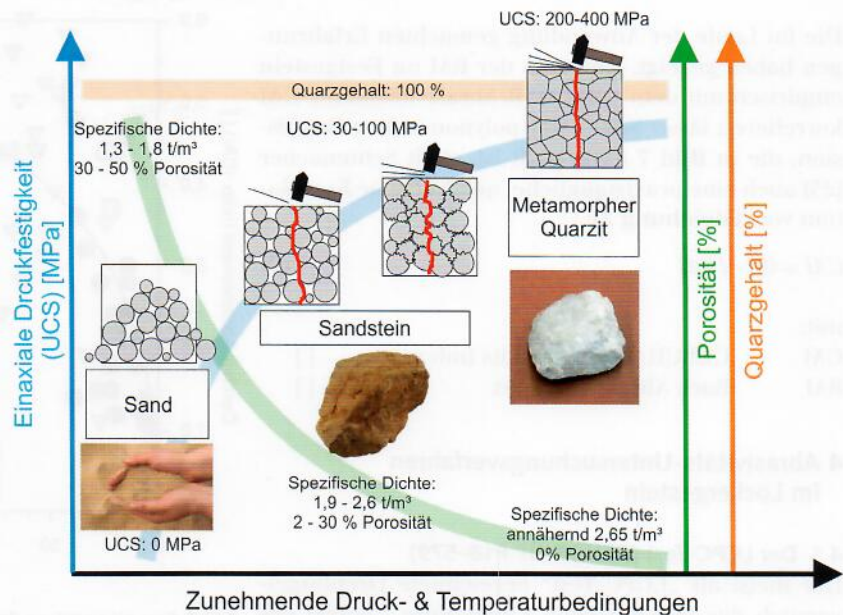


Bild 6. Schematische Darstellung der Entwicklung wesentlicher Gesteinsparameter eines Quarzsands (links), Sandsteins (Mitte) und Quarzits (rechts) mit zunehmender Diagenese und Metamorphose.
Fig. 6. Scheme for the changes in relevant rock properties for a quartz sand (left), sandstone (middle) and quartzite (right) during increasing diagenesis and metamorphism.

logisch-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 Sprödbbruch relevant ist. In die Berechnung gehen der zum Äquivalenten Quarzanteil verrechnete modale Mineralbestand sowie die Einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins gemäß Gleichung 1 ein.

$$RAI = \ddot{A}Qu \times UCS \quad (1)$$

mit:

RAI	Rock Abrasivity Index	[]
$\ddot{A}Qu$	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 circa 360 (Quarzite mit rund 360 MPa Einaxiale Druckfestigkeit und rund 100 % Quarzgehalt), Werte bis circa 500 erscheinen für baurelevante Gesteine möglich [23]. Am Übergang zu Lockergesteinen werden die minimal bestimmbar Werte nur technisch (insbesondere durch die Auflösung der Druckfestigkeitsprüfung) begrenzt.

Im Kontext des RAI ist anzumerken, dass die Verknüpfung mineralogisch-petrographischer und felsmechanischer Kennwerte zu einem komplexeren Indexwert selbst kein Novum darstellt. Mit dem sogenannten „Schimazek-Verschleißindex“ nach Schimazek & Knatz [14], [15], oder dem sogenannten „modifizierten Schimazek-Verschleißindex“ nach Ewendt [24] liegen vergleichbare ältere Ansätze vor, deren Verbreitung und Anwendbarkeit lediglich durch weniger verbreitete Festigkeitskennwerte (Spaltzugfestigkeit oder Punktlastindex) sowie die aufwendig zu bestimmenden Korngrößenparameter eingeschränkt wird.

Die im Laufe der Anwendung gemachten Erfahrungen haben gezeigt, dass sich der RAI im Festgestein empirisch mit dem CERCHAR-Abrasivitätsindex CAI korrelieren lässt. Neben der polynomischen Regression, die in **Bild 7** dargestellt ist, stellt Schumacher [25] auch eine praxistaugliche, quadratische Korrelation vor (**Gleichung 2**):

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

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 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 (unter anderem [26]) und in dieser Funktion auch in der VOB/C referenziert wurde.

Der LCPC-Test wird an 500 g gebrochenem Probenmaterial definierter Körnung (Ø 4 – 6,3 mm; entspricht Feinkies) durchgeführt. Die Probe wird in einen zylindrischen Behälter eingefüllt und dort fünf Minuten lang bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 4.500 U/min von einem Metallflügel definierter Geometrie und Härte durchgemengt, der dabei verschlissen wird (**Bild 8**). 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 fünf Klassen von „nicht abrasiv“ (< 50 g/t) bis „extrem abrasiv“ (> 1.250 g/t) eingeteilt wird.

Der AK 3.3. „Versuchstechnik Fels“ der DGGT hat mit der Arbeit an einer entsprechenden Versuchsempfehlung begonnen, was angesichts der ungenügenden Spezifikationen in der AFNOR NF P18-579 [6] 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 Prüflügel-Oberfläche. Hier wird insbesondere ein Augenmerk auf die vollständige Entfernung einer eventuellen Zunderschicht (z.B. durch Sandstrahlen) zu legen sein. Da das Verschleißverhalten derartiger Zunderschichten

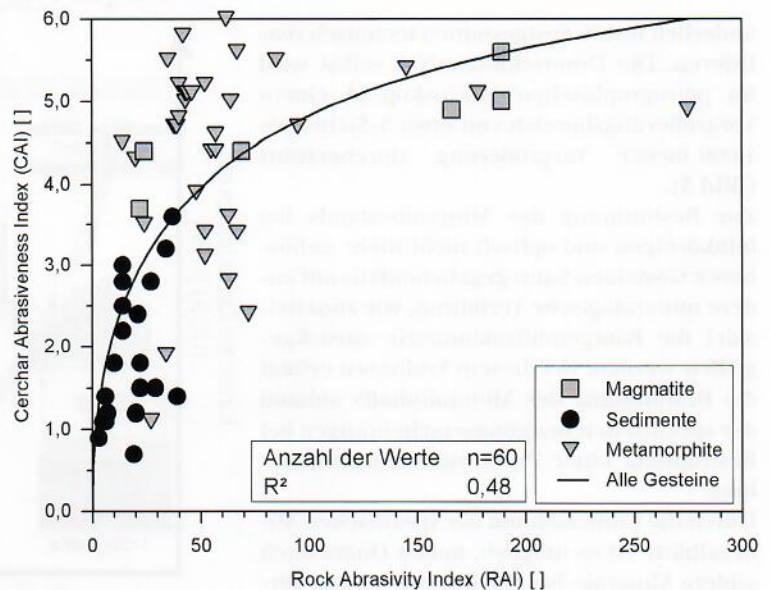


Bild 7. Gegenüberstellung des Rock Abrasivity Index, RAI und des CERCHAR Abrasiveness Index, CAI anhand von 60 mit beiden Verfahren untersuchten Gesteinen.

Fig. 7. Comparison of Rock Abrasivity Index, RAI and CERCHAR Abrasiveness Index, CAI for 60 rock types that have been investigated with both procedures.

erheblich vom Verhalten des Stahls selbst abweicht, führen derartige Schichten zu weiteren Messungenauigkeiten.

- Einen weiteren versuchstechnischen Einflussfaktor stellt die Formgebung des Prüflügels dar, insbesondere die Ausbildung der Kanten. In Reihenuntersuchungen konnte zum Beispiel festgestellt werden, dass die Verwendung von Flügeln mit „scharfen“ Kanten (z. B. Flügel aus Präzisionsstahl) zu einem scheinbar höheren ABR-Wert führten, als entsprechende Flügel, bei denen die Kanten runder ausgeführt waren (z. B. Flügel aus herkömmlichen Walzstahl) [27].
- Problematisch ist auch die Wahl der Stahlsorte, auch wenn diese die geforderte Rockwell-Härte B (60 – 75) aufweist. So wiesen Kupperle et al. [28] nach, dass je



Bild 8. Ansicht des LCPC-Prüfgerätes [9],
Fig. 8. Testing setup of the LCPC test [9],

Bild 8, S. 66.
Fig. 8, pp. 66.

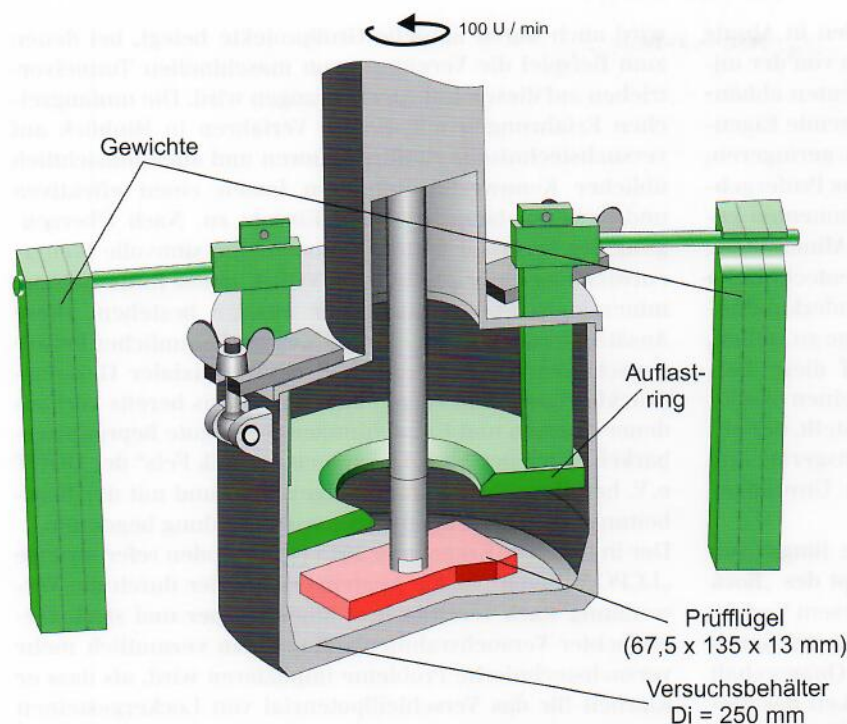


Bild 9. Schnittzeichnung des TU Wien „Abrasimeters“ (nach [29], umgezeichnet)
Fig. 9. Cross section of the TU Vienna „Abrasimeter“ (according to [29], redrawn)

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 mm – 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 gegebenenfalls Brechen und erneutes Sieben führt dazu, dass zusätzlich eine Vielzahl verschleißrelevanter Parameter, wie zum Beispiel die natürliche Lagerungsdichte, der Wassergehalt, der Feinkornanteil (und damit zusammenhängende bindige Eigenschaften), Kornform oder ge-

ringfügige Ver kittungen oder Zementierungen des Bodens bereits vor dem eigentlichen Versuch verworfen beziehungsweise 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 sogenannte „TU Wien Abrasimeter“ stellt einen bis dato prototypischen Versuchstand dar, der im Rahmen eines Forschungsvorhabens [29], [30] an der Technischen Universität Wien entwickelt worden ist (Bild 9). Das Abrasimeter ähnelt hinsichtlich seiner Grundauflegung dem vorangehend beschriebenen LCPC-Verfahren und umfasst einen rechteckigen Stahlflügel definierter Geometrie und Härte, der in einem zylinderförmigen Versuchsbehälter rotiert. Die maximale Drehzahl des Drehflügels beträgt 100 U/min. Gegenüber dem LCPC-Versuch unterscheidet sich der Versuchsaufbau insbesondere durch folgende Modifizierungen:

- deutlich vergrößerter, zylinderförmiger 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 Auflastings, der eine „mittlere Lagerungsdichte“ simulieren soll.

Das Verfahren ist in einem 2013 veröffentlichten Merkblatt der Österreichischen Bautechnik-Vereinigung (ÖBV) verankert [31].

4.3 Der SAT-Test

Die an der NTNU Trondheim entwickelte sogenannte „Soil-Abrasion-Test“ (SAT; [32]) ist eine Weiterentwicklung des dort bestehenden Systems von 3-Körper-Abrasionsversuchen. Statt einem feinkörnigen Pulverpräparat mit \varnothing 0 mm – 1 mm Korngröße (Probengut für die als „AV“ und „AVS“ bezeichneten Tests) wird beim SAT-Test eine getrocknete Bodenprobe mit Kornung \varnothing 0 mm – 4 mm in Interaktion mit einem Versuchskörper aus Stahl gebracht, dessen Geometrie und Härte an die Auslegung von Schneidringen von Tunnelvortriebsmaschinen angelehnt ist (Bild 10). Die Versuchsauslegung legt eine Anwendung insbesondere für Sande nahe – einem Korngrößenbereich, in dem wiederum die Auflösung des LCPC-Verfahrens als grundsätzlich unbefriedigend zu bezeichnen ist (Absatz 4.1).

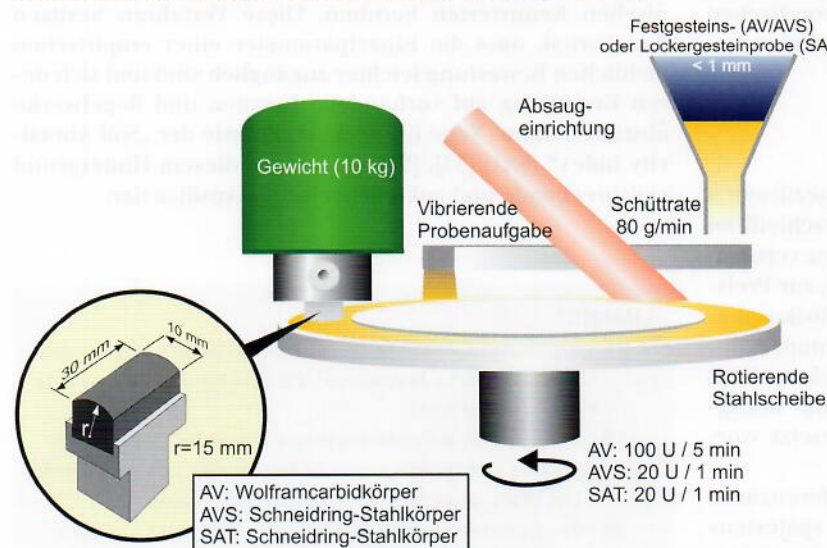


Bild 10. Versuchsverfahren SAT-Test der NTNU Trondheim (nach [32], umgezeichnet)
Fig. 10. Testing setup of NTNU Trondheim's SAT-Test (according to [32], redrawn)

4.4 Geologisch-geotechnische Ansätze

Jüngere Untersuchungen mit dem LCPC-Verfahren [27] und dem TU Wien Abrasimeter [29], [30] haben bestätigt, dass das Prüfer-

gebnis von „Verschleißtopf-Versuchen“, wie den in Absatz 4.1 bis 4.3 vorgestellten Verfahren, maßgeblich von der mineralogische Zusammensetzung der Komponenten abhängig ist, sofern andere abrasivitäts-mit-bestimmende Eigenschaften unverändert bleiben. Einen weitaus geringeren, aber immer noch feststellbaren Einfluss auf das Prüfergebn haben Kornform und Korngröße der Komponenten gezeigt. Da Parameter zur Charakterisierung der Mineralogie, Korngröße und Kornform als herkömmliche geotechnische Parameter im Zuge standardisierter Baugrunderkundungen 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 aufwendiger Spezialversuchsgeräte und die damit verbundenen, versuchstechnischen Unwägbarkeiten auskommt.

Ein derartiger, vielsprechender Ansatz wurde jüngst von Köppl [33], [34] publiziert. Analog zum Konzept des „Rock Abrasivity Index (RAI)“ (Absatz 3.5) 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 5).

$$SAI = \left(\frac{\dot{A}Qu}{100} \right)^2 \cdot \tau_c \cdot D_{60} \quad (5)$$

SAI	Soil Abrasivity Index	[]
ÄQu	Äquivalenter Quarzgehalt	[]
τ_c	Scherfestigkeit	[kN/m ²]
D_{60}	Korndurchmesser D_{60}	[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 5 verwendete Kennwert der Scherfestigkeit in der vorliegenden Form auf einer idealisierten Annahme der Überlagerungshöhe basiert und daher gegebenenfalls 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 Fazit und Ausblick

Die Beurteilung der Abrasivität – das heißt des spezifischen Potenzials eines Locker- oder Festgesteins, 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 Baugrunderkundung. Mit Erscheinen des Ergänzungsbandes 2015 zur VOB 2012 [1] sind in Deutschland erstmals „Standards“ bezüglich der anzuwendenden Versuchsverfahren gesetzt worden.

Der in der VOB-Ergänzung 2015 für Fels referenzierte „CERCHAR-Versuch“ ist ein Modellversuch, der spätestens seit Verabschiedung der nationalen DGGT-Empfehlung [11] und der internationalen ISRM-Empfehlung [10] im Felsbau als „Standardverfahren“ angesehen werden muss. Dies

wird auch durch aktuelle Großprojekte belegt, bei denen zum Beispiel die Vergütung von maschinellen Tunnelvortrieben auf diesen Indexwert bezogen wird. 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 Ansätze 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. Auch der AK 3.3. „Versuchstechnik Fels“ der DGGT e.V. hat diese Entwicklung aufgegriffen und mit der Bearbeitung einer derartigen Versuchsempfehlung begonnen. Der in der VOB-Ergänzung 2015 [1] für Boden referenzierte „LCPC-Versuch“ ist ein Modellversuch, der durch die Verwendung stark vereinfachter Modellkörper und stark vereinfachter Versuchsrahmenbedingungen vermutlich mehr versuchstechnische Probleme implizieren wird, als dass er Klarheit für das Verschleißpotenzial 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 Brechen führt dazu, dass eine Vielzahl verschleißrelevanter Parameter, wie zum Beispiel natürliche Lagerungsdichte, Wassergehalt, Feinkornanteil, Kornform oder geringfügige Verkittungen und Zementierungen bereits vor dem eigentlichen Versuch verworfen, beziehungsweise in signifikanter Weise verändert werden. 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 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) [33], [34], stellen vor diesem Hintergrund vielsprechende und zukunftsweisende Ansätze dar.

Literatur

- [1] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V., VOB 2012: Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Deutsche Fassung, Ausgabe 2012, Ergänzungsband 2015.
- [2] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V., VOB Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV), Bohrarbeiten – DIN 18301. Deutsche Fassung, Ausgabe August 2015.
- [3] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V., VOB Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV), Untertagebauarbeiten – DIN 18312. Deutsche Fassung, Ausgabe August 2015.

- [4] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V.: VOB Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV): Rohrvortriebsarbeiten – DIN 18319. Ausgabe August 2015. Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [5] DIN – Deutsches Institut für Normung e.V., VOB Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV): Horizontal-spülbohrarbeiten – DIN 18324. Deutsche Fassung, Ausgabe August 2015.
- [6] AFNOR – Association française de normalisation: Granulats: Essai d'abrasivité et de broyabilité (P 18–579). Paris (AFNOR), 1990.
- [7] AFNOR – Association française de normalisation, Détermination du pouvoir abrasive d'une roche – Partie 1: Essai de rayure avec une pointe (NF P 94–430–1). Paris (AFNOR), 2000.
- [8] Plinninger, R.J.: Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein. Münchner Reihe B, In: *Angewandte Geologie* (2002), B17, S. 1–146, München.
- [9] Plinninger, R.J.; Restner, U.: Abrasiveness testing, quo vadis? – a commented overview of abrasivity testing methods. In: *Geomechanics and Tunnelling* Vol. 1 (2008), Iss. 1, pp. 61–70.
- [10] Alber, M.; Yarah, O.; Dahl, F.; Bruland, A.; Käsling, H.; Michalakopoulos T.N.; Cardu, M.; Hagan, P.; Aydin, H. & Özarslan, A.: ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* Vol. 47 (2014), Iss. 1, pp. 261–266.
- [11] DGGT – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Empfehlung Nr. 23 des Arbeitskreises 3.3. Versuchstechnik Fels: Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen mit dem CERCHAR-Versuch, Deutsche Fassung, [in Druck].
- [12] Plinninger, R.J.; Düllmann, J.: Gebirgsmaßstäbliche Einflussfaktoren auf den Werkzeugverschleiß im Feltunnelbau – baupraktisch relevant und wissenschaftlich vernachlässigt. In: *Vogt, C.; Moormann, C. (Hrsg.): Bauen in Boden und Fels. Tagungshandbuch zum 10. Kolloquium, Technische Akademie Esslingen, Esslingen, 2016, S. 279 – 286.*
- [13] Rziha, F.: Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst. Erster Band. Verlag von Ernst & Korn, Berlin, 1867.
- [14] Schimazek, J.; Knatz, H.: Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen. In: *Glückauf* (1970), Heft 6, S. 274–278.
- [15] Schimazek, J.; Knatz, H.: Die Beurteilung der Bearbeitbarkeit von Gesteinen durch Schneid- und Rollenbohrwerkzeuge. In: *Erzmetall* (1976), Heft 3, S. 113–119.
- [16] Mohs, F.: Grund-Riß der Mineralogie. Dresden, Erster Teil. Terminologie, Systematik, Nomenklatur, Charakteristik, 1822.
- [17] Rosiwal, A.K.: Quarz als Standardmaterial für die Abnutzbarkeit. Verhandlungen der k. k. Geologischen Reichsanstalt, Heft 5/6, Wien, 1902.
- [18] Rosiwal, A.K.: Neuere Ergebnisse der Härtebestimmung von Mineralien und Gesteinen. Verhandlungen der k. k. Geologischen Reichsanstalt, Heft 9, Wien, 1916.
- [19] Smith, R. L.; Sandland, G. E.: An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals with Particular Reference to Those of a High Degree of Hardness. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 1 (1922), pp. 623–641.
- [20] Al-Ameen, S. I.; Waller, M.D.: The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index. In: *Engineering Geology*, Vol. 36 (1994), Iss. 3/4, pp. 293–301.
- [21] Thuro, K.: Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb, Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. In: *Münchner Geologische Hefte* (1996), Reihe B, S. 1–145.
- [22] Bruland, A.: Project report 13A-98 – Hard rock tunnel boring. In: *Drillability Test methods* (1998), pp. 13A-98.
- [23] Plinninger, R.J.: Abrasivitätsbewertung in Festgesteinen mit dem Rock Abrasivity Index (RAI) – Erfahrungen aus 8 Jahren Anwendung. In: *Geotechnik*, 33 (2010), Heft 2, S. 185–189.
- [24] Ewendt, G.: Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognose des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln. In: *BOCHUMER Geologische und Geotechnische Arbeiten*, Heft 33 (1989), S. 1 – 88.
- [25] Schumacher, L.: Auslegung und Einsatzbedingungen von Tunnelvortriebsmaschinen im Hartgestein. In: *Felsbau*, 22 (2004), Heft 3, S. 21–28.
- [26] Thuro, K.; Käsling, H.: Classification of the abrasiveness of soil and rock. In: *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 2 (2009), Iss. 2, pp. 179 – 188.
- [27] Düllmann, J.; Alber, M.; Plinninger, R.J.: Determining soil abrasiveness by use of index tests versus using intrinsic soil parameters. In: *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 7 (2014), Iss. 1, pp. 87 – 97.
- [28] Küpferle, J.; Röttger, A.; Alber, M.; Theisen, W.: Assessment of the LCPC abrasiveness test from the view of material science. In: *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 8 (2015), Iss. 3, pp. 211–220.
- [29] Drucker, P.: Abrasivität von Lockergestein und der Werkzeugverschleiß im Tief- und Tunnelbau. In: *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 156 (2012), Heft 1–12/2011, S. 1 – 7.
- [30] Drucker, P.: Über die Abrasivität von Lockergestein und den Werkzeugverschleiß im Spezialtiefbau. Wien, TU Wien, Dissertation, 2013.
- [31] ÖBV – Österreichische Bautechnik Vereinigung: Merkblatt zur Abrasivitätsbestimmung von grobkörnigem Lockergestein. Oktober 2013.
- [32] Nilsen, B.; Dahl, F.; Holzhäuser, J.; Raleigh, P.: SAT – NTNU's new soil abrasion test. In: *Tunnels and Tunnelling International Magazine*, Vol. 38 (2006), Iss. 5, pp. 43–45.
- [33] Köppl, F.: Abbauwerkzeugverschleiß und empirische Verschleißprognose beim Vortrieb mit Hydroschild TVM in Lockergesteinen. München, Technische Universität München, Dissertation, 2014.
- [34] Köppl, F.: Abbauwerkzeugverschleiß und empirische Verschleißprognose beim Vortrieb mit Hydroschild-TVM in Lockergesteinen. In: *Köppl, F. (Hrsg.): Taschenbuch für den Tunnelbau*. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2016, S. 135–184.