

BERGAKADEMIE



250
JAHRE

KOLLOQUIUM 7

Maschinen und Verfahren
für den Bergbau und Spezialtiefbau

LXVI. Berg- und Hüttenmännischer Tag 19. Juni 2015

Abrasivitätsuntersuchung in Boden und Fels – ein aktueller Überblick

Dr. Plinninger, Ralf

Dr. Plinninger Geotechnik, Kirchweg 16, D-94505 Bernried,
E-Mail: geotechnik@plinninger.de

Prof. Dr.-Ing. Alber, Michael

Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie/Felsbau,
Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150,
D-44780 Bochum, E-Mail: michael.alber@rub.de

Die Beurteilung der Abrasivität – d.h. des spezifischen Potentials eines Locker- oder Festgestein, Verschleiß an einem zur Lösung oder Bearbeitung eingesetzten Werkzeug zu verursachen – ist spätestens seit den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts zu einem zunehmend festen Bestandteil der Baugrundkundung und Bauausführung im Tief-, Tunnel- und Spezialtiefbau geworden. Im Feststein muss der CERCHAR-Versuch und der dabei ermittelte Abrasivitätsindex CAI mittlerweile als „Standardverfahren“ angesehen werden. Darüber hinaus werden aber auch mineralogisch-petrographische Ansätze erfolgversprechend eingesetzt, die auf der Ermittlung relevanter Eigenschaften wie Mineralgehalt und einaxialer Gesteinsdruckfestigkeit beruhen. Einer der hieraus abgeleiteten Indexwerte ist z.B. der „Rock Abrasivity Index“ (RAI). Ausgehend von Ansätzen und Untersuchungsverfahren im Feststein ist die Untersuchung von Lockergesteinen seit einigen Jahren vermehrt Gegenstand der Forschung, wobei der Prozess der Weiterentwicklung insbesondere in diesem Bereich noch nicht abgeschlossen scheint.

1 Werkzeugverschleiß – ein relevanter Leistungs- und Kostenfaktor

Ob maschineller oder konventioneller Tunnelvortrieb, Sprenglochbohrung in der Gewinnungsindustrie, Ankerlochbohrung, Geothermiebohrung oder Baugrund- und Lagerstättenexploration – der Verschleiß an den zur Gebirgslösung eingesetzten Werkzeugen 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. Nachstehende Abb. 1 zeigt beispielhaft das Absinken der Werkzeugpenetration – und damit Löseleistung – mit fortschreitendem Verschleiß einer Bohrkrone. Ähnliche Tendenzen sind ebenso für andere Werkzeugbauformen, wie Rundschaftmeißel oder Disken nachzuweisen.

Bei Verschleißvorgängen handelt es sich grundsätzlich 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 (siehe u.a. PLINNINGER, 2002).

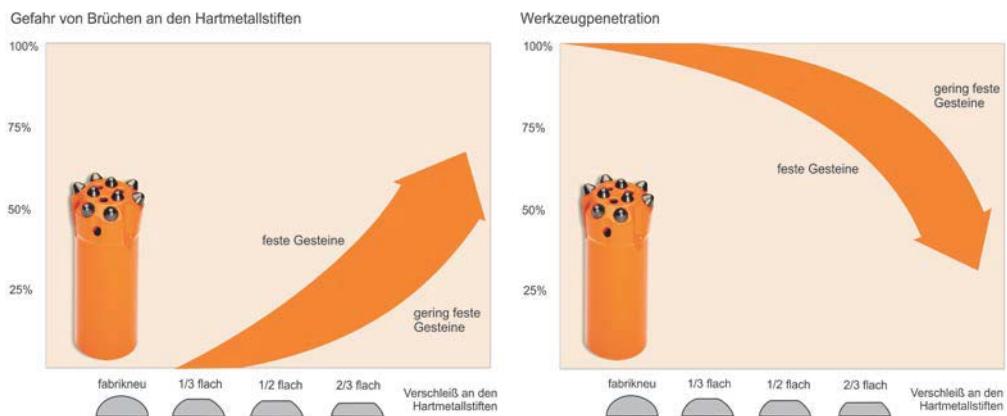


Abb. 1: Schematische Darstellung abnehmender Bohrkronenpenetration mit zunehmendem Abrasivverschleiß an den Hartmetallstiften (nach Unterlagen ATLAS-COPCO)

Die geologischen Einflüsse auf den Werkzeugverschleiß werden 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.

Zur Untersuchung der Abrasivität sind grundsätzlich eine Vielzahl von Prüfverfahren denkbar, die – abhängig von Zielsetzung und Kostenaufwand – unterschiedlich aussagekräftige Prognosekennwerte liefern können. Dabei kann zwischen 6 verschiedenen Kategorien unterschieden werden, die vom Betriebsversuch bis hin zum Modellversuch mit einfachen Prüfkörpern und mineralogischen oder chemischen Untersuchungen reichen (Abb. 2).

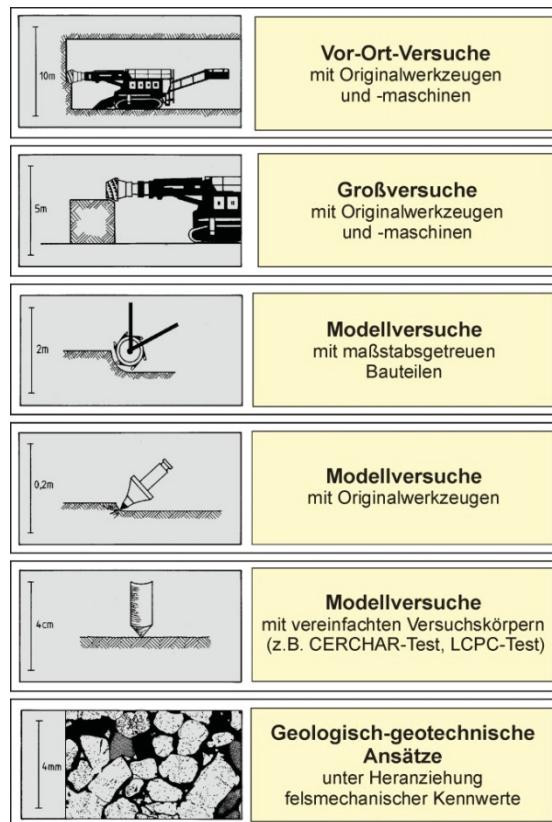


Abb. 2: Kategorien der Verschleißprüfung in Anlehnung an DIN 50322 am Beispiel einer Teilschnittmaschine.

2 Abrasivitäts-Untersuchungsverfahren im Festgestein

Ausgehend von einem normativen „Vakuum“ in diesem Bereich haben mit zunehmendem Erkenntniszuwachs und dem Einsetzen entsprechender Gremien- und Normenarbeit bis dato folgende Verfahren und Vorgehensweisen Eingang in entsprechende Regelwerke gefunden:

- der CERCHAR-Versuch und der dabei ermittelte CERCHAR-Abrasivitätsindex CAI, ein Modellversuch, der mittlerweile als „Standardverfahren“ angesehen werden muss. Dies wird z.B. auch durch entsprechende, aktuelle Großprojekte belegt, bei denen z.B. die Vergütung von TBM-Vortrieben auf diesen Indexwerts bezogen wird;
- herkömmliche, mineralogisch-petrographische Ansätze, die auf der Ermittlung relevanter Eigenschaften wie Mineralgehalt und einaxialer Gesteinsdruckfestigkeit beruhen sowie komplexe, daraus abgeleiteten Indexwerte, wie z.B. der „Rock Abrasivity Index“ (RAI).

Alle drei Verfahren werden in den folgenden Absätzen 2.1 bis 2.3 in ihren Grundzügen beschrieben

2.1 CERCHAR-Test

Der Abrasionsversuch nach den Prüfempfehlungen des CERCHAR basiert auf einem definierten Prüfstift, der bei konstanter Auflast über 10 mm eines Prüfkörpers gezogen wird (Abb. 3). Der CERCHAR Abrasivitätsindex (CAI) errechnet sich als Mittelwert über meist 5 Einzelversuche aus der Breite der am Prüfstift entstandenen kegelstumpfförmigen Verschleißphase.

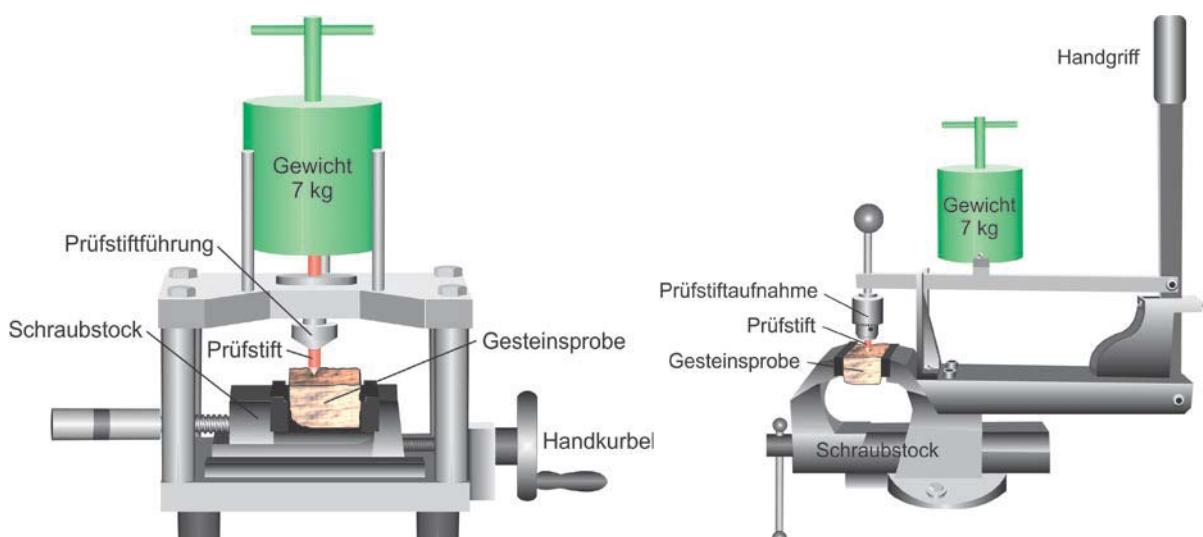


Abb. 3: Cerchar-Abrasivitätsversuch: Typisches Prüfgerät (links) und auf Gesteinsprobe aufgesetzter Prüfstift vor dem Versuch (rechts).

Die mittlerweile erschienene ISRM Suggested Method (ALBER ET AL., 2013) und die im Frühjahr 2015 verabschiedete Empfehlung Nr. 23 des AK 3.3. „Versuchstechnik Fels“ der DGGT (in Druck) werden zu einer weiteren Vereinheitlichung der Prüfbedingungen und zur Vergleichbarkeit von an verschiedenen Instituten ermittelten Prüfergebnissen beitragen.

Kernpunkte der beiden weitestgehend harmonisierten Prüfempfehlungen 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. 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“ ($CAI \geq 5$) klassifiziert.

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. Gebirgs-einflüsse, wie Wechsellagerungen verschiedener Gesteine, Trennflächen-, Bergwasser oder auch Spannungseinflüsse bleiben bei der Ermittlung des CAI unter „Laborbedingungen“ unberücksichtigt.

So ist z.B. für die Anwendung für den Bau tiefliegender Tunnel oder im tiefen Bergbau zu beachten, dass vor allem Gesteine mit hoher Porosität oder geringem Elastizitätsmodul durch Spannungsumlagerungen an der Ortsbrust komprimiert werden können und durch eine derartige Einspannung *in situ* erhöhte CAI-Werte auftreten können. Laboruntersuchungen dieses Phänomens haben gezeigt, dass der maßgebliche *in-situ* CAI unter solchen Bedingungen um bis zu 100 % gegenüber dem „Laborwert“ erhöht sein kann (ALBER, 2008)

2.2 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 FRANZ VON RZIHA („Lehrbuch der gesammten Tunnelbaukunst“, 1874) und weiter zurückverfolgen lässt.

Erste Ansätze berücksichtigten vor allem den Quarzgehalt eines Gesteins, dessen wesentliche Rolle als schleißscharfes und gleichzeitig sehr weit verbreitetes gesteinsbildendes Mineral bald erkannt wurde. Durch die Einbeziehung von Kennwerten für die Mineralhärte wurde es möglich, ebenso auch andere Minerale als Quarz bei der Bewertung zu berücksichtigen, indem diese entsprechend ihrer jeweiligen Härte gewichtet und miteinander zu einem einzigen Leitparameter für das gesamte Gestein verrechnet wurden.

Als Härtekennwerte werden bis heute die bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts entwickelten Systeme der MOHS'schen Ritzhärte (FRIEDRICH MOHS, 1912-1924), der ROSIWAL'schen Schleifhärte (AUGUST KARL ROSIWAL, 1896, 1916) oder die mit einem statischen Eindringversuch ermittelte, 1925 von SMITH & SANDLAND entwickelte und nach der britischen Flugzeugbaufirma VICKERS benannte VICKERS-Härte verwendet.

Es entstanden auf dieser Basis auch heute noch übliche geotechnische Verschleißindices wie der auf der MOHS-Härte basierende „*Abrasiv Mineral Content*“ („AMC“), der im angloamerikanischen 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, 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.

Die Verwendung der bisher vorgestellten Indexwerte hat jedoch auch gravierende Nachteile, da ausschließlich Quantität und Qualität des Mineralinhalts berücksichtigt werden und andere die Abrasivität beeinflussende Parameter - wie vor allem die Festigkeit des Gefügeverbands, aber auch die Kornformen und Korngrößen der schleißscharfen Minerale - unberücksichtigt bleiben. Die Tragweite dieser Feststellung wird insbesondere deutlich, wenn auf Basis dieser Indexwerte die hypothetische Abrasivität eines rezenten Strandsands (Lockergestein), eines mittelfesten Sandsteins und eines hochfesten Quarzits mit ansonsten identischem Mineralanteil bewertet werden soll (Abb. 4) – allen drei Sedimenten werden identische Quarzäquivalent-Gehalte, VHNR oder AMC zugeordnet!

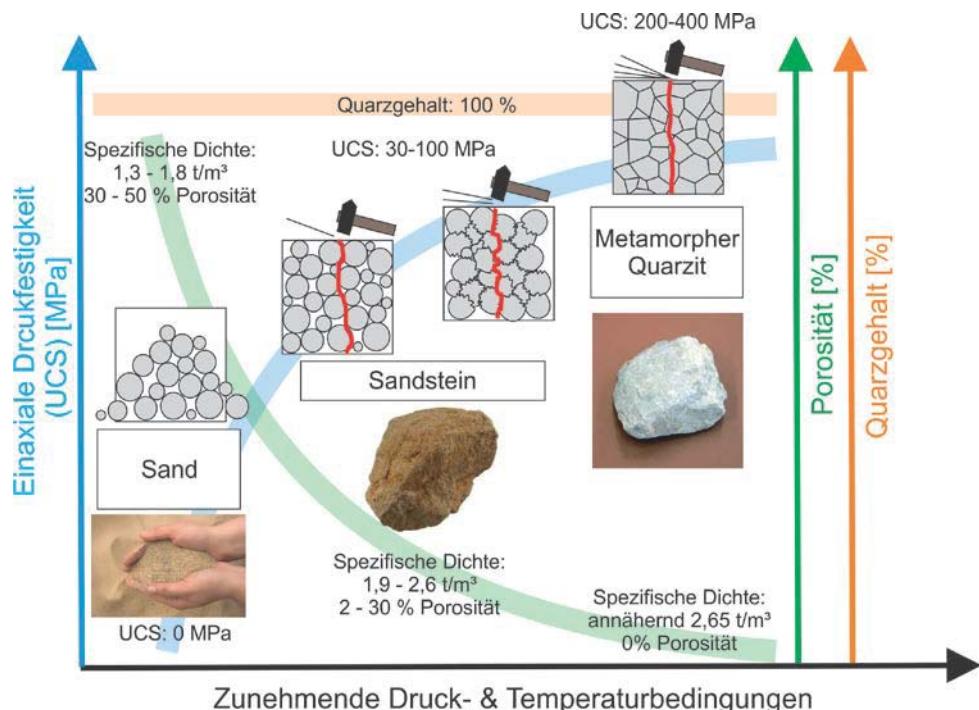


Abb. 4: Schematische Darstellung der Entwicklung wesentlicher Gesteinsparameter eines Quarzsands – Sandsteins – Quarzits während der Diagenese und Metamorphose.

2.3 Rock Abrasivity Index (RAI)

Der Gesteinsabrasivitäts-Index RAI („Rock Abrasivity Index“) stellt eine 2002 eingeführte Weiterentwicklung des Äquivalenten Quarzgehalts dar (PLINNINGER, 2002). Der RAI stellt in der vorliegenden Form einen einfachen und mit weit verbreiteten Kennwerten bestimmbaren 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.

Gleichung 1: Bestimmung des Rock Abrasivity Index RAI.

$$RAI = \sum_{i=1}^n A_i \cdot S_i \cdot UCS$$

mit	RAI	Rock Abrasivity Index	[]
	UCS	Einaxiale Druckfestigkeit	[MPa]
A_i		Anteil der Mineralart	[%]
S_i		Rosiwal-Schleifhärte (bezogen auf Quarz)	[]
n		Anzahl aller Minerale	[]

Der höchste, bisher bestimmte RAI liegt dabei bei rd. 360 (Quarze mit rd. 360 MPa Einaxiale Druckfestigkeit und rd. 100 % Quarzgehalt), Werte bis rd. 500 erscheinen für baurelevante Gesteine möglich. Nach unten hin (Übergang zu Lockergesteinen) werden die minimal bestimmbaren Werte nur technisch (insbesondere durch die Auflösung der Druckfestigkeitsprüfung) begrenzt.

Dabei ist festzustellen, dass die Verknüpfung mineralogisch-petrographischer und felsmechanischer Kennwerte zu einem komplexeren Indexwert selbst kein Novum darstellt. Mit dem SCHIMAZEK-Verschleißindex (SCHIMAZEK & KNATZ, 1970, 1976), der aus Quarzgehalt, mittlerem Quarzkorn-durchmesser und Gesteinszugfestigkeit ermittelt wird sowie dem modifizierten SCHIMAZEK-Verschleißindex nach EWENDT (1989), der als Eingangskennwerte den Äquivalenten Quarzgehalt, den Punktlastindex I_{50} und die Quarzkorngröße verwendet, liegen vergleichbare ältere Ansätze vor, deren

Anwendbarkeit lediglich durch weniger verbreitete Festigkeitskennwerte (Spaltzugfestigkeit bzw. Punktlastindex) sowie die aufwändig zu bestimmenden Korngrößenparameter eingeschränkt wird.

Die im Laufe der Anwendung gemachten Erfahrungen haben gezeigt, dass sich der RAI im Festgestein gut mit dem CERCHAR-Abrasivitätsindex CAI korrelieren lässt. Neben der empirischen, polynomischen Regression, die in Abbildung 5 dargestellt ist, stellt SCHUMACHER (2004) auch eine praxis-taugliche, quadratische Korrelation vor (Gleichung 2):

Gleichung 2: Empirische Korrelation von RAI und CAI.

$$CAI = 0,9 \cdot \sqrt[3]{RAI}$$

mit CAI CERCHAR Abrasivitäts Index []
 RAI Rock Abrasivity Index []

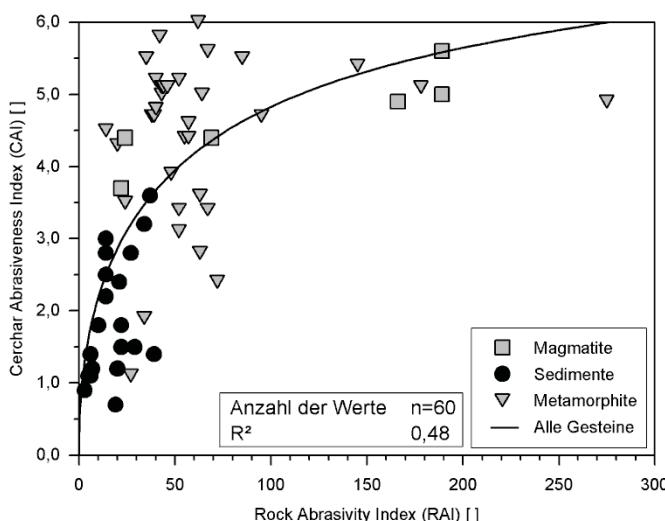


Abb. 5: Gegenüberstellung des Rock Abrasivity Index RAI und des Cerchar Abrasiveness Index CAI anhand von 60 mit beiden Verfahren untersuchten Gesteinen.

3 Abrasivitäts-Untersuchungsverfahren im Lockergestein

Für die Anwendung im Lockergestein fehlen derzeit nach wie vor entsprechende „Standardverfahren“, wobei sich im Lichte der Fachpublikationen der letzten Jahre folgende beiden „Strömungsrichtungen“ beobachten lassen, die durchaus gewisse Analogien zur Entwicklung im Festgestein erkennen lassen:

- die Entwicklung und Anwendung von Modellversuchen auf der Basis von „Verschleißtöpfen“, wie z.B. dem LCPC („Abroy“)-Test, dem Wiener „Abrasimeter“ oder dem „SAT“-Test, um drei der am meisten verbreiten Verfahren zu nennen. Zumeist handelt es sich um komplexe „prototypartige“ Versuchsaufbauten mit stark vereinfachten Modellkörpern und vereinfachten Versuchsrahmenbedingungen, die z.T. neue, versuchstechnische Probleme implizieren;
- die Entwicklung und Anwendung von Prognoseindices, 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.

Mit dem LCPC-Tests, dem TU Wien „Abrasimeter“, dem SAT-Test und dem auf konventionellen Parametern beruhenden Abrasivitätsindex „SAI“ werden in den folgenden Absätzen 3.1 bis 3.3 einige der derzeit am häufigsten angeführten Ansätze in ihren Grundzügen beschrieben.

3.1 LCPC-Test

Der als Drehflügelversuch oder LCPC-Abrasimetre (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - LCPC) bezeichnete Test wurde in den 70er Jahren für die Brecherindustrie als Indexversuch zur Abrasivitätsuntersuchung entwickelt. Da sich der Versuch – im Gegensatz zu den in Kapitel 2 angeführten Verfahren – grundsätzlich zur Prüfung von Lockergesteinen eignet, wurde er seit Mitte der 2000er-Jahre 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. Das Ergebnis des Versuchs ist der ABR-Index, der sich aus dem Massenverlust [g] des Flügels bezogen auf die Probenmenge [t] errechnet. Der ABR wird üblicherweise in 5 Klassen von „nicht abrasiv“ (< 50 g/t) bis „extrem abrasiv“ (> 1250 g/t) eingeteilt.

Das Versuchsverfahren ist als Kennwert für die Abrasivität von Lockergesteinen in den DAUB-Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen aufgeführt (DAUB, 2010) und wird in diesem Kontext wohl auch Eingang in die überarbeiteten ATVs der VOB/C (DIN 18300 ff.) finden.

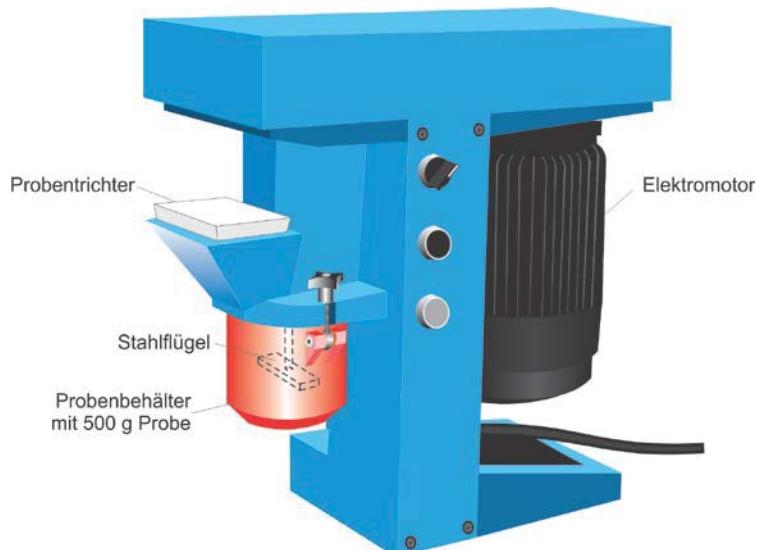


Abb. 6: Ansicht des LCPC-Prüfgerätes

Der AK 3.3. „Versuchstechnik Fels“ der DGQT hat mit der Arbeit an einer entsprechenden Versuchsempfehlung begonnen, was angesichts der derzeit noch weitgehend unstandardisierten Prüfmaschinen und Prüfmaterialien auch 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 Prüfblatt-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 erheblich vom Verhalten des Stahls selbst abweicht, führen derartige Schichten zu weiteren Messungenauigkeiten.

- Einem weiteren versuchstechnischen Einflussfaktor stellt die Formgebung des Prüfflügels dar, insbesondere die Ausbildung der Kanten. DÜLLMANN (2014) fand bei Reihenuntersuchungen z.B. heraus, dass die Verwendung von Flügeln mit „scharfen“ Kanten zu einem scheinbar höheren ABR-Wert führten, als entsprechende Flügel, bei denen die Kanten „rund“ ausgeführt waren.
- Problematisch ist auch die Wahl der Stahlsorte, auch wenn diese die geforderte Rockwell-Härte B (60 – 75) aufweist. So zeigen KÜPFERLE ET AL. (2015), dass je nach Werkstoff der ABR-Wert um 216 g/t variieren kann.

Bei der Interpretation von LCPC-Indexwerten für Lockergesteine ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass bereits durch die Probenahme und Probenvorbereitung (Trocknen, Sieben, ggf. Brechen) eine Vielzahl verschleißrelevanter Parameter, wie z.B. natürliche Lagerungsdichte, Wassergehalt, Feinkornanteil (und damit zusammenhängende bindige Eigenschaften), Kornform oder geringfügige Verkittungen/Zementierungen bereits vor dem eigentlichen Versuch verworfen, bzw. in signifikanter Weise verändert werden. Diese Faktoren müssen daher bei der Ermittlung des ABR stets unberücksichtigt bleiben.

3.2 TU Wien Abrasimeter

Der derzeit noch prototypische Versuchsaufbau des sog. „TU Wien Abrasimeters“ wurde im Rahmen einer Dissertation (DRUCKER, 2012 & 2013) an der Technischen Universität Wien entwickelt (Abb. 7).

Abb. 7: Schnittzeichnung zum TU Wien „Abrasimeter“ (aus: DRUCKER, 2012, Abb. 6, S. 3)

Das Abrasimeter basiert hinsichtlich seiner Grundauslegung auf dem vorangehend beschriebenen LCPC-Verfahren und umfasst einem 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 aber insbesondere durch folgende Modifizierungen:

- deutlich vergrößerter, zylinderförmigen Versuchsbehälter mit 25 cm Durchmesser für bis zu 10 kg Probenmaterial;

- damit verbunden die Möglichkeit, auch gröberkörnige 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.

Das Verfahren ist mittlerweile in einem Merkblatt der Österreichischen Bautechnik-Vereinigung (ÖBV) verankert (ÖBV, 2013).

3.3 SAT-Test

Die an der NTNU Trondheim entwickelte sog. „Soil-Abrasion-Test“ (SAT; NILSEN ET AL., 2006) ist eine Weiterentwicklung des dort bestehenden Systems von 3-Körper-Abrasionsversuchen. Statt einem feinkörnigen Pulverpräparat mit \varnothing 0-1 mm Korngröße (AV/AVS-Test) wird beim SAT-Test eine getrocknete Bodenprobe mit Körnung \varnothing 0-4 mm in Interaktion mit einem Versuchskörper aus Stahl gebracht, dessen Geometrie und Härte an die Auslegung von Schneidringen angelehnt ist (Abb. 8).

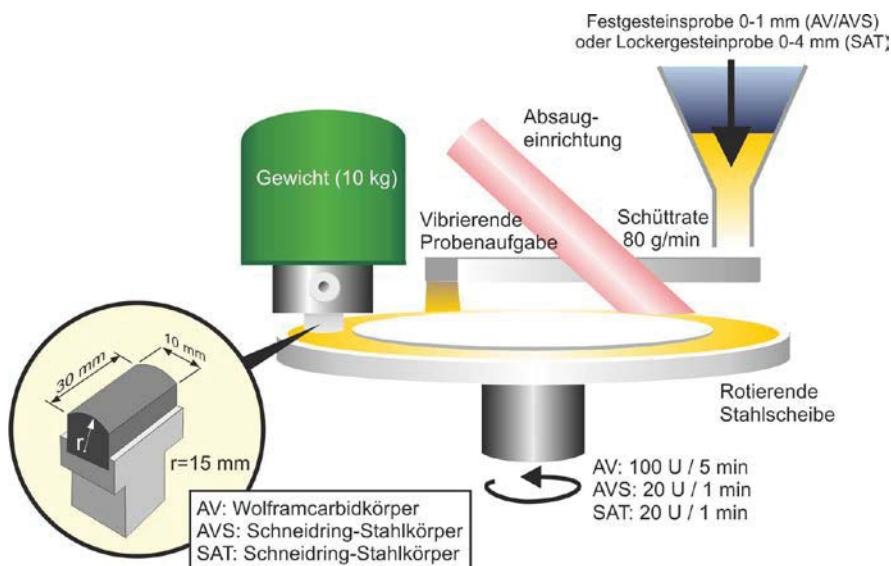


Abb. 8: Versuchsverfahren SAT-Test (nach: NILSEN, et al. 2006)

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.

3.4 Geologisch-geotechnische Ansätze

Aktuelle Untersuchungen mit dem LCPC-Verfahren (DÜLLMANN ET AL, 2014) und dem TU Wien Abrasimeter (DRUCKER, 2012 & 2013) haben bestätigt, dass das Prüfergebnis derartiger „Verschleißtopf-Versuche“ 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 Prüfergebnis haben Kornform und Korngröße der Komponenten (DÜLLMANN ET AL, 2014; DRUCKER, 2012, siehe Abb. 9).

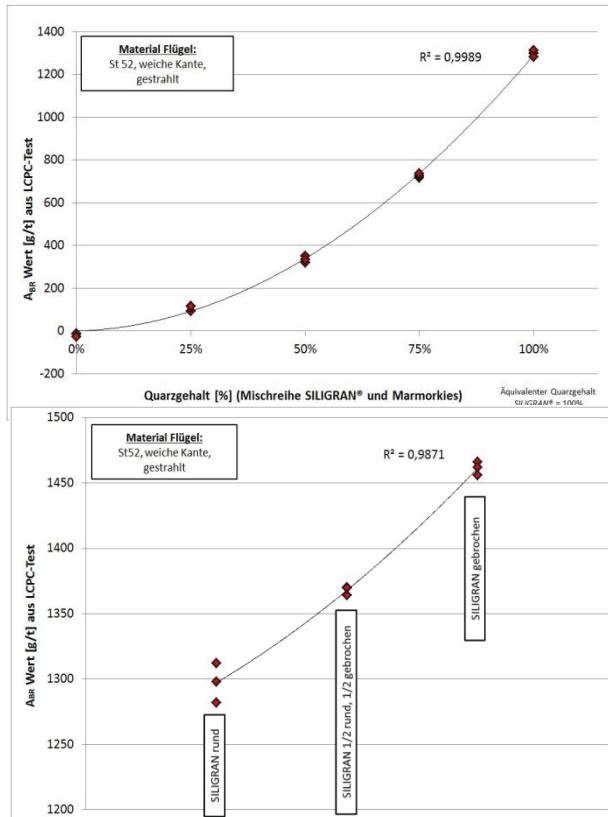


Abb. 9: Bodenmechanische Einflussfaktoren auf den LCPC-Verschleißkoeffizient ABR: links: Einfluss des Quarzgehalts anhand einer Mischreihe aus SILIGRAN® Quarz und Marmorkies, rechts: Einfluss der Kornform in einer Mischreihe aus gebrochenem und gerundeten Korn mit gleicher mineralogischer Zusammensetzung (aus: DÜLLMANN ET AL, 2014).

Da Parameter zur Charakterisierung der Mineralogie, Korngröße und Kornform als „herkömmliche“ geotechnische Parameter im Zuge standardisierter Baugrundkundungen ermittelt werden, stellt sich daher die Frage ob es nicht sinnvoller ist, die Abrasivitätsbewertung von vornehmlich auf diese „herkömmlichen“ Kennwerte abzustellen, ohne die Anschaffung eines aufwändigen Spezialversuchsgerät und die damit verbundenen, versuchstechnischen Unwägbarkeiten in Kauf nehmen zu müssen.

Ein derartiger, vielsprechender Ansatz wurde jüngst von KÖPPL & THURO (2013) vorgestellt. Analog zur Bestimmung des in Kapitel 2 beschriebenen „Rock Abrasivity Index (RAI)“ 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.

Der hierbei verwendete Abbauwiderstand basiert in der derzeit vorliegenden Form auf idealisierten Annahmen und der Überlagerungshöhe und kann daher ggf. von den natürlichen Verhältnissen abweichen. Eine Verbesserung der Aussagekraft ist allerdings zu erwarten, wenn anstatt einer theoretischen Scherfestigkeit reale Kennwerte und Zustandsgrößen benutzt werden können.

4 Schlussfolgerungen

Die Beurteilung der Abrasivität – d.h. des spezifischen Potentials eines Locker- oder Festgestein, Verschleiß an einem zur Lösung oder Bearbeitung eingesetzten Werkzeug zu verursachen – ist zur Beurteilung von Werkzeugverschleiß und zur Minimierung bauvertraglicher Risiken ein weiterhin aktuelles Thema. Ausgehend von einem normativen „Vakuum“ in diesem Bereich haben mit zunehmendem Erkenntniszuwachs und dem Einsetzen entsprechender Gremien- und Normenarbeit bis dato folgende Verfahren und Vorgehensweisen Eingang in entsprechende Regelwerke gefunden:

für die Anwendung im **Festgestein**:

1. der CERCHAR-Versuch und der dabei ermittelte CERCHAR-Abrasivitätsindex CAI, ein Modellversuch, der spätestens seit der Verabschiedung der entsprechenden ISRM-Empfehlung (ALBER ET AL, 2013) und DGGT-Empfehlung (DGGT, 2015 / in Druck) als eines der „Standardverfahren“ für Festgestein angesehen werden muss. Dies wird z.B. auch durch entsprechende, aktuelle Großprojekte belegt, bei denen z.B. die Vergütung von TBM-Vortrieben auf diesen Indexwerts bezogen wird;
2. herkömmliche, mineralogisch-petrographische Ansätze, die auf der Ermittlung relevanter Eigenschaften wie Mineralgehalt und einaxialer Gesteinsdruckfestigkeit beruhen. Einer der hieraus abgeleiteten Indexwerte ist z.B. der „Rock Abrasivity Index“ (RAI).

für die Anwendung im **Lockergestein** fehlen derzeit nach wie vor entsprechende „Standardverfahren“. Im Lichte der Fachpublikationen der letzten Jahre folgende beiden „Strömungsrichtungen“ beobachten, die durchaus gewisse Analogien zur Entwicklung im Festgestein erkennen lassen:

1. die Entwicklung und Anwendung von Modellversuchen auf der Basis von „Verschleißtöpfen“, wie z.B. dem LCPC („Abroy“)-Test, dem TU Wien „Abrasimeter“ oder „SAT“-Test, um drei der am meisten verbreiten Verfahren zu nennen. Zumeist handelt es sich um komplexe „prototypartige“ Versuchsaufbauten mit stark vereinfachten Modellkörpern und vereinfachten Versuchsrahmenbedingungen, die z.T. neue, versuchstechnische Probleme implizieren;
2. die Entwicklung und Anwendung von Prognoseindices, 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.

5 Literaturverzeichnis

ALBER, M. (2008): Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools. *Tunnelling & Underground Space Technology* 23, 4, S. 351-359.

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.- *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 47: 261-266 (Elsevier).

DGGT - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V. (2015 / in Druck): 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.- eingereicht zur Publikation in geotechnik (Ernst & Sohn).

DRUCKER, P. (2012): Abrasivität von Lockergestein und der Werkzeugverschleiß im Tief- und Tunnelbau, Österreich. Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 156. Jg., Heft 1-6/2011 und Heft 7-12/2011, S. 1 – 7.

DRUCKER, P. (2013): Über die Abrasivität von Lockergestein und den Werkzeugverschleiß im Spezialtiefbau, Dissertation TU Wien, 158 S.

DÜLLMANN, J. (2014): Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Optimierung von Leistungs-und Verschleißprognosen bei Hydroschildvortrieben im Lockergestein. Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 198 S.

DÜLLMANN, J., ALBER, M. & PLINNINGER, R.J. (2014): Determining soil abrasiveness by use of index tests versus using intrinsic soil parameters.- *Geomechanics & Tunnelling*, 7: S. 87 – 97 (Ernst & Sohn).

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. Ruhruniv. Bochum.

KÖPPL, F. & THURO, K. (2013): Verschleißprognose für Mix-Schild TVM in Lockergesteinen, Beiträge zur 19. Tagung für Ingenieurgeologie, München 2013, S. 55 – 60.

KÜPFERLE, J., RÖTTGER, A., ALBER, M. & THEISEN, W. (2015 / in Druck): Bewertung des LCPC-Abrasivitätstests aus werkstofftechnischer Sicht.- angenommen zur Publikation in *Geomechanics & Tunnelling*, 8 (Ernst & Sohn).

NILSEN, B., DAHL, F., HOLZHÄUSER, J. & RALEIGH, P. (2006): SAT - NTNU's new soil abrasion test, *Tunnels and Tunnelling International Magazine*, 38 (2006), 5: S. 43-45.

ÖBV - ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG (2013): Merkblatt zur Abrasivitätsbestimmung von grob-körnigem Lockergestein, 32 S.

PLINNINGER, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein. – *Münchener Geologische Hefte*, Reihe B: Angewandte Geologie, B17, XI + 146 Seiten.

PLINNINGER, R.J. & RESTNER, U. (2008): Abrasiveness testing, quo vadis? - a commented overview of abrasivity testing methods.- *Geomechanik und Tunnelbau*: 2008, 1: 61-70 (Ernst und Sohn).

SCHIMAZEK, J. & KNATZ, H. (1970): Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen.- *Glückauf*, 106, 6: 274-278.

SCHIMAZEK, J. & KNATZ, H. (1976): Die Beurteilung der Bearbeitbarkeit von Gesteinen durch Schneid- und Rollenbohrwerkzeuge.- *Erzmetall*, 29, 3: 113-119.

SCHUMACHER, L. (2004): Auslegung und Einsatzbedingungen von Tunnelvortriebsmaschinen im Hartgestein.- *Felsbau*, 22, 3: 21-28, Essen (Glückauf).

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. Baugrundtagung, 27. - 29. Sept. 2006 in Bremen, 283-290.