

Abrasivitätsprüfung – quo vadis?

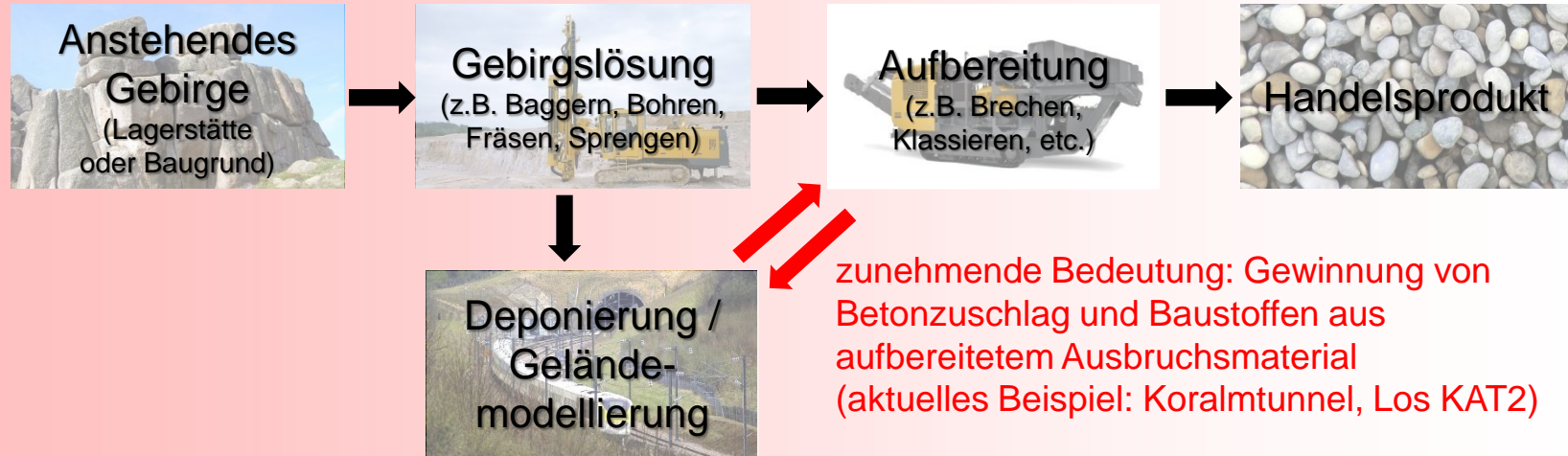
Hintergründe, Stand der Normung und Fallbeispiele
zur Bewertung der Abrasivität
von Fest- und Lockergesteinen

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



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

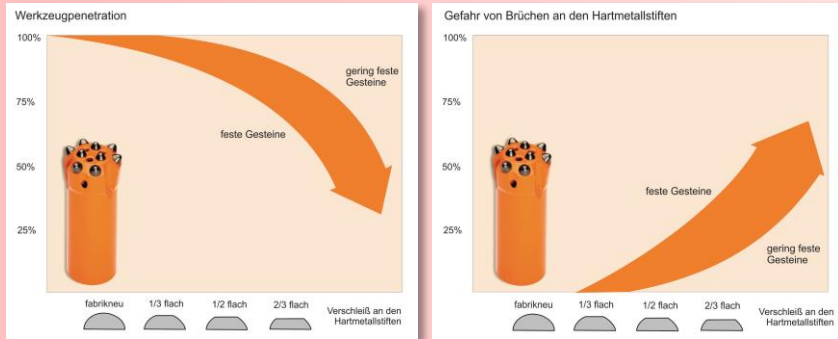
► Abbau und Aufbereitung in Rohstoffgewinnung und Bauwesen



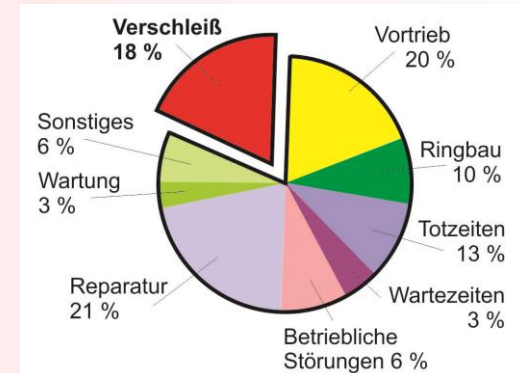
- Der Kontakt mit Gebirge und Gestein steuert den Verschleiß der eingesetzten Maschinen und Werkzeugen über die gesamte Prozesskette hinweg.

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.

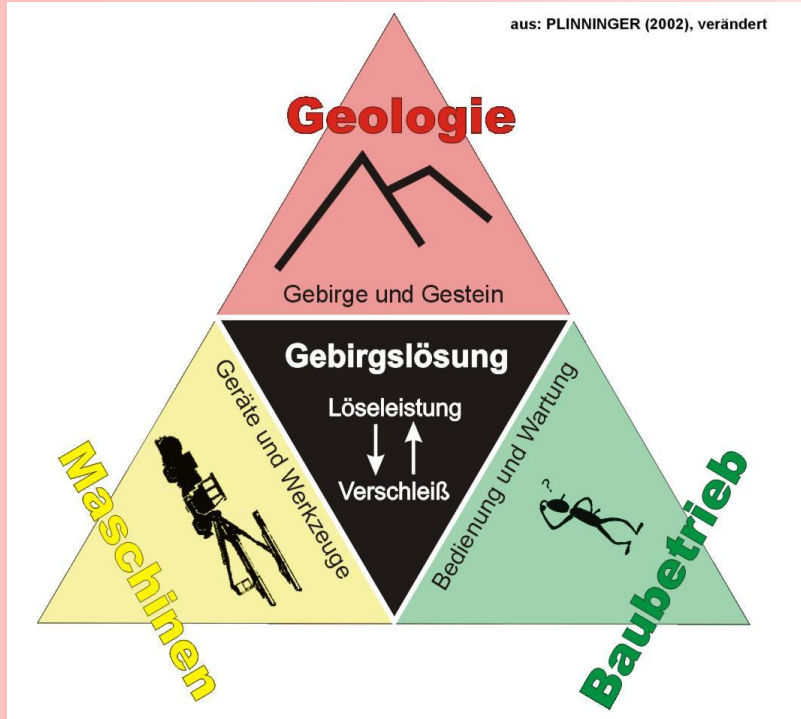


Beispiele für das Absinken der Werkzeugpenetration und das Ansteigen von HM-Stiftbrüchen mit fortschreitendem Verschleiß (nach Diagrammen der Fa. ATLAS-COPCO, modifiziert)



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

► Einflußfaktoren - Übersicht

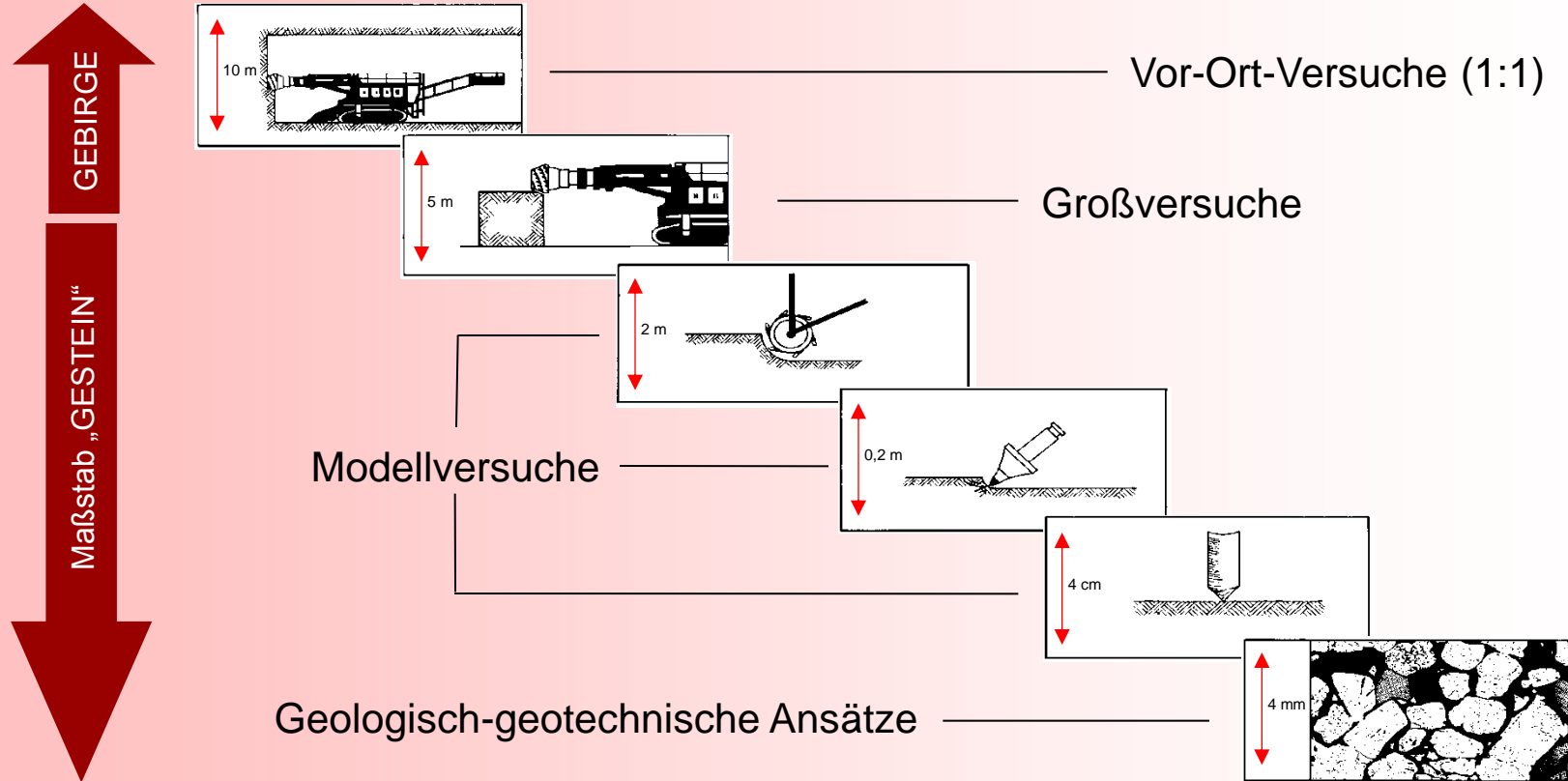


- Auf den Verschleiß an eingesetzten Werkzeugen wirkt eine **Vielzahl** von
 - geologischen
 - maschinentechnischen
 - und betrieblichen
 Einflussfaktoren ein.
- Als „Abrasivität“ wird dabei die spezifische **Fähigkeit eines Gesteins oder Gebirges** verstanden, **Verschleiß** an einem zur Bearbeitung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





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

► Übersicht über „Standardverfahren“ im Fels

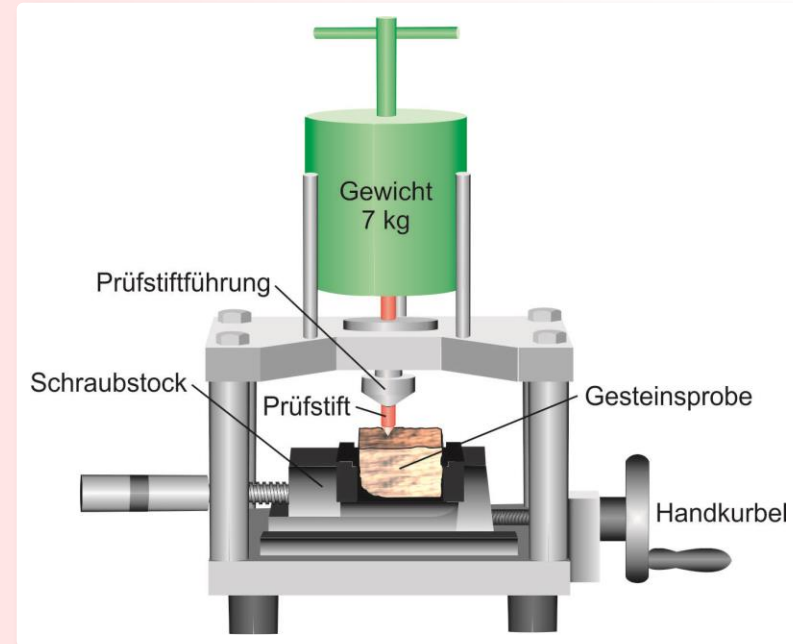
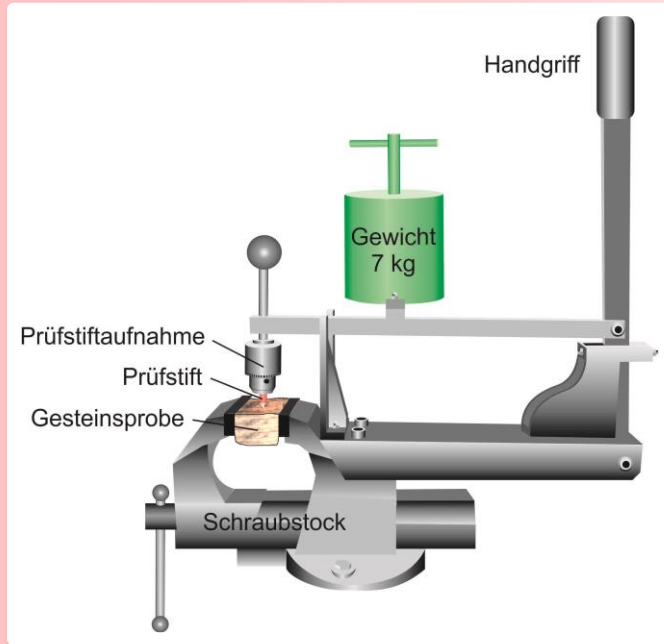
„Indextests“

- **CERCHAR – Abrasivitätsversuch (CAI)**
basierend auf einem vereinfachten Modellversuch mit Stahlstift
- ISRM Suggested Method (2013), ASTM-Norm D7625 (2010)
DGGT-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)

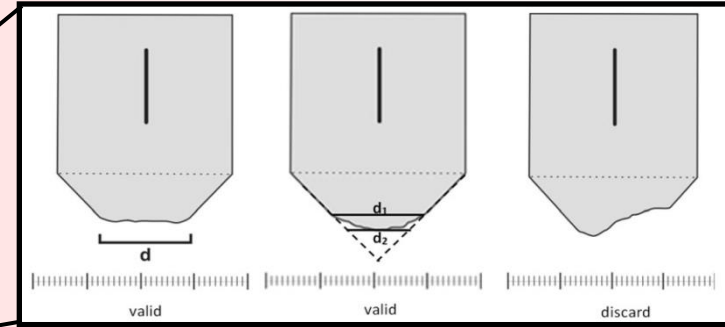
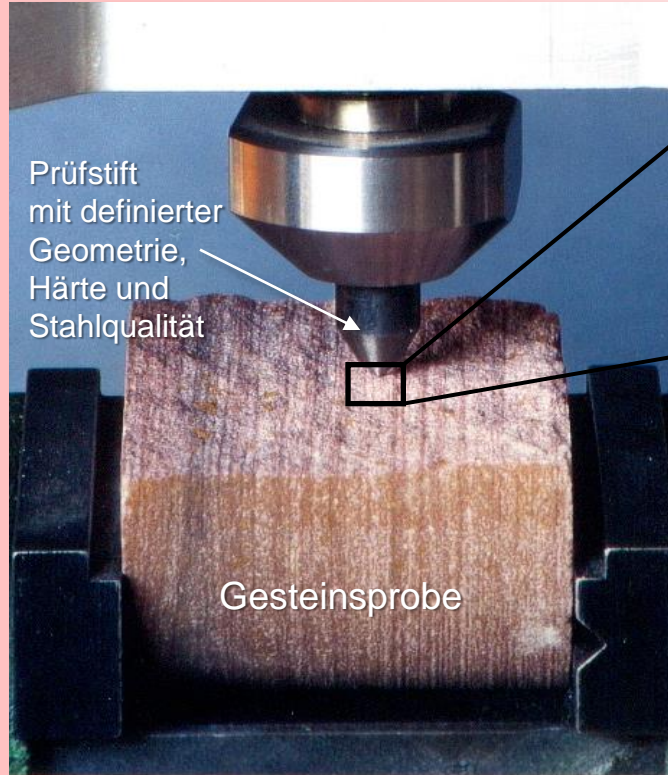
► Auslegung CERCHAR-Versuch



(aus: PLINNINGER & RESTNER, 2008, modifiziert)

Prüfgeräte zur Durchführung des CERCHAR-Versuchs:
Links das Originalgerät (CERCHAR, 1986), rechts das modifizierte Prüfgerät nach WEST (1989)

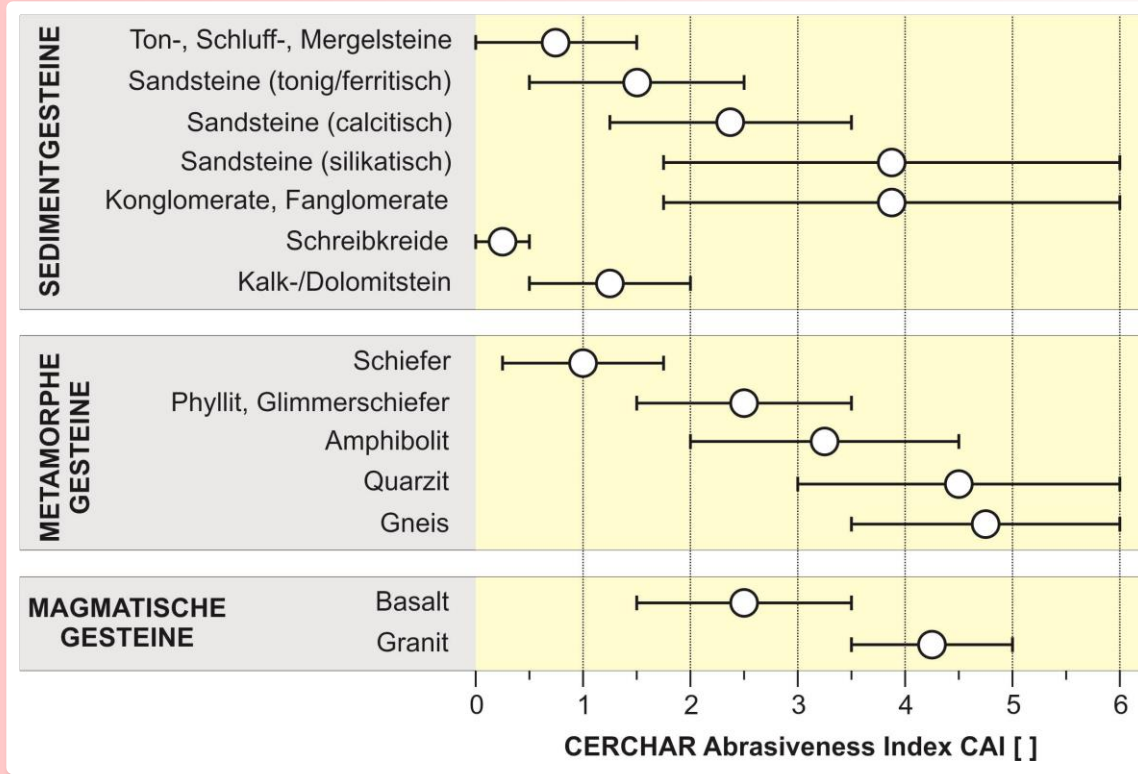
► Durchführung und Auswertung des CERCHAR-Versuchs



CAI	ISRM-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

(nach: ISRM Suggested Method, 2014)

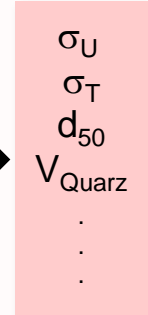
► Erfahrungswerte CAI



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).



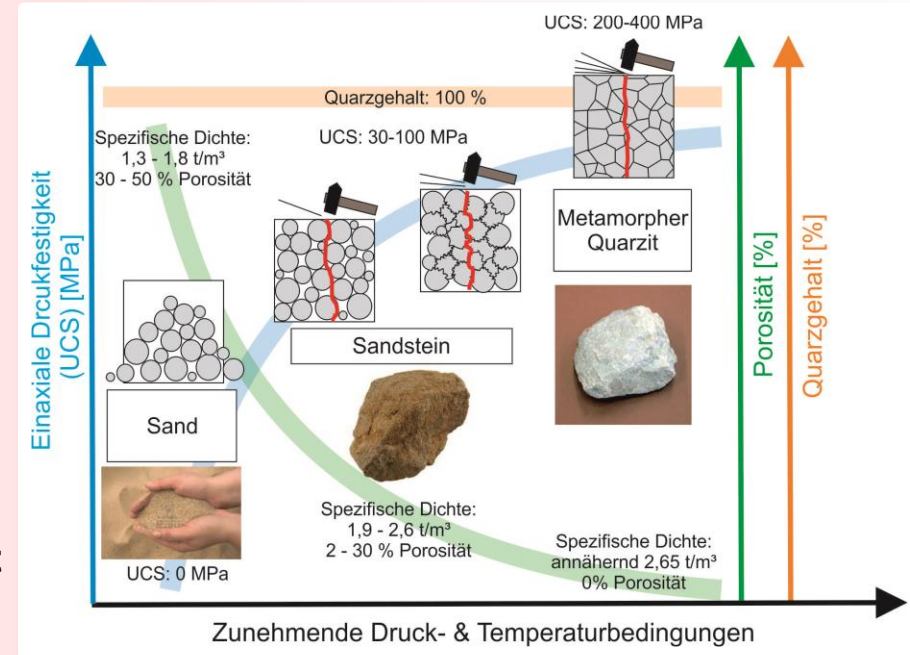
► Petrographische Dünnschliffanalyse



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 Spröbruchversagen 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

Foto: MU Leoben



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

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

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

Foto: TU Graz / Bergmann

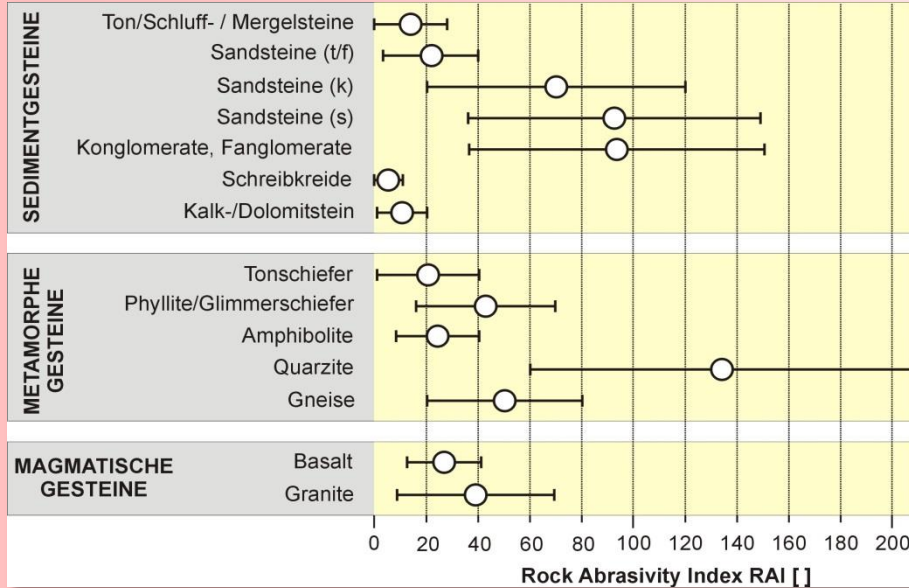


- **Petrographische Dünnschliff-Modalanalyse**
(u.a. ISRM Suggested Method, 1978)

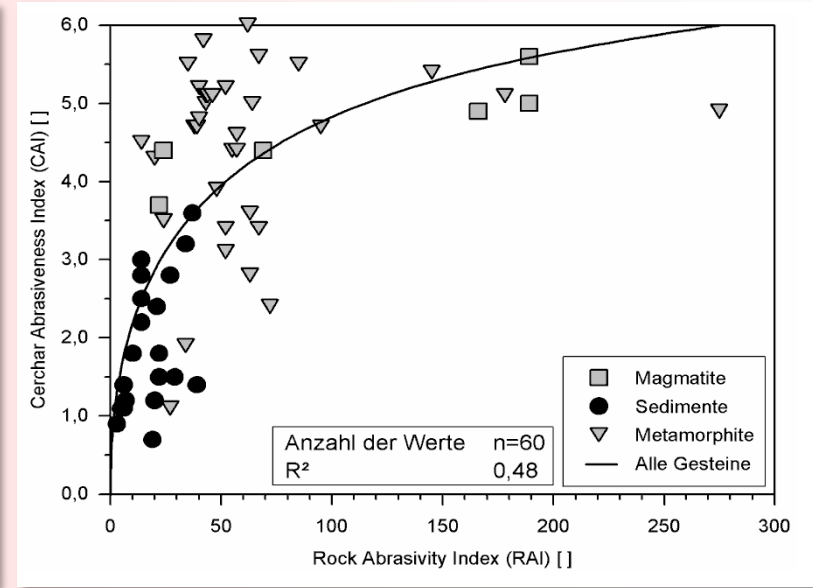
hilfsweise: Röntgendiffraktometer-Analyse

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)



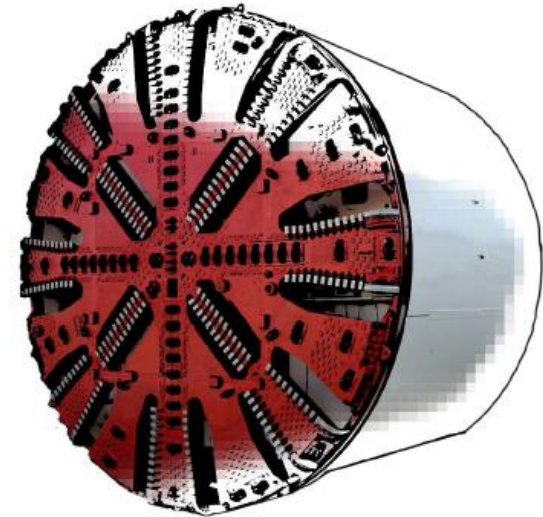
Empirische Korrelation des RAI mit dem CAI
(nach: Plinninger & Restner, 2008, modifiziert)

► 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 <i>Wear</i>													
Abrasivität (Cerchar Abrasivity Index) <i>Abrasiveness</i>	CAI	–	x	x	x	nicht empfohlen	x	x	x	x	x	x	nicht empfohlen
Quarzanteil <i>Equivalent quartz content</i>	äQu	%	x	x	x		x	x	x	x	x	x	
Abrasivität RAI <i>Rock Abrasivity Index (RAI = Equ · UCS)</i>	RAI	–	x	x	x		x	x	x	x	x	x	
Druckfestigkeit <i>Uniaxial rock compressive strength (UCS)</i>	σ	MN/m ²	x	x	x		x	x	x	x	x	x	
Spaltzugfestigkeit <i>Tensile strength (SPZ)</i>	σ_t	MN/m ²	x	x	x		x	x	x	x	x	x	
Scherfestigkeit <i>Shear strength</i>			x	x	x		x	x	x	x	x	x	
tonmineralische Zusammensetzung <i>Clay mineral composition</i>			x	x	x		x	x	x	x	x	x	
Verwitterungsgrad <i>Weathering</i>	W	–	x	x	x		x	x	x	x	x	x	
Verfestigung <i>Cementation</i>			x	x	x		x	x	x	x	x	x	

Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen



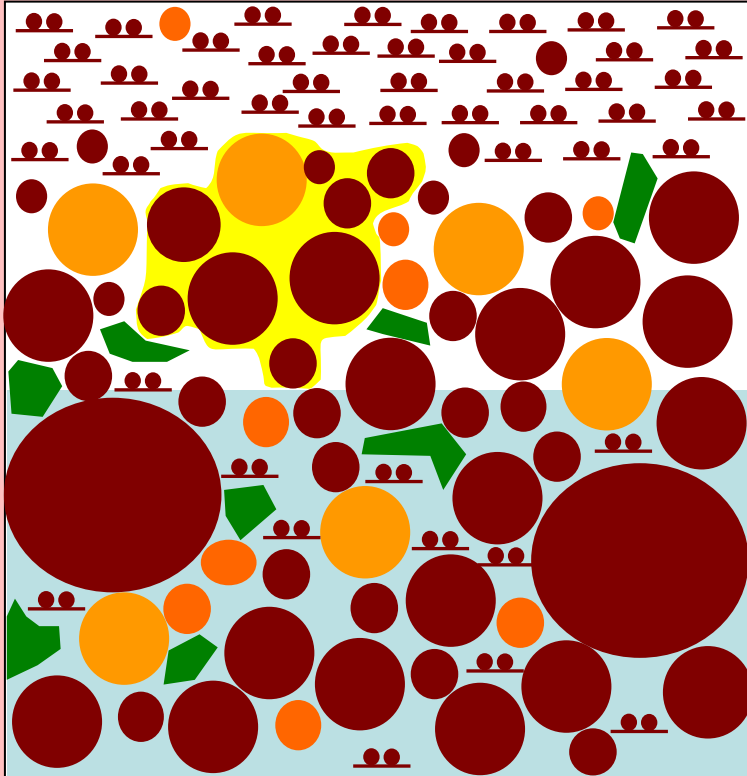
► Aktuelles Projektbeispiel: Vergütung nach CAI

GESCHLOSSENES LV				22-11-2009
HG OG LG PosNr	Z	PZZV	A BESCHREIBUNG DER LEISTUNG	RWG
			MENGE EH	PREISANTEILE
				POS.PREIS
03 01 800106A	Z	MB	Kontin. Vortrieb Nordröhre VKL1 / TF -4 Kontinuierlicher Vortrieb und Tübbingeinbau, 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 Tübbingeinbau, 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“

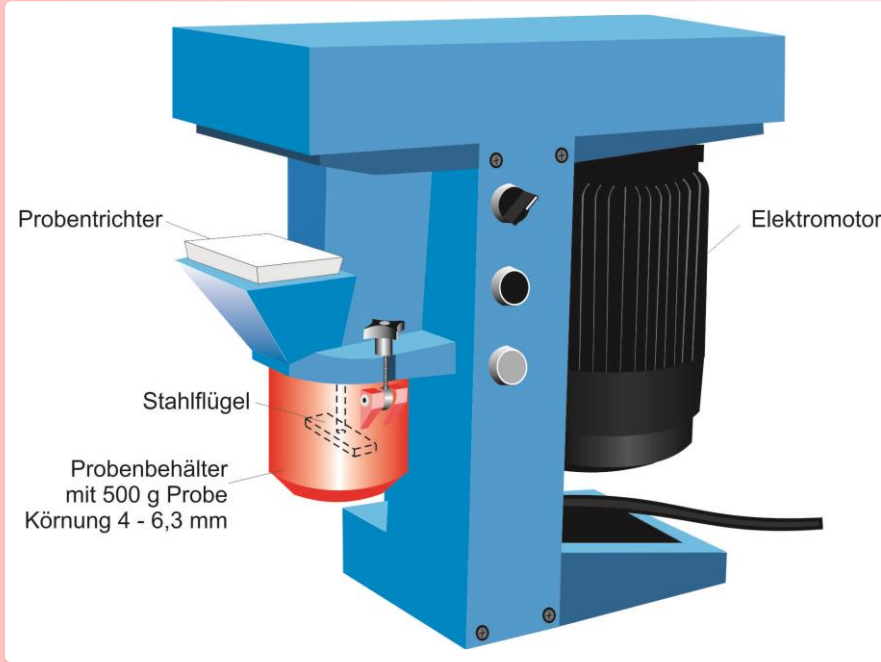
- **LCPC-Abrasimetre (ABR)** - „Drehflügelversuch“, LCPC Frankreich
- **Wiener „Abrasiometer“** - „Drehflügelversuch“, TU Wien
- **Soil-Abrasion Test (SAT)** - „Drehtellerversuch“, NTNU Trondheim
- weitere **Verschleißtopf-Verfahren** nach UETZ, WILMS, u.v.m.

„Geologisch-mineralogische Ansätze“

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

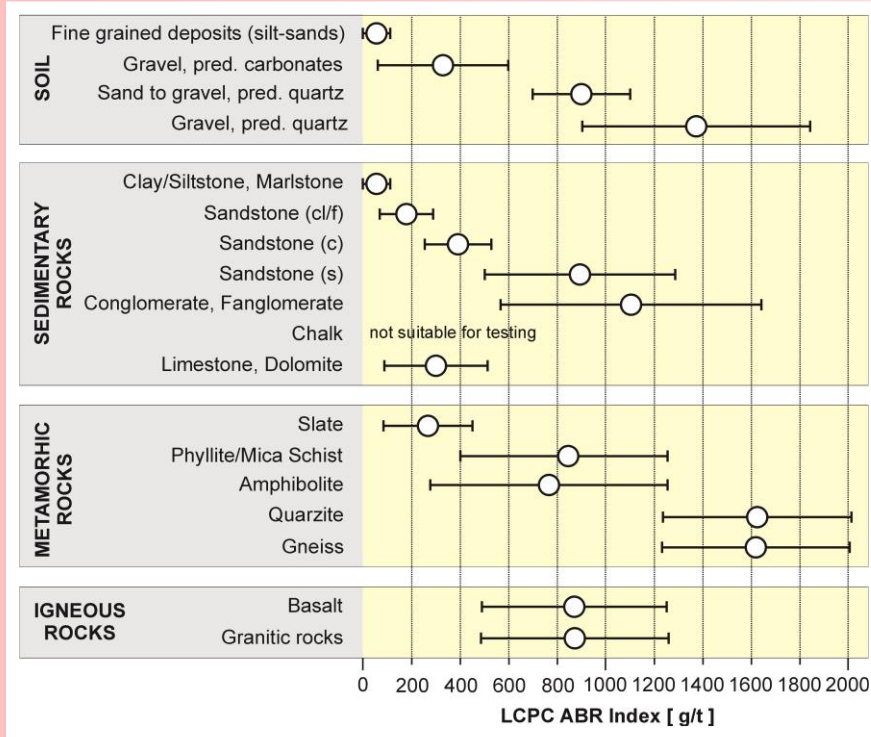
► Auslegung LCPC-Versuch

(aus: PLINNINGER & RESTNER, 2008, modifiziert)

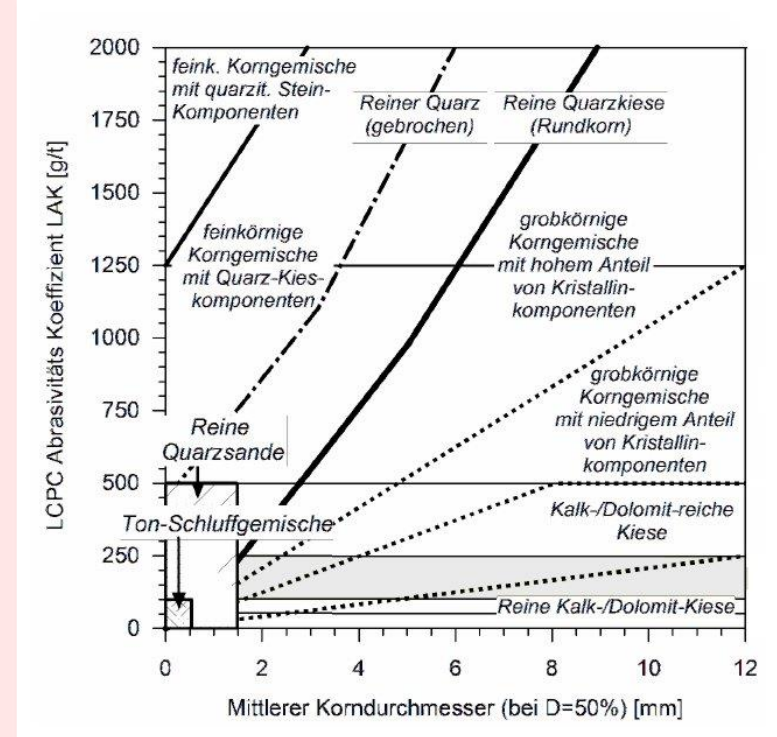


Prüfgerät zur Durchführung des LCPC-Versuchs, links in der Übersicht, rechts Blick in den Verschleißtopf mit Prüflügel

LCPC-Versuch: Versuchsergebnisse



aus: Plinninger & Restner, 2008

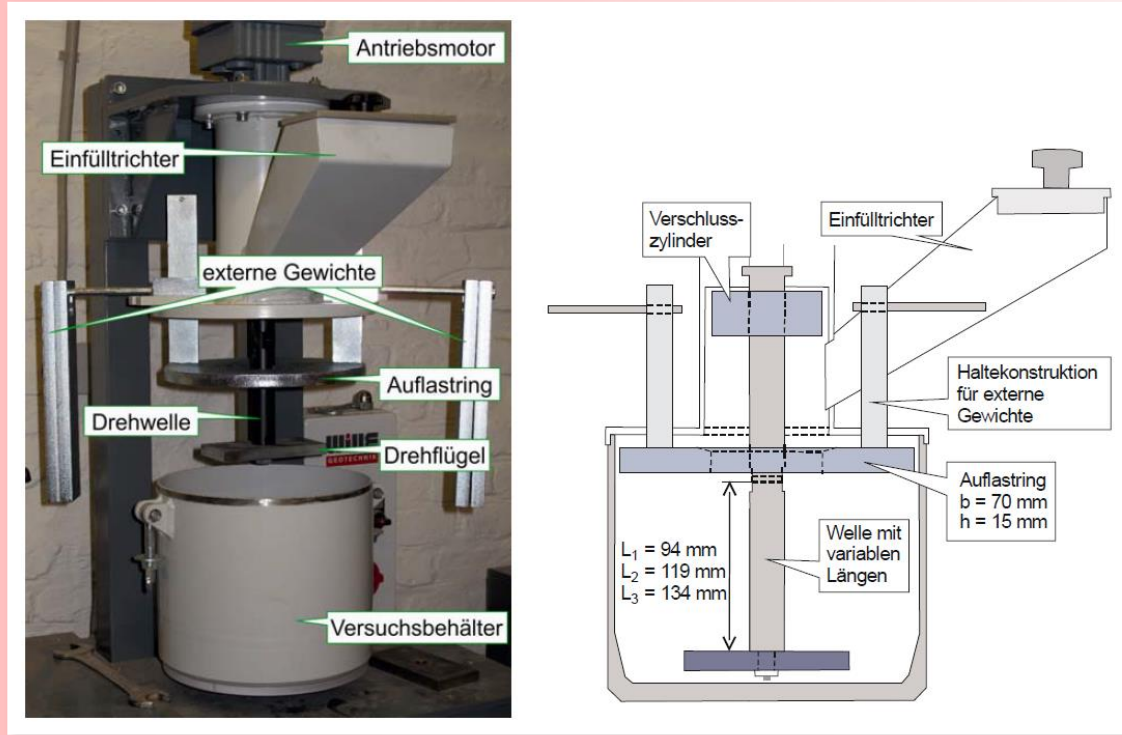


aus: Beckhaus & Thuro, 2008

▶ 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. Größere Korngrößen liegt 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

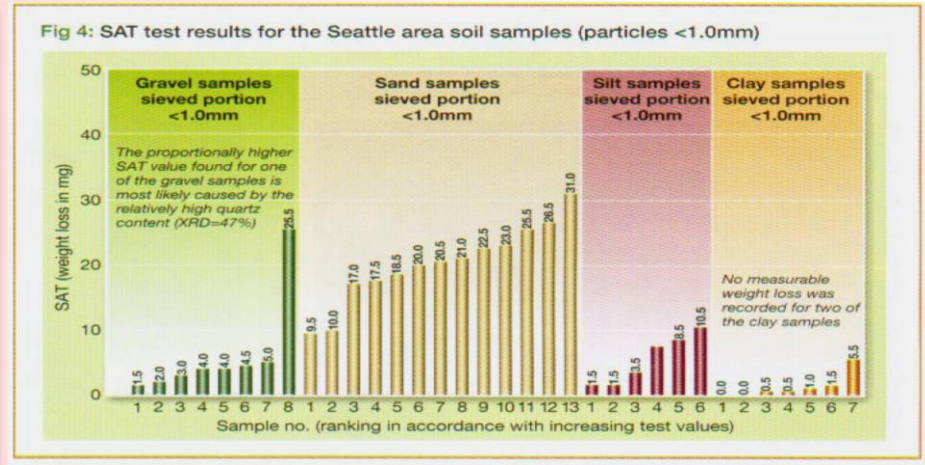
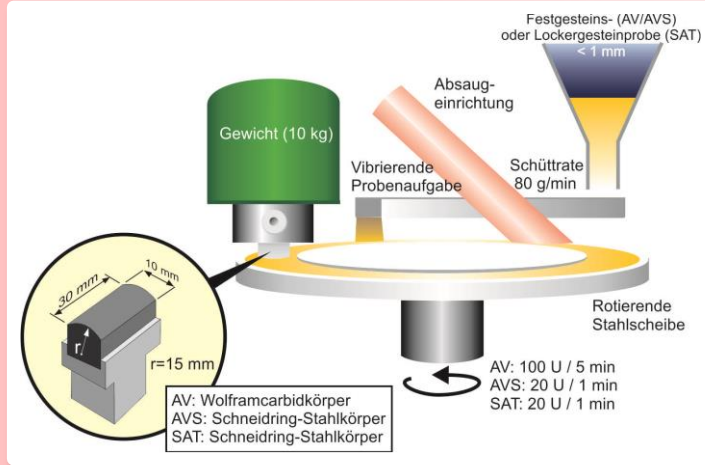
► Auslegung „Wiener Abrasimeter“



- Prototypische Weiterentwicklung des LCPC-Verfahrens
- Probenmenge 5-10 kg
- Prüfung des Bodens in seiner originalen Zusammensetzung
- Auflastring 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

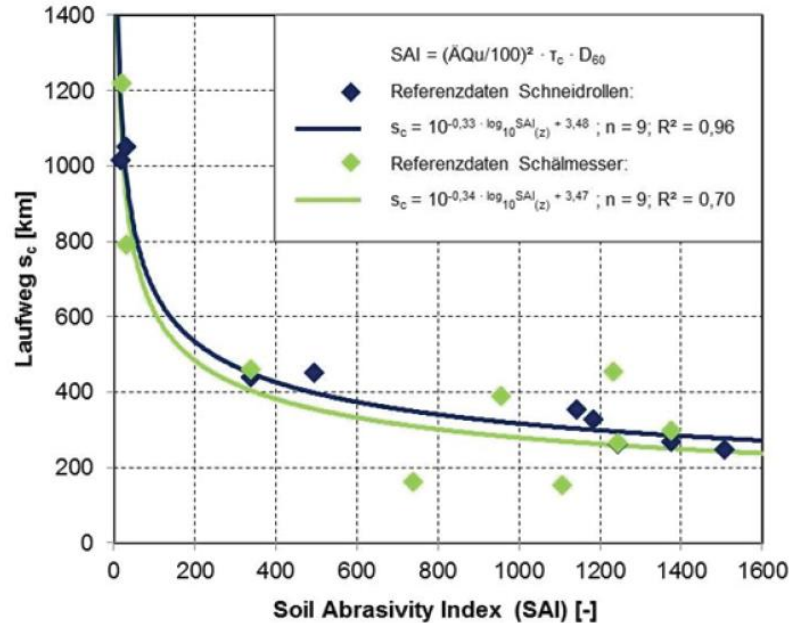
Nach derzeitigem Stand der Technik ist ein Boden umso abrasiver:

- 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)

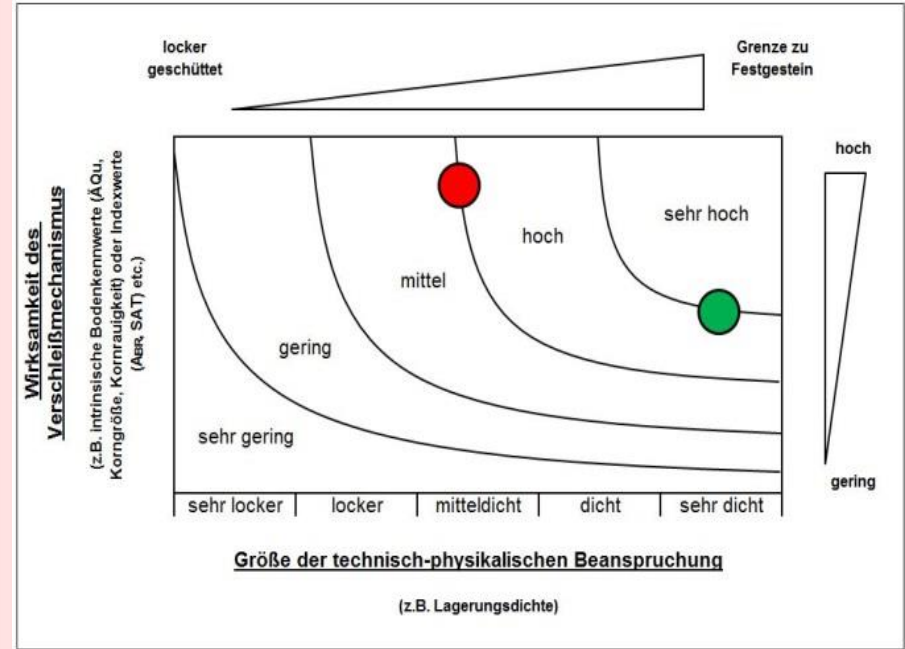
Es handelt sich hierbei um **herkömmliche Parameter**, die mit entsprechenden Feld- und Laborversuchen ermittelt und mit Maßzahlen belegt werden können.



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 Abbauschleiß, 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. Plinninger Geotechnik
Geotechnische Dienstleistung und Forschung