

Abrasivitätsprüfung – quo vadis?

Hintergründe, Stand der Normung und Fallbeispiele
zur Bewertung der Abrasivität
von Fest- und Lockergesteinen

Dr. rer.nat. Ralf Plinninger
Diplom-Geologe (Univ.)



ö.b.u.v. Sachverständiger für
Leistung und Verschleiß
bei Lösearbeiten im Fels

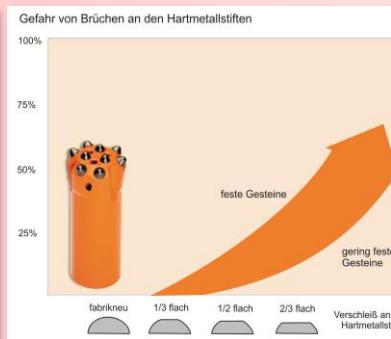
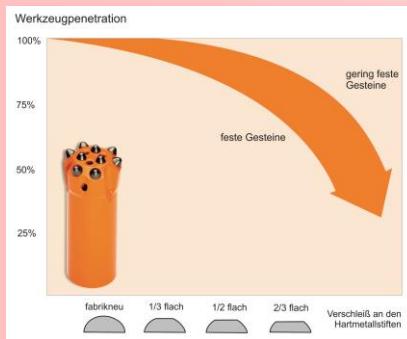
► Abbau und Aufbereitung in Rohstoffgewinnung und Bauwesen



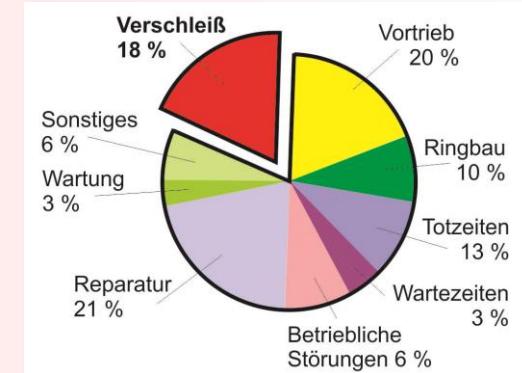
- Der Kontakt mit Gebirge und Gestein steuert den Verschleiß der eingesetzten Maschinen und Werkzeugen über die gesamte Prozesskette hinweg.

► Relevanz

- Geologisch bedingter Verschleiß steuert direkt die **Stoffkosten** für den Ersatz verschlissener Werkzeuge und damit zusammenhängende **Lohnkosten** für Wartung und Reparatur.
- Verschleiß wirkt sich **direkt** negativ auf die Effektivität eingesetzter Werkzeuge aus.
- Verschleiß kann einen **indirekt** negativen Einfluss auf den Arbeitsablauf ausüben.

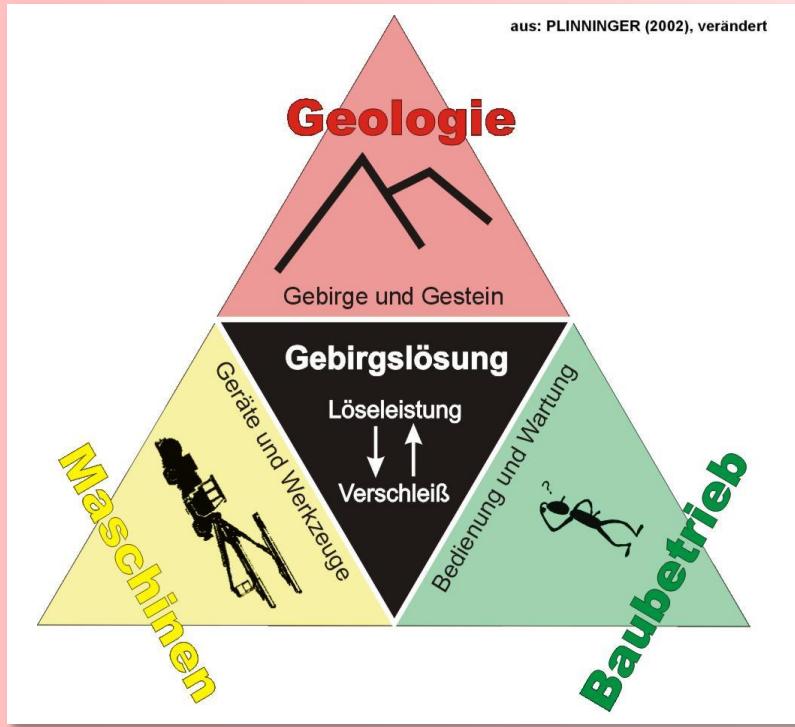


Beispiele für das Absinken der Werkzeugpenetration und das Ansteigen von HM-Stiftbrüchen mit fortschreitendem Verschleiß (nach Diagrammen der Fa. ATLAS-COPCO, modifiziert)



Beispiel für die Personalstunden-Verteilung bei einem maschinellen Tunnelvortrieb (Stadtbahn Essen, Bauabs 32, nach: WILMS, 1995)

► Einflußfaktoren - Übersicht

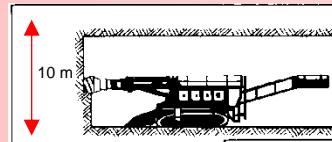


- Auf den Verschleiß an eingesetzten Werkzeugen wirkt eine **Vielzahl** von
 - geologischen
 - maschinentechnischen
 - und betrieblichenEinflussfaktoren ein.
- Als „Abrasivität“ wird dabei die spezifische **Fähigkeit eines Gesteins oder Gebirges** verstanden, **Verschleiß** an einem zur Bearbeitung eingesetzten Werkzeug **zu verursachen**.

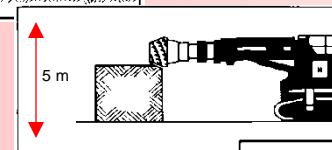
► Verschleiß birgt vertragliches Konfliktpotenzial!

- ▶ Überall dort, wo das Lösen oder Aufbereiten von Gestein und Gebirge **nicht durch den Eigentümer selbst**, sondern im Rahmen eines Vertragsverhältnisses durch einen Auftragnehmer durchgeführt wird, birgt die Thematik „Verschleiß“ und „Abrasivität“ Konfliktpotential.
- ▶ Das Lösen von Gestein und Gebirge stellt in diesen Fällen eine **komplexe Interaktion** der vom **Auftragnehmer** konzipierten bzw. bereitgestellten **Maschinentechnik** mit dem vom **Auftraggeber** gestellten **Rohstoff / Baugrund** dar.
- ▶ Das **bodenbezogene Risiko** und das Risiko für dessen zutreffende Erkundung und Beschreibung zum Zwecke der Angebotskalkulation durch den Bieter liegt nach gängiger europäischer Rechtsauffassung üblicherweise **beim AG**.
- ▶ Die **Wahl der geeigneten technischen Verfahren** und das Risiko der Ausführung innerhalb der dem Werkvertrag zu Grunde liegenden geologischen Parameter liegt nach gängiger Auffassung üblicherweise **beim AN**.

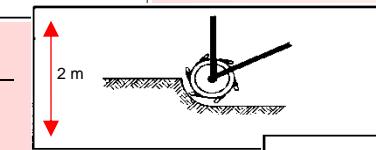
► Maßstabsebenen der Verschleißuntersuchung



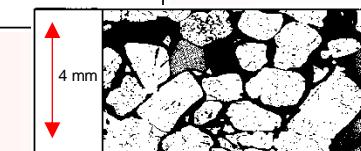
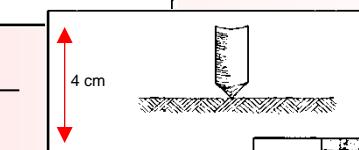
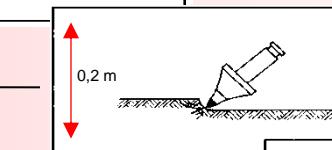
Vor-Ort-Versuche (1:1)



Großversuche



Modellversuche



Abrasivitätsprüfung – quo vadis?



**Verfahren zur
Untersuchung
der Abrasivität
von
Fels / Festgestein**

► Übersicht über „Standardverfahren“ im Fels

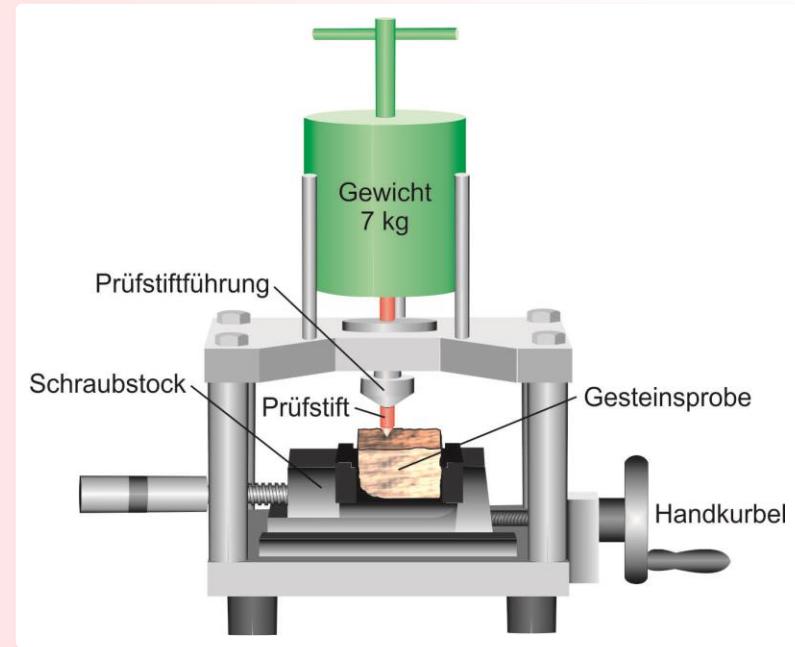
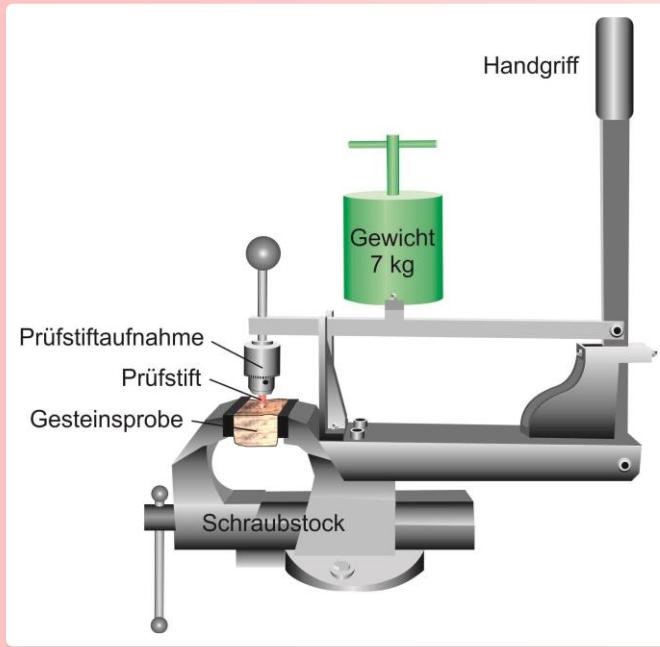
„Indextests“

- **CERCHAR – Abrasivitätsversuch (CAI)**
basierend auf einem vereinfachten Modellversuch mit Stahlstift
 - ISRM Suggested Method (2013), ASTM-Norm D7625 (2010)
DGTT-Empfehlung Nr. 23 in Bearbeitung

„Geologisch-
mineralogische
Ansätze“

- **Einfache mineralogische Parameter**
z.B. Quarzgehalt, Äquivalenter Quarzgehalt, VHNR...
- **Komplexere Verschleißindices**
z.B. Schimazek-Verschleißindex, Rock Abrasivity Index (RAI)

Auslegung CERCHAR-Versuch

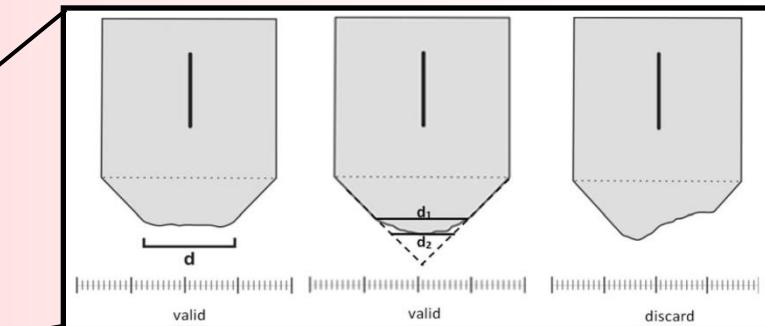
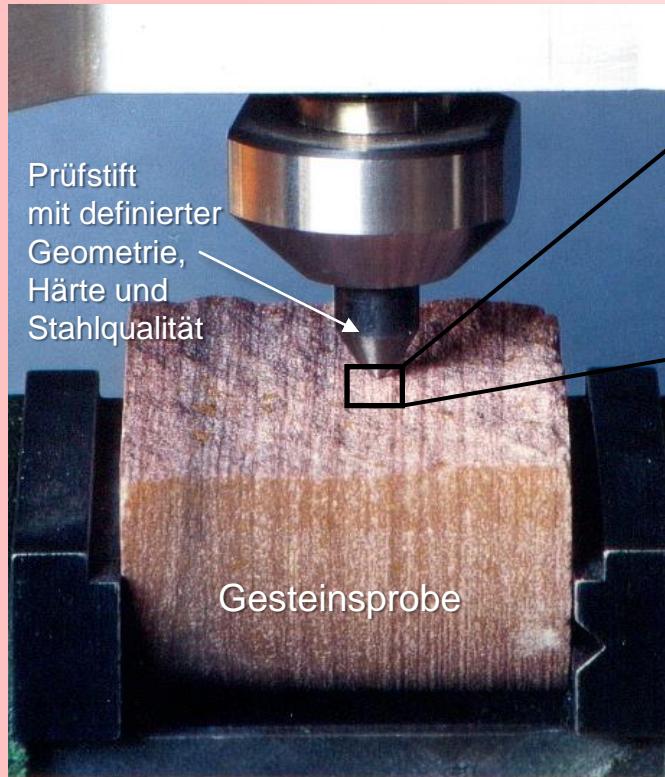


Prüfgeräte zur Durchführung des CERCHAR-Versuchs:

Links das Originalgerät (CERCHAR, 1986), rechts das modifizierte Prüfgerät nach WEST (1989)

(aus: PLINNINGER & RESTNER, 2008, modifiziert)

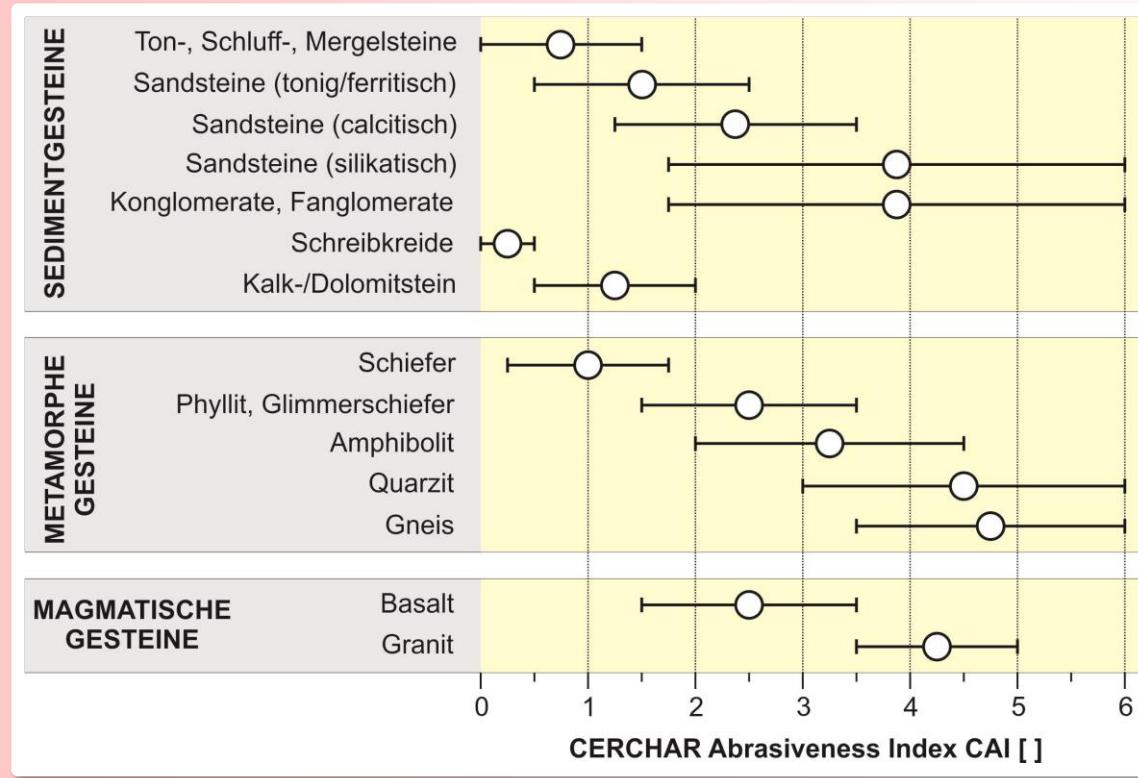
Durchführung und Auswertung des CERCHAR-Versuchs



(nach: ISRM Suggested Method, 2014)

CAI	ISM-Klassifizierung
0.1 – 0.4	extrem geringe Abrasivität
0.5 – 0.9	sehr geringe Abrasivität
1.0 – 1.9	geringe Abrasivität
2.0 – 2.9	mittlere Abrasivität
3.0 – 3.9	hohe Abrasivität
4.0 – 4.9	sehr hohe Abrasivität
≥ 5.0	extrem hohe Abrasivität

► Erfahrungswerte CAI



nach: PLINNINGER & RESTNER, 2008

► Geologisch-geotechnische Ansätze im Festgestein

- Ziel geologisch-geotechnischer Ansätze ist die Ermittlung von **intrinsischen (gesteinsphysikalischen) Kennwerten** anstatt versuchsspezifischer Indexparameter.
- Grundlage sind **bewährte und normierte Standardverfahren**, die eine gute Reproduzierbarkeit gewährleisten.
- Damit erlauben diese Ansätze einerseits eine **bessere Plausibilisierung** der Kennwerte, andererseits auch den fallweisen Einsatz von **alternativen Versuchsverfahren** (Beispiel: Punktlastversuch zur indirekten Bestimmung der Einaxialen Gesteinsdruckfestigkeit).



σ_U
 σ_T
 d_{50}
 V_{Quarz}
..

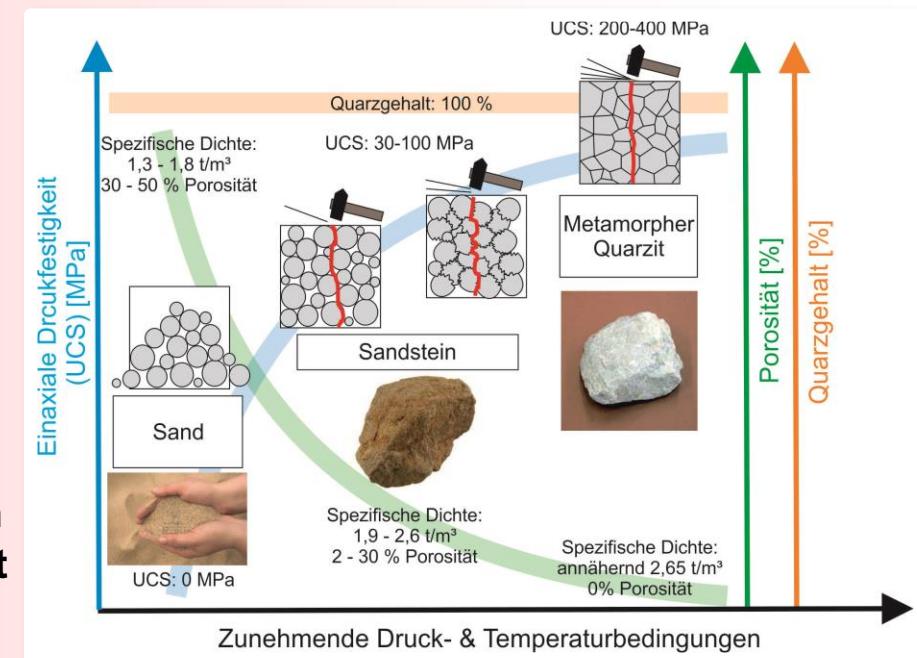
Petrographische Dünnschliffanalyse



Mineral	Mineral Content [Vol-%]	Rosiwal hardness []	Equivalent Quartz Content [Vol-%]
Quartz	47	100	47.0
Feldspar	23	32	7.4
Muscovite	13	3	0.4
Biotite	9	4	0.4
Opaque	8	55	4.4
SUM	100 %	-	59.6 %

► Einfache mineralogische Indices – und ihre Schwächen

- ▶ Der **Quarzgehalt** eines Gesteins stellt einen der ältesten „geotechnischen Abrasivitätsindices“ dar. Er berücksichtigt den Gehalt des verschleißend wirkenden Quarz.
- ▶ Weitere, einfache Indices, wie der **Äquivalente Quarzgehalt** oder die **Vickers Hardness Number of the Rock (VHNR)** sind in der Lage, alle Minerale eines Gesteins entsprechend zu berücksichtigen.
- ▶ Keiner dieser Indices ist in der Lage, den Einfluss der **Kornbindung** hinreichend zu berücksichtigen, d.h. ein **Strandsand**, ein **Sandstein** oder ein **Quarzit** derselben mineralogischen Zusammensetzung würden mit **dem selben Äquivalenten Quarzgehalt** oder **VHNR** beschrieben!



▶ Rock Abrasivity Index, RAI

$$\text{RAI} = \text{UCS [MPa]} \times \text{Äquivalenter Quarzgehalt [%]}$$

- ▶ Ziel des Indexwerts RAI (PLINNINGER, 2002) ist eine fachlich sinnvolle und baupraktisch einfach umsetzbare **Erweiterung** des Äquivalenten Quarzgehalts.
- ▶ Die Einbeziehung der weitverbreiteten Einaxialen Druckfestigkeit ermöglicht die Berücksichtigung des **Einflusses der Kornbindung** auf Abrasivverschleiß und Verschleiß durch Sprödbruchversagen von Werkzeugen.
- ▶ Die Kombination verschiedener felsmechanischer Kennwerte selbst stellt **kein Novum** dar, ähnliche Ansätze liegen z.B. mit dem sog. „Schimazek-Verschleißindex“ vor.
- ▶ Zugunsten einer einfachen und kostengünstigen Bestimmbarkeit, wurde auf die Einbeziehung weiterer, ebenfalls verschleißrelevanter Kenngrößen (z.B. Korngrößen, Kornformen, etc.) bewusst verzichtet.

Versuchsprogramm für den RAI



- ▶ **Einaxialer Zylinderdruckversuch** gem. DGTT-Empfehlung 1 (2004)
z.B. Versuchsoption 1

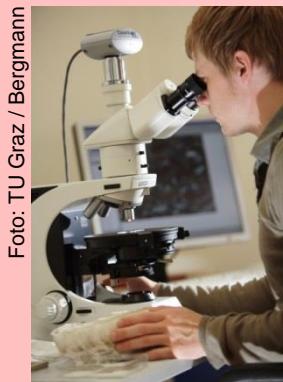
hilfsweise: Mittelbare Versuche zur Festigkeitsbestimmung,
z.B. Punktlastversuch gem. DGTT-Empfehlung 5 (2010)

Kommentar: Als felsmechanischer Standardversuch auch im
internationalen Rahmen gut verfügbar und reglementiert

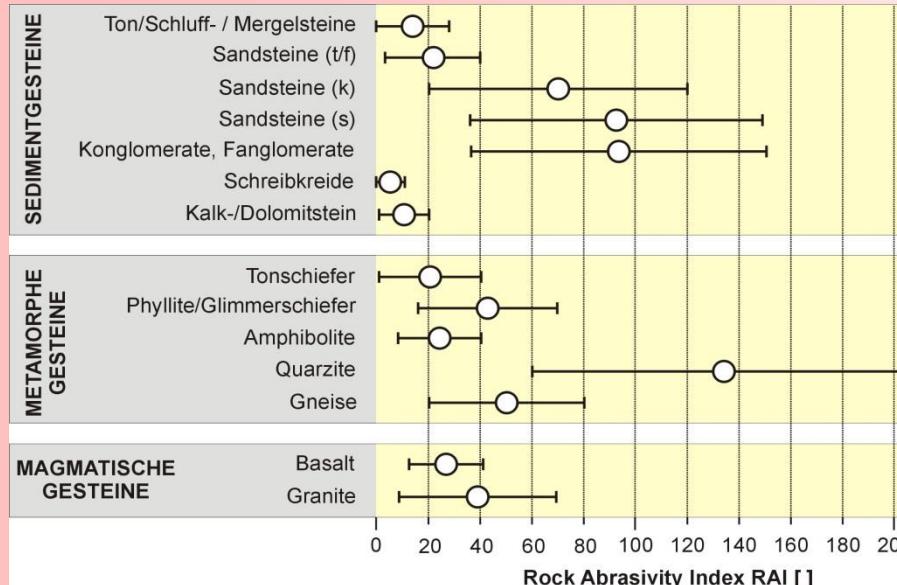
- ▶ **Petrographische Dünnschliff-Modalanalyse**
(u.a. ISRM Suggested Method, 1978)

hilfsweise: Röntgendiffraktometer-Analyse

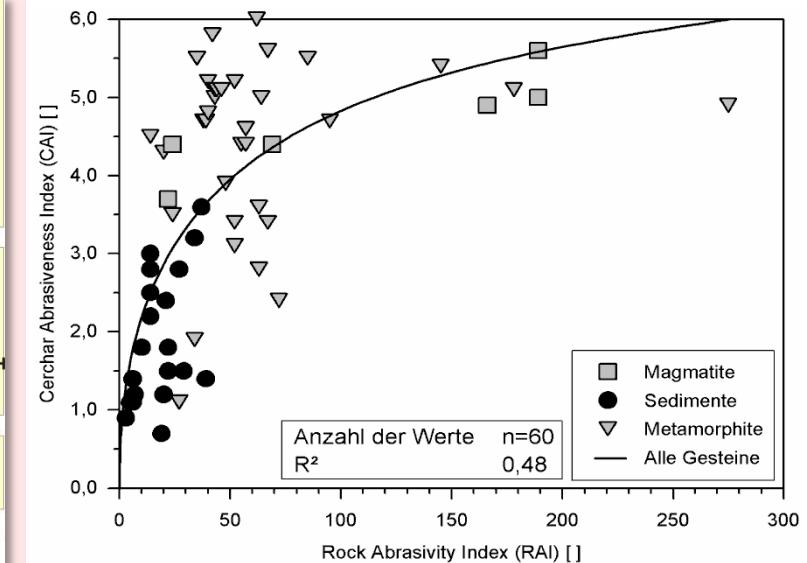
Kommentar: Als mineralogisches Standardverfahren gut verfügbar,
liefert umfassende Informationen über das Gestein und dessen Gefüge.



Erfahrungswerte und Korrelationen



Typische RAI-Bandbreiten für verschiedene Gesteine
(nach: Plinninger & Restner, 2008, modifiziert)



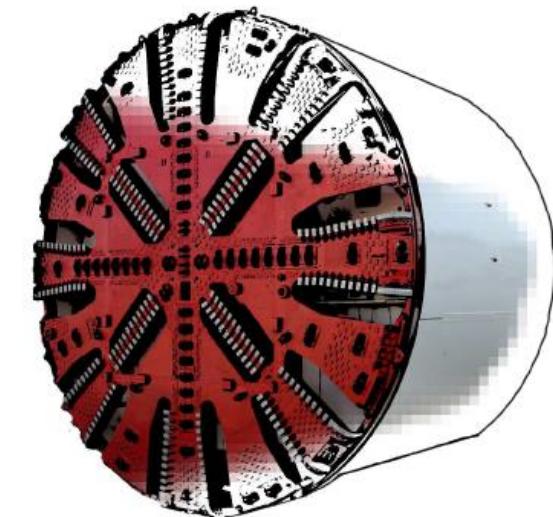
Empirische Korrelation des RAI mit dem CAI
(nach: Plinninger & Restner, 2008, modifiziert)

► DAUB-Empfehlung zur Auswahl von TVM (10/2010)

Anlage 2.2 Prozessbezogene geotechnische Kenngrößen für Festgestein

Prozessbezogene geotechnische Kenngrößen für Festgestein	Kurzbezeichnung	Einheit	TBM	DSM	SM-V1	SM-V2	SM-V3	SM-V4	SM-V5	SM-T1	SM-T2	SM-T3	SM-T4
Verschleiß Wear													
Abrasivität (Cerchar Abrasivity Index) Abrasiveness	CAI	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Quarzanteil Equivalent quartz content	äQu	%	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Abrasivität RAI Rock Abrasivity Index (RAI=Equ · UCS)	RAI	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Druckfestigkeit Uniaxial rock compressive strength (UCS)	σ	MN/m ²	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Spaltzugfestigkeit Tensile strength (SPZ)	σ_z	MN/m ²	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Scherfestigkeit Shear strength			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
tonmineralische Zusammensetzung Clay mineral composition			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Verwitterungsgrad Weathering	W	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Verfestigung Cementation			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen



Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V.
German Tunnelling Committee (ITA-AITES)

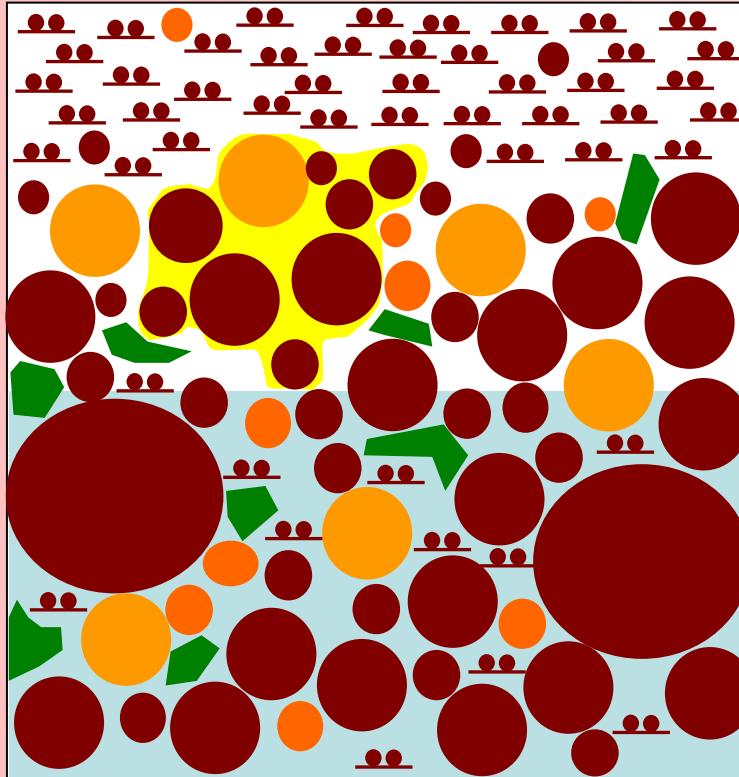
► Aktuelles Projektbeispiel: Vergütung nach CAI

GESCHLOSSENES LV				22-11-2009
HG OGLG	PosNr	Z PZZV A BEISCHREIBUNG DER LEISTUNG	RWG	
MENGE	EH	PREISANTEILE	POS.	PREIS
03 01 800106A	Z MB	Kontin. Vortrieb Nordröhre VKL1 / TF -4 Kontinuierlicher Vortrieb und Tübbingebau, Nordröhre, Vortriebsabschnitt VA1, Tübbingsystem 1 (frei wählbar), CAI-Wert <4,00	Lo:
			So:
		1.980,00 m EP:
03 01 800106B	Z MB	Kontin. Vortrieb Nordröhre VKL1 / TF >4 Kontinuierlicher Vortrieb und Tübbingebau, Nordröhre, Vortriebsabschnitt VA1, Tübbingsystem 1 (frei wählbar), CAI-Wert größer/gleich 4,00 bis 6,00	Lo:
			So:
		725,00 m EP:



**Verfahren zur
Untersuchung
der Abrasivität
von
Boden / Lockergestein**

► Das Mehrstoffsystem Boden



Lockergesteine besitzen als Mehrstoffsysteme eine hohe Variabilität hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Eigenschaften:

- ▶ Korngrößen der Einzelkörner
- ▶ Feinkornanteil / Matrix
- ▶ Mineralzusammensetzung der Einzelkörner
- ▶ Kornformen
- ▶ evtl. vorhandene Bindemittel / Zemente
- ▶ Lagerungsdichte
- ▶ Wassergehalt / Grundwasser

► Übersicht über „Standardverfahren“ im Lockergestein

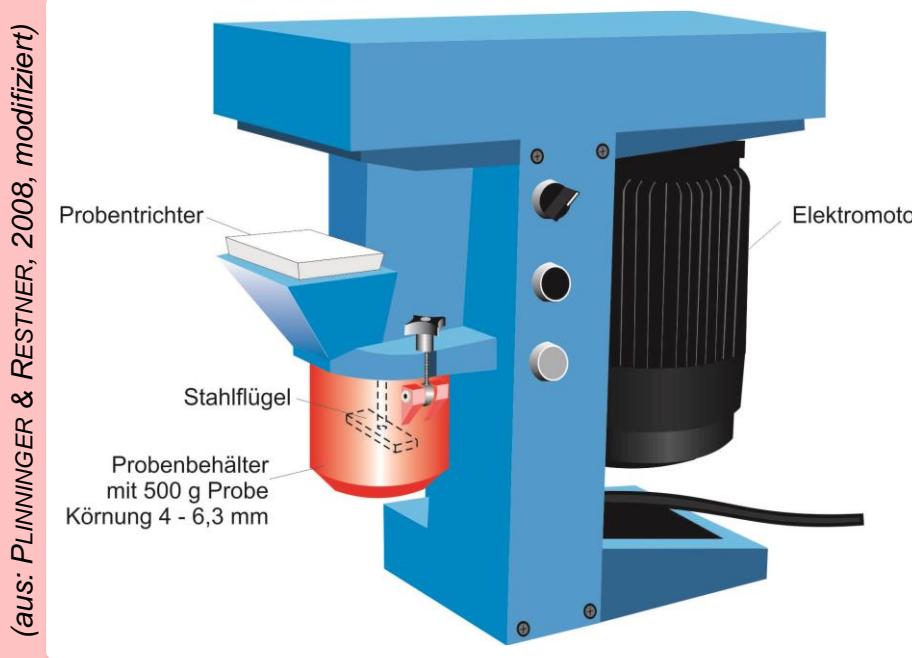
„Indextests“

- **LCPC-Abrasimetre (ABR)** - „Drehflügelversuch“, LCPC Frankreich
- **Wiener „Abrasimeter“** - „Drehflügelversuch“, TU Wien
- **Soil-Abrasion Test (SAT)** - „Drehtellerversuch“, NTNU Trondheim
- weitere **Verschleißtopf-Verfahren** nach UETZ, WILMS, u.v.m.

„Geologisch-
mineralogische
Ansätze“

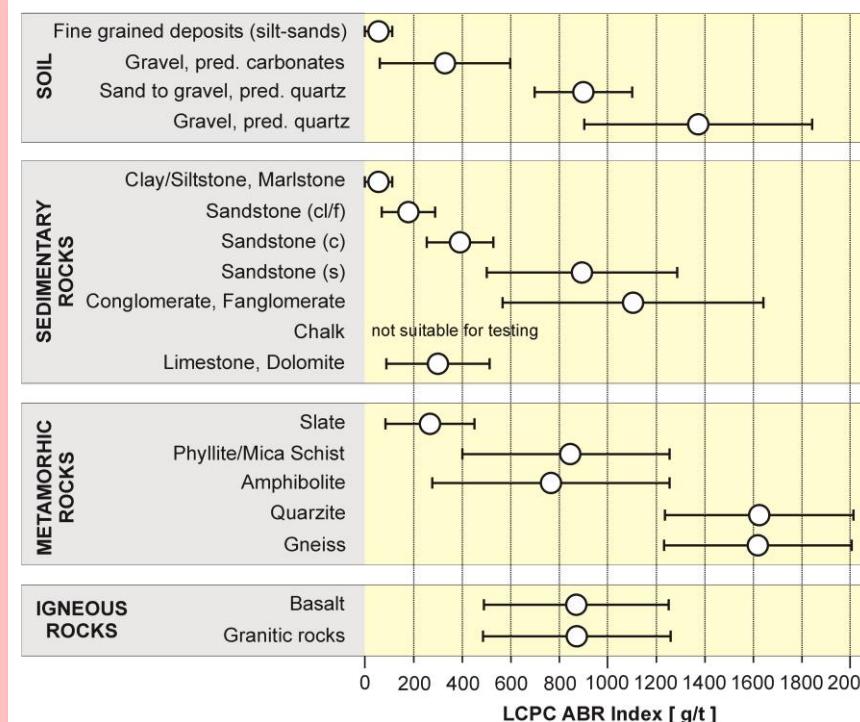
- Verwendung **intrinsischer bodenmechanischer Kennwerte** zur Abrasivitätsbewertung:
- u.a. Soil Abrasivity Index (SAI) nach KÖPPL

Auslegung LCPC-Versuch

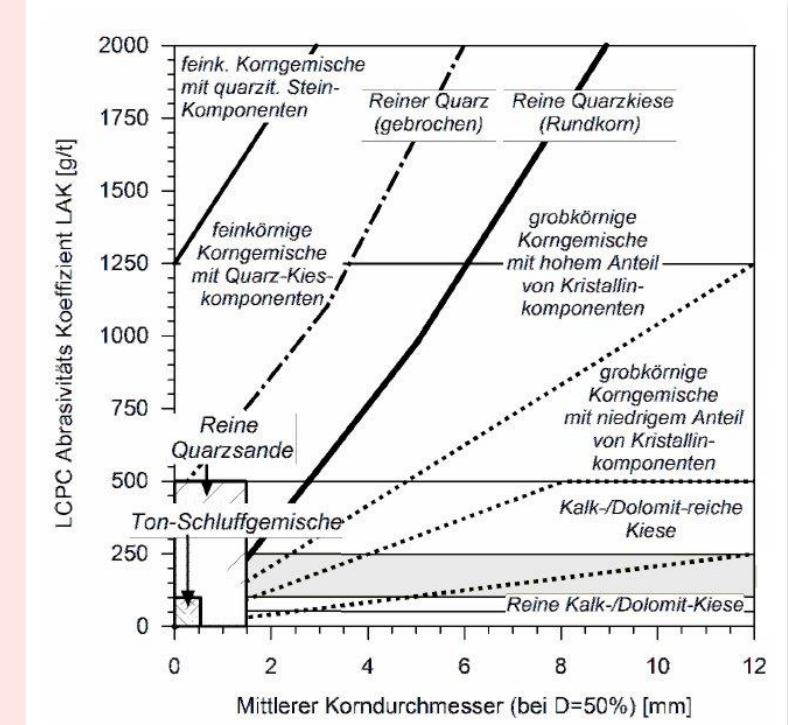


Prüfgerät zur Durchführung des LCPC-Versuchs, links in der Übersicht, rechts Blick in den Verschleißtopf mit Prüfflügel

► LCPC-Versuch: Versuchsergebnisse



aus: Plinninger & Restner, 2008

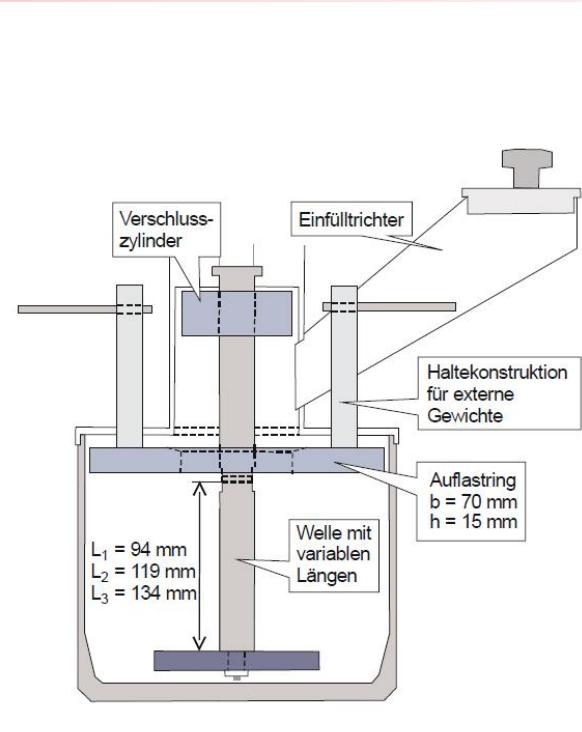
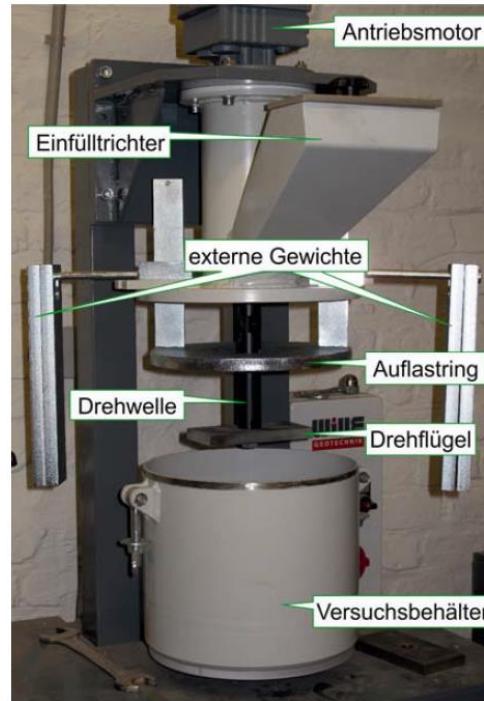


aus: Beckhaus & Thuro, 2008

► LCPC-Versuch: Aussagekraft im Lockergestein?

Parameter	Berücksichtigung	Kommentar
Anteil an Grobkomponenten (Steine, Blöcke)	nicht / bedingt berücksichtigt	Im Zuge der Probenformatierung wird Feinanteil < 4 mm verworfen. Komponenten > 6,3 mm werden auf 6,3 mm gebrochen.
Reibungsparameter (Kohäsion, Reibungswinkel)	berücksichtigt	jedoch ggf. durch die Probenahme und Probenvorbereitung verändert
Festigkeit der Einzelkörner (insbes. der Grobkomponenten)	berücksichtigt	-
Kornform / Kornrundung der Einzelkörner	nicht bzw. nur sehr bedingt berücksichtigt	Infolge Probenaufbereitung sind nur Komponenten > 4 mm < 6,3 mm mit ihren originären Kornrundungsgraden vorhanden. Gröbere Korngrößen liegen stets gebrochen / eckig vor.
Anteil schleißscharfer Minerale (insbes. bei Grobkomponenten)	berücksichtigt	-
Vorhandensein von Bindemitteln (z. B. Karbonate, Eisenhydroxide) bis hin zur Bildung von Konglomeraten	nicht bzw. nur sehr bedingt berücksichtigt	durch die Probenahme und Probenvorbereitung zerstört bzw. stark verändert
Lagerungsdichte	nicht berücksichtigt	durch die Probenahme und Probenvorbereitung zerstört bzw. stark verändert
Klebrigkeit (Adhäsion)	nicht / bedingt berücksichtigt	durch die Probenahme und Probenvorbereitung ggf. verändert
Wassergehalt	bedingt berücksichtigt	durch die Probenahme und Probenvorbereitung ggf. stark verändert

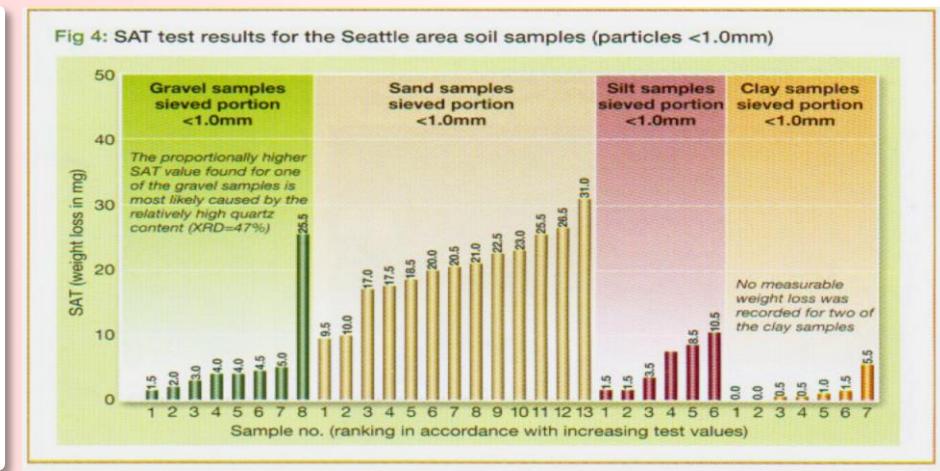
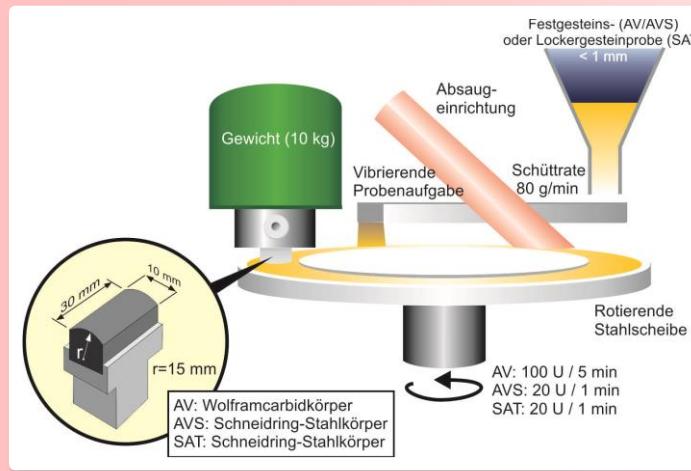
Auslegung „Wiener Abrasimeter“



- ▶ Prototypische Weiterentwicklung des LCPC-Verfahrens
- ▶ Probenmenge 5-10 kg
- ▶ Prüfung des Bodens in seiner originalen Zusammensetzung
- ▶ Auflastrang simuliert „mittlere Lagerungsdichte“
- ▶ Gegenstand eines österreichischen Merkblatts zur Abrasivitätsuntersuchung

Gesamtansicht (links) und Systemschnitt des TU Wien Abrasimeters (aus: DRUCKER, 2013)

► Soil Abrasion Test (SAT)



- Teil eines Modellversuchssystems der NTNU Trondheim (N) zur Bewertung maschineller und konventioneller Gebirgslösungsverfahren (DRI, CLI, BWI)
- Probenmaterial: aufbereiteter Boden Körnung < 1 mm

► Geologisch-geotechnische Ansätze

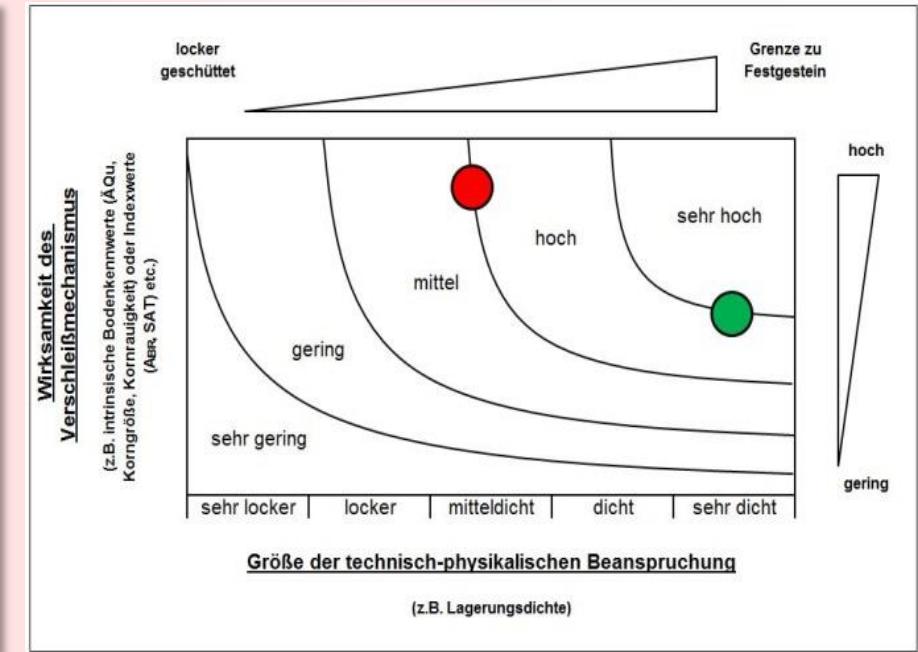
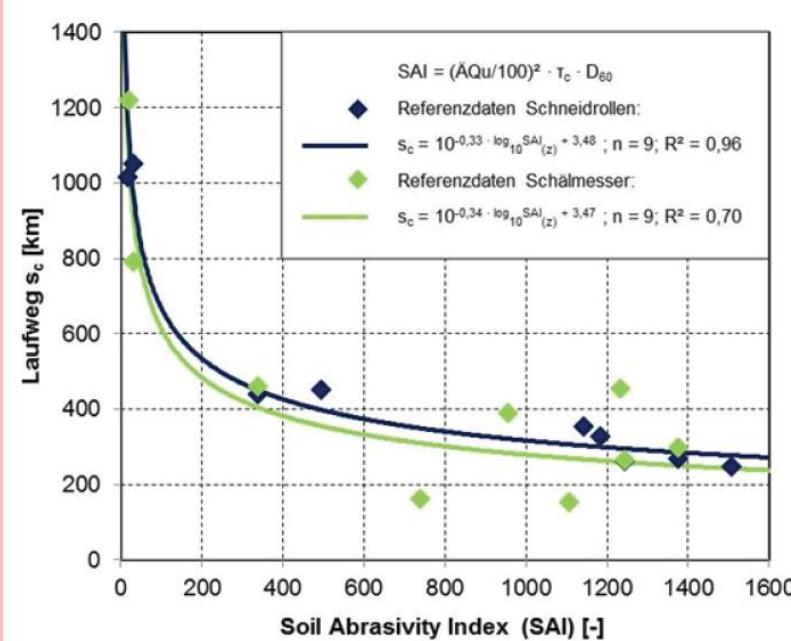
Nach derzeitigem Stand der Technik ist ein Boden umso abrasiver:

- ▶ je höher sein Gehalt an Grobkomponenten ist (Steine und Blöcke),
- ▶ je höher die Festigkeit und Härte seiner Komponenten ist,
- ▶ je eckiger der Rundungsgrad der Komponenten ist,
- ▶ je höher der Abbauwiderstand (d.h. der innere Zusammenhalt des Lockergesteins ist (z.B. durch Zementation, bindige Matrix, hohe Lagerungsdichte))

Es handelt sich hierbei um **herkömmliche Parameter**, die mit entsprechenden Feld- und Laborversuchen ermittelt und mit Maßzahlen belegt werden können.



► Geologisch-geotechnische Ansätze



Korrelation des Verschleißes von Schneidrollen und Schälmessern an Schildmaschinen mit dem Soil Abrasivity Index (SAI), aus: KÖPPL, 2012

Konzeptuelles Diagramm für die verbesserte Bewertung für das Potential von Lockergesteinen für Abbauverschleiß, aus:
DÜLLMANN, ALBER & PLINNINGER, 2013

► Abrasivitätsuntersuchung – quo vadis?

- ▶ Die Trennung von **geologischer Ursache** („Abrasivität“) und **technischer Folge** („Verschleiß“) ist vor dem Hintergrund der gängigen Zuordnung von Risikosphären in einem Vertragsverhältnis zwischen Eigentümer = Auftraggeber und Fachfirma = Auftragnehmer grundsätzlich sinnvoll.
- ▶ Im **Festgestein** haben sich mit dem CERCHAR-Versuch sowohl ein Indexversuch, als auch geologisch-geotechnischen Ansätze (z.B. RAI) bewährt und etabliert. Beide Ansätze sind bzw. werden kurzfristig so standardisiert sein, dass eine breite Anwendbarkeit und Übertragbarkeit gewährleistet sind.
- ▶ Im **Lockergestein** ist der Zenit prototypischer „Verschleißtöpfe“ zum Zwecke einer allgemeingültigen Abrasivitätsbewertung vermutlich erreicht. Publikationen und Ansätze der letzten Jahre legen nahe, dass auch hier der Fokus weiterer Entwicklungen vermutlich eher auf der Adaptierung intrinsischer, bodenmechanischer Kennwerte liegen wird.



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit!**



Dr. Plinniger Geotechnik
Geotechnische Dienstleistung und Forschung