

# **Einfluss der Abrasivität von Lockergestein auf den maschinellen Rohrvortrieb**

**Dipl.-Ing. Petra Drucker**

TU Wien, Institut für Geotechnik  
petra.drucker@tuwien.ac.at

## **KURZFASSUNG**

Um für geplante Rohrvortriebe den Werkzeugverschleiß einwandfrei zu prognostizieren und die daraus resultierenden finanziellen Konsequenzen kalkulieren zu können stehen für Lockergestein bislang nur unzureichende Abrasivitätskennwerte zur Verfügung. Bei abrasivem, bzw. verschleißintensivem Boden bedeutet das einerseits für die Auftraggeberseite ein unakzeptables Baugrundrisiko, andererseits für die ausführende Seite ein entsprechend hohes Planungs- und Kalkulationsrisiko.

Vorliegender Beitrag soll zunächst die Auswirkungen auf den Werkzeugverschleiß bei maschinellen Rohrvortrieben in abrasivem Lockergestein aufzeigen. Typische Verschleißmechanismen an Abbauwerkzeugen sowie im Förderkreislauf werden behandelt und es werden Möglichkeiten angedacht, wie verschleißreduzierend in das System eingegriffen werden kann.

Im zweiten Teil des Beitrags wird auf die Verfahren eingegangen welche heute im deutschsprachigen Raum überwiegend Verwendung finden, um einen Kennwert zur Beurteilung der Abrasivität von Lockergestein zu ermitteln. Der derzeitige Stand der Technik ist jedoch nicht ausreichend, weshalb an der TU Wien derzeit im Rahmen eines Forschungsprojekts an der Entwicklung eines standardisierbaren Labor-Verfahrens zur umfassenden Quantifizierung der Abrasivität von Lockergestein gearbeitet wird.

## **EINLEITUNG**

Die ÖGL-TR 101, bzw. das DWA-Merkblatt 125 definieren Abrasivität als Eigenschaft eines Gesteins, beim Bohren am Bohrwerkzeug Verschleiß auszuüben [12], [1]. Unter „Gestein“ ist in diesem Zusammenhang jedoch sowohl Locker- als auch Festgestein zu verstehen. Während großer Werkzeugverschleiß bei Vortrieben im Festgestein schon seit langem bekannt ist, wurde man im Lockergestein erst im Zuge der steigenden Bau- und Leistungserfordernisse der vergangenen Jahre auf den Verschleiß, und damit auf die Abrasivität des Bodens aufmerksam.

Die Bedeutung der Abrasivität für grabenlose Verfahren zeigt sich bspw. in den Empfehlungen für die Beschreibung der Baugrund- und Grundwasserverhältnisse der ÖGL-TR 101 (Tab. 1), bzw. der DWA-A 125 (Tab. 8), wo der Cerchar Abrasivity Index zur Bestimmung der Abrasivität von Festgestein angeführt wird. Für Lockergestein werden jedoch in den genannten Richtlinien keinerlei An-

gaben hinsichtlich Abrasivitätsermittlung gemacht, was nicht zuletzt auch am derzeit unbefriedigenden Stand der Technik liegen könnte (siehe dazu zweiter Abschnitt des vorliegenden Beitrags).

Der Druck auf die Grabenlose Bauindustrie zu immer größeren Haltungslängen – sowie auch die technologischen Entwicklungen die dazu führen, dass diese Forderungen vielfach erfüllbar geworden sind – hat nicht zuletzt auch verdeutlicht, dass der Verschleiß an den Abbauwerkzeugen in manchen Fällen als neuer limitierender Faktor für die Vortriebsleistung akzeptiert werden muss. Werkzeugverschleiß ist baubetrieblich durch z.B. Materialkosten, verminderte Vortriebsleistung, sowie Maschinenstehtzeiten und Personalkosten für den Werkzeugtausch zu registrieren und diese Kosten steigen in abrasivem Boden mit jedem zusätzlich aufgefahrenen Vorpressmeter überproportional an. Wird die Abrasivität jedoch im Vorfeld maßgebend unterschätzt und macht sich diese erst im Zuge der Vorpressung bemerkbar, so ist im Lockergestein mit zumeist aufwendigsten Wartungs- und Reparaturarbeiten zu rechnen. Im schlimmsten Fall kann übermäßiger Werkzeugverschleiß zur Einstellung des Rohrvortriebs führen, in den meisten Fällen wird die Abnutzung der Abbauwerkzeuge jedoch frühzeitig am rapiden Abfallen der Vortriebsleistung erkannt.

Es ist also nachvollziehbar, dass es von großem Interesse für den grabenlosen Leitungsneubau ist, die Abrasivität des Bodens zu quantifizieren, bevor sie durch ihre negativen Auswirkungen schmerzlich (weil zumeist teuer) auf sich aufmerksam macht.

Im Detail lässt sich die **Relevanz eines eindeutigen Abrasivitätskennwerts im Lockergestein** wie folgt angeben:

Nutzen für Auftraggeber von Rohrvortrieben:

- Reduzierung des Baugrundrisikos infolge der Möglichkeit zur genauen Beschreibung einer u.U. vortriebsbestimmenden Baugrundeigenschaft;
- Erhöhung der Kostensicherheit bei Ausschreibung und Abrechnung;
- Verbesserung der Termintreue bei Ausführung der Arbeiten;
- Vermeidung von technisch riskanten Situationen während der Bauausführung (z.B. Errichtung eines Wartungsschachtes zum Werkzeugwechsel am Schneidrad);
- Argumentationsgrundlagen bei Nachtragsbehandlungen.

Nutzen für Rohrvortriebs-Unternehmen:

- Kalkulationsgrundlage für den zu erwartenden Werkzeugverschleiß, Optimierung der Haltungslängen;
- Vermeidung von sog. sekundärem Verschleiß (= über das eigentliche Abbauwerkzeug hinausgehender Verschleiß, also an z.B. Halterungen, Leitungen,...);
- Grundlage für die Entwicklung von Maßnahmen zur Abminderung der Verschleißwirkung von abrasivem Boden;
- Potential zur Kostenoptimierung von Bauleistungen;
- Argumentationsgrundlagen bei Nachtragsforderungen.

Die nachfolgenden Aussagen über Verschleißerscheinungen bei maschinellen Rohrvortrieben beziehen sich primär auf offene und geschlossene Schildvortriebe mit vollflächigem Abbau, treffen aber vollinhaltlich auch auf unbemanntes Mikrotunneling zu und können auch sinngemäß auf Teilflächenabbau angewandt werden.

## VERSCHLEIßERSCHEINUNGEN AN WERKZEUGEN DES MASCHINELLEN ROHRVORTRIEBS

Verschleiß ist grundsätzlich bei allen Maschinenteilen die sich in Bewegung befinden unvermeidbar, jedoch kann er in vielen Fällen reduziert werden, und zwar insbesondere durch Schmierung der betroffenen Teile, aber auch durch z.B. optimierte Formgebung. Maschinenschmierung im herkömmlichen Sinn (also mit Schmierölen) kommt für Werkzeuge die in Bodenkontakt stehen aus wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten nicht in Frage und auch die Werkzeugformen unterliegen zumeist anderen, stärker maßgebenden Anforderungen als der Verschleißminderung. Als zusätzlicher, verschleißintensivierender Faktor ist beim Bodenabbau die Tatsache zu handhaben, dass die betroffenen Maschinenbauteile laufend in Kontakt zu „frischem“ Abrasivgut (= Boden) stehen.

Zunächst wird eine Unterteilung getroffen, an welchen Stellen beim maschinellen Rohrvortrieb mit maßgebendem Verschleiß von bodenberührenden Bauteilen zu rechnen ist:

### Verschleiß an den Abbauwerkzeugen

Hier wird nach [5] in den sog. primären Verschleiß, der an den eigentlichen Abbauwerkzeugen (z.B. Rollmeißel, Schälmesser) auftritt und dem sekundären Verschleiß an Bauteilen, die eigentlich keiner übermäßigen Abnutzung unterliegen sollten (z.B. Schneidradkörper, Werkzeughalterungen) unterschieden. Während beim Bodenabbau immer mit einem gewissen Primärverschleiß zu rechnen ist, stellt sich Sekundärverschleiß in der Regel unplanmäßig ein und ist somit in der Regel unerwünscht.

Generell nutzen sich alle Werkzeuge am Außenrand des Schneidrads bzw. an der Felge, aufgrund des vergleichsweise sehr großen zurückgelegten Verschleißwegs, wesentlich stärker ab als jene im Schneidradzentrum. Demzufolge sind Kaliberrollen und Räumer häufig besonders von Verschleiß betroffen.



Abbildung 1 Unterschiedlicher Verschleiß über den Schneidradquerschnitt [Quelle: Martak.geo]

Rollmeißel werden beim maschinellen Vortrieb im Lockergestein eingesetzt, um Steine und Blöcke sowie Verhärtungen zu zerkleinern und / oder um, bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels, Aus- und Einfahrtssicherungen aus z.B. DSV-Körpern durchhörern zu können. Sie werden also nicht – wie im Festgestein – ständig benötigt, sondern lediglich anlassbezogen. Trotzdem nutzen sich die Meißel während des gesamten Vortriebs ab. Solange die Rollmeißel frei laufen, ist

die Abnutzung über ihren gesamten Umfang gleichbleibend, ein fest geklemmter Rollmeißel verschleißt jedoch asymmetrisch und wird so schnell unbrauchbar.

Der Außenumfang des Schneidradkörpers, bzw. die Felge sind häufig von Sekundärverschleiß betroffen. Beim Rohrvortrieb hat der „Verlust“ des Schneidrad-Überschnitts maßgebende Auswirkungen auf den gesamten nachzupressenden Rohrstrang, mit Konsequenzen auf Pressenkräfte, Rohrschmierung etc.

Erfolgt beim Vortrieb eine Umströmung des Schneidrads und somit Ein- oder Austritt von feinstmaterialführendem Grundwasser oder Suspension durch den Spalt zwischen Schneidrad und Schildmantel, kommt es – bei entsprechender abrasiver Eigenschaft des Feinstmaterials – zu einer Vergrößerung des Eintrittspalts. Die Wirkung tritt verstärkt an der Sohle auf, wenn die Strömungsverhältnisse an der Ortsbrust und in der Abbaukammer ein Absinken der Feinteile zulassen [3]. Ein solcher, unplanmäßiger Verschleiß kann u.U. das gesamte Maschinenkonzept zur Ortsbruststützung gefährden!

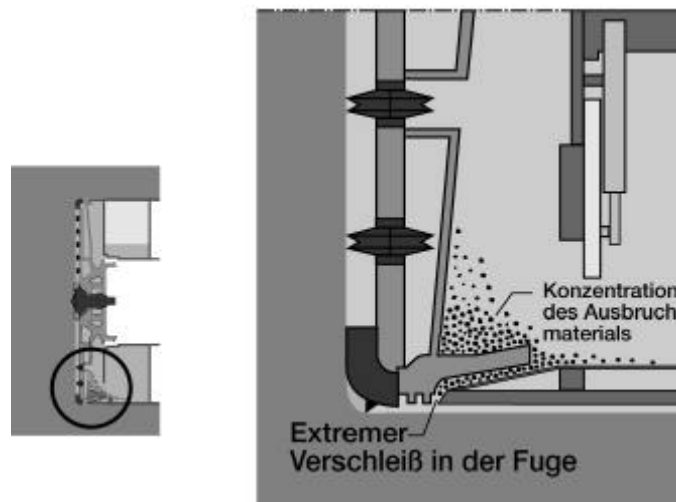


Abbildung 2 Verschleiß zwischen Schneidrad und Schildschneide [3].

Jeder übermäßige Verschleiß, das ist größerer Primärverschleiß als erwartet sowie sekundärer Verschleiß, führt beim maschinellen Schildvortrieb im Lockergestein zu vortriebsbestimmendem Reparaturaufwand. Arbeiten am Schneidrad und im Brecherraum können nur bei Unterbrechung des Vortriebs durchgeführt werden und sind in der Regel nicht in den planmäßigen Wartungsschichten machbar. Insbesondere unter Grundwasser sind solche Arbeiten nur mit hohem Aufwand zu bewerkstelligen. Bei entsprechendem Maschinenquerschnitt und entsprechender Ausstattung ist eine Beaufschlagung der Abbaukammer mit Druckluft möglich, um Reparaturarbeiten am Schneidrad durchzuführen. Alternativ kann, so es die örtlichen Gegebenheiten zulassen, ein Wartungsschacht hergestellt werden, um die Zugänglichkeit des Schneidrads von Außen zu ermöglichen.

### Verschleiß im Förderkreislauf

Beim Mikrotunneling oder begehbaren maschinellen Rohrvortrieben im kohäsionslosen Lockerboden ist die Flüssigförderung des Abbaumaterials mehr die Regel als eine Ausnahme. Insbesondere auch, weil eine bentonithaltige Fördersuspension gerne als Ortsbruststützende Maßnahme gesehen wird.

Bei Flüssigförderung kommen Leitungen (vor allem Rohrkrümmer), Pumpen und die Anlagenteile der Separation in Kontakt mit dem Boden und unterliegen somit einer gewissen Abnutzung. Hier werden vor allem abrasive Feinstbestandteile des Bodens, bzw. Zerkleinerungsprodukte (Korn-

durchmesser kleiner 100 µm) zu einem Problem, weil diese durch die Separationsanlage nicht abgetrennt werden und somit ständig im Förderkreislauf verbleiben.

Verschleißerscheinungen an den Bauteilen der Flüssigförderung können überwiegend mit vergleichsweise geringem Aufwand, ohne außerplanmäßigen Unterbrechung des Rohrvortriebs, erneuert werden. Aus diesem Grund wirkt sich solcher Verschleiß meist „nur“ durch reine Reparatur- und Wartungskosten (Material, Arbeitszeit zum Tausch, etc.) aus und mindert nicht – wie üblicherweise alle Maßnahmen am Schneidrad – die Vortriebsleistung.

### Verschleißminderung beim maschinellen Vortrieb

Das wissenschaftliche Fachgebiet, das sich mit „aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung“ befasst, also mit Reibung und Verschleiß, nennt sich Tribologie (griechisch „Reibungslehre“) [9]. Unter Verschleiß wird grundsätzlich Materialabtrag (Materialverlust) an den Reibflächen fester Körper verstanden [11]. Nach ÖNORM M 8120 – Teil1 besteht ein tribologisches System aus einem Grundkörper (in unserem Fall z.B. das Abbauwerkzeug), einem Gegenkörper (Boden), einem Zwischenstoff und dem Umgebungsmedium (i.d.R. Grundwasser oder Luft). Der Zwischenstoff befindet sich zwischen Grund- und Gegenkörper und kann verschleißmindernde Wirkung (z.B. Bentonitsuspension als Schmierstoff) oder verschleißerhöhende Wirkung (z.B. harte Körner) haben.

Schließlich sind neben der Struktur des Tribosystems auch die von außen einwirkenden Belastungsgrößen und das resultierende Beanspruchungskollektiv (Relativgeschwindigkeit der Oberflächen, Bewegungsform (z.B. Gleiten, Rollen) sowie die Temperatur, etc.) für jeden Verschleißvorgang maßgebend.

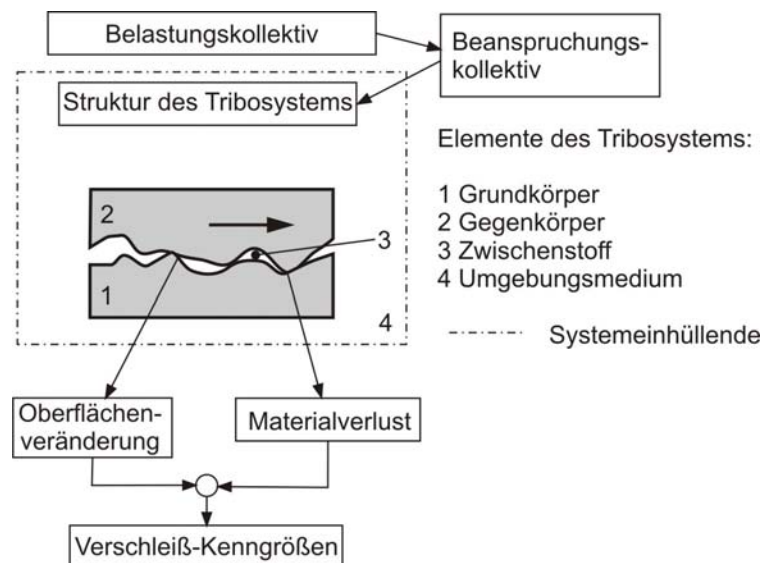


Abbildung 3 Systemanalyse eines Verschleißvorgangs nach [11].

In ÖNORM M 8120-2 wird der dimensionslose Reibkoeffizient angegeben als Quotient der Reibkraft und der Normalkraft, welche normal zur Ebene wirkt in der die Reibkraft auftritt [10]. Die auf die Belastung (F) normierte Verschleißrate ( $dW_v/ds$ ) wird als Verschleißkoeffizient bezeichnet:

$$k = \frac{dW_v}{ds \cdot F} \left[ \frac{\text{mm}^3}{\text{m} \cdot \text{N}} \right]$$

Beim Abbauvorgang einer Mikrotunneling- oder Schildmaschine können jedoch weder die Reibkraft, noch die Normalkraft der Berührungen der einzelnen Bodenbestandteile mit den Abbauwerk-

zeugen (Mikrokontakte) beziffert werden. Ein Zusammenhang mit Anpressdruck und Vorpressegeschwindigkeit ist vermutlich gegeben, darüber hinaus sind jedoch weitere Faktoren wie z.B. Grundwassereindring und Abtransportgeschwindigkeit des Bodens aus der Abbaukammer zu berücksichtigen.

Im gängigen Sprachgebrauch werden sämtliche denkbaren Verschleißformen mit denen wir beim maschinellen Vortrieb konfrontiert sind als Abrasivverschleiß bezeichnet. Abrasiver Verschleiß wird streng genommen nur durch Schneid- oder Furchungsvorgänge am Grundkörper durch harte Gegenkörper oder Partikel hervorgerufen (Mikrozerspanungsprozesse) [11]. Wenn harte Partikel in einem strömenden hydraulischen Medium mitgeführt werden spricht man von hydroabrasiven Verschleiß. Andere Verschleißarten, welche vielleicht ebenfalls vorkommen aber weniger Beachtung finden sind Ermüdungsverschleiß, adhäsiver Verschleiß und tribochemischer Verschleiß, zu dem auch die Verschleißkorrosion gezählt wird.

Dieser Exkurs in die Tribologie soll verdeutlichen, dass eine vermeintlich einfache Beobachtung, nämlich das Auftreten von Werkzeugverschleiß, einer Reihe von komplexen Zusammenhängen unterliegt. Der Verschleißbetrag ist kein Werkstoff- sondern immer ein Systemkennwert! Gleichzeitig bietet diese Komplexität eine Vielzahl an Möglichkeiten um in das System einzugreifen. Für die zielführende Konstruktion und Dimensionierung von Abbauwerkzeugen ist es vorteilhaft, möglichst viele der am Verschleißprozess beteiligten Parameter zu berücksichtigen.

Ganz wesentlichen Einfluss auf den Verschleiß haben die Stoffeigenschaften des Grundkörpers selbst und zwar vor allem seine Härte, aber auch seine Oberflächenstruktur. Demzufolge ist häufig der erste „Reflex“ auf das Auftreten (oder die Erwartung) von großem Werkzeugverschleiß das „Aufrüsten“ auf der Werkzeugseite, indem man härteren Werkzeugstahl einsetzt oder Verschleißschutzschichten aufschweißt. Abrasive Materialabtrennung findet nur dann statt, wenn die Abrasivstoffhärte (Härte der Bodenbestandteile) größer als die Werkstoffhärte ist.

In unserer Vorstellung ist der Boden eine Systemkonstante, an deren Einfluss auf das tribologische System nicht viel optimiert werden kann. Die Abrasivität des Bodens soll die Eigenschaften der Gegenkörper beschreiben, allenfalls können das Umgebungsmedium und natürlich vorhandene Zwischenstoffe berücksichtigt werden. Doch bereits bei der Abgrenzung von Gegenkörper zum Zwischenstoff besteht bei weitgestuftem Lockergestein enormer Interpretationsspielraum.

Die Herstellung von Zerkleinerungsprodukten während des Abbauvorgangs der Schildmaschine, welche zu neuen Formen der Gegenkörper und ggf. zu neuen Zwischenstoffen führt, muss bereits als systemimmanent bezeichnet werden. Diese Zerkleinerungsprodukte wirken als Zwischenstoffe beim Verschleißvorgang maßgeblich mit und das gewählte Vortriebssystem, sowie die Maschinenfahrweise sind von entscheidender Bedeutung für deren Entstehung. Ebenfalls von nicht geringer Bedeutung ist die Geschwindigkeit des Abtransports der Abrasivstoffe, womit das Gesamtkonzept der Flüssigförderung (also z.B. auch die Rohrdurchmesser) ins Spiel kommt. Die Fließgeschwindigkeit entscheidet einerseits über die Verweildauer im Abbauraum und bestimmt andererseits die Bewegungsart und –geschwindigkeit der Abrasivstoffpartikel und hat somit großen Einfluss auf die Verschleißintensität der betroffenen Bauteile.

Tatsächlich ist über die tribologisch maßgebenden Vorgänge im Abbauraum einer Schildmaschine noch wenig bekannt. Ja es stellt sich sogar die Frage, inwieweit diese überhaupt generalisiert werden können, oder ob nicht jedes System Boden-Schildmaschine gesondert zu beurteilen wäre.

## **ABRASIVITÄTSQUANTIFIZIERUNG IN LOCKERGESTEIN**

Wie bereits in der Einleitung ausgeführt, liegt eine objektive Beschreibung der Abrasivität des Bauwerks im Interesse aller bei der Realisierung einer Rohrpressung Beteiligten. Jedoch ist eine umfassende Beurteilung der abrasiven Wirkung von Lockergestein bislang noch nicht möglich. Gän-

gige Verfahren beschränken sich in der Regel auf die Quantifizierung einzelner für die Abrasivität maßgebenden Faktoren.

### **Einflussfaktoren auf die Abrasivität von Lockergestein**

Der Einfluss von einigen Faktoren auf die Abrasivität, z.B. die Korngröße und die Kornrundung, sind prinzipiell bekannt, können aber noch nicht quantifiziert werden, andere Einflussfaktoren, z.B. Grundwassersättigung, sind bislang gänzlich unerforscht. So wird bspw. der Zusammenhang zwischen Korngröße bzw. Rundungsgrad und Abrasivität nach derzeitigem Stand der Technik als direkt proportional angenommen, also kleines Korn (hoher Rundungsgrad) geringere Abrasivität als großes Korn (hoher Anteil Bruchkorn) [13], [14].

Soll die Gesamtabrasivität eines Lockergesteins erfasst werden, ist die umfassende Berücksichtigung zumindest der folgenden Einflussfaktoren notwendig:

- Mineralzusammensetzung und Mineralhärte,
- Korngröße und Kornverteilung,
- Rundungsgrad (Gehalt an Bruchkorn),
- Lagerungsdichte,
- Porengehalt,
- Wassergehalt,
- Kohäsion,
- ggf. Druckfestigkeit großer Bodenkomponenten oder Kornverfestigungen.

Darüber hinaus sollte stets bedacht werden, dass auch bei der Abrasivitätsermittlung anthropogene Faktoren (z.B. bei der Probengewinnung) ausgeschlossen werden müssen. So ist bspw. bei mittels Rotationskernbohrung gewonnenen, kohäsionslosen Lockergesteinsproben tendenziell mit einem höheren Gehalt an Bruchkorn zu rechnen, als bei Proben aus einer Greiferbohrung und in beiden Fällen ist der Bruchkorngehalt abhängig vom ausgeführten Bohrdurchmesser in Relation zum Größtkorn.

### **Der LCPC-Abrasivitätsversuch**

Der am *Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées* entwickelte **LCPC-Abrasivitätsversuch** wird derzeit im deutschsprachigen Raum üblicherweise zur Untersuchung der Abrasivität von Lockergestein herangezogen. Er ist in Frankreich als NF P18-579 normiert, wo das Prüfgerät sowie die unmittelbar damit verbundene Versuchsdurchführung und –auswertung festgelegt sind [6].

Für den Versuch werden  $500 \pm 2$  g der Bodenprobe mit Kornfraktion 4,0 – 6,3 mm durch einen Einfülltrichter in den Versuchsbehälter mit dem darin befindlichen Drehflügel gefüllt (siehe Abbildung 4). Anschließend rotiert der Stahlflügel während der fünfminütigen Versuchsdauer mit einer Geschwindigkeit von 4.500 Umdrehungen pro Minute um seine Achse. Der Stahlflügel wird vor und nach dem Versuch exakt eingewogen, denn der Quotient aus seiner Gewichtsabnahme [g] und der Ausgangsmasse der Bodenprobe [t] ist das Maß der Abrasivität.

Anders gesprochen beziffert der LCPC-Abrasivitätskoeffizient [g/t] die rd. 2.000-fache Verschleißmasse des Drehflügels [g] infolge der Versuchsdurchführung.

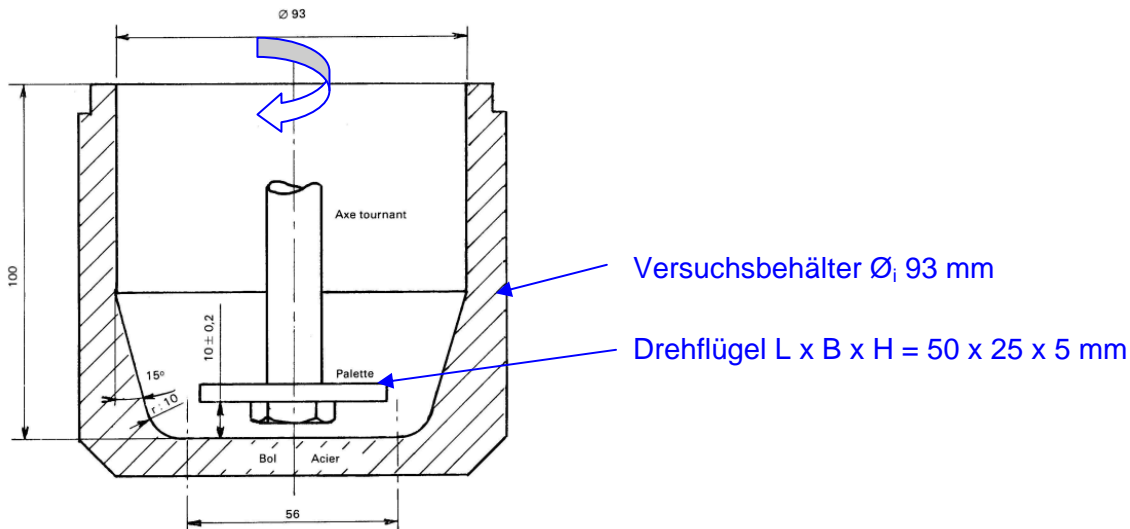


Abbildung 4 Querschnitt durch den Behälter des LCPC-Abrasivitätsversuchs ([6], adaptiert).

Was die Aussagekraft des LCPC-Abrasivitätskoeffizienten für u.a. die Verschleißprognose betrifft, so existiert erheblicher Interpretationsspielraum, wie die Gegenüberstellung der qualitativen Abrasivitäts-Bezeichnungen aus der Fachliteratur in Tabelle 1 belegt.

Tabelle 1 Gegenüberstellung der Abrasivitäts-Klassifizierung nach Büchi et al. [4] und nach Thuro [13], [14].

Abrasivität nach Büchi	LCPC-Abrasivitätskoeffizient $A_{BR}$ [g/t]	Abrasivität nach Thuro	
		LAK [g/t]	
sehr schwach	0 - 500	0 - 50	nicht abrasiv
		50 - 100	kaum abrasiv
		100 - 250	schwach abrasiv
		250 - 500	abrasiv
schwach	500 - 1.000	500 - 1.250	stark abrasiv
mittel	1.000 - 1.500		
stark	1.500 - 2.000	1.250 - 2.000	extrem abrasiv
sehr stark	> 2.000		

Der LCPC-Versuch sieht für das Prüfgut normgemäß ausschließlich den Korngrößenbereich von 4,0 – 6,3 mm vor, eine Einschränkung die für die Prüfung von Festgestein durchaus sinnvoll erscheint, jedoch für Lockergestein unakzeptabel ist. Die Ausführungspraxis belegt klar, dass auch Sande (Korngrößen 0,063 – 2,0 mm) sowie Mittel- und Grobkiese (Korngrößen 6,3 – 63 mm) durchaus verschleißintensiv sein können.

Der LCPC-Versuch wird daher zunehmend auch an Korngrößen > 6,3 mm durchgeführt, indem Mittel- und Grobkiese mittels Backenbrecher auf die Versuchsgröße reduziert werden. Diese Vorgehensweise impliziert, dass Grobmaterial grundsätzlich höher abrasiv ist als Feinkorn, was im Versuch durch die Scharfkantigkeit des Bruchkorns repräsentiert werden soll [13]. Eine Verifikation dieser Hypothese ist jedoch noch ausständig. Alternativ wird häufig argumentiert, dass die erhöhte Abrasivität des Brechkorns im LCPC-Versuch die (Verschleiß-)Auswirkungen simuliert, wie sie



beim Bodenabbau tatsächlich auftreten. Dabei wird jedoch außer Acht gelassen, dass die Verhältnisse (Auswirkungen) in einem bestimmten tribologischen System (LCPC-Versuch) nicht mit einem gänzlich anderen System (Bauausführung) verglichen werden können.

Für Kornfraktionen kleiner 4,0 mm kann der LCPC-Versuch nach [14] nicht zu befriedigenden Ergebnissen führen, hier werden i.d.R. ergänzende Verfahren, z.B. die Beurteilung der Kornrundung unter dem Binokular, durchgeführt.

### Weitere Methoden zur Abrasivitätsquantifizierung

In Norwegen wurde der sog. **Soil Abrasion Test (SAT)** entwickelt, bei dem Korngrößen < 4 mm untersucht werden können [5]. Die Probe wird auf eine rotierende Stahlscheibe aufgebracht, auf die ein 10 kg schwerer Stahlprüfkörper gedrückt und während 5 Minuten über die Scheibe bewegt (100 Umdrehungen) wird. Der sog. AV -Wert (Abrasion Value) entspricht dem mittleren Gewichtsverlust des Prüfkörpers. Der Versuch wurde ursprünglich für Festgestein konzipiert (Verwendung von Gesteinsmehl < 1 mm) um die Bohrbarkeit und den Verschleiß bei Tunnelbohrmaschinen zu beschreiben. Eine umfassende Anwendung im Lockergestein kann jedoch – wie beim LCPC-Versuch – aufgrund der Einschränkung des prüfbareren Korndurchmessers nicht erfolgen.

Das **Los-Angeles-Prüfverfahren** ist in Österreich etabliert (ÖNORM EN 1097-2) und wird vornehmlich zur Ermittlung des Abriebverhaltens und der Polierfähigkeit von Gesteinsmaterialien für den Straßenbau herangezogen. Sinngemäß kann das Verfahren auch zur Prüfung der Verschleiß-eigenschaften von weit gestuften Kornklassen ( $\geq 1,6$  mm) eingesetzt werden, es besitzt jedoch den praktischen Nachteil, dass zur Versuchsdurchführung zumindest 15 kg Trockenmaterial herbeizuschaffen sind [8].

Häufig wird, ergänzend zum LCPC-Versuch, der **Rundungsgrad** von Grobsand (Korngröße 0,63 - 2,0 mm) optisch bestimmt und als ergänzender Hinweis auf die Abrasivität des Lockerbodens herangezogen. Diese Vorgehensweise kann prinzipiell auch auf für Feinkiese (2,0 – 4,0 mm) angewandt werden. In ÖNORM EN 933-5 finden sich beispielsweise nachfolgende Definitionen hinsichtlich des Anteils an gebrochenen Körnern.

Tabelle 2 Bezeichnungen der Kornrundung nach EN 933-5 [7].

Bezeichnung	gebrochene Kornoberfläche
vollständig gebrochene Körner	mehr als 90%
gebrochene Körner	mehr als 50%
gerundete Körner	weniger als 50%
vollständig gerundete Körner	mehr als 90% gerundete Oberfläche

Als gebrochene Oberfläche wird in diesem Zusammenhang die Fläche eines Kieskorns definiert, die durch Brechen auf Grund natürlicher Kräfte entsteht und von scharfen Kanten begrenzt ist. Wenn sowohl die Oberfläche als auch die Kanten eines gebrochenen Kieskorns abgenutzt oder verwittert sind, muss die Oberfläche als gerundet bewertet werden [7].

Die **Mineralhärte** korreliert grundsätzlich mit der Fähigkeit Verschleiß zu erzeugen; je größer der Anteil an harten Mineralen (v.a. Quarz und Feldspat) umso mehr Verschleiß ist zu erwarten [4], [5],[14], oder allgemein: Kristallingestein ist abrasiver als Karbonatgestein. Der Äquivalente Quarzanteil (Produkt der Mineralanteile mit ihrer Schleifhärte nach Rosiwal) wird häufig als Maßzahl für die Abrasivität herangezogen. Diese Untersuchungen berücksichtigen jedoch nicht den maßgebenden Einfluss von Korngröße und Rundungsgrad auf die Abrasivität.

Beim **Cerchar-Test** wird ein Prüfstift aus Stahl mit dem Gewicht belastet und mit Hilfe des Hebels innerhalb von 1 Sekunde über 10 mm über die Gesteinsoberfläche hinweg bewegt. Der Cerchar Abrasivitäts-Index (CAI) errechnet sich als Mittelwert über 2 bis 5 Einzelversuche aus der Breite der am Stift entstandenen, kegelstumpfförmigen Rillen [4],[5],[14]. Es liegt auf der Hand, dass mit dem Cerchar-Verfahren sinnvoll – wenn überhaupt – nur die groben Komponenten von Lockergestein (Steine, Blöcke) untersucht werden können. Die Aussagekraft für das Gesamtmaterial erscheint äußerst begrenzt.

Die Abrasivität von Feinstmaterial in Suspension kann mit Hilfe des **Miller-Tests** [2] bestimmt werden. Ein standardisierter Stahlblock wird hierbei (mit definierter Auflast und festgelegtem Verschleißweg) in einer mit Testflüssigkeit (z.B. Wasser + Feststoff) gefüllten Wanne 6 Stunden lang hin und her bewegt, sein Gewichtsverlust wird während der Versuchszeit mehrfach gemessen und ergibt die sog. Miller-Zahl. Dieser in den USA normierte Versuch erscheint für die Beurteilung der Abrasivität, vor allem hinsichtlich der Flüssigförderung beim maschinellen Vortrieb, durchaus geeignet. Jedoch ist auch dieser Versuch, aufgrund der gegebenen Geräteabmessungen, hinsichtlich des beprobaren Größtkorns beschränkt.

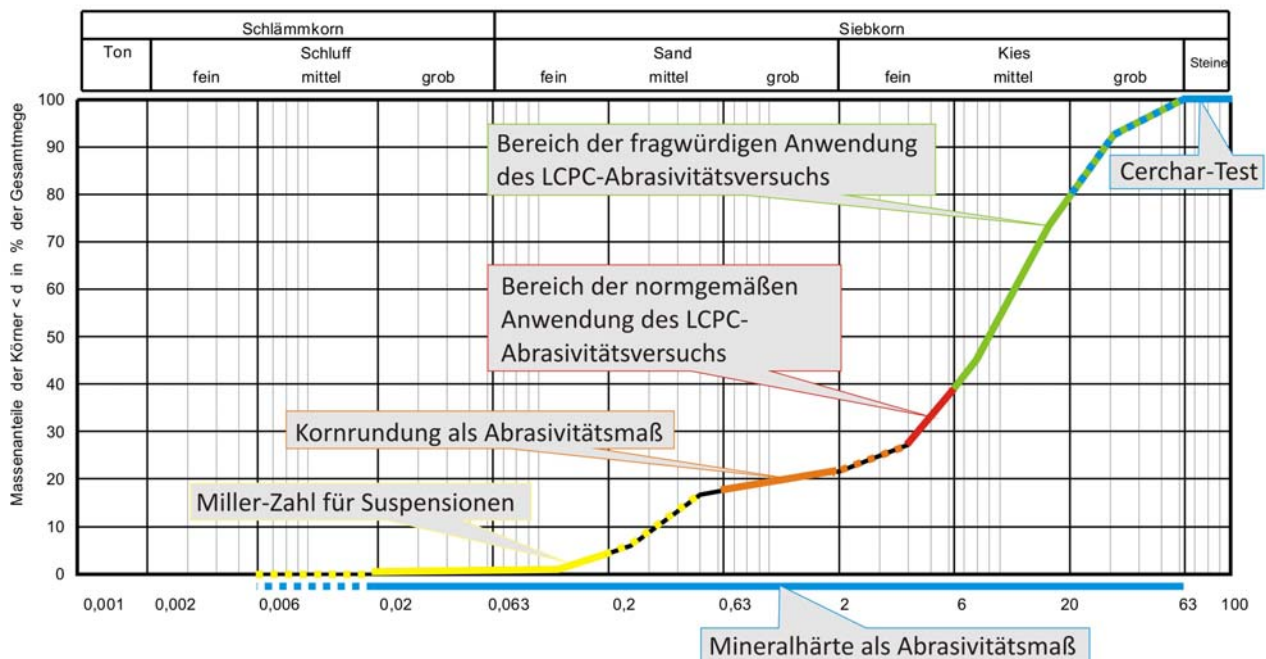


Abbildung 5 Sieblinie eines sandigen Kieses (Donauschotter) und „Stand der Technik“ für Aussagen über die Abrasivität des Korngemischs.

Grundsätzlich besteht die Problematik der fehlenden Vergleichbarkeit der einzelnen zur Abrasivitätsquantifizierung herangezogenen Verfahren, sowie daraus abgeleitete Interpretationen zur Gesamtbeschreibung eines Lockergesteins.

Und schließlich sei an dieser Stelle Aristoteles (343 v.Ch.) zitiert: „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“. Die Abrasivität von Lockergestein wird sich, dieser Weisheit entsprechend, vermutlich nicht allein durch die Teilabrasivitäten der einzelnen Kornfraktionen bestimmen lassen. Das Ziel der Forschungstätigkeit an der TU Wien besteht darin, einen Laborversuch zu entwickeln, bei dem möglichst viele der genannten Einflussfaktoren gleichzeitig erfasst werden können.

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Während im Festgestein zahlreiche Erfahrungen aus der Ausführungspraxis die Zuordnung bestimmter Abrasivitätskennwerte (vor allem des Cerchar-Index) auf den zu erwarteten Werkzeugverschleiß von Tunnelvortriebsmaschinen ermöglichen, fehlen für das Lockergestein entsprechende Erfahrungswerte. Als Grundlage hierfür muss zunächst ein anerkannter, einwandfrei reproduzierbarer Indexwert zur Bestimmung der Abrasivität von Lockergestein entwickelt werden, der vor allem auch möglichst alle Einflussfaktoren des Lockergesteins berücksichtigt.

Die „Abrasivität des Bodens“ beschreibt jedoch (wenn überhaupt) nur eine Systemgröße des Tribosystems „maschineller Rohrvortrieb“. Verschleißmechanismen und Verschleißraten sind komplexe Ergebnisse von tribologischen Vorgängen bei maschinellem Bodenabbau und -förderung. Steigende Leistungsanforderungen auf den grabenlosen Leitungsbau führen dazu, dass diese Vorgänge in Zukunft vermehrt dokumentiert und untersucht werden müssen.

Derzeit wird am Institut für Geotechnik der TU Wien ein Forschungsprojekt durchgeführt, bei dem die Einflussparameter auf die Abrasivität von Lockergestein untersucht werden. In weiterer Folge soll, aufbauend auf den LCPC-Versuchsaufbau, ein neuer Index-Versuch entwickelt werden, um die Abrasivität von Lockergestein eindeutig und umfassend zu quantifizieren. Erst dann werden zuordenbare Erfahrungswerte über die Verschleißintensität von Abbauwerkzeugen maschineller Vortriebe im Lockergestein gesammelt werden können. Darauf aufbauend können zielgerichtete Maßnahmen zur Verschleißreduktion und vor allem zur Verhinderung von übermäßigem Primärverschleiß und sekundärem Verschleiß entwickelt werden.

## LITERATURVERWEISE

- [1] Arbeitsblatt DWA A 125 – Rohrvortrieb und verwandte Verfahren, Herausgeber: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.; Hennef, 2008
- [2] ASTM G75-07: Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller number) and Slurry Sbrasion Response of Materials (SAR number)
- [3] Babendererde, L.: Schwachstellen beim Betreiben von Vortriebsmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust: Ursachen, Folgen und Maßnahmen zur Behebung; Tagungsband STU-VA-Jahrestagung in Frankfurt/M. 1999; pp. 78 – 83
- [4] Büchi, E.; Mathier J.-F.; Wyss Ch.: Gesteinsabrasivität – ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein; Tunnel 5/1995, pp. 38 – 44
- [5] Holzhäuser, J.; Nilsen, B.: Abrasivität von Lockergestein bei Tunnelvortrieben – Aktuelle Erfahrungen aus der Baupraxis und Entwicklung eines neuen Laborversuchs; DGGT: Beiträge zur 29. Baugrundtagung in Bremen 2006; pp. 169 – 176
- [6] NF P 18-579: 1990-12 ; Granulats – Essai d’abrasivite´et de broyabilité
- [7] ÖNORM EN 933-5:2005-04-01 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 5: Bestimmung des Anteils an gebrochenen Körnern in groben Gesteinskörnungen
- [8] ÖNORM EN 1097-2: 2006-11-01 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung
- [9] ÖNORM M 8120-1: 1985-12-01, Tribologie, Tribotechnik, Tribosysteme
- [10] ÖNORM M 8120-2: 1985-11-01, Tribologie – Reibung – Begriffsbestimmungen und Einteilung

- [11] ÖNORM M 8120-3: 1987-12-01, Tribologie, Verschleiß
- [12] Österreichische Vereinigung für grabenloses Bauen und Instandhalten von Leitungen: ÖGL Regelwerk – Technische Richtlinie; Rohrvortrieb mit offenem Schild ÖGL TR-101; 2010
- [13] Thuro, K.; Singer, J.; Käsling, H.; Bauer, M.: Abrasivitätsuntersuchungen an Lockergesteinen im Hinblick auf die Gebirgslösung; DGGT: Beiträge zur 29. Baugrundtagung in Bremen 2006; pp. 283 – 290
- [14] Thuro, K.; Käsling, H.: Klassifikation der Abrasivität von Boden und Fels; Geomechanics and Tunneling 2 (2009), pp. 179 – 188