

UNIVERSITÄT MISKOLC
FAKULTÄT FÜR TECHNISCHE ERDWISSENSCHAFT



FORSCHUNG DES PHYSIKALISCHEN AUFSCHLUSSES MIT NASSMAHLUNG VON
ERZBERGEGHALDENKÖRNERN

THESEN DER DOKTORARBEIT

VON

DIPL.-ING. VIKTÓRIA MANNHEIM

AUS MISKOLC

LEITER DER DOKTORSCHULE UND DES DOKTORPROGRAMMES:

DR. H. C. MULT. DR.-ING. FERENC KOVÁCS
PROFESSOR UND AKADEMIKER
UNIVERSITÄT MISKOLC

THEMENLEITER:

PROF. DR.-ING. BARNABÁS CSÓKE
PROFESSOR, KANDIDAT UND LEHRSTUHLINHABER
INSTITUT FÜR VERFAHRENSTECHNIK
UNIVERSITÄT MISKOLC

1. Einleitung, Zielsetzungen

Ungarn ist ein altes Bergbauland, wo im Laufe einer mehr als hundertjährigen Bergbau- und Aufbereitungsaktivität eine große Zahl von Rückstandshalden und Schlammteichen stillgelegter Bergwerksbetriebe entstanden ist. So lagern in der Bergbauregion um Recsk und Gyöngyösoroszi ca. 10 Mio.t schwermetallhaltige Halden mit den Inhaltsstoffen besonders Pyrit und Kupfersulfid. Neben diesen Hauptkomponenten, ansehnlich liegen Arsen, Cadmium, Blei, Zink und Molybdän im Haldenmaterial, aber die konkrete Menge von den Inhaltsstoffen ist nicht bekannt. Die Bearbeitung der Halden und die Gewinnung der Nutzkomponenten sind ökonomische und auch umweltbeauftragte Belange.

Die Nutzkomponenten liegen im Haldenmaterial in Form von Mineralen und ihren Verwitterungsprodukten vor und sind ganz sehr fein ($<50\ \mu\text{m}$) miteinander verwachsen. Die metallhaltigen Komponenten des Haldenmaterials sind in vielerlei Formen miteinander verbunden. Der Kontakt der primären Erz- und der nichtmetallischen Minerale verläuft meistens entlang einer gut definierten ebenen Fläche. Der physikalische Aufschluss der primären Mineralkomponenten kann mittels der Mahlung verwirklicht werden.

Die Aufbereitung der fein- und feinstverwachsenen Stoffe auch im bekannten Fall erfordert neue und weiterentwickelte Verfahrenstechniken.

Die Gewinnung der Wertkomponenten der Bergehalden muß in zwei Schritten stattfinden:

1. Physikalischer und/oder chemischer Aufschluss der Komponenten: ersterer kann durch Zerkleinerung und Mahlung des Materials, letzterer durch seine Auslaugung mit Säuren oder Basen (z.B. in situ) verwirklicht werden.

2. Die Herausgewinnung der aufgeschlossenen Komponenten aus dem festdispersen System ist mit Hilfe von mechanischen Trennverfahren – vorwiegend Gravitationsverfahren, magnetische Scheidung und Flotation – und/oder bei chemischem (kolloid- und biochemisch) Aufschluss mit Hilfe von selektiven Kristallizationen, Flüssigextraktionen, Ionenaustauschen und Elektrolysen möglich.

Infolge der bisherigen, das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist, der physikalische Aufschluß der Mineralkomponenten zu untersuchen.

Im industriellen Maßstab, zum Aufschluss der feinverwachsenen Komponenten im Haldenmaterial $<100\ \mu\text{m}$ werden hierfür Rührwerkskugelmühlen und Schwingmühlen eingesetzt. Dafür hatte ich experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um diese Mühlen mit dem Verwendungszweck und einander zu vergleichen. Zuzufolge der Untersuchungen die Anwendung der Rührwerkskugelmühle günstiger ist. Andererseits aus dem Studium der

Fachliteratur von Rührwerkskugelmühlen geht hervor, dass die heutige Kenntnisse zu den Mühlenbemessungen und den Berechnungen von Produkt-korngrößenverteilungen unzulänglich sind. Dafür war es unentbehrlich, die entsprechenden mathematischen Methoden auszuführen.

2. Stand des Wissens

2.1. Das Mahlungprozess und die Zerkleinerungsfähigkeit

Die Intensität und die Eigenart der Partikelwechselwirkungen hängen von den Stoffeigenarten der mechanischen Eigenschaften (Härte und Zerkleinerungsfähigkeit) und Beanspruchungen sowie der Bauart der Zerkleinerungsanlagen ab (TARJÁN, OPOCZKY, BEKE). Das Direktergebnis der Mahlung ist die Partikelgrößenverminderung. Die Zerkleinerungsfähigkeit bedeutet auch die Bereitschaft für Aggregation bzw. Agglomeration, die die Bauart der Zerkleinerungsanlage und der Technologie bestimmen kann.

Die Eigenschaften der mit der Feinzerkleinerung erzeugten Produkte kann die Geschwindigkeit und die Höhe des Primär- und der Sekundärprozesses bestimmen. Im Wissen der mechanochemischen Prinzipie kann die Zerkleinerungsprozesse mit der Anbahnung des Primärprozesses und mit der Zurücksetzung des Sekundärprozesses leiten.

2.2. Übersicht über die Literatur und Beschreibung der Versuchsanlagen

Eine der ersten von KLEIN und SZEGVÁRI vorgeschlagenen, langsam laufenden Rührwerkskugelmühlen wurde aus dem Jahre 1928 illustriert. Die Maschine besitzt einen vertikal angeordneten Mahlbehälter mit einem Durchmesser-Höhenverhältnis von ungefähr eins. Als Rührelemente sind an einer zentrischen Hohlwelle, durch die Mahlgutzufuhr geschieht, hochkantige Flachheisen befestigt. Die Umfangsgeschwindigkeit wird als niedrig bezeichnet und der Füllungsgrad (Mahlkörper aus Kiesmischung) wird extrem hoch (90 Prozent) gewählt. Die Weiterentwicklung der Maschine von SZEGVÁRI (aus dem Jahre 1950) ist die vertikal angeordnete Rührwerkskugelmühle mit anderem Durchmesser-Höhenverhältnis (verringertes Durchmesser und vergrößerte Höhe) und höherer Umfangsgeschwindigkeit. In dem vertikal angeordneten Mahlzylinder läuft zentrisch ein Rührwerk um, das aus nach einem bestimmten System an der Rührwelle befestigten Rundstäben besteht. Die Einführung der schnellaufenden Rührwerkskugelmühle ist die Sand-Mill nach HOCHBERG und BOSSE mit einem Füllungsgrad von 50 Prozent aus dem Jahre 1958. Der eingesetzte Ottawa-Sand wird durch die Siebmaschenweiten 0,42-0,84 mm begrenzt. Damit liegt das Grundprinzip fest, nach den heutigen schnellaufenden Rührwerkskugelmühlen gefertigt werden (seit 1963).

Die seitdem angemeldeten schnellaufenden Rührwerksmühlen befassen sich mit Ausführungen von Röhreinbauten, Anordnung und Gestaltung des Mahlraumes, sowie Austragsvorrichtungen. Die traditionell zur Feinstzerkleinerung eingesetzten Mühlen sind die schnellaufende Rührwerksmühlen. Die Zerkleinerung erfolgt durch Stoß und Reibung zwischen den Mahlkörpern, die von einem Rührwerk (Scheiben- oder Lochscheibenrührwerk) intensiv bewegt wird. Diese Rührwerksmühlen werden zunächst zur Feinzerkleinerung von Farbpigmenten und keramischen Materialien sowie in der Grundstoff- Lebensmittel- und Lackindustrie verwendet. Die Anwendung von Rührwerkskugelmühlen zum mechanischen Zellaufschluss in der Biotechnologie wurde untersucht. Ein ganz neues Einsatzgebiet für Rührwerkskugelmühlen stellt die Herstellung von Kohle-Wasser- und Kohle-Öl-Suspensionen dar.

Als Mahlkörper werden meist Kugeln von 0,2-3 mm Durchmesser aus Glas, Stahl, Sand, Kunststoff oder Keramik verwendet. Der Mahlraum ist meist bis zu 40-70 % mit Mahlkörpern gefüllt. Die Mühlen können kontinuierlich oder diskontinuierlich in Kreislauf- oder Passagenfahrweise sowie in Trocken- oder Nassbetriebssystem betrieben werden.

Da die Komponenten im Haldenmaterial ganz sehr fein miteinander verwachsen sind, der physikalische Aufschluss erfordert allerdings besondere feine Mahlung. Anhand von Versuchen zeigen, dass mit Rührwerkskugelmühlen wesentlich geringeren Energieeinsatz hergestellt werden können als mit konventionellen Kugelmühlen. Infolge der hohen Zentrifugalkräfte können wesentlich feinere Partikelgrößenverteilungen als in Kugelmühlen erzeugt werden. Auch bezüglich der Investitionskosten erscheinen Rührwerkskugelmühlen für diesen Anwendungsbereich konkurrenzfähig. Die Investitionskosten sind für die Rührwerkskugelmühlen ca. halb so gross wie für die konventionelle Kugelmühle.

Um diese Feststellungen auch auf experimentalem Weg beweisen zu können, es war notwendig, die Versuchreihe in beiden Mühlen durchzuführen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

Die Schwingmühle besteht aus einem liegenden zylinderförmigen Behälter, der durch einen Unwuchtantrieb zu kreisförmigen Schwingungen um seine Längsachse angeregt wird. Durch den periodischen Impulseintrag über die Mühlenwände wird das im Schwingreaktor befindliche Gut zu Wurf- bzw. zu intensiven Scherbewegungen innerhalb des Partikelkollektivs angeregt. Die Schwingbewegungen werden über die Wand auf die äußerste Schicht der Füllung übertragen und von dort ins Innere weitergegeben. Die Füllung hebt ab und lockert sich geringfügig. Dabei tritt eine starke Dämpfung der Bewegung ein, so daß die Beanspruchungsintensität im Kern sehr viel geringer als außen ist. Die Mahlfeinheit wird von der Beanspruchungshäufigkeit und -intensität bestimmt.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1. Untersuchungsmethoden

Bei dem physikalischen Aufschluss der Komponenten im Haldenmaterial von Gyöngyösoroszi werden zahlreiche Untersuchungsmethoden eingesetzt.

Das Versuchsmaterial enthält in erster Linie Pyrit, Galenit und Sphalerit. Die Probeentnahme wird auf drei Sitze mit Hilfe von Pressluftbohrer abgelegt. Der Pressluftbohrer wurde im Rahmen eines Projektes (OTKA) am Institut für Verfahrenstechnik an der Universität Miskolc entwickelt.

Die Korngrößenverteilungen der Aufgabe und des Ausgangsmaterials wird mit einem Laserbeugungsspektrometer (Sympatec Helos) analysiert. Die Dichte des Versuchsmaterials beträgt 2580 kg/m^3 .

Die chemische und mineralische Zusammensetzung des Versuchsmaterials wird mit Hilfe von Mikrosonde EDAX und Röntgenbeugungsspektrometer bestimmt.

Der physikalische Aufschluss der Komponenten kann mittels mikroskopischer Charakterisierung bestimmt werden. Damit hatte ich den physikalischen Aufschluss mit einem Lichtmikroskop am Institut für Mineral- und Gesteinskunde an der Universität Miskolc (Bauart: LEITZ Metalloplan) und im ZELMI an der TU Berlin kontrolliert.

Die spezifische Oberfläche des Versuchsmaterials wird mit Griffin-Apparat bestimmt.

Die Zerkleinerungsfähigkeit des Versuchsmaterials wird nach den Methoden Bond und Hardgrove bestimmt. Die Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass es keine entsprechende Methode gibt, um die Zerkleinerungsfähigkeit zu charakterisieren. So habe ich diese für die Rührwerksmühle mit einem eigenen Verfahren ermittelt. Um die Richtigkeit dieser Methode belegen zu können, werden die Laboruntersuchungen mit weiteren Versuchsmaterialien durchgeführt. Diese Untersuchungen haben gleiche Eigenschaft für die verschiedenen Versuchsmaterialien in der Rührwerkskugelmühle ausgewiesen.

Die dynamische Viskosität der Suspension (aus dem Versuchsmaterial) wird mit einem Rotationsviskosimeter (Bauart: Brookfield RVDV) bestimmt.

Als Trägerflüssigkeit wurde Wasser verwendet und die Mahlkörper bestanden aus Stahl. Bei allen Versuchen wurde die Mahlkörpergröße mit 3.175 mm konstant gehalten.

3.2. Auswertungsmethoden

Die Korngrößenverteilungen, die Medianwerte, die charakteristischen Kenngrößen und der Zerkleinerungsgrad werden mit konventionellen Auswertungsmethoden bestimmt. Die Parameter des mathematischen Modells und der Kurven werden mit nicht linearem Parameterberechnungsverfahren bestimmt.

Die mit dem Rotationsviskosimeter (Bauart: Brookfield RVDV) bestimmten Parameter werden von Annäherungskurven abgelesen und danach wird der absolute Viskositätsfaktor in mathematischer Form gemerkt.

Es wurde Scale-up für die Laborrührwerksmühle verwendet. Beim Scale-up von Rührwerkskugelmühlen müssen die in Laborversuchen erhaltenen Zerkleinerungsergebnisse auf eine Produktionsmühle übertragen werden. Zur Untersuchung dieser Problemstellung werden Zerkleinerungsversuche mit unterschiedlichen Versuchsmaterialien durchgeführt. Die wesentliche Frage im Hinblick auf das Scale-up von Rührwerkskugelmühlen, welche Bedingungen kennen müssen. Diese sind meist die folgende: der Zusammenhang zwischen der Mühlenkapazität und des Leistungsbedarfes sowie Beziehungen zwischen den Grösse- und Betriebskennwerten. Dafür habe ich keine Beziehung in der Fachliteratur gefunden. Um dieses Ziel zu erhalten, habe ich die Methode der Dimensionsanalyse verwendet, wobei ich die Beziehung

$$P_m = f(d_k, w_k, D_m, n, c_m, \varphi_m, d_g \dots)$$

existiert hatte. Die konkrete mathematische Form aber ist nicht bekannt.

3.2. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Bei den Zerkleinerungsversuchen werden Haldenmaterial mit Mahlkörpern aus Stahl (Mahlkörpergröße, d_g : 3.175 mm, Mahlkörperdichte, ρ_g : 7800 kg/m³) anfangs in einer Laborrührwerkskugelmühle (am Institut für Verfahrenstechnik, Universität Miskolc) mit einem Mahlraumvolumen von 0.7 l zerkleinert. Die Untersuchungen werden mit Haldenmaterial, das auf eine Partikelgrößenverteilung <145 µm vorzerkleinert war, durchgeführt. In dem vertikal angeordneten Mahlzylinder läuft zentrisch ein Scheibenrührwerk um, an der Rührwelle sind 5 befestigten Scheiben.

In Vorversuchen werden Erfahrungen bei der Handhabung der Rührereinrichtung und der Rührwerkskugelmühle gesammelt. Während der durchgeführten Zerkleinerungsvorversuche werden verschiedene Betriebsparameter (Mahldauer, t : 5, 10, 20 min, Rührwerksdrehzahl, n : 1440, 2880 U/min, Feststoffmassenkonzentration, c_m : 0.2, 0.4 und Füllungsgrad, φ_m : 0.7, 0.8) variiert. Andere Parameter (Versuchsmaterial, Trägerflüssigkeit, Mahlkörperart, Mahlkörperdichte, Mahlkörperdurchmesser und Mahlraumanordnung) werden konstant gehalten. Während der Versuche wird an der Rührwelle das Drehmoment gemessen. Es sind umfangreiche Voruntersuchungen mit der Rührwerkskugelmühle durchgeführt worden, wobei sich die Betriebsbedingungen als optimal hinsichtlich der Mahlwirkung, des physikalischen Aufschlusses und des Energieverbrauchs erwiesen haben. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Variationen bezüglich der verschiedenen Betriebsparameter (Rührwerksdrehzahl, Feststoffmassenkonzentration und Füllungsgrad) in sinnvollen Grenzen bewegen. Diese sind

die folgende: Rührwerksdrehzahl, n : 1440 U/min, Feststoffkonzentration, c_m : 0.2 und Füllungsgrad, ϕ_m : 0.7. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der untersuchten Mahlprozesse sind bei einer Laborschwingmühle (am Institut für Aufbereitung von Roh- und Reststoffen, TU Berlin) mit einem Mahlraumvolumen von 0.97 l (Mahlkörpergröße, d_g : 3.250 mm, Mahlkörperdichte, ρ_g : 7800 kg/m³) die entsprechenden Betriebsbedingungen übernommen worden.

Als Konsequenz aus den Ergebnissen von Vorversuchen wurden in Hauptversuchen nur die optimalen Betriebsparameter in der Rührwerkskugelmühle eingesetzt. Es wurde nur die Mahldauer (1-20 min) und das Versuchsmaterial (Haldenmaterial, Kalkstein, Andesit und Bimssteintuff) beeinflusst. Im Rahmen der Vor- und Hauptversuchen wurden insgesamt über 150 Zerkleinerungsversuche und annähernd 500 Korngrößenanalysen durchgeführt.

Das Zerkleinerungsergebnis wird durch die Partikelgrößenverteilung bzw. daraus abgeleiteten Größen (Medianwerte) charakterisiert. Für die Diskussion der weiteren Einflussgrößen wird der Medianwert x_{50} von Partikelgrößenverteilungen verwendet und mit einem Laser-Doppler-Sizer (Sympatec Helos H0541, TU Berlin) bestimmt.

4. Neue Forschungsergebnisse und Thesenaufstellung

I. Die Bestimmung der Mahlbarkeit anhand der Laboruntersuchungen ist in einer Rührwerkskugelmühle möglich.

I.1. Ich habe bewiesen, dass die Methoden Bond und Hardgrove zur Charakterisierung der Mahlbarkeit von Versuchsmaterialien in der Rührwerkskugelmühle nicht befähigt sind.

I.2. Ich habe das Verfahren ausgearbeitet zur Bestimmung der Mahlbarkeit in der Laborrührwerksmühle neben Leistungsmessungen der Leerlaufleistungen ($P_{m,0}$) und Betriebsleistungen (P_m) bei einer Mahldauer bis zu 20 Minuten und den vorgegebenen Bedingungen.

I.3. Ich habe bewiesen, dass die Beziehung „Median (x_{50}) -spezifische Arbeit (W_f)“ ist für alle untersuchten Versuchsmaterialien das gleiche Prinzip zeigt:

$$x_{50} = f(W_f) = C_{kev} W_f^m$$

Die funktionale Darstellung ist eine Exponentialfunktion, wo die Hochzahl m konstant ist. Dieser Wert ist -0,2. Das Parameter C_{kev} ist die Mahlbarkeitsmesszahl, deren Werte sind: 7,4; 11,1; 14,5 und 15,3 in der Ordnung Kalkstein, Andesit, Haldenmaterial und Bimssteintuff.

II. Zum Aufschluss der feinverwachsenen Komponenten im Haldenmaterial werden hierfür eine Rührwerkskugelmühle und eine Schwingmühle eingesetzt. Infolge der hohen

Zentrifugalkräfte können wesentlich feinere Partikelgrößenverteilungen in Rührwerkskugelmühlen als in Schwingmühlen erreicht werden. Bei der Rührwerksmühle ist die Mahldauer zum Erzielen einer bestimmten Produktfeinheit und eines besseren Aufschlusses kürzer.

III. Ich habe ein empirisches Modell ausgearbeitet die Partikegrößenverteilungen des Produktes in der Rührwerkskugelmühle zu berechnen.

III.1. Ich habe bewiesen, dass die Funktion der relativ Partikegrößenverteilung (die empirische Zerkleinerungsfunktion) $F(\xi) = x/x_{50}$ befähigt zur Charakterisierung des Zerkleinerungsprozesses ist.

III.2. Die zwei Funktionen des Modells sind:
die empirische Rosin-Rammler Zerkleinerungsfunktion:

$$F(\xi) = 1 - \exp\left(-\frac{\xi}{a}\right)^n$$

für das Versuchsmaterial:

$$F(\xi) = 1 - \exp\left(-\frac{\xi}{1,479}\right)^{1,038}$$

und die Median-Mahldauer Funktion:

$$x_{50} = a \cdot t^b$$

(für das Versuchsmaterial: $a = 7,355$ és $b = -0,405$).

IV. Die Bestimmung der Leistung in der Rührwerkskugelmühle ist mit der Methode der Dimensionsanalyse möglich, wegen der Mangelhaftigkeit von analytischen Beziehungen.

IV.1. Die angestellte Dimensionsanalyse-Methode:

Aus der Beziehung:

$$P_m = f(d_k, w_k, D_m, n, c_m, \varphi_m, d_g, \rho, \mu, g)$$

kann den nächsten Zusammenhang annehmen:

$$Eu = A Re^{-m} Fr^{-n}$$

Die Konstante A hängt von den Mahlungparametern ab:

$$A = f(c_m, \varphi_m, \dots)$$

Daraus ergibt sich der Leistungsbedarf der Rührwerkskugelmühle:

$$P_m = A d_k^5 n^3 \rho$$

IV.2. Ich habe ermittelt, dass die Rührwerkskugelmühle im turbulenten Gebiet funktioniert.

V. Mit der Benutzung der Beziehungen von den Mühleleistungen (P_m) und der Meinung von konstanten spezifischen Leistungen ($P_m/V_m = \text{konstant}$) hatte ich Scale-up mit dem Kleinmodell abgeleitet um die Bedingungen der Konversion für die Produktionsmühle berechnen zu können.

Im turbulenten Gebiet sind die Leistungsbedarfe für die Produktionsmühle (ohne Kennzahl) und für die Laborrührwerksmühle (mit Kennzahl k_m) die folgende:

$$P_m = P_{m,km}$$

$$\frac{A \cdot n^3 d_k^5 \rho}{d_k^3} = \frac{A \cdot n_{km}^3 d_{k,km}^5 \rho}{d_{k,km}^3}$$

(in dem Nenner steht d_k^3 , anstatt des Volumens V).

Wenn die Werte A und ρ gleiche bleiben, kann sich die vorhergehende Gleichung vereinfachen:

$$n^3 d_k^2 = n_{km}^3 d_{k,km}^2$$

Daher kann sich die Rührwerksdrehzahl der Produktionsmühle bezeigen lassen neben der Kenntnis der Laborrührwerksdrehzahl:

$$n = n_{km} \left(\frac{d_{km}}{d_k} \right)^{2/3} = n_{km} \cdot k^{-2/3} = n_{km} \left(\frac{1}{k} \right)^{2/3}$$

Formelzeichen:

P_m	[kW]	Leistungsbedarf der Rührwerkskugelmühle
d_k	[m]	Rührscheibendurchmesser
w_k	[m]	Rührscheibenbreite
D_m	[m]	Mahlzylinderdurchmesser
n	[U/min]	Drehzahl
c_m		Feststoffmassenkonzentration,
φ_m		Füllungsgrad
d_g	[m]	Mahlkugeldurchmesser
ρ	[kg/m ³]	Suspensionsdichte
μ	[Pas]	Dynamische Suspensionsviskosität
g	[m/s ² g]	Fallbeschleunigung
Eu		Euler-Zahl
Re		Reynolds-Zahl
Fr		Froude-Zahl
m, n		Exponenten

5. Zusammenfassung

Die Nutzkomponenten liegen im Haldenmaterial in Form von Mineralen und ihren Verwitterungsprodukten vor und sind ganz sehr fein miteinander verwachsen. Der physikalische Aufschluss der Mineralienkomponenten kann mittels der Feinstmahlung verwirklicht werden. Die Aufbereitung der feinst-, und feinverwachsenen Stoffe auch im bekannten Fall erfordert neue oder weiterentwickelte Verfahrenstechniken.

Aufgrund der relativ einfachen Konstruktion und der hohen, erreichbaren Energiedichten haben die Rührwerksmühlen in den letzten Jahren große Beachtung gefunden und wurden im Hinblick auf die Erzeugung kleiner Produktfeinheit weiter entwickelt. Deswegen habe ich die Untersuchungen in einer Laborrührwerksmühle und auch in einer Laborschwingmühle durchgeführt.

Bei dem physikalischen Aufschluss der Komponenten im Haldenmaterial von Gyöngyösoroszi wurden zahlreiche Untersuchungsmethoden eingesetzt. Die Korngrößenverteilungen wurden mit einem Laserbeugungsspektrometer an der TU Berlin bestimmt. Die chemische und mineralische Zusammensetzung des Versuchsmaterials wurde mit Hilfe von Mikrosonde und Röntgenbeugungsspektrometer an der Universität Miskolc bestimmt. Der physikalische Aufschluss wurde mit einem Lichtmikroskop kontrolliert und die spezifische Oberfläche des Versuchsmaterials wurde mit Griffin-Apparat bestimmt.

Die experimentellen Untersuchungen zur Nassmahlung von Haldenmaterial in der Rührwerkskugelmühle zeigen, dass die Partikelgrößenverteilungen mit zunehmender Mahldauer (und mit zunehmendem Energieeintrag) steiler werden. Der Medianwert mit zunehmender Mahldauer nimmt ab, das heißt es erfolgt eine Zerkleinerung, deren Intensität mit zunehmender Mahldauer geringer wird. Der intensivere Zerkleinerungseffekt zu Beginn der Beanspruchung könnte darauf zurückgeführt werden, daß zunächst die Körner mit größeren Inhomogenitäten, Fehlstellen und Rissen zerfallen. Die übrig bleibenden Körner besitzen einen größeren Widerstand gegenüber den Beanspruchungen und weisen dementsprechend eine geringere Zerfallsneigung auf. Die Kurvensteigung wird mit der Beanspruchungsdauer kleiner und bei längerer Mahldauer wird sich Agglomeration abgespielt.

Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass der physikalische Aufschluss von Erzbergehaldekörnern mit Rührwerkskugelmühlen gut möglich ist. Um zur Erzeugung einer bestimmten Produktfeinheit sowie eines höheren physikalischen Aufschlusses, ist es sinnvoll, die optimierten Betriebs- und Mahlparameter zu verwenden. Bei der Rührwerkskugelmühle ist die Mahldauer zum Erzielen einer bestimmten Produktfeinheit kürzer, als bei der Schwingmühle. Die Untersuchungen bewiesen, dass sich Rührwerkskugelmühlen für die

Naßmahlung im Feinstkornbereich eignen und es hier mit jeder anderen Mühle aufnehmen können.

Die Zerkleinerungsfähigkeit des Versuchsmaterials kann nach den Methoden Bond und Hardgrove nicht bestimmt werden. Deswegen wird die Zerkleinerungsfähigkeit für die Rührwerkskugelmühle mit eigenem Verfahren ermittelt. Die Parameter werden mit nicht linearem Parameterberechnungsverfahren bestimmt. Die funktionale Darstellung ist eine Exponentialfunktion, wo die Hochzahl (m) konstant ist. Die Mahlbarkeitsmesszahl (C_{kev}) zeigt verschiedene Werte in Ordnung.

Es wird ein empirisches Modell ausgearbeitet um die Partikegrößenverteilung des Produktes aus der Rührwerkskugelmühle zu berechnen. Es geben zwei Funktionen des empirischen Modells: die empirische Rosin-Rammler Zerkleinerungsfunktion und die Median-Mahldauer Funktion.

Es wird der Leistungsbedarf in der Laborrührwerksmühle mittels Dimensionsanalyse bestimmt, der auf eine Ausgangsbeziehung aufgebaut wird. Es wird auch Scale-up für die Laborrührwerksmühle verwendet. Die weiteren Forschungsergebnisse und die Thesenauflösungen lassen sich in dem vorangehenden Kapitel lesen.

6. Literaturverzeichnis

1. **Mannheim, V.:** *A finom őrlés eljárás technikai jellemzői keverőmalmokban*, Zeitschrift BKL-Bányászat, 6/132., 1999, pp. 471-478.
2. **Mannheim, V.:** *Talajmodell fizikai terhelésére vonatkozó összehasonlító vizsgálatok rezgő-és keverőmalomban*, Forum der Doktoranden, Universität Miskolc, 1998, pp. 21-26.
3. **Mannheim, V.:** *Nedves őrlés keverőmalomban*, Forum der Doktoranden, Universität Miskolc 1999, pp. 42-48.
4. **V. Mannheim, B. Csőke:** *Mahlung von Erzbergehaldekörnern zum Aufschliessen mineralischer Komponenten in Rührwerkskugelmühlen*, 7. Deutsch-ungarisches Seminar für Verfahrenstechnik, TU Berlin, 2000, pp. 19-28.
5. **V. Mannheim:** *Physikalischer Aufschluss von Erzbergehaldekörnern in Rührwerksmühlen*, Forum der Doktoranden, Universität Miskolc, 2000, pp. 50-56.
6. **V. Mannheim:** *Nassmahlung zum physikalischen Aufschluss mineralischer Komponenten in Rührwerks- und Schwingmühlen*, Publikation von akademischen Berichten (Band 54.), Universität Miskolc (unter Erscheinung).
7. **V. Mannheim:** *Nassmahlung zum physikalischen Aufschluss mineralischer Komponenten*, Konferenz „MicroCAD 2001”, Universität Miskolc, 2001. pp. 83-88.
8. **V. Mannheim, B. Csőke:** *Physikalischer Aufschluss von Erzbergehaldekörnern in Rührwerks- und Schwingmühlen*, 8. Ungarisch-deutsches Seminar für Verfahrenstechnik, Universität Miskolc, 2001.
9. **V. Mannheim, B. Csőke:** *Nassmahlung zum physikalischen Aufschluss mineralischer Komponenten in Rührwerks- und Schwingmühlen*, Konferenz „Universitaria Ropet 2001”, Petrosani (Rumänien), 2001, pp. 123-126.