

Mit dem Topf zum Erfolg? Zur Bewertung der Abrasivität von Lockergesteinen mit Indexverfahren und „herkömmlichen“ Bodenkennwerten

Jan Düllmann
Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Deutschland

Michael Alber
Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Deutschland

Ralf J. Plinninger
PG - Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried, Deutschland

Zusammenfassung

Die Beurteilung der Abrasivität von Lockergesteinen ist bis heute nicht vereinheitlicht oder normiert. Verbreitet sind vor allem komplexe Indexverfahren mit stark vereinfachten Modellkörpern und vereinfachten Versuchsrahmenbedingungen, wie z.B. der Drehflügelversuch „LCPC“. Diese Verfahren können aber allenfalls die Wirksamkeit des Verschleißmechanismus abbilden und sind nicht in der Lage, die Festigkeit des Gefügeverbandes als maßgeblichen Einflussfaktor auf die Größe der Beanspruchung, d.h. den Abbauwiderstand zu erfassen. Derartige Indexverfahren besitzen daher keine Vorteile gegenüber Bewertungsverfahren, die auf „herkömmlichen“, bodenmechanischen Kennwerten beruhen. Ganz im Gegenteil implizieren diese, meist „prototypartigen“ Versuche neue, versuchsspezifische Probleme. Der Beitrag stellt daher abschließend einen erweiterten Bewertungsansatz zur Verschleißbewertung von Abbauwerkzeugen sowie der Abförderung bzw. dem Abtransport von gelöstem Abbaugut vor.

1. Einführung

Unerwartet hoher Verschleiß an Abbau- und Bohrwerkzeugen (Bild 1) gehört im maschinellen Tunnelbau und Spezialtiefbau zu den häufigsten Ursachen für geringeren Baufortschritt und damit verbundenen Kostensteigerungen und Mehrkostenforderungen [3].



Bild 1: Beispiel einer verschlissenen Einringdiske

Die Beurteilung der Abrasivität von Lockergesteinen als Basis für Verschleißprognosen ist bis heute nicht vereinheitlicht oder normiert. Unterschiedlichste Prüfverfahren – meist komplexe Indexverfahren mit stark vereinfachten Modellkörpern und vereinfachten Versuchsrahmenbedingungen – haben in der Vergangenheit nach Einschätzung der Autoren öfter für Verwirrung gesorgt, als dass sie aussagekräftige und belastbare Kennwerte geliefert und zur Klärung strittiger Sachverhalte hätten beigetragen können.

Ein weiteres Problem stellen die auf solchen Kennwerten aufbauenden Verschleißprognosen selbst dar, die zumeist empirisch abgeleitet werden und in einem hohen Maße subjektive oder firmeninterne Erfahrungen einbringen, die meist nicht publiziert und allgemein verfügbar sind.

2. Definition von Verschleiß und tribologischen Systemen

Die Grundlagen der Verschleißbeschreibung und der Gliederung von Verschleißsystemen werden im Arbeitsblatt Nr. 7 der Gesellschaft für Tribologie [8] beschrieben. Dieses Arbeitsblatt stellt die Fortschrei-

bung der ehemaligen DIN-Normen der Reihe 50320 dar, die 1997 wegen fehlender turnusmäßiger Überarbeitung zurückgezogen wurden.

Als Verschleiß wird darin der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers definiert, welcher durch mechanische Beanspruchung hervorgerufen wird.

Diese sog. „tribologische“ Beanspruchung kann nicht als stoffbezogene, sondern nur als systembezogene Kenngröße ausgedrückt werden, da es vor allem die Wechselwirkungen der beteiligten Systemkomponenten sind, die für das tatsächliche Verschleißpotential eines Systems relevant sind. Ein solches tribologisches System gliedert sich in ein **Beanspruchungskollektiv**, in dem sämtliche auf das System wirkenden Kräfte zusammengefasst werden, und eine **Struktur**, die sämtliche am System beteiligten Stoffe (Elemente) und deren Eigenschaften beschreibt.

Um eine Aussage zum Verschleißpotential eines Gesamtsystems treffen zu können, müssen zwei Komponenten als Resultat der Wechselwirkungen aus Beanspruchungskollektiv und Struktur bewertet werden können. Dies sind die „Wirksamkeit des Verschleißmechanismus“ und die „Größe der technisch-physikalische Beanspruchung“ (Bild 2).

Bereits bei der theoretischen Betrachtung dieser allgemein anerkannten Zusammenhänge wird also deutlich, dass eine aussagekräftige Angabe zum Verschleißpo-

tential des Gesamtsystems nicht möglich ist, wenn anstatt einer vollständigen Systemanalyse nur eine dieser Komponenten beurteilt wird.

3. Tribologische Systeme im maschinellen Tunnelbau

Der wesentliche Verschleißmechanismus im maschinellen Tunnelbau im Lockergestein mit oder ohne Ortsbruststützung ist entsprechend den Definitionen in [8] die Abrasion.

Auf mögliche „Gewaltschäden“ durch hohe Schlagbeanspruchungen soll in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen werden. Andere Verschleißmechanismen wie Adhäsion, tribochemische Reaktionen oder Oberflächenzerrüttung haben bei diesen Vortriebsverfahren einen allenfalls stark untergeordneten Einfluss.

Bei maschinellen Schildvortrieben mit oder ohne Ortsbruststützung ist die generelle Trennung zweier verschiedener Verschleißsysteme notwendig:

- Verschleiß an **Abbauwerkzeugen** durch den direkten Kontakt zum anstehenden Baugrund (meist als „Abbauverschleiß“ oder „Primärverschleiß“ bezeichnet)
- Verschleiß an **Transport- und Fördereinrichtungen** durch den Kontakt zum bereits gelösten Baugrund (als „Transportverschleiß“ oder „Sekundärverschleiß“ bezeichnet)

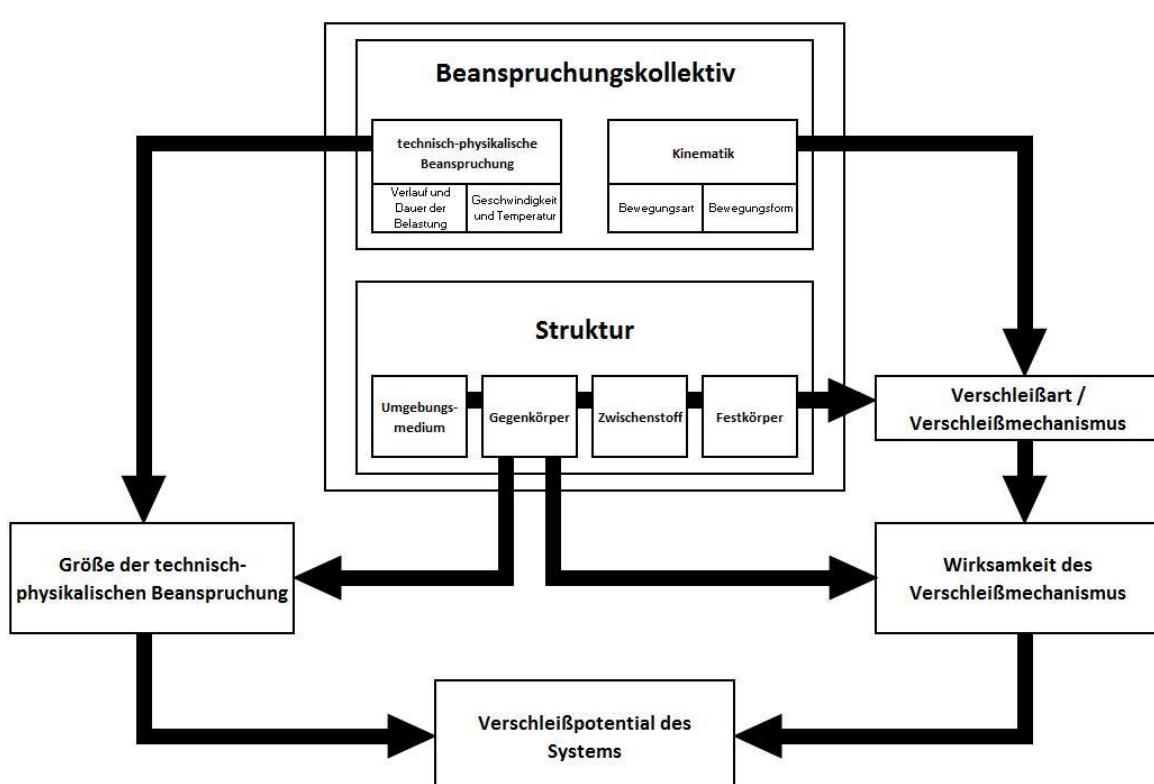


Bild 2: Schematische Darstellung der Komponenten und deren Wechselwirkungen innerhalb eines Verschleißsystems (verändert/ergänzt nach [8])

Die Gemeinsamkeit beider Systeme liegt in der Wirksamkeit des Verschleißmechanismus, sie unterscheiden sich jedoch ganz wesentlich hinsichtlich der Größe der technisch-physikalischen Beanspruchung:

Während im System „**Abbauverschleiß**“ die Kontaktkraft der Werkzeuge zum anstehenden Baugrund die Größe der Beanspruchung vorgibt (u.a. abhängig von den Baugrundeigenschaften), wird diese im System „**Transportverschleiß**“ eher durch die Strömungsmechanik in den Förderwegen, v.a. durch die Strömungsgeschwindigkeiten bedingt.

4. Abrasivitätserfassung für Lockergesteine im Überblick

4.1 Indexversuche zur Abrasivitätsbewertung

Zum Zwecke der (vermeintlich) einfachen und laborgerechten Bewertung der Abrasivität von Lockergesteinen wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungsverfahren vorgeschlagen, die zumeist auf stark vereinfachten Modellversuchssystemen („Verschleißtöpfen“) beruhen.

Das Grundprinzip dieser Verfahren ist die Bestimmung des Materialverlusts eines modellartigen Prüfkörpers, der für eine bestimmte Zeit und unter definiertem Energieeintrag durch eine Bodenprobe bewegt wird. Im deutschsprachigen Raum hat sich insbesondere der auch als „Drehflügelversuch“ bezeichnete LCPC-Test etabliert [16], für den eine französische Prüfnorm vorliegt [1] (Bild 3).

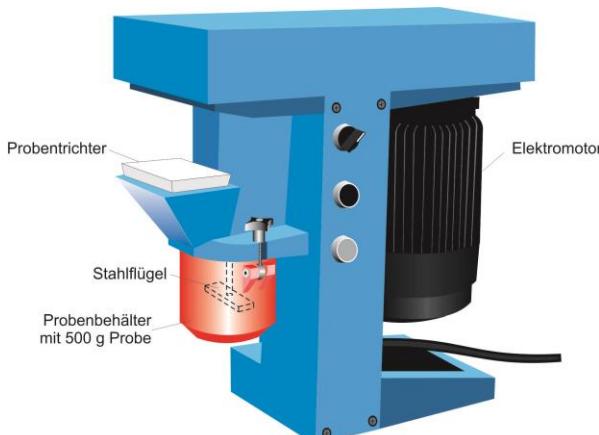


Bild 3: Schematische Darstellung des LCPC-Tests

Beim LCPC-Versuch wird durch die Rotation eines Metallflügels in einer gestörten und hinsichtlich Korngröße, Korngrößenverteilung und Kornform ggf. veränderten Bodenprobe zwar eine definierte Energie in den Prüfvorgang eingebracht, diese steht jedoch mit der tatsächlichen Größe der technisch-physikalischen Beanspruchung im anstehenden (ungestörten) Boden nicht im Zusammenhang.

Auch Versuche mit größeren Volumina oder der Möglichkeit das Probenmaterial künstlich zu verdichten (z.B. „Wiener Abrasimeter“, siehe DRUCKER, [5], [6])

können diese wesentliche Eigenschaft eines Bodens daher nicht abbilden.

Gleiches gilt für die im sog. „Miller-Test“ nach ASTM G75-07 [2], oder im sog. „NTNU Soil Abrasion Test (SAT)“ [17], [18] (Bild 4) ermittelten Kennwerte. Auch diese Versuche sind im günstigsten Fall nur in der Lage, lediglich die Wirksamkeit des Verschleißmechanismus zu bewerten (vgl. Kap. 2).

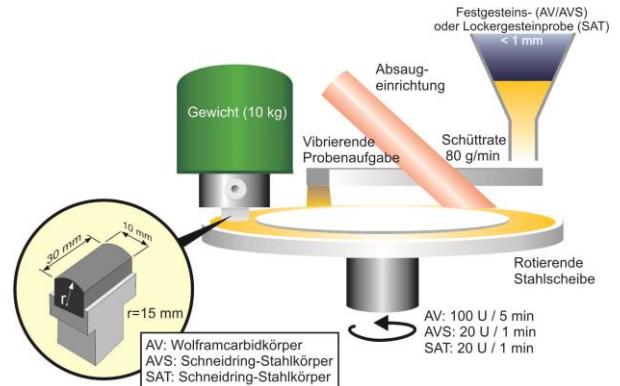


Bild 4: Schematische Darstellung des sog. „NTNU SAT-Tests“

Eine Zusammenstellung von weiteren Bodeneigenschaften und deren Berücksichtigung (bzw. Nichtberücksichtigung) bei derartigen Indexverfahren findet sich am Beispiel des LCPC-Tests in PLINNIGER & RESTNER [15].

4.2 Herkömmliche Bodenkennwerte in der Abrasivitätsbewertung

Hinsichtlich der Wirksamkeit des Verschleißmechanismus stellen Mineralzusammensetzung, Korngröße und Kornrundungsgrad der Komponenten (vgl. DIN 14688-1 [4]) maßgebliche intrinsische Kennwerte dar (siehe HEINRICH, [9]; DRUCKER, [6]). Vereinfacht ausgedrückt steigt die Abrasivität eines Bodens mit steigendem Anteil schleißscharfer Minerale, größerer Korngrößen und eckiger Kornform.

Dies gilt dabei sowohl für das System „Abbauverschleiß“ als auch für das System „Transportverschleiß“, da diese Merkmale bei den hier betrachteten Verfahren beim Lösen der Komponenten aus der Ortsbrust meist nicht nennenswert verändert werden.

Zusätzlich hat auch der Wassergehalt einen erheblichen Einfluss auf das Verschleißpotential (DRUCKER, [6]), dieser Einfluss ist aber bei Vortrieben mit Ortsbruststützung, bzw. auch bei offenen EPB-Vortrieben und hydraulischer Materialförderung zu vernachlässigen, da in der Regel von einem Überangebot von Wasser und gesättigten Zuständen auszugehen ist.

Im System „Abbauverschleiß“ hat vor allem die Festigkeit des Gefügeverbandes (d.h. die Lagerungsdichte bei grobkörnigen Böden und die Scherparameter c und ϕ (bzw. die Konsistenz) bei fein- und gemischtkörnigen

Böden) maßgeblichen Einfluss auf die Größe der Beanspruchung, da sie einen direkten Einfluss auf den Abbauwiderstand hat.

Im System „Transportverschleiß“ sind diese Parameter wiederum hinfällig, da die ursprünglichen Eigenschaften des Gefügeverbandes beim Lösen des Materials vollständig zerstört werden.

Es ist zu vermuten, dass es vor allem diese - bei bisherigen Betrachtungen oft vernachlässigten - Faktoren sind, die dazu führen, dass direkte Abhängigkeiten zwischen der Abrasivität des Bodens und tatsächlichem Werkzeugverschleiß oft nicht erkennbar sind (siehe u.a. KÖHLER ET AL., [12]).

Ein vielsprechender, methodisch auf geotechnisch-mineralogischen Kennwerten aufbauender Ansatz wurde jüngst von KÖPPL & THURO, [13] vorgestellt. Analog zur Bestimmung des sog. „Rock Abrasivity Index (RAI)“ (PLININGER, [14]) 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 allerdings derzeit noch auf idealisierten Annahmen und der Überlagerungshöhe und kann daher ggf. von den natürlichen Verhältnissen abweichen. In ähnlicher Art empfehlen JAKOBSEN ET AL. [11] eine Verknüpfung des SAT-Wertes mit einem geotechnischen Parameter wie der Lagerungsdichte um daraus einen ebenfalls als „Soil Abrasivity Index“ bezeichneten Wert zu erhalten, der so alle relevanten Kennwerte eines Baugrundes berücksichtigen soll.

4.3 Erfahrungen mit dem LCPC-Verfahren

Auch im Rahmen eigener Reihenversuche mit dem LCPC-Verfahren an der Ruhr-Universität Bochum (Dissertation DÜLLMANN, in Bearbeitung) hat sich bestätigt, dass die mineralogische Zusammensetzung der Komponenten (charakterisiert durch den Äquivalenten Quarzgehalt) einen maßgeblichen Einfluss auf das Prüfergebnis des LCPC-Versuchs hat, sofern andere abrasivitäts(mit)bestimmende Eigenschaften unverändert bleiben (Bild 5).

Diese Feststellung bestätigt die Erkenntnisse anderer Untersuchungen (u.a. DRUCKER, [6], S. 55) und widerspricht damit den in KÖHLER ET AL. ([12], Abb. 4, S. 41) dargestellten Erfahrungen, die offenbar auf einem für eine derartige Bewertung nicht ausreichendem Probenset beruhen.

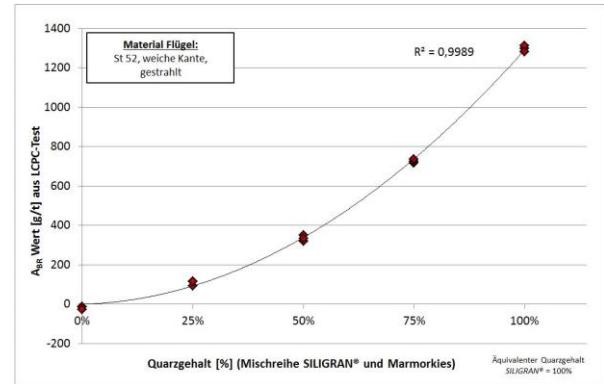


Bild 5: Bodenmechanische Einflussfaktoren auf den LCPC-Verschleißkoeffizient A_{BR} : links: Einfluss des Quarzgehalt (Mischreihe aus SILIGRAN® Quarz und Marmorkies)

Es ist zudem festzustellen, dass Kornform und Korngröße einen zwar weitaus geringeren, aber immer noch feststellbaren Einfluss haben (Bild 6), was ebenfalls in Übereinstimmung mit den in DRUCKER, [6], S. 57 dargestellten Erkenntnissen ist.

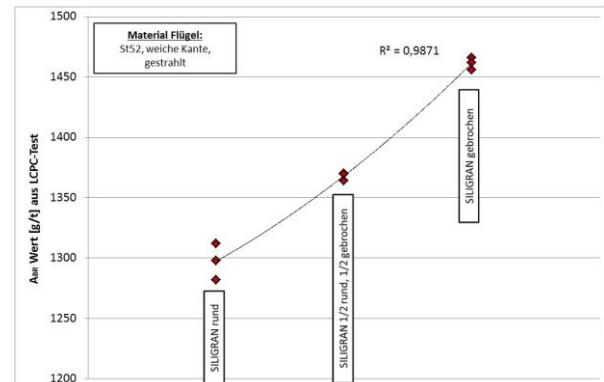


Bild 6: Einfluss der Kornform (Mischreihe aus gebrochenem und gerundeten Korn mit gleicher mineralogischer Zusammensetzung, jeweils dreifache Bestimmung)

Die eigenen Versuche bestätigen also zusammenfassend, dass der LCPC-Test allenfalls die Wirksamkeit des Verschleißmechanismus näherungsweise abbilden kann.

Zusätzlich können allerdings durch nicht standardisierte Prüfmaschinen und Prüfmaterialien Ungenauigkeiten im Ergebnis entstehen, die eine quantitative Bewertung und den Vergleich von Werten aus unterschiedlichen Prüfanstalten erschweren. So können sich z.B. durch die hohe Sensibilität des Ergebnisses gegenüber der Wägung des Prüfkörpers ($\pm 0,05$ g entspricht einer Differenz von ± 100 g/t im Ergebnis) bereits kleine Unterschiede nachteilig auf die Aussagekraft dieses Indexwertes auswirken.

Zusätzlich besteht weiterhin das bereits bekannte Problem, dass durch die Beschränkung des Prüfkornspektrums auf 4 - 6,3 mm ggf. relevante Fraktionen des Bo-

dens (Fraktion $d < 4\text{mm}$) bei der Prüfung nicht berücksichtigt werden.

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

5. Auswertung von 2 Projektbeispielen

Der Vergleich zweier aktueller Projekte soll zeigen, wie unterschiedlich sich verschiedene Bodeneigenschaften auf den Abbauprozess und den Fördervorgang des gelösten Materials auswirken können. Die Eckdaten der beiden bewerteten Projekte sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht über die Projektbedingungen

	Projekt 1	Projekt 2
Schneidrad-durchmesser	ca. 9,5 m	ca. 13 m
Anzahl Schälmesser	172	268
Anzahl Disken / Ripper	54	64
Materialförderung	hydraulisch	hydraulisch
Baugrund	Quartäre Flussablagerungen, Kies und Sand	Quartäre Flussablagerungen, vorwiegend Kies und Sand

5.1 Projektbeispiel 1

Bei den Vortriebsarbeiten des Projektes 1 traten auf dem ersten Bauabschnitt mit ca. 1,3 km Länge wenige bis gar keine Verschleißerscheinungen an der Maschine und den Fördereinrichtungen auf. Die Werkzeugwechsel am Schneidrad beschränkten sich auf zwei im Vorfeld der Baumaßnahme geplante Einstiege an festgelegten Positionen. Unplanmäßige Vortriebsunterbrechungen aufgrund von Verschleißerscheinungen fanden nicht statt.

Eine Übersicht über die Baugrundverhältnisse innerhalb der betrachteten Streckenabschnitte findet sich in Tabelle 2.

Kurz nach Beginn des zweiten Bauabschnitts mit ca. 1 km Länge zeigten sich gravierende Verschleißerscheinungen an den Transport- und Fördereinrichtungen, die nach dem ersten Bauabschnitt nicht erneuert wurden.

Tabelle 2: Projekt 1: Kennwerte aus Laboruntersuchungen während der Bauphase (IST-Geologie)

Kennwert	Projekt 1			n
	Min.	Ø	Max.	
Äquiv. Quarzgehalt Fraktion $< 2\text{ mm}$	85	92	95	9
Anteil (Gew %) von Gangquarz, Sandstein und Grauwacke, Fraktion $> 2\text{ mm}$	84	92	100	17
Anteil (Gew%) Komponenten $> 2\text{ mm}$	19	43	72	24
ABR-Wert [g/t] aus LCPC-Test		~1200		n.A.
Kornrauigkeit (Fraktion $> 2\text{ mm}$)	gerundet bis angerundet			10
Lagerungsdichte aus SPT-Test	mitteldicht			69

Besonders betroffen waren dabei die Förderleitungen, durch die das abgebaute Material hydraulisch von der Maschine zur Separationsanlage geführt wurde. Bereits im Bereich der Maschine musste das Übergangsstück von der Abbaukammer zur Förderleitung mehrfach repariert werden. Mehrere Leckagen in der Förderleitung führten immer wieder zu Vortriebsunterbrechungen und teilweise mehrtägigen Stillständen. Zusätzlich wurde ein hoher Verschleiß an den Düsen der Hydrozyklone dokumentiert, die in der Separationsanlage die Sandfraktion aus dem Suspensionskreislauf abtrennten.

Ein nennenswerter Verschleiß an den Abbauwerkzeugen wurde bis zum Ende des Vortriebs nicht festgestellt. Auf dem 2. Bauabschnitt fanden zwar ebenfalls 3 vorsorgliche bzw. turnusmäßige Werkzeugwechsel statt, der Verschleiß an den ausgebauten Werkzeugen war jedoch trotz des extrem hohen Quarzgehaltes im Baugrund (und des dadurch hohen A_{BR}-Wertes) gering.

5.2 Projektbeispiel 2

Im Zuge der Vortriebsarbeiten für das Projekt 2 wurde eine Reihe unterschiedlicher Verschleißerscheinungen an den Abbauwerkzeugen dokumentiert. Insgesamt fanden auf den hier betrachteten ca. 500 m Vortrieb 8 ungeplante Vortriebsunterbrechungen mit Werkzeugwechseln statt (trotz eines vergleichsweise geringen A_{BR}-Wertes). Besonderes Merkmal dieser Vortriebsabschnitte war eine sehr hohe Lagerungsdichte die bei den Einstiegen dokumentiert wurde. Eine Übersicht über die Baugrundverhältnisse innerhalb der betrachteten Streckenabschnitte findet sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: Projekt 2: Kennwerte aus dem Baugrundgutachten (SOLL-Geologie) und zusätzlichen Laboruntersuchungen während der Bauphase (IST-Geologie) für die Gesteine innerhalb des betrachteten Streckenabschnitts

Kennwert	Projekt 2			n
	Min.	Ø	Max.	
Äquiv. Quarzgehalt Fraktion < 2 mm	33	45	59	18
Karbonatanteil (Gew %) Fraktion > 2 mm	38	55	68	16
Anteil (Gew%) Komponenten > 2 mm	65	72	82	6
A _{BR} -Wert [g/t] aus LCPC-Test	320	523	680	20
Kornrauigkeit (Fraktion > 2 mm)	gerundet bis kantengerundet		n.A.	
Lagerungsdichte aus SPT-Test	mitteldicht bis sehr dicht		46	

5.3 Erkenntnisse aus den Projektbeispielen

Bei der Gegenüberstellung der Verschleißerscheinungen und der Baugrundeigenschaften wird deutlich, dass in Bezug auf den Abbaubeschleiß tatsächlich nicht der Quarzgehalt oder die Kornform alleine die relevanten Faktoren für die Verschleißerscheinungen darstellen, sondern diese stets in Kombination mit dem Abbauwiderstand als Kennwert für die technisch-physikalische Beanspruchung bewertet werden müssen.

Der Unterschied im Abbauwiderstand lässt sich anhand der aufbereiteten Maschinendaten der beiden Projekte verdeutlichen. In Bild 7 sind die vom Stützdruck und anderen Einflüssen bereinigten Schneidradanpresskräfte auf einen Quadratmeter Ortsbrustfläche normiert und dargestellt (spezifische Kontaktkraft Schneidrad SCF).

Während beim Projektbeispiel 1 (Bild 7, oben) ein relativ gleichmäßiger Wert von SCF ~ 10 kN/m² gefahren wurde, zeigt sich beim Projektbeispiel 2 (Bild 7, unten) für den betrachteten Bereich zwischen Tunnelmeter 4800 und 5300 ein Mittelwert von SCF > 30 kN/m². Der Betrag ist dabei unabhängig von der Steuerung der Maschine durch den Schildfahrer, sondern resultiert ausschließlich aus dem Abbauwiderstand des Baugrundes sowie dem Zustand der Abbauwerkzeuge bzw. des Schneidrades (vgl. [7], [10]).

Anders verhält es sich bei der Betrachtung des Transportverschleißes an den Transport- und Fördereinrichtungen. Hier wird deutlich, dass in erster Linie der Quarzgehalt und die Kornform für die Höhe des zu erwartenden Verschleißes verantwortlich zu sein scheinen. Beim Verschleiß in den Transportleitungen sollte ebenfalls die Korngrößenverteilung des gesamten Materials berücksichtigt werden. Für die Separierung sollte

jede Korngrößenfraktion individuell bewertet werden (z.B. Sandfraktion für das System Hydrozyklone).

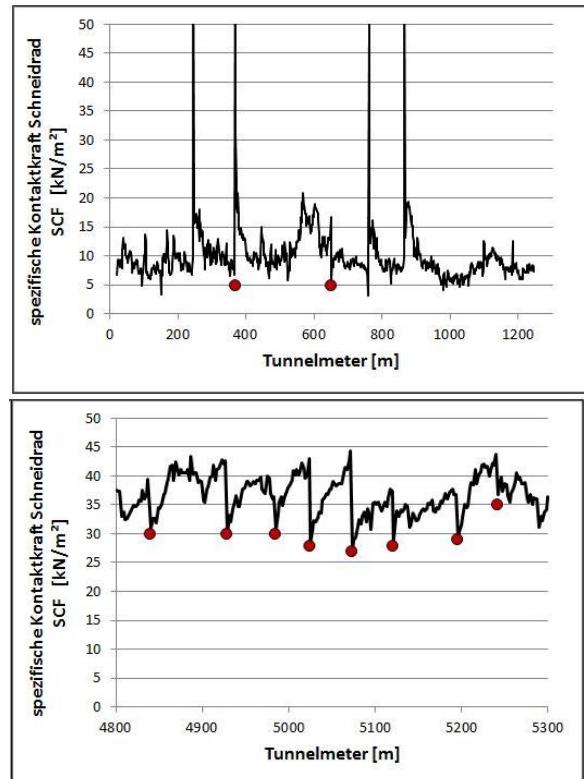


Bild 7: Spezifische Kontaktkraft (SCF) am Schneidrad für Projektbeispiel 1 (oben) und Projektbeispiel 2 (unten) (ergänzt / verändert aus [10]). Punkte markieren Werkzeugwechsel; die auffälligen Peaks in der oberen Grafik stellen Durchfahrten von Betonschlitzwänden dar

6. Fazit

Heute übliche, auf sog. „Verschleißtöpfen“ beruhende Indexverfahren wie z.B. der LCPC-Test oder das „Wiener Abrasimeter“ können allenfalls die Wirksamkeit des Verschleißmechanismus als einen Teil der relevanten Systemeigenschaften näherungsweise abbilden. Die Ergebnisse solcher Indextests werden jedoch durch versuchstechnische Einflüsse, z.B. die Verwendung von gestörten und in seiner Korngröße und Kornform veränderten Bodenmaterials, Flügelgeometrie, Flügelmaterial und Einflüsse des Bedieners beeinträchtigt.

Es erscheint daher durchaus sinnvoll, stattdessen auf „herkömmliche“, in der Regel gut normierte und weitgehend reproduzierbare geotechnisch-mineralogische Kennwerte eines Bodens zurückzugreifen. Hier sind als relevante Kennwerte vor allem der Äquivalente Quarzgehalt, die Kornform und die Korngröße zu nennen.

Für eine aussagekräftige Abrasivitätsbewertung eines Bodens darf dennoch nicht die Größe der technisch-physikalischen Beanspruchung unberücksichtigt bleiben. Dafür ist die Bewertung des Abbauwiderstandes als Funktion tatsächlicher Zustandsgrößen wie z.B. der

Lagerungsdichte sinnvoll. Derartige Angaben finden sich in den meisten Baugrundgutachten (Messergebnisse aus Standard Penetration Tests, SPT oder Rammsondierungen, v.a. DPH) bzw. lassen sich ggf. auch nachträglich anhand von aufbereiteten Maschinendaten grob qualitativ einschätzen [7], [10].

Es ist zu erwarten, dass bei fein- und gemischtkörnigen Böden die Scherparameter (bzw. die Konsistenz) den Abbauwiderstand in ähnlicher Weise steuern, wie die Lagerungsdichte bei grobkörnigen, nichtbindigen Böden.

Für die Beurteilung des Potentials eines Lockergesteins Transportverschleiß zu verursachen, erscheinen die angeführten geotechnisch-mineralogische Kennwerte ebenfalls als grundsätzlich geeignet. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Größe der Beanspruchung hier ihren Ursprung nicht in den Baugrundeigenschaften, sondern viel mehr in den technischen Bedingungen der Förderung (z.B. Strömungsgeschwindigkeiten) hat.

Folgende generelle Aussagen lassen sich nach den beschriebenen Erfahrungen für maschinelle Vortriebe mit oder ohne Ortsbruststützung in Lockergesteinen geben:

1. abgesehen von Gewaltschäden z.B. durch Impakt, ist beim maschinellen Tunnelbau im Lockergestein stets **Abrasion** der relevante Verschleißmechanismus;
2. das Verschleißpotential muss für jedes System individuell **anhand der Wirksamkeit des Verschleißmechanismus zusammen mit der Größe der technisch-physikalischen Beanspruchung** bewertet werden;
3. Indexwerte wie der A_{BR} -Wert oder der SAT-Wert haben **per se** für die Bewertung eines Abbauschleißpotentials **keine Relevanz**, da durch die Verwendung gestörter Bodenproben eine zweite wesentliche Komponente des Systems nicht berücksichtigt werden kann;
4. der anhand herkömmlicher geotechnisch-mineralogischer Parametern berechnete sog. „SAI-Wert“ (KÖPPL & THURO, [13]) stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Eine Verbesserung der Aussagekraft ist allerdings zu erwarten, wenn anstatt einer theoretischen Scherfestigkeit reale Kennwerte und Zustandsgrößen benutzt werden.

7. Ausblick: Integriertes Bewertungsmodell

Als Alternative zur Abrasivitätsbewertung durch einen berechneten Kennwert werden nachstehen zwei graphische Bewertungsdiagramme vorgestellt (Bild 8).

Aus der Bewertung der Wirksamkeit des Verschleißmechanismus (ausgedrückt z.B. durch intrinsische Bodenkennwerte oder aber auch ggf. durch Indexwerte

wie A_{BR} oder SAT) und der Größe der Beanspruchung (z.B. Lagerungsdichte im System Abbauschleiß oder Strömungsgeschwindigkeiten im System Transportverschleiß), lässt sich aus einem der definierten Felder das zugehörige Verschleißpotential des Systems ableiten.

Allerdings gilt auch hier, dass es nicht ein allgemeingültiges Diagramm für sämtliche Systeme geben kann, sondern dass zumindest zwischen Abbau- und Transportverschleiß unterschieden werden muss.

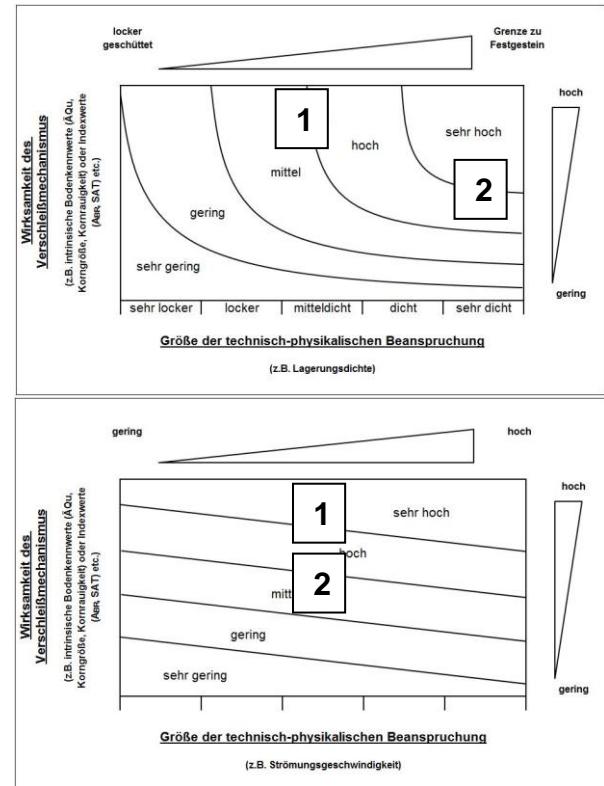


Bild 8: Konzeptuelle Darstellung verbesselter Bewertungsdiagramme für das Potential von Lockergesteinen für Abbauschleiß (oben) und Transportverschleiß (unten). Legende: 1 - Projektbeispiel 1, 2 - Projektbeispiel 2

Da die bisher zur Verfügung stehende Datenbasis gering ist, basieren die Grenzen der einzelnen Bereiche auf wenigen Erfahrungswerten und werden in der Zukunft durch eine intensive Dokumentation von Verschleißerscheinungen und tatsächlichen Baugrundverhältnissen auf möglichst vielen Projekten vor Ort überprüft und angepasst werden müssen.

Die Verfasser sind dennoch zuversichtlich, dass derartige (validierte) Bewertungsdiagramm unter Verwendung der klassischen geotechnisch-mineralogischen Baugrundkennwerte dann aber in der Zukunft ein wichtiges und sinnvolles Hilfsmittel zur Planung und Kalkulation von Tunnelprojekten darstellen.

8. Danksagung

Dieser Aufsatz entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 837 „Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“ an der Ruhr-Universität Bochum. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG.

9. Literatur

- [1] AFNOR – ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION (1990): Norme experimentale P18-579: Granulats – Essaid’abrasivité de broyabilité, 5 S.
- [2] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: ASTM G75-07 Standard test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)
- [3] DAUB – DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR UNTERIRISCHEN BAUEN E.V. (2010): Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. Deutscher Ausschuss für Unterirdisches Bauen (German Tunnelling Committee). Köln, 48 S.
- [4] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2003): DIN EN ISO 14688-1, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2002); Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2002, Berlin, 15 S.
- [5] DRUCKER, P. (2013): Über die Abrasivität von Lockergestein und den Werkzeugverschleiß im Spezialtiefbau, Dissertation TU Wien, 158 S.
- [6] DRUCKER, P. (2012): Abrasivität von Lockergestein und der Werkzeugverschleiß im Tief- und Tunnelbau, Österr. Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 156. Jg., Heft 1-6/2011 und Heft 7-12/2011, S. 1 - 7
- [7] DÜLLMANN, J., HOLLMANN, F.S., THEWES, M. & ALBER, M. (2013): Analysis of Soil-Machine-Interactions (Part 1): Processing of TBM-Machine-Data and Extraction of Excavation-specific Data, 3rd International Conference on Computational Methods in Tunneling and Subsurface Engineering, Ruhr University Bochum, 17-19 April 2013, S. 621 - 634
- [8] GESELLSCHAFT FÜR TRIBOLOGIE E.V. (2002): Arbeitsblatt Nr. 7, Tribologie, Aachen, 52 S.
- [9] HEINRICH, R. (1995): Untersuchungen zur Abrasivität von Böden als verschleißbestimmender Kennwert, Dissertation TU Bergakademie Freiberg, 103 S.
- [10] HOLLMANN, F.S., DÜLLMANN, J., THEWES, M. & ALBER, M. (2013): Analysis of Soil-Machine-Interactions (Part 2): Influences on the Excavation-specific Data of TBM Machine Data, 3rd International Conference on Computational Methods in Tunneling and Subsurface Engineering, Ruhr University Bochum, 17-19 April 2013, S. 635 - 647
- [11] JAKOBSEN, P.D., BRULAND, A. & DAHL, F (2013): Review and assessment of the NTNU/SINTEF Soil Abrasion Test (SATTM) for determination of abrasiveness of soil and soft ground. Tunneling and Underground Space Technology 37 (2013), S. 107 - 114
- [12] KÖHLER, M., MAIDL, U. & MARTAK, L. (2011): Abrasivität und Werkzeugverschleiß beim Schildvortrieb im Lockergestein,- Geomechanik und Tunnelbau, 4: S. 36 - 53
- [13] KÖPPL, F. & THURO, K. (2013): Verschleißprognose für Mix-Schild TVM in Lockergesteinen, Beiträge zur 19. Tagung für Ingenieurgeologie, München 2013, S. 55 - 60
- [14] PLINNINGER, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein.- Münchner Geologische Hefte, Reihe B, 17 - Angewandte Geologie, XI + 146 p., 99 Fig., 36 Tab., München (Hieronymus).
- [15] PLINNINGER, R.J. & RESTNER, U. (2008): Abrasiveness Testing, Quo Vadis? – A Commented Overview of Abrasiveness Testing Methods, Geomechanics and Tunneling 1 (2008), S. 61 –70
- [16] THURO, K., SINGER, J., KÄSLING, H. & BAUER, M. (2006): Abrasivitätsuntersuchungen an Lockergesteinen im Hinblick auf die Gebirgslösung. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: Beiträge zur 29. Baugrundtagung, 27.-29. Sept. 2006 in Bremen, S. 283 - 290.
- [17] NILSEN, B., DAHL, F., HOLZHÄUSER, J. & RALEIGH, P (2006A): Abrasivity testing for rock and soils. Tunnels and Tunnelling International Magazine, 38 (2006), 4, S. 47-49
- [18] NILSEN, B., DAHL, F., HOLZHÄUSER, J. & RALEIGH, P. (2006B): SAT - NTNU’s new soil abrasion test, Tunnels and Tunnelling International Magazine, 38 (2006), 5: S. 43-45