

DIPLOMARBEIT Master Thesis

Orientierungsversuche mit dem TU-Abrasimeter zur Untersuchung von Lockergesteinsabrasivität

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar ADAM

und als verantwortlich mitwirkende Assistentin

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Petra DRUCKER

Institut für Geotechnik

Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik

E220

eingereicht an der Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Bc. Eva Nehybova

0727450

Wien, am 24.10.2011

..... Eva Nehybova

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir beim Erstellen dieser Arbeit durch ihre Unterstützung zur Seite gestanden sind.

Allen voran bei dem Leiter des Instituts für Grundbau, Boden- und Felsmechanik **Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam**, sowie bei meiner Betreuerin **Dipl.-Ing. Petra Drucker**, die mir durch ihre intensive Betreuung sehr geholfen hat.

Auch großer Dank für die Hilfsbereitschaft gebührt den Mitarbeitern des Erdbaulabors bei der Durchführung meiner Laborversuche: Alfred Nitz, Michael Dürmoser Patrick Hackensellner und Gerhard Steinbauer.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mein Studium erst ermöglicht haben, mich all die Jahre hinweg tatkräftig unterstützt haben und meinen Plänen und Wünschen gegenüber immer offen waren.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Freund Marco Fettinger, meiner Schwester Tereza Lokajova und meinem Onkel Zdenek Merta, die mich bei Bedarf liebevoll unterstützten.

Meinem Freund Martin Reinisch danke ich für Ausdauer und Geduld.

Bester Dank gilt auch meinen Kollegen, die mich durch einen spannenden Lebensabschnitt begleitet haben: Martina Dutzler, Thomas Baumgartner, Florian Özkoral, Katrin Haselbauer, Peter Macher und Max Havranek.

KURZFASSUNG

Heutzutage ist der Bauingenieur ständig mit der Aufgabe konfrontiert, schnelle und kostenminimierende Lösungen bei der Planung und Bauausführung zu finden. Dabei ist die Prognose möglichst aller Faktoren, die den Bauablauf behindern könnten, von entscheidender Bedeutung.

Die Abrasivität in Lockergestein stellt vor allem bei Tiefbauarbeiten ein wesentliches Problem dar, da sie nur wenig bekannt ist, jedoch ruft sie beim mechanischen Lösevorgang Verschleiß an den Abbauwerkzeugen hervor, welcher den geplanten Ablauf der Bauarbeiten (z.B. Abnutzung von Abbauwerkzeugen beim Schildvortrieb im Lockergestein etc.) beträchtlich stören kann. Der derzeitige Stand der Versuchstechnik zur Ermittlung der Abrasivität von Lockergestein ist nicht ausreichend. Um diesen lückenhaften Zustand zu ergänzen, wurde das sog. TU-Abrasimeter an der TU Wien entwickelt.

Im Zuge dieser Arbeit wurden erste Orientierungsversuche mit dem TU-Abrasimeter durchgeführt, um die Abrasivität der untersuchten Böden unter Berücksichtigung mehrere Einflüsse auf den Werkzeugverschleiß zu ermitteln.

Den Abschluss dieser Diplomarbeit bildet die Empfehlung einer Vorgehensweise für die Versuchsdurchführung mit dem TU-Abrasimeter zur Bestimmung der Abrasivität von Lockergestein, welche aufgrund der Ergebnisse der Orientierungsversuche abgeleitet wurde.

ABSTRACT

Nowadays, the civil engineer is constantly faced with the task of finding a quick and cost-minimizing solution for design and construction and must be able to prognosticate factors that might impede the building process.

In underground works and foundation engineering, loose rock abrasiveness is one of such factors. Often underestimated, it can nevertheless cause considerable tool wear in the mechanical chipping process (eg. tool wear in shield tunneling in soil) and thus interfere with time schedules of construction works. The current state of experimental equipment for determining the abrasive properties of soils is far from satisfactory. To fill in this gap, the so-called TU-Abrasimeter has been developed at the Vienna University of Technology.

First orientation experiments with the TU-Abrasimeter were carried out in preparation for this thesis with the aim to determine the abrasiveness of analyzed soils, taking into account a number of factors influencing the tool wear.

The output of this thesis, based on the results of orientation experiments, amounts to a recommendation of a method suitable for experimental procedure using the TU-Abrasimeter to determine the abrasiveness of soils.

Inhaltsverzeichnis

1		EIN	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG1					
2		GRUNDLAGEN						
	2.	1	Beg	riffsbestimmungen	. 2			
	2.	.2 Trik		ologische Grundlagen				
		2.2	.1	Allgemeines	. 3			
		2.2	.2	Elemente des tribologischen Systems	.4			
		2.2	.3	Systemanalyse der Verschleißvorgänge	. 5			
		2.2.4		Abrasivverschleiß	11			
		2.2.5		Ablauf von Verschleißprozessen bei der Bodenbearbeitung	13			
		2.2.6		Untersuchungsverfahren13				
		2.2.7		Einflussfaktoren auf die Abrasivität von Lockergestein	15			
	2.3	3	Stand der Technik		23			
		2.3	.1	Versuche zur Bestimmung der Abrasivität	23			
3		ME	тно	DIK BEI DER ABRASIVITÄTSUNTERSUCHUNG	30			
	3.	.1 Allg		emeines	30			
	3.	2	TU-	Abrasimeter	30			
		3.2	.1	Bestandteile des Versuchsgeräts	30			
		3.2	.2	Versuchsvorbereitung	32			
		3.2	.3	Versuchsdurchführung	33			
		3.2	.4	Nach dem Versuch	35			
	3.3	3	LCF	PC – Abrasivitätsversuche	36			
4		OR	IENT	TIERUNGSVERSUCHE MIT DEM TU-ABRASIMETER	37			
	4.	.1 Allg		emeines	37			

4.2 Pro	obematerial	38
4.2.1	Herkunft	38
4.2.2	Korngröße und Korngrößenverteilung	
4.2.3	Rundungsgrad	42
4.2.4	Mineralogie	42
4.3 Ve	rsuchsdauer und Beanspruchungsweg	42
4.4 Ve	rsuchsreihen und ihr Ablauf	43
4.4.1	Versuchsreihe 400/8	43
4.4.2	Versuchsreihe 400/9	45
4.4.3	Versuchsreihe 400/10	47
4.4.4	Versuchsreihe 400/11	48
5 ERGE	BNISSE DER ORIENTIERUNGSVERSUCHE	50
5.1 Alle	gemeines	50
5.2 Sie	ebungen – Zerkleinerung des Probematerials	50
5.3 Ve	rschleiß	57
5.3.1	Einfluss der Versuchsdauer	60
5.3.2	Einfluss der Probemasse und der Auflast auf den Verschleiß	62
5.3.3	Einfluss der Kornverteilung auf den Verschleiß	74
5.3.4	Einfluss der Länge der Drehwelle	78
5.4 Ve	rgleich mit LCPC-Abrasivitätsversuchen	82
6 SCHLU	JSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK AUF ZUKÜNFTIGE FORSCHUNG	86
6.1 Fel	hlerquellen, die eine zuverlässige Ergebnisinterpretation erschweren	86
6.1.1	Konstruktion des Auflastrings	86
6.1.2	Einhaltung der Versuchsdauer	87

	6.1.3 Ermittlung der Sieblinie							
	6.1.4	Oxidschicht (Zunder) an den Drehflügeln	87					
6	.2 Em	npfehlungen für zukünftige Versuchsdurchführung	88					
	6.2.1	Probemasse	88					
	6.2.2	Auswahl der Welle	88					
	6.2.3	Versuchsdauer	89					
	6.2.4	Abrasivgut	90					
7	ZUSAM	MMENFASSUNG	91					
8	LITERATURVERZEICHNIS							
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS							
10	TABELLENVERZEICHNIS							
11	ANHAN	ANHANG102						
1	11.1 Korngrößenverteilungen							
	11.1.1	Probekörnung 400/8	102					
	11.1.2	Probekörnung 400/9	107					
	11.1.3	Probekörnung 400/10	108					
1	1.2 Fot	tos	109					

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Problematik des Verschleißes in Lockergestein. Die Abrasivitätseigenschaften von Lockergestein sind im Gegensatz zum Festgestein nur wenig bekannt, obwohl auch hier ein wesentlicher Verschleiß an den Bohr-, Fräs- und Schneidwerkzeugen auftreten kann. Sowohl die relevanten Eigenschaften von Böden (z.B. Korngröße, Inhomogenität des Gefüges, Gesamtporosität, mineralogisch-petrographische Zusammensetzung), als auch die weiteren Einflüsse auf den Werkzeugverschleiß (z.B. Kontaktdruck, Mengendurchsatz) sind jedoch nur schwer zu quantifizieren. In der letzten Zeit hat es sich allerdings als notwendig gezeigt, diese Eigenschaften zu untersuchen, um die Kosten und unakzeptable Risiken (Baugrund-, Kalkulations- und Planungsrisiko) zufolge Verschleiß bei Tiefbauarbeiten in Lockergestein (Tunnelvortrieb mit Schildmaschinen, beim Herstellen von Pfählen usw.) überhaupt erst abschätzen und reduzieren zu können.

Die Abrasivität ruft nicht nur Materialverschleiß, verbunden mit Abstumpfung hervor, sondern behindert auch den Ablauf von Bauarbeiten und verursacht z.T. aufwendige Wartungs- und Reparaturarbeiten. Die gesamte Baudauer kann sich somit verlängern, was ggf. einen nennenswerten Kostenfaktor darstellt.

Der derzeitige Stand der Technik bei der Quantifizierung von Abrasivität in Lockergestein ist nicht ausreichend. Aus diesem Grund wird am Institut für Geotechnik der TU Wien ein neuer Versuchsaufbau (TU-Wien Abrasimeter) entwickelt und im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden erste Orientierungsversuche damit durchgeführt. Die gegenständliche Arbeit beschränkt sich auf die Untersuchung von Kiesen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die wesentlichen versuchstechnischen Randbedingungen (Probenmenge, Auflastgewicht, Länge der Welle und Versuchsdauer), welche die Versuchsergebnisse mit dem TU-Abrasimeter beeinflussen, zu untersuchen, um eine ideale Vorgehensweise für die Versuchsdurchführung zu ermitteln. Darüber hinaus werden auf diese Weise auch generelle Einflussfaktoren auf den Verschleiß durch körniges Abrasivgut (z.B. Korngröße) im Labormaßstab untersucht.

Als Ergebnis dieser Diplomarbeit soll ein Vorschlag erarbeitet werden, mit welchen Randbedingungen der TU-Abrasimeterversuch zukünftig durchgeführt werden soll.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Begriffsbestimmungen

Lockergesteine sind Böden im eigentlichen Sinne. "Boden ist ein Gemisch aus mineralischen Bestandteilen, entstanden durch Ablagerung, fallweise auch organischen Ursprungs (siehe Abbildung 2.1). Das Korngemisch kann mit geringem mechanischem Aufwand separiert werden und enthält unterschiedliche Anteile von Wasser und Luft." [1]



Abbildung 2.1: Gliederung der Lockergesteine nach [1]

Mineralböden werden weiter in nichtbindige (Steinböden, Schotterböden, Kiesböden und Sandböden), schwachbindige (Schluff, Löss, Lehm, Mergel; tonige, lehmige, mergelige Sande) und bindige (Tonböden, Lehmböden, Sandböden) unterteilt. Ihre innere Zusammensetzung wird durch die Ausgangsfestgesteine bestimmt. Die Grundlage für die Benennung mineralischer Böden bildet die Korngröße.

Die Böden organischen Ursprungs gliedern sich in Humusböden (Moorböden, Torf, Flachmoor, Hochmoor) und Faulschlammböden (faulschlammhältige Sande und Tone).

Zu Böden zählt man auch künstlich hergestelltes Material (z.B. zerkleinertes Gestein, Flugaschen), weil es ein ähnliches Verhalten aufweist. [1, 6]

"Abrasivität ist die Eigenschaft eines Gesteins, beim Bohren am Bohrwerkzeug Verschleiß auszuüben." [19]

"**Tribologie** ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß." [7]

"**Reibung** ist eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern. Sie wirkt einer Relativbewegung entgegen." [7]

"Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch tribologische Beanspruchungen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers." [7]

"Ein **Tribologisches System** (Tribosystem) beinhaltet alle an einer tribologischen Beanspruchung beteiligten stofflichen Komponenten und ihre Eigenschaften mit den sich bei ihnen ergebenden Veränderungen sowie die für die Beanspruchung charakteristischen Vorgänge und Größen." [7]

2.2 Tribologische Grundlagen

2.2.1 Allgemeines

Verschleiß ist in der Technik eine unvermeidbare Erscheinung, übermäßiger Verschleiß ist jedoch in der Regel unerwünscht und wertmindernd. Das gilt auch für die Werkzeuge im Tiefbau generell und bei der Großbohrtechnik im speziellen.

Im Maschinenbau dient die Analyse der Verschleißvorgänge zur Optimierung von Reibungsbedingungen (Schmierung, optimale Formgebung der Maschinenteile) und somit zur Verschleißminimierung.

Im Gegensatz zu den stoffbezogenen Werkstoffkennwerten wie Zugfestigkeit oder Druckfestigkeit, handelt es sich im Zusammenhang mit tribologischer Beanspruchung um das Zusammenwirken aller am Verschleißvorgang beteiligten Teile einer technischen Konstruktion. Die Beschreibung so eines Systems wird dadurch logischerweise viel komplizierter. Beim Verschleiß spricht mal also immer von einem systembezogenen Kennwert [7, 4].

Das tribologische System muss komplex betrachtet werden, gleichzeitig gibt es aber mehrere Möglichkeiten, wie man die einzelnen Prozesse im System erfasst. Es sollen möglichst viele am Verschleißvorgang beteiligten Parameter berücksichtigt werden, damit große Abweichungen von echten Prozessen vermieden werden können [7].

2.2.2 Elemente des tribologischen Systems

"Die am Verschleiß unmittelbar beteiligten Bauteile werden als Elemente des tribologischen Systems bezeichnet." [7] Ein Tribosystem (Abbildung 2.2) besteht aus einem **Grundkörper** (z.B. Abbauwerkzeug), einem **Gegenkörper** (z.B. Boden), in der Regel aus einem **Zwischenstoff** (z.B. Schmierstoff, Bentonitsuspension) und dem **Umgebungsmedium** (Luft, Wasser). Die Struktur eines Tribosytems wird durch die tribologisch wichtigen Eigenschaften und die Wechselwirkungen bestimmt. Neben der Struktur sind von außen einwirkende Belastungsgrößen, **Beanspruchungskollektiv** genannt, maßgebend. Beim Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Struktur des Tribosystems tritt Verschleiß auf, der durch **Verschleißkenngrößen** charakterisiert wird. [7]

Das **Beanspruchungskollektiv** ist "Gesamtheit der auf die Elemente des Tribosystems von außen einwirkenden Beanspruchungsgrößen" [7]. Die Struktur, das Beanspruchungskollektiv und ihre Wechselwirkungen bestimmen unmittelbar das Verhalten des tribologischen Systems.

Die **Verschleißkenngrößen** (ein Überbegriff für Verschleißerscheinungsformen und Verschleiß-Messgrößen) "beschreiben den in einem tribologischen System auftretenden Verschleiß, der sich durch das Einwirken des Beanspruchungskollektivs auf die Systemstruktur ergibt." [7]

"Unter **Verschleißerscheinungsformen** versteht man die sich durch Verschleiß ergebenden Veränderungen der Oberflächen eines Körpers sowie die Art und Form der entstandenen Verschleißpartikel." [7]

Die **Verschleiß-Messgrößen** kennzeichnen direkt oder indirekt die Änderung der Gestalt oder der Masse eines Körpers durch Verschleiß." [7]



Abbildung 2.2: Schema eines tribologischen Systems nach [7]

2.2.3 Systemanalyse der Verschleißvorgänge

Die Systemanalyse dient dazu, vorhandene Verschleißvorgänge zu erfassen und zu analysieren. Sie umfasst die folgenden Punkte [7]:

- a. Kennzeichnung der technischen Funktion des Tribosystems
- b. Angabe des Beanspruchungskollektivs
- c. Kennzeichnung der Struktur durch:
 - > am Verschleiß beteiligte Elemente
 - Eigenschaften der Elemente
 - Wechselwirkung der Elemente
- d. Verschleißkenngrößen

2.2.3.1 Funktion

Es gibt mehrere technische Funktionen (z.B. Materialbearbeitung, Materialtransport usw.), welche von Tribosystemen erfüllt werden können. Bei der Analyse von Verschleißvorgängen wird die technische Funktion berücksichtigt. Beispielweise kann die Funktion "Bodenbearbeitung" durch folgendes Tribosystem abgebildet werden:

- das Abbauwerkzeug als Grundkörper
- der Boden als *Gegenkörper*
- die Bentonitsuspension als Zwischenstoff oder ohne Zwischenstoff
- Luft oder Wasser als Umgebungsmedium

Das wirksame Beanspruchungskollektiv ist vom angewendeten Bauverfahren (z.B. Drehbohren, Greiferschlitzwand, maschineller Tunnelvortrieb, usw.) bestimmt.

2.2.3.2 Beanspruchungskollektiv

Die Belastungen, die auf ein System einwirken sind charakterisiert durch [7]:

- Kinematik (die *Bewegungsform* und der *zeitliche Ablauf*)
- technisch-physikalische Beanspruchungsparameter

Bei Verschleißvorgängen treten vier Bewegungsformen und ihre Überlagerungen auf:

- Gleiten
- Rollen
- Stoßen
- Strömen

Der zeitliche Bewegungsablauf der Elementar-Bewegungsformen kann sein:

- kontinuierlich
- oszillierend
- und/oder intermittierend

Die bei Verschleißvorgängen maßgebenden Beanspruchungsparameter sind:

- Normalkraft F_N
- Geschwindigkeit v
- Temperatur T
- Beanspruchungsdauer t_B

Es können noch weitere zusätzliche Beanspruchungsgrößen vorkommen, die unerwünscht sind – sog. **Störgrößen** (z. B. äußere mechanische Schwingungen, Strahlung). Diese müssen gesondert berücksichtigt werden, weil sie den Verschleißvorgang wesentlich beeinflussen können [7].

2.2.3.3 Struktur tribologischer Systeme

Wie schon im vorigen Textabschnitt erläutert, sind nicht nur die **Eigenschaften der Werkstoffe**, sondern vor allem **die Wechselwirkung** der einzelnen Elemente zueinander bestimmend für das Gesamtverhalten des Systems. Die Wechselwirkungen zwischen Grundkörper und Gegenkörper lassen sich beschreiben durch [7]:

- den Kontaktzustand (trocken, geschmiert, rau, glatt etc.)
- den Reibungszustand
- die Verschleißmechanismen

"Unter **Verschleißmechanismen** versteht man die beim Verschleißvorgang ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse." [7]

Unter anderem muss man beachten, dass jeder technische Werkstoff senkrecht zur Oberfläche einen Schichtaufbau besitzt. Bei metallischen Werkstoffen weist die oberste Schicht häufig andere Eigenschaften auf als der eigentliche Grundwerkstoff, was Verschleißanalysen komplizierter macht [7].

Reibungszustand

Auch wenn eine Gliederung des Verschleißgebietes nach Reibungszuständen kompliziert ist und kaum alle Reibungszustände umfasst, hilft die Angabe von Reibungszuständen die Verschleißvorgänge besser zu verstehen [7].

Reibung in Abhängigkeit vom Bewegungszustand:

- Haftreibung (die angreifenden Kräfte sind nicht ausreichend, um eine Relativbewegung zu bewirken)
- Bewegungsreibung (Reibung zwischen Kontaktpartner in Relativbewegung zueinander)

Reibung in Abhängigkeit vom Aggregatzustand des Reibpartners:

- Festkörperreibung
- Mischreibung

- Flüssigkeitsreibung
- Gasreibung

Verschleißarten und Verschleißmechanismen

"Verschleißvorgänge können nach Art der Bewegung, der tribologischen Beanspruchung oder der Systemstruktur durch verschiedene **Verschleißarten** unterschieden werden. Sie verweisen auf die Verschleißursachen, die im Zusammenspiel der Art der tribologischen Beanspruchung (insbesondere der Kinematik) mit der Systemstruktur, begründet sind." [7]

Man kann die Verschleißarten – je nach Kenntnis über das Tribosystem – nach *den Bewegungsformen* (Gleitverschleiß, Wälzverschleiß, Prallverschleiß, Schwingungverschleiß), nach *den beteiligten Stoffen* (Korngleitverschleiß, Partikelgleitverschleiß, Flüssigkeitserosion) oder *den Wechselwirkungen bzw. wirksamen Mechanismen* (Abrasivverschleiß, Ermüdungsverschleiß) kennzeichnen.

Es werden folgende Hauptverschleißmechanismen (Abbildung 2.3) unterschieden [1, 7]:

- Adhäsion Da technische Oberflächen nie ideal glatt sind, bilden sich lokal auf den Grenzflächen Haftverbindungen aus. Durch nachfolgende Trennung der Haftverbindung tritt außerhalb der ursprünglichen Grenzflächen im Material mit geringerer Festigkeit Verschleiß auf (Materialübertrag).
- Abrasion Harte Abrasivstoffe oder auch abgetrennte Partikel dringen unter Last in den weicheren Feststoff ein und gleiten über dessen Oberflächen, was zu einem Materialabtrag führt.
- Oberflächenzerrüttung Durch tribologische Wechselbeanspruchungen oder zyklische Beanspruchung kommt es in Oberflächenbereichen zu Ermüdung und Rissbildung, die zu Materialtrennungen und -abtragungen führen.
- tribochemische Reaktionen Durch die tribologische Beanspruchung werden chemische Reaktion aktiviert bzw. gefördert.

Der Kenntnis dieser Mechanismen kommt bei der Werkstoffauswahl und bei der Beurteilung von Verschleißerscheinungsformen besondere Bedeutung zu [23].

Mechan	lismus	Kennzo	Merkmal	
Adhä	sion			Vertiefungen, Riefen, Risse, Werkstoff- übertrag, Verformung, Gefügeänderung
Abras	sion			Riefen, Span, Wall, Mulden, Wellen, Verformung, Gefügeänderung
Oberflächen	zerrüttung			Verformung, Risse, Grübchen, Gefügeänderung
Tribo- chemische und/oder	Reaktions- schicht- bildung	+ !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!		Schichtbildung, Oxidation
tribo- physikalische Reaktionen	Ablation			Verdampfen, Ausgasen, Zersetzen

Abbildung 2.3: Verschleißmechanismen bei tribologischer Beanspruchung [23]

Bei jedem Verschleißvorgang können verschiedene Verschleißmechanismen gleichzeitig wirksam werden, so dass bei ein und derselben Verschleißart unterschiedliche Verschleißerscheinungsformen auftreten können. "In Abhängigkeit von der tribologischen Beanspruchung und den am Verschleiß beteiligten Stoffen können klarerweise sowohl die Verschleißarten als auch die Verschleißmechanismen in Kombination auftreten."[7] Eine scharfe Trennung der Prozesse ist dadurch häufig sehr schwierig, in vielen Fällen praktisch unmöglich.

Die Gliederung des Verschleißgebietes stellt Tabelle 2.1 dar. Bei den Verschleißfragestellungen die in der Baupraxis überwiegend auftreten ist der **Abrasivverschleiß** vorherrschend, weshalb im Kapitel 2.2.4 detailliert darauf eingegangen wird.

					Wirkende Mechanismen ● vorherrschend ○ untergeordnet			
Elemente der Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung		Verschleißart	Beispiele	Ad- hä- sion	Abra -sion	Ober- flächen- zer- rüttung	Triboche- mische Reak- tionen
Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Flüssigkeit) Gegenkörper 2	Gleiten Rollen Wälzen		Gleit- verschleiß, Wälz- verschleiß	Gleitlager, Wälzlager, Zahnräder, Nockenwellen	(0)	(0)	•	0
	Gleiten		Gleit- verschleiß	Führungsbahnen, Zylinderbüchsen	٠	0	0	•
Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Verschleiß-	Rollen Wälzen		Roll- verschleiß, Wälz- verschleiß	Wälzlager, Zahnräder, Nockenwellen, Rad/Schiene	0	0	•	٠
partikel, Flüssig- keitsreste, Gase oder Vakuum) Gegenkörper 2	Oszillieren		Schwingungs- verschleiß	Passflächen, Lagersitze	٠	٠	٠	٠
	Stoßen		Stoß- verschleiß	Ventilnadeln	0	0	•	•
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Festgestein	Stoßen	¢₽₽	Zweiköper-	Prallplatten, Schlagmühlen	0	٠	•	0
Stückgut, Schütt- gut)	Gleiten		verschleiß	Baggerschau- feln, Schurren, Gesteinsbohrer	0	•	0	(0)
Grundkörper 1	Gleiten			Verunreinigung in Lagern und Führungen	0	•	٠	0
Zwischenstoff 3 (Stückgut, Partikel)	Wälzen		Dreikörper- Abrasiv- verschleiß	Wälzmühlen	0	•	•	0
Gegenkorper 2	Stoßen			Backenbrecher	0	•	•	(0)
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Flüssigkeit mit Partikeln)	Strömen		Hydroerosiv- (hydroabra- siv)verschleiß	Pumpen, Trans- portleitungen	(0)	•	•	0
Grundkörper 1 Gegenkörper 2	Strömen		Gleitstrahl- verschleiß	pneumatische	0	٠	٠	0
(Gas mit Partikeln)	Gleiten Stoßen		Schrägstrahl-, Prallstrahl- verschleiß	Förderanlagen	0	•	•	0
	Strömen Schwingen		Kavitations- erosion	Pumpen, Ventile, Wasserturbinen			٠	0
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Flüssigkeit)	Stoßen Gleiten		Tropfen- schlagerosion	Rotorblätter, Dampfturbinen			٠	0
	Strömen		Flüssigkeits- erosion	Pumpen, Ventile, Rohrleitungen		(0)	0	•
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Gas)	Strömen		Gaserosion	Gasturbinen, Hitzeschilde				٠

Tabelle 2.1: Gliederung des Verschleißgebietes [23]

2.2.3.4 Verschleißkenngrößen

Die Verschleißkenngröße ergibt sich für jedes Tribosystem als eine Funktion von Beanspruchungskollektiv und Systemstruktur: [7]

Verschleißkenngröße = f (Beanspruchungskollektiv, Systemstruktur)

Die Verschleißkenngrößen gliedern sich in Verschleißerscheinungsformen (z.B. Furchen, Kratzer, Wellen...) und die Verschleißmessgrößen (z.B. Flächenänderung, Volumenverlust, Masseverlust etc.)

2.2.4 Abrasivverschleiß

Der Abrasivverschleiß kann weiter unterteilt werden in:

- **Zweikörper-Abrasivverschleiß** (two body abrasion)
- **Dreikörper-Abrasivverschleiß** (three body abrasion)

Was die Fragestellungen des Bodenabbaus betrifft, kann die Verschleißart als Zweikörper-Abrasivverschleiß bezeichnet werden, wo das Abbauwerkzeug im Sinne des tribologischen Systems der Grundkörper ist und das Lockergestein (Abrasivstoff) die Funktion des Gegenkörpers übernimmt (siehe *Tabelle 2.1*). Die Mineralien sind aufgrund ihrer Härte in der Lage, die Metallteile zu furchen oder zu ritzen, wobei die Adhäsion auch eine Rolle spielt [23].

"Der Zweikörper-Abrasivverschleiß gliedert sich weiter in *Abrasiv-Gleitverschleiß* und *Erosion*. Abrasiv-Gleitverschleiß steht für eine Beanspruchung durch Festgestein, stückiges Gut (gebundene Körner) oder Kornschüttungen (verdichtet oder als lose Körner). In der genannten Reihenfolge nimmt die Beanspruchung im Allgemeinen ab, wobei die Kornschüttungen einen fließenden Übergang zur Erosion bilden." [23] Von Erosion spricht man, wenn der Grundkörper durch einzelne in einem Trägermedium (Gas, Flüssigkeit) transportierte Körner beansprucht wird. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Beanspruchungsarten sieht man auf Abbildung 2.4:

Zweikörper-Abrasivverschleiß



Dreikörper-Abrasivverschleiß



Abbildung 2.4: Beanspruchungsarten beim Abrasivverschleiß [23]

a) Abrasiv-Gleitverschleiß (gebundenes Korn)

Die Körnen befinden sich in einer festen Bindung (Festgestein, verdichtete Schüttung) und führen eine reine Gleitbewegung aus.

- b) Übergang von Abrasiv-Gleitverschleiß zu Erosion (Kornschüttung, lose Körner)
 Die Körner gleiten an der Oberfläche entlang, wobei sie auch eine Rollbewegung ausführen können.
- c) Erosion (einzelne Körner)

Die Körner werden mittels eines Mediums (Gas, Flüssigkeit) oder durch Fliehkräfte transportiert und beanspruchen dynamisch die Oberfläche des Grundkörpers.

Die abrasiven, losen (kohäsionslosen) Körner besitzen hohe Beweglichkeit, wirken dadurch auf die Oberfläche des Metallteiles gleitend, rollend und stoßend und verursachen somit in uneinheitlicher Richtung Riefen und Eindrückungen. Diese Erscheinungsformen werden nach [23] von mehreren Parametern beeinflusst (Beanspruchungshöhe, Beweglichkeit der Körner, Korngröße, Härteverhältnis Abrasivstoff-Werkstoff, Gefüge – heterogen, homogen usw.) und sind sehr vielfältig, vor allem im mikroskopischen Bereich. "Für das Eindringen des Abrasivs ist der Härteunterschied zwischen Abrasivstoff und Grundkörperstoff entscheidend, für das Abscheren der Späne die Festigkeit und Zähigkeit des Grundkörpers (Materialabtrag)." [21] Körnige Abrasivstoffe erzeugen auf der Oberfläche homogener Werkstoffe unregelmäßig angeordnete Riefen verschiedener Länge und Breite. Diese sind aber weniger tief als im Fall des Festgesteins (gebundenes Korn). Eindrückungen weisen darauf hin, dass die Körner auch Roll- und Stoßbewegungen ausführen [23].

2.2.5 Ablauf von Verschleißprozessen bei der Bodenbearbeitung

Der Werkzeugverschleiß läuft nach [9] in zwei Phasen ab, die bei der Interpretation der Ergebnisse eine wichtige Rolle spielen, nämlich:

- Einlaufphase des Verschleißes
- Stationäre Phase des Verschleißes

In der sog. Einlaufphase passt sich das Werkzeug an die wirkenden, äußeren Beanspruchungen (Kontakt mit dem abrasiven Boden, Auflast etc.) an. Nach einer gewissen Zeit stellt sich ein Gleichgewicht zwischen aufzubringenden Belastungen des Werkzeuges und der Bodenfestigkeit ein, welches sich durch eine konstante Werkzeugform (Abrundung der Schneide) auszeichnet. "Unter Einlaufphase versteht man den Zeitraum bis zum Erreichen konstanter Verschleißabträge pro zurückgelegten Reibweg" [9]. Anders gesagt gelangt das System in die stationäre Phase wenn die Verschleißintensität konstant bleibt. Aufgrund der Unsicherheiten in der Einlaufphase (es kommt zu größeren Verschleißabträgen) sind Verschleißmessungen nach [9] generell nur in der stationären Phase sinnvoll. Die Dauer dieser Phase hängt von den beteiligten Elementen und den Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung ab und ist für jedes System anders [9].

2.2.6 Untersuchungsverfahren

Die Abrasivität des Bodenmaterials ist über den am Grundkörper (Werkstoff) entstandenen Verschleiß messbar. Zur Bestimmung der Abrasivität gibt es zwei konventionelle Verschleißversuchstechniken (Abbildung 2.5), die je nach Kornbindung des Gegenstoffes ausgewählt werden. Versuche mit losem Abrasivgut werden im Verschleißtopf durchgeführt, gebundenes Korn wird gewöhnlich mit dem Schleifpapierversuch geprüft [9].

Der sog. Verschleißtopfversuch besteht aus einem (Stahl-) Gefäß, in welches das lose Abrasivgut gefüllt wird, und einem Werkstück (Drehflügel), welches sich (zumeist rotierend) durch das Abrasivgut bewegt. Es lassen sich auch weitere Einflüsse, z.B. Befeuchtung oder umgebendes Medium untersuchen [26].

Im Gegensatz dazu wird bei Schleifpapierversuchen ein Werkstück über die Oberfläche des Schleifpapiers bewegt. Die Mineralkörner, fest auf dem Schleifpapier gebunden, können nicht ausweichen, so dass der überwiegende Mechanismus der Abrasivverschleiß ist [26]. Die Körner müssen auf dem Schleifpapier gleichmäßig verteilt werden, damit sie alle an dem Verschleißvorgang beteiligt sind.



Abbildung 2.5: Schema eines Verschleißtopfversuchs (links) und Schleifpapierversuchs (rechts) [9]

Während der Versuchsdurchführung kommt es zur Änderung von Gestalt und Masse des verschleißenden Werkstücks. Diese Änderung wird über mehrere Verschleiß-Messgrößen ermittelt [7, 9]:

- Längenänderung W₁ [m] linearer Verschleißbetrag
- Flächenänderung W_q [m²] planimetrischer Verschleißbetrag
- Volumenänderung W_v [m³] volumetrischer Verschleißbetrag
- Massenänderung W_m [kg] massenmäßiger Verschleißbetrag

Grundsätzlich kann zwischen direkten, bezogenen und indirekten Verschleißmessgrößen unterschieden werden.

Direkte Verschleiß-Messgrößen sind jene Messgrößen, die an dem Grundkörper gemessen wurden (z.B. Volumenverslust, Massenverlust etc.).

Da die direkten Messgrößen für sich allein oft nicht genug aussagekräftig sind (z.B. zum Vergleich von unterschiedlichen Tribosystemen), können bezogene Verschleiß-Messgrößen (Verschleißraten) aus den direkten abgeleitet werden. Diese ergeben sich aus dem Verhältnis des Verschleißbetrages (beispielweise Massenänderung W_m) zu weiteren Bezugsgrößen, z.B. [7]:

Die Verschleißgeschwindigkeit v_M ist nach [7] als Verschleißbetrag W_M bezogen auf Beanspruchungsdauer **t** definiert:

$$v_M = \frac{W_M}{t} \left[\frac{kg}{min} \right]$$

Die Verschleißintensität I_M (Verschleiß-Weg-Verhältnis) stellt nach [7] die Ableitung des Verschleißbetrages W_M nach Beanspruchungsweg s dar:

$$I_M = \frac{W_M}{s} \left[\frac{kg}{m} \right]$$

Das Verschleiß-Durchsatz-Verhältnis stellt nach [7] die Ableitung des Verschleißbetrages W_M nach dem Volumen, Masse oder Anzahl der Körper **z**, durch welche die Beanspruchung hervorgerufen wird, dar:

$$D_{M} = \frac{W_{M}}{z} \left[\frac{kg}{m^{3}} \right], \left[\frac{kg}{kg} \right], \left[\frac{kg}{Stk} \right]$$

Zwischen diesen Messgrößen und der Abrasivität des Bodens besteht eine direkte Abhängigkeit, die unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren auf das Tribosystem (z.B. Verschleißtopf) quantifiziert werden kann. [9]

Die indirekten Verschleiß-Messgrößen beruhen auf der Messung der Dauer oder des Durchsatzes, wonach das Werkstück oder Tribosystem seine Funktion nicht mehr erfüllen kann. Zu den indirekten Messgrößen zählen z.B. [7]:

- Verschleißbedingte Gebrauchsdauer T_w [h]
- Gesamt-Gebrauchsdauer T_G [h]
- Verschleißbedingte Durchsatzmenge [m³], [kg], [Stk]

2.2.7 Einflussfaktoren auf die Abrasivität von Lockergestein

Die Abrasivität von Lockergestein unterliegt einer Vielzahl von Einflüssen und ist von den Eigenschaften des konkreten Bodens abhängig: [4, 9]

- Mineralzusammensetzung und Mineralhärte
- Korngröße und Kornverteilung
- Rundungsgrad (Gehalt an Bruchkorn)
- Porengehalt
- Wassergehalt
- Kohäsion
- Lagerungsdichte

Diese müssen jedoch bei ihrer Bewertung in Hinblick auf die gesamte Struktur des tribologischen Systems betrachtet werden.

2.2.7.1 Mineralzusammensetzung, Mineralhärte und ihr Zusammenhang mit der Werkstoffshärte

Die Härte des Lockergesteins ist durch die Mineralzusammensetzung und die Härte der einzelnen Komponenten bestimmt und wird durch den Verschleißvorgang nicht verändert. Für den Einfluss der Abrasivkornhärte auf das Verschleißverhalten ist die sog. Tieflage-/Hochlage-Charakteristik (Abbildung 2.6) kennzeichnend: [9, 21, 23, 27]



Abbildung 2.6: Ein typisches Hoch-/Tieflage Verhalten des Abrasivverschleißes in Abhängigkeit von der Härte des Abrasivs [21]

Wenn die Abrasivkornhärte wesentlich niedriger ist als die Werkstoffhärte, können die Körner logischerweise nicht in die Oberfläche eindringen und rufen kaum Verschleiß hervor (Tieflage). Ein starker Anstieg wird beobachtet, wenn sich die Kornhärte der Größenordnung der Werkstoffhärte nähert. Beginn und Ende des Steilanstiegs liegen nach [9] zwischen:

$$\frac{H\ddot{a}rte_{K\ddot{o}rner}}{H\ddot{a}rte_{Werkstoff}} = 0,7 \ bis \ 1,1 - 1,3 \ bis \ 1,7$$

Nach dem Erreichen der Hochlage nimmt der Verschleiß weiterhin nur wenig zu bzw. bleibt konstant. Um den Verschleiß an Metallteilen versuchstechnisch bestimmen zu können, sollte sich der Verschleiß in der Hochlage befinden d.h. die Härte des angreifenden Abrasivs ist deutlich höher als die Werkstoffhärte, damit die Körner in den Werkstoff eindringen können. Dies ist der Grund, warum bei Abrasivitätsuntersuchungen i.d.R. besonders weiche Stähle zum Einsatz kommen [9].

Zur Bestimmung der Härte werden mehrere Verfahren angewendet, z.B. [8]:

- Härteprüfung nach Brinell (**HB**)
- Härteprüfung nach Vickers (**HV**)
- Rockwell-C, Rockwell-B-Verfahren usw. (HRC, HRB)
- Ritzhärte nach Mohs (Härte eines Minerals)

Die Verfahren unterscheiden sich durch Geometrie und Material des Prüfkörpers (z.B. Diamantkegel, Stahlkugel) und die angebrachte Prüfkraft, mit welcher der Prüfkörper in die Oberfläche des zu prüfenden Werkstücks eingedrückt wird [8].

Da jede Härteprüfung einen anderen Härtewert ergibt, muss daher das Verfahren im Ergebnis eindeutig angegeben werden. Das Verfahren ist je nach dem zu prüfenden Werkstoff auszuwählen [8].

Zur Prüfung der Härte von Mineralien hat sich das Ritz-Verfahren nach Mohs (1811) durchgesetzt. Das Prinzip besteht darin, dass jedes nachfolgende Mineral härter als das vorhergehende ist. Die Standardmineralien sind unter Nummern 1-10 in der Härteskala eingeordnet (Tabelle 2.2). Die Unterschiede zwischen den Härtestufen sind jedoch im absoluten Maß völlig ungleich. Das Schleifhärteverfahren nach Rosiwal ergänzt die Mohs'sche Skala und gibt für die Mineralien folgende mittleren Relativschleifhärten (bezogen auf Korund = 1000) an [13] (Tabelle 2.2):

	Talk	Gips (Halit)	Kalkspat (Calcit)	Flußspat (Fluorit)	Apatit	Feldspat	Quarz	Topas	Korund	Diamant
Mohs'sche Skala	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Relativ- schleifhärte	1/33	1,25	4,5	5	6,5	37	120	175	1000	140000

Tabelle 2.2: Mohs'sche Härteskala und Relativschleifhärte nach Rosiwal [13]

In Abbildung 2.7 sind die Härtewerte verschiedener Metalle zufolge Verwendung der unterschiedlichen Härteprüfverfahren dargestellt.



Abbildung 2.7: Vergleich der Härtewerte verschiedener Härteprüfungsverfahren [29]

Die Mineralhärte zählt zu den primären Merkmalen des Bodens und wird üblicherweise beschrieben durch den "Gehalt an verschleißscharfen Mineralen (besonders Quarz, Feldspat), der unter Berücksichtigung der verschiedenen Schleifhärten der einzelnen Minerale als Äquivalenter Quarzgehalt in [%] angegeben wird" [11].

Der Äquivalente Quarzgehalt (ÄQu) wird mittels Röntgendiffraktometrie-Analyse (RDE) oder an Dünnschliffen bestimmt. Die derart festgestellten Mineralgehalte werden über die Relativschleifhärte nach Rosiwal auf den Äquivalenten Quarzgehalt umgerechnet. Der ÄQu charakterisiert objektiv den Gesamtgehalt der verschleißscharfen Mineralen in einem Korngemisch [11].

2.2.7.2 Korngröße und Kornverteilung

Die Korngrößenverteilung ist für die Abrasivität des Bodens von entscheidender Bedeutung. Sie wird durch die Siebanalyse und Schlämmanalyse ermittelt und in Form einer Körnungslinie dargestellt. Größe und Verteilung der Körner beeinflussen die Festigkeit des Bodens und damit die zu seiner Gewinnung aufzubringende Kraft [9]. Nach [27] gilt im Korngrößenbereich 0,25 – 1,25 mm für trockenes Abrasivgut eine degressive Zunahme des Verschleißes mit steigender Korngröße. Für Korngrößen 1,0 – 20 mm wurde ein nahezu linearer Anstieg (Abbildung 2.8) festgestellt. Die Versuche wurden an sehr eng gestuften Sanden (trocken/feucht) mit verschiedenen Materialien im Verschleißtopf durchgeführt, weshalb die Ergebnisse nach [9] nur bedingt auf natürliche Böden übertragbar sind.



Abbildung 2.8: Einfluss der Korngröße auf das Verschleißverhalten für verschiedene Werkstoffe [27]

Es wurde nachgewiesen, dass mit größeren Einzelkörnern im Gegen- bzw. Zwischenstoff höhere Verschleißbeträge zu erwarten sind. Diese Erscheinung wird mit der zahlenmäßige Abnahme der realen Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Boden und der damit verbundenen Erhöhung des realen Kontaktdruckes erklärt [9].

2.2.7.3 Wassergehalt

Die Poren im Lockergestein sind mit Luft und Wasser gefüllt (Dreiphasensystem), wobei das Porenwasser grundsätzlich in mehreren Erscheinungsformen auftreten kann: [1, 9]

- Sickerwasser oberhalb des Grundwasserkörpers eingespeistes
 Niederschlagwasser; bewegt sich abwärts zufolge der Schwerkraft
- hygroskopisches Wasser (Adsorptionswasser) umschließt die Körner infolge
 Oberflächenkräfte einzelner Bodenteilchen mit einer Wasserhülle
- Haftwasser
 - o Häutchenwasser umschließt das Korn mit einer zweiten Wasserhülle
 - Porenwinkelwasser kommt an den Kontaktstellen zwischen Bodenkörner vor

- Kapillarwasser haftet infolge der Oberflächenspannung und der Adhäsion zwischen Bodenkorn und Wasser an den Wandungen des Korngefüges im Porensystem des Bodens; steigt durch die Kapillarwirkung vom Grundwasserspiegel
 - Geschlossenes Kapillarwasser geschlossener Wasserhorizont über dem Grundwasserspiegel, ohne Luft gefüllte Poren
 - Offenes Kapillarwasser kein geschlossener Wasserhorizont (Lufteinschlüsse)

Das mikroskopische Wasser (hygroskopisches Wasser, Haftwasser) tritt vor allem bei feinkörnigen, bindigen Böden (Tonen) auf. Die Eigenschaften von solchen Böden sind stark von dem Wassergehalt abhängig, deswegen müssen sie neben der Korngröße auch nach der Plastizität klassifiziert werden. Die Zustandform ändert sich mit zunehmendem Wassergehalt sehr stark, sie weisen daher ein anderes Verhalten bei der Befeuchtung auf, als die grobkörnigen Böden [1].

Der typische Verlauf des Verschleißes ist nach [27] für Sande in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis Wasser/Sand (durch Verschleißtopfverfahren festgestellt) in Abbildung 2.9 dargestellt. Er ist mit der Änderung der Bindungskräfte infolge des wachsenden Wassergehalts zu erklären [9]. Der Verschleiß steigt im Bereich des Mischungsverhältnisses von 0 bis 0,10 (Werkstoff – Stahl St 37 und Stahl C 60H), weil "die Bindungskräfte im Boden durch Kapillarität bis zum Kohäsionsmaximum ansteigen" [9]. Mit weiter zunehmendem Wassergehalt nimmt der Verschleiß wieder ab, da die Reibung zwischen dem Werkstoff und dem Boden infolge des schmierend wirkenden Wasserfilmes reduziert wird. Das Mischungsverhältnis Null entspricht dem trockenen Material [27]. Eine Befeuchtung des Abrasivguts bewirkt für Grundkörper aus Gummi eine deutliche Verschleißreduktion (siehe Abbildung 2.9).



Abbildung 2.9: Einfluss der Befeuchtung auf das Verschleißverhalten von Sanden für verschiedene Werkstoffe [27]

2.2.7.4 Rundungsgrad

Zur Bestimmung des Rundungsgrades von Gesteinskörnungen 4-63 mm (Kies und Mischungen von Gesteinskörnungen mit Kies) ist das Verfahren, in der ÖNORM EN 933-5 [17] beschrieben (prozentueller Anteil von gebrochenen Körnern in einer Probe), anwendbar. Bei diesem Verfahren wird die Gesteinskörnung aufgrund optischer Beurteilung ihrer Oberfläche manuell eingeteilt in:

- gebrochene Körner, einschließlich vollständig gebrochene Körner
- gerundete Körner, einschließlich vollständig gerundete Körner

Die gebrochene Oberfläche ist definiert als "Fläche eines Kieskorns, die durch Brechen auf Grund natürlicher Kräfte entsteht und von scharfen Kanten begrenzt ist. Wenn die Oberflächen und Kanten eines gebrochenen Kieskorns abgenutzt oder verwittert sind, muss die Oberfläche als gerundet bewertet werden." [17]

Die Masse jeder dieser vier Gruppen wird bestimmt und als Massenanteil (in Prozent) der Gesamtmasse der Probe ausgedrückt. Der Rundungsgrad der Probe wird nach Tabelle 2.3 bestimmt:

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

Tabelle 2.3: Bezeichnung des Rundungsgrades nach [17]

An feineren Fraktionen wird die Kornrundung mikroskopisch bestimmt.

Die Kornrundung hat einen wesentlichen Einfluss auf das Verschleißverhalten. Zufolge der Verschleißtopfversuche von Wellinger/Uetz [27] mit rundlichem Rheinsand und daraus gebrochenem Korn, jeweils in der Korngröße 7-15 mm, weisen die scharfkantigen Körner, vor allem bei trockenem Probematerial, einen deutlich höheren Verschließ auf (Werkstoff – Stahl St 37 und Stahl C 60H). Bei Befeuchtung ist der Unterschied zwischen scharfkantigen und gerundeten Körnern nicht so markant (Abbildung 2.10).



Abbildung 2.10: Einfluss der Kornform auf das Verschleißverhalten [27]

2.3 Stand der Technik

2.3.1 Versuche zur Bestimmung der Abrasivität

2.3.1.1 LCPC Abrasivitätsversuch

Der LCPC Abrasivitätstest wurde am Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussés entwickelt und stellt heutzutage ein gängiges Prüfverfahren zur Untersuchung von mineralischem Abrasivgut dar. Der Versuch begrenzt sich jedoch nur auf Kornfraktion 4-6,3 mm. Er wird in der französischen Norm P18-579 wie folgt geregelt [12].

Getrocknetes Probematerial (Probemasse **500** $g \pm 2$ g) der Körnung **4-6,3 mm** wird durch den Einfülltrichter in den Versuchsbehälter gefüllt. Der Stahlflügel mit den Abmessungen 5 x 25 x 50 mm, der sich bereits in dem Behälter befindet, dreht sich während der Versuchsdauer von **5 min** mit **4500 Umdrehungen pro Minute** innerhalb des Behälters (siehe Abbildung 2.11). Der Drehflügel wird vor und nach jedem Prüfvorgang exakt eingewogen, um die Gewichtsabnahme bestimmen zu können, woraus sich das Maß für die Abrasivität errechnet.

Da für die Versuchsdurchführung gerätetechnisch nur Probematerial kleiner als 6,3 mm zulässig ist, gibt es für gröbere Körnungen zwei gängige Vorgangsweisen [25]:

- Verwendung des gesamten Probematerials Abrasivitätswert der Gesamtprobe Die Kornfraktionen ≥ 6,3 mm müssen durch Trockensiebung abgetrennt und alle Körner auf die Körnung < 6,3 mm gebrochen werden. Je nach der auftretenden Fragestellung muss abgestimmt werden, ob der Kornanteil < 4,0 mm abgetrennt werden soll, da er die Abrasivität des Materials dämpft. [25]
- 2) Gewinnung von Teilfraktionen (z.B. 4/16, 16/32, 32/64 und >64 mm) Abrasivitätswert der Teilprobe bzw. verschiedener Korngrößenabstufungen Bei Verwendung der Teilproben erhöht sich der Aufwand für die Vorbereitung deutlich, da die Probe zuerst in die Fraktionen aufgeteilt und jede Fraktion noch separat zerkleinert werden muss. Es sind etwa 2,5 kg Probematerial für jede Teilfraktion notwendig, um 500 g gebrochenes Material erforderlicher Körnung für die Versuchsdurchführung zu gewinnen. [25]



Abbildung 2.11: LCPC Abrasivitäts-Prüfgerät an der TU Wien

Die im LCPC Versuch ermittelte Abrasivität wird in Form des LCPC-Abrasivitätskoeffizienten A_{BR} angegeben. Der A_{BR} wird gem. [12] nach der Formel berechnet:

$$A_{BR} = \frac{m_{F0} - m_F}{M} \left[\frac{g}{t}\right]$$

m_{F0} Masse Metallflügel vor Versuch [g]

m_F Masse Metallflügel nach Versuch [g]

M Probemasse [t]

Der so gewonnene LCPC-Abrasivitätskoeffizient kann unterschiedlich klassifiziert und interpretiert werden (Tabelle 2.4):

Klassifikatio	on nach [2]	Klassifikation nach [25]		
	LCPC-Abrasivit	tätskoeffizient		
Abrasivität	A _{BR} [g/t]	LAK [g/t]	Abrasivität	
		0 - 50	nicht abrasiv	
sobr sobwach	0 500	50 - 100	kaum abrasiv	
Selli Schwach	0-500	100 - 250	schwach abrasiv	
		250 - 500	abrasiv	
schwach	500 - 1 000	500 1 250	stark abrasiv	
mittal	1 000 1 500	500 - 1 250	SIGIN ADIASIV	
miller	1 000 - 1 500	1 250 2 000	oxtrom obraciv	
stark	1 500 - 2 000	1 200 - 2 000	extrem abrasiv	
sehr stark	> 2 000			

Tabelle 2.4: Klassifikation des LCPC-Abrasivitätskoeffizienten nach [2] und [25]

Mittels LCPC-Abrasivitätsversuchs kann auch die **Brechbarkeit B**_R ermittelt werden. Diese wird über den Gewichtsanteil des Feinkorns <1,6 mm in der Probe nach dem LCPC-Abrasivitätsversuch bestimmt [12]:

$$B_R = \frac{100 \cdot M_{1,6}}{M} \ [\%]$$

M_{1,6} Masse Feinanteil < 1,6 mm nach dem Versuch [g]

M Probemasse [g]

Da die Brechbarkeit von Lockergesteinen neben der mineralogischen Zusammensetzung auch von der Korngrößenverteilung abhängig ist, wird empfohlen, die Sieblinie vor und nach dem LCPC-Abrasivitätsversuch zu bestimmen [25]. Die Brechbarkeit wird nach [2] in 5 Klassen unterteilt (Tabelle 2.5):

B _R [%]	Brechbarkeit
0 - 25	sehr schwach
25 - 50	mittelschwach
50 - 75	mittel
75 - 100	mittelstark
> 100	sehr stark

Tabelle 2.5: Klassifikation der LCPC Brechbarkeit B_R [25]

Da die Kornhärte (Gehalt an verschleißscharfen Mineralen) den Abrasivitätswert stark beeinflusst, wurde eine Korrelation zwischen dem Abrasivitätskoeffizienten A_{BR} (LAK) und dem Äquivalenten Quarzgehalt (ÄQu) gefunden, die in Abbildung 2.12 dargestellt ist. Diese

Darstellung ist nur berechtigt, wenn die kristallinen Komponenten im Kiesgemisch zu 100% aus Quarzgeröllen bestehen [11].



Abbildung 2.12: LCPC- Abrasivitätskoeffizient aufgetragen gegen den Anteil abrasiver (kristalliner) Komponenten im Kies, gefasst als Äquivalenter Quarzanteil [24]

Sowohl Sande (Korngrößen 0,063-2 mm) als auch Mittel- und Grobkiese (6,3-63 mm) können sehr verschleißintensiv sein, wobei das Grobmaterial grundsätzlich höher abrasiv als Feinkorn ist. [4] Die Beschränkung des Korngrößenbereichs bei dem LCPC-Versuch bedeutet, dass die Korngröße des ursprünglichen Materials nur durch die Scharfkantigkeit des Bruchkorns berücksichtigt wird, wobei, auch wenn damit eine brauchbare Auflösung erreicht wurde, eine Verifikation dieser Hypothese noch ausständig ist. Es zeigt sich also als notwendig, ein weiteres Verfahren zu entwickeln, das auch gröbere Körnungen untersuchen lässt [4].

2.3.1.2 Cerchar-Abrasivitätstest

In Mitteleuropa hat sich der sog. Cerchar-Test zur Untersuchung der Abrasivität von Festgesteinen durchgesetzt. "Er basiert auf einem Prüfstift definierter Eigenschaft und Geometrie, der bei konstanter Auflast (70N) innerhalb von 1 Sekunde über eine bestimmte Strecke eines Prüfkörpers gezogen wird. Der Cerchar-Abrasivitäts-Index errechnet sich als Mittelwert über 2-5 Einzelversuche aus der Breite der am Stift entstandenen kegelstupfförmigen Rille." [20]



Abbildung 2.13: Cerchar-Testgerät mit Binokular zur Ermittlung des CAI [32]

Die Länge der Prüfstrecke ist mit 10 mm definiert, wobei 70% der Abnutzung bereits auf dem ersten Millimeter auftritt und auf den restlichen 9 mm keine wesentliche Veränderung des CAI stattfindet [20]. Die mikroskopische Auswertung (Bestimmung der Stiftabnutzung) erfolgt mit Hilfe eines Binokulars (Abbildung 2.13). Da die Abnutzung des Prüfstiftes manchmal asymmetrisch oder unscharf abgegrenzt ist, sollten 2 Messungen an einem Gestein senkrecht zueinander erfolgen [20]. Die Klassifikation (0,1 mm Abnutzung = 1 CAI) und der Vergleich mit dem LCPC-Abrasivitätsversuch ist in Tabelle 2.6 zu sehen [25].

LAK [g/t]	CAI [0,1 mm]	Abrasivitäts- Bezeichnung	Beispiele für Festgesteine und Komponenten in Lockergesteinen
0 - 50	0 – 0,3	nicht abrasiv	Holz, Torf, organische Beimengungen
50 - 100	0,3-0,5	kaum abrasiv	Ton-Schluff-Stein, Mergelstein
100 - 250	0,5 – 1,0	schwach abrasiv	Tonschiefer, Sandstein (feinkörnig, schwach tonig gebunden), Kalkstein (rein), Marmor (rein)
250 - 500	1,0-2,0	abrasiv	Kalkstein (sandig), Marmor (quarzhaltig) Sandstein (fest, karbonatisch gebunden)
500 - 1250	2,0-4,0	stark abrasiv (sehr abrasiv)	Sandstein (kieselig gebunden), Quarzsandstein, Porphyr, Andesit, Basalt, Phyllit, Glimmerschiefer, z.T. Amphibolit
1250 - 2000	4,0-6,0	extrem abrasiv	(Gang-)Quarz, Granit, Quarzit, Eklogit, Gneis, z.T. Amphibolit

Tabelle 2.6: Gegenüberstellung des LCPC-Abrasivitätskoeffizienten LAK und des Cerchar-Abrasivitätsindex CAI nach [25]

Es ist offensichtlich, dass aufgrund des Cerchar-Tests keine Aussage über die Abrasivität von Lockergestein getroffen werden kann, weil damit nur grobe Einzelkomponenten (Steine, Blöcke) untersucht werden können [4].

2.3.1.3 NTNU-Versuch

Auch wenn der in Norwegen entwickelte NTNU-Abrasivitätstest (Norges teknisknaturvitenskapelige universitet) ursprünglich zur Bestimmung der Bohrbarkeit von Festgestein beim TBM-Vortrieb (AV/AVS-Test) konzipiert war, wurde er mit dem sog. **Soil Abrasion Test (SAT)** auch auf Böden erweitert. Der einzige Unterschied zwischen dem AVS-Test und dem SAT ist, dass statt Gesteinsmehl < 1 mm gesiebter Boden < 1 mm verwendet wird. Der SAT wurde weiter modifiziert, damit auch die Korngrößen bis zu 4 mm untersucht werden können (Abbildung 2.15) [15]. Bei dem Versuch "wird die Probe auf eine rotierende Stahlscheibe aufgebracht, auf die ein 10 kg schwerer Stahlprüfkörper gedrückt und während 5 Minuten über die Scheibe (100 Umdrehungen) bewegt wird (siehe Abbildung 2.14)." [4] Der SAT-Koeffizient entspricht dem Gewichtsverlust des Prüfkörpers in mg [4, 16].



Abbildung 2.14: Schema des NTNU-Abrasivitätstests [14]



Abbildung 2.15: Originalprüfkörper (links) und modifizierter Prüfkörper (rechts) für SAT [14]

Da der Versuch die Untersuchung nur von Korngrößen < 4 mm ermöglicht, ist die Aussage über gesamtes Lockergestein sehr eingeschränkt.

2.3.1.4 Miller-Test

Für die Bestimmung der Abrasivität von Feinstmaterial in Suspension kann der sog. Miller-Versuch angewendet werden. Während der Versuchszeit (6 Stunden) wird ein standardisierter Stahlblock mit definierter Auflast durch eine, sich in einer Plastikwanne befindlichen, Testsuspension hin und her bewegt, um die Flüssigkeit immer in Bewegung zu halten. Alle 2 Stunden wird die Gewichtsabnahme an dem Stahlblock gemessen. Es sind insgesamt drei Versuche notwendig, um die Verschleißkurve aufzeichnen zu können. Die sog. Miller-Zahl wird aus den Verschleißbeträgen nach 2 Stunden ermittelt [28, 4].
3 METHODIK BEI DER ABRASIVITÄTSUNTERSUCHUNG

3.1 Allgemeines

Für die Untersuchung von Lockergestein (loses Abrasivgut) ist das **Verschleißtopfverfahren**, im Kapitel 2.2.6 bereits beschrieben, gut geeignet, weil es die tatsächlichen Vorgänge beim Bearbeiten von Boden am Realistischsten nachbilden kann [3].

3.2 TU-Abrasimeter

Ausgehend vom LCPC-Prüfgerät (siehe Kapitel 2.3.1.1) wurde an der TU Wien ein neues Gerät – das sog. TU-Abrasimeter – für das Forschungsprojekt "Abrasivität von Lockergestein" entwickelt. [18] Das Ziel dieses Projektes ist es, mit dem TU-Abrasimeter einen Laborversuch zu entwickeln, beim dem möglichst viele Einflussfaktoren auf den Verschleiß (z.B. Korngröße, Wassergehalt usw.) gleichzeitig erfasst werden können [4].

3.2.1 Bestandteile des Versuchsgeräts

Das Gerät ermöglicht es, Korngemische bis zu einem Größtkorn von mindestens 20 mm zu untersuchen [29]. Die Hauptbestandsteile sind (siehe Abbildungen 3.1 und 3.2):

- Versuchsbehälter
- Drehflügel
- Welle
- Auflastring
- zusätzliche Gewichte
- Einfülltrichter
- Elektromotor



Abbildung 3.1: TU-Abrasimeter



Abbildung 3.2: Aufbau des TU-Abrasimeters [30]

Der zylinderförmige **Versuchsbehälter** weist einen Innendurchmesser von 250 mm auf. Dazu passend wurde ein rechteckiger **Drehflügel** mit Abmessungen von 67,5 x 135 x 16 mm bestimmt. Er wird an der kurzen, mittleren oder langen **Welle** (diese können ausgetauscht werden) angebracht. Der Einfülltrichter dient zur Befüllung mit dem Versuchsmaterial, während sich der Behälter und der Drehflügel bereits in Versuchsposition befinden. Während des Versuchs dreht sich der Metallflügel, damit stets neues Bodenmaterial zur Wirkung kommt. Er wird nach jedem Versuch ausgewechselt. [30] Der Drehflügel besteht aus Stahl 1.1141 (C15 E) mit einer Vickershärte HV30 i. M. 126, Rockwellhärte HRB i.M. 65,9 mit Zunder (bzw. HRB 68,9 ohne Zunder) [5].

Da die Kornhärte (HV Quarz ~1000, HV Feldspat ~700) deutlich höher als die Stahlhärte vom Drehflügel ist (weicher Stahl), liefen alle Versuche in der Hochlage (Kapitel 2.2.7.1) ab und das Abrasivgut übt an dem Drehflügel Verschleiß aus.

"Die **Drehzahl** des Flügels während der Versuchsdurchführung ist mit 100 U/min begrenzt und kann stufenlos variiert werden, womit die Verhältnisse in-situ (bei Bohrarbeiten in Lockergestein) nachgebildet werden können." [30] Das Gerät wird mit einem starken Elektromotor betrieben.

Der **Auflastring** (Gewicht 5,5 kg) dient zur Stabilisierung der Bodenprobe bei der langsamen Umdrehung des Drehflügels, damit sie nicht nach oben ausweichen kann, und weiters zur Belastung der Bodenprobe und somit zur Simulation einer Lagerungsdichte. Es können noch zusätzliche Gewichte (8 Stücke insgesamt; 1,5 kg pro Gewicht) auf den Ring aufgehängt werden [30].

Das Gerät bietet auch die Möglichkeit, die Abrasivität bei Wassersättigung, sowie bei Zugabe von Bentonit oder den Einsatz speziell geformter Drehflügel zu erforschen [30].

3.2.2 Versuchsvorbereitung

Die Versuchskörnung musste zuerst nass gesiebt werden, um das Überkorn und Unterkorn zu entfernen. Das vorbereitete Material wurde im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet, anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt. Unmittelbar vor dem Versuch wurde die erforderliche Probemenge eingewogen.

Der Stahldrehflügel wurde vor Versuchsbeginn mit einer Schleifmaschine (Schleifpapier Körnung 80) oberflächig behandelt, um Rost zu entfernen und die Oberfläche zu glätten und zu ebnen. Danach wurde der Drehflügel im Ultraschallreinigungsbad gereinigt um

anhaftende, feinstrukturierte Partikel zu beseitigen. Nach dem Reinigen wurde der Drehflügel sorgfältig getrocknet und gewogen.

3.2.3 Versuchsdurchführung

Der Versuch selber fängt mit dem Befestigen des Drehflügels an der jeweils vorgesehenen Welle an. Der Flügel verfügt über ein Gewinde und wird an der Welle angeschraubt und mit einer Mutter befestigt. Dann wird der Versuchsbehälter nach oben gefahren und mit zwei Flügelschrauben am Deckel/Einfülltrichter befestigt. Der Auflastring ist zu diesem Zeitpunkt unter den Deckel geschoben und fixiert, damit das Material beim Einfüllen nicht auf den Ring fällt. Anschließend kann das Material durch den Einfülltrichter eingefüllt werden. Nach der Befüllung wird das Gerät nur ganz kurz gestartet, damit sich das Probematerial gleichmäßig verteilt. Erst danach wird der Auflastring auf die Probenoberfläche im Topf abgesenkt und die zusätzlichen Gewichte werden von außen aufgehängt. Der Ablauf der Versuchsdurchführung ist in den Abbildungen 3.3 – 3.5 dargestellt.

Während der Versuchsdurchführung musste das Gerät regelmäßig kontrolliert werden, um die beständige Wirkung der Auflast zu überprüfen und das unterbrechungsfreie Laufen der Drehwelle zu gewährleisten.



Abbildung 3.3: Vorbereiteter Drehflügel (1) wird mit einer Mutter (2) an der Welle (3) befestigt. Danach kann der Verschleißtopf (4) hochgefahren werden. Der Auflastring(5), mit Feststellschrauben (6) befestigt, befindet sich gerade in oberer Fixposition.



Abbildung 3.4: Nach dem Festziehen der Flügelschrauben (7) kann das Probematerial durch den Einfülltrichter gefüllt werden (8) und fällt in den Versuchstopf.



Abbildung 3.5: Herablassen des Auflastrings (9) und Anhängen der Gewichte (10). Einschalten des Elektromotors (11) und Beginn der Zeitaufzeichnung des Versuchs (Stoppuhr).

3.2.4 Nach dem Versuch

Nach Absolvierung der vorgesehenen Versuchsdauer wurde das Gerät abgeschaltet und der Drehflügel ausgebaut. Zuerst wurden die Gewichte wieder abgenommen, die Flügelschrauben gelöst und der Versuchsbehälter heruntergefahren. Da sich die Probekörnung während des Versuchs zerkleinert hatte, mussten mit einem Pinsel die kleinsten Bodenteile von Auflastring und Drehflügel abgeputzt werden. Nach dem Abputzen wurde der Auflastring wieder in der oberen Position fixiert. Das Lösen des Drehflügels nach dem Entfernen der Mutter war teilweise problematisch, da er sich beim Drehen am Gewinde der Welle festgezogen hatte. Der Ausbau erfolgte dann mit Hilfe eines Gummihammers.

Der Drehflügel wurde nach jedem Versuch im Ultraschallreinigungsbad gereinigt und gewogen. In Abbildung 3.6 sieht man an dem Drehflügel deutliche Abnutzungserscheinungen. Es kam zur Rillenbildung in der Drehrichtung und zur starken Abnutzung an den Kanten und Ecken, verbunden mit Materialabtrag.



Abbildung 3.6: Erscheinungsbild des Drehflügels nach dem Versuch 10/1

Das Probematerial, das zum Sieben gehörte, musste aus dem Versuchsbehälter sorgfältig ausgeleert werden. Nach jedem Versuch wurde eine Sieblinie erstellt, um die Zerkleinerung des Probematerials festzustellen und gegebenenfalls Zusammenhänge mit der Abrasivität des Bodens herstellen zu können.

Das zerkleinerte Probematerial 400/10 und 400/8 ist in Abbildung 3.7 zu sehen.



Abbildung 3.7: Zerkleinerung der Körnung 400/10 (links) und 400/8 (rechts) infolge Versuchsdurchführung im TU-Abrasimeter nach 6 Stunden

3.3 LCPC – Abrasivitätsversuche

Zusätzlich zu den Versuchen mit dem TU-Abrasimeter wurden LCPC-Abrasivitätsversuche (Kapitel 2.3.1.1) durchgeführt. Da für diesen Test der Korngrößenbereich von 4,0 bis 6,3 mm erforderlich ist, mussten Körnungen > 6,3 mm gebrochen und die erforderliche Fraktion durch Siebung isoliert werden. Vor und nach dem Versuch wurde der Drehflügel gewogen und der Verschleiß bestimmt (Gewichtverlust). Nach jedem Versuch wurde auch der Anteil der Körner <1,6 mm durch Siebung festgestellt.

4 ORIENTIERUNGSVERSUCHE MIT DEM TU-ABRASIMETER

4.1 Allgemeines

Die Aufgabe dieser Forschung war es, die Einflüsse von variierten Parametern auf den Verschleiß festzustellen und zu quantifizieren.

Entsprechend dem Grundsatz, Verschleißtopfversuch dass die im ermittelten Verschleißmessgrößen miteinander vergleichbar sind, wurden bei den Orientierungsversuchen im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit folgende Randbedingungen festgelegt:

1. Grundkörper (Drehflügel)

konstant: - Werkstoff

- Gefüge
- Härte
- Bearbeitung

2. Umgebungsmedium (Atmosphäre)

konstant: - Temperatur

- Feuchtigkeit

Der Einfluss des Umgebungsmediums kann als konstant angenommen werden, da die Bedingungen im Labor ungefähr gleich bleiben.

3. Gegenkörper (Boden)

variiert: - Abrasivgut (Korngrößen 4-8 mm, 8-16 mm, 16-32 mm, Mischproben)

- Probemasse (5 kg, 7 kg, 10 kg)
- mineralogische Zusammensetzung

4. Beanspruchungskollektiv

konstant: - Gerätkonstruktion

- Dauer der Belastung
- Drehzahl: 100 U/min
- variiert: Auflast (5,5 kg; 11,5 kg; 17,5 kg)

 Länge der Welle des Drehflügels (45 mm, 70 mm, 85 mm) – Abstand des Drehflügels vom Topfboden

4.2 Probematerial

4.2.1 Herkunft

Das Probematerial stammt aus einer Schottergrube bei Markgrafneusiedl, Niederösterreich. Geologisch gesehen ist es den quartären Hochterassensedimenten der Riss Eiszeit zuzuordnen (vor 1,6 bis 0,01 Millionen Jahren). [5]

4.2.2 Korngröße und Korngrößenverteilung

Größe und Verteilung der Körner ist für die Abrasivität von entscheidender Bedeutung, da sie die Festigkeit des Bodens beeinflussen und die Anzahl der Kontakte zwischen Werkzeug und Boden bestimmen.

Für die Orientierungsversuche wurden folgende enggestufte Körnungen verwendet (Tabelle 4.1). Die Mischprobe 400/11 setzt sich aus den Körnungen 400/8, 400/9 und 400/10 (ein Drittel des Massenanteils von jeder Ausgangskörnung) zusammen. Die Korngrößenverteilung sowohl der Ausgangskörnungen, als auch der Mischprobe sind in den Abbildungen 4.1 und 4.2 dargestellt.

Probenr.	Körnung		Mittl. Korndurchme (arithmetischer Mittelwert)	sser
400/8	8-16	mm	12	mm
400/9	4-8	mm	6	mm
400/10	16-32	mm	24	mm
400/11 (Mischprobe)	4-32	mm	18	mm

Tabelle 4.1: Parameter der Ausganskörnungen

Am Anfang der Versuchsreihe 400/8 und 400/9 wurde das Überkorn nicht abgetrennt, jedoch bei der späteren Auswertung in Erwägung gezogen und die Ergebnisse hinsichtlich der tatsächlichen Ausgangskörnung interpretiert.



Abbildung 4.1: Korngrößenverteilung der Ausgangskörnungen (Farben der Körnungslinien entsprechend Bezeichnungen Tab. 4.1)



Abbildung 4.2: Korngrößenverteilung der Ausgangskörnungen (Detail) mit Bezeichnungen der Proben

Für die Bestimmung des Einflusses der Korngröße hat sich bei der Auswertung der **Grobfaktor G** als nützlicher Wert gezeigt, da sich dadurch die "Gesamtheit" des Probematerials beschreiben lässt.

"Der Grobfaktor G ist definiert als jene Fläche, die bei einer halblogarithmischen Darstellung der Korngrößenverteilung von der Abszissenparallele durch 100 Massenprozente Siebdurchgang und von der Kornverteilungskurve zwischen Größtkorn und dem 0,02 mm-Durchmesser eingeschlossen wird. Jeweils 10 Massenprozente der Gesamtmenge entsprechen 1 cm (Ordinate), die Einheit der logarithmischen Teilung wird mit 10 cm in Rechnung gestellt (Abszisse); damit ergibt sich als Dimension für den Grobfaktor cm²" [22] (Abbildung 4.3).



Abbildung 4.3: Definition von Grobfaktor G und Verfeinerungsgrad *AG* [22]

Der **Verfeinerungsgrad** ΔG ermöglicht es, die Zerkleinerung des Probematerials zu beschreiben. Er ergibt sich gem. [22] infolge Durchführung eines Proctorversuchs als Differenz der Grobfaktoren G vor und nach der Zerkleinerung eines Korngemisches (siehe Abbildung 4.3). [22]

Der Grobfaktor der Ausgangskörnungen ist in Tabelle 4.2 zu sehen:

Ve	ersuchsreihe	Grobfaktor [cm ²]
400/8	mit Überkorn	226,8
	ohne Überkorn	225,4
400/9	mit Überkorn	199,0
	ohne Überkorn	195,3
400/10	ohne Überkorn	255,2
400/11	ohne Überkorn	225,1

Tabelle 4.2: Grobfaktor der Ausgangskörnungen für die Orientierungsversuche

Um die Kornverteilung bei der Auswertung berücksichtigen zu können, wurde für alle Probekörnungen die **Ungleichförmigkeitszahl** C_u und **die Krümmungszahl** C_c berechnet (Tabelle 4.3).

"Über Ungleichförmigkeitszahl und Krümmungszahl kann die Gestalt der Kornverteilungslinie beschrieben werden. Die Ungleichförmigkeitszahl C_u wird definiert nach Formel

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

und gilt als Maß für die Steilheit im Bereich von d_{10} bis d_{60} . Die Krümmungszahl C_c gibt den Verlauf der Kurve in diesem Bereich an und wird definiert als": [1]

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$$

d₆₀ maximale Korngröße, welche die Kornverteilungslinie bei 60% der Masse aufweist

d₃₀ maximale Korngröße, welche die Kornverteilungslinie bei 30% der Masse aufweist

d₁₀ maximale Korngröße, welche die Kornverteilungslinie bei 10% der Masse aufweist

Nr.	d ₁₀	d ₃₀	d ₆₀	Cu	Cc
400/8	8,5	9,9	13	1,53	7,54
400/9	4,4	5	6,3	1,43	3,97
400/10	18	20	24	1,33	16,67
400/11	5	7,5	15	3,00	3,75

Tabelle 4.3: Berechnung der Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahlen der Ausgangskörnungen für die Orientierungsversuche

4.2.3 Rundungsgrad

Der Rundungsgrad aller Ausgangskörnungen wurde nach ÖNORM EN 933-5 bestimmt (siehe Kapitel 2.2.7.4). Der prozentuelle Anteil von gerundeten Körnern war bei allen Körnungen größer als 90%, wodurch sich das Probematerial als **vollständig gerundete Körner** klassifiziert.

4.2.4 Mineralogie

Um die bereits genannten Einflüsse (Korngröße, Auflast etc.) quantifizieren zu können, wurden Probekörnungen gleichen Ursprungs herangezogen und dadurch möglichst gleiche mineralogischen Zusammensetzung vorgesehen, was jedoch nur teilweise realistisch ist. In Tabelle 4.4 sind die Massenanteile von Quarz, Feldspäte, Schichtsilikate und Karbonate der verwendeten Probekörnungen entsprechend den an der BOKU durchgeführten mineralogischen Untersuchungen (Röntgendiffraktometer) angegeben. [5]

Drohomotorial	Mineral [Massenanteil in %]						
Probematenai	Quarz	Schichtsilikate	Feldspäte	Karbonate			
400/8	57	6	12	25			
400/9	64	8	13	15			
400/10	67	7	12	14			

Tabelle 4.4: Mineralogische Zusammensetzung der Proben gemäß Untersuchungsergebnisse BOKU [5]

Da Quarz als ein hartes und oft vorkommendes Mineral (siehe Kapitel 2.2.7.1) maßgebend für den Verschleiß ist und die Körnung 400/8 (8-16 mm) einen deutlich kleineren Quarzanteil aufweist, kann sie als weniger abrasiv als die Proben 400/9 und 400/10 eingestuft werden. Diese Tatsache muss bei der Auswertung der Verschleißbeträge berücksichtigt werden.

4.3 Versuchsdauer und Beanspruchungsweg

Die Versuchsdauer der Orientierungsversuche wurde von dem Beanspruchungsweg anderer Abrasivitätsversuche abgeleitet, damit die Ergebnisse eventuell mit diesen vergleichbar werden. Der erste Messzeitpunkt (83 Minuten) geht von dem Beanspruchungsweg des LCPC-Versuchs aus (Tabelle 4.5), der zweite (152 Minuten) dann von dem sog. Miller Versuch, was jedoch nicht mehr Umfang der gegenständlichen Forschungsarbeit ist. Wie im Kapitel 2.2.5 beschrieben, sollte der Verschleiß des Drehflügels in stationärer Phase ablaufen, d.h. die ermittelte Verschleißintensität sollte konstant bleiben. Darum wurde auch ein dritter Messzeitpunkt (360 Minuten) bestimmt, um den Verlauf der Verschleißintensität überprüfen zu können. Die drei festgelegten Messzeitpunkte, in Tabelle 4.6 abgebildet, sollten den Verschleißvorgang abbilden.

LCPC-Versuch			
Beanspruchungsweg pro Drehung		0,351	m
Drehzahl		4500	U/min
Versuchsdauer		5	min
gesamter Beanspruchungsweg	0,351*4500*5 =	7902,92	m
Orientierungsversuche			
Beanspruchungsweg pro Drehung		0,948	m
Drehzahl		100	U/min
gesamter Beanspruchungsweg		7902,92	m
Versuchsdauer	7902,92/(0,948*100) =	83,33	min

Tabelle 4.5: Ableiten des ersten Messzeitpunktes von dem LCPC-Versuch

Messzeit- punkt	Versuchsdauer	er Beanspruchungsweg				
1.	83 min	83 min*100 U/min*0,948 m =	7871	m		
2.	152 min	152 min*100 U/min*0,948 m =	14415	m		
3.	360 min	360 min*100 U/min*0,948 m =	34141	m		

Tabelle 4.6: Versuchsdauer und Beanspruchungsweg der Orientierungsversuche

Nach der **Versuchsdurchführung** wurde die Korngrößenverteilung durch Siebung ermittelt (bei der ersten Versuchsreihe zu jedem Messzeitpunkt, bei den weiteren erst am Ende – nach 6 Stunden). Das Wiegen des Drehflügels erfolgte zu jedem Messzeitpunkt.

4.4 Versuchsreihen und ihr Ablauf

4.4.1 Versuchsreihe 400/8

Die erste Versuchsreihe, bezeichnet als **400/8** (Körnung 8-16 mm; siehe Abbildung 4.4), wurde primär mit Einsatz der mittleren Welle (70 mm) durchgeführt.

Bei der Versuchsdurchführung wurden die Probemassen 5 kg, 7 kg und 10 kg jeweils mit einer Auflast von 5,5 kg, 11,5 kg und 17,5 kg kombiniert, um den Einfluss der zwei Faktoren auf den Verschleiß zu untersuchen. Die Versuche wurden bei den Messzeitpunkten von 83 Minuten und 152 Minuten angehalten und der Drehflügel nach der Ultraschallbadreinigung gewogen. Bei der Auflast von 11,5 kg wurde die Versuchsdauer auf 360 Minuten verlängert und anschließend der Drehflügel noch einmal gewogen.

Um den Einfluss der Wellenlänge festzustellen, waren zwei zusätzliche Versuche mit der langen und kurzen Welle geplant. Aufgrund der besseren Aussagekraft wurde für die Versuche mit der langen (85 mm) und kurzen (45 mm) Welle die **7 kg Probemasse** mit **11,5 kg Auflast** gewählt, gleichermaßen wie bei den weiteren Versuchsreihen, um den Vergleich der Verschleißbeträge miteinander zu ermöglichen.

Die Parameter der einzelnen Versuche der Versuchsreihe 400/8 sind in Tabelle 4.7 aufgelistet.

Probenr. / Körnung	Länge der Welle [mm]	Versuchsnr. Probemasse [kg]		Auflast [kg]	Messzeit- punkte [min]
		8/1		5,5	83; 152
		8/2	5	11,5	83; 152; 360
		8/3		17,5	83; 152
E E	70	8/4		5,5	83; 152
19		8/5	7	11,5	83; 152; 360
		8/6		17,5	83; 152
8) 8		8/7		5,5	83; 152
/00		8/8	10	11,5	83;152; 360
4		8/9		17,5	83;152
	85	8/10	7	11,5	83;152; 360
	45	8/11	7	11,5	83;152; 360

Nach Betrachtung der Ergebnisse der Versuche 400/8 wurde der Ablauf der weiteren Versuchsreihen festgelegt.

Variieren der Welle

Tabelle 4.7: Ausgangsparameter der Versuchsreihe 400/8

Die Versuche liefen überwiegend problemlos ab. Es zeigte sich jedoch des Öfteren, dass beim Ausbau des Drehflügels zum Messzeitpunkt (bzw. zum Versuchsende) der Auflastring festklemmte. Als Ursache wurde das Einklemmen einzelner Körner zwischen Ring und Topfwand erkannt. Dies war aus diesem Grund problematisch, weil der Behälter nicht mehr mühelos bewegt werden konnte. Diese Erscheinung wurde jedes Mal notiert, weil dadurch eine Abweichung des Verschleißbetrags zu erwarten war. Es lässt sich jedoch nicht im Nahhinein feststellen, ab welchen Zeitpunkt der Ring festklemmte und die Auflast daher nicht mehr voll wirksam war.

Beim Versuch 8/10 mit der kurzen Welle lief der Versuch nur ungefähr eine Minute und dann hat sich der Motor von selbst abgedreht. Die Durchführung war daher nicht möglich. Das Drehmoment, das bei dem Versuch entstanden ist, war offenbar zu groß und konnte mit dem Elektromotor nicht überwunden werden. Bereits während dieser kurzen Versuchszeit haben die Körner tiefe Riefen an den Kanten des Drehflügels herbeigeführt (Abbildung 4.4).



Abbildung 4.4: Körnung 400/8 – Drehflügel nach einer Minute Versuchszeit bei Versuch 8/10 (abgebrochen)

4.4.2 Versuchsreihe 400/9

Für die zweite Reihe **400/9**, mit feinerem Material (**Körnung 4-8 mm**; siehe Abbildung 4.5), wurde die lange Welle vorgesehen. Da der Verschleiß bei einem Vergleichsversuch mit der mittleren Welle sehr gering gewesen war (auch trotz Verlängerung der Versuchsdauer auf 480 Minuten), wurde beschlossen, die kurze Welle überhaupt nicht einzusetzen.

Die kleinste Auflast (5,5 kg) wurde ausgeschlossen, da ein geringer Verschleiß zu erwarten war und eine Messung dadurch schwerer möglich wäre. Außerdem wurde schon der Einfluss der steigenden Auflast in der vorigen Versuchsreihe überprüft. Aus demselben Grund wurde die Probemasse mit 5 kg ausgeschlossen.



Abbildung 4.5. Körnung 400/9 (4-8 mm)

Bei der Reihe 400/8 hat sich, im Gegensatz zur Auflast, gezeigt, dass der Messzeitpunkt nach 360 Minuten einen wichtigen Blickwinkel auf die Gesamtbetrachtung der Ergebnisse bietet. Alle Versuche wurden daher bis zu 360 Minuten Versuchszeit ausgeführt. Ein Gesamtüberblick der Ausgangsparameter der Versuchsreihe 400/9 ist in Tabelle 4.8 zu sehen.

Probenr. / Körnung	Länge der Welle [mm]	Versuchsnr.	Probemasse [kg]	Auflast [kg]	Messzeit- punkte [min]
(u	85	9/1	7	11,5	83;152; 360
Ē		9/2	1	17,5	83;152; 360
		9/3	10	11,5	83;152; 360
9 (4		9/4	10	17,5	83;152; 360
400/	70	9/5	7	11,5	83;152; 360; 480

Variieren der Welle

Tabelle 4.8: Ausgangsparameter der Versuchsreihe 400/9

Bei Verwendung der mittleren Welle (70 mm) stellte sich am Drehflügel im Vergleich zum gleichartigen Versuch mit der langen Welle (85 mm) kaum Verschleiß ein und der Versuch 9/5 wurde daher von der weiteren Interpretation der Ergebnisse ausgeschlossen.

Die weiteren Versuche mit der langen Welle liefen problemlos, selten blieb der Auflastring klemmen (bereits beschrieben im Kapitel 4.4.1).

4.4.3 Versuchsreihe 400/10

Das gröbste Material (Abbildung 4.6), bezeichnet als **400/10** (16-32 mm), erforderte die kurze Welle um den Versuch überhaupt durchführbar zu machen. Auch wenn am Anfang Versuche mit der Probemasse von 10 kg geplant waren, hat sich schon beim ersten Versuch gezeigt, dass für die Durchführung 7 kg ein Massenmaximum darstellt (häufiger Ausfall des Elektromotors und daraus resultierender Versuchsabbruch). Die durchgeführten Versuche mit dem Material 400/10 sind in Tabelle 4.9 dargestellt.



Abbildung 4.6: Körnung 400/10 (16-32 mm)

Die lange Welle kam beim gröbsten Material überhaupt nicht in Frage, da sich der Motor schon bei Verwendung der mittleren Welle nach wenigen Sekunden selbst ausgeschaltet hatte. Auch die Durchführung mit der langen Welle war mühsam, da man während des Versuchs anwesend sein musste um zu kontrollieren, ob der Elektromotor nicht infolge des großen Drehwiderstandes des Flügels im Boden seine Funktion aufgab. Da dies nicht immer zu vermeiden war, gab es kleine Abweichungen in der Versuchsdauer (±10 Minuten), wo nachträglich nicht ganz sicher war, wie lange das Gerät tatsächlich lief. Das Drehmoment, das das Gerät überwinden musste um das Material weiterzuschieben, war anscheinend zu groß. Bei dem Versuch, die Drehzahl zu reduzieren, konnte der Drehflügel nicht einmal in

Bewegung gesetzt werden. Diese Beobachtungen hängen vermutlich mit dem Größtkorn zusammen, da das Gerät für diese Körnung (16-32 mm) nicht konzipiert wurde.

4.4.4 Versuchsreihe 400/11

Die Mischprobe **400/11 diente** zur Bestimmung des Einflusses der Kornverteilung und setzte sich aus den drei vorigen Proben wie folgt zusammen:

- $\quad \text{4-8 mm} \rightarrow \text{2,35 kg}$
- 8-16 mm \rightarrow 2,35 kg
- 16-32 mm \rightarrow 2,30 kg

Um die Ergebnisse mit den anderen Versuchen vergleichen zu können, wurde wieder die 7 kg Probemasse mit 11,5 kg Auflast verwendet (Tabelle 4.9).

Mit dem TU-Abrasimeter wurde noch ein ergänzender Versuch durchgeführt, beim welchem der Verschleiß nach kürzeren Zeitabständen gemessen wurde. Somit ist der Verlauf der Verschleißentwicklung über die Versuchszeit besser zu verfolgen. Es kann überprüft werden, wie sich die Verschleißgeschwindigkeit während des Versuchs ändert. Davon kann geschlossen werden, in welcher Phase der Verschleiß (siehe Kapitel 2.2.5) ablief. Für eine schlüssige Aussage über das Verschleißverhalten gem. [9] ist die stationäre Phase erforderlich. Ausgangsparameter des zusätzlichen Versuchs sind in Tabelle 4.9 zu sehen.

Probenr. / Körnung	Länge der Welle [mm]	Versuchsnr.	Probemasse [kg]	Auflast [kg]	Messzeit- punkte [min]
10 32)	45	10/1	7	11,5	83;152; 360
00/1 9 - 3	40	10/2	7	17,5	83;152; 360
4((1) r	70	10/3	7	11,5	83;152; 360
400/11 (Mischprobe)	70	11/1	7	11,5	83;152; 360
	70	11/2*	7	11,5	60; 120; 180; 200; 260; 380

zusätzlicher Versuch mit Variieren der Welle

Tabelle 4.9: Ausgangsparameter der Versuchsreihe 400/10 und 400/11

Während des Versuchs 11/1 (Mischprobe) sind keine Komplikationen entstanden, welche den Verlauf gestört hätten. Beim ersten Messzeitpunkt (nach 83 Minuten) war der Ausbau komplizierter, da der Auflastring klemmen blieb und wahrscheinlich nicht völlig wirksam war.

Auch wenn die Versuchsparameter gleich waren (Probemasse 7 kg, Auflast 11,5 kg, mittlere Welle – 70 mm), wurden höhere Verschleißbeträge bei Versuch 11/2* als beim gleichartigen Versuch 11/1 gemessen. Die Ursache dafür liegt vermutlich bei einer gerätetechnischen Verbesserung – bei Versuch 11/2* wurde ein flexibler Abdichtungsring verwendet, der das Klemmen des Auflastringes verhindert hat. Die Auflastgewichte dürften somit während des ganzen Versuchs wirksam gewesen sein.

5 ERGEBNISSE DER ORIENTIERUNGSVERSUCHE

5.1 Allgemeines

Da es sich bei den gegenständlichen Orientierungsversuchen um die ersten, planmäßigen Erfahrungen handelt, die mit dem TU-Abrasimeter gemacht wurden, müssen die Ergebnisse sorgfältig interpretiert und die Zusammenhänge genau untersucht werden. In der ersten Phase ist es notwendig, möglichst viele Faktoren zu erfassen und die Gesetzmäßigkeiten bei der Versuchsdurchführung zu bemerken.

Zuerst werden die Zerkleinerung des Materials anhand der Sieblinien und anschließend der Verschleiß des Drehflügels behandelt.

5.2 Siebungen – Zerkleinerung des Probematerials

Bei der Versuchsreihe 400/8 (außer Versuch 8/11) wurde zu jedem Messzeitpunkt eine Sieblinie gemacht, um die Veränderungen infolge der Versuchsdurchführung zu protokollieren. Bei den restlichen Reihen wurde die Sieblinie erst am Versuchsende (nach 360 Minuten) ermittelt. In Tabelle 5.1 sind alle ermittelten Grobfaktoren und Verfeinerungsgrade (Definition siehe Kapitel 4.2.2), die sich zufolge Versuchsdurchführung aus der Sieblinie ablesen lassen, angegeben.

Es zeigte sich, dass sich das Probematerial proportional zum gemessenen Verschleißbetrag zerkleinert hat – je größer der Verschleiß wurde, desto kleiner wurde der Grobfaktor. Dies stimmt jedoch bei den Versuchen der Reihe 400/8 nicht immer.

Nr.	Probe-	Auflast	Grobfaktor G [cm ²]				Verfeinerungsgrad ∆G [cm²]		
	masse [kg]	[ĸg]	vor	83 min	152 min	360 min	83 min	152 min	360 min
8/1	5	5,5	226,8	207,7	203,6	196,1	19,1	23,2	30,7
8/2	5	11,5	226,8	207,1	200,5	-	19,7	26,3	-
8/3	5	17,5	226,8	207,2	199,5	-	19,6	27,3	-
8/4	7	5	226,8	210,7	205,0	-	16,1	21,8	-
8/5	7	11,5	226,8	207,7	202,8	196,3	19,1	24,0	30,5
8/6	7	17,5	226,8	207,2	200,7	-	19,6	26,1	-
8/7	10	5	226,8	207,1	203,5	-	19,7	23,3	-
8/8	10	11,5	226,8	208,6	204,6	195,6	18,2	22,2	31,2
8/9	10	17,5	226,8	210,4	204,1	-	16,4	22,7	-
8/11	7	11,5	225,4	-	-	208,9	-	-	16,5
9/1	7	11,5	199,0	-	-	180,2	-	-	18,8
9/2	7	17,5	199,0	-	-	177,3	-	-	21,7
9/3	10	11,5	199,0	-	-	173,9	-	-	25,1
9/4	10	17,5	195,3	-	-	173,1	-	-	22,2
9/5	7	11,5	199,0	-	-	184,7	-	-	14,3
10/1	7	11,5	255,2	-	-	209,5	-	-	45,7
10/2	7	17,5	255,2	-	-	193,7	-	-	61,5
11/1	7	11,5	225,1	-	-	203,4	-	-	21,7

Tabelle 5.1: Ermittelte Grobfaktoren G und Verfeinerungsgrade ∆G aller Versuche

An dieser Stelle sei ergänzt, dass der Anteil von Bodenpartikel <0,63 mm bei der Ermittlung der Korngrößenverteilung unterschätzt wurde, da die Probe bei der Siebung nicht durchgewaschen wurde. Die kleinen Bodenteilchen blieben vielfach an den größeren Körnern haften und wurden dadurch zu deren Gewicht gezählt.

Diese Ungenauigkeiten bei der Durchführung der Sieblinien wurden in Kauf genommen, da die Versuche zu den Messzeitpunkten zumeist nur unterbrochen wurden und nach der Siebung wieder mit demselben Probematerial fortgesetzt werden mussten.

5.2.1.1 Versuche 8/5 und 8/8

Das Probematerial 400/8 bestand aus Körnung 8 bis 16 mm. Die Korngrößenverteilung des Versuchs 8/5 (7 kg Probemasse; 11,5 kg Auflast) und die zunehmende Verfeinerung des Abrasivguts mit steigender Versuchsdauer lassen sich in Abbildung 5.1 erkennen. Nach 83 Minuten (graue Kurve) lagen 23% der Körnung unter 8 mm, nach 152 Minuten (braune Kurve) fast 30% und nach 6 Stunden (schwarze Kurve) ca. 40% der Körner.

Für den "Dämpfungseffekt" des Verschleißes mit zunehmender Versuchsdauer (siehe Kapitel 2.3.1.1) ist der Anteil an feinkörnigem Mahlgut (Körner< 1,6 mm) entscheidend. Er beträgt nach 152 Minuten ungefähr 9% und nach 360 Minuten ca. 15%.



Abbildung 5.1: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/5 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun, nach 360 Minuten – schwarz, Ausgangskörnung – blau)

Bei Versuch 8/8 (7 kg Probemasse; 11,5 kg Auflast) hat eine etwas stärkere Zerkleinerung der Probe (Δ G=31,2 nach 360 min) als bei Versuch 8/5 (Δ G=30,5 nach 360 min), infolge der größeren Probemasse stattgefunden (Abbildung 5.2). Der Anteil an Körner <8 mm ist jedoch bei Versuch 8/8 kleiner. Nach 83 Minuten lagen 20% (graue Kurve), nach 152 Minuten ca. 27% (braune Kurve) und nach 360 Minuten ca. 38% (schwarze Kurve) der Körner unter 8 mm.

Bei Versuch 8/8 ist der Massenanteil an Mahlgut fast gleich wie bei Versuch 8/5. Nach 152 Minuten beträgt er 11% und nach 360 Minuten 16%.



Abbildung 5.2: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/8 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun, Ausgangskörnung – blau)

Auffällig ist vor allem, dass im Bereich des jeweiligen Größtkorns kaum eine Kornverfeinerung auftritt. Für Versuche 8/5 und 8/8 gilt, dass sich jeweils die kleineren Körner (\emptyset 8 mm) weiter zerkleinert haben, während mit zunehmendem Korndurchmesser der Massenanteil in der Versuchskörnung weniger verändert wurde.

5.2.1.2 Versuche 9/1 und 9/5

Die Kornverteilung der Versuchsreihe 400/9 war vor dem Versuch 4-8 mm. Nach dem Versuch 9/1 lagen nach 360 Minuten 25% des Massenanteils der Körner unter 4 mm (Abbildung 5.3). Wie im Kapitel 4.2.2 bereits erwähnt, wurde der Versuch mit dem Probematerial mit Überkorn durchgeführt.

Der gleichartige Versuch 9/5, nur mit der mittleren Welle durchgeführt, weist nach 360 Minuten einen Massenanteil von 16% der Körner < 8 mm (Abbildung 5.4), d.h. das Probematerial hat sich weniger zerkleinert als bei Versuch 8/5, was mit dem ermittelten Verschleißbetrag übereinstimmt.



Abbildung 5.3: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 9/1 (nach 360 min – schwarz, Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 5.4: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 9/5 (nach 360 min – schwarz, Ausgangskörnung – blau)

5.2.1.3 Versuch 10/1

Bei der Versuchsreihe 400/10 (16-32 mm) war die größte Materialzerkleinerung zu beobachten (Abbildung 5.5). Nach 360 Minuten lagen 56% der Körnung unter 16 mm, 28% unter 8 mm und 19% unter 4 mm.

Im Gegensatz zu den Körnungen 400/8 und 400/9, tritt eine Kornverfeinerung auch im Bereich des Größtkorns (32 mm) auf.



Abbildung 5.5: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 10/1 (nach 360 min – schwarz, Ausgangskörnung – blau)

Im Gegensatz zu den anderen kleineren Versuchskörnungen trat bei Versuchsreihe 400/10 offenbar ein nennenswerter Kornbruch auf. In Abbildung 5.6 ist erkennbar, dass die durch die Versuchsdurchführung entstandene Kornfraktion 4-8 mm eine scharfkantige Kornform hat.



Abbildung 5.6: Scharfkantige Körner nach dem Versuch 10/1 (4-8 mm)

5.2.1.4 Versuch 11/1

Für die Reihe 400/11 wurde eine Mischung von allen vorigen Körnungen im Bereich von 4 bis 32 mm verwendet. Nach 360 Minuten lagen 16% der Körnung unter 4 mm (Abbildung 5.7); die Zerkleinerung des Probematerials war also in diesem Fall nicht so erheblich.

Hier findet wieder eine kleinere Verfeinerung des Probematerials, wie bei der Körnung 400/8, im Bereich des Größtkorns statt.



Abbildung 5.7: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 11/1 (nach 360 min – schwarz, Ausgangskörnung – blau)

5.3 Verschleiß

Der massenmäßige Verschleißbetrag W_M errechnet sich aus der Differenz des Flügelgewichts zu Versuchsbeginn und seines Gewichts zum Messzeitpunkt:

$$W_M = M_{t,0} - M_{t,i}$$

i... Messzeitpunkt

Alle Ergebnisse zeigen in einer Gesamtübersicht Tabellen 5.2, 5.3 und 5.4:

Versuchsnr.	Probe- masse [kg]	Auflast [kg]	Versuchs- dauer	Gewicht Drehflügel [g]	Verschleiß W _M [g]	Anmerkung
			0	839,58		
Q/1	Б	5 5	83 min	838,81	0,77	
0/1	5	5,5	152 min	838,48	1,10	
			360 min	838,06	1,52	
			0	838,69		
8/2	5	11,5	83 min	837,80	0,89	
			152 min	837,34	1,35	
			0	839,61		
8/3	5	17,5	83 min	838,73	0,88	
		,	152 min	838,15	1,46	Auflastring blieb klemmen
			0	841,56		
8/4	7	5,5	83 min	840,52	1,04	
			152 min	840,23	1,33	
	8/5 7		0	840,70		
- /-			83 min	839,67	1,03	
8/5		11,5	152 min	839,32	1,38	Auflastring blieb klemmen
			360 min	838,97	1,73	
			0	838,43		
8/6	7	17,5	83 min	837,23	1,20	
			152 min	836,77	1,66	
			0	839,13		
8/7	10	5,5	83 min	837,90	1,23	
			152 min	837,58	1,55	
			0	842,47		
8/8	10	11.5	83 min	841,11	1,36	
0.0	10	, o	152 min	840,70	1,77	_
			422 min	839,79	2,68	Dauer
0/0	40		0	839,22	4.44	
8/9	10	17,5	83 min	837,78	1,44	
			152 min	837,16	2,00	
8/10	7	11,5	nicht möglich und 6.1.2			
			0	839,23		Probematerial
0/4.4	7	11 5	83 min	838,56	0,67	ohne Überkorn
0/11	1	11,5	152 min	838,12	1,11	(siehe
			360 min	837,36	1,87	Kap.4.2.2)

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Reihe 400/8

Versuchsnr.	Probema sse [kg]	Auflast [kg]	Versuchs -dauer	Gewicht Drehflügel [g]	Verschleiß W _M [g]	Anmerkung
			vor	840,50		
0/1	7	115	83 min	839,79	0,71	
5/1	1	11,5	152 min	839,74	0,76	
			360 min	839,71	0,79	
			vor	840,55		
9/2	7	17.5	83 min	839,63	0,92	
		,-	152 min	839,59	0,96	
			360 min	839,56	0,99	
			vor	838,08		
0/3	10	115	83 min	836,88	1,20	
5/5	10	11,5	152 min	836,76	1,32	
			360 min	836,73	1,35	
			vor	839,79		Prohomatorial
0/4	10	475	83 min	838,60	1,19	ohne Überkorn
9/4	10	17,5	152 min	838,49	1,30	(siehe
			360 min	838,40	1,39	Kap.4.2.2)
9/5	7	11,5	vor	838,52		
			83 min	838,47	0,05	
			152 min	838,40	0,12	gesonderte
			360 min	838,33	0,19	Interpretation
			480 min	838,27	0,25	notwendig
		11,5	vor	840,27		
10/1	7		83 min	838,10	2,17	
10/1			152 min	837,09	3,18	
			360 min	834,47	5,80	±10 min
	7	17,5	vor	837,49		±10 min
40/2			83 min	835,31	2,18	
10/2			152 min	833,94	3,55	
			360 min	830,60	6,89	
10/3	7	11,5	nicht möglich			siehe Kapitel 4.4.3 und 6.1.2
11/1	7	11,5	vor	841,30		
			83 min	840,62	0,68	Auflastring blieb klemmen
			152 min	839,51	1,79	
			360 min	839,19	2,11	

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Reihen 400/9, 400/10 und 400/11

Versuchsnr.	Probe- masse [kg]	Auflast [kg]	Versuchs- dauer	Gewicht Drehflügel [g]	Verschleiß- betrag W _M [g]	Anmerkung
11/2*	7	11,5	0	840,80	0	
			60 min	839,58	1,22	
			120 min	838,72	2,08	
			180 min	838,00	2,80	
			200 min	837,91	2,89	
			260 min	837,71	3,09	
			380 min	837,19	3,61	

Tabelle 5.4: Ergebnisse des Versuchs 11/2*

5.3.1 Einfluss der Versuchsdauer

Die Verschleißintensität bzw. die Verschleißgeschwindigkeit (Definition siehe Kapitel 2.2.6) nehmen generell während des Versuchs ab, da das Probematerial infolge der "Abnutzung" durch den Drehflügel bzw. durch die Körner untereinander weniger abrasiv wirkt. Weiters ist zu vermuten, dass das im Versuchstopf entstehende Feinmaterial die Verschleißintensität dämpft.

Da die Versuche mit dem TU-Abrasimeter mit konstanter Drehzahl ausgeführt wurden, ist die Verschleißintensität I_M infolge direkt proportional zu der Verschleißgeschwindigkeit v_M . Aus diesem Grund wird nur die Verschleißgeschwindigkeit im weiteren Text angegeben.

Der Ergänzungsversuch 11/2* eignet sich sehr gut, um die zeitliche Entwicklung des Verschleißverlaufs zu verfolgen, da der Verschleiß nach kürzeren Abständen gemessen wurde. Der Verlauf der Verschleißgeschwindigkeit bei Versuch 11/2* wird in Tabelle 5.5 mit Versuchen 11/1 und 8/5 verglichen.

Nr.	Probe- masse [kg]	Auflast [kg]	Versuchs- dauer	Verschleiß- betrag W _M [g]	Verschleißgeschw. [mg/min]	Grobfaktor [cm ²]
			83 min	1,03	12,41	207,7
8/5	7	11,5	152 min	1,38	9,08	202,8
			360 min	1,73	4,81	196,3
11/1	7	11,5	83 min	0,68	8,19	-
			152 min	1,79	11,78	-
			360 min	2,11	5,86	203,4
			60 min	1,22	20,33	-
11/2*	7	11,5	120 min	2,08	17,33	-
			180 min	2,80	15,56	-
			200 min	2,89	14,45	-
			260 min	3,09	11,88	-
			380 min	3,61	9,50	-

Tabelle 5.5: Verschleiß, Verschleißgeschwindigkeit und Grobfaktor der Versuche für die Bestimmung der optimalen Versuchsdauer

Der Anstieg der Geraden in Abbildung 5.8 entspricht der Verschleißgeschwindigkeit v_M [mg/min]. Es ist ersichtlich, dass bei Versuch 11/2* bis zur 180. Minute der größte Anstieg zu verzeichnen ist (rosa Kurve). Danach nimmt der Verschleißbetrag nur langsam weiter zu, bzw. nimmt die Verschleißgeschwindigkeit langsam ab.



Abbildung 5.8:Verschleißgeschwindigkeit bei Versuchen 11/1, 11/2* und 8/5 (alle 7 kg Probemasse; 11,5 kg Auflast) zur Bestimmung der optimalen Messzeitpunktes

Möglicherweise wurde nach 180 Minuten die "stationäre Phase" erreicht (siehe Kapitel 2.2.5). Die stationäre Verschleißphase ist nach Heinrich [9] definiert als "Konstanz der Verschleißbeträge pro zurückgelegten Reibweg", d. h. keine weitere Änderung des Anstiegs der Gerade in Abbildung 5.8. Dagegen spricht aber die zunehmende Zerkleinerung des Abrasivguts (siehe Tabelle 5.5 – Grobfaktor bei Versuch 8/5). Es ist dabei zu beachten, dass bei Abbauvorgängen in der Praxis immer ein frisches Abrasivgut zur Wirkung kommt. Während des Versuchs mit dem TU-Abrasimeter entsteht im Topf infolge der Zerkleinerung des Probematerials Mahlgut – das Probematerial weist zum Schluss des Versuchs andere abrasive Eigenschaften auf als zu Versuchsbeginn.

Da die Verschleißzunahme nach 152 Minuten nur mehr sehr gering ist, werden die Verschleißbeträge zu den Messzeitpunkten 152 und 360 Minuten hinsichtlich des Erreichens der stationären Phase als zuverlässiger als zum Messzeitpunkt von 83 Minuten angesehen.

5.3.2 Einfluss der Probemasse und der Auflast auf den Verschleiß

Die Versuchsreihe 400/8 (8-16 mm) wurde so konzipiert, damit sie ausführliche Informationen über den Einfluss von Probemasse und Auflast auf den Verschleiß leistete. Im Rahmen der Reihe 400/8 wurden auch die meisten Versuche durchgeführt, weshalb sich der Einfluss von Auflast und Probemasse gut zeigen lässt.

5.3.2.1 Auflast

Die Ergebnisse bestätigten unsere Annahme, dass der Verschleiß mit größerer Auflast zunimmt. Auch wenn der Versuch 8/5 (Probemasse 7 kg; Auflast 11,5 kg) eine Abweichung aufweist, da der Auflastring vermutlich während der Versuchsdurchführung stecken blieb, ist aus der Abbildung 5.9 ersichtlich, dass die Verschleißbeträge mit zunehmender Auflast nahezu linear zunehmen.



Abbildung 5.9: Auflast-Verschleiß-Verhältnis nach 152 min mit Material 400/8 für verschiedene Probemassen

Es ließ sich grundsätzlich erkennen, dass die Versuche mit der größten Probemasse (10 kg) die zuverlässigsten Resultate erbrachten, insofern dass bei diesen Versuchen alle beobachteten Tendenzen am deutlichsten hervortreten.

In Tabelle 5.6 ist ersichtlich, um welche Werte der Verschleißbetrag nach 152 Minuten in Relation zu Auflast zunimmt. Die Verschleißdifferenz zwischen den Versuchen mit 5,5 kg und 11,5 kg Auflast, jeweils für alle Probemassen (5 kg, 7 kg, 10 kg), liegt durchschnittlich bei 0,18 g. Im Vergleich dazu war die Verschleißdifferenz zwischen den Versuchen mit 11,5 kg und 17,5 kg Auflast wieder jeweils für alle Probemassen durchschnittlich 0,23 g. Da die Auflast immer um 6 kg gesteigert wurde, ergibt sich im Schnitt ein zusätzlicher Verschleißbetrag von 0,21 g jeweils pro 6 kg Auflast.

Das Ergebnis wurde durch die kleineren Verschleißbeträge infolge nicht völlig wirksamer Auflast bei den Versuchen 8/3 und 8/5 verzerrt (siehe Tabelle 5.6).

Auflast [kg]	Probemasse [kg]	Nr.	W _M [g] nach 152 min					
	5	8/1	1,10					
5,5	7	8/4	1,30					
	10	8/7	1,55				_	
	5	8/2	1,35		0,25	g		
11,5	7	8/5	1,38* ⁾	$W_{M 11,5 kg}$ - $W_{M 5,5 kg}$ =	0,08	g		
	10	8/8	1,77		0,22	g		
			Mittelwert	0,18	g)	
	5	8/3	1,46* ⁾		0,11	g		
17,5	7	8/6	1,66	$W_{M 17,5kg} - W_{M 11,5kg} =$	0,28	g		∕ −0,21 g
	10	8/9	2,06		0,29	g		(Mittelwert)
*) Messwert Versuch 8/3 und 8/5 unrealistisch niedrig			Mittelwert	0,23	g	/	J	

Tabelle 5.6: Zunahme des Verschleißbetrags in Relation zur Auflast

Die Tendenz des zunehmenden Verschleißes mit einer zunehmenden Auflast kann auch bei der Versuchsreihe 400/9 in Abbildung 5.10 beobachtet werden. Bei Versuch 9/4 (Probemasse 10 kg; Auflast 17,5 kg) ist kein Anstieg des Verschleißes gegenüber Versuch 9/3 (Probemasse 10 kg; Auflast 11,5 kg) zu sehen, da der Einfluss der höheren Auflast vermutlich durch die Entfernung des Überkorns kompensiert wurde (feineres Material bewirkt weniger Verschleiß).



Abbildung 5.10: Auflast-Verschleiß-Verhältnis nach 83 min mit Material 400/9 für zwei verschiedene Probemassen

Abbildung 5.11 zeigt die Verschleißgeschwindigkeit bei einer Probemasse von 10 kg für alle Auflasten. Verschleißbeträge und Verschleißgeschwindigkeiten für 10-kg Versuche sind in Tabelle 5.7 angegeben.

Versuchnr.	Probemasse [kg]	Auflast [kg]	Verschleißbetrag W _m [g]			Verschleißgeschwindigkeit v _m [mg/min]		
			83 min	152 min	360 min	83 min	152 min	360 min
8/7	10	5,5	1,23	1,55	-	14,82	10,20	-
8/8	10	11,5	1,36	1,77	2,68	16,39	11,64	7,44
8/9	10	17,5	1,44	2,06	-	17,35	13,55	-

Tabelle 5.7: Verschleiß und Verschleißgeschwindigkeit bei 10-kg-Probemasse für verschiedene Auflasten (Körnung 400/8)

Die Verschleißgeschwindigkeit ist als Anstieg der Geraden in Abbildung 5.11 abzulesen. Je steiler die Gerade ansteigt, desto höher ist die Verschleißgeschwindigkeit.

Bei 83 Minuten bleibt der Verschließ von allen Auflasten relativ nah beieinander (zwischen 1,23 g und 1,44 g). Je länger der Versuch dauerte, desto größer wurde der Abstand zwischen den Verschleißbeträgen einzelner Auflasten. Schon nach 152 Minuten vergrößerte sich das Intervall auf 1,55 g bis 2,06 g. Zu diesem Messzeitpunkt lässt sich nachweisen, dass bei einer höheren Auflast ein höherer Verschleiß stattfindet. Je länger der Versuch läuft, desto deutlicher wurde das Ergebnis.



Abbildung 5.11: Verschleißgeschwindigkeit bei 10-kg-Probemasse für verschiedene Auflasten (Körnung 400/8)
5.3.2.2 Probemasse

Es wurde auch der Einfluss der Probemasse auf den Verschleiß des Drehflügels überprüft und das gleiche Ergebnis festgestellt, wie für die Auflast. Wie sich aus Abbildung 5.12 erkennen lässt – mit zunehmender Probemasse steigen die Verschleißbeträge linear.



Abbildung 5.12: Probemasse-Verschleiß-Verhältnis nach 152 min mit Material 400/8 für unterschiedliche Auflast

Analog zur Auflast wurde auch hier (Tabelle 5.8) ermittelt, um welche Werte der Verschleißbetrag nach 152 Minuten in Relation zu Probemasse steigt. Die durchschnittliche Verschleißdifferenz zwischen den Versuchen mit 5 kg und 7 kg Probemasse, jeweils für alle Probemassen (5 kg; 7 kg; 10 kg), beträgt 0,15 g, was aber vermutlich sehr ungenau ist, weil die Verschleißbeträge durch das Klemmen des Auflastringes zu viel beeinflusst wurden. Die Wirkung der Probemasse kann zumindest am Beispiel der Versuche mit 7 kg und 10 kg Probemasse gezeigt werden, da der Mittelwert bei 0,34 g liegt. Die Steigerung der Probemasse um 3 kg ergibt einen zusätzlichen Verschleiß von 0,34 g.

Probemass e [kg]	Auflast [kg]	Nr.	W _M [g] nach 152 min			
	5,5	8/1	1,10			
5	11,5	8/2	1,35			
	17,5	8/3	1,46			
	5,5	8/4	1,33		0,23	g
7	11,5	8/5	1,38	W _{M 7kg} - W _{M 5kg} =	0,03	g
	17,5	8/6	1,66		0,20	g
				Mittelwert	0,15	g
	5,5	8/7	1,55		0,22	g
10	11,5	8/8	1,77	W _{M 10} kg- W _{M 7kg} =	0,39	g
	17,5	8/9	2,06		0,40	g
*) Messwert Ver	such 8/5 un	realistisc	h niedria	Mittelwert	0,34	a

Tabelle 5.8: Zunahme des Verschleißbetrags in Relation zur Probemasse

Anhand Tabelle 5.9, wo die errechneten Verschleißgeschwindigkeiten angegeben sind, wird ein weiterer Zusammenhang ersichtlich. Die Verschleißgeschwindigkeiten sind grundsätzlich zu Versuchsbeginn am Höchsten (Messzeitpunkt 83 min in Tabelle 5.9), es zeigt sich jedoch auch eine Abhängigkeit mit der Probemasse – je größer die Probemasse, desto größere die Verschleißgeschwindigkeit. Sie nimmt mit zunehmender Versuchsdauer ab, was an der unterschiedlichen Steilheit der Geraden erkennbar ist. Mit zunehmender Versuchsdauer wurde auch der Abstand zwischen den Verschleißbeträgen einzelner Probemassen größer (Messzeitpunkt 152 Minuten – 7 kg Probemasse \rightarrow 1,38 g und 10 kg Probemasse \rightarrow 2,68 g).

Nr.	Probemasse	Auflast	Versch	nleißbetr [g]	ag W _m	Verschleißgeschwindigke v _m [mg/min]		
	[kg]	[kg]	83 min	152 min	360 min	83 min	152 min	360 min
8/2	5	11,5	0,89	1,35	-	10,72	8,88	-
8/5	7	11,5	1,03	1,38	1,73	12,41	9,08	4,81
8/8	10	11,5	1,36	1,77	2,68	16,39	11,64	7,44

Tabelle 5.9: Vergleich der Verschleißgeschwindigkeit für verschiedene Probemassen Minuten (Körnung 400/8)

Mit Zunahme der Probemasse steigt folglich auch die Verschleißgeschwindigkeit. Die Verschleißgeschwindigkeiten von Versuchen der Reihe 400/8 mit der Auflast 11,5 kg sind in Abbildung 5.13 dargestellt – sie nehmen mit dem Beanspruchungsweg ab.



Abbildung 5.13: Verschleißgeschwindigkeit bei Auflast 11,5 kg (Körnung 400/8)

5.3.2.3 Gesamtmasse (Probemasse + Auflast)

Der Verschleiß nimmt sowohl mit der größeren Probemasse, als auch mit der größeren Auflast zu. Beide Einflussparameter wirken jedoch mit einem unterschiedlichen Maß ein. Tabelle 5.10, wo die Versuche nach der Gesamtmasse (Probemasse+Auflast) sortiert sind, zeigt, dass die Verschleißbeträge nicht mit der Gesamtmasse linear zunehmen, sondern eine in Abbildung 5.14 dargestellte Abhängigkeit aufweisen – das Gewicht der Probemasse hat einen größeren Einfluss auf den Verschleiß als die Auflast.

Bei Auflast 5,5 kg und Probemasse 7 kg – <u>Gesamtmasse 12,5 kg</u> – ist der Verschleißbetrag nach 83 Minuten sogar größer als der Verschleißbetrag bei Auflast 11,5 kg und Probemasse 5 kg – <u>Gesamtmasse 16,5 kg</u> (siehe Versuche 8/4 und 8/2 in Tabelle 5.10).

		Gesamtmasse [kg]	Probemasse	Versch	nleiß [g]
	Versuchsnr.	Probemasse+Auflast	[kg]	nach 83 min	nach 152 min
st	8/1	10,5	5	0,77	1,10
ufla 5,5	8/4	12,5	7	1,04	1,33
A	8/7	15,5	10	1,23	1,55
51 St	8/2	16,5	5	0,89	1,35
fla:	8/5	18,5	7	1,03	1,38
Au	8/8	21,5	10	1,36	1,77
o, st	8/3	22,5	5	0,88	1,46
ufla 17,5	8/6	24,5	7	1,20	1,66
J AL	8/9	27,5	10	1,44	2,06

Tabelle 5.10: Versuchsreihe 400/8 nach der Gesamtmasse (Probemasse+ Auflast) sortiert



Abbildung 5.14: Gesamtmasse-Verschleiß-Verhältnis (Körnung 400/8)

Eine Steigerung der Auflast um 6 kg hat im Durchschnitt eine Zunahme des Verschleißes um 0,21 g bewirkt (siehe Tabelle 5.6). Im Gegensatz dazu hat eine Steigerung der Probemasse um 3 kg im Durchschnitt eine Zunahme um 0,34 g verursacht (siehe Tabelle 5.8).

Die Abhängigkeit des Verschleißes von der Auflast und Probemasse ist besser in Abbildung 5.15 in zu erkennen, da der Effekt in 3D wiedergegeben wird. Jede Farbe auf der Skala (links) stellt das Niveau des Verschleißes (rot – Maximum, blau – Minimum) dar.



Abbildung 5.15: 3D-Darstellung der Abhängigkeit des Verschleißes nach 152 Minuten von der Probemasse (5 kg; 7kg; 10 kg) und Auflast (5,5 kg; 11,5 kg; 17,5 kg)

Es gibt mehrere mögliche Begründungen für dieses Verschleißverhalten:

- 1. Die Probemasse wirkt auf jeden Fall, im Gegensatz dazu ist der Auflastring nicht zuverlässig wirksam (versuchstechnisch bedingt) und darum hat die Probemasse einen größeren Einfluss auf den Verschleiß.
- 2. Der Drehflügel (aufgrund seiner Geometrie und seinem Bewegungsspielraum im Topf) verfügt nur über einen bestimmten Einflussbereich und hat somit nur zu einem begrenzten Probevolumen Kontakt. Dadurch kann nur eine bestimmte Menge des Materials pro Zeiteinheit zerkleinert werden. Es entsteht daher in allen Fällen eine gleiche Menge von Mahlgut, welches den Verschleißt dämpft. Das bestätigen auch die Sieblinien von Versuchen 8/5 und 8/8 (siehe Abbildungen 5.1 und 5.2), beschrieben im Kapitel 5.2.1.1. Auch wenn der Anteil an Mahlgut (Körner < 1,60 mm) in beiden Fällen ungefähr 10% der Gesamtmasse beträgt, beinhaltet das Probematerial nach dem Versuch 8/5 etwas mehr an Körnern < 8 mm.</p>

Da bei der kleineren Probemasse (7 kg) mehr vom feinkörnigen Material im Topf entsteht, richtet dieses an dem Drehflügel einen kleineren Verschleiß an.

 Eine größere Probemasse bedeutet auch eine größere Füllhöhe im Versuchstopf, wodurch die Wandreibung ebenfalls ansteigt. Die Gesamtheit der Probe weist daher einen größeren Widerstand gegen die Drehbewegung des Flügels auf. Auf Grund der unterschiedlichen Einflüsse auf den Verschleiß, sollten die Auflast und die Probemasse nicht als Gesamtmasse betrachtet werden. Damit die Versuche vergleichbar werden, wird im Kapitel 6.2.1 für die zukünftigen Versuchsdurchführungen eine festgelegte Probemasse empfohlen.

5.3.2.4 Einfluss der Korngröße auf den Verschleiß

Für die Bestimmung des Einflusses der Korngröße wurden die Versuche mit 7 kg-Probemasse jeder Körnung jeweils mit 11,5 kg und 17,5 kg Auflast verglichen. Abbildung 5.16, die den Verlauf der Verschleißgeschwindigkeiten darstellt, bestätigt die Annahme, dass das gröbere Material größeren Verschleiß an dem Drehflügel bewirkt. Die unterschiedlichen Verschleißbeträge innerhalb der einzelnen Kornfraktionen sind auf die unterschiedlichen Auflastgewichte zurückzuführen (siehe Kapitel 5.3.2.1).

Da der Verschleiß auch durch die Kornhärte bestimmt wird, sind die Verschleißbeträge der Körnung 400/8 nicht nur infolge der Korngröße, sondern auch des kleineren Quarzanteils (siehe Kapitel 4.2.4) niedriger, als die Verschleißbeträge der Körnung 400/10.



Abbildung 5.16: Verschleißgeschwindigkeit für Körnungen 400/8, 400/9 und 400/10 mit 7 kg-Probemasse

Es ist aber die Frage entstanden, ob die Korngröße und deren Einfluss auf den Verschleiß genau quantifiziert werden kann. Eine Möglichkeit wäre es, den Grobfaktor der Ausgangskörnung einzukalkulieren, der sich aus der Sieblinie ablesen lässt.

Es soll die Abrasivitätszahl AW_G wie folgt eingeführt werden:

$$AW_G = \frac{W_m}{t} \cdot G \left[\frac{mg \cdot cm^2}{min} \right]$$

W_m Verschleißbetrag (Massenänderung) [mg]

t Beanspruchungsdauer [min]

G Grobfaktor der Ausgangskörnung [cm²]

Die Abrasivitätszahl AW_G wurde für alle Versuche nach 152 und 360 Minuten berechnet und in Tabelle 5.11 angegeben:

Nr.	Masse	Auflast	Ve	rsch	leiß [g]	Grobfaktor [cn		A\ mg.cr[N _G n²/min]
	[kg]	[kg]	152	Min	360	Min	Ausgan	gswert	152 min	360 min
<u>9/1</u>	7	11,5	0,7	6	0,	79	199	,00	995	437
9/2	7	17,5	0,9	6	0,	99	199	,00	1257	547
8/1	5	5,5	1,1	0	1,	52	226	,80	1641	958
8/11	7	11,5	1,1	1	1,	87	225	,40	1646	1171
9/4	10	17,5	1,3	0	1,	39	195	,30	1670	754
9/3	10	11,5	1,3	2	1,	35	199	,00	1728	746
8/4	7	5,5	1,3	3		-	226	,80	1985	-
8/2	5	11,5	1,3	5		-	226	,80	2014	-
<u>8/5</u>	7	11,5	1,3	8	1,	73	226	,80	2059	1090
8/3	5	17,5	1,4	6		-	226	,80	2178	-
8/7	10	5,5	1,5	5		-	226	,80	2313	-
8/6	7	17,5	1,6	6		-	226	,80	2477	-
8/8	10	11,5	1,7	7		-	226	,80	2641	-
11/1	7	11,5	1,7	9	2,	11	225	,10	2651	1319
8/9	10	17,5	2,0	6		-	226	,80	3074	-
<u>10/1</u>	7	11,5	3,1	8	5,	80	255	,20	5339	<mark>4112</mark>
10/2	7	17,5	3,5	5	6,	89	255	,20	5960	4884

Tabelle 5.11: Abrasivitätszahl AW_G für alle Versuche (Berücksichtigung von Grobfaktor der Ausgangskörnung)

Um die Ergebnisse vergleichen und nur den Einfluss der Korngröße herausarbeiten zu können, muss die Probemasse einheitlich sein, d.h. die Versuche mit 5 und 10 kg Probemasse werden für die weitere Auswertung nicht eingeschlossen. Als repräsentative Versuche für jede Korngröße, wurden die Versuche 8/5, 9/1 und 10/1 (7 kg Probemasse) ausgewählt. Sie unterscheiden sich nur durch die Korngröße und bleiben sonst in allen anderen Parametern gleich. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5.12 verglichen. Der Verschleißvorgang der Versuche ist dann in Abbildung 5.17 dargestellt.

Nr	Probe-	Auflast	Verschleißbetrag Wm [g]Verschleißgeschw.Vm [mg/min]			AW _G [I	AW _G [mg.cm²/min]				
111.	[kg]	[kg]	83 min	152 min	360 min	83 min	152 min	360 min	83 min	152 min	360 min
8/5	7	11,5	1,03	1,83	1,73	12,41	12,04	4,81	2815	2731	1090
9/1	7	11,5	0,71	0,76	0,79	8,55	5,00	2,19	1702	995	437
10/1	7	11,5	2,17	3,18	5,8	26,14	20,92	16,11	6672	5339	4112

Tabelle 5.12: Abrasivitätszahl AW_G und Eingangswerte für die Berechnung



Abbildung 5.17: Verschleißgeschwindigkeit-Beanspruchungsweg-Verhältnis für alle Korngrößen (Probemasse 7 kg, Auflast 11,5 kg)

Die Einführung der Abrasivitätszahl AW_G ermöglicht es, die Abrasivität des Bodens in Abhängigkeit eines mittleren Korndurchmessers (arithmetischer Mittelwert) darzustellen (Abbildung 5.18). Die Abrasivität des enggestuften Bodens nimmt mit dem mittleren Korndurchmesser nahezu linear zu. Die kleine Abweichung nach unten bei der Reihe 400/8 wird durch die unterschiedliche mineralogische Zusammensetzung (kleinerer Quarzanteil) verursacht.



Abbildung 5.18: Einfluss der Komgröße auf das Verschleißverhalten unter Berücksichtigung des Grobfaktors der Ausgangskörnung (Material 400/8 Ø12 mm, 400/9 Ø6 mm und 400/10Ø24 mm)

Die Abrasivitätszahl AW_G ermöglicht es nicht, die mineralogische Zusammensetzung zu berücksichtigen. Darum muss diese für jedes Probematerial gesondert interpretiert und im Zusammenhang mit den anderen Probekörnungen gesetzt werden.

5.3.3 Einfluss der Kornverteilung auf den Verschleiß

Zur Überprüfung des Einflusses der Kornverteilung dienten der Versuch 8/5 im Vergleich zu Versuch 11/1. Der arithmetische Mittelwert des Korndurchmessers der Körnung 400/11 beträgt 18 mm, der Körnung 400/8 dann 12 mm. Der Grobfaktor beider Körnungen liegt jedoch sehr nah, da sich die Mischprobe aus allen Probekörnungen zu einem Drittel zusammensetzt und die Körnung 400/8 genau die mittlere Korngröße darstellt (siehe Tabelle 5.13).

Das Verschleißpotenzial der Materiale 400/8 und 400/11 ist am Beispiel der Versuche 8/5 und 11/1 (Parameter der Versuche zeigt Tabelle 5.13), in Abbildungen 5.19 und 5.20 dargestellt. Der Verschleißbetrag beim Versuch 8/5 nimmt mit der Beanspruchungsdauer allmählich ab. Bei dem Versuch 11/1 (grüne Kurve) wurde die intensivste Verschleißgeschwindigkeit zwischen 83 und 152 Minuten beobachtet (die steilste Gerade in Abbildung 5.19), was aber durch den nach 83 Minuten gemessen Verschleißbetrag verursacht wurde, der vermutlich infolge nicht vollständig wirksamer Auflast zu niedrig war.

Nr	Probe-	Auflast	Grobf [c	Grobfaktor G [cm ²]		Verschleißbetrag W _m [g]			Verschleißgeschwindigkeit v _m [mg/min]			
INF.	[kg]	[kg]	vor	360 min	83 min	152 min	360 min	83 min 152 min 36		360 min		
8/5	7	11,5	226,8	196,3	1,03	1,38	1,73	12,41	9,08	4,81		
11/1	7	11,5	225,1	203,4	0,68	1,79	2,11	8,19 11,78		5,86		

Im Endeffekt wurde an dem Drehflügel bei Versuch 11/1 ein höherer Materialabtrag gemessen.

Tabelle 5.13: Parameter der Versuche 8/5 (Kornfraktion 8-16 mm) und 11/1 (Kornfraktion 4-32 mm)



Abbildung 5.19: Verschleißgeschwindigkeit der Versuche 8/5 und 11/1

Zum ersten Messzeitpunkt (nach 83 Minuten) ist die Verschleißgeschwindigkeit bei Versuch 8/5 höher (12,41 mg/min), bei Versuch 11/1 liegt sie nur bei 8,19 mg/min. Zum zweiten Messzeitpunkt (152 min) ist die Verschleißgeschwindigkeit bei Versuch 11/1 auf 11,78 g/min gestiegen, im Gegensatz dazu ist sie bei Versuch 8/5 auf 9,08 mg/min gefallen. Ein Anstieg der Verschleißgeschwindigkeit mit zunehmender Versuchszeit (wie bei Versuch 11/1 zu 83 min und 152 min beobachtet) erscheint aufgrund der bereits beschriebenen Kornzerkleinerung des Abrasivguts wenig plausibel. Ein "Messfehler" z.B. zufolge der fehlenden Wirksamkeit der Auflast auf die Probe ist daher am Wahrscheinlichsten.

Die Verschleißgeschwindigkeit nimmt weiter ab und am Versuchsende weist sie bei Versuch 8/5 einen Wert von 4,81 mg/min und bei Versuch 11/1 einen Wert von 5,86 mg/min (siehe Abbildung 5.20) auf.



Abbildung 5.20: Verschleißgeschwindigkeit-Beanspruchungsweg-Verhältnis der Versuche 8/5 und 11/1

Da anscheinend die gröbsten Körner für den Verschleiß maßgebend sind, bewirkt vermutlich das *Größtkorn 32 mm* der Körnung 400/11 im Vergleich mit dem *Größtkorn 16 mm* der Körnung 400/8 eine höhere Abrasivität des Gesamtmaterials. Auch wenn man den Grobfaktor beider Körnungen nach dem Versuch vergleicht, hat sich das Material 400/11 weniger zerkleinert, obwohl ein höherer Verschleißbetrag festgestellt wurde (siehe Tabelle $5.1 - \Delta G_{11/1}=21,7$; $\Delta G_{8/5}=30,5 -$ und Abbildungen 5.1 und 5.7).

Das Verschleißverhalten der Versuche 8/5 und 11/1 ist infolge der verschiedenen Kornverteilung unterschiedlich, welche über die Ungleichförmigkeitszahl (siehe Kapitel 4.2.2) charakterisiert werden kann, da die Kornlinie des enggestuften Materials 400/8 steiler als die Kornlinie des Materials 400/11 verläuft. Die Definition der Abrasivitätszahl AW_{GC}, welche die Ungleichförmigkeitszahl berücksichtigt, geht von der Definition der Abrasivitätszahl AW_G aus und erfolgt nach der Formel:

$$AW_{GC} = \frac{W_m}{t} \cdot G \cdot C_u \left[\frac{mg \cdot cm^2}{min} \right]$$

- W_m Verschleißbetrag (Massenänderung) [g]
- t Beanspruchungsdauer [min]
- G Grobfaktor der Ausgangskörnung [cm²]
- C_u Ungleichförmigkeitszahl der Ausgangskörnung [-]

Für die Untersuchung des Einflusses der Kornverteilung wurden die Versuche 9/1, 8/5, 10/1 und 11/1 (wieder mit Probemasse 7 kg und Auflast 11,5 kg) herangezogen.

Die Abrasivitätszahl AW_{GC} wurde mit dem nach 360 Minuten gemessenen Verschleißbetrag bestimmt (Tabelle 5.14), da dieser durch die nicht vollständig wirksame Auflast beim Versuch 11/1 weniger verzerrt wurde.

Nr.	Probe- masse	Auflast	Verschleißbetrag W _m [g]	Grobfaktor G [cm ²]	AW _{GC} [mg.cm ² /min]
	[kg]	[Kg]	360 min	Ausgangswert	360 min
9/1	7	11,5	0,79	199,0	625
8/5	7	11,5	1,73	226,8	1667
11/1	7	11,5	2,11	225,1	3958
10/1	7	11,5	5,80	255,2	5482

Tabelle 5.14: Abrasivitätswert AW_{GC} für 7 kg Probemasse-Versuche (Berücksichtigung von Grobfaktor und Ungleichförmigkeitszahl)

Unter Berücksichtigung der Ungleichförmigkeitszahl wurde die Abrasivität der Proben in Abhängigkeit von deren mittleren Korndurchmesser in Abbildung 5.21 dargestellt. Die Abrasivität, mittels Abrasivitätszahl AW_{GC} ausgedrückt, nimmt bei den untersuchten Bodenproben mit dem mittleren Korndurchmesser nahezu linear zu.



Abbildung 5.21: Einfluss der Kornverteilung auf das Verschleißverhalten unter Berücksichtigung des Grobfaktors und Ungleichförmigkeitszahl der Ausgangskörnung (alle Körnungen)

5.3.4 Einfluss der Länge der Drehwelle

Bei allen Körnungen waren Versuche mit variierter Wellenlänge geplant. Leider ist das Versuchsgerät oft an seine Grenzen gestoßen. Es stellte sich heraus, dass die Wellenlänge an das Probematerial angepasst werden musste. Die Versuche 8/10 und 10/3 (siehe Tabellen 5.2 und 5.3) waren nicht durchführbar, da das Probematerial für die bestimmte Welle zu grob war.

5.3.4.1 Versuche 8/5 (mittlere Welle – 70 mm) und 8/11 (kurze Welle – 45 mm)

Die Einwirkung der Wellenlänge kann an den Versuchen 8/5 und 8/11 gezeigt werden und eine Aussage darüber getroffen werden. Sie unterscheiden sich in der Versuchskonzeption nur durch die Wellenlänge (Tabelle 5.15).

Nir	Probe-	Auflast	Wellenlänge	Vers	chleißbe W _m [g]	etrag	Verschleißgeschw. v _m [mg/min]			
INF.	[kg]	[kg]	[mm]	83 min	152 min	360 min	83 min	152 min	360 min	
8/5	7	11,5	70 (mittl.)	1,03	1,38	1,73	12,41	9,08	4,81	
8/11	7	11,5	45 (kurze)	0,67	1,11	1,87	8,07	7,30	5,19	

Tabelle 5.15: Parameter der Versuche 8/5 und 8/11

In Abbildung 5.22 ist ersichtlich, dass die Verschleißgeschwindigkeit bei dem Versuch mit der längeren Welle (Nr. 8/5) zunächst größer ist als bei dem mit der kürzeren Welle (Nr. 8/11) – der Anstieg bis zum ersten Messwert nach 83 Minuten ist deutlich größer. Jedoch stellt sich dann eine Verringerung der Verschleißgeschwindigkeit ein, die ab dem zweiten Messwert, nach 152 Minuten, besonders augenscheinlich wird. Zu Versuchsende weist der Drehflügel an der 70 mm Welle sogar einen geringeren Gesamtverschleiß auf als jener an der 45 mm Welle.



Abbildung 5.22: Verschleißgeschwindigkeit für unterschiedliche Wellenlängen (Versuche 8/5 und 8/11)

In Abbildung 5.23, wo die Verschleißgeschwindigkeit gegen den Beanspruchungsweg aufgetragen ist, sieht man deutlich ihre Entwicklung. Sie nimmt mit der Versuchsdauer bei Versuch 8/5 viel schneller ab (von 12,41 mg/min auf 9,08 mg/min nach 152 Minuten und auf 4,81 mg/min nach 360 Minuten). Bei Versuch 8/11 liegt sie nach 83 Minuten bei 8,07 mg/min, nach 152 Minuten bei 7,30 mg/min, bis sie nach 360 Minuten den Endwert 5,19 mg/min erreicht.



Abbildung 5.23: Verschleißgeschwindigkeit-Beanspruchungsweg-Verhältnis für unterschiedliche Wellenlängen (Versuche 8/5 und 8/11)

Da das zerkleinerte Probematerial, welches bei der Versuchsdurchführung entsteht, im Topf nach unten "fällt", befand sich zum Versuchsende beim Ausbau das feine Material fest gedrückt an den Wänden und auf dem Boden des Behälters. Darunter kamen vereinzelt einige größere Körner in der Matrix vor. Da das Mahlgut den Verschleiß dämpft, sollten höhere Verschleißbeträge bei der kurzen Welle (Versuch 8/11) gemessen werden, weil sie nicht so tief in den Behälter hineinreicht und damit der Verschleiß nicht so stark durch das Mahlgut beeinflusst werden sollte. Zu den ersten zwei Messzeitpunkten (83 und 152 min) wurden aber höhere Verschleißbeträge bei der mittleren Welle (Versuch 8/5) festgestellt.

Es lässt sich dadurch erklären, dass für den Versuch 8/11 das Probematerial ohne Überkorn verwendet wurde. Durch das Entfernen der Körner \geq 16 mm wurde das Material weniger abrasiv. Mit zunehmender Versuchsdauer hat die Verschleißgeschwindigkeit vermutlich durch das entstehende Mahlgut beim Versuch 8/5 so abgenommen, dass der Gesamtverschleiß zum letzten Messzeipunkt bei Versuch 8/11 trotz kleinerer Körnung höher war.

5.3.4.2 Versuche 9/1 (lange Welle – 85 mm) und 9/5 (mittlere Welle – 70 mm)

Während der Versuche 9/1 und 9/5, welche sich nur durch die verwendete Wellenlänge unterscheiden, wurde eine andere Abhängigkeit beobachtet, als in 5.3.4.1 beschreiben. Die Verschleißbeträge, die bei dem Versuch mit der mittleren Welle (9/5) gemessen wurden,

waren viel geringer als beim gleichartigen Versuch mit der langen Welle (9/1) (siehe Tabelle 5.16).

Nir	Masse	Auflast	Wellen-	/ellen- Verschleißbetrag W _M [g] Verschleiß [mg				chleißo [mg/i	geschw. v _M /min]		
INF.	[kg]	[kg]	[mm]	83 min	152 min	360 min	480 min	83 min	152 min	360 min	480 min
9/1	7	11,5	85 (lange)	0,71	0,76	0,79	-	8,55	5,00	2,19	-
9/5	7	11,5	70 (mittl.)	0,05	0,12	0,19	0,25	0,60	0,79	0,53	0,52

Tabelle 5.16: Parameter der Versuche 9/1 und 9/5

Nach 83 Minuten wurde bei 9/5 nur 0,05 g Verschleiß an dem Drehflügel gemessen. Bei Versuch 9/1 waren das 0,71 g. Ab diesem Messpunkt sind die Verschleißbeträge bei beiden Versuchen kaum mit der Versuchsdauer gewachsen (siehe Abbildung 5.24). Bei Versuch 9/5 wurden am Versuchsende (nach 480 Minuten) nur 0,25 g ermittelt.



Abbildung 5.24: Verschleißgeschwindigkeit bei für unterschiedliche Wellenlängen (Versuche 9/1 und 9/5)

Der Verlauf der Verschleißgeschwindigkeit ist besser in Abbildung 5.25 zu sehen, da sie gegen den Beanspruchungsweg aufgetragen wird. Bei Versuch 9/5 bleibt sie über die ganze Versuchszeit fast konstant – zum Messpunkt 83 min liegt sie bei 0,60 mg/min und nach 152 min bei 0,79 mg/min. Im Gegensatz dazu sieht der Ablauf der Verschleißgeschwindigkeit bei Versuch 9/1 wie folgt aus: nach 83 Minuten liegt sie bei 8,55 mg/min, nach 152 Minuten bei 5,00 mg/min und zum Versuchsende nach 360 Minuten bei 2,19 mg/min.

Bei Versuch 9/5 kam es auch zu einer geringeren Zerkleinerung des Probematerials als bei Versuch 9/1 (Verfeinerungsgrad – siehe Kapitel 5.2.1.2); auch optisch konnten kaum Verschleißspuren an dem Drehflügel 9/5 beobachtet werden.



Abbildung 5.25: Verschleißgeschwindigkeit-Beanspruchungsweg-Verhältnis für unterschiedliche Wellenlängen (Versuche 9/1 und 9/5)

Dieses Ergebnis ist schwer zu erklären; das Problem liegt aber vermutlich an der Konstruktion des Versuchsgeräts. Da sich die Verschleißbeträge zu stark von den mit der kurzen Welle festgestellten abweichen, wird der Versuch 9/5 als nicht aussagekräftig angesehen und für die weitere Interpretation der Abrasivität aus den Ergebnissen ausgeschlossen.

5.4 Vergleich mit LCPC-Abrasivitätsversuchen

Die Körnungen 400/8 (8,0-16,0 mm) und 400/10 (16,0-32,0 mm) wurden für die Versuchsdurchführung gebrochen und die erforderliche Fraktion 4-6,3 mm abgesiebt. Mit der Körnung 400/9 wurden zwei Versuche durchgeführt und zwar mit dem gesamten Probematerial (4,0 – 8,0 mm) und mit der Teilprobe nach Entfernen der Fraktion 6,3-8,0 mm. Aus dem am Drehflügel gemessenen Verschleiß wurde der LCPC-Abrasivitätskoeffizient A_{BR} und die Brechbarkeit B_{R} , wie im Kapitel 2.3.1.1 beschrieben, ermittelt (siehe Tabelle 5.17).

Probem	aterial	Ge Drehf	wicht lügel [g]	Verschleiß- betrag [g]	Gewichtsanteil der Körner <1,6 mm [g]	A _{BR} [g/t]	B _R [%]
400/8		vor	44,4841	0.6720	215 /	12/5 9	12.2
4,0-6,3 mm	Bruchkorn	5 min	43,8112	0,0729	215,4	1343,0	43,3
400/10		vor	44,7609	0 7112	217.0	1400.6	42.4
4,0-6,3 mm	Bruchkorn	5 min	44,0496	0,7113	217,0	1422,0	43,4
400/9		vor	44,7725	0.2006	202.1	500.0	40.6
4,0-6,3 mm	Rundkorn	5 min	44,4729	0,2990	203,1	599,Z	40,0
400/9		vor	44,6345	0.2007	216.0	701 /	12.2
4,0-8,0 mm	Rundkorn	5 min	44,2438	0,3907	210,0	101,4	43,3

Tabelle 5.17: Ergebnisse der LCPC-Abrasivitätsversuche (alle Körnungen)

Der Abrasivitätskoeffizient A_{BR} aller verwendeten Probekörnungen ist in Abbildung 5.26 dargestellt. Als das abrasivste Material hat sich die Bruchkörnung 400/10 gezeigt, obwohl der Unterschied zum zweitgrößten Versuch (400/8) ziemlich gering ist ($\Delta A_{BR} = 77$ g/t). Der Abrasivitätskoeffizient der Gesamtprobe 400/9 (4-8 mm) ist um 182 g/t höher als der Koeffizient der Teilprobe (4-6,3 mm), was ein deutlicherer Unterschied ist, als der zwischen dem Material 400/8 und 400/10, obwohl die Ausgangskörnung 400/10 doppelt so groß ist. Es ist dabei zu betonen, dass die mineralogische Zusammensetzung beider Körnungen als die Ursache des Unterschieds gesehen werden kann, da die Körnung 400/8 einen kleineren Anteil von Quarz und Feldspat beinhaltet (siehe Kapitel 4.2.4), welche durch ihre Härte den Verschleiß am meisten beeinflussen. Der Abrasivitätskoeffizient A_{BR} steigt mit dem zunehmenden Quarzgehalt exponentiell (siehe Abbildung 2.12).

Die mit den Orientierungsversuchen (Versuche 8/5, 9/1 und 10/1 – Probemasse 7 kg; Auflast 11,5 kg – siehe Tabelle 5.12) bestimmten Abrasivitätzahlen AW_G weisen ein anderes Verhältnis zwischen einzelnen Körnungen auf (Abbildung 5.27) und nähern sich vermutlich mehr der in der Praxis gewonnenen Erfahrung an.

Auch wenn der Beanspruchungsweg im TU-Abrasimeter nach 83 Minuten gleich wie beim LCPC-Test ist, werden für die Beurteilung der Abrasivität die Ergebnisse der Orientierungsversuche nach 152 Minuten bzw. nach 360 Minuten als aussagekräftiger angesehen (siehe Kapitel 5.3.1). Die Abrasivitätszahl AW_G des Versuchs 10/1 weist fast einen 10-fachen Wert (4112 mg.cm²/min) gegenüber dem Versuch 9/1 (437 mg.cm²/min) und einen 4-fachen Wert gegenüber dem Versuch 8/5 (1090 mg.cm²/min) auf.



Abbildung 5.26: Abrasivitätskoeffizient A_{BR} aller Körnungen



Abbildung 5.27: Abrasivitätszahl AW_G für Versuche 10/1, 8/5 und 9/1 nach 83, 152 und 360 Minuten

Die Abrasivität des Korngrößenbereichs > 6,3 mm soll gem. [25] beim LCPC-Versuch durch die Scharfkantigkeit der gebrochenen Körner berücksichtigt werden, was aber nicht der Realität entspricht, da der Unterschied zwischen den Korngrößen der Proben 400/10 und 400/8 fast verschwunden ist und eventuell nur durch die geringere Kornhärte des Materials 400/8 verursacht ist.

Die Verwendung von Bruchkorn zur Gewinnung von Aussagen über Körnungen > 6,3 mm kann gemäß der vorliegenden Vergleiche mit den Abrasivitätskennwerten aus dem TU-Abrasimeter sowohl zu einer deutlichen Unterschätzung der Abrasivität (Material 400/10), als auch zu einer massiven Überschatzung der Abrasivität (Material 400/8) führen.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK AUF ZUKÜNFTIGE FORSCHUNG

6.1 Fehlerquellen, die eine zuverlässige Ergebnisinterpretation erschweren

6.1.1 Konstruktion des Auflastrings

Die Konstruktion des Auflastrings (Abbildung 6.1 – links) hat sich nicht als optimal erwiesen, da der Ring vor allem bei Versuchen mit Korngrößen bis 16 mm oft klemmen blieb. Dies geschah, wenn sich ein Korn in die Spalte zwischen Behälter und Ring gedrängt hatte und die Auflast daher nur von einem einzelnen Korn getragen wurde. Der Ring konnte nicht mehr auf dem Probematerial satt aufliegen und deswegen waren die Gewichte nicht vollständig wirksam.

Durch diesen Umstand wurden die Gesamtergebnisse verzerrt, da an dem Drehflügel niedrigere Verschleißbeträge, infolge der kleineren wirkenden Auflast, erzielt wurden. Man kann nicht feststellen, wann die Auflast während der Versuchsdurchführung gut wirksam war.

Als Abhilfe gegen diese Fehlerquelle wurde infolge der Orientierungsversuche ein "Abdichtungsring", bestehend aus aufgeklebten Kunststoffstreifen, konzipiert (Abbildung 6.1 – rechts). Diese Konstruktion soll das Eindringen der Körner in den Spalt zwischen Ring und Behälter verhindern, sodass der Auflastring während der gesamten Versuchsdauer frei beweglich bleibt und auf das Probematerial aufliegt. Bei Versuch 400/11-2* wurde der verbesserte Auflastring erstmals eingesetzt und die auf diese Weise erzielten Ergebnisse erscheinen deutlich plausibler.



Abbildung 6.1: Auflastring des TU-Abrasimeters (Detail); bei der Orientierungsversuche verwendete Konstruktion (links) und verbesserte Konstruktion (rechts)

6.1.2 Einhaltung der Versuchsdauer

Der geplante Versuch 8/10 war mit der langen Drehwelle überhaupt nicht durchführbar, weil der Elektromotor nicht stark genug war, um das entstandene Drehmoment zu überwinden. Das gleiche passierte auch bei Versuch 10/3.

Die Ursache dafür ist vermutlich der für die Probekörnung zu kleine Spalt zwischen dem Behälter und dem Drehflügel. Auch wenn der Spalt größer als das Größtkorn war, haben sich die Körner gleich nach dem Starten des Versuchs ineinander verkeilt und konnten mit dem Drehflügel nicht mehr locker bewegt werden. Die beiden Versuche wurden daher abgebrochen und der Einfluss der Drehwelle konnte nicht überprüft werden.

Aus demselben Grund kamen bei der Reihe 400/10 (16-32 mm) auch mit der langen Welle Störungen vor. Die Körner blieben zeitweilig verkeilt und der Elektromotor war nicht in der Lage, das Gerät weiter anzutreiben. Trotz der öfteren Kontrolle während der Versuchsdurchführung gibt es kleine Abweichungen in der Versuchsdauer (\pm 10 Minuten) bei Versuchen 10/1 und 10/2.

6.1.3 Ermittlung der Sieblinie

Die Korngrößenverteilung wurde aus zeitlichen Gründen ausschließlich mittels Trockensiebung ermittelt, was eine Unterschätzung schon im Bereich von Sanden und vor allem im Bereich von Schluffen und Tonen (Partikel < 0,063 mm) zur Folge hatte. Eine vollständige Trennung der Feinteile, die an den Grobkörnern haften bleiben, ist nur mittels Durchwaschen (Nasssiebung) zu erzielen.

Vor jeder Siebung sollte das Probematerial wieder bis zur Massenkonstanz getrocknet werden, weil der Boden während der Versuchsdurchführung aus der Luftfeuchtigkeit Wasser aufnehmen konnte. Dies hätte jedoch den ganzen Versuchsablauf wesentlich verzögert. Vor allem bei der Versuchsreihe 400/8 kam es zu zahlreichen Ungenauigkeiten, da der Versuch mit demselben Probematerial fortgesetzt wurde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die ermittelten Sieblinien nur eine beschränkte Aussagekraft haben.

6.1.4 Oxidschicht (Zunder) an den Drehflügeln

Beim Walzen, wodurch metallische Werkstoffe umgeformt und gestreckt werden, oder bei anderen Wärmebehandlungen (Glühen, Härten) wird durch erhöhte Temperatur in Verbindung mit einer oxidierenden Atmosphäre an der Werkzeugoberfläche eine dünne Oxidschicht gebildet, die als Zunder bezeichnet wird. Diese entstehende Oxidschicht weist andere Eigenschaften als der Kern auf – eine höhere Festigkeit, jedoch eine geringere Zähigkeit – sie ist spröd und leicht abplatzend. [8, 31, 10]

Der Zunder sollte vor dem Versuchsbeginn von dem Drehflügel entfernt werden (Sandstrahlen), damit das Verschleißverhalten davon unbeeinflusst bleibt. Dies wurde allerdings bei den Orientierungsversuchen nicht gemacht. Auch wenn der Härteunterschied zwischen dem Werkstück mit (HRB 65,9) und ohne Zunder (HRB 68,9) nicht groß ist, wurde das Verschleißverhalten infolge der anderen physikalischen Eigenschaften der Zunderschicht geändert.

Da aber die Bedingungen bei allen Versuchen gleich blieben (Drehflügel mit Zunder), sind die Ergebnisse somit miteinander vergleichbar. Für die zukünftige Durchführung ist allerdings zu empfehlen, die Zunderschicht zu entfernen.

6.2 Empfehlungen für zukünftige Versuchsdurchführung

6.2.1 Probemasse

Da die Probemasse einen wesentlichen Einfluss auf den Verschleiß hat, muss sie bei den Versuchen einheitlich gehalten werden, damit die Ergebnisse miteinander vergleichbar sind und nur die Abrasivität des Probematerials (Bodens) beurteilt wird. Während der Durchführung der Orientierungsversuche hat sich die **7 kg-Probemasse** für trockene Korngemische als optimal erwiesen, d.h. sie hat aussagekräftige Ergebnisse geliefert und war gleichzeitig in der Handhabung noch praktikabel.

6.2.2 Auswahl der Welle

Mittels der Länge der Welle wird die Korngröße des Abrasivguts berücksichtigt. Die Auswahl der Welle soll sich sowohl nach dem Größtkorn, als auch nach der Kornverteilung richten. Anhand der gewonnen Erfahrung mit enggestuften Körnungen werden folgende Grenzen für die Versuchsdurchführung vorgeschlagen (siehe Tabelle 6.1):

Korngröße [mm]	Länge der Welle [mm]	Anmerkung
<8	85 (lange)	
8-16	70 (mittlere)	bis zu 1/3 Massenanteil des Größtkorns 32 mm auch mittl. Welle möglich
16-32	45 (kurze)	100 % Größtkorn 32 mm nur mit langer Welle möglich

Tabelle 6.1: Auswahl der Welle nach der Korngröße des Abrasivguts

Entsprechend der Versuchsauswertungen 8/5 und 8/11 (siehe Kapitel 5.3.4.1) sollte die Auswahl der Welle nicht die Ergebnisse beeinflussen, da bei ausreichend langer Versuchszeit der gleiche Verschleißbetrag mit beiden Wellen erzielt wurde. Die oben erwähnten Grenzen haben sich jedenfalls als passend gezeigt und haben zuverlässige Ergebnisse geliefert.

Es sollte weiter untersucht werden, welcher Anteil von gröberen Teilen noch für die jeweilige Welle zulässig ist – welche Kornverteilung muss das Probematerial aufweisen, um den Versuch mit der Welle noch durchführen zu können.

6.2.3 Versuchsdauer

Die am Anfang angeführte Idee, die Orientierungsversuche mit dem LCPC-Test aufgrund des gleichen Beanspruchungswegs zu vergleichen, hat sich als nicht brauchbar gezeigt. Es handelt sich in beiden Fällen um ein anderes Tribosystem und die Versuchszeit muss die Gesetzmäßigkeiten, von denen das konkrete Tribosystem geprägt ist, respektieren. Das heißt aber nicht, dass die Ergebnisse beider Experimente nicht verglichen werden können. Sowohl der Abrasivitätskoeffizienten A_{BR} (LCPC), als auch die Abrasivitätszahl AW_{G} beschreiben die gleiche Eigenschaft des Probematerial – die Abrasivität.

Um dem Verlauf des Verschleißvorgangs folgen zu können, sind drei Messzeitpunkte sinnvoll. In der Regel zeigte sich nach dem Messzeitpunkt von 152 Minuten nur mehr eine geringe Verschleißzunahme. Eine Begrenzung der Versuchsdauer auf z.B. 4 Stunden wird daher kaum weniger Erkenntnisse bringen. Es werden für zukünftige Versuche folgende drei Messzeitpunkte vorgeschlagen:

- 60 Minuten
- 180 Minuten
- 240 Minuten

6.2.4 Abrasivgut

Bei realen Abbauvorgängen (z.B. Tunnelvortrieb mit Schildmaschinen) stehen die Abbauwerkzeuge laufend in Kontakt zu "frischem" Abrasivgut (Boden) – offenes tribologisches System [3]. Um in der Wirklichkeit vorkommende Verschleißvorgänge besser mit dem TU-Abrasimeter simulieren zu können, wäre es sinnvoll, Versuche mit wiederkehrender Materialerneuerung durchzuführen. Die "Dämpfungseffekte" des Drehflügelverschleißes infolge zunehmender Abrundung des Abrasivguts und Entstehung von Feinmaterial während der Versuchsdurchführung könnten auf diese Weise minimiert werden.

Es sollte dabei untersucht werden, zu welchen Zeitpunkten das "abgenutzte" Abrasivgut gegen frisches ausgetauscht werden sollte, damit optimale Ergebnisse gewonnen werden können und eine Aussage über das Verschleißverhalten möglich wäre.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Derzeit gibt es nur wenige zuverlässige Methoden zur Abschätzung und Prognose des Werkzeugverschleißes in Lockergestein, der durch abrasive Eigenschaften der Böden bei verschiedenen Tiefbauarbeiten hervorgerufen wird. Abrasive Böden richten erhebliche Schäden an den Abbauwerkzeugen an und verursachen unerwünschte und kostspielige Störungen beim Bauablauf und damit ein erhöhtes Verfahrensrisiko. Die Quantifizierung der Abrasivität von Lockergestein ist daher für die Planung von Bauarbeiten und ihrer Ausführung von entscheidender Bedeutung.

Der Stand der Technik ist vor allem im Korngrößenbereich von Mittel- und Grobkiesen unausgereift. Am Institut für Geotechnik der TU Wien wurde speziell für diesen Zweck das sog. TU-Abrasimeter entwickelt, um eine schnelle Beurteilung der Abrasivität von Lockergestein im Labormaßstab zu schaffen.

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurden insgesamt achtzehn Versuche mit dem TU-Abrasimeter, mit drei verschiedenen Körnungen im Größenbereich von 4 bis 32 mm und vier LCPC-Versuche mit den gleichen Körnungen durchgeführt. Im Gegensatz zum LCPC-Versuch, ermöglicht es das TU-Abrasimeter, mehrere Einflussfaktoren auf den Verschleiß zu erfassen. Was das Abrasivgut betrifft, wurden folgende Parameter untersucht:

- Einfluss der Korngröße
- Einfluss der Probemasse

Die äußeren Belastungen (das sog. Beanspruchungskollektiv), die auch variiert wurden, sind durch folgende Parameter repräsentiert:

- Auflast
- Länge der Drehwelle
- Versuchszeit

Diese Parameter und deren Einfluss auf den Verschleiß wurden detailliert untersucht und davon auf die Abrasivität der Probekörnungen geschlossen. Die Orientierungsversuche sollten auch überprüfen, ob die Konzeption des Versuchsgeräts die gesetzten Ziele erfüllen kann.

Zusammenfasend konnten folgende Ergebnisse aus den Orientierungsversuchen abgeleitet werden:

- Eine höhere Auflast (die die Lagerungsdichte simulieren sollte) hat, wie vorausgesetzt, einen größeren Verschleiß hervorgerufen. Je mehr Anpressdruck auf den Boden angebracht wird, desto höherer Verschleiß ergibt sich.
- 2. Die Probemasse stellte sich überraschend als ein noch wesentlicherer Einfluss auf den Verschleiß heraus als die Auflast. Für die zukünftigen Versuchsdurchführungen wird daher eine einheitliche Probemasse von 7 kg empfohlen, die sich aufgrund der Erfahrungen als optimal erwiesen hat. Die Auflast kann je nach Bedarf variiert werden, weil sie eine lineare Zunahme des Verschleißes bewirkt.
- 3. Für die zukünftige Versuchsdurchführung sollte die gesamte Versuchsdauer auf vier Stunden beschränkt werden, da nach diesem Zeitpunkt keine wesentliche Verschleißzunahme mehr zu erwarten ist. Insgesamt werden drei Messzeitpunkten vorgeschlagen, da auf diese Weise der Verschleißvorgang genau abgebildet werden kann.
- 4. Anhand der durchgeführten Versuche wurde eine Abhängigkeit zwischen der einsetzbaren Wellenlänge und dem mittleren Korndurchmesser herausgefunden und die Grenzen für die Auswahl der jeweiligen Welle wurden vorgeschlagen.
- 5. Es hat sich bestätigt, dass das Probematerial mit zunehmender Korngröße abrasiver wird. Um die Korngröße in einen Koeffizient einzubeziehen, wurden die Abrasivitätszahlen AW_G bzw. AW_{GC} eingeführt, die die Korngröße mit Hilfe des Grobfaktors der Ausgangskörnung bzw. noch zusätzlich die Kornverteilung mittels der Ungleichförmigkeitszahl berücksichtigen. Die Abrasivität des Bodens kann somit in einem Wert ausgedrückt werden.
- 6. Zum Schluss wurden die Ergebnisse der Orientierungsversuche mit den Ergebnissen der LCPC-Versuche verglichen und wichtige Erkenntnis gewonnen. Der LCPC-Test ist für eine Aussage über gröbere Körnungen (Kiese) überhaupt nicht gut geeignet, da das Bruchkorn nicht über die Eigenschaften des ursprünglichen Probematerials verfügt. Die Orientierungsversuche lieferten komplett andere Abrasivitätswerte, womit nachgewiesen wurde, dass man mit dem LCPC-Test nur eine ungefähre Vorstellung über der Abrasivität der gröberen Körnungen gewinnen kann.

Die vorliegenden Orientierungsversuche stellen eine wertvolle Grundlage für die weitere Forschung der Abrasivität von Lockergestein mit dem TU-Abrasimeter dar. Sie haben sowohl Defizite, als auch Vorzüge des Versuchsverfahrens aufgedeckt und die gewonnenen Primärdaten können zur besseren Beurteilung und besserem Verständnis der Abrasivität von Lockergestein beitragen.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Adam D.: Grundbau und Bodenmechanik I; Vorlesungsskriptum, 2010
- [2] Büchi E., Mathier J.-F., Wyss Ch.: Gesteinsabrasivität ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein; Tunnel 5/1995, Seite 38-44
- [3] Drucker P: Abrasivität und Verschleiß Baugrund vs. Verfahrensrisiko; VÖBU Bauinnung; schriftliche Vertragsfassung – Wien, 19. Oktober 2011
- [4] Drucker P.: Einfluss der Abrasivität von Lockergestein auf den maschinellen Rohrvortrieb; ÖGL Symposium – Saalfelden, 19. und 20. Oktober 2010, Seite 51-62
- [5] Drucker P.: Mündliche Information am 11.10.2011, Institut für Geotechnik, TU Wien
- [6] Frank H.: Bodenmechanik und Erddruckberechnung; Studienblätter FH Giessen-Friedberg; <u>http://homepages.thm.de/~hg8195/Skripte/Boden.pdf</u>; 09.09.2011
- [7] Gesellschaft f
 ür Tribologie e.V.; Arbeitsblatt 7: Tribologie, Verschlei
 ß, Reibung (Definitionen, Begriffe, Pr
 üfung) – Aachen, 2002
- [8] Gobrecht J.: Werkstofftechnik Metalle; München, Oldenbourg Verlag, 2006
- [9] Heinrich R.: Untersuchungen zur Abrasivität von Böden als verschleißbestimmender Kennwert; Dissertation – Freiberg, 1995
- [10] Horn W., Horn H.J., Merfels W.: Wärmebehandlung von Stahl Düsseldorf, Dt. Verlag für Schweißtechnik, 1987
- [11] Köhler M., Maidl U., Martak L.: Abrasivität und Werkzeugverschleiß beim Schildvortrieb im Lockergestein; Geomechanics und Tunneling – April 2011, Seite 36-53
- [12] NF P 18-579: 1990-12; Granulats Essai d'abrasivité et de broyabilité
- [13] Niggli P.: Lehrbuch der Mineralogie und Kristallchemie Berlin, Verlag von Gebrüder Borntraeger, 1941
- [14] Nilsen B., Dahl F., Holzhäuser J., Raleigh P.: Abrasivity testing for rock and soils; Tunnel and Tunelling International – April 2006, Seite 47-49

- [15] Nilsen B., Dahl F., Holzhäuser J., Raleigh P.: New Test Methodology for Estimating the Abrasiveness of Soils for TBM Tunnelling; RETC Proceedings – Toronto, 2007, Seite 104-116
- [16] Nilsen B., Dahl F., Holzhäuser J., Raleigh P.: SAT: NTNU's new soil abrasion test; Tunnel and Tunelling International – Mai 2006, Seite 47-49
- [17] ÖNORM EN 933-5: 2005-04-01 Pr
 üfverfahren f
 ür geometrische Eigenschaften von Gesteinsk
 örnungen – Teil 5: Bestimmung des Anteils an gebrochenen K
 örner in groben Gesteinsk
 örnungen
- [18] Österreichische Vereinigung f
 ür Beton und Bautechnik: Mitteilungen Februar 2011, Seite 15
- [19] Österreichische Vereinigung für grabenloses Bauen und Instandhalten von Leitungen: ÖGL Regelwerk – Technische Richtlinie; ÖGL TR-101 Rohrvortrieb mit offenem Schild, 2010
- [20] Plinninger R., Käsling H., Thuro K., Spaun G.: Versuchstechnische und geologische Einflussfaktoren beim CERCHAR-Abrasivitätstest (CAI), Geotechnik 2/2002, Seite 110-113
- [21] Riehle M., Simmchen E.: Grundlagen der Werkstofftechnik Stuttgart, Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, 2000
- [22] RVS 8.511: Oberbauarbeiten (ohne Deckarbeiten); Tragschichten, Ungebundene Tragschichten – Wien, November 1979 (2001 zurückgezogen)
- [23] Sommer K., Heinz R., Schöfer J.: Verschleiß metallischer Werkstoffe Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2010
- [24] Thuro K., Käsling H.: Klassifikation der Abrasivität von Boden und Fels; Geomechanics und Tunneling – Februar 2009, Seite 179-188
- [25] Thuro K., Singer J., Käsling H., Bauer M.: Abrasivitätsuntersuchungen an Lockergesteinen im Hinblick auf die Gebirgslösung; Tagungsbericht – Bremen, 2006, Seite 283-290
- [26] Uetz H.: Verschleiß durch körnige mineralische Stoffe; Aufbereitungs-Technik 3/1969
 Stuttgart, Seite 130-140

[27] Wellinger K., Uetz H.: Gleitverschleiß, Spülverschleiß, Strahlverschleiß unter der Wirkung von körnigen Stoffen; VDI-Forschungsheft 449, 1955

Internetquellen:

- [28] http://www.cetr.com/ASTM_Standard/ASTM_G75-95.htm; 03.10.2011
- [29] http://www.htl-steyr.ac.at/~morg/htl/FET/haertepr.html; 03.10.2011
- [30] <u>http://www.igb.tuwien.ac.at/forschung/details/backto/2631/news/</u> <u>das-tu-abrasimeter.html;</u> 09.09.201
- [31] <u>http://www.maschinenbau.de/maschinenbau-lexikon/V/1088/Verzunderung.aspx;</u> 03.10.2011
- [32] <u>http://wille-geotechnik.com/fileadmin/Datenablage/PDF/LP_6000_Cerchar_dt.pdf;</u> 09.09.2011

9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Gliederung der Lockergesteine nach [1]2
Abbildung 2.2: Schema eines tribologischen Systems nach [7]5
Abbildung 2.3: Verschleißmechanismen bei tribologischer Beanspruchung [23]9
Abbildung 2.4: Beanspruchungsarten beim Abrasivverschleiß [23]
Abbildung 2.5: Schema eines Verschleißtopfversuchs (links) und Schleifpapierversuchs (rechts) [9]
Abbildung 2.6: Ein typisches Hoch-/Tieflage Verhalten des Abrasivverschleißes in Abhängigkeit von der Härte des Abrasivs [21]16
Abbildung 2.7: Vergleich der Härtewerte verschiedener Härteprüfungsverfahren [28]18
Abbildung 2.8: Einfluss der Korngröße auf das Verschleißverhalten für verschiedene Werkstoffe [27]
Abbildung 2.9: Einfluss der Befeuchtung auf das Verschleißverhalten von Sanden für verschiedene Werkstoffe [27]21
Abbildung 2.10: Einfluss der Kornform auf das Verschleißverhalten [23]
Abbildung 2.11: LCPC Abrasivitäts-Prüfgerät an der TU Wien24
Abbildung 2.12: LCPC- Abrasivitätskoeffizienten aufgetragen gegen den Anteil abrasiver (kristalliner) Komponenten im Kies, gefasst als Äquivalenter Quarzanteil [24]
Abbildung 2.13: Cerchar-Testgerät mit Binokular zur Ermittlung des CAI [29]27
Abbildung 2.14: Schema des NTNU-Abrasivitätstests [13]28
Abbildung 2.15: Originalprüfkörper (links) und modifizierter Prüfkörper (rechts) für SAT [14]29
Abbildung 3.1: TU-Abrasimeter
Abbildung 3.2: Aufbau des TU-Abrasimeters [4]31
Abbildung 3.3: Vorbereiteter Drehflügel (1) wird mit einer Mutter (2) an der Welle (3) befestigt. Danach kann der Verschleißtopf (4) hochgefahren werden. Der Auflastring(5), mit Feststellschrauben (6) befestigt, befindet sich gerade in oberer Fixposition

Abbildung 3.4: Nach dem Festziehen der Flügelschrauben (7) kann das Probematerial durch
den Einfülltrichter gefüllt werden (8) und fällt in den Versuchstopf
Abbildung 3.5: Herablassen des Auflastrings (9) und Anhängen der Gewichte (10). Einschalten des Elektromotors (11) und Beginn der Zeitaufzeichnung des Versuchs (Stoppuhr)
Abbildung 3.6: Erscheinungsbild des Drehflügels nach dem Versuch 10/1
Abbildung 3.7: Zerkleinerung der Körnung 400/10 (links) und 400/8 (rechts) infolge Versuchsdurchführung im TU-Abrasimeter nach 6 Stunden
Abbildung 4.1: Korngrößenverteilung der Ausgangskörnungen (Farben der Körnungslinien entsprechend Bezeichnungen Tab. 4.1)
Abbildung 4.2: Korngrößenverteilung der Ausgangskörnungen (Detail)mit Bezeichnungen der Proben
Abbildung 4.3: Definition von Grobfaktor G und Verfeinerungsgrad Δ G [22]40
Abbildung 4.4: Körnung 400/8 – Drehflügel nach einer Minute Versuchszeit bei Versuch 8/10 (abgebrochen)
Abbildung 4.5. Körnung 400/9 (4-8 mm)46
Abbildung 4.6: Körnung 400/10 (16-32 mm)
Abbildung 5.1: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/5 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun, nach 360 Minuten – schwarz, Ausgangskörnung – blau)
Abbildung 5.2: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/8 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun, Ausgangskörnung – blau)53
Abbildung 5.3: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 9/1 (nach 360 min – schwarz, Ausgangskörnung – blau)
Abbildung 5.4: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 9/5 (nach 360 min – schwarz, Ausgangskörnung – blau)
Abbildung 5.5: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 10/1 (nach 360 min – schwarz, Ausgangskörnung – blau)55
Abbildung 5.6: Scharfkantige Körner nach dem Versuch 10/1 (4-8 mm)

Abbildung 5.7: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 11/1 (nach 360 min – schwarz, Ausgangskörnung – blau)
Abbildung 5.8: Verschleißgeschwindigkeit bei Versuchen 11/1, 11/2* und 8/5 (alle 7 kg Probemasse; 11,5 kg Auflast) zur Bestimmung der optimalen Messzeitpunktes61
Abbildung 5.9: Auflast-Verschleiß-Verhältnis nach 152 min mit Material 400/8 für verschiedene Probemassen
Abbildung 5.10: Auflast-Verschleiß-Verhältnis nach 83 min mit Material 400/9 für zwei verschiedene Probemassen
Abbildung 5.11: Verschleißgeschwindigkeit bei 10-kg-Probemasse für verschiedene Auflasten (Körnung 400/8)65
Abbildung 5.12: Probemasse-Verschleiß-Verhältnis nach 152 min mit Material 400/8 für unterschiedliche Auflast
Abbildung 5.13: Verschleißgeschwindigkeit bei Auflast 11,5 kg (Körnung 400/8)68
Abbildung 5.14: Gesamtmasse-Verschleiß-Verhältnis (Körnung 400/8)69
Abbildung 5.15: 3D-Darstellung der Abhängigkeit des Verschleißes nach 152 Minuten von der Probemasse (5 kg; 7kg; 10 kg) und Auflast (5,5 kg; 11,5 kg; 17,5 kg)
Abbildung 5.16: Verschleißgeschwindigkeit für Körnungen 400/8, 400/9 und 400/10 mit 7 kg- Probemasse
Abbildung 5.17: Verschleißgeschwindigkeit-Beanspruchungsweg-Verhältnis für alle Korngrößen (Probemasse 7 kg, Auflast 11,5 kg)73
Abbildung 5.18: Einfluss der Korngröße auf das Verschleißverhalten unter Berücksichtigung des Grobfaktors der Ausgangskörnung (Material 400/8 Ø 12 mm, 400/9 Ø 6 mm und 400/10Ø 24 mm)
Abbildung 5.19: Verschleißgeschwindigkeit der Versuche 8/5 und 11/175
Abbildung 5.20: Verschleißgeschwindigkeit-Beanspruchungsweg-Verhältnis der Versuche 8/5 und 11/176
Abbildung 5.21: Einfluss der Kornverteilung auf das Verschleißverhalten unter Berücksichtigung des Grobfaktors und Ungleichförmigkeitszahl der Ausgangskörnung (alle Körnungen)

Abbildung 5.22: Verschleißgeschwindigkeit für unterschiedliche Wellenlängen (Versuche 8/5 und 8/11)
Abbildung 5.23: Verschleißgeschwindigkeit-Beanspruchungsweg-Verhältnis für unterschiedliche Wellenlängen (Versuche 8/5 und 8/11)
Abbildung 5.24: Verschleißgeschwindigkeit bei für unterschiedliche Wellenlängen (Versuche 9/1 und 9/5)
Abbildung 5.25: Verschleißgeschwindigkeit-Beanspruchungsweg-Verhältnis für unterschiedliche Wellenlängen (Versuche 9/1 und 9/5)82
Abbildung 5.26: Abrasivitätskoeffizient A _{BR} aller Körnungen
Abbildung 5.27: Abrasivitätszahl AW _G für Versuche 10/1, 8/5 und 9/1 nach 83, 152 und 360 Minuten
Abbildung 6.1: Auflastring des TU-Abrasimeters (Detail); bei der Orientierungsversuche verwendete Konstruktion (links) und verbesserte Konstruktion (rechts)

10 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Gliederung des Verschleißgebietes [23] 10
Tabelle 2.2: Mohs'sche Härteskala und Relativschleifhärte nach Rosiwal [13] 17
Tabelle 2.3: Bezeichnung des Rundungsgrades nach [17]
Tabelle 2.4: Klassifikation des LCPC-Abrasivitätskoeffizienten nach [2] und [25]25
Tabelle 2.5: Klassifikation der LCPC Brechbarkeit B _R [25]25
Tabelle 2.6: Gegenüberstellung des LCPC-Abrasivitätskoeffizienten LAK und des Cerchar-Abrasivitätsindex CAI nach [25]27
Tabelle 4.1: Parameter der Ausganskörnungen
Tabelle 4.2: Grobfaktor der Ausgangskörnungen für die Orientierungsversuche
Tabelle4.3:BerechnungderUngleichförmigkeits-undKrümmungszahlenderAusgangskörnungen für die Orientierungsversuche41
Tabelle4.4:MineralogischeZusammensetzungderProbengemäßUntersuchungsergebnisseBOKU [5]42
Tabelle 4.5: Ableiten des ersten Messzeitpunktes von dem LCPC-Versuch
Tabelle 4.6: Versuchsdauer und Beanspruchungsweg der Orientierungsversuche
Tabelle 4.7: Ausgangsparameter der Versuchsreihe 400/8
Tabelle 4.8: Ausgangsparameter der Versuchsreihe 400/9
Tabelle 4.9: Ausgangsparameter der Versuchsreihe 400/10 und 400/1148
Tabelle 5.1: Ermittelte Grobfaktoren G und Verfeinerungsgrade ΔG aller Versuche
Tabelle 5.2: Ergebnisse der Reihe 400/858
Tabelle 5.3: Ergebnisse der Reihen 400/9, 400/10 und 400/1159
Tabelle 5.4: Ergebnisse des Versuchs 11/2*60
Tabelle 5.5: Verschleiß, Verschleißgeschwindigkeit und Grobfaktor der Versuche für dieBestimmung der optimalen Versuchsdauer

Tabelle 5.6: Zunahme des Verschleißbetrags in Relation zur Auflast
Tabelle5.7:Verschleiß undVerschleißgeschwindigkeitbei10-kg-Probemassefürverschiedene Auflasten (Körnung 400/8)65
Tabelle 5.8: Zunahme des Verschleißbetrags in Relation zur Probemasse 67
Tabelle 5.9: Vergleich der Verschleißgeschwindigkeit für verschiedene ProbemassenMinuten (Körnung 400/8)67
Tabelle 5.10: Versuchsreihe 400/8 nach der Gesamtmasse (Probemasse+ Auflast) sortiert 69
Tabelle 5.11: Abrasivitätszahl AW _G für alle Versuche (Berücksichtigung von Grobfaktor der Ausgangskörnung)
Tabelle 5.12: Abrasivitätszahl AW $_{\rm G}$ und Eingangswerte für die Berechnung
Tabelle 5.13: Parameter der Versuche 8/5 (Kornfraktion 8-16 mm) und 11/1 (Kornfraktion 4- 32 mm) 75
Tabelle 5.14: Abrasivitätswert AW_{GC} für 7 kg Probemasse-Versuche (Berücksichtigung von
Grobfaktor und Ungleichförmigkeitszahl)
Tabelle 5.15: Parameter der Versuche 8/5 und 8/11 78
Tabelle 5.16: Parameter der Versuche 9/1 und 9/5
Tabelle 5.17: Ergebnisse der LCPC-Abrasivitätsversuche (alle Körnungen)
Tabelle 6.1: Auswahl der Welle nach der Korngröße des Abrasivguts
11 ANHANG

11.1 Korngrößenverteilungen

11.1.1 Probekörnung 400/8



Abbildung 11.1: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/1 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun, nach 360 min – schwarz; Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 11.2: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/2 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun; Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 11.3: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/3 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun; Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 11.4: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/4 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun; Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 11.5: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/6 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun; Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 11.6: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/7 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun; Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 11.7: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/9 (nach 83 min – grau, nach 152 min – braun; Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 11.8: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 8/11 (nach 360 min – schwarz; Ausgangskörnung – blau)

11.1.2 Probekörnung 400/9



Abbildung 11.9: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 9/2 (nach 360 min – schwarz; Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 11.10: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 9/3 (nach 360 min – schwarz; Ausgangskörnung – blau)



Abbildung 11.11: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 9/4 (nach 360 min – schwarz; Ausgangskörnung – blau)

11.1.3 Probekörnung 400/10



Abbildung 11.12: Korngrößenverteilung nach dem Versuch 10/2 (nach 360 min – schwarz; Ausgangskörnung – blau)

11.2 Fotos



Abbildung 11.13: TU-Abrasimeter und LCPC-Versuchsgerät an der TU Wien



Abbildung 11.14: Untere Seite des Drehflügels nach Versuch 8/5 (links) und Versuch 8/11 (recht)



Abbildung 11.15: Vergleich der Drehflügel für LCPC-Test und TU-Abrasimeter nach dem Versuch mit Körnung 400/8



Abbildung 11.16: Gleich aussehendes Probematerial nach dem LCPC-Test – links vor dem Versuch rundkantig (400/9), rechts scharfkantig (400/10)