

Versuchstechnische Einflüsse beim CERCHAR-Abrasivitätsversuch: Überblick und Diskussion des nationalen und internationalen Stand der Technik

Dr. R.J. Plinninger, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried
Akad. Dir. Dipl.-Ing. M. Feinendegen, RWTH Aachen University

Spätestens seit der Referenzierung in den Allgemeinen Technischen Vertragsbestimmungen (ATV) der VOB/C ist der CERCHAR-Versuch auch in Deutschland fester Bestandteil der Baugrunderkundung im Fels. Die Versuchsdurchführung erfolgt auf Basis der 2016 veröffentlichten Empfehlung Nr. 23 des AK 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. Der CERCHAR-Versuch stellt einen Modell-Abrasionsversuch dar, dessen Ergebnis (CAI) von einer Vielzahl versuchstechnischer Randbedingungen abhängt, u.a. der Stiftgeometrie, Stifthärte, Auflast, Prüfstreckenlänge und der Beschaffenheit der Probenoberfläche. Während Aspekte der Stifthärte im nationalen Kontext eher nachrangig sind -hier haben sich neben der originären Stifthärte HRC 55±1 kaum andere Standards durchgesetzt- bietet insbesondere der Effekt der Oberflächenformatierung bzw. -rauigkeit häufig Anlass für Unklarheiten und Diskussionen. Auf Basis einer bisher einzigartigen Datenbasis, die über 1300 Erfahrungswerte aus Laboruntersuchungen am Institut für Geomechanik und Untergrundtechnik (GUT) der RWTH Aachen und weiteren Forschungsarbeiten umfasst, werden im vorliegenden Beitrag Einflüsse der Oberflächenrauigkeit analysiert und die derzeit national und international angewendeten Korrekturansätze einer Überprüfung und Neubewertung unterzogen.

1 Einleitung

1.1 Kurzbeschreibung des Verfahrens

Beim CERCHAR-Versuch handelt es sich um einen Modell-Abrasionsversuch zur Bestimmung der Abrasivität von Festgestein, der in den 1980er Jahren am französischen *Centre d'Etudes et Recherches de Charbonnages de France* (Kürzel: CERCHAR) für den Steinkohlenbergbau entwickelt wurde.

Der Versuch (Abbildung 1-1) basiert auf einem Prüfgerät, in dem ein Prüfstift aus Stahl unter konstanter Auflast über eine Strecke von 10 mm über die Oberfläche eines Gesteinsprobekörpers gezogen wird. Der CERCHAR-Abrasivitäts-Index (CAI) errechnet sich aus der Breite der am Prüfstift entstandenen kegelstumpfförmigen Verschleißfase als Mittelwert einer Serie von meist fünf Einzelversuchen.

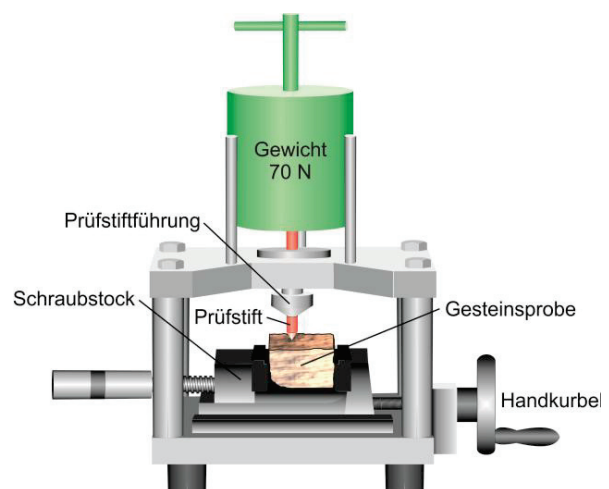


Abbildung 1-1: Typisches Versuchsgärät und Prüfungsanordnung beim CERCHAR-Versuch.

1.2 Normative Grundlagen

In Deutschland ergibt sich die Pflicht zur Beschreibung der Abrasivität von Festgesteinen mit Hilfe des CAI aus zahlreichen Allgemeinen Technischen Vertragsbestimmungen (ATV) der VOB/C. Diese umfassen Bohrarbeiten (DIN 18301), Untertagebauarbeiten (DIN 18312), Rohrvortriebsarbeiten (DIN 18319) sowie Horizontalspülbohrarbeiten (DIN 18324).

Seit Erscheinen der Gesamtausgabe 2019 ist in der VOB/C als anzuwendende Prüfrichtlinie die Empfehlung Nr. 23 des AK 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. referenziert (DGGT, 2016). In älteren Fassungen der VOB/C wurde auf die französische AFNOR NF P 94-430-1 (AFNOR, 2000) Bezug genommen.

Im internationalen Kontext wird für CERCHAR-Versuche neben der ISRM Suggested Method (ISRM, 2014) auch der ASTM-Standard D7625 (ASTM, 2010, bzw. 2022) angewendet.

1.3 Relevante Versuchsbedingungen

Die Identifizierung relevanter versuchstechnischer Randbedingungen und die Quantifizierung deren Auswirkungen auf das Versuchsergebnis ist seit den 1980er Jahren Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Veröffentlichungen, deren Aufzählung den Rahmen dieses Beitrags sprengen würde. Für die praktische Durchführung und Interpretation des Versuchs kann vereinfachend zwischen „Versuchskonstanten“ und „Versuchsvariablen“ unterschieden werden. Als Versuchskonstanten im nationalen und internationalen Kontext dürfen angesehen werden:

- Auflast: 70N,
- Prüfstrecke: 10 mm,
- Stiftgeometrie: Zylinder mit 90° Konuswinkel.

Als Versuchsvariable ist anzusehen:

- Oberflächenbeschaffenheit der Probekörper.

Einen Sonderfall stellt die Prüfstifthärte dar: Während gemäß der deutschen DGGT-Empfehlung Nr. 23 ausschließlich Prüfstifte mit einer nachgewiesenen Härte von HRC 55±1 verwendet werden dürfen und die Prüfstifthärte damit als Versuchskonstante anzusehen ist, werden international teilweise auch andere (meist weichere) Stiftqualitäten verwendet. Im internationalen Kontext ist die Prüfstifthärte daher ebenfalls als Versuchsvariable anzusehen und bei der Auswertung zu berücksichtigen.

In welcher Größenordnung der ermittelte CAI variieren kann, wenn Versuche mit verschiedenen Stifthärten auf unterschiedlichen Probekörperoberflächen durchgeführt werden, ist in nachstehender Abbildung

1-2 veranschaulicht. Dieser Grafik liegen die entsprechenden Korrekturvorschläge der ISRM Suggested Method (ISRM 2014) zugrunde.

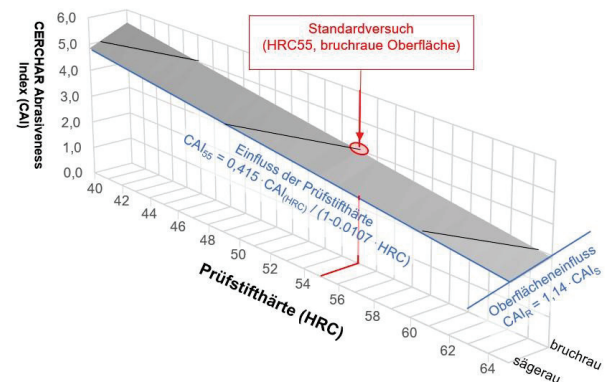


Abbildung 1-2: Variation des CAI in Abhängigkeit von Prüfstifthärte und Oberflächenrauigkeit.

Da der Effekt variierender Prüfstifthärte im nationalen Kontext keine Relevanz besitzt, wird im Weiteren nur auf den Effekt der Oberflächenbeschaffenheit eingegangen.

2 Einfluss der Oberflächenrauigkeit

2.1 Historie



Abbildung 2-1: Vergleich verschiedener Probenoberflächen einer Probe aus flaserigem Kalkstein: oben die durch Aufspalten hergestellte, nicht zur Prüfung geeignete, „bruchraue“ Oberfläche, unten die durch trockenes Sägen hergestellte „sägeraue“ Probe.

Ausgehend von der ursprünglichen Beschreibung des Prüfverfahrens (CERCHAR, 1986) wurden Versuche zunächst ausschließlich auf „frischen“ und „bruchrauen“ Oberflächen durchgeführt. Eine derartige Probenoberfläche wird üblicherweise durch Aufspalten einer größeren Ausgangsprobe hergestellt



und stellt auch heute noch den international referenzierten Standardfall dar (AFNOR, 2000; ASTM 2010 & 2022; ISRM, 2014; DGGT, 2016).

Da sich im Laboralltag bei einer Vielzahl ausgeprägt anisotroper oder inhomogener Gesteine (z.B. Konglomerate, grobkörnige Granite, Glimmerschiefer oder feingeschichtete Kalk- oder Sandsteine) durch Aufspalten keine prüffähige Oberfläche herstellen ließ (siehe Beispiel in Abbildung 2-1), wurden Ende der 1990er Jahre an der TU München Versuche mit alternativen Bearbeitungsverfahren (wie z.B. Sägen mit Diamantsäge oder Anschleifen mit Schleifpulver) durchgeführt.

Die Auswirkungen auf das Prüfergebn wurden mittels Vergleichsuntersuchungen quantifiziert (Käsling, 2000). Ausgehend von diesen Erfahrungen wurde die Möglichkeit, in Ausnahmefällen auch sägeraue Oberflächen zu prüfen, 2003 in einer ISRM Technical Note vorgestellt (Plinninger et al., 2003). Der damals zur Verfügung stehende „Datensatz“ empirischer Messwerte umfasste 77 Proben (Abbildung 2-2).

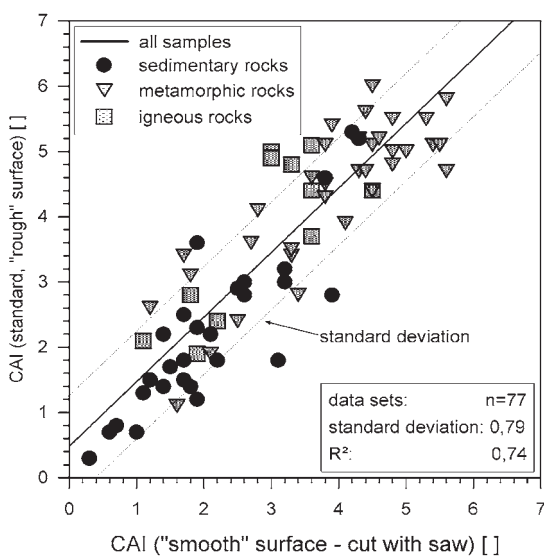


Abbildung 2-2: Datensatz und (lineare) Korrekturgleichung, Stand 2003 (Plinninger et al. 2003).

2.2 Aktueller Stand der Normung

Die aktuell angewendeten Normen und Prüfeempfehlungen erlauben grundsätzlich die Prüfung auf einer durch Sägen hergestellten Oberfläche. Während die AFNOR NF P94-430-1 bei der Ermittlung der Messergebnisse keine Unterscheidung hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit macht, müssen bei Anwendung der DGGT-Empfehlung Nr. 23, der ISRM Suggested Method, wie auch der ASTM D7625 die auf sägeraue Oberfläche ermittelten Messergebnisse korrigiert, d.h. auf das zu vermutende Ergebnis auf bruchraue Oberfläche umgerechnet werden.

Obwohl die Korrekturformeln auf dem gleichen, zuletzt 2010 veröffentlichten, empirischen Datensatz mit 80 Werten beruhen (Käsling & Thuro, 2010), sehen die Prüfeempfehlungen unterschiedliche Korrekturen und Korrekturfaktoren vor, die in Tabelle 1 und Abbildung 2-3 zusammengestellt sind.

Tabelle 1: International gebräuchliche Korrektursätze zur Umrechnung eines auf sägerauen Oberflächen ermittelten Messwerts (CAI_s) auf den für bruchraue Oberflächen definierten CAI .

Norm / Empfehlung	Prüfung auf sägerauer Oberfläche zulässig	Korrektur des Messergebnisses erforderlich	Korrekturformel
AFNOR NFP94-430-1 (2000)	ja	nein	-
ASTM D7625 (2010)	ja	ja	$CAI = 0,99 \times CAI_s + 0,48$
ASTM D7625 (2022)	ja	ja	$CAI_s < 4,0:$ $CAI = 1,14 \times CAI_s$ $CAI_s \geq 4,0:$ $CAI = 0,99 \times CAI_s + 0,48$
DGGT E23 (2016)	ja	ja	$CAI = 1,1 \times CAI_s$
ISRM (2014)	ja	ja	$CAI_s < 4,0:$ $CAI = 1,14 \times CAI_s$ $CAI_s \geq 4,0:$ n.a.

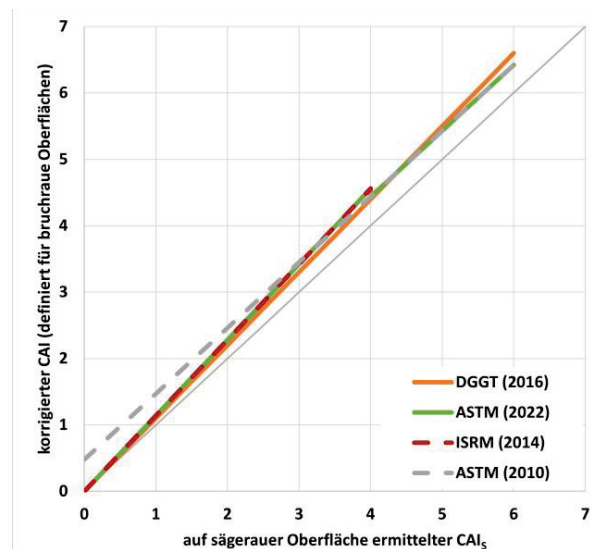


Abbildung 2-3: Grafische Darstellung der in den verschiedenen Prüfeempfehlungen referenzierten Korrekturgleichungen.

2.3 Datenanalyse und Bewertung

Mit der Etablierung als Standardverfahren der Baugrunderkundung ist im letzten Jahrzehnt die Anzahl durchgeführter CERCHAR-Versuche deutlich angestiegen. Für eine Analyse und Neubewertung des Effekts der Oberflächenrauigkeit kann daher erstmals

auf eine Datenbasis von über 1300 Messwerten zurückgegriffen werden, die vorrangig auf den Untersuchungen am Institut für Geomechanik und Untergundtechnik (GUT) der RWTH Aachen University basiert. Hierbei wurden vielfach auch wenig abrasive Sedimentgesteine untersucht, an denen früher nur in seltenen Ausnahmefällen CERCHAR-Versuche durchgeführt worden wären (Jennen, 2023).

Zusätzlich wurden ältere Daten (Plinninger et al., 2005), die Ergebnisse bislang unveröffentlichter Masterarbeiten an der TU Darmstadt (Fehre, 2019; Ören, 2021) sowie Messdaten aus einem aktuellen TBM-Projekt einbezogen.

Im Einzelnen standen für die Bewertung folgende Wertepaare zur Verfügung:

- 198 Proben aus magmatischen Gesteinen,
- 84 Proben aus metamorphen Gesteinen,
- 563 Proben aus Sedimentgesteinen sowie
- 524 Proben, die mangels ausreichender Angaben nicht zugeordnet werden konnten.

Abbildung 2-4 zeigt die Ergebnisse sämtlicher Versuche, jeder Datenpunkt entspricht dabei dem Mittelwert aus jeweils fünf Einzelversuchen an einer bruchrauen und fünf an einer sägerauen Oberfläche.

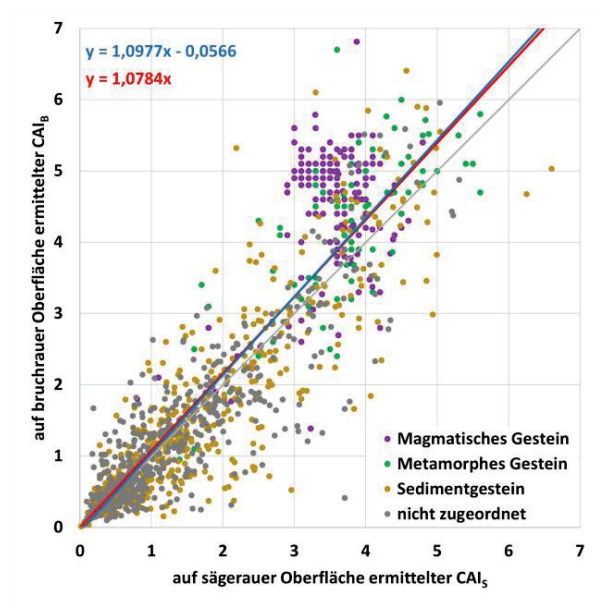


Abbildung 2-4: Auftragung aller Versuchsergebnisse mit linearer Regression, einmal rein aus den Messdaten (blau), einmal durch den Nullpunkt gezwungen (rot).

Es zeigt sich, dass über die Gesamtheit der untersuchten Proben ein Korrekturfaktor von 1,1, wie er in der DGGT-Empfehlung Nr. 23 empfohlen wird, in einer plausiblen Größenordnung liegt. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass es große Abweichungen, sowohl nach oben als auch nach unten, gibt. Bei

Anwendung einer einfachen Umrechnungsformel kann also die aus dem Ergebnis eines auf sägerauer Oberfläche durchgeführten CERCHAR-Versuchs abgeleitete Angabe des - normgerecht an bruchrauer Oberfläche ermittelten - CAI also sowohl signifikant zu hoch als auch signifikant zu niedrig ausfallen.

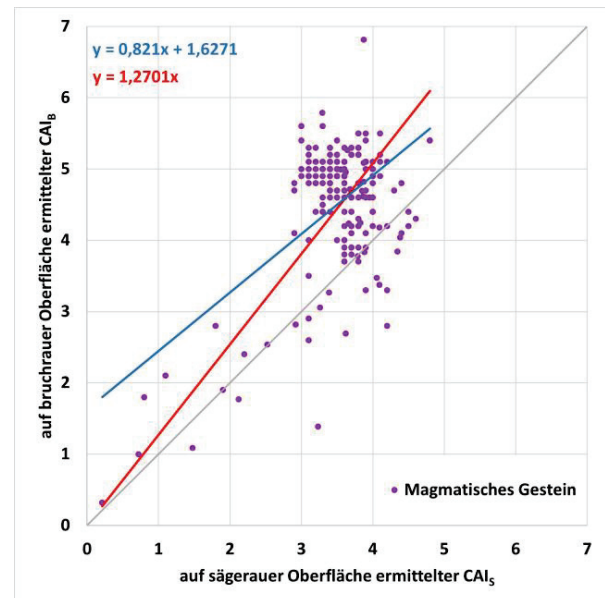


Abbildung 2-5: Versuchsergebnisse für magmatische Gesteine.

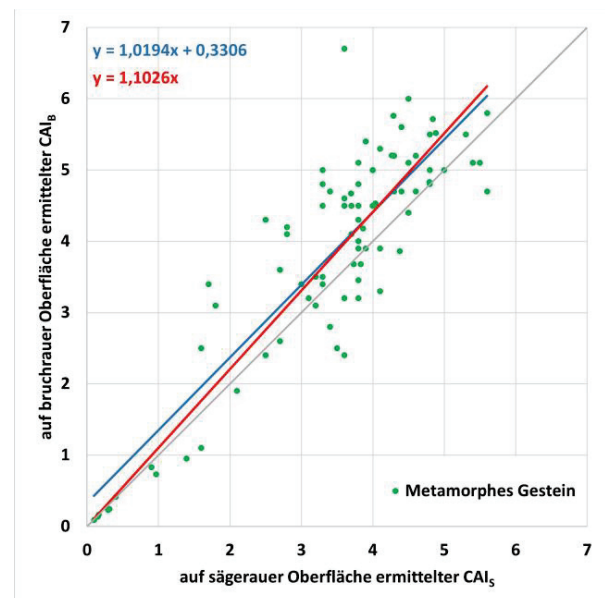


Abbildung 2-6: Versuchsergebnisse für metamorphe Gesteine.

Besonders augenfällig wird dies bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse an magmatischen Gesteinen (Abbildung 2-5). Hier ergibt sich für die durch den Nullpunkt gehende Regressionsgerade sogar ein Faktor von 1,27, d.h. die auf sägerauer Oberfläche bestimmte Abrasivität ist in den meisten Fällen deutlich kleiner als die normgerecht auf bruchrauer



Oberfläche ermittelte. Bei den untersuchten metamorphen Gesteinen ist dieser Effekt nicht so ausgeprägt, hier ergibt sich wiederum ein Faktor von etwa 1,1 (Abbildung 2-6).

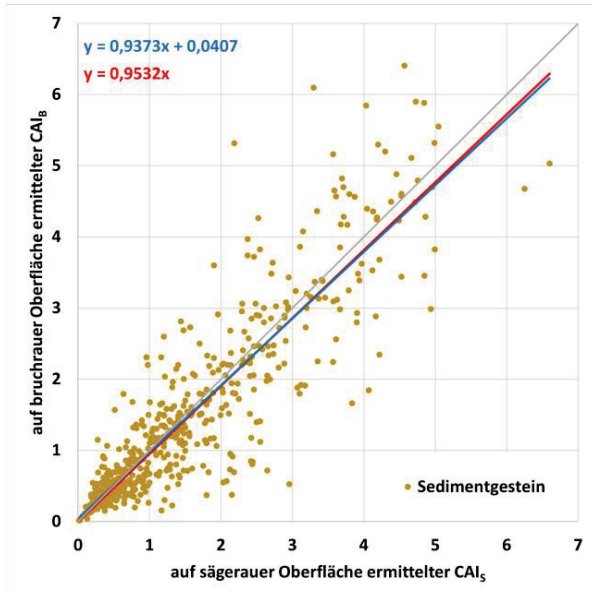


Abbildung 2-7: Versuchsergebnisse für Sedimentgesteine.

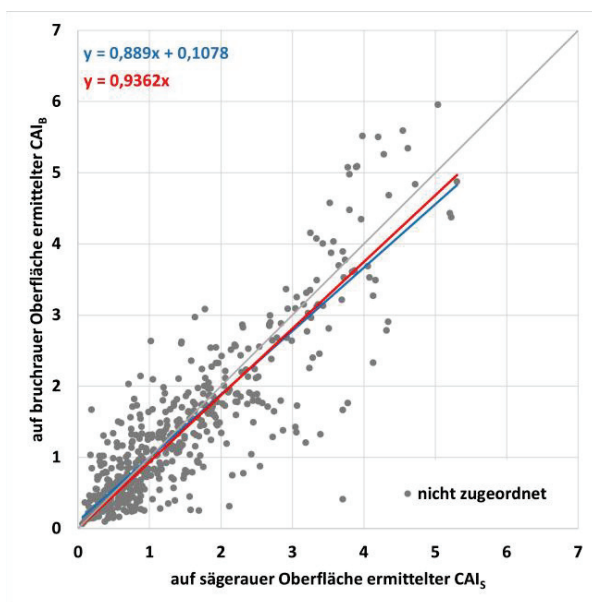


Abbildung 2-8: Versuchsergebnisse der nicht zugeordneten Gesteine.

Bemerkenswert sind auch die Ergebnisse für die untersuchten Sedimentgesteine (Abbildung 2-7) sowie die Proben, die keiner Gesteinskategorie zugeordnet werden konnten (Abbildung 2-8). Bei beiden Datensätzen ergeben sich für die Ausgleichsgeraden Verhältniswerte kleiner als 1,0, hier fallen die an der bruchrauen Oberfläche ermittelten Werte also häufig sogar geringer aus, als die Messwerte auf sägerauer Oberfläche.

Da in diesem Datensatz überwiegend extrem niedrig bis niedrig abrasive Gesteine ($CAI < 2,0$) dominieren, welche meist auch nur eine geringe Gesteinsfestigkeit aufweisen, kann vermutet werden, dass durch das höhere Relief der bruchrauen Oberfläche ggf. das in derartigen Gesteinen häufig zu beobachtende „Einpflegen“ der Prüfstifte in das Gestein forciert wird. Unter derartigen Bedingungen verteilt sich die Prüflast (70 N) auf eine größere Fläche des Prüfstifts und es findet eine zusätzliche Abnutzung an den Prüfstiftflanken statt, die bei der Ermittlung der Abnutzung an der Prüfstiftspitze nicht erfasst wird.

3 Fazit

Der CERCHAR-Versuch hat sich in den vergangenen Jahrzehnten als Standardverfahren zur Abrasivitätsbewertung im Fels durchgesetzt. Für die Durchführung und die Festlegung der entsprechenden Versuchsrandbedingungen liegen international (ISRM, 2013; ASTM, 2022) und national (DGGT, 2016) sinnvoll anwendbare Prüfeempfehlungen vor. Dass mit dem Verfahren von verschiedenen Prüfinstituten unter vergleichbaren Ausführungsbedingungen auch vergleichbare Messergebnisse ermittelt werden, hat ein 2018 durchgeführter Ringversuch (Lange, 2018) nachgewiesen. Über die Ergebnisse wurde auf den DGGT-Fachsektionstagen 2019 berichtet (Lange et al., 2019).

Die in allen aktuellen Versuchsempfehlungen enthaltene Möglichkeit, CERCHAR-Versuche nicht nur auf durch Aufspalten hergestellten bruchrauen Oberflächen durchzuführen, sondern ggf. auf die Prüfung gesägter d.h. sägerauer Oberflächen zurückzugreifen, erlaubt eine definierte Versuchsdurchführung auch für ausgeprägt anisotrope oder inhomogene Proben, bei denen sich durch Spalten keine prüffähige Oberfläche herstellen lässt.

Bei der Anwendung dieser „Sonderfall-Regelung“ ist jedoch zu beachten, dass damit eine zusätzliche Variable in den Versuchsrahmenbedingungen eingeführt wird, für deren Berücksichtigung bzw. Korrektur international keine einheitliche Vorgehensweise vorliegt. Aus sägerauen Oberflächen abgeleitete CAI-Werte bergen daher stets die Gefahr einer signifikanten Unter- oder auch Überschätzung des Abrasivitäts-Messwerts. Die Prüfung sägerauer Oberflächen sollte daher stets nur einen Ausnahmefall bzw. eine „Rückfallebene“ für die Standardprüfung auf bruchrauer Oberfläche darstellen.

Die Analyse und Neubewertung des Einflusses der Oberflächenrauigkeit auf das Messergebnis auf Basis eines bis dato einzigartigen Datenpools aus über 1300 Messwerten zeigt, dass sich der Zusammenhang zwischen den Messergebnissen auf bruch- und



sägerauen Oberflächen bei Weitem nicht so eindeutig darstellt, wie es die teilweise komplexen Korrekturformeln im internationalen Kontext (ASTM) suggerieren. Grundsätzlich bestätigen die analysierten Daten aber den Trend niedrigerer Messwerte auf sägerauen Oberflächen.

Die für alle Gesteine abgeleitete lineare Regression zeigt, dass der in der DGGT-Empfehlung Nr. 23 (DGGT, 2016) vorgeschlagene Korrekturfaktor von 1,1 global betrachtet in einer plausiblen Größenordnung liegt.

Bei genauerer Bewertung der verschiedenen Lithologien zeigen sich allerdings auch deutliche Unterschiede:

- bei magmatischen Gesteinen wird die an bruchrauer Oberfläche ermittelte sehr hohe (CAI > 4,0) bis extrem hohe (CAI > 5,0) Abrasivität in den Versuchen auf sägerauer Oberfläche zum Teil deutlich unterschätzt;
- bei den eher gering abrasiven (CAI < 3,0) Sedimentgesteinen und Proben, die keiner Gesteinsart zugeordnet werden konnten, fallen die Ergebnisse auf sägerauer Oberfläche tendenziell sogar höher aus, als auf bruchrauer.

Literaturverzeichnis

AFNOR - Association Française de Normalisation (2000): *NF P 94-430-1: Roches - Détermination du pouvoir abrasif d'une roche, Partie 1: Essai de rayure avec une pointe*, 9 Seiten, Paris.

ASTM - American Society for Testing and Materials Standard (2010): *ASTM D7625-10: Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method*, 6 Seiten, West Conshohocken.

ASTM - American Society for Testing and Materials Standard (2022): *ASTM D7625-22: Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method*, 6 Seiten, West Conshohocken.

CERCHAR - Centre d'Etudes et Recherches de Charbonnages de France (1986): *The Cerchar Abrasiveness Index*, 12 Seiten, Verneuil.

DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.: (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 (2016), Heft 6, S. 409-415, Ernst und Sohn.

Fehre, D. (2019): *Bestimmung der Abrasivität ausgewählter Festgesteine des Odenwalds mit dem CERCHAR-Versuch*, XIII + 93 Seiten, Masterarbeit

am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt (unveröffentlicht).

ISRM - International Society for Rock Mechanics (2014): *ISRM Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by the CERCHAR Abrasivity Test*, Rock Mechanics and Rock Engineering 47 (2014), S. 261-266.

Jennen, N. (2023): *Die Auswirkungen bruchrauer oder sägerauer Oberflächen auf die Ergebnisse von CAI-Versuchen*, XII + 77 Seiten, Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen University (unveröffentlicht).

Käsling, H. (2000): *Der Cerchar-Abrasivitätstest: Aussagekraft und Verbesserungsmöglichkeiten eines Indextests zur Bestimmung der Gesteinsabrasivität*, 47 Seiten + 9 Anlagen, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieurgeologie, TU München (unveröffentlicht).

Käsling, H.; Thuro, K. (2010): *Determining rock abrasivity in the laboratory*, in: Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium EUROCK 2010, Lausanne, Schweiz, 15.-18. Juni 2010, S. 425-428.

Lange, T. (2018): *Durchführung und Auswertung eines CERCHAR-Ringversuchs zur Validierung der Empfehlung Nr. 23 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) e.V.*, LI + 79 Seiten, Masterarbeit am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt (unveröffentlicht).

Lange, T., Plinninger, R.J. & Henk, A. (2019): *Ergebnisse eines Ringversuchs zur DGGT-Empfehlung Nr. 23 CERCHAR-Versuch*, in: DGGT e.V. (Hrsg.): Tagungsband zu den Fachsektionstagen Geotechnik, Würzburg, 29./30. Oktober 2019, S. 286-291, Essen.

Ören, E. (2021): *Evaluation des Einflusses von intrinsischen Parametern und Prüfflächenbeschaffenheit auf den CERCHAR-Abrasivitäts-Index (CAI) von Sandsteinen*, XIV + 88 Seiten, Masterarbeit am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt (unveröffentlicht)

Plinninger, R.J., Käsling, H., Thuro, K. & Spaun, G. (2003): *Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40 (2003), Heft 2, S. 259-263, Elsevier.

Plinninger, R.J., Käsling, H. & Thuro, K. (2005): *Praktische Aspekte der Abrasivitätsuntersuchung und Verschleißprognose mit dem Cerchar-Abrasivitätstest (CAI)*, in: Moser, M.: Veröffentlichungen von der 15. Tagung Ingenieurgeologie, Erlangen, 06.-09. April 2005, S. 371-375.