

# Master Thesis

## Zementmühlenoptimierung mit besonderer Berücksichtigung der Rohstoffcharakterisierung

erstellt für



Zementwerke Leube GmbH



Kurzböck Peter, 0335122

---

Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung  
Department of Mineral Resources and Petroleum Engineering  
Montanuniversität Leoben

**Betreuer:** Flachberger, Helmut, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont.  
Öfner, Wolfgang, Dipl.-Ing.

Leoben, 2010

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, im April 2010

.....  
stud. mont. Kurzböck Peter, BSc.

## **Motiv, Danksagung**

Die in den letzten Jahren absolvierten Praktika und angefertigten Bachelorarbeiten im Bereich der Mineralaufbereitung und des Gesteinshüttenwesens stellten für mich eine sehr interessante und abwechslungsreiche Arbeit dar. Es wurden mir Aufgaben gestellt, die Herausforderungen beinhalteten und auch Verantwortung an mich übertrugen. So nahm ich die Möglichkeit der Erstellung einer Masterarbeit in den Bereichen der Zementmahlung und der Zementrohstoffcharakterisierung gerne wahr.

Ich möchte mich besonders bei folgenden Personen für Ihre Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken:

### **Betreuung der Masterarbeit an der Montanuniversität in Leoben:**

Flachberger, Helmut, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont.

Öfner, Wolfgang, Dipl.-Ing.

### **Betreuung der Masterarbeit im Werk Gartenau der Zementwerk Leube GmbH:**

Kranabrtl, Johann, Dipl.-Ing., Betriebsleitung Zementwerk

Waldl, Günter, Dipl.-Ing. Dr. mont., Geschäftsbereichsleitung Technik

Mlekusch, Thomas, Mag. Dr., Leitung Labor

Lindenthaler, Peter, Mühlenmeister

Dank gebührt schließlich auch allen Mitarbeitern des Werkes Gartenau, welche mir immer sehr freundlich und hilfsbereit gegenüberstanden.

**Abstract: Cement mill optimization with particular reference to the characterization of raw materials**

The initiation of this work deals with the basics and possibilities of raw materials characterization regarding a comparison of the Zeisel-Method, the Bond-Test and the Method of the Optimized Comminution Sequence (Department of Mineral Processing at University of Leoben, Austria).

The thesis is divided into three main parts:

- Raw materials characterization
- Current state analysis
- Potential for optimization

In the characterization of each of the raw materials which can be used in cement production, an analysis regarding the comminution properties was carried out. Clinker, slag, marl, limestone, fly ash, a blend of marl and slag and a blend of plaster and anhydrite were analysed by applying the Optimized Comminution Sequence (OCS). Main focus was put on the specific energy consumption (in terms of Rittinger equation and workindex to Bond) and the dispersity in terms of specific surface and particle size distributions in the GGS- and RRSB-graphs. The analyses included density and visual assessments.

The current state analysis of the cement mill and the comminution circuit included a chemical analysis of fractionated samples, which have been taken along the grinding chambers.

Based on the experimental results of the previous chapters and a literature survey, some optimization potential was identified.

## **Kurzfassung: Zementmühlenoptimierung mit besonderer Berücksichtigung der Rohstoffcharakterisierung**

Die Einleitung dieser Arbeit befasst sich mit den Grundlagen und Möglichkeiten der Rohstoffcharakterisierung und einem Vergleich der Methoden zur Bestimmung der Zerkleinerungseigenschaften. Es wird dabei der Zeisel-Test, die Methode nach Bond und die am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung an der Montanuniversität Leoben entwickelte Methode der Optimierten Zerkleinerungskette (OZK) bezüglich einer Eignung verglichen.

Die Masterarbeit ist in folgende 3 Hauptkapitel eingeteilt:

- Charakterisierung der Ausgangs-Rohstoffe für die Zementproduktion
- Ist-Zustandsanalyse der Mahlung im Werk von LEUBE
- Vorschläge zur Optimierung der Betriebsweise

Im Kapitel der Charakterisierung wird für jeden Rohstoff, der gegenwärtig als Zumahlstoff für die Zementproduktion in der Zementmühle verwendet wird, eine Analyse hinsichtlich der Zerkleinerungseigenschaften durchgeführt. Klinker, Hochofenschlacke, Mergel, Kalkstein, Flugasche, Steinmehl und ein Gips/Anhydritgemisch werden dabei mit Hilfe der Optimierten Zerkleinerungskette bezüglich des spezifischen Energieverbrauchs (ermittelter Rittingerkoeffizient und daraus abgeleiteter Arbeitsindex nach Bond) und den Dispersitätsmerkmalen (wie der spezifischen Oberfläche und der Korngrößenverteilungen) untersucht. Weiters erfolgten Untersuchungen bezüglich der Dichte, auftretender Porositätsunterschiede und optischer Beurteilungen in der Charakterisierung der Rohstoffe.

Für die Ist-Zustandsanalyse der Zementmühle wurde ein Mahlfortschrittsdiagramm angefertigt, die Verteilung der Mahlkörper im Mahlraum laut Vdz<sup>1</sup>-Mitteilungsblatt bestimmt und chemische Analysen von fraktionierten Mühlenmeterproben und Proben aus dem Mühlenkreislauf durchgeführt.

Aus den Versuchsergebnissen der vorangegangenen Kapitel und einer fundierten Literaturrecherche wurden Optimierungspotentiale betreffend Gattierung, Vorzerkleinerung und Prozessparameter evaluiert und Vorschläge zur Umsetzung ausgearbeitet.

---

<sup>1</sup> Verein der deutschen Zementwerke

## Inhaltsverzeichnis

<b>ZEMENTMÜHLENOPTIMIERUNG MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER ROHSTOFFCHARAKTERISIERUNG .....</b>	<b>1</b>
Motiv, Danksagung.....	3
Abstract: Cement mill optimization with particular reference to the characterization of raw materials.....	4
Kurzfassung: Zementmühlenoptimierung mit besonderer Berücksichtigung der Rohstoffcharakterisierung.....	5
Inhaltsverzeichnis .....	6
<b>I. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG .....</b>	<b>8</b>
<b>II. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>10</b>
<b>III. CHARAKTERISIERUNG DER ROHSTOFFE .....</b>	<b>12</b>
<b>3.01 Theoretische Ansätze.....</b>	<b>12</b>
Zeisel Methode .....	12
Arbeitsindex nach Bond [19].....	13
(a) Optimierte Zerkleinerungskette (OZK) .....	13
(b) Natürliche Bruchcharakteristik .....	15
<b>3.02 Versuchsbeschreibung.....</b>	<b>17</b>
(a) Mahlbarkeitsuntersuchung.....	17
(b) Ermittlung der Kennwerte für die Stab- und Kugelmühle .....	21
Stabmühlenauswertung - HOS (Fraktion 3,15/1 mm; Kreislaufmahlung).....	21
Kugelmühlenauswertung - HOS (Fraktion 1/0,5 mm; Kreislaufmahlung).....	22
(c) Abschätzung des Arbeitsindex nach Bond.....	24
(d) Porositätsmessung mittels Geo-Pyknometerversuche.....	25
(e) Stoffdichtemessung mittels Helium-Pyknometerversuche .....	25
(f) Messung der Spezifische Oberfläche mittels Permeametrie .....	27
<b>3.03 Rohstoffe.....</b>	<b>29</b>
(a) Klinker .....	29
(i) Allgemein.....	29
Mahlbarkeitseinflüsse des Klinkers .....	29
(ii) Versuchsbeschreibung.....	31
(iii) Mahlbarkeitsuntersuchung .....	31
Kreislaufmahlung .....	34
Durchlaufmahlung .....	35
Geo-Pyknometerversuche.....	36
Spezifischer Energieeintrag .....	37
(b) Hochofenschlacke / Hüttensand.....	39
(i) Allgemein.....	39
Mahlbarkeitseinflüsse der Hochofenschlacke.....	40
(ii) Versuchsbeschreibung.....	42
(iii) Mahlbarkeitsuntersuchung .....	43
Kreislaufmahlung .....	43
Durchlaufmahlung .....	44
Geo-Pyknometerversuche.....	46
Spezifischer Energieeintrag .....	46
(c) Gips / Anhydritgemisch .....	49
(i) Allgemein.....	49
Mineralogie Anhydrit, CaSO <sub>4</sub> .....	49

	Mineralogie Gips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ .....	49
(ii)	Versuchsbeschreibung .....	50
(iii)	Mahlbarkeitsuntersuchung .....	50
	He-Pyknometerversuche .....	54
	Spezifischer Energieeintrag .....	54
(d)	Mergel .....	57
(i)	Allgemein .....	57
(ii)	Versuchsbeschreibung .....	57
(iii)	Mahlbarkeitsuntersuchung .....	57
	Spezifischer Energieeintrag .....	60
(e)	Kalkstein .....	62
(i)	Allgemein .....	62
(ii)	Versuchsbeschreibung .....	62
(iii)	Mahlbarkeitsuntersuchung .....	62
	Spezifischer Energieeintrag .....	65
(f)	Flugasche .....	67
(i)	Allgemein .....	67
(ii)	Versuchsbeschreibung .....	67
(iii)	Mahlbarkeitsuntersuchung .....	68
(g)	Steinmehl .....	70
(i)	Allgemein .....	70
(ii)	Versuchbeschreibung .....	70
(iii)	Mahlbarkeitsuntersuchung .....	70
<b>3.04</b>	<b>Zusammenfassung Rohstoffanalyse .....</b>	<b>73</b>
(a)	Arbeitsindex nach Bond .....	73
(b)	Rittinger Koeffizient .....	74
<b>IV.</b>	<b>IST-ZUSTANDSANALYSE .....</b>	<b>76</b>
<b>4.01</b>	<b>Versuchsdurchführung .....</b>	<b>76</b>
<b>4.02</b>	<b>Mahlfortschrittsdiagramm .....</b>	<b>76</b>
	Chemische Analysen des Mahlfortschrittdiagramms .....	80
	Vorzerkleinerung des Gips/Anhydritgemischs .....	84
<b>4.03</b>	<b>Gattierungsuntersuchungen .....</b>	<b>85</b>
(a)	Bemessung der Größtkugel .....	87
(b)	Mahlkörperzusammensetzungen .....	89
	Gattierungsvorschlag Kammer II .....	92
<b>V.</b>	<b>OPTIMIERUNG / AUSBLICK .....</b>	<b>93</b>
<b>5.01</b>	<b>Gattierung .....</b>	<b>93</b>
<b>5.02</b>	<b>Vorzerkleinerung .....</b>	<b>94</b>
<b>5.03</b>	<b>Prozess .....</b>	<b>94</b>
<b>5.04</b>	<b>Weitere Untersuchungen .....</b>	<b>95</b>
	Literaturverzeichnis .....	96
	Tabellenverzeichnis .....	97
	Abbildungsverzeichnis .....	98

## I. Einleitung und Aufgabenstellung

Etwa 40 % der für die Zementherstellung benötigten elektrischen Gesamtenergie (40 kWh/t) wird im Bereich der Mahlung verbraucht.

Es ist daher verständlich, dass durch zweckmäßige Wahl des Mahlverfahrens und optimale Betriebsbedingungen der Energieverbrauch deutlich beeinflusst werden kann, da dieser stark von der zu erzeugenden Mahlfeinheit und der Mahlbarkeit der einzelnen Zementbestandteile abhängt. Möglichkeiten zur Beeinflussung sind dem Aufbereiter durch eine ganze Reihe an wichtigen Prozessparametern gegeben, wie etwa durch Variation der Mühlendrehzahl, des Mahlkörperfüllungsgrades und der Mahlkörpergrößenverteilung. Weitere wichtige Einflussmöglichkeiten sind die Temperatur im Mahlraum und die Zugabe von Mahlhilfsstoffen.

Im Zuge dieser Masterarbeit sollen Optimierungspotenziale für die Zementmahanlage 5 der Firma Zementwerk Leube GmbH in Gartenau evaluiert und Optimierungsvorschläge erarbeitet werden. Ein großes Hauptaugenmerk obliegt dabei der Charakterisierung der Zementzumahlstoffe. Nach einer repräsentativen Probenahme wird dafür im Technikum des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben eine Mahlbarkeitsprüfung nach dem Prinzip der Optimierten Zerkleinerungskette durchgeführt. Die Proben werden mit Hilfe eines Backenbrechers vorbereitet und an einer Stab- und einer Kugelmühle im zyklischen Satzversuch untersucht. Um weitere Erkenntnisse über die Mahlbarkeit zu erlangen, wird zusätzlich zur betriebsnahen, kontinuierlichen Kreislaufmahlung eine Durchlaufmahlung durchgeführt, um ergänzende zerkleinerungskinetische Aussagen zu erhalten. Die Kennzeichnung der Mahlbarkeit erfolgt auf Basis der jeweils ermittelten Rittingerkoeffizienten, den davon abgeleiteten Arbeitsindizes nach Bond, den Darstellungen der Korngrößenverteilungen nach jeder Zerkleinerungsstufe im RRSB<sup>II</sup>- und GGS<sup>III</sup>-Netz und einer optischen Beurteilung. Um die Mahlbarkeit nach der Optimierten Zerkleinerungskette bestimmen zu können, werden ergänzende Untersuchungen

---

<sup>II</sup> Rosin-Rammler-Sperling-Benett-Verteilung

<sup>III</sup> Gates-Gaudin-Schuhmann-Verteilung



zur Dichte, Porosität, Feuchte und spezifischen Oberfläche nach Blaine durchgeführt. Bei den zu untersuchenden Ausgangs-Rohstoffen handelt es sich um Klinker, Hochofenschlacke, ein Gips/Anhydritgemisch, Mergel, Kalkstein, Flugasche und ein Steinmehl, welches aus Hochofenschlacke und Mergel in einer Gutbettwalzenmühle produziert wurde.

Um Optimierungspotenziale aufzufinden, ist eine Ist-Zustandanalyse der Zementmühle durchzuführen. Hierfür ist eine Längsabsiebung für beide Kammern und eine Gattierungsuntersuchung durchzuführen. Um weitere Einflüsse in Betracht ziehen zu können, sind außerdem der Sichter und die Rohgutvorbereitung zu untersuchen. Aus den gewonnenen Ergebnissen sollen die Gattierung, der gesamte Mahlprozess, Mahlaufwandsabschätzungen und etwaige neue Aggregate beurteilt werden. Bei den etwaigen neuen Aggregaten ist vor allem die Überlegung eines Rohgutvorbereiters Aufmerksamkeit zuzuordnen.

#### **Daten der Mahlanlage der Firma Leube (Zementmühle 5):**

Bei der Mahlanlage 5 handelt es sich um eine Zweikammersichtermühle.

Länge des Mühlenmantels: 14,25 m

Innendurchmesser Mühlenmantel: 3,8 m

Mahlbahnlänge erste Kammer: 4,25 m

Mahlbahnlänge zweite Kammer: 9,25 m

Drehzahl: 16 min<sup>-1</sup>

Aufgenommene Antriebsleistung: 2600 kW

Füllungsgrad Kammer I: 29 %

Füllungsgrad Kammer II: 30 %

Verschleiß: ca. 27 g/t

Mühlenpanzerung: Hubpanzerung (Kammer I); Sortierpanzerung (Kammer II)

Schlitzweite Zwischenwand Kammer I: 6-7 mm

Schlitzweite Austragswand Kammer II: 10 mm

## II. Zusammenfassung

In den theoretischen Aspekten dieser Masterarbeit wurde als geeignete Mahlbarkeitsuntersuchung die Methode der Optimierten Zerkleinerungskette (Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Montanuniversität) ausgewählt. Für alle Zementzumahlstoffe wurden Rittingerkoeffizienten ermittelt (Abbildung 1). Der Rittingerkoeffizient des Rückgutes der Zementmühle 5 errechnet sich zu  $20,3 \text{ cm}^2/\text{J}$ .

	Rittingerkoeffizient
	[ $\text{cm}^2/\text{J}$ ]
Klinker	24
Hochofenschlacke	13
Gips	114
Mergel	129
Kalkstein	100
Stein	58
Flugasche	151

Abbildung 1 Rittingerkoeffizienten der Zementzumahlstoffe

Die ermittelten Rittingerkoeffizienten konnten mit dem analytischen Nachweis der selektiven Zerkleinerung in den Mahlkammern über den Mahlfortschritt und die Kornfraktionen bestätigt werden.

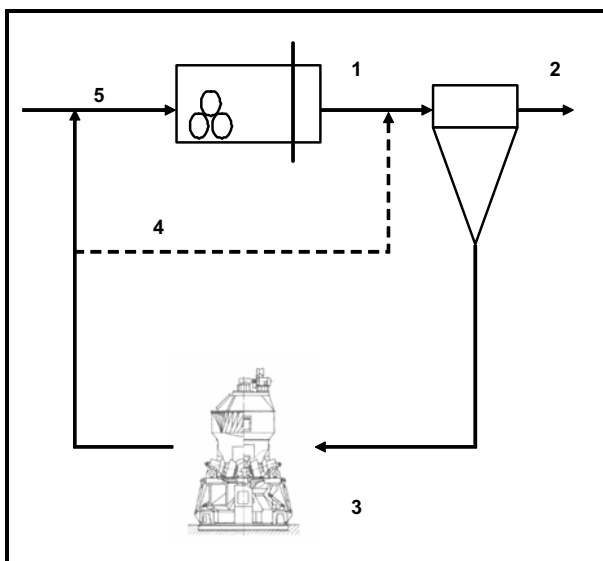
Probenbezeichnung	nasschemische Untersuchung					RFA								
	Klinker	Hüttensand	Sonstiges Kalkstein	Summe ZM		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Summe RFA	Rest	
↑ ansteigend ↓ abnehmend														
Vergleich einer Fraktion in Kammer 1 & 2														
Kammer 1	K I 1m 2/1 mm	60,77	39,23	0	0	39,23	26,76	6,47	2,23	55,67	3,65	1,84	96,62	3,38
	K I 2m 2/1 mm	76,02	23,98	0	0	23,98	23,52	5,66	2,53	58,48	2,82	3,44	96,45	3,55
	K I 3m 2/1 mm	80,47	19,53	0	0	19,53	22,75	5,48	2,56	58,69	2,69	4,02	96,19	3,81
	K I 4m 2/1 mm	85,32 ↑	14,68 ↓	0	0	14,68 ↓	22,94 ↓	5,45 ↓	2,69 ↑	59,76 ↑	2,63 ↓	3,71 ↑	97,18 ↑	2,82
Kammer 2	K II 0,5m 25/125 µm	63,75	36,25	0	0	36,25	25,14	6,26	2,37	56,46	3,34	2,07	95,64	4,36
	K II 2m 25/125 µm	63,22	36,78	0	0	36,78	25,85	6,40	2,36	56,12	3,46	1,81	96,00	4,00
	K II 3,5m 25/125 µm	58,17	41,83	0	0	41,83	26,10	6,49	2,33	55,71	3,57	1,75	95,95	4,05
	K II 6,5m 1000/125 µm	54,03	45,97	0	0	45,97	28,14	6,99	2,22 ↓	53,89	4,07	1,24	96,55	3,45
K II 8m 500/250 µm	54,99 ↓	44,63 ↑	0	0,38	45,01 ↑	30,19 ↑	7,16 ↑	2,87 ↑	51,47 ↓	4,52 ↑	0,94 ↓	97,15 ↑	2,85	
Vergleich der unterschiedlichen Fraktionen einer Meterprobe														
Kammer 1	K I 1m >4 mm	97,54	2,46	0	0	2,46	10,97	3,88	2,10	52,76	1,71	23,05	94,47	5,53
	K I 1m 2/1 mm	60,77 ↓	39,23 ↑	0	0	39,23 ↑	26,76 ↑	6,47 ↑	2,23 ↑	55,67	3,65 ↑	1,84 ↓	96,62 ↑	3,38
Kammer 1	K I 3m >2 mm	89,96	10,04	0	0	10,04	19,91	4,59	2,76	62,08	2,01	5,12	96,47	3,53
	K I 3m 2/1 mm	80,47	19,53	0	0	19,53	22,75	5,48	2,56	58,69	2,69	4,02	96,19	3,81
	K I 3m <0,125 mm	64,81 ↓	34,58 ↑	0	0,60	35,19 ↑	24,20 ↑	6,04 ↑	2,31 ↓	56,62 ↓	3,12 ↑	2,75 ↓	95,04 ↓	4,96
Vergleich Sichter Rückgut mit Produkt der Mühle ZM5 & Sichterückgut / Sichterfeingut														
Sichter	K II 8m 500/250 µm	54,99 ↓	44,63 ↑	0	0,38	45,01 ↑	30,19 ↑	7,16 ↑	2,87 ↑	51,47 ↓	4,52 ↑	0,94 ↓	97,15 ↑	2,85
	Sichter RG	64,47	35,10	0	0,43	35,53	26,63	6,40	2,40	56,69	3,50	1,15	96,77	3,23
	Sichter FG	67,56	30,58	0	1,86	32,44	24,70	6,26	2,27	56,61	3,24	2,60	95,68	4,32
Vergleich des schwer mahlbaren Grobguts der Kammer II bei 8 m mit dem Mittelwert des Klinkers Juni 2009														
Mittelwert Klinker DOII Normal Juni 09	K II 8m 8/1 mm	94,32	2,27	3	0,55	5,68	24,1	5,32	3,15	62,55	2,29	0,69	98,1	1,90
							21,69	5,17	3,54	66,23	1,94	0,76	99,33	0,67

Abbildung 2 Zusammenfassung der nasschemischen Untersuchungen und der RFA

Mit den Untersuchungen der Ist-Zustandsanalyse konnte nicht nur die selektive Zerkleinerung nachgewiesen werden, sondern mit dem Versuch der Evaluierung des Mahlfortschrittes auch Vergleiche gezogen werden. Der Vergleich zweier Siebanalysen aus Meterproben der Zementmühle zeigt erhebliche Unterschiede, was vor allem auf sehr unterschiedliche Betriebsweisen zum Zeitpunkt der Probennahmen hinweist.

Bei den Gattierungsuntersuchungen ist zu erkennen, dass grundsätzlich eine feinere Gattierung der Kammern möglich ist, jedoch sollte dabei ein Aggregat zur Beschränkung des Größtkorns bzw. zur Vorzerkleinerung der gesamten Mühlenaufgabe angedacht werden.

Eine interessante Möglichkeit einer Teilstromvermahlung des Sichtergrobgutes konnte eruiert werden. Es würde sich dabei um eine Zerkleinerung der schwer mahlbaren Stoffe, wie Hochofenschlacke und Klinker handeln, da sich diese in der umlaufenden Last, durch selektive Zerkleinerung anreichern. Dabei kann sowohl eine Kugelmühle als auch eine Vertikalmühle angedacht werden. Die Rückführung des gemahlten Teilstroms kann entweder als Aufgabe der Kugelmühle oder des Sichters erfolgen.



**Abbildung 3** Fließbild von Teilstromvermahlungen; 1... Kugelmühle, 2... Sichter, 3... Vertikalmühle oder Kugelmühle, 4... Alternative Rückführung, 5... Mühlenaufgabe

---

## III. Charakterisierung der Rohstoffe

### 3.01 Theoretische Ansätze

Für die Planung und Optimierung von Zerkleinerungssystemen sind Zerkleinerungseigenschaften hinsichtlich der Bruchcharakteristik und des spezifischen Energieaufwandes in Abhängigkeit von der Dispersität von großer Bedeutung. Die Kennzeichnung der Dispersität erfolgt durch die Korngrößenverteilung und der spezifischen Oberfläche. Die am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung entwickelte Optimierte Zerkleinerungskette beschreibt Gesteine und Minerale durch ihre natürliche Bruchcharakteristik und stellt über die Energieregisterfunktion einen Zusammenhang zwischen eingetragendem Energieaufwand und dem spezifischen Oberflächenzuwachs dar. Aus dem Zusammenhang  $\Delta a = R \cdot \Delta e$  kann der Rittingerkoeffizient  $R$  – der energiebezogene Oberflächenzuwachs [ $\text{cm}^2/\text{J}$ ] – ermittelt werden. [3]

In der Praxis gibt es eine Reihe von Verfahren zur Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs. Nachfolgend werden zwei davon kurz erläutert und Gründe für die Verwendung der Methode der Optimierten Zerkleinerungskette angeführt.

#### **Zeisel Methode**

Sehr häufig wird die Mahlbarkeit der Hauptbestandteile von Zement mit dem Prüfgerät nach Zeisel ermittelt<sup>IV</sup>. Als Mahlgut werden dabei 30 g der Kornklasse 0,8 mm bis 1 mm verwendet, welche durch Brechen und Sieben hergestellt werden. Durch die geringe Größe des Mahlraumes haben Feinanteile einen erhöhten Einfluss auf die Mahlbarkeit. Eine Verbesserung des Verfahrens wurde durch die Einführung der Kreislaufmahlung mit Vorabsiebung erreicht (*Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf*).

Bei der Methode nach Zeisel wird versucht, mit Hilfe einer Korngrößenklasse und eines Mahlsystems, die ermittelten Systemeigenschaften den Kennwerten des Materials anzupassen. Große Fehler können dabei in der Probenvorbereitung und vor allem bei nicht

---

<sup>IV</sup> B. Schiller und H.-G. Ellerbrock [17]

monomineralischen Stoffen mit inhomogenen Festigkeitskennwerten auftreten (siehe Klinker und Hochofenschlacke in dieser Arbeit).

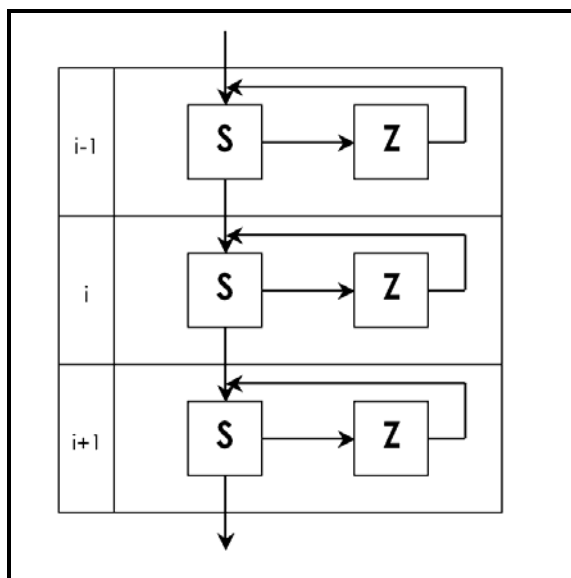
### **Arbeitsindex nach Bond [19]**

Der Arbeitsindex ( $W_i$ ) nach Bond stellt den Gesamtarbeitsbedarf für die Zerkleinerung einer Masseinheit Material von „theoretisch unendlicher“ Korngröße auf 80 % kleiner 100  $\mu\text{m}$  dar. Er enthält sämtliche Arbeitseinträge, die über Zerkleinerungsvorgänge in das Material eingetragen werden. Die Bestimmung dieser Arbeitsindizes ist durch Labormahlversuche unter vorgegebenen Bedingungen möglich. Dadurch ist eine sehr gute Vergleichbarkeit von Mahlbarkeitskennwerten gleicher mineralischer Stoffe möglich, jedoch können keine vergleichbaren Bedingungen für den Unterschied mineralischer und nicht natürlicher mineralischer Stoffe geschaffen werden. So liegen etwa die Hochofenschlacke, der Klinker wie auch die Flugasche oder das bereits vorzerkleinerte Steinmehl nicht mit „theoretisch unendlicher“ Korngröße vor. Auch ist die Schaffung von energieoptimierten Bedingungen, für welche der Energieeintrag im Mahlraum zur geleisteten Zerkleinerung am geringsten ist, bei mineralisch sehr unterschiedlichen Materialien schwierig. Mahlbarkeitskennwerte werden stark von den optimierten Bedingungen im Mahlraum beeinflusst, die wiederum stark von Materialkennwerten wie Dichte, Schüttdichte, Dispersität und Feuchte abhängig sind. Bond gibt außerdem nur einen mittleren Mahlbarkeitskennwert, ohne Unterscheidung der korngrößenabhängigen Mahlbarkeitskennwerte, an.

#### **(a) Optimierte Zerkleinerungskette (OZK)**

Hierbei handelt es sich um eine verhältnismäßig arbeitsintensive Versuchsdurchführung. Zum Unterschied zu den meisten anderen Methoden erfolgt eine Direktmessung der vom Zerkleinerungsgut aufgenommenen Nettoenergie und es kann auch auf die stoffspezifische Bruchcharakteristik geschlossen werden. Im Betrieb erfolgt die Zerkleinerung des mineralischen Gutes meistens in Stufen mit entsprechender Klassierung, wobei deren Hauptzweck die Formung der Korngrößenverteilung an der Grobkornflanke ist. Dies bringt vor allem große energetische Vorteile. Durch die Konzentration der Zerkleinerung auf die Grobkornflanke können die stoffliche Eigenart des Zerkleinerungsgutes, der Energieaufwand und die Dispersitätsmerkmale ohne Einfluss der maschinellen Bedingungen bestimmt werden. Das im Labormaßstab weitgehend verwirklichte Konzept einer vollkommenen

Kreislaufzerkleinerung mit analysenscharfer Siebung und hoher Umlauflast ergibt Zerkleinerungsprodukte mit der kleinstmöglichen Korngrößenstreuung, die kennzeichnend für die stoffeigene „natürliche“ Bruchcharakteristik sind. Durch Optimierung der Versuchsbedingungen kann jede Stufe im Labormaßstab an den zu zerkleinernden Stoff angepasst werden. So kann im Labor zum Beispiel mit einem Backenbrecher, einer Stabmühle und einer Kugelmühle eine 3-Stufenzerkleinerung eingerichtet werden (Siehe Abbildung 4). Zur Nachahmung eines kontinuierlichen Zerkleinerungsvorganges wird die Methode der zyklischen Satzversuche, jeweils bis zur Gleichgewichtseinstellung der Umlauflasten, angewendet [3]. Durch die gleich bleibenden energieoptimierten Bedingungen der einzelnen OZK-Stufen enthält die Korngrößenverteilung eines OZK-Produktes die gesamte Information über die Korngrößenverteilungen gutgleicher OZK-Produkte unterschiedlicher Maximalkorngrößen. Theoretisch wäre zur Charakterisierung eines Rohstoffes eine OZK-Stufe ausreichend, zur Vermeidung von etwaigen Messfehlern und der Feststellung von korngrößenabhängigen Stoffeigenschaften sind jedoch mehrere Stufen nötig. Ein Vorteil der OZK ist auch, dass die Versuchsdurchführung mit den Standardeinrichtungen von Aufbereitungslabors durchzuführen ist.

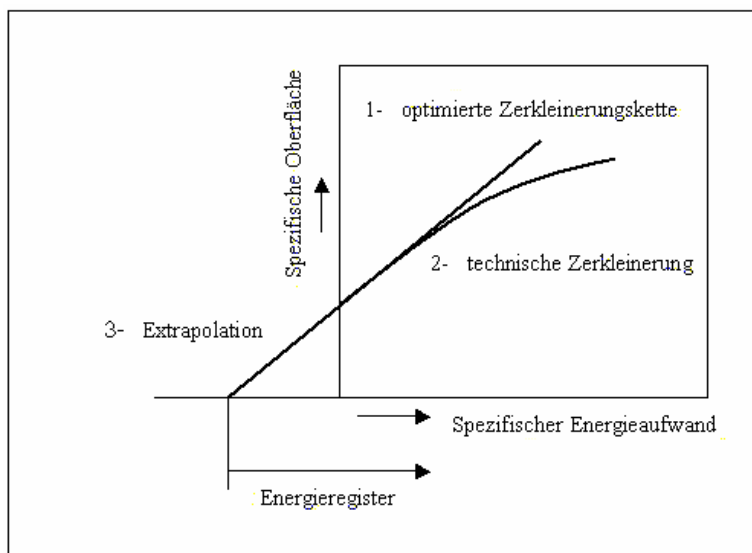


**Abbildung 4** Schematische Darstellung der Stufen (i-1) bis (i+1) einer Optimierten Zerkleinerungskette. S = analysenscharfe Siebung, Z = Zerkleinerungsaggregat. Quelle: [3]

Werden die Bedingungen der Optimierten Zerkleinerungskette eingehalten, kann eine Gerade, wie sie die Rittinger-Hypothese als Proportionalität zwischen der neu erzeugten Oberfläche und dem Nettoenergieaufwand vorhersagt, erzeugt werden. Durch Extrapolation lässt sich der

Nullpunkt einer Energieaufwandsskala finden. Die Beträge des spezifischen Energieaufwandes, welche auf diesen Nullpunkt bezogen werden, werden Energieregister genannt. Es wird damit jene Energie bezeichnet, die nötig ist, das unzerkleinerte Gut in den jeweils betrachteten Dispersitätszustand zu überführen. Der spezifische Energieaufwand eines einzelnen Zerkleinerungsschritts bzw. einer OZK-Stufe ist die Differenz der Energieregister ihres Zerkleinerungsproduktes und Aufgabegutes.

Die Kernaussage einer praxisorientierten Zerkleinerungskinetik ist der Zusammenhang des Energieaufwandes und der Dispersitätsentwicklung des Zerkleinerungsguts. Im Falle einer nicht optimierten technischen Zerkleinerung wird bei diesem Zusammenhang ein degressiv ansteigender Kurvenzug im Gegensatz zur Geraden der Rittinger-Hypothese erzeugt.



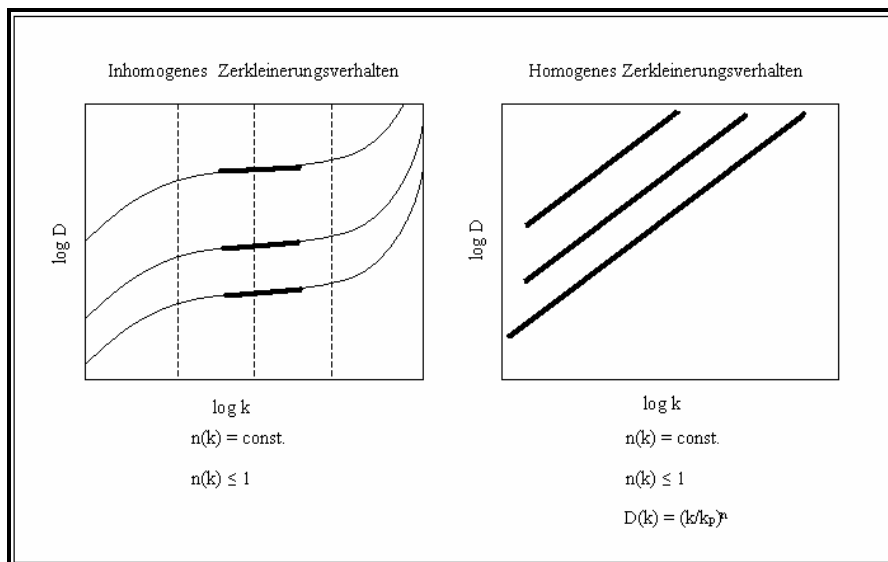
**Abbildung 5** Schematische Darstellung zwischen dem spezifischen Energieaufwand und der spezifischen Oberfläche. Quelle: [3]

### (b) Natürliche Bruchcharakteristik

Die stoffliche Eigenart eines Zerkleinerungsgutes wird vorwiegend in den Feingutanteilen gefunden, daher ist auch die natürliche Bruchcharakteristik hier zu suchen. Das Merkmal der natürlichen Bruchcharakteristik ist die kleinstmögliche Korngrößenstreuung, die bei einer Körnermengenzerkleinerung auf eine eindeutig definierte Maximalkorngröße erreichbar ist.

Durch die Erzeugung optimierter Bedingungen für jede OZK-Stufe enthält eine Korngrößenverteilung eines OZK-Produktes die gesamten Informationen aller gutgleichen OZK-Produkte anderer Maximalkorngrößen.

Zur Unterscheidung von inhomogenem und homogenem Zerkleinerungsverhalten wird die Linearisierbarkeit der Korngrößenverteilung im GGS-Netz herangezogen (Siehe Abbildung 6). Sind die Durchgangsfunktionen von gutgleichen, homogenen bzw. monomineralischen OZK-Produkten unterschiedlicher Maximalkorngröße im GGS-Netz durch Parallelverschieben in Richtung der Durchgangsachse gleich, kann von homogenen Zerkleinerungsverhalten ausgegangen werden. Kann im GGS-Netz keine Linearisierung erreicht werden können die Bereiche der gleich bleibenden Steigung durch eine Gerade abgebildet und die Schnittpunkte des entstehenden Streckenzuges als strukturkennzeichnende Korngrößenlage ausgewiesen werden. Das inhomogene Zerkleinerungsverhalten ist nicht nur bei mineralischen Mischungen sondern häufig, sondern auch bei metamorphen Gesteinen zu finden. Am unteren Ende der KGV<sup>V</sup> (Feinstkornbereich; Durchgang  $\rightarrow 0$ ) ist der Verlauf unbekannt und es kann nicht mit einer unveränderten Fortsetzung gerechnet werden. Dies kann aus der Berechnung der Oberfläche aus der KGV durch Integration geschlossen werden, die in diesem Fall gegen „unendlich“ gehen müsste, was in der Realität nicht der Fall ist.



**Abbildung 6** Schematische Darstellung von Produkten der Optimierten Zerkleinerungskette. Quelle: [3]

<sup>V</sup> Korngrößenverteilung (KGV)



Bereits aus der Breite bzw. der Steigung der KGV, kann die Mahlbarkeit abgeschätzt werden, leichter mahlbare Stoffe weisen eine breitere KGV bei gleicher massenbezogener Oberfläche auf.

Mit Hilfe der natürlichen Bruchcharakteristik und der Rittinger-Hypothese können Zerkleinerungseigenschaften nach Steiner<sup>VI</sup> durch vier messtechnisch zugängliche Parameter mit eindeutigen physikalischen Begriffsinhalten beschrieben werden:

1. Der Kornformkoeffizient der spezifischen Oberfläche in der Dimension [1].
2. Der GGS-Exponent der natürlichen Bruchcharakteristik in der Dimension [1].
3. Die nominelle untere Grenzkorngröße in der Dimension [Länge].
4. Der Rittinger Koeffizient in der Dimension [Fläche / Energie].

### **3.02 Versuchsbeschreibung**

#### **(a) Mahlbarkeitsuntersuchung**

Vor jeder Mahlbarkeitsuntersuchung muss die Probenahme festgelegt werden. Es ist darauf zu achten, dass es sich bei der Probe um eine repräsentative Durchschnittsprobe handelt. Die Probenahme der Rohstoffe dieser Diplomarbeit ist in einem eigenen Unterpunkt zusammengefasst (Siehe Anhang).

Nach der Probenahme muss das Ausgangsmaterial hinsichtlich gerüttelter und losen Schüttdichte, Reindichte, Feuchte und Korngrößenverteilung analysiert werden. Bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung ist darauf zu achten, dass an den beiden feinsten Fraktionen die spezifische Oberfläche gemessen wird. Diese Werte dienen zur Bestimmung der gesamten spezifischen Oberfläche der Probe. Für die Beurteilung einer Mahlung sollte nicht nur die spezifische Oberfläche oder ein Siebrückstandswert, sondern eine Kombination verwendet werden [14]. Mithilfe des GGS-Exponenten kann die anzahläquivalente Korngröße einer Fraktion und nach Messung ihrer spezifischen Oberfläche ihr Kornformfaktor bestimmt werden. Vor der Oberflächenmessung der Fraktion wird sie am Luftstrahlsieb

---

<sup>VI</sup> Steiner, Hans Jörg, em.O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont.

„nachgereinigt“. Der berechnete Kornformfaktor dient zur Berechnung der volumenspezifischen Oberfläche jener Fraktionen, für welche keine Blainemessung durchgeführt werden kann. Über die Dichte kann auf die massenbezogene spezifische Oberfläche gerechnet werden. Für die spezifische Oberfläche der gesamten Probe werden die Werte der einzelnen Fraktionen entsprechend ihrer Verteilung gewichtet.

Zur Linearisierung der Korngrößenverteilung sei noch erwähnt, dass Produkte kleinerer Maschenweiten aus der Kreislaufmahlung im GGS-Netz eine bessere Linearisierung als im RRSB-Netz aufweisen. Produkte größerer Maschenweiten aus der Durchlaufmahlung linearisieren jedoch im RRSB-Netz besser.

### Linearisierung von Korngrößenverteilungen:

GGs-Netz: Kreislaufzerkleinerung + kleine Maschenweiten  $\log D^{\text{VII}}$  über  $\log k^{\text{VIII}}$

RRSB-Netz: Durchgangskerkerkleinerung + große Maschenweiten  $\log(\log(1/R^{\text{IX}}))$  über  $\log k$

Die Beschreibung des GGS-Netzes erfolgt mit der Steigung  $n_{\text{GGs}}$  und dem  $k_{80}$ -Wert, welcher die Korngröße bei 80 % Durchgang angibt. Eine Charakterisierung der Korngrößenverteilungen im RRSB-Netz erfolgt mit den Kennwerten  $d'$  und  $n$ , wobei  $d'$  die Korngröße beim Rückstandswert  $R = 100/e = 36,8 \%$  und  $n$  die Steigung ( $n = \tan \alpha$ ) darstellt.

$$n_{\text{GGs}} = \frac{\log\left(\frac{D_{\text{oben}}}{D_{\text{unten}}}\right)}{\log\left(\frac{K_{\text{oben}}}{K_{\text{unten}}}\right)} \quad (1)$$

$$f = k_{\text{äquivalent}} * a_{\text{Vol}} \quad (2)$$

$$k_{\text{äquivalent}} = \frac{n_{\text{GGs}} - 1}{n_{\text{GGs}}} * \frac{\frac{D_{\text{oben}} - D_{\text{unten}}}{D_{\text{oben}} - \frac{D_{\text{unten}}}{K_{\text{oben}}}}}{\frac{D_{\text{oben}}}{K_{\text{oben}} - \frac{D_{\text{unten}}}{K_{\text{unten}}}}} \quad (3)$$

$$a_m = \frac{a_{\text{Vol}}}{\rho} \quad (4)$$

<sup>VII</sup> Durchgang [%]

<sup>VIII</sup> Korngröße [ $\mu\text{m}$ ]

<sup>IX</sup> Rückstand [%]

$n_{\text{GGS}}$ ... GGS-Exponent [1]

$D_{\text{oben}}$ ... Durchgang bei der oberen Klassengrenze [%]

$D_{\text{unten}}$ ... Durchgang bei der unteren Klassengrenze [%]

$K_{\text{oben}}$ ... obere Grenze der Korngrößenklasse [ $\mu\text{m}$ ]

$K_{\text{unten}}$ ... untere Grenze der Korngrößenklasse [ $\mu\text{m}$ ]

$f$ ... Kornformfaktor [1]

$k_{\text{äquivalent}}$ ... anzahläquivalente Korngröße [ $\mu\text{m}$ ]

$a_{\text{Vol}}$ ... volumenspezifische Oberfläche [ $\text{cm}^{-1}$ ]

$a_{\text{m}}$ ... massenspezifische Oberfläche [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]

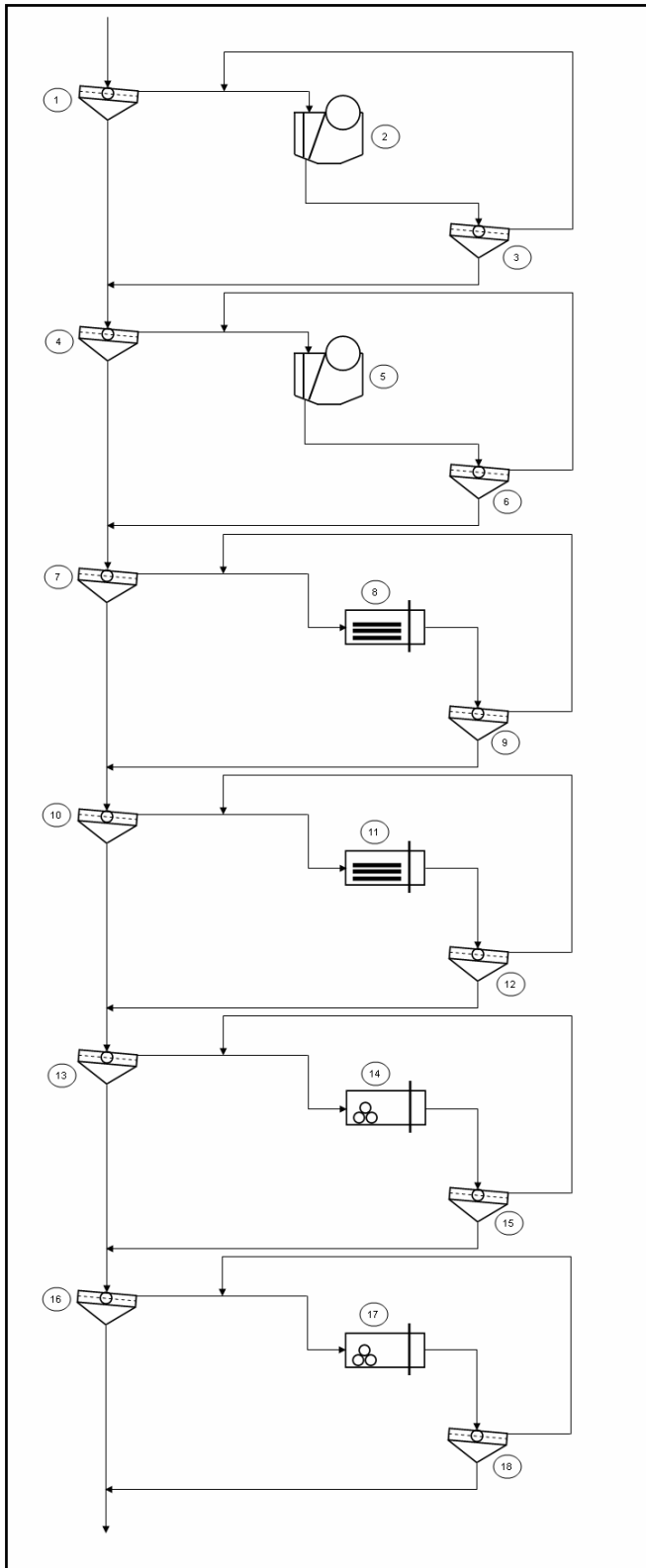
$\rho$ ... Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{\text{GGS}}$ [1]	$k_{\text{äqu}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$a_{\text{v}}$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$a_{\text{m}}$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]	
18	0	0	0	100					
3,15	268	5,43	5,43	94,57	0,03	6706,66	27,73	9,38	49,34
2	545	11,03	16,46	83,54	0,27	2500,21	74,37	25,16	
1	1624,5	32,89	49,34	50,66	0,72	1426,80	130,32	44,09	
0,5	1620	32,79	82,14	17,86	1,50	735,81	252,71	85,49	50,66
0,1	826,5	16,73	98,87	1,13	1,72	285,66	650,94	220,22	
0,04	46,6	0,94	99,81	0,19	1,97	69,85	2661,93	900,57	
0	9,2	0,19	100	0			6574,43	2224,22	
Summe	4939,8	100						95,31	
Kornformfaktor = $k_{\text{äqu}} \cdot a_{\text{v}}$ :							18,6		

**Tabelle 1** Berechnung der Korngrößenverteilung am Bsp. HOS

Für die Berechnungen der spezifischen Energieeinträge sind außerdem die Massenströme in den OZK-Stufen zu bestimmen.

Da nicht für jeden Rohstoff dieselben Zerkleinerungsstufen gewählt werden können, muss jeweils eine auf das Material „zugeschnittene“ OZK-Kette erstellt werden (Abbildung 7).



- 1 Analysesieb 18 mm
- 2 Backenbrecher 1. OZK-Stufe  
Spaltweite 18mm
- 3 Analysesieb 18 mm
- 4 Analysesieb 6,3 mm
- 5 Backenbrecher 2. OZK-Stufe  
Spaltweite 6,3 mm
- 6 Analysesieb 6,3 mm
- 7 Analysesieb 3,15 mm
- 8 Stabmühle 3. OZK-Stufe  
Fraktion 6,3/3,15 mm
- 9 Analysesieb 3,15 mm
- 10 Analysesieb 1 mm
- 11 Stabmühle 4. OZK-Stufe  
Fraktion 3,15/1 mm
- 12 Analysesieb 1 mm
- 13 Analysesieb 0,5 mm
- 14 Kugelmühle 5. OZK-Stufe  
Fraktion 1/0,5 mm
- 15 Analysesieb 0,5 mm
- 16 Analysesieb 0,2 mm
- 17 Kugelmühle 6. OZK-Stufe  
Fraktion 0,5/0,2 mm
- 18 Analysesieb 0,2 mm

Abbildung 7 Fließbild der Mahlbarkeitsuntersuchung

## (b) Ermittlung der Kennwerte für die Stab- und Kugelmühle

Zur Verwirklichung des kontinuierlichen Zerkleinerungsvorganges wird die Methode der zyklischen Satzversuche jeweils bis zur Gleichgewichtseinstellung der Umlauflasten angewendet.

### Stabmühlenauswertung - HOS (Fraktion 3,15/1 mm; Kreislaufmahlung)

Die Versuchsanlage dieser Stufe besteht aus einer Stabmühle mit Hubleisten, die über ein verstellbares Getriebe mit einem Motor verbunden ist. Die Anlage ist mit einem Umdrehungszähler ausgestattet. Der Innendurchmesser der Mühle beträgt 15,4 cm und die Mahlkörpermasse 7,79 kg. Diese teilt sich auf 9 Stäbe mit einem Durchmesser von ca. 20 mm auf.

Zyklus	Umdrehungen $\Delta$	Umdrehungen $\Sigma$	Aufgabe	Grobgut >500 $\mu\text{m}$	Feingut <500 $\mu\text{m}$	Umlaufende Last = 100%	Spez. Feingutbildung	Umdrehungen nächster Zyklus
	[1]	[1]	[g]	[g]	[g]	[%]	[g/U]	[1]
1	150	150	500,0	48,2	451,8	10,67	3,012	83
2	83	83	501,3	126,4	374,9	33,72	4,517	55
3	40	40	500,0	253,3	246,7	102,68	6,168	41
4	40	40	500,0	278,9	221,1	126,14	5,528	5
	6	46	499,0	266,9	232,1	114,99	5,046	3
	5	51	499,0	252,5	246,5	102,43	4,833	52
5	51	51	500,2	246,7	253,5	97,32	4,971	50
6	51	51	500,0	253,9	246,1	103,17	4,825	52
<b>Ergebnis</b>	<b>51</b>							

Tabelle 2 Stabmühlenauswertung Bsp. HOS

Die Berechnung des Energieeintrages erfolgt bei der Stabmühle mit der Mühlenformel nach Steiner. [11]

$$e_p = C_p * D * M_G * g * u_p \quad (5)$$

$e_p$  ... spezifischer Energieeintrag

$C_p$  ... Leistungskennzahl der Mühle

$D$  ... Innendurchmesser der Mühle

$M_G$  ... Mahlkörpermasse

$g$  ... Erdbeschleunigung

$u_p$  ... spezifische Anzahl Umdrehungen

### Kugelmühlenauswertung - HOS (Fraktion 1/0,5 mm; Kreislaufmahlung)

Die OZK-Stufe der Kugelmühle und die Durchlaufmahlung wurden am Mahlstand nach Wiechert durchgeführt. Der Mahlstand setzt sich aus einer Kugelmühle mit Torsionsmomentenmesswelle und Planetengetriebe, einem Messverstärker und einem analogen Messschreiber zusammen. Die Gattierung erfolgt mit Stahlkugeln. Bei den Versuchen ist darauf zu achten, dass die Mahlkörperzwischenräume vollständig mit Mahlgut gefüllt sind. Die Berechnung der in den Mahlraum eingetragenen Energie erfolgt über folgenden Zusammenhang [12]:

$$w_M = \frac{2\pi * U * M_d}{M_{FG}} \quad (6)$$

$w_M$ ... in den Mahlraum eingetragene spezifische Energie

$M_d$ ... Drehmoment der Mühle

$U$ ... Anzahl der Umdrehungen

$M_{FG}$ ... Masse Feingut

#### Kenndaten der Mühle:

Innendurchmesser: 0,2 m

Länge: 0,2 m

Erstgattung Stahlkugeln: 48 Stk. mit 30 mm; 46 Stk. mit 25mm; 35 Stk. mit 20 mm

Masse: 9 kg

Füllungsgrad: 40 %

Drehzahl: 0,7  $n_{kritisch}$

Umlaufende Last: möglichst hoch, aber wählbar (z.B. 100 % bzw. 250 %)

Das Nettodrehmoment wird über die Beziehung  $\Delta M_D = C * \Delta(IE/t)$  (7) errechnet. Eine Flanke des Integrators des Messschreibers entspricht 100 Integrationseinheiten (IE) und die Vorschubgeschwindigkeit wurde mit 1 mm/s gewählt. Der Ausdruck  $\Delta IE/t$  ist die Differenz der Integrationseinheiten pro Zeit des Mahlzyklus abzüglich der  $IE/t$  der beiden gemittelten benachbarten Leerläufe. Die Werte des Integrators werden aus dem Liniendiagramm ausgelesen. Der Faktor C berechnet sich aus  $C = \frac{1}{B * b}$  (8) wobei B eine Konstante der Messvorrichtung ( $1,25 \text{ s}^{-1}$ ) und b die Steigung der Regressionsgeraden aus der Kalibrierung

ist (siehe Kalibrierung der Versuchsanlage). Über  $\Delta E = 2\pi U * \Delta M_D$  (9) gelangt man über die Umdrehungen (U) des Mahlzyklus zum Nettoenergieeintrag.

Zyklus	Um- drehungen	Integrations- einheiten (IE)	Zeit	IE / t Gesamt	IE / t Effektiv	Netto- moment	Energie- eintrag Mahlgut	Mahlgut	Spezifischer Energieeintrag $\Delta e$	Spezifischer Energieeintrag $\Sigma e$
[1]		[1]	[s]	[1/s]	[1/s]	[Nm]	[J]	[g]	[J/g]	[J/g]
Leerlauf		3500	227,0	15,419		1,030				
	50	3070	47,9	64,092	48,673	3,253	1021,88	740,0	1,38	
	35	2160	33,7	64,095	48,676	3,253	715,36	740,0	0,97	
1. Zyklus	Summe									2,35
	99	6700	94,5	70,899	55,481	3,708	2306,32	740,0	3,12	
	20	1220	19,0	64,211	48,792	3,261	409,75	740,0	0,55	
2. Zyklus	Summe									3,67
3. Zyklus	125	7425	119,0	62,395	46,976	3,139	2465,64	740,1	3,33	3,33
4. Zyklus	127	7650	121,5	62,963	47,544	3,177	2535,38	740,3	3,42	3,42
5. Zyklus	127	7645	121,2	63,078	47,659	3,185	2541,49	740,2	3,43	3,43

Tabelle 3 Kugelmühlenauswertung Bsp. HOS

### Kalibrierung der Versuchsanlage - Kugelmühle (Bsp. HOS)

Vor jedem Versuch mit der Kugelmühle ist der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Schreiberstellung aufzunehmen. Hierfür wird mit verschiedenen großen Gewichten ein statisches Moment an der Welle aufgebracht und diese leicht ausgelenkt. Der Ausschlag des Messschreibers wird zur Berechnung einer Regressionsgeraden verwendet.

Kalibrierung vor Mahlung:

Masse	Erdbeschleunigung	Gewicht	Abstand	Moment	Skalierung	Skaleneinheiten*
[g]	[m/s <sup>2</sup> ]	[N]	[m]	[Nm]	[mm]	[1]
152	9,80665	1,4906	0,1085	-0,1617313	50,3	25,15
152	9,80665	1,4906	0,1085	0,16173	57,2	28,60
552	9,80665	5,4133	0,1085	0,58734	68,5	34,25
1052	9,80665	10,3166	0,1085	1,11935	81,2	40,60
2052	9,80665	20,1232	0,1085	2,18337	105,7	52,85
3052	9,80665	29,9299	0,1085	3,24739	131,9	65,95
4050	9,80665	39,7169	0,1085	4,3092872	157,2	78,60

Tabelle 4 Kalibrierung vor Mahlung (\* 2 mm entsprechen 1 Skaleneinheit)

Kalibrierung nach Mahlung:

Masse	Erdbeschleunigung	Gewicht	Abstand	Moment	Skalierung	Skaleneinheiten*
[g]	[m/s <sup>2</sup> ]	[N]	[m]	[Nm]	[mm]	[1]
152	9,80665	1,4906	0,1085	-0,1617313	47,2	23,60
152	9,80665	1,4906	0,1085	0,16173	55,7	27,85
552	9,80665	5,4133	0,1085	0,58734	65,6	32,80
1052	9,80665	10,3166	0,1085	1,11935	77,1	38,55
2052	9,80665	20,1232	0,1085	2,18337	101,8	50,90
3052	9,80665	29,9299	0,1085	3,24739	128,2	64,10
4050	9,80665	39,7169	0,1085	4,3092872	155,4	77,70

Tabelle 5 Kalibrierung nach Mahlung (\* 2 mm entsprechen 1 Skaleneinheit)

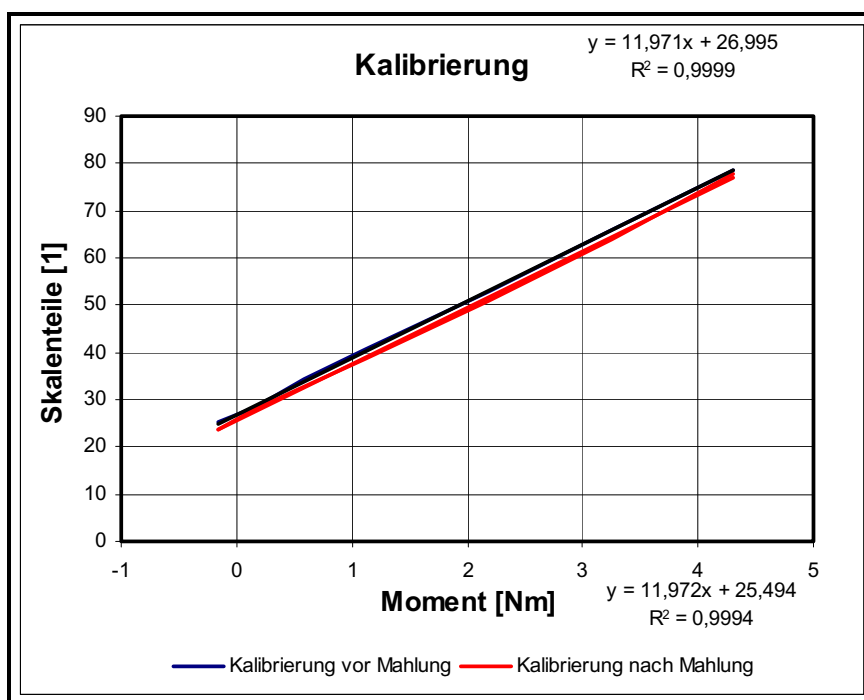


Abbildung 8 Kalibriergerade vor und nach der Mahlung

### (c) Abschätzung des Arbeitsindex nach Bond

Der Arbeitsindex nach Bond kann formal aus jeder OZK-Stufe und aus jedem einzelnen Abschnitt der Durchlaufmahlung berechnet werden. Durch die von der Bond-Vorschrift abweichenden Apparate und Arbeitsweise darf dieser Wert nicht als „echter“ Bond-Index verstanden werden.



$$W_i = \frac{\Delta e}{\sqrt{\frac{100}{p_{80}}} - \sqrt{\frac{100}{a_{80}}}} \quad (10)$$

$W_i$ ... berechneter Arbeitsindex

$\Delta e$ ... spezifischer Energieverbrauch [kwh/t]

$p_{80}$ ...  $k_{80}$ -Wert des Produkts

$a_{80}$ ...  $k_{80}$ -Wert der Aufgabe

#### **(d) Porositätsmessung mittels Geo-Pyknometerversuche**

Messungen mit dem Geo-Pyknometer der Firma Micromeritics werden zur Beurteilung der Porosität grober Kornklassen durchgeführt. Nach dem Verdrängungsprinzip wird ein Messzylinder mit Messmaterial (Dryflow) aus kleinen festen sphärischen Partikeln mit enger Korngrößenverteilung und hoher Rieselfähigkeit gefüllt und mit einem Kolben zusammengedrückt. Nach Einbringung der zu messenden Partikel wird dieser Vorgang wiederholt und die Differenz der Distanzen gemessen. Der Messsand ist fein genug, um sich während des Konsolidierungsprozesses eng um die Probe zu gruppieren und groß genug, um nicht in die Poren der Probe eindringen zu können. Die untere Grenze der messbaren Korngrößen liegt zwischen 500  $\mu\text{m}$  und 1000  $\mu\text{m}$ .

#### **(e) Stoffdichtemessung mittels Helium-Pyknometerversuche**

Messgerät: Micromeritics Accupyc 1330, Messzelle Nennvolumen 10  $\text{cm}^3$

Die Ermittlung der Rohdichte erfolgt mit dem Helium-Pyknometer. Das Gaspyknometer des Herstellers Micromeritics ist ein vollautomatisches Gerät zur Bestimmung des Volumens von Festkörpern, Pulvern, Pasten und nichtflüchtigen Flüssigkeiten. Es besteht aus einer Mess- und einer Expansionskammer, dem Gaseinlassventil, dem Gasauslassventil, dem Ventil zum Trennen der beiden Kammern sowie einem Drucksensor, der sich an der Messkammer befindet. Das Messgerät bestimmt das Volumen einer Probe aus der Druckänderung des Gases (Helium) beim Expandieren von der Messkammer in den Expansionsraum. Außerdem misst es die Temperatur des Messvorganges. Die beiden Kammervolumina werden durch eine

Kalibrierung ermittelt. Nach Wägung der Probenmasse kann die Feststoffdichte berechnet werden.

### Technische Daten

Probemenge:	bis zu ca. 20 g (10 cm <sup>3</sup> Messzelle)
Messgenauigkeit:	+/- 0,03 % des Messkammervolumens
Reproduzierbarkeit:	+/- 0,01 %
Messgas:	Helium 99,996 %
Erforderlicher Gasdruck:	1,5-1,7 bar
Betriebstemperatur:	15-35 °C

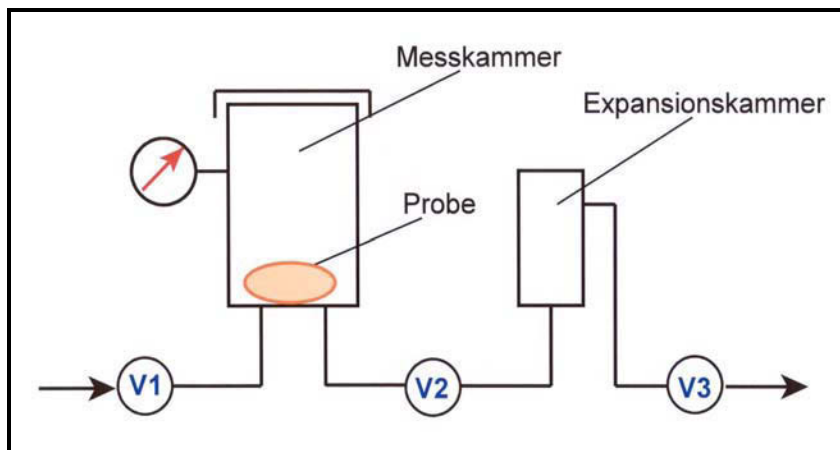


Abbildung 9 Prinzipskizze He-Pyknometer

### (f) Messung der Spezifische Oberfläche mittels Permeametrie

Die Ermittlung der spezifischen Körneroberfläche wurde mit dem BLAINE-Gerät 295/83 (Tonindustrie Prüftechnik GmbH) und der Messzelle Nr. 295 durchgeführt.

Probenbezeichnung			P41HOS <40 µm	
			1. Durchgang	2. Durchgang
Meßwerte	Körnerdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,91	2,91
	Schüttgutmasse	g	2,50	2,57
	Abstand zwischen den Endflächen von Verdichtungskolben und Meßzelle	cm	7,855	7,920
	Falldauer der U-Rohr Flüssigkeit zwischen den Meßmarken 70/15 mm über der Nullmarke	sec.	28,64	27,71
		sec.	29,93	28,21
		sec.	28,81	28,15
		sec.	29,89	28,98
		sec.	30,50	28,15
		sec.	30,23	29,13
		Mittelwert	sec.	29,67
	Lufttemperatur	°C	21,6	21,7
Rechenwerte	Viskosität der Luft	µPas	18,17	18,17
	Gesamtwiderstand	cm <sup>-3</sup>	4,899E+08	4,687E+08
	Durchflußwiderstand der Probe	cm <sup>-3</sup>	4,789E+08	4,577E+08
	Querschnittsfläche des Schüttgutkörpers	cm <sup>2</sup>	1,243	1,243
	Höhe des Schüttgutkörpers	cm	1,37	1,435
	Spez.Durchflußwiderstand	cm <sup>-2</sup>	4,345E+08	3,965E+08
	Körnervolumenbruch	Dim. 1	0,504	0,495
	KOZENY-Koeffizient	Dim. 1	5,000	5,000
	Volumenspezifische Oberfläche	cm <sup>-1</sup>	6458	6464
	Massespezifische Oberfläche	cm <sup>2</sup> /g	2218	2220
	Dichte des Schüttgutkörpers	g/cm <sup>3</sup>	1,468	1,441
	Abweichung Durchgang 1 und 2	%	0,09	
<b>Mittelwert Volumenspezifische Oberfläche</b>	<b>cm<sup>-1</sup></b>	<b>6461</b>		
<b>Mittelwert Massespezifische Oberfläche</b>	<b>cm<sup>2</sup>/g</b>	<b>2219</b>		

Abbildung 10 Blaineauswertung Bsp. HOS

Das Blainemessgerät dient zur Bestimmung der volumenspezifischen Oberfläche feinkörniger Schüttgüter. Es handelt sich hierbei um ein Durchströmungsverfahren, bei dem die äußere Oberfläche gemessen wird. Die Probe befindet sich in einem Zylinder, der luftdicht auf einem Ende eines flüssigkeitsgefüllten U-Rohres sitzt. Durch Abdichten dieses Schenkels und Anbringen von Unterdruck wird die Flüssigkeit auf dieser Seite hochgezogen. Nach Entfernen der Abdichtung sinkt die Flüssigkeitssäule in ihre Ruhelage ab und zieht das entsprechende Luftvolumen durch die Probe. Die zum Absinken durch einen bestimmten Abschnitt benötigte Zeit dient als Maß für die Oberfläche. Die Auswertung erfolgt mit Hilfe der Carman-Kozeny-Gleichung. Der Messbereich wird mit 300-12000 cm<sup>-1</sup> angegeben und das Messverfahren ist in der DIN 66127 genormt.

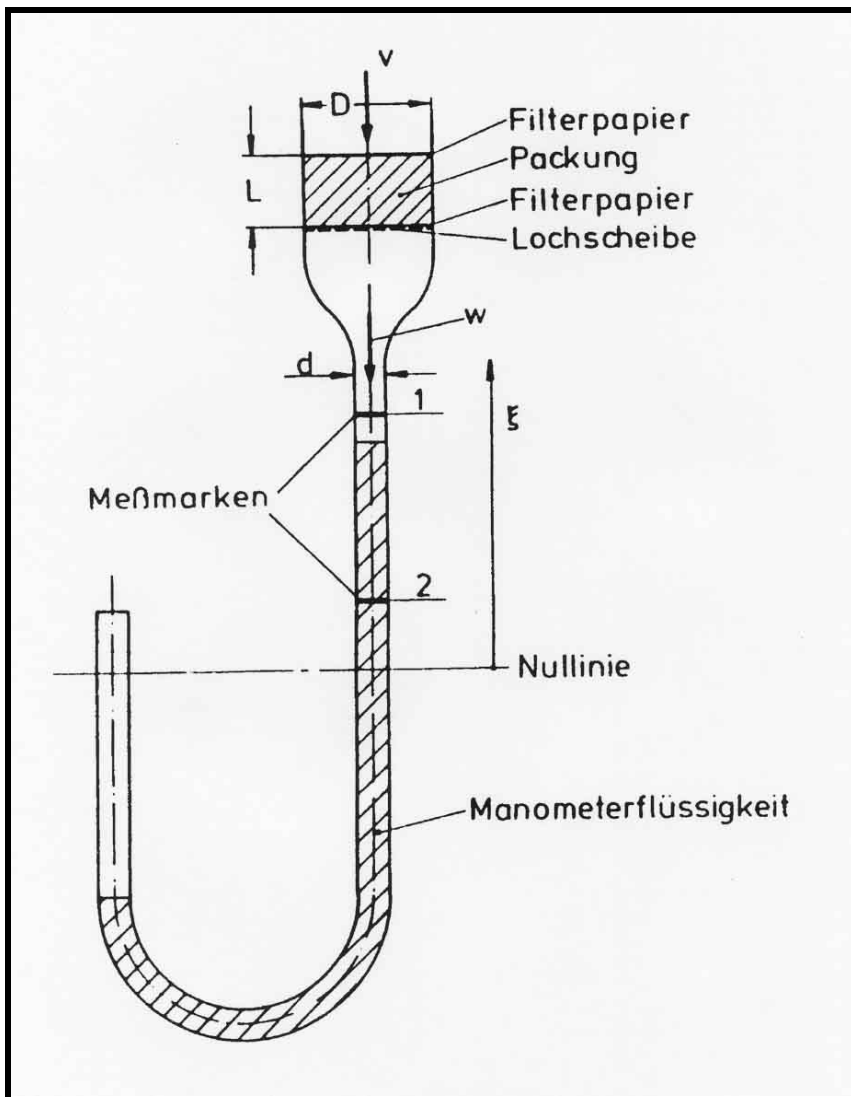


Abbildung 11 Prinzipskizze Blainewertmessung

### **3.03 Rohstoffe**

#### **(a) Klinker**

##### **(i) Allgemein**

Die Mahlbarkeit von verschiedenen Klinkern kann im Gegensatz zu den deutlichen Unterschieden bei Zumahlstoffen als relativ gleich gesehen werden [5].

Da es sich bei Klinker um keinen monomineralischen Stoff, sondern um einen erzeugten Rohstoff mit verschiedene Phasen - welche unterschiedliche Korngrößen und Eigenschaften aufweisen - handelt, muss für alle Untersuchungen eine geeignete Probenmenge festgelegt werden.

##### **Mahlbarkeitseinflüsse des Klinkers**

Mikrostruktur und Zusammensetzung beeinflussen die Mahlbarkeit in unterschiedlicher Weise, so kann die sekundäre Zerkleinerung sehr einfach gelingen und die tertiäre Mahlung sehr energieaufwendig sein.

Bei Versuchen mit verschiedenen Portlandzementklinkern wurde festgestellt, dass die *Anfangsmahlbarkeit* durch die Porosität bestimmt wird, was mit dem stetigen Mahlfortschritt einen zunehmend geringeren Einfluss hat und die Feinmahlung wenig beeinflusst. Die *Zwischenmahlbarkeit* wird vorrangig durch den Alit-Gehalt beeinflusst, während die *Endmahlbarkeit* durch den Gehalt an Aluminat und Aluminatferrit im Klinker beeinflusst wird. [6]

Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungsergebnisse wurden nach dem Hardgrove- und dem daraus entwickelten Zeiselverfahren gewonnen. [15]

##### **Einfluss der Porosität**

Zur Bestimmung der Porosität wurden einzelne Granalien an der Luft und in Quecksilber gewogen und der Auftrieb in Quecksilber bestimmt. Die Ergebnisse zeigten, dass Porosität nur in gröberen Korngrößenklassen einen Einfluss hat. Ist die Anfangsmahlbarkeit noch stark von Rissen und Poren abhängig, so ist deren Anteil in den Feinkornbereichen meistens zu gering, um die Mahlbarkeit zu beeinflussen.

### **Einfluss des freien CaO und des MgO**

Ein hoher Gehalt an freiem CaO begünstigt durch seine gefügestörende Wirkung die Mahlung. Für den MgO-Gehalt gilt die Annahme, dass dieser bei einem Gehalt über zwei Prozent durch die Ausbildung von Periklas negative Auswirkungen auf die Zerkleinerung hat.

### **Einfluss des C<sub>2</sub>S- und C<sub>3</sub>S-Gehalts** (siehe Abbildung 12)

Klinker mit hohem C<sub>3</sub>S-Gehalt und einem geringen Schmelzanteil weist die beste Mahlbarkeit auf. Der höchste Energieaufwand ist dem Klinker mit hohem C<sub>2</sub>S- und niedrigem C<sub>3</sub>S-Gehalt zuzuschreiben. Die Klinkerphasen haben jedoch nur Einfluss auf die Feinkornmahlung (Endmahlbarkeit) und diese wird auch von der Agglomerationsneigung der einzelnen Phasen beeinflusst, wobei C<sub>3</sub>S fast keine und β-C<sub>2</sub>S eine starke Agglomerationsneigung hat.

### **Einfluss des Vorwärmersystems**

Die Mahlbarkeit wird nur sehr gering durch das Vorwärmersystems beeinträchtigt.

### **Sonstige Einflussgrößen**

Weiteren Einfluss auf die Mahlbarkeit haben die Abkühlungsbedingungen (Bauart des Kühlers) sowie die Brenntemperatur. So steigt mit der Brenntemperatur der Schmelzanteil, wodurch eine Mahlwidstandserhöhung durch den prozentuellen Mehranteil an Gefügeverfestigung entsteht.

### **Eigenschaften der Klinkerphasen**

<b>Tricalciumsilicat</b>	3 CaO • SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	schnelle Erhärtung, hohe Hydrationswärme
<b>Dicalciumsilicat</b>	2 CaO • SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	langsame, stetige Erhärtung, niedrige Hydrationswärme
<b>Tricalciumaluminat</b>	3 CaO • Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	in größerer Menge: schnelleres Erstarren, höhere Hydrationswärme, Schwindneigung und Empfindlichkeit gegen Sulfatwasser
<b>Calciumaluminatferrit</b>	2 CaO (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	C <sub>2</sub> (A,F)	langsame Erhärtung, widerstandsfähig gegen Sulfatwasser
<b>Freier Kalk</b>	CaO	C	in geringer Menge: unschädlich; in größeren Mengen: Treiben und Schnellbinden
<b>Freie Magnesia</b>	MgO	M	in größerer Menge: Magnesiatreiben

Abbildung 12 Eigenschaften der Klinkerphasen [13]

## (ii) Versuchsbeschreibung

Die Ausgangskorngrößenverteilung wurde im Labor der Firma Leube ermittelt. Die weiteren Versuche erfolgten im Technikum in Leoben. Nach einer Probenteilung (Viertelmethode) wurde das Ausgangsmaterial  $> 14$  mm in einer ersten Brecherstufe bei einer Maschenweite von 14 mm und in einer zweiten Brecherstufe  $> 6,3$  mm im Kreislauf gebrochen. Dies diente rein der Probenvorbereitung, die Ermittlung der Mahlbarkeit erfolgte mit Hilfe der OZK-Stufen an der Stabmühle und der Kugelmühle sowie einer zusätzlichen Durchlaufmahlung an der Kugelmühle. Die Prüfung der Mahlbarkeit an der Stabmühle wurde mit der Fraktion 6,3/1 mm durchgeführt. Um möglichst gleichmäßige Proben zu erhalten, wurden diese aus den Fraktionen 6,3/3,15 mm und 3,15/1 mm, im richtigen Massenverhältnis zusammengeführt. Die Mahlbarkeitsprüfung an der Kugelmühle wurde im Kreislauf und im Durchlauf mit der Fraktion 1/0,5 mm gemacht.

Neben den üblichen Versuchen zur Ermittlung der Mahlbarkeit (siehe 2.02 Versuchsbeschreibung) wurden zur Feststellung der Porosität Messungen am Geopyknometer durchgeführt.

## (iii) Mahlbarkeitsuntersuchung

Die Sieblinie der ersten Brecherstufe wurde nur mit dem gebrochenen Material  $>14$  mm durchgeführt. Bei der Korngrößenverteilung der Ausgangsprobe sind im GGS-Netz zwei Krümmungen bei den Korngrößen 18 mm und ca. 550  $\mu\text{m}$  erkennbar. Ein ähnliches Verhalten kann bei metamorphen Gesteinen beobachtet werden. Diese „Grenzen“ könnten die korngrößenabhängige Festigkeit des Klinkers beschreiben. Eine Linearisierung des Zerkleinerungsverhaltens kann jedoch nach den Brecherstufen beobachtet werden. Die Steigung der Korngrößenverteilung wirkt bereits nach der zweiten Brecherstufe ( $< 550$   $\mu\text{m}$ ) linear. Die Ermittlung der GGS-Exponenten (Steigung) und der  $k_{80}$ -Werte wurden in den Diagrammen eingezeichnet (hellgrün).

$$n_{\text{GGS Ausgangsprobe (125/40 } \mu\text{m)}} = 1,68$$

$$k_{80} = 18 \text{ mm}$$

$$n_{\text{GGS nach Stabmühle (100/40 } \mu\text{m)}} = 0,82$$

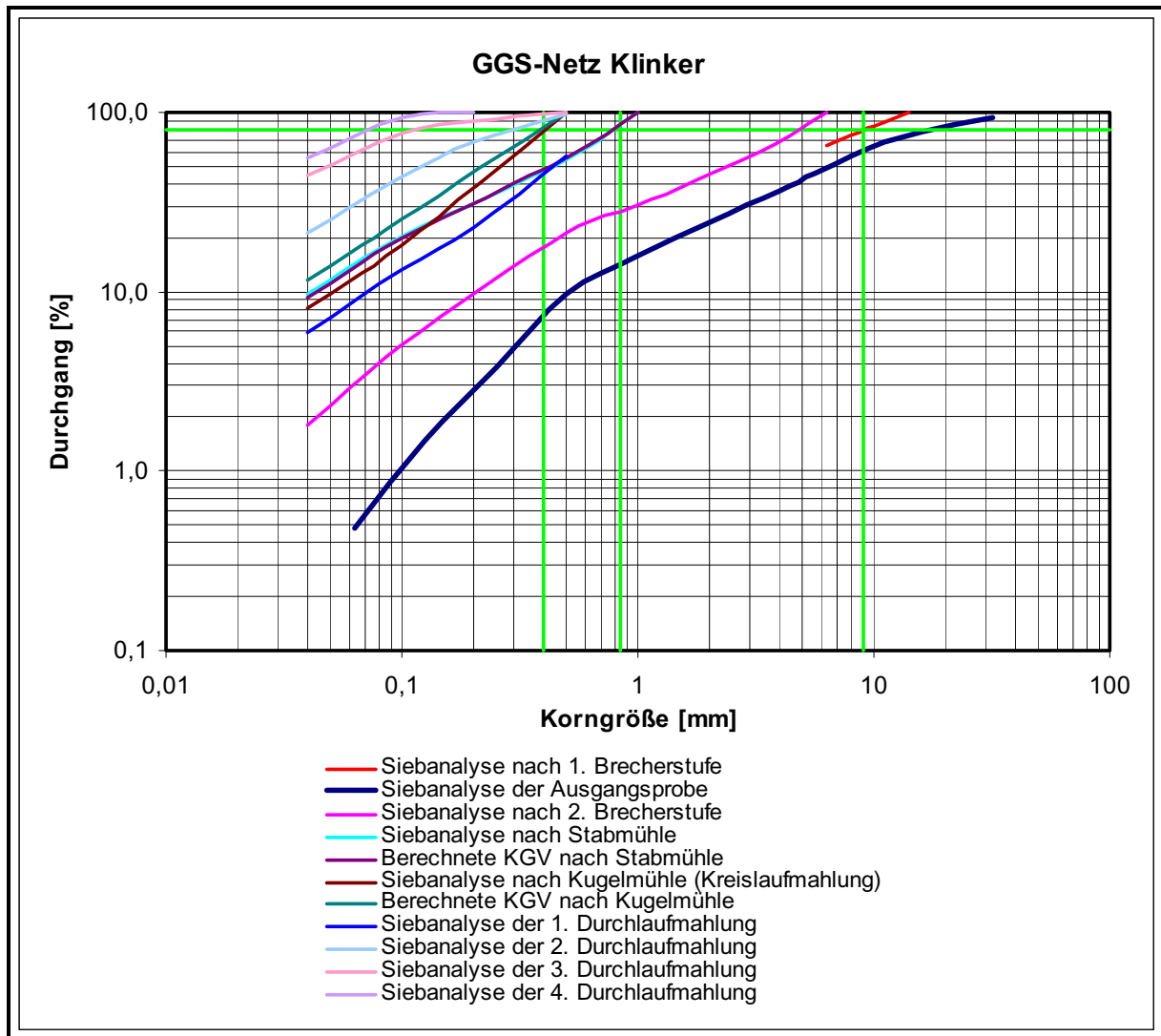
$$k_{80} = 0,9 \text{ mm}$$

$$n_{\text{GGS nach Kugelmühle (100/40 } \mu\text{m)}} = 0,85$$

$$k_{80} = 0,4 \text{ mm}$$

$$n_{\text{GGS DLM 4.DG (2500 U)}} = 0,56$$

$$k_{80} = 0,075 \text{ mm}$$



**Abbildung 13** Klinker - GGS-Netz

Auch im RRSB-Netz sind eine Linearisierung sowie die Krümmungen bei unterschiedlichen Korngrößen erkennbar. Die Charakterisierung der Korngrößenverteilungen erfolgt im RRSB-Netz mit  $d'$  und  $n$ . Dabei ist  $d'$  die Korngröße für den Rückstandswert  $R = 100/e = 36,8 \%$  und  $n$  die Steigung ( $n = \tan \alpha$ ).

$$n_{\text{Ausgangsprobe (400/40 } \mu\text{m)}} = 1,43$$

$$d' = 9 \text{ mm}$$

$$n_{\text{nach Stabmühle (300/40 } \mu\text{m)}} = 0,87$$

$$d' = 3,2 \text{ mm}$$

$$n_{\text{nach Kugelmühle}} = 0,93$$

$$d' = 0,37 \text{ mm}$$

$$n_{\text{DLM 4. DG (2500 U)}} = 1,23$$

$$d' = 0,048 \text{ mm}$$



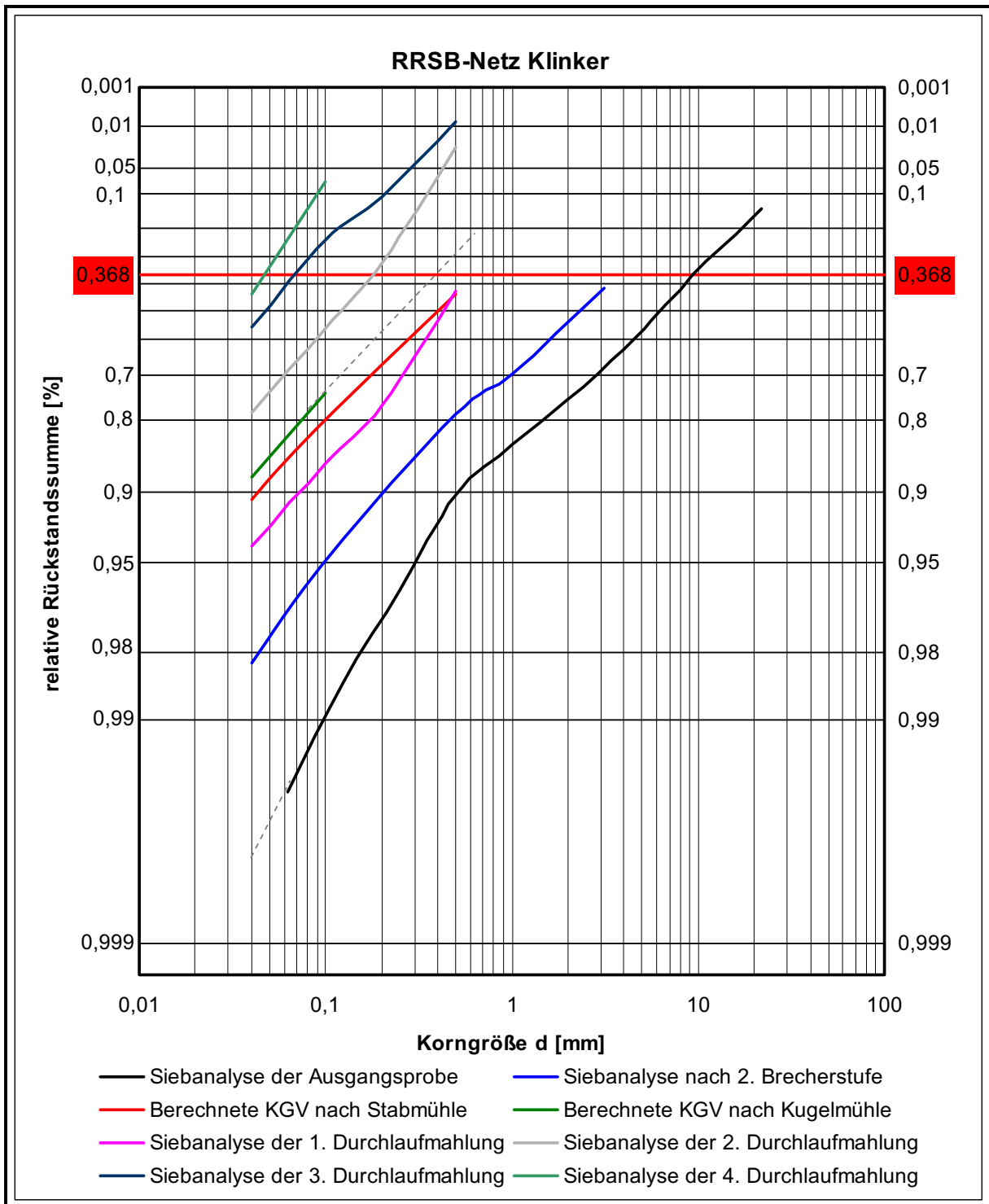


Abbildung 14 Klinker - RRSB Netz

## Kreislaufmahlung

Ein nicht übliches Ergebnis ist, dass im GGS-Netz der Kreislaufmahlung die Korngrößenverteilung des Produktes aus der Kugelmühle gröber als das Produkt der Stabmühle ist. Eine mögliche Erklärung ist in der Krümmung und der damit verbundenen korngrößenabhängigen Festigkeit zu suchen. So werden wahrscheinlich Körner mit einer bestimmten Phase und einer geringeren Festigkeit in der Stabmühle zerkleinert und Körner mit höherer Festigkeit auf die Kugelmühle aufgegeben. In den korngrößenoptimierten Verhältnissen der Kugelmühle werden dadurch vorwiegend jene Körner mit schwererer Mahlbarkeit zerkleinert. Diese liefern einen geringeren Anteil an Feinkorn als jene in der Stabmühle. Ein ähnliches Verhalten ist in der Durchlaufmahlung bei Korngrößen  $< 40 \mu\text{m}$  erkennbar (siehe Durchlaufmahlung Klinker).

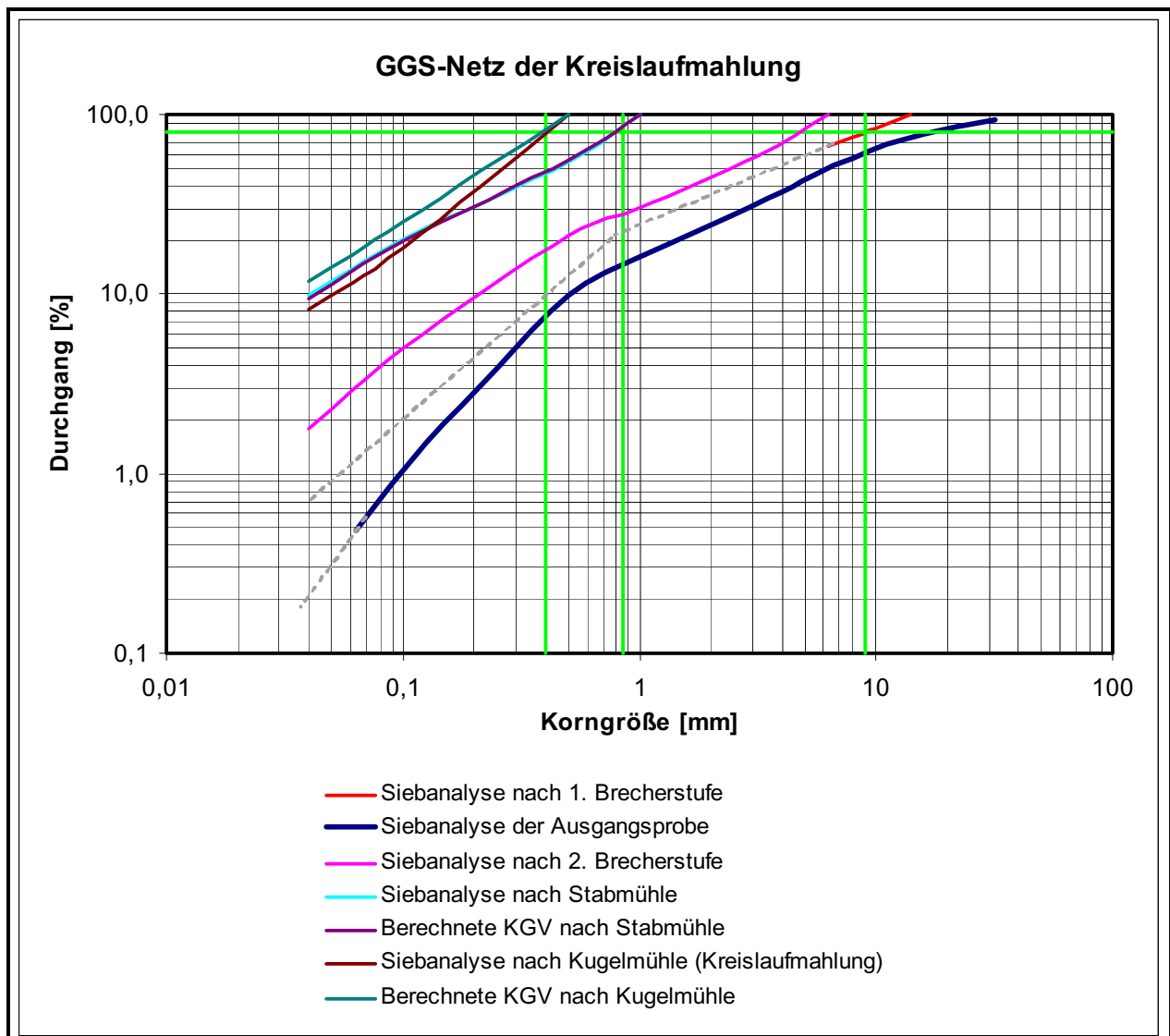


Abbildung 15 Klinker - Korngrößenverteilung der Kreislaufmahlung

## Durchlaufmahlung

Für die Durchlaufmahlung wurden 4 Zyklen mit 300, +700, +1000 und +500 Umdrehungen angesetzt. Für den dritten Durchgang wurde nur eine Durchschnittsprobe (Probenteilung mit Riffelteiler) genommen und die Korngrößenverteilung mit Hilfe der benachbarten Korngrößenverteilungen und dem gemessenen Blainewert ( $< 40 \mu\text{m}$ ) ermittelt.

Eine Eigenheit des Klinkers konnte auch bei der Oberflächenentwicklung der vier Durchgänge der Durchlaufmahlung beobachtet werden. So konnte nach insgesamt 2500 Umdrehungen nur eine sehr geringe Oberfläche von  $1736 \text{ cm}^2/\text{g}$  ermittelt werden. Um eine mögliche Agglomeration durch Feuchtigkeit und einer damit verbundenen Verringerung der spezifischen Oberfläche auszuschließen, wurde die Probe  $< 40 \mu\text{m}$  mikroskopisch untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass es sich um keine Agglomeration handelt. Jedoch wurde ein ungewöhnlich geringer Anteil an Feinstkorn (Grenze ca.  $30 \mu\text{m}$ ) entdeckt. Dies ist vermutlich wieder auf eine korngrößenabhängige Festigkeit zurückzuführen.

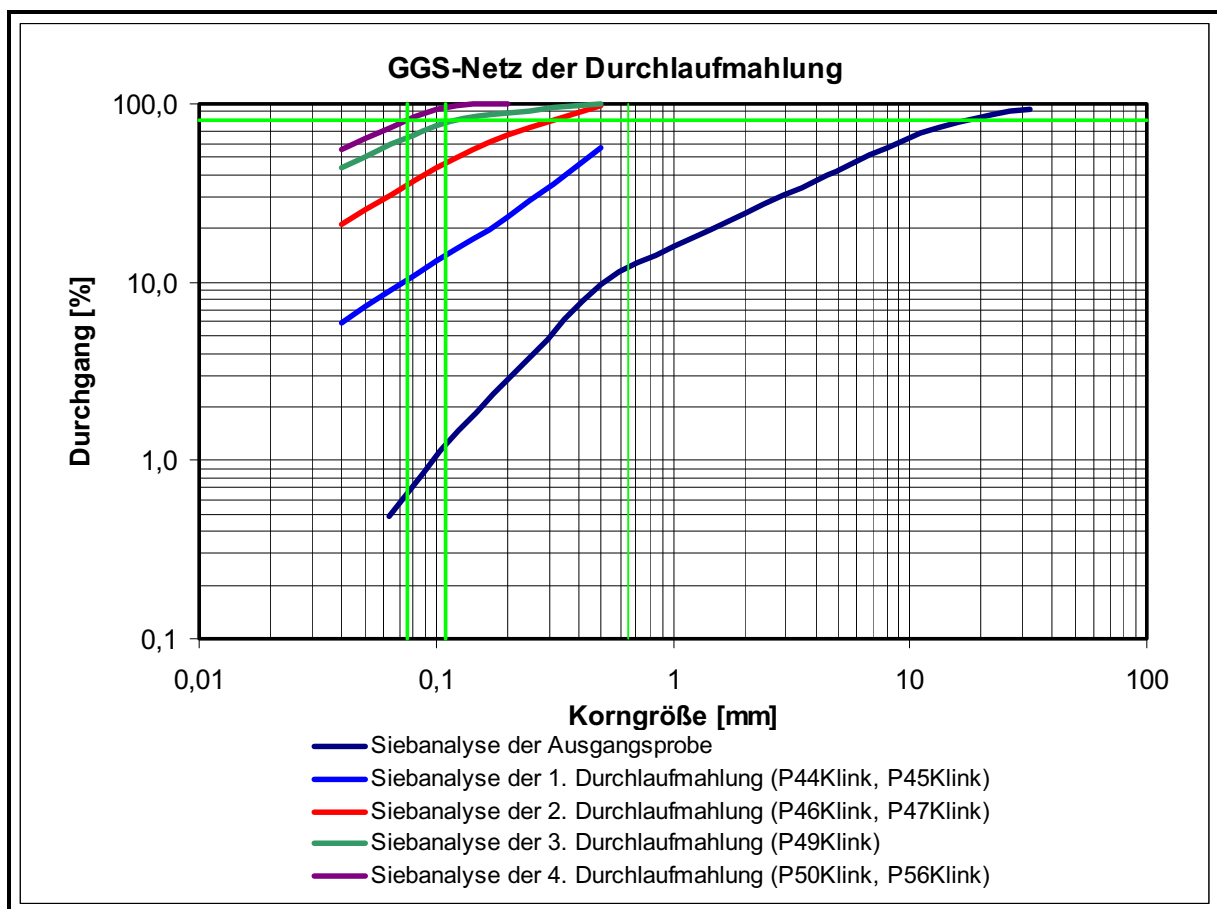


Abbildung 16 Klinker - Korngrößenverteilung der Durchlaufmahlung

Probenbezeichnung	Korngröße [µm]	Analyse 1	Analyse 2	Analyse 3	Analyse 4	Beschreibung
		Luftstrahlsiebung	Geo-Pyknometer	Blaine-Messung	He-Pyknometer	
			Dichte g/cm <sup>3</sup>	Oberfläche cm <sup>2</sup> /g	Dichte g/cm <sup>3</sup>	
P11Klink	>6300		2,8914			nach 2. Brecherstufe - Stichprobe
P11Klink 1. Probe	>6300				3,12	nach 2. Brecherstufe
P11Klink 2. Probe	>6300				3,09	nach 2. Brecherstufe
P13Klink	6300/3150		2,7278			Aufgabe Stabmühle - Stichprobe
P13Klink	6300/3150		2,6355			Aufgabe Stabmühle - ungebrochene Körner
P13Klink	6300/3150		2,8573			Aufgabe Stabmühle - gebrochene Körner
P13Klink 1. Probe	6300/3150				3,16	Aufgabe Stabmühle
P13Klink 2. Probe	6300/3150				3,16	Aufgabe Stabmühle
P14Klink	3150/1000		2,3922			Aufgabe Stabmühle - Stichprobe
P14Klink 1. Probe	3150/1000				3,18	Aufgabe Stabmühle
P14Klink 2. Probe	3150/1000				3,18	Aufgabe Stabmühle
P15Klink	1000/500				3,22	2. Brecherstufe Aufgabe auf Kugelmühle
P16Klink	500/100				3,25	2. Brecherstufe
P17Klink	100/40	Luftstrahlsiebung		437	3,22	2. Brecherstufe
P18Klink	<40			1539	3,21	2. Brecherstufe
P22Klink	100/40	Luftstrahlsiebung		434		KGV Stabmühle 9. Zyklus (Kreislaufmahlung)
P23Klink	<40			2122		KGV Stabmühle 9. Zyklus (Kreislaufmahlung)
P33Klink	<40			2327	3,25	KGV Kugelmühle 6. Zyklus (Kreislaufmahlung)
P34Klink	100/40	Luftstrahlsiebung		427	3,21	KGV Kugelmühle 6. Zyklus (Kreislaufmahlung)
P35Klink	500/100				3,21	KGV Kugelmühle 6. Zyklus (Kreislaufmahlung)
P36Klink	1000/500				3,21	KGV Kugelmühle 6. Zyklus (Kreislaufmahlung)
P44Klink	100/40	Luftstrahlsiebung		457	3,18	DLM 1.DG (300 U)
P45Klink	<40			2183		DLM 1.DG (300 U)
P47Klink	<40			2468		DLM 2.DG (700 U)
P49Klink	<40			2717		DLM 3.DG (1000 U)
P50Klink	100/40	Luftstrahlsiebung		431	3,19	DLM 4.DG (500 U)
P56Klink	<40			2811		DLM 4.DG (500 U)

Abbildung 17 Klinker - Analysenverzeichnis

### Geo-Pyknometersversuche

Alle Pyknometersversuche sind in Abbildung 17 aufgelistet. Bei den Materialien „nach 2. Brecherstufe“ und „Aufgabe Stabmühle“ handelt es sich um dasselbe Ausgangsprodukt. Gebrochene Körner weisen eine höhere „Geo-Dichte“ als ungebrochene Körner auf, was den Schluss zulässt, dass Körner und Kornteile mit einem größeren Porenteil leichter brechen.

Die Dichte des Helium-Pyknometers nimmt mit sinkender Korngröße zu, wodurch eine Erhöhung des Aufschlusses, der Poren angenommen werden kann.

Die Dichte des Geo-Pyknometers nimmt mit sinkender Korngröße ab.

Klinker weist sowohl geschlossene, oberflächengängige, Mikro- und Grobporen und unterschiedliche Phasenzusammensetzungen, welche bei der Zerkleinerung eine Korngrößenabhängigkeit besitzen auf. Es ist dadurch eine Abschätzung des Porenanteils und der Porenhäufigkeit und der direkt proportionalen Dichte schwierig. Aus einigen schlüssigen Messergebnissen können Annahmen getroffen werden, diese sind jedoch nicht dem gesamten komplexen System zuzuordnen. Um genauere Aussagen treffen zu können würden weitere Messungen, wie zum Beispiel mit einem Hg-Pyknometer notwendig sein.

### Spezifischer Energieeintrag

In Abbildung 18 ist die Kreislaufmahlung (Blau) und die Durchlaufmahlung (Magenta) dargestellt. Es ist eine gute Korrelation der Kreislaufmahlung und der Durchlaufmahlung erkennbar. Die etwas unterschiedliche Steigung der Kreislaufmahlung, genauer gesagt der ersten beiden Datenpunkte (Oberfläche nach zweiter Brecherstufe und Oberfläche nach Stabmühle) und der Durchlaufmahlung ist auf die Korngrößenabhängige Festigkeit zurückzuführen. So ist der spröde Klinker in der Kornfraktion 6,3/3,15 mm in der Stabmühle leichter zu zerkleinern als in der Kugelmühle (Kornfraktion 1/0,5 mm). Dadurch wird in der Stabmühle ein höherer Rittingerkoeffizient (34,7 cm<sup>2</sup>/J) erreicht. Der durchschnittliche Rittingerkoeffizient der mittleren Kornklassen aus Kreislaufmahlung und Durchlaufmahlung wird mit 25 cm<sup>2</sup>/J angenommen. Da es bei der Durchlaufmahlung zu keinem degressiven Anstieg der Oberflächenentwicklung kommt, kann darauf geschlossen werden, dass die Mahlkörper nicht verpolstern.

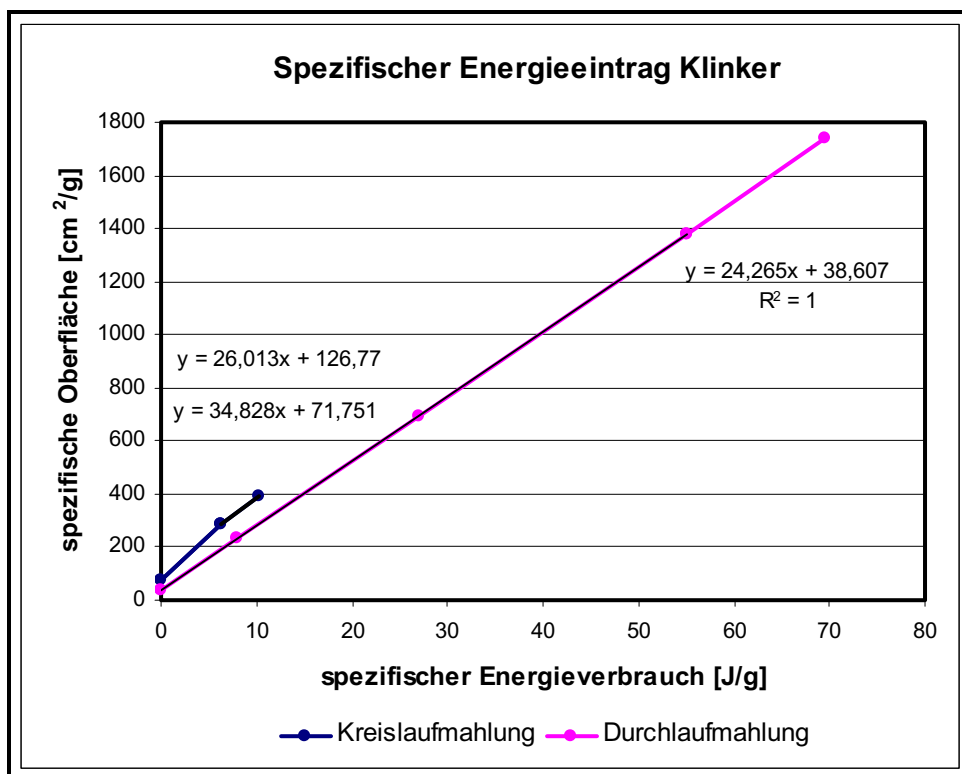


Abbildung 18 Klinker - Energieeintrag

Eine konstante Umlaufende Last von 100 % wurde an der Stabmühle mit 173 Umdrehungen erreicht. Die OZK-Stufe der Kugelmühle befindet sich in der Gleichgewichtseinstellung (UL= 250 %) bei 90 Umdrehungen.

Klinker			
Umdrehungen	$a_{\text{Spezifisch}}$	$\Sigma e$	Beschreibung
[1]	[cm <sup>2</sup> /g]	[J/g]	
<b>Kreislaufmahlung</b>			
	71,75		Ausgangsprobe KLM
173	289,12	6,24	nach Stabmühle
90	393,30	10,25	nach Kugelmühle
<b>Durchlaufmahlung</b>			
0	39,44	0	Ausgangsprobe DLM
+300	230,97	7,96	KM 1. Durchgang
+700	695,62	27,09	KM 2. Durchgang
+1000	1375,69	55,09	KM 3. Durchgang
+500	1736,44	69,48	KM 4. Durchgang

**Tabelle 6** Klinker - Energieeintrag

## (b) Hochofenschlacke / Hüttensand

### (i) Allgemein

Hochofenschlacke wird weltweit für die Herstellung von Portlandhütten- und Hochofenzementen verwendet. Nach der Kühlung bzw. Granulation mit Wasser, Dampf oder Luft erstarrt die schmelzflüssige Schlacke meistens zu Partikeln mit einer Korngröße kleiner 4 mm.

Hüttensand weist im zementtypischen Feinheitsbereich einen höheren Mahlwidstand als andere Zementzumahlstoffe auf. Dadurch ist die für eine wünschenswerte hohe Anfangsfestigkeit zu erreichende hohe spezifische Oberfläche besonders energieintensiv. Siehe Abbildung 19.

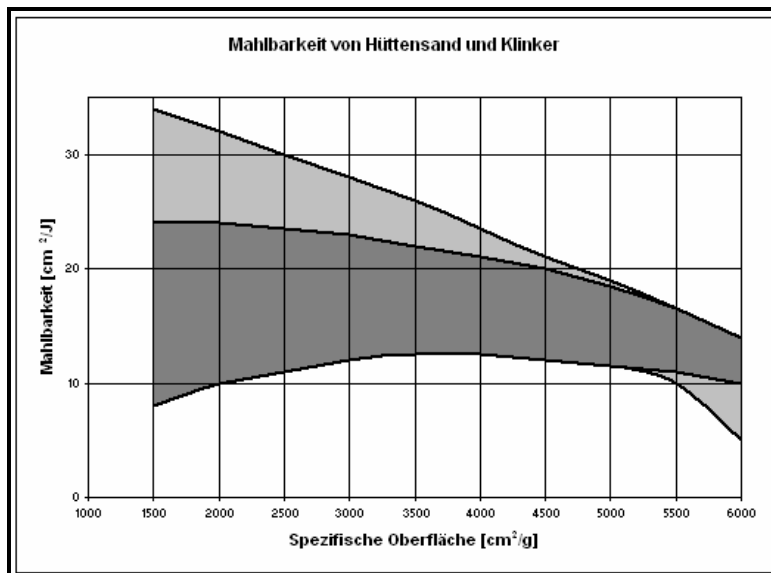
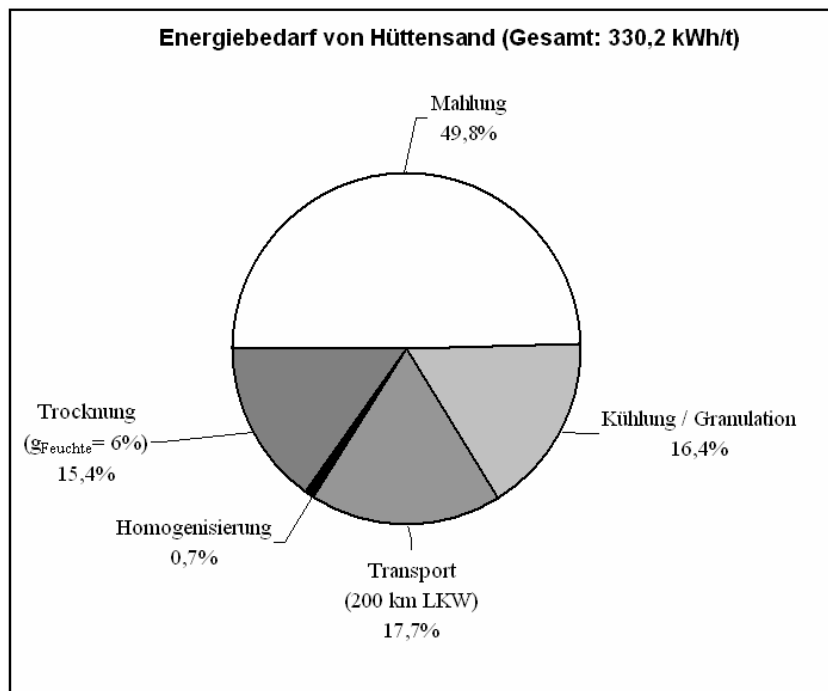


Abbildung 19 Spannweite der Mahlbarkeit von Hüttensand und Klinker. Quelle: [1]

Bei der Betrachtung des Energiebedarfs sind jedoch zusätzlich weitere Energiefaktoren des Rohstoffes zu beachten (Siehe Abbildung 20).



**Abbildung 20** Energiebedarf von Hüttensand. Quelle: [1]

Die Anforderungen an Hüttensande der DIN EN 197-1 beschränken sich auf eine Mindestbasizität und auf einen Mindestglasgehalt. Aus Untersuchungen im *Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken e.V. (FehS), Duisburg/Deutschland*, ist jedoch bekannt, dass erhebliche Schwankungen der chemischen und physikalischen Eigenschaften auftreten. In der Literatur wird erwähnt, dass Roheisenproduzenten ohne Beeinträchtigung der Produktion, für den Zementhersteller „günstigere“ Schlacke erzeugen könnten [7].

### **Mahlbarkeitseinflüsse der Hochofenschlacke**

In der Praxis überlagern sich die verschiedenen Einflussgrößen, was eine eindeutige Bewertung hinsichtlich Mahlbarkeit sehr erschwert. Die Untersuchungen wurden mit dem Zeiseltest durchgeführt [1].

- **Alter des Hüttensands**

Das Alter des Hüttensands hat einen wesentlichen Einfluss auf die Mahlbarkeit. So wurde festgestellt, dass 3 Jahre alte Schlacke eine um 20-30 % leichtere Mahlbarkeit als frische Schlacke aufweist. Durch Vorhydratation können jedoch innerhalb der Halde Unterschiede



auftreten. Ein sehr großer Einfluss wurde auch der Korngrößenverteilung von älteren Schlacken zugesprochen.

- **Sieblinie des ungemahlene Hüttensands**

Granulationsbedingter hoher Feinanteil führt erst ab einer bestimmten Menge zu einer Einsparung von Mahlenergie.

- **Schüttdichte**

Bei der Einteilung nach *Mußnug* ist die dichteabhängige chemische Zusammensetzung mitzubetrachten.

Schüttdichte	Mahlbarkeit
[g/cm <sup>3</sup> ]	
< 0,6	leicht
0,6 - 1,2	mittel
> 1,2	schwer

Tabelle 7 Proportionalität nach *Mußnug* zwischen Schüttdichte und Mahlbarkeit

- **Rohdichte / Porosität**

Porosität beeinflusst vor allem die Mahlbarkeit bis zu einem Bereich von 2000-4000 cm<sup>2</sup>/g. Eine Abschätzung über den Einfluss kann über die Größe der Poren getroffen werden. Die Beurteilung kann optisch erfolgen.

- **Reindichte**

Ein Zusammenhang zwischen Reindichte und Mahlbarkeit konnte nicht gefunden werden.

- **Glasgehalt**

Grundsätzlich verbessern kristalline Anteile die Mahlbarkeit.

- **Chemische Zusammensetzung**

Die chemische Zusammensetzung und die Hochofenschlackentemperatur beeinflussen sich gegenseitig und somit auch die Viskosität der Schlacke. Schlacke mit geringerer Viskosität kann bei konstanten Granulationsbedingungen feinkörniger produziert werden. Hinsichtlich

Mahlbarkeit ist eine Beurteilung des Einflusses der chemischen Zusammensetzung nur schwer möglich.

In Versuchen wurde dennoch festgestellt, dass steigende  $\text{TiO}_2$  Gehalte zu poröseren Kornstrukturen und damit zu einer besseren Mahlbarkeit führen.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  hat nicht nur positive Auswirkungen auf die Frühfestigkeit des Zements, sondern auch auf die Mahlbarkeit der HOS.

- **Granulationsverfahren**

Durch unterschiedliche Granulationsverfahren werden erhebliche Unterschiede bezüglich Kornhabitus und der Korngrößenverteilung erzeugt. Signifikante Unterschiede können dabei vor allem beim Glasgehalt durch die Auskristallisation entstehen.

- **Granulationsbedingungen**

Schlacke-Wasser-Verhältnis, Wasserdruck und geometrische Randbedingungen können gleich wie unterschiedliche Granulationsverfahren vor allem Einfluss auf Kornhabitus und Korngrößenverteilungen haben. So erzeugen hoher Druck und große Wassermengen bei bestimmten Bedingungen sehr fein zerteilte, faserige Partikel mit einer sehr schlechten Mahlbarkeit. Unter anderen Bedingungen kann aber auch eine Art Hüttenbims entstehen. Zu beachten ist das Wasseraufnahmeverhalten der verschiedenen produzierten Stoffe und der damit verbundene Wassergehalt.

## **(ii) Versuchsbeschreibung**

Vor der Bestimmung der Ausgangskorngrößenverteilung wurde die Feuchte mit 4,12 % ermittelt. Es ist hierbei zu beachten, dass durch die Lagerungszeit ein geringfügig höherer Anteil an Feuchte im frischen Ausgangsprodukt anzunehmen ist. Für die Mahlbarkeitsprüfung wurde eine Stabmühlen-OZK-Stufe (Fraktion 3,15/1 mm) und eine OZK-Stufe an der Kugelmühle (Fraktion 1/0,5 mm) gewählt. Weiters wurde der Versuch der Durchlaufmahlung an der Kugelmühle durchgeführt (Fraktion 1/0,5 mm). Zur Feststellung möglicher Porositäten wurden auch Messungen am Geo-Pyknometer durchgeführt. Alle Massenströme wurden im richtigen Verhältnis zusammengeführt. Die Mahlbarkeitsprüfung wurde mit dem getrockneten Material durchgeführt.

### (iii) Mahlbarkeitsuntersuchung

Im Ausgangsmaterial liegt der Hauptbestandteil (ca. 65 %) in der Kornklasse 2/0,5 mm vor. Im Gegensatz zu Klinker kann bereits für das Ausgangsmaterial eine gute Linearisierung im GGS-Netz erkannt werden.

#### Kreislaufmahlung

Durch den geringen Anteil an Feinstkorn im Ausgangsrohstoff ist der Unterschied zwischen der berechneten Korngrößenverteilung und der Siebanalyse direkt nach der Stabmühle erheblich. Eine starke Verringerung des Unterschiedes kann jedoch bereits nach einer weiteren OZK-Stufe (Kugelmühle Fraktion 1/0,5 mm) beobachtet werden.

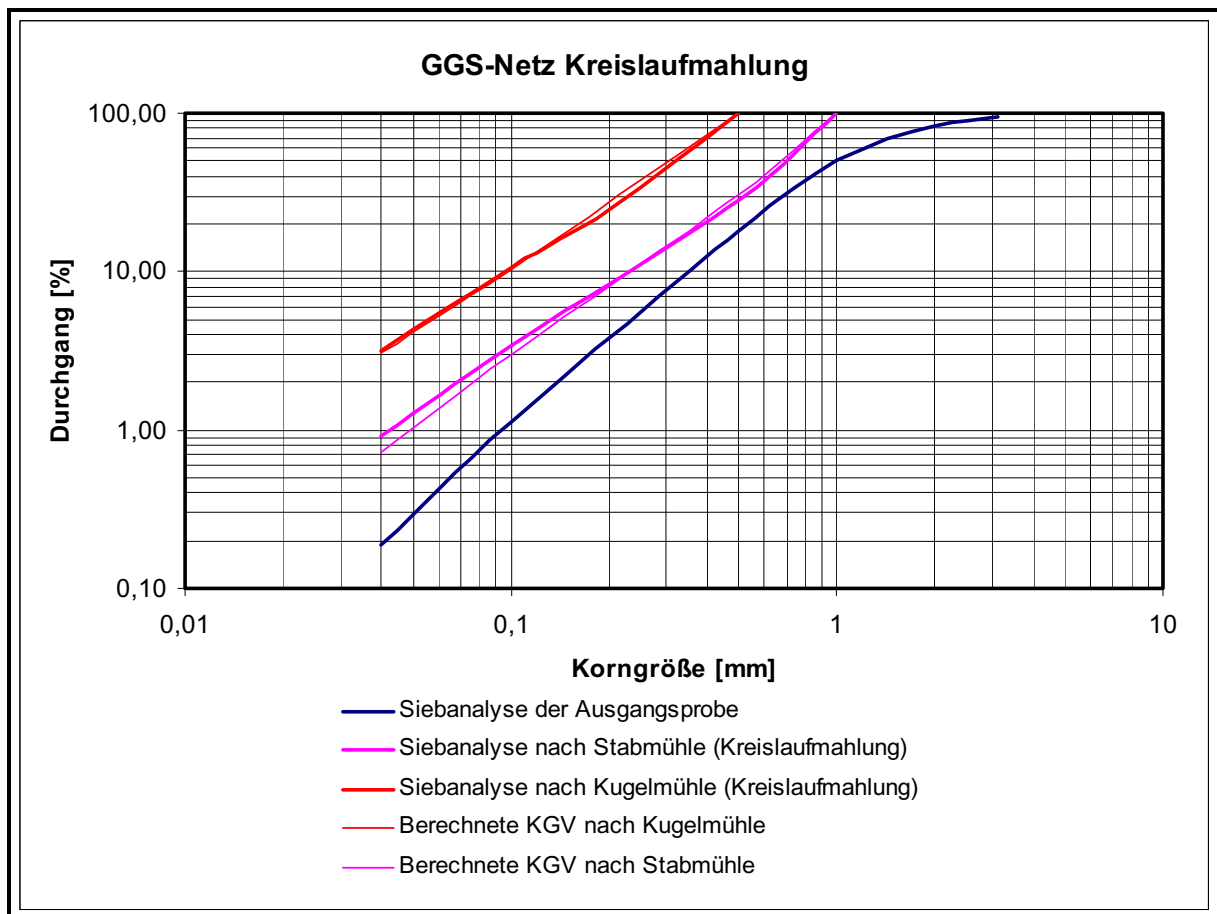


Abbildung 21 HOS - GGS-Netz der Kreislaufmahlung

$$n_{\text{GGS Ausgangsprobe}} (500/100 \mu\text{m}) = 1,72$$

$$k_{80} = 1,19 \text{ mm}$$

$$n_{\text{GGS nach Stabmühle}} (100/40 \mu\text{m}) = 1,55$$

$$k_{80} = 0,98 \text{ mm}$$

$$n_{\text{GGS nach Kugelmühle}} (100/40 \mu\text{m}) = 1,33$$

$$k_{80} = 0,5 \text{ mm}$$

## Durchlaufmahlung

Die Zyklen der Durchlaufmahlung wurden mit 300, +500, +500, +700, +700 und +700 Umdrehungen durchgeführt. Es wurden 6 Zyklen durchgeführt, da für die einzelnen Zyklen nur sehr geringe Oberflächenzuwächse erzielt werden konnten. Die ermittelte Oberfläche nach dem 6. Zyklus beträgt  $1187,45 \text{ cm}^2/\text{g}$  bei einem  $k_{80}$ -Wert von  $100 \text{ }\mu\text{m}$ . Sowohl im GGS-Netz wie auch im RRSB-Netz ist eine gleichmäßige Linearisierung erkennbar. Im Gegensatz zu Mergel, Kalkstein und Gips kann bei Hochofenschlacke und Klinker ein degressiv ansteigender Verlauf der Grobkornflanke im GGS-Netz beobachtet werden. Die Abflachung der Grobkornflanke ist auf Spritzkorn, welches nur in der Durchgangsmahlung entsteht, zurückzuführen. Im RRSB-Netz ist dies nicht zu erkennen.

$n_{\text{GGS}} \approx 0,92$  (linearisierter Teil des 6. Durchgangs der Durchlaufmahlung)

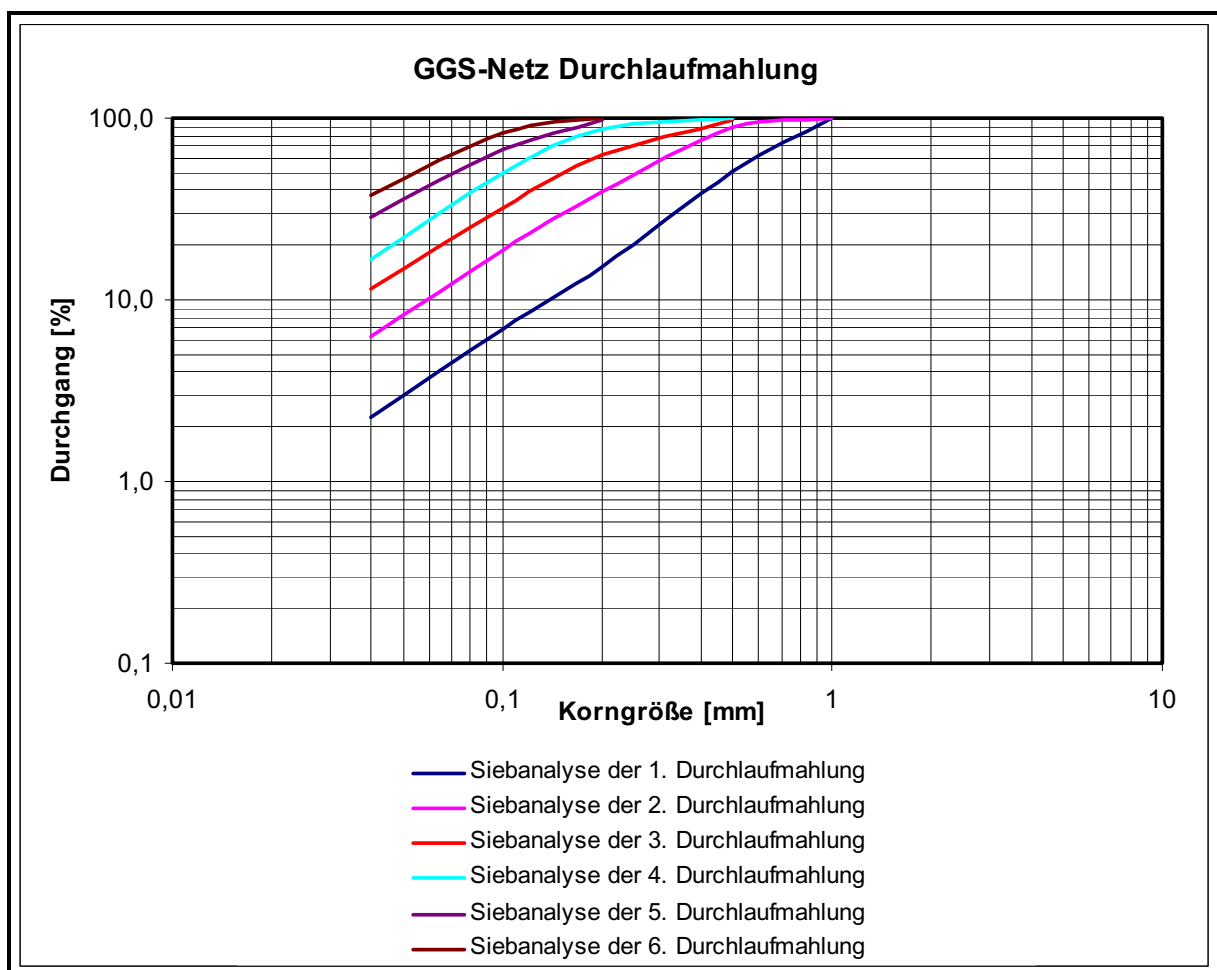


Abbildung 22 HOS - Korngrößenverteilung der Durchlaufmahlung

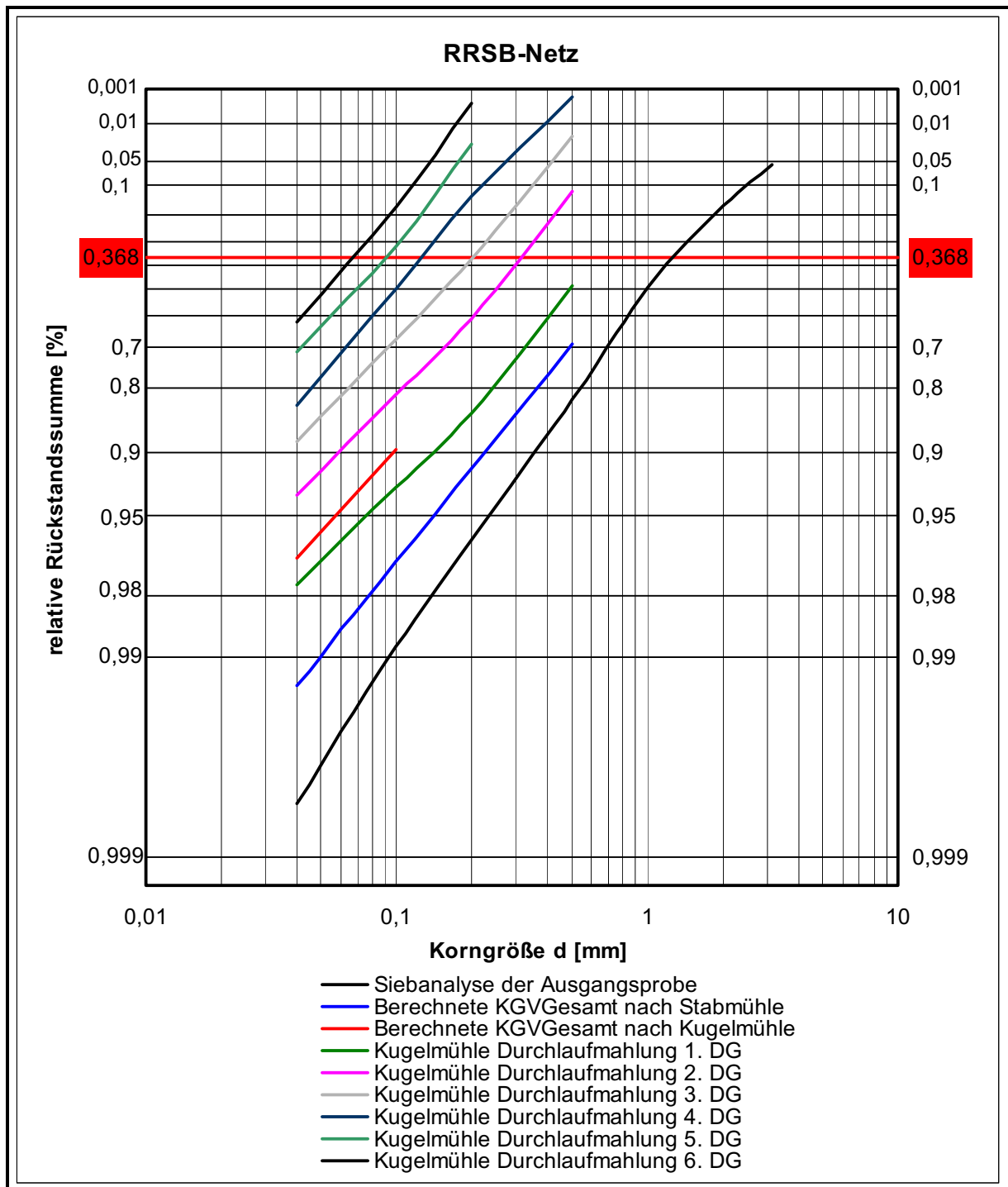


Abbildung 23 HOS - RRSB-Netz

$$n_{\text{Ausgangsprobe}} = 1,48$$

$$d' = 1,2 \text{ mm}$$

$$n_{\text{nach Stabmühle}} = 1,28$$

$$d' = 0,98 \text{ mm}$$

$$n_{\text{nach Kugelmühle}} = 1,11$$

$$d' = 0,5 \text{ mm}$$

$$n_{\text{DLM 6. DG (3400 U)}} = 1,23$$

$$d' = 0,068 \text{ mm}$$

## Geo-Pyknometerversuche

Durch die Abnahme der Dichte vom Ausgangsmaterial zu dem Material der Stabmühle (Kreislaufmahlung 3,15/1 mm), kann die Annahme getätigt werden, dass Material mit einem höheren Porenanteil in der Stabmühle zerkleinert wurde. Wie auch für Klinker kann eine Korngrößenabhängige Festigkeit angenommen werden, die jedoch nicht so stark ausgeprägt ist.

Probenbezeichnung	Korngröße	Analyse 1	Analyse 2	Analyse 3	Analyse 4	Probenbeschreibung
		Luftstrahlsiebung	Geo-Pyknometer	Blaine-Messung	He-Pyknometer	
			Dichte g/cm <sup>3</sup>	Oberfläche cm <sup>2</sup> /g	Dichte g/cm <sup>3</sup>	
P01HOS	>3150		2,712		2,82	Ausgangsmaterial
P02HOS	3150/2000		2,7675		2,86	Ausgangsmaterial
P03HOS	2000/1000		2,7293		2,89	Ausgangsmaterial
P06HOS	500/100				2,91	Ausgangsmaterial
P07HOS	100/40	Luftstrahlsiebung		901	2,96	Ausgangsmaterial
P09HOS	1000/500				2,89	STM Kreislauf
P11HOS	100/40	Luftstrahlsiebung		634	2,94	STM Kreislauf
P12HOS	<40			1869		STM Kreislauf
P17HOS	1000/500				2,89	KM Kreislauf
P20HOS	100/40	Luftstrahlsiebung		625	2,93	KM Kreislauf
P21HOS	<40			2048		KM Kreislauf
P22HOS	<40			2224		Ausgangsmaterial
P23HOS	3150/1000		2,673		2,87	STM Kreislauf
P30HOS	1000/500				2,90	KM 3. DG
P33HOS	100/40	Luftstrahlsiebung		459	2,92	KM 3. DG
P34HOS	<40			2349		KM 3. DG
P37HOS	100/40	Luftstrahlsiebung		585	2,92	KM 1. DG
P38HOS	<40			2118		KM 1. DG
P39HOS	100/40	Luftstrahlsiebung		584	2,92	KM 2. DG
P40HOS	<40			2309		KM 2. DG
P41HOS	<40			2219		KM 4. DG
P42HOS	100/40	Luftstrahlsiebung		477		KM 4. DG
P43HOS	<40			2373		KM 5. DG
P44HOS	100/40	Luftstrahlsiebung		471		KM 5. DG
P45HOS	<40			2522		KM 6. DG
P46HOS	100/40	Luftstrahlsiebung		435		KM 6. DG

**Tabelle 8** HOS Analyseverzeichnis

## Spezifischer Energieeintrag

Die Differenz der OZK-Stufen der Kreislaufmahlung ist wie auch für Klinker auf die Sprödigkeit zurückzuführen. Eine Korngrößenabhängige Mahlbarkeit kann erkannt werden. Die Kornklasse 6,3/1 mm der OZK-Stufe der Stabmühle weist eine geringere Mahlbarkeit als die der Kugelmühle auf. Auch muss die selektive Zerkleinerung bedacht werden. Körner, die einen geringeren Zerkleinerungswiderstand aufweisen, werden in der Stabmühle vorrangig zerkleinert.

Die Durchlaufmahlung wurde in zwei Abschnitten durchgeführt. Dazwischen wurde die Mühle entleert und mit Quarzsand ausgemahlen. Dadurch kann die Zunahme des Energieverbrauchs aufgrund von Verklebung bzw. Verpolsterung der Mahlkörper beobachtet werden (Durchlaufmahlung Magentalinie). Die Steigung ist vor und nach der Reinigung fast gleich (Ausmahlung bei ca. 57 J/g). Hochofenschlacke weist mit 12,6 cm<sup>2</sup>/J einen um die Hälfte kleineren Rittingerkoeffizienten auf (Durchlaufmahlung Fraktion 1/0,5 mm) als Klinker (R = 24,3 cm<sup>2</sup>/J).

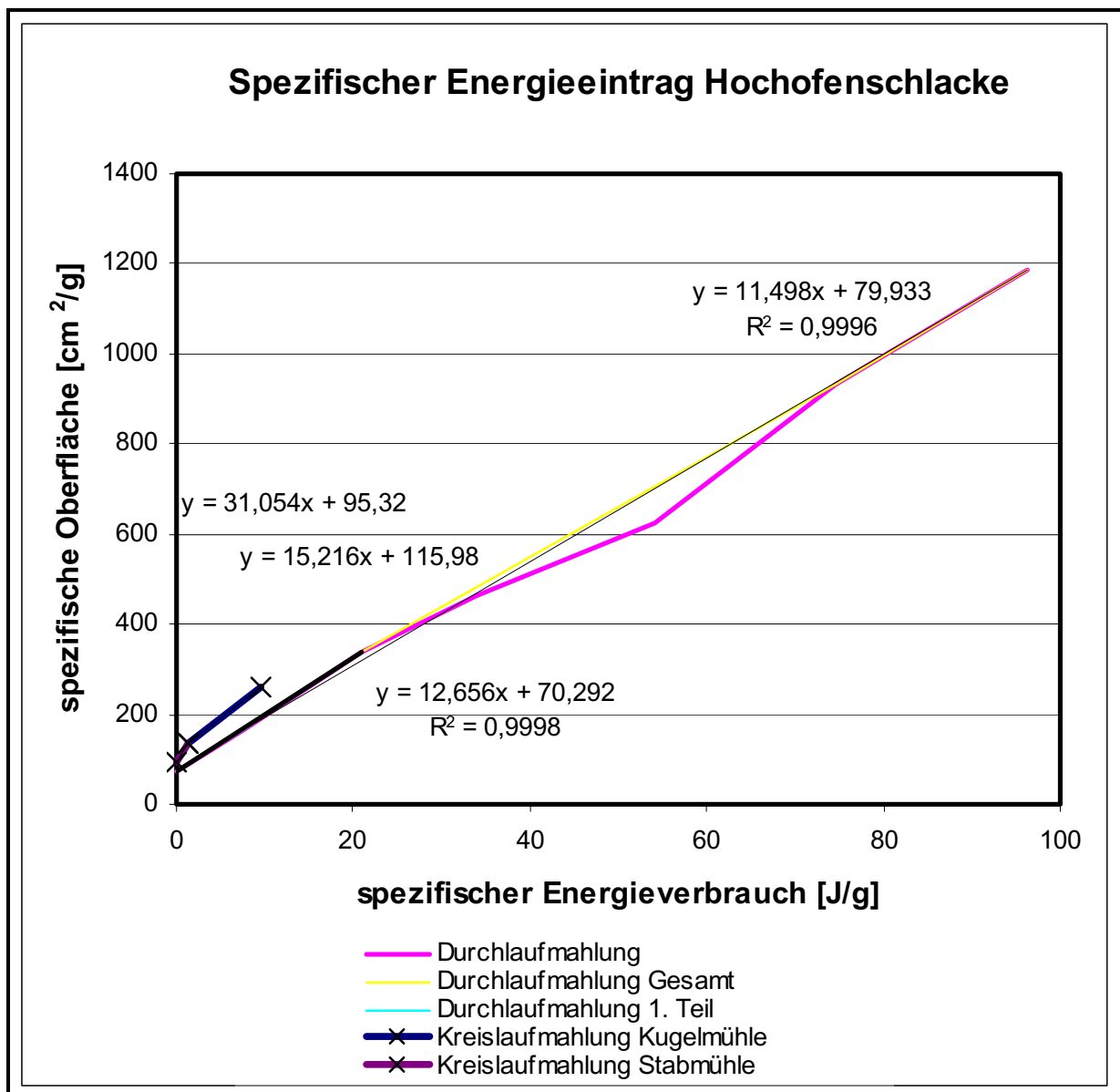


Abbildung 24 HOS - Energieeintrag

Wie bei Klinker konnte ein sehr geringer Feinstkornanteil bei einer optischen Beurteilung festgestellt werden. Dadurch lässt sich auch der geringe Oberflächenzuwachs, der mittels Blainemessgerät ermittelt wurde, erklären.

Bei dem Vergleich der Kreislaufmahlungen zwischen Klinker und HOS sind große Unterschiede bezüglich Oberflächenentwicklung und Energieaufwand zu erkennen. Für Klinker muss mehr Energie aufgewendet werden um die einzelnen OZK-Stufen zu überwinden, da das Ausgangsmaterial erheblich gröber als das der Hochofenschlacke ist. Der direkte Vergleich der Stabmühlen-OZK-Stufe lässt den Schluss zu, dass es sich bei Klinker um ein weniger sprödes Material handelt und dadurch höhere Energie aufgewendet werden muss. Wahrscheinlich haben auch die unterschiedlichen Aufgabekornklassen für die Stabmühle durch die Beeinflussung der optimierten Bedingungen eine energetische Auswirkung (Klinker: Kornklasse 6,3/1 mm; HOS: 3,15/1 mm).

Bei dem Vergleich der Durchlaufmahlung (beide Fraktionen 1/0,5 mm) in der Kugelmühle ist die Energieaufnahme annähernd gleich. Dabei kann jedoch für Hochofenschlacke nur ca. die Hälfte der Oberfläche erzeugt werden (2000 U Klinker: 1736 cm<sup>2</sup>/g; 2000 U HOS: 622 cm<sup>2</sup>/g).

Klinker				Hochofenschlacke			
Umdrehungen	a <sub>Spezifisch</sub>	Σe	Beschreibung	Umdrehungen	a <sub>Spezifisch</sub>	Σe	Beschreibung
[1]	[cm <sup>2</sup> /g]	[J/g]		[1]	[cm <sup>2</sup> /g]	[J/g]	
<b>Kreislaufmahlung</b>				<b>Kreislaufmahlung</b>			
	71,75		Ausgangsprobe KLM		95,32	0	Ausgangsprobe KLM
173	289,12	6,24	nach Stabmühle	51	135,82	1,30	nach Stabmühle
90	393,30	10,25	nach Kugelmühle	127	262,60	9,64	nach Kugelmühle
<b>Durchlaufmahlung</b>				<b>Durchlaufmahlung</b>			
0	39,44	0	Ausgangsprobe DLM	0	71,49	0	Ausgangsprobe DLM
+300	230,97	7,96	KM 1. Durchgang	+300	165,66	7,68	KM 1. Durchgang
+700	695,62	27,09	KM 2. Durchgang	+500	336,67	20,99	KM 2. Durchgang
+1000	1375,69	55,09	KM 3. Durchgang	+500	461,72	33,99	KM 3. Durchgang
+500	1736,44	69,48	KM 4. Durchgang	+700	622,13	54,04	KM 4. Durchgang
				+700	931,88	74,55	KM 5. Durchgang
				+700	1187,45	96,25	KM 6. Durchgang

**Tabelle 9** HOS - Klinker Energieeintrag



## (c) Gips / Anhydritgemisch

### (i) Allgemein

#### Mineralogie Anhydrit, $\text{CaSO}_4$

Kristalle sind nicht häufig und das Vorkommen ist fast immer derb, fein- bis grobkörnig oder spätig bzw. gesteinsbildend. Anhydrit weist je nach Kristallform bzw. Spaltfläche bis zu 3 unterschiedliche Spaltbarkeiten von sehr vollkommen bis deutlich auf. Auch der Glanz kann je nach Spaltfläche von Perlmuttglanz bzw. Glasglanz, durchsichtig bis durchscheinend wechseln. Das Mineral kann Farben von farblos bis trüb-weiß, bläulich, grau und rötlich annehmen. Die Dichte wird mit  $2,9 \text{ cm}^2/\text{g}$  und Mohs-Härte von 3-3,5 angegeben. Unter Einfluss von Verwitterung wandelt sich Anhydrit unter Wasseraufnahme mit einer Volumenzunahme von 60 % langsam in Gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$ ) um. Neben der Herstellung von Schwefelsäure findet Anhydrit als Zusatz zu Baustoffen Anwendung. [9]

#### Mineralogie Gips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$

Oft werden große monokline Kristalle, nicht ganz so oft prismatische (seltener nadelförmige) Prismen gebildet. Derbe Massen von Gips sind feinkörnig bis spätig. Gips ist lokal ein wichtiges gesteinsbildendes Mineral. Rein weißer, feinkörniger Gips wird als Alabaster bezeichnet. Die Spaltbarkeit wird mit sehr vollkommener bzw. deutlicher und fasriger Spaltbarkeit angegeben. Die Mohs-Härte beträgt 2 und die Dichte  $2,3 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Gips kann farblos, häufig gelblich, rötlich, durch Bitumeneinschlüsse grau bis braun gefärbt, durchsichtig bis durchscheinend auftreten.

Bei Erhitzen auf  $120\text{-}130 \text{ }^\circ\text{C}$  verliert Gips den größten Teil seines Kristallwassers und geht dabei in ein Halbhydrat ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{ H}_2\text{O}$ ) über. Das Halbhydrat findet als Modell- oder Stuckgips sowie zur Fertigung von Gipsplatten technische Verwendung. Wird es mit Wasser verrührt, so erhärtet und rekristallisiert der Brei in kurzer Zeit unter Bildung von Gips. Durch stärkeres Erhitzen des Rohgipses über  $190 \text{ }^\circ\text{C}$  wird das gesamte Wasser abgegeben und der Gips „tot gebrannt“. Hierbei wird eine metastabile Modifikation von Anhydrit, dem  $\gamma\text{-CaSO}_4$ , bei noch höheren Temperaturen daneben das  $\beta\text{-CaSO}_4$  erzeugt. Diese Modifikationen verlieren die Fähigkeit, das Wasser rasch zu binden. Die Wasseraufnahme vollzieht sich erst nach Tagen (Verwendung als Estrich und Mörtelgips). [9]

## **(ii) Versuchsbeschreibung**

Die Probengesamtmasse von ca. 240 kg wurde im Betrieb halbiert und eine Teilprobe mit Hilfe eines Backenbrechers zerkleinert. Die zerkleinerte Probe wurde anschließend mit einem Riffelteiler geteilt. Die Zerkleinerung vor der Probenteilung war durch das Größtkorn von über 80 mm notwendig. Die zweite Teilprobe diente zur Ermittlung der Ausgangskorngrößenverteilung.

Für das bereits vorzerkleinerte Gemisch wurde in Leoben die Korngrößenverteilung erstellt. Die erste Zerkleinerungsstufe wurde am Backenbrecher im Kreislauf durchgeführt. Die Spaltweite betrug 6,3 mm.

Nach der Probenvorbereitung wurde die Kreislaufmahlung an der Stab- und Kugelmühle weitergeführt. Neben der Kreislaufmahlung wurden auch die Werte der Durchlaufmahlung für die Fraktion 1/0,5 mm an der Kugelmühle bestimmt.

Die Ermittlung der Kennwerte der Kreislauf- und Durchlaufmahlung wurde im Zuge einer Bachelorarbeit dieser Masterarbeit ausgegliedert.

## **(iii) Mahlbarkeitsuntersuchung**

Sowohl in der Ausgangskorngrößenverteilung wie auch in der Korngrößenverteilung nach der ersten Brecherstufe kann der typische Verlauf einer nichtlinearen Korngrößenverteilung, wie sie teilweise bei metamorphen Gesteinen auftreten, erkannt werden. Dieses Verhalten ist auf die Tatsache, dass es sich hierbei um eine Mischung handelt, zurückzuführen (siehe Abbildung 25). Es können zwei Wendepunkte der Korngrößenverteilung bei den Korngrößen von ca. 450 µm und ca. 5 mm bestimmt werden.

Die großen Unterschiede zwischen der berechneten Korngrößenverteilung und der Korngrößenverteilung der OZK-Stufe kann ebenso durch das Rohstoffgemenge erklärt werden. Der vermehrte Feinkornanteil eines Rohstoffproduktes führt erst zu einer Überschneidung der beiden Korngrößenverteilungen, wenn diese eine ausreichende Feinheit erreicht haben. In Abbildung 25 ist dieses Gleichgewicht der Feinkornanteile zu den erzeugten Feinkornanteilen bei der OZK-Stufe der Kugelmühle erreicht. Auch wird der gekrümmte Bereich erst in der OZK-Stufe der Kugelmühle linearisiert. So kann dieser und die linearisierten Bereiche der Durchlaufmahlung zur Bestimmung der natürlichen Bruchcharakteristik herangezogen werden.

$n_{\text{GGS}} \approx 0,49$  (linearisierter Teil der KGV der Durchlaufmahlung 3. Durchgang; Bereich von 67  $\mu\text{m}$  bei 70 % bis 49  $\mu\text{m}$  bei 60 % Durchgang)

$n_{\text{GGS}} \approx 0,66$  (linearisierter Teil der KGV nach der Kugelmühle; Bereich von 40  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$ )

$n_{\text{GGS}}$  Ausgangsprobe (125/40  $\mu\text{m}$ ) = 0,60

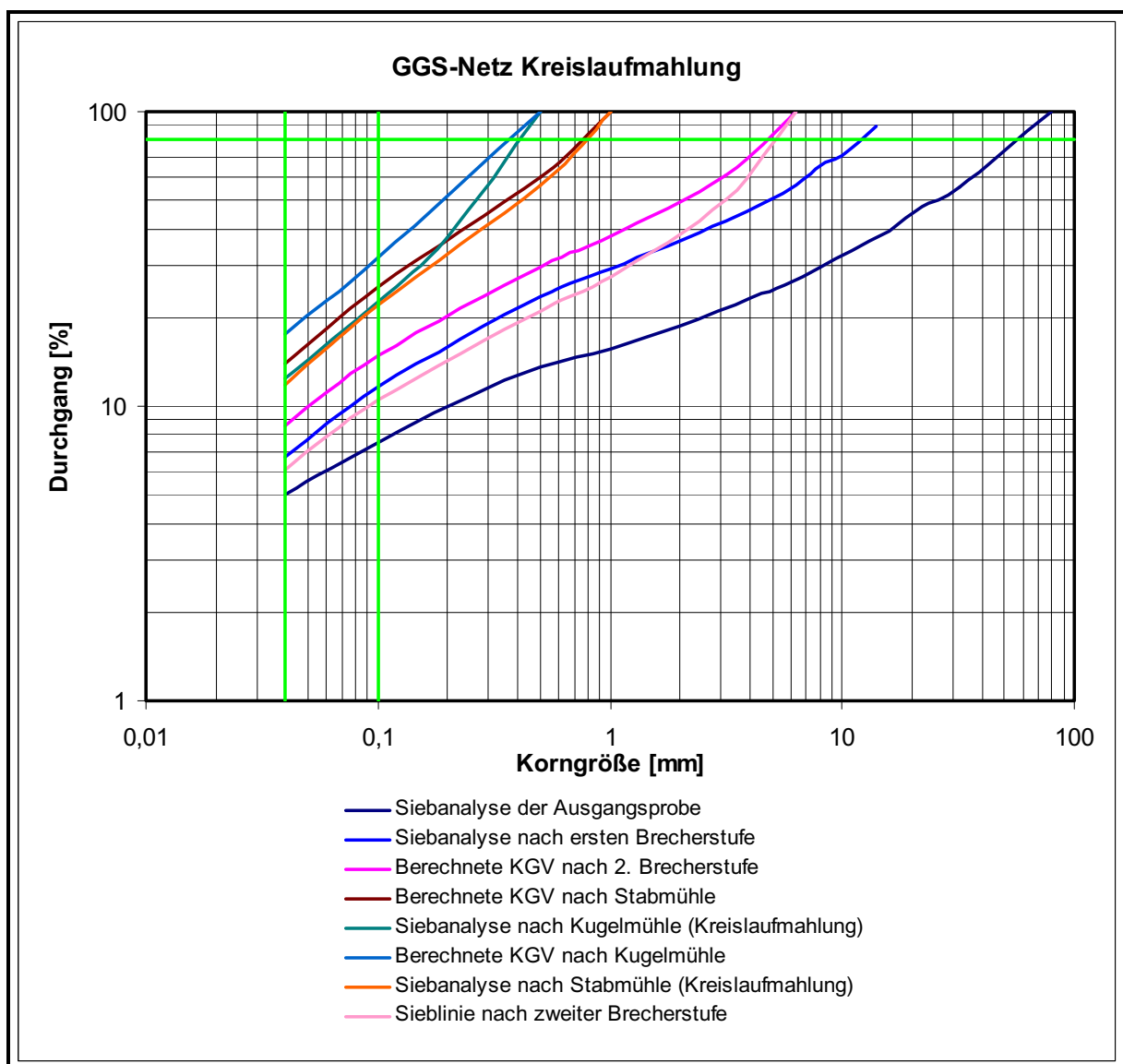
$k_{80} = 70 \text{ mm}$

$n_{\text{GGS}}$  nach Stabmühle (100/40  $\mu\text{m}$ ) = 0,66

$k_{80} = 0,9 \text{ mm}$

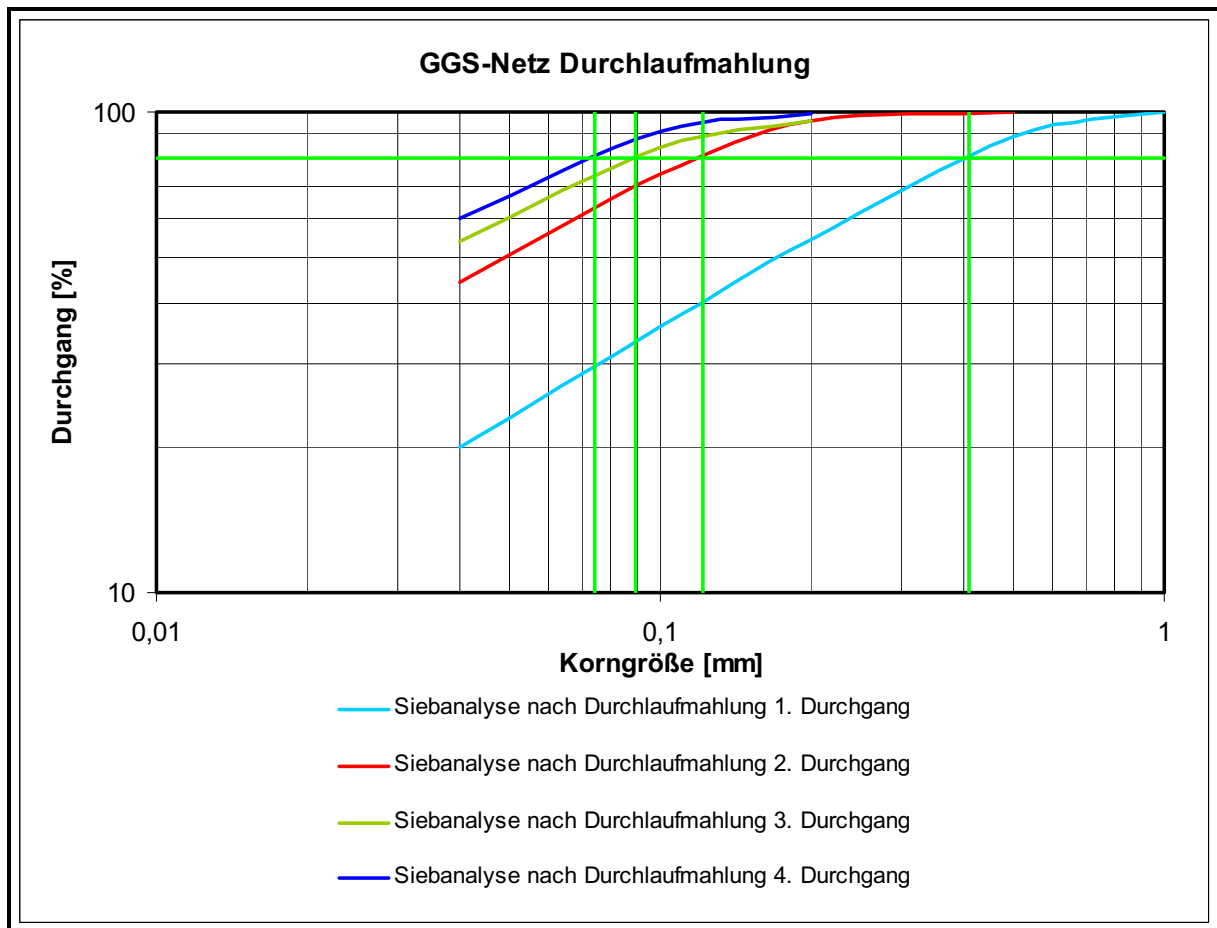
$n_{\text{GGS}}$  DLM 4.DG (2500 U) = 0,45

$k_{80} = 0,073 \text{ mm}$

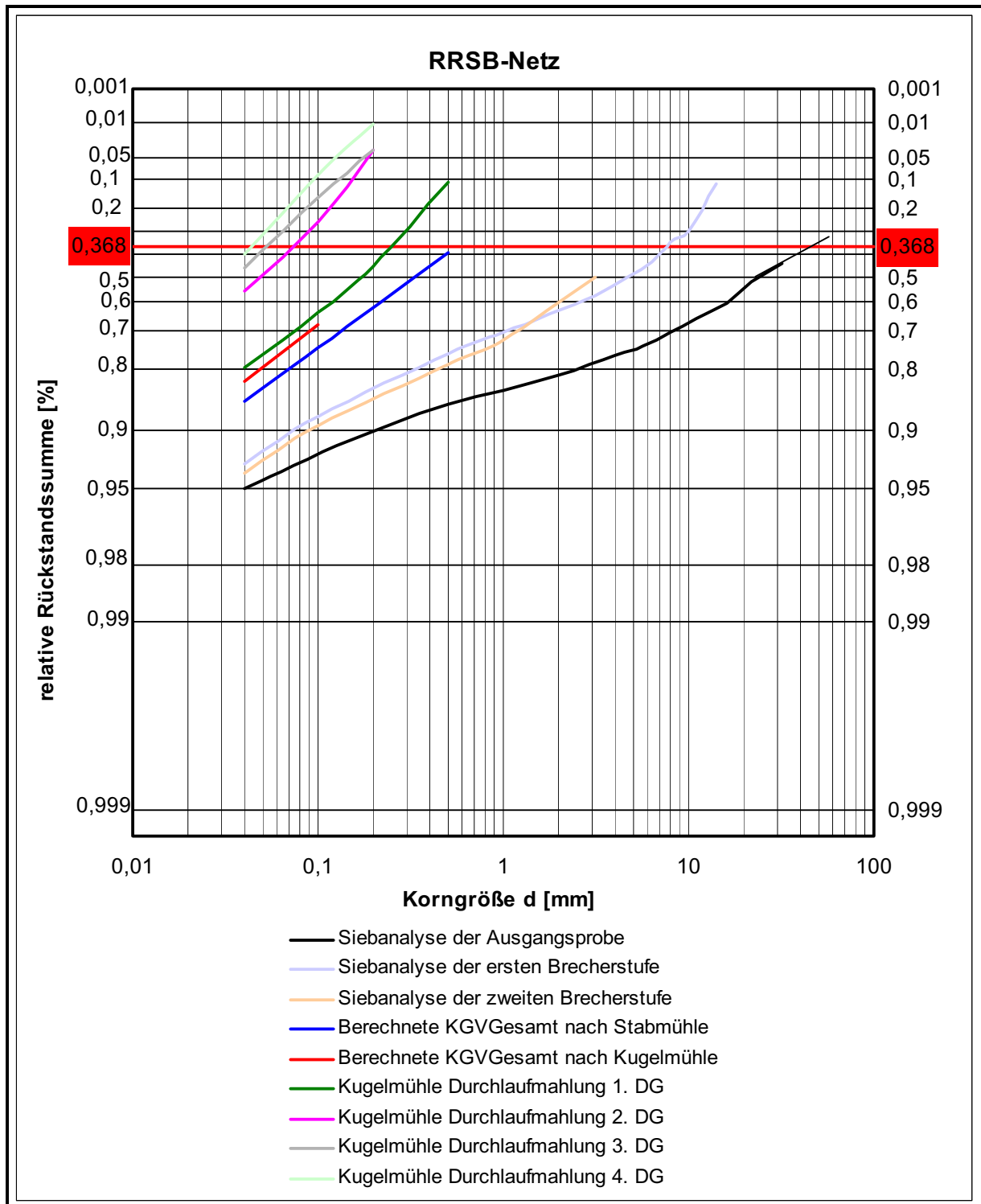


**Abbildung 25** Gips/Anhydritgemisch - GGS-Netz Kreislaufmahlung

Im GGS-Netz der Durchlaufmahlung ist der für die Durchlaufmahlung typische degressive Verlauf der Grobkornflanke zu beobachten. Zur Berechnung des Arbeitsindex nach Bond sind die Korngrößen bei 80 % Durchgang eingezeichnet (hellgrün). Die Korngrößen liegen bei 73  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$ , 122  $\mu\text{m}$  und 410  $\mu\text{m}$ . Die Auflistung aller berechneten Arbeitsindexe nach Bond erfolgt in der Rohstoffzusammenfassung.



**Abbildung 26** Gips/Anhydritgemisch - GGS-Netz Durchlaufmahlung



**Abbildung 27** Gips/Anhydritgemisch - RRSB-Netz

$$n_{\text{Ausgangsprobe}} = 0,47$$

$$d' = 70 \text{ mm}$$

$$n_{\text{nach Stabmühle}} = 0,75$$

$$d' = 0,57 \text{ mm}$$

$$n_{\text{nach Kugelmühle}} = 0,84$$

$$d' = 0,19 \text{ mm}$$

$$n_{\text{DLM 6. DG (3400 U)}} = 1,07$$

$$d' = 0,041 \text{ mm}$$

## He-Pyknometerversuche

In Tabelle 10 sind die Mohs'sche Härte (aus der Literatur) und die Dichte der beiden Ausgangsstoffe des Mineralgemenges dargestellt.

	Mohs Härteskala	Dichte
	[1]	[g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Gips</b>	2	2,3
<b>Anhydrit</b>	3,5	2,9

**Tabelle 10** Gips/Anhydritgemisch - Mohskala und Dichte

Nimmt man nun diese Werte als Anhaltspunkt und analysiert die Kornklassen 6,3/3,15 mm und 100/40 µm des Ausgangsproduktes, so kann man einen hohen Gehalt an Anhydrit in der groben Kornklasse ( $\rho_{6,3/3,15 \text{ mm}} = 2,74 \text{ g/cm}^3$ ) und in der Kornklasse 100/40 µm ( $\rho_{100/40 \text{ µm}} = 2,51 \text{ g/cm}^3$ ) einen hohen Gehalt an Gips feststellen.

In der Durchlaufmahlung findet man keine großen Dichteunterschiede womit eine Anreicherung eines der Ausgangsprodukte ausgeschlossen werden kann.

Probennummer	Korngröße	Masse [g]	Luftstrahlsieb	Blaine a <sub>m</sub> [cm <sup>2</sup> /g]	HE-Pyk	Beschreibung
	[µm]		Verlust [%]		[g/cm <sup>3</sup> ]	
P0 Gips	<40 µm	28,87		4483		KGV Brecherprodukt 2
P6 Gips	100/40	21,09		553	2,72	KGV Brecherprodukt 2
P7 Gips	6300/3150	1825			2,74	KGV Ausgangsprodukt
P11 Gips	100/40	21,15		713	2,51	KGV Ausgangsprodukt
P12 Gips	<40	27,07		3295		KGV Ausgangsprodukt
P17 Gips	100/40	25,51		609	2,78	KGV Stabmühle 7. Zyklus
P18 Gips	<40	29,26		4173		KGV Stabmühle 7. Zyklus
P27 Gips	100/40	19,05	1,52	599	2,75	KGV Kugelmühle Kreislaufmahlung 6. Zyklus
P28 Gips	100/40	14,95	5,42	514	2,72	KGV Kugelmühle Durchlaufmahlung 1 Durchgang
P29 Gips	<40	36,71		4334		KGV Kugelmühle Durchlaufmahlung 1 Durchgang
P30 Gips	100/40	13,32	5,63	547	2,83	KGV Kugelmühle Durchlaufmahlung 2 Durchgang
P31 Gips	<40	19,58		5030		KGV Kugelmühle Durchlaufmahlung 2 Durchgang
P33 Gips	100/40	8,41		692	2,84	KGV Kugelmühle Durchlaufmahlung 3 Durchgang
P34 Gips	<40	14,97		6003		KGV Kugelmühle Durchlaufmahlung 3 Durchgang
P37 Gips	100/40	12,94	10,36	787	2,79	KGV Kugelmühle Durchlaufmahlung 4 Durchgang
P38 Gips	<40	25,08		6848		KGV Kugelmühle Durchlaufmahlung 4 Durchgang
P42 Gips	<40	22,05		4499		KGV Kugelmühle Kreislaufmahlung 6. Zyklus

**Tabelle 11** Gips/Anhydritgemisch - Analysenverzeichnis

## Spezifischer Energieeintrag

Bei der Differenz der beiden Rittingerkoeffizienten aus der Kreislaufmahlung ( $R_{KLM \text{ Gips/Anhydrit}} = 150 \text{ cm}^2/\text{J}$ ) und der Durchlaufmahlung ( $R_{DLM \text{ Gips/Anhydrit}} = 114 \text{ cm}^2/\text{J}$ ) sind zwei Aspekte zu beachten. Erstens muss man in der Kreislaufmahlung durch die hohen Feinkornanteile in dem Gemenge weniger Energie aufbringen (bereits zerkleinertes Material

muss nicht mehr einer OZK-Stufe zugeführt werden), zweitens findet man in den größeren Fraktionen (in der Kreislaufmahlung) vermehrt Anhydrit vor. Es ist davon auszugehen, dass Anhydrit einen höheren Mahl widerstand als Gips aufweist. Diese Vermutung kann durch die mineralogischen Parameter der Spaltbarkeit, Dichte und Härte abgeschätzt werden.

Der Rittingerkoeffizient wird aufgrund dieser Aspekte mit  $R_{\text{Gips/Anhydrit}} = 114 \text{ cm}^2/\text{J}$  festgelegt. Es ist aus der Durchlaufmahlung auch sehr gut erkennbar, dass die Feinkornanteile des Gips-Anhydritgemischs einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Durch das Zusetzen der Mühle und der Mahlkörper wird kein linearer sondern degressiv steigender Oberflächenzuwachs erzeugt.

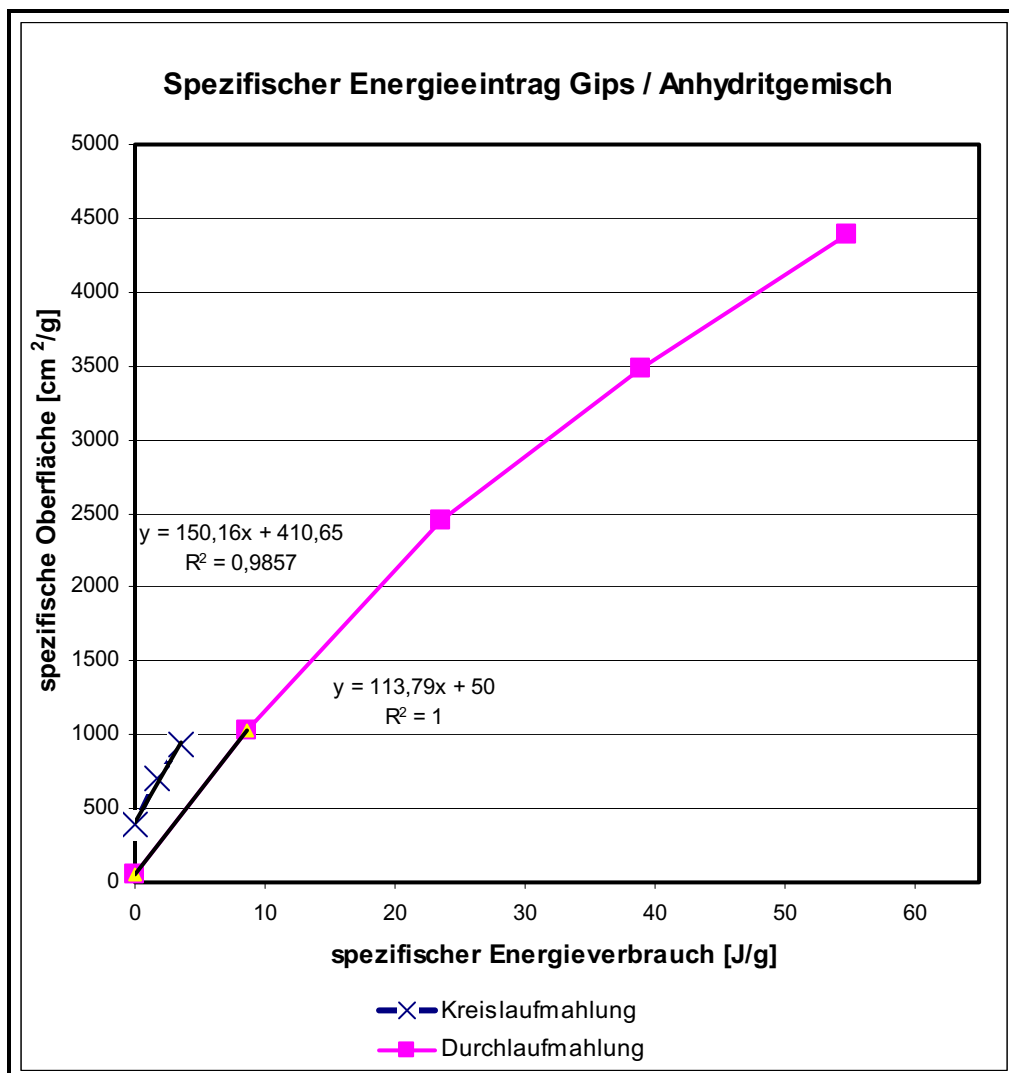


Abbildung 28 Gips/Anhydritgemisch - Spezifischer Energieeintrag

Der sehr geringe Mahlwiderstand des Gemenges zeigt sich auch in der Tabelle 12, da bereits nach 300 Umdrehungen in der Durchlaufmahlung eine spezifische Oberfläche von über  $a_m = 1000 \text{ cm}^2/\text{g}$  erzeugt wurden.

Umdrehungen	$a_{\text{Spezifisch}}$	$\Sigma e$	Beschreibung
[1]	$[\text{cm}^2/\text{g}]$	$[\text{J/g}]$	
<b>Kreislaufmahlung</b>			
	390,9	0	Ausgangsprobe KLM
87	703,7	1,7	nach Stabmühle
45	932,1	3,6	nach Kugelmühle
<b>Durchlaufmahlung</b>			
0	50,00	0	Ausgangsprobe DLM
+300	1035,46	8,7	KM 1. Durchgang
+500	2447,53	23,5	KM 2. Durchgang
+500	3486,57	38,9	KM 3. Durchgang
+500	4384,79	54,9	KM 4. Durchgang

**Tabelle 12** Gips/Anhydritgemisch - Energieeintrag



## **(d) Mergel**

Die betriebsinterne Kennzeichnung ist Mergel 540 SO.

### **(i) Allgemein**

Bei Mergel handelt es sich um ein Sedimentgestein, welches aus Ton und Kalk besteht. Kalk besteht überwiegend aus  $\text{CaCO}_3$ . Tonminerale bestehen aus zwei charakteristischen Bauelementen, der Tetraederschicht und der Oktaederschicht, wobei die erstgenannte vorwiegend aus  $\text{SiO}_4$ -Tetraedern und die zweite aus  $\text{AlO}_6$ -Oktaeder aufgebaut ist. Eine Abschätzung der Eigenschaften ist jedoch ohne vorangegangener mineralogischer Untersuchung nur schwer zu machen, da Mergel in den verschiedensten Mischungen und Varianten vorkommen kann. Der für Portlandzemente verwendete Mergel weist meistens einen Kalkgehalt von 25-55 % und „Tongehalt“ (= Nichtkarbonat) von 75-45 % auf. Der  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt wird dabei mit 25-60 % angegeben. [9]

### **(ii) Versuchsbeschreibung**

Um den Versuchsablauf für Mergel zu verkürzen wurde nach zwei Brecherstufen nur die OZK-Stufe der Stabmühle durchgeführt. Die Spaltweite der beiden Brecherstufen zur Probenvorbereitung wurde bei 20 mm und 6,3 mm festgelegt. Um einen genaueren Aufschluss über die Entwicklung der Oberfläche zu bekommen, wurde zusätzlich zur OZK-Stufe der Stabmühle die Durchlaufmahlung an der Kugelmühle (Fraktion 1/0,5 mm) gemacht. Zur weiteren Verkürzung wurde bei der Durchlaufmahlung eine Zwischensiebanalyse nur nach dem ersten und dem letzten Durchgang durchgeführt. Für die Ermittlung der Kennwerte des zweiten und dritten Durchgangs wurde eine Rückstellprobe gezogen und mit dem Blainemessgerät analysiert. Die Umdrehungen der einzelnen Durchgänge betragen 300, +300, +500 und +500.

### **(iii) Mahlbarkeitsuntersuchung**

Während der Handsiebungen aller Maschenweiten kleiner als 200  $\mu\text{m}$  kam es zu einer sehr starken Agglomeration des Mergels. Diese Agglomeration konnte auch mittels optischer Beurteilung bestätigt werden. Die Dichte des Materials wurde als konstant angenommen, was

durch drei Versuche im Helium-Pyknometer bestätigt wurde. Die Abweichungen waren kleiner als 0,5 %. Die ermittelte durchschnittliche Dichte betrug  $2,73 \text{ g/cm}^3$ .

Beim Versuch, die berechneten Oberflächen der Korngrößenverteilungen für den Rittingerkoeffizienten zu ermitteln, wurden sehr große Abweichungen zur gemessenen spezifischen Oberfläche erreicht. Da die Linearisierung im Grobkornbereich teilweise progressiv und teilweise degressiv verläuft ist eine Abschätzung des  $k_{80}$ -Wertes zur Berechnung des Arbeitsindex nach Bond nur bedingt möglich.

$n_{\text{GGS}} \approx 0,75$  (linearisierter Teil des 4. Durchgangs Durchlaufmahlung)

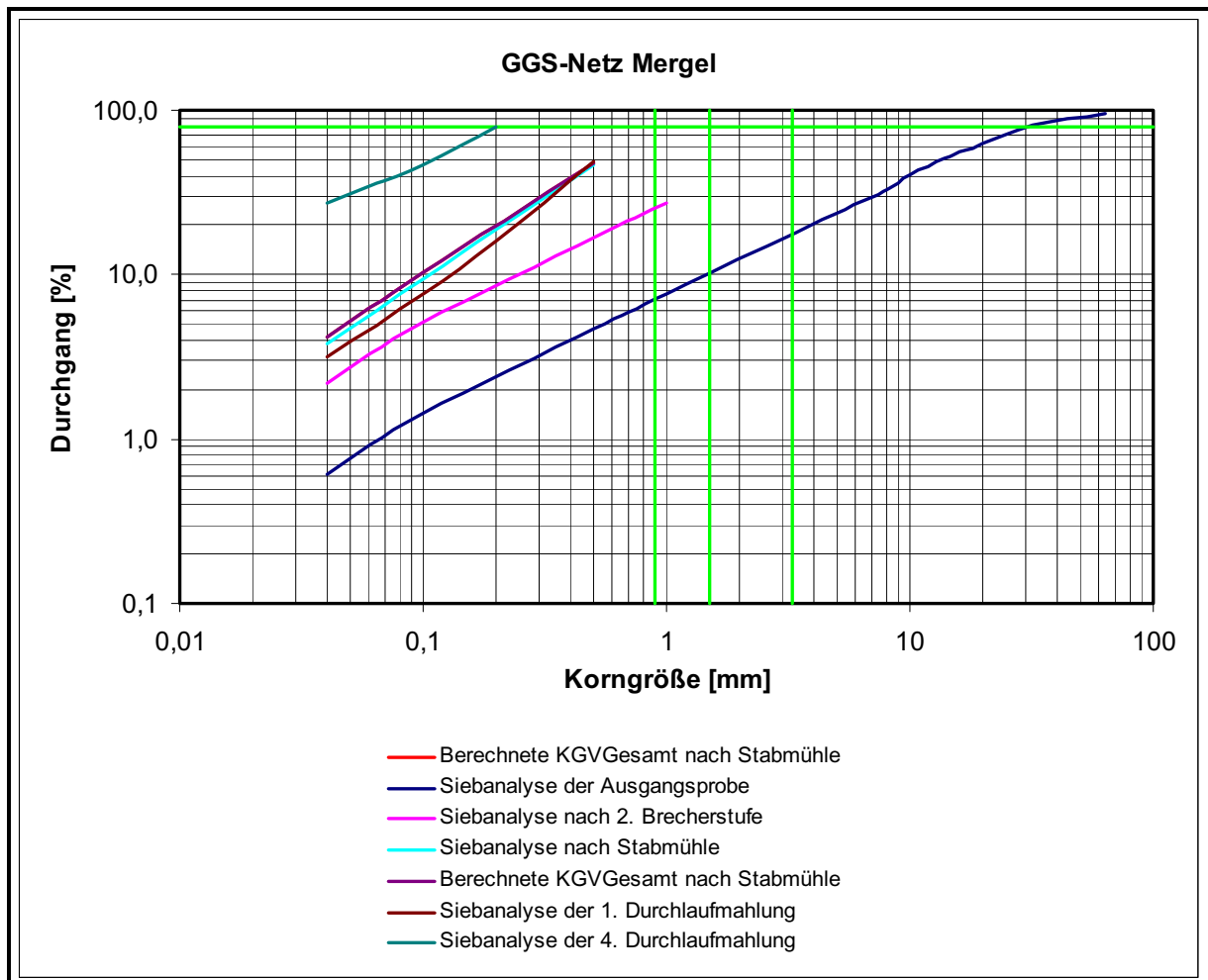


Abbildung 29 Mergel - GGS-Netz

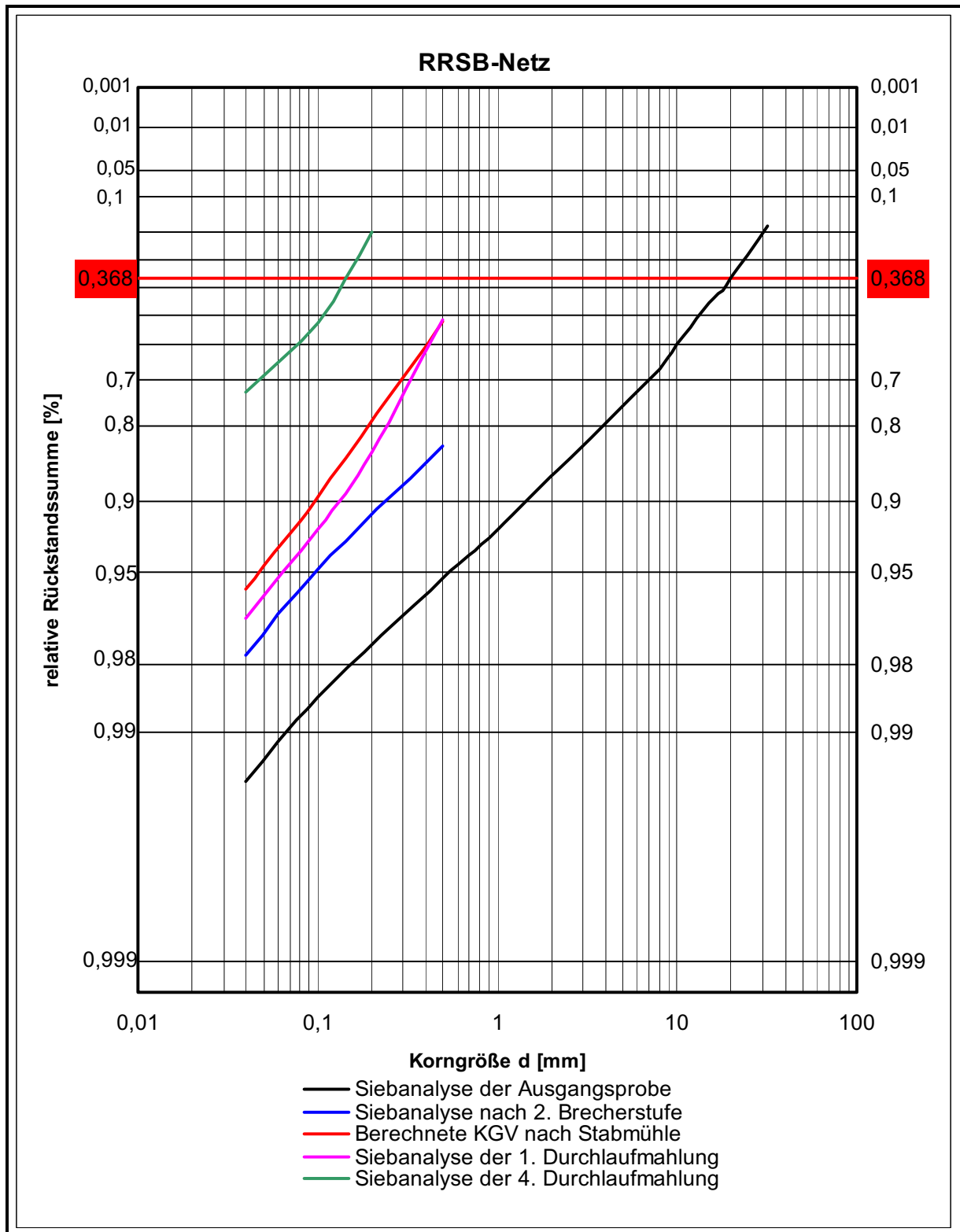


Abbildung 30 Mergel - RRSB-Netz

Ein weiteres Indiz für die elektrostatische Anlagerung des Feinstkorns an gröbere Kornfraktionen kann in der theoretisch nicht möglichen Abnahme des Blainewertes, ausgehend vom Produkt der zweiten Brecherstufe zum ersten Durchgang der Kugelmühle, gefunden werden.

Probenbezeichnung	Korngröße [µm]	Analyse 1	Analyse 2	Analyse 3	Beschreibung
		Luftstrahlsiebung	Blaine-Messung	He-Pyknometer	
			Oberfläche cm <sup>2</sup> /g	Dichte g/cm <sup>3</sup>	
P20Merg	100/40	Luftstrahlsiebung	1069	2,72	2. Brecherstufe
P21Merg	<40		9265		2. Brecherstufe
P26Merg	100/40	Luftstrahlsiebung	874	2,74	Stabmühle
P27Merg	<40		7594		Stabmühle
P31Merg	100/40	Luftstrahlsiebung	941	2,72	1. DG KM
P32Merg	<40		6995		1. DG KM
P33Merg	-		573		2. DG KM
P34Merg	-		2315		3. DG KM
P37Merg	-		4417		4. DG KM

Tabelle 13 Mergel - Analyseverzeichnis

### Spezifischer Energieeintrag

Bei Mergel konnte eine starke Verpolsterung der Mahlkörper bei den Versuchen mit der Kugelmühle beobachtet werden. Probleme traten auch bei der Probenteilung mit einem kleinen Riffelteiler auf, da diese durch Anpackungen und Verklebungen nicht mehr möglich war.

Die Bestimmung des Rittingerkoeffizienten ist auf Grund großer Differenzen der berechneten gemessenen spezifischen Oberfläche schwer durchzuführen. So wurde für den zweiten, dritten und vierten Durchgang der Durchlaufmahlung die Oberfläche durch eine Teilprobenmessung im Blainemessgerät ermittelt und bei den anderen Bestimmungen durch die Messungen der Fraktionen < 40 und 100/40 µm hochgerechnet. Die Abweichungen der unterschiedlichen Methoden sind erheblich (4. Durchgang Durchlaufmahlung:  $a_{m-Blainemesswert} = 4417 \text{ cm}^2/\text{g}$ ;  $a_{m-Teilberechnung} = 2868 \text{ cm}^2/\text{g}$ ).

Im Vergleich zur Kalkstein-Stabmühlenauswertungen ist Mergel in der Stabmühle schwerer zu zerkleinern ( $R_{KaSt, STM} = 51 \text{ cm}^2/\text{J}$ ;  $R_{Mergel, STM} = 27 \text{ cm}^2/\text{J}$ ). Da in der Zementindustrie die übergeordnete Eigenschaft die spezifische Oberfläche ist, die mit Hilfe des Blainemessgeräts

bestimmt wird, kann für Mergel der Rittingerkoeffizient des zweiten Teils der Durchlaufmahlung herangezogen werden. Der Rittingerkoeffizient für Mergel wurde mit  $129,4 \text{ cm}^2/\text{J}$  festgelegt.

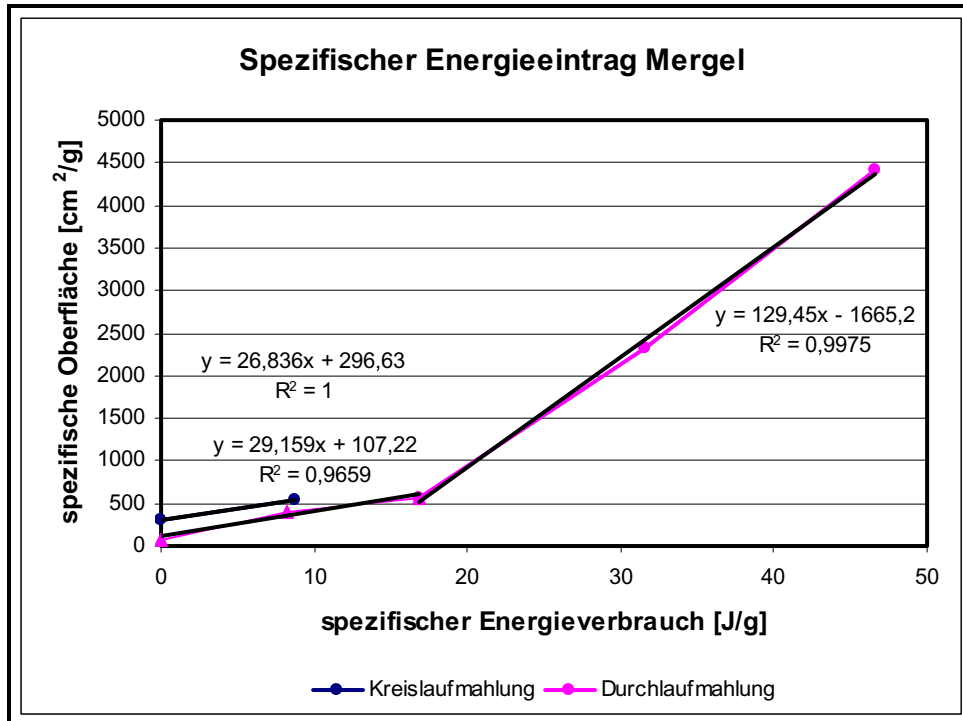


Abbildung 31 Mergel - Spezifischer Energieeintrag

In Tabelle 14 sind für die Durchlaufmahlung (2.-3. Durchgang) die Werte des gemessenen Blainewertes eingetragen.

Umdrehungen	$a_{\text{Spezifisch}}$	$\Sigma e$	Beschreibung
[1]	$[\text{cm}^2/\text{g}]$	$[\text{J/g}]$	
<b>Kreislaufmahlung</b>			
0	296,63	0	Ausgangsprobe KLM
233	531,34	8,75	nach Stabmühle
<b>Durchlaufmahlung</b>			
0	80,00	0	Ausgangsprobe DLM
+300	400,95	8,25	KM 1. Durchgang
+300	572,55	16,85	KM 2. Durchgang
+500	2314,54	31,61	KM 3. Durchgang
+500	4416,61	46,55	KM 4. Durchgang

Tabelle 14 Mergel - Energieeintrag

## **(e) Kalkstein**

### **(i) Allgemein**

Als Kalkstein wird ein Sedimentgestein bezeichnet, welches grundlegend aus  $\text{CaCO}_3$  in Form von Calcit und Aragonit besteht. Das Grundmaterial dieser Probe ist das Gestein aus dem Ofenauerberg bei Golling.

### **(ii) Versuchsbeschreibung**

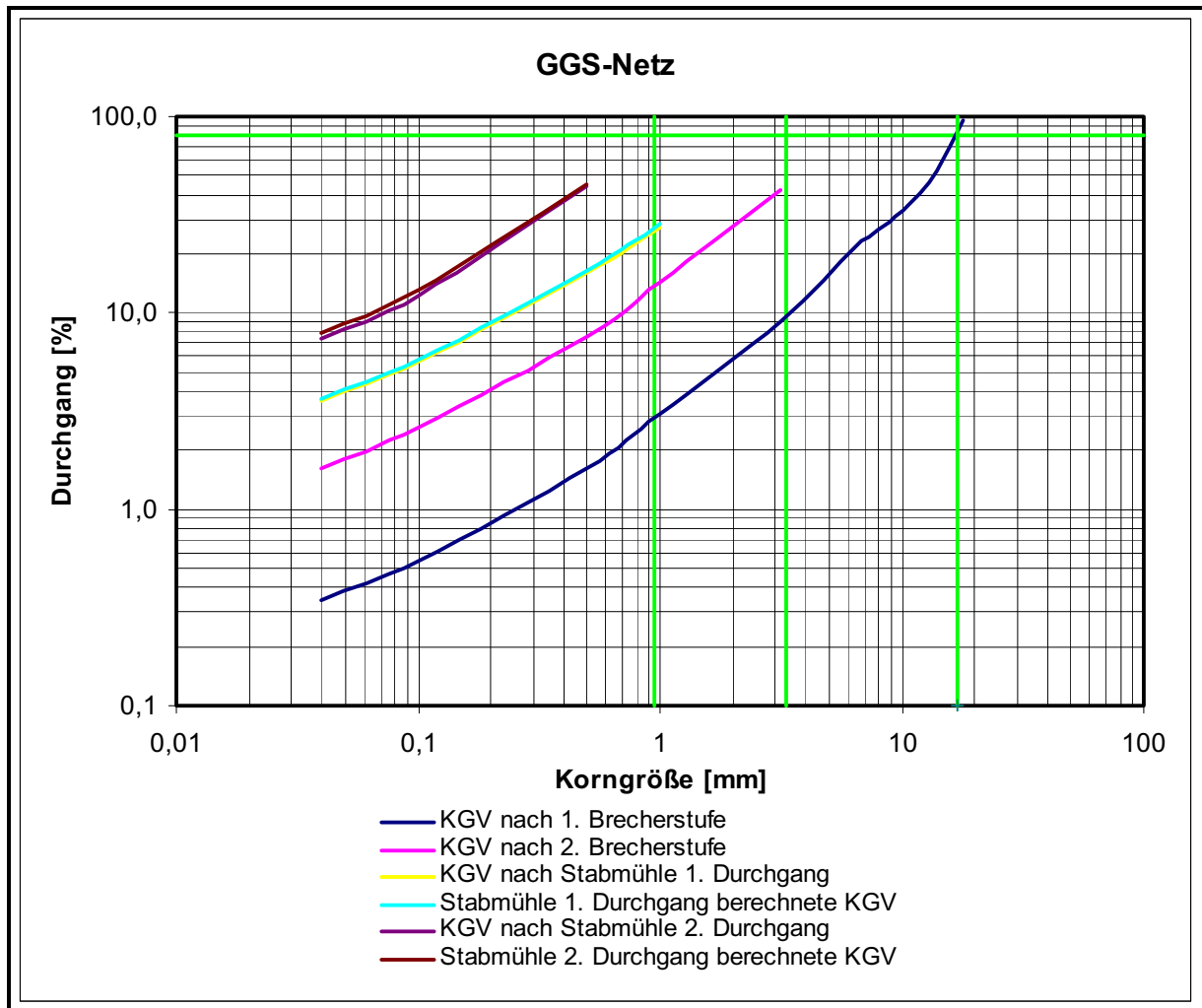
Bei der verwendeten Kalksteinprobe handelte es sich um die Fraktion 50/20 mm. Diese Probe wurde mit Hilfe zweier Brecherstufen für die OZK-Stufe der Stabmühle vorbereitet. Die OZK-Stufe der Stabmühle wurden schließlich in zwei Stufen aufgeteilt (Fraktion 6,3/3,15 mm und Fraktion 3,15/1mm).

### **(iii) Mahlbarkeitsuntersuchung**

Wie in den Kreislaufmahlungen der vorangegangenen Versuche für Mergel und Gips kann auch bei Kalkstein ein progressiver Verlauf der Korngrößenverteilungen an den Grobkornflanken beobachtet werden. Die Korngrößenverteilung der ersten Brecherstufe wurde kleiner 6,3 mm mit der Korngrößenverteilung der zweiten Brecherstufe berechnet.

Für den Arbeitsindex nach Bond wurde die Aufgabe der ersten Stabmühlenstufe bei einem  $k_{80}$ -Wert von 5500  $\mu\text{m}$  und für die zweite Stufe bei 2400  $\mu\text{m}$  bestimmt. Das Produkt der zweiten Stufe wurde bei  $k_{80, \text{Produkt}} = 750 \mu\text{m}$  festgelegt.

$n_{\text{GGS}} \approx 0,49$  (linearisierter Teil der KGV nach der Stabmühle; Bereich von 110  $\mu\text{m}$  bei 6 % bis 48  $\mu\text{m}$  bei 4 % Durchgang)



**Abbildung 32** Kalkstein - GGS-Netz

Auch im RRSB-Netz des Kalksteins kann ein progressiver Korngrößenverlauf der Kreislaufmahlung beobachtet werden. Nachdem es sich um ein in OZK-Stufen zerkleinertes Material handelt, ist die Abweichung der berechneten Korngrößenverteilung zur Korngrößenverteilung der einzelnen OZK-Stufen sehr klein. Dies trifft sowohl im GGS-Netz wie auch im RRSB-Netz zu.

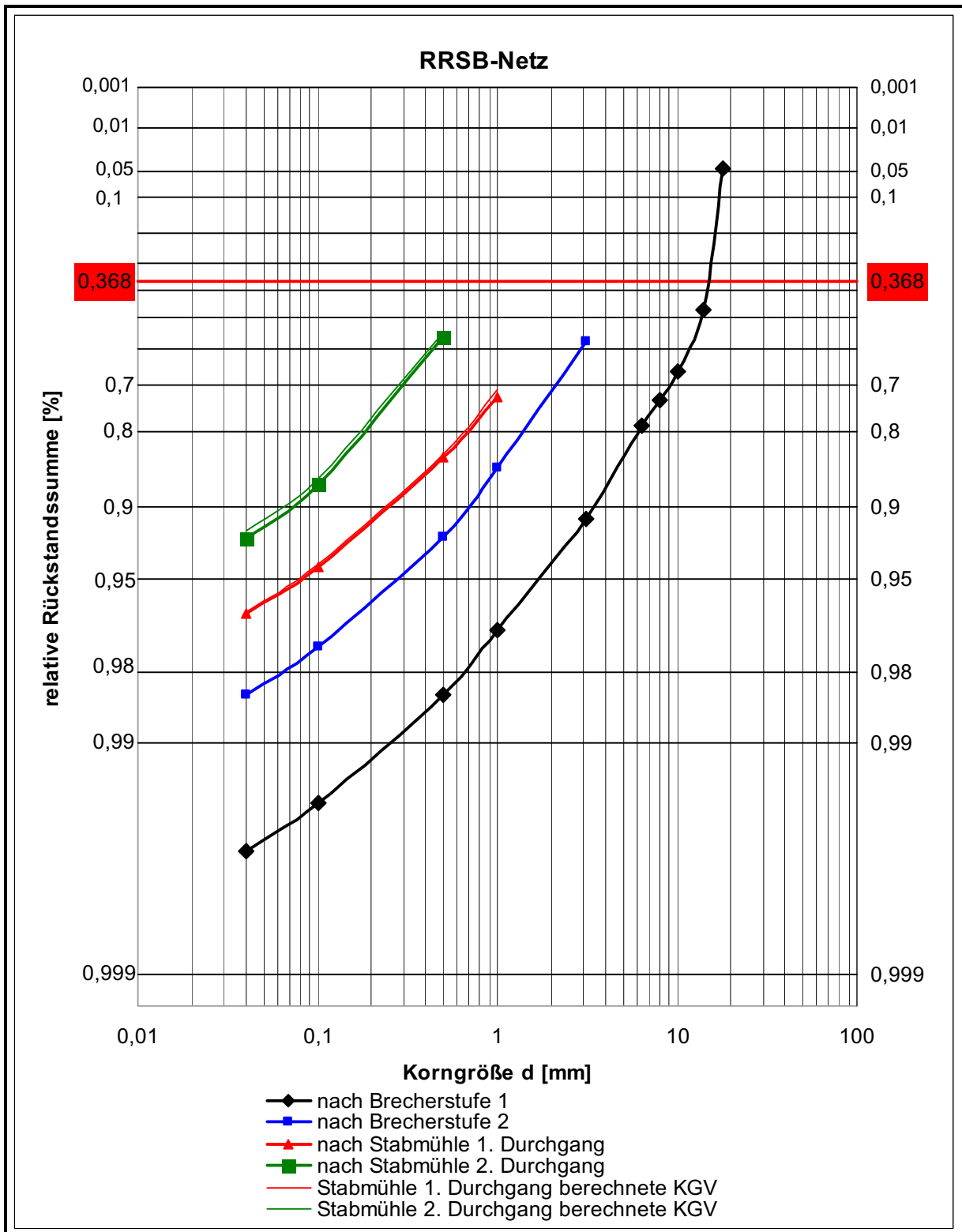


Abbildung 33 Kalkstein - RRSB-Netz



Wie auch bei Mergel nimmt die gemessene spezifische Oberfläche des Blainewertes der Fraktion < 40 µm nach dem Brecher ab und erst nach der zweiten Stabmühlenstufe wieder zu.

Probenbezeichnung	Korngröße [µm]	Analyse 1	Analyse 2	Beschreibung
		Blaine-Messung	He-Pyknometer	
		Oberfläche	Dichte	
		cm <sup>2</sup> /g	g/cm <sup>3</sup>	
P16KaSt	100/40	733		Ausgangprobe
P17KaSt	<40	6095	2,85	Ausgangprobe
P24KaSt	100/40	663		Stabmühle 1. DG
P25KaSt	<40	5881		Stabmühle 1. DG
P29KaSt	100/40	718		Stabmühle 2. DG
P30KaSt	<40	6573		Stabmühle 2. DG

Tabelle 15 Kalkstein - Analysenverzeichnis

### Spezifischer Energieeintrag

Für die beiden Kreislaufdurchgänge an der Stabmühle konnte ein gut linearisierter Bereich ermittelt werden. Der Rittingerkoeffizient wurde aus dem Mittel der beiden Durchgänge mit 51 cm<sup>2</sup>/J bestimmt.

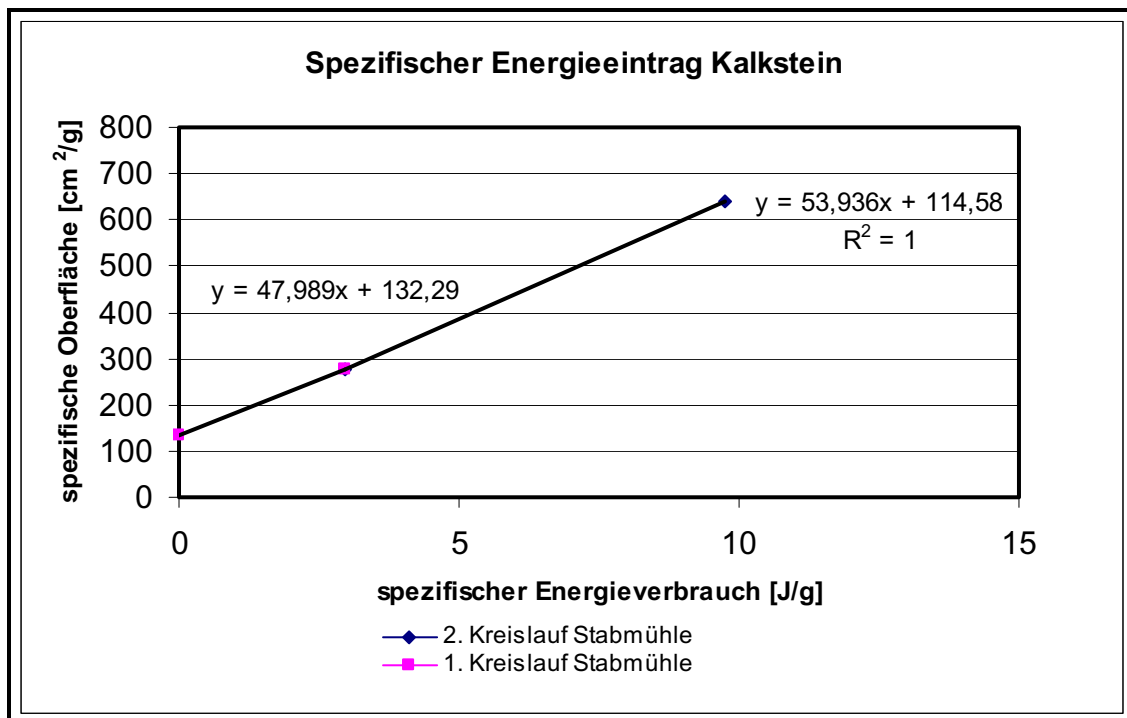


Abbildung 34 Kalkstein - Spezifischer Energieeintrag

---

<b>a<sub>Spezifisch</sub></b>	<b>Σe</b>	<b>Spez. Feingutbildung</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>[cm<sup>2</sup>/g]</b>	<b>[J/g]</b>	<b>[g/U]</b>	<b>Cp= 1,1</b>
132,29	0	0	nach 2. Brecher
275,21	2,98	2,48	1. Kreislauf Stabmühle
641,03	9,76	1,56	2. Kreislauf Stabmühle

**Tabelle 16** Kalkstein - Energieeintrag

## **(f) Flugasche**

### **(i) Allgemein**

Flugaschen werden als Betonzusatzstoffe eingesetzt und auf den Zementgehalt des Betons angerechnet. Die Wirkung der Flugasche im Beton beruht im Wesentlichen auf der physikalischen Füllerwirkung und der puzzolanischen Reaktivität.

#### **Kennzeichnend dafür sind:**

- die Verringerung des Wasseranspruchs bei der Frischbetonherstellung
- die Verbesserung der Verarbeitbarkeit
- die Verbesserung der Verdichtungswilligkeit
- die Verringerung der Hydratationswärme
- die Verringerung des Ausblühens
- die Erhöhung der Dichtigkeit und der Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe sowie gegen Frost-Tau-Wechsel. [10]

### **(ii) Versuchsbeschreibung**

Die Ausgangskorngrößenverteilung wurde mittels Luftstrahlsiebung ermittelt. Nach einer Blainemessung des Ausgangsmaterials wurde auf der Kugelmühle der Versuch der Durchlaufmahlung durchgeführt.

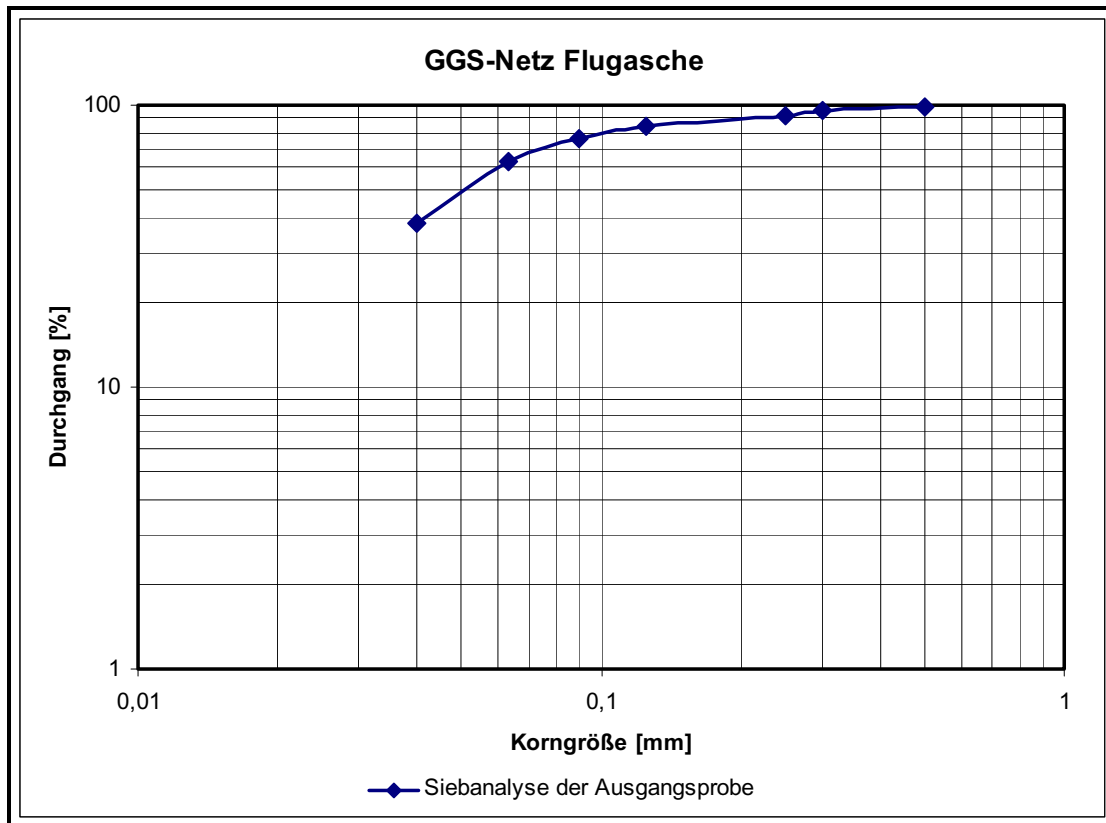
**(iii) Mahlbarkeitsuntersuchung**

Abbildung 35 Flugasche - GGS-Netz

Bei dem Versuch der Durchlaufmahlung konnte eine stetige Erhöhung der spezifischen Oberfläche erreicht werden. Der Zerkleinerungswiderstand ist mit einem Rittingerkoeffizienten von  $R_{Flua} = 151 \text{ cm}^2/\text{J}$  sehr gering.

Probenbezeichnung	Analyse 1	Analyse 2	Beschreibung
	Blaine-Messung	He-Pyknometer	
	Oberfläche	Dichte	
	$\text{cm}^2/\text{g}$	$\text{g}/\text{cm}^3$	
P02FluA	11150	2,84	Ausgangsmaterial
P03FluA	11410		DLM 1. DG
P04FluA	11850		DLM 2. DG
P05FluA	-		DLM 3. DG
P06FluA	13017		DLM 4. DG

Tabelle 17 Flugasche - Analyseverzeichnis

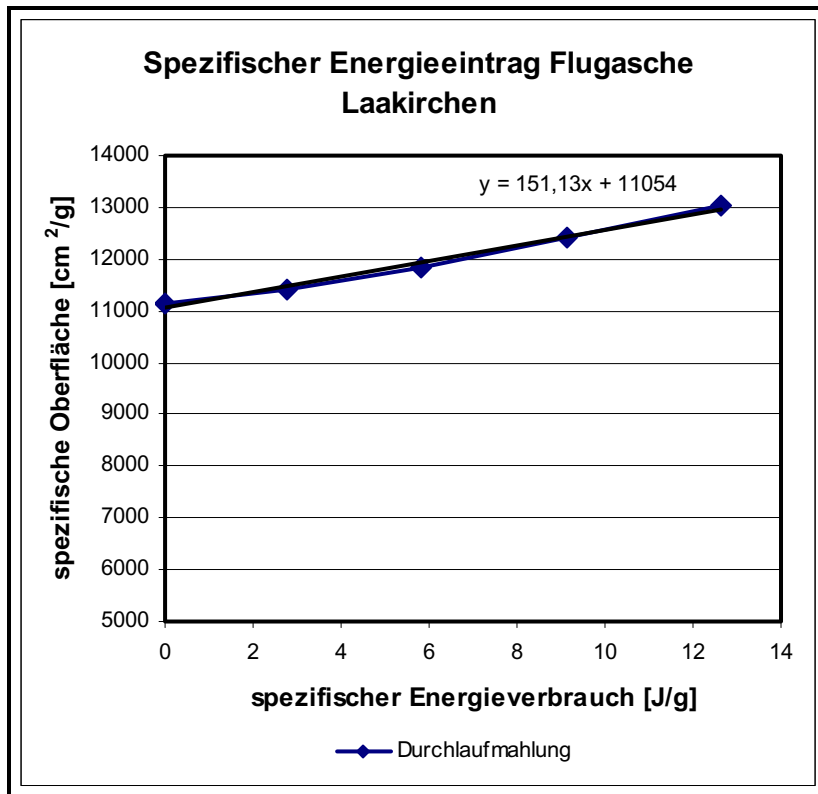


Abbildung 36 Flugasche - Spezifischer Energieeintrag

Der Blainewert der dritten Durchlaufmahlung wurde rechnerisch ermittelt.

<b>a<sub>Spezifisch</sub></b> <b>[cm<sup>2</sup>/g]</b>	<b>e<sub>Spezifisch</sub></b> <b>[J/g]</b>	<b>Beschreibung</b>
11149,9	0	Ausgangprobe
11409,8	2,79	Durchlaufmahlung 1. DG
11850,5	5,81	Durchlaufmahlung 2. DG
12433,8	9,12	Durchlaufmahlung 3. DG
13017,1	12,65	Durchlaufmahlung 4. DG

Tabelle 18 Flugasche - Energieeintrag

## (g) Steinmehl

### (i) Allgemein

Bei Steinmehl handelt es sich um ein Produkt, das in der Firma Leube in einer Walzengutmühle hergestellt wird. Es handelt sich dabei um eine Mischung aus Hochofenschlacke (Hüttensand Donawitz Schlacke) und AMZ. AMZ ist ein Rohstoffgemisch aus Mergel, welches im betriebsinternen Steinbruch mit Hilfsmaterial (z.B. Ziegelsplitt) bezüglich der Gehalte korrigiert wird. Der gemahlene Rohstoff findet seine Hauptanwendung nicht in der Zementmühle, sondern als Rohmehl für die Klinkerherstellung.

### (ii) Versuchbeschreibung

Die Versuche für Steinmehl wurden analog der Untersuchung der Flugasche durchgeführt. Steinmehl weist jedoch eine etwas gröbere Sieblinie im Bereich kleiner 100  $\mu\text{m}$  auf.

### (iii) Mahlbarkeitsuntersuchung

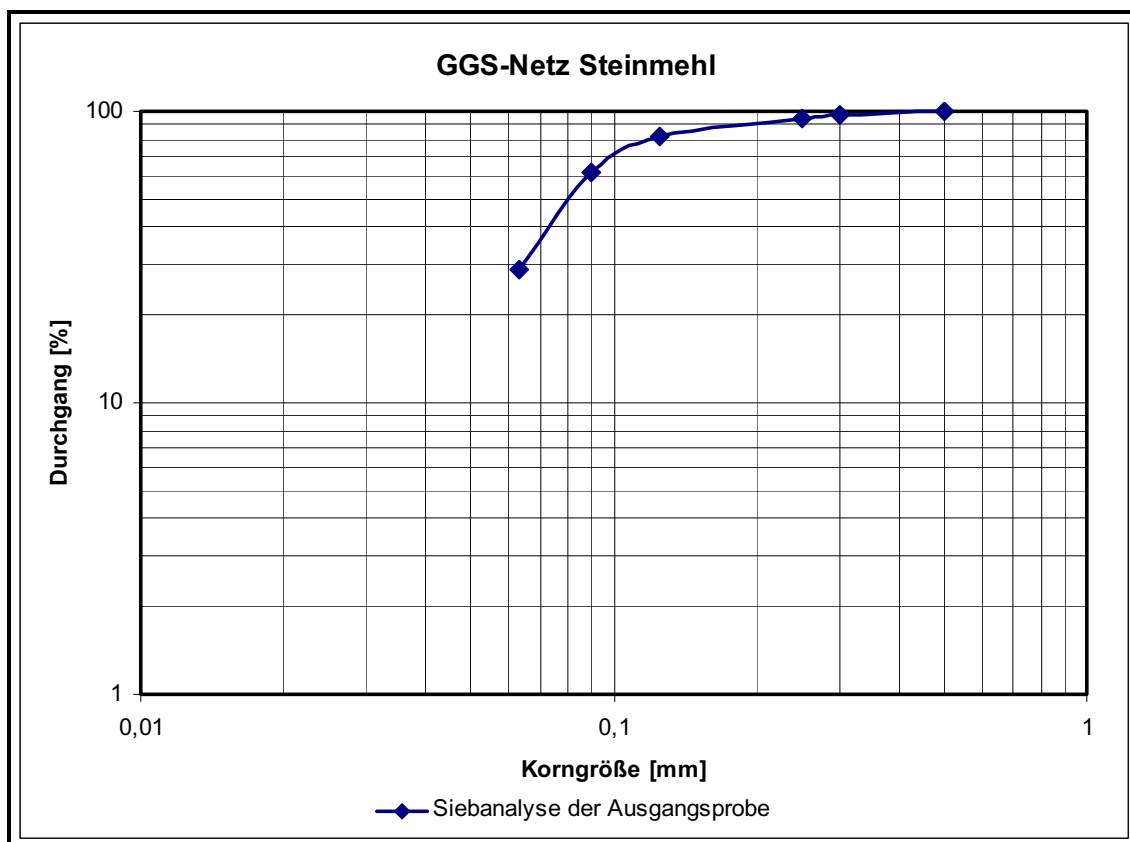


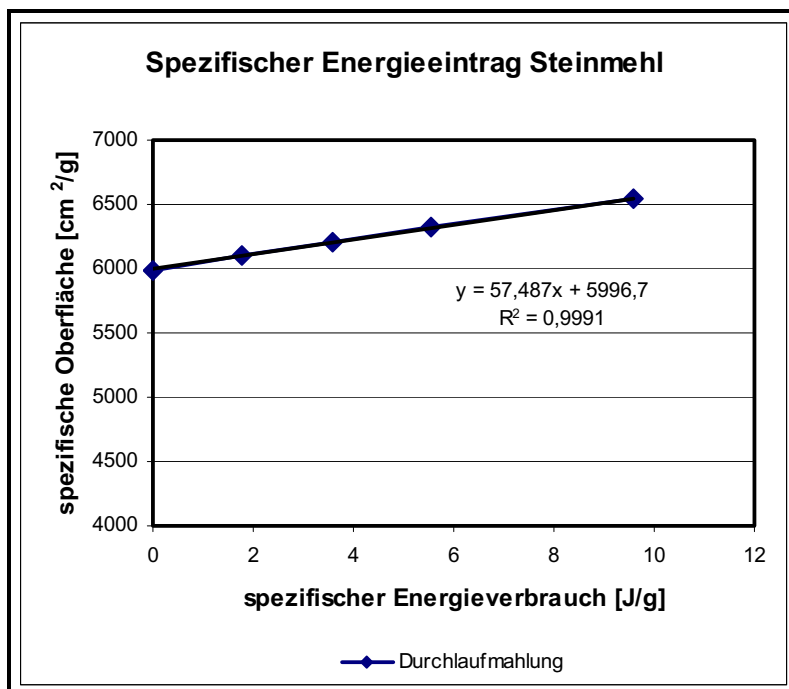
Abbildung 37 Steinmehl - GGS-Netz

Im Gegensatz zu Flugasche ist die Blainemessung für Steinmehl sehr zeitaufwändig und so wurde die spezifische Oberfläche nur für das Ausgangsprodukt und das Fertigprodukt bestimmt. Dauert eine Messung für Flugasche nur ca. 3 min, so muss für Steinmehl eine Dauer von über 12 min gerechnet werden. Diese sehr gute Verdichtbarkeit bzw. Luftundurchlässigkeit kann auf den hohen Anteil an Mergel zurückgeführt werden. Steinmehl verhält sich bei der Bestimmung der Oberfläche annähernd gleich wie Mergel.

Probenbezeichnung	Analyse 1	Analyse 2	Beschreibung
	Blaine-Messung	He-Pyknometer	
	Oberfläche	Dichte	
	cm <sup>2</sup> /g	g/cm <sup>3</sup>	
P02Steim	5990	2,69	Ausgangsmaterial
P03Steim	-		DLM 1. DG
P04Steim	-		DLM 2. DG
P05Steim	-		DLM 3. DG
P06Steim	6541		DLM 4. DG

**Tabelle 19** Steinmehl - Analyseverzeichnis

Da es sich bei Steinmehl um eine Mischung aus Hochofenschlacke und AMZ handelt, passt der ermittelte Rittingerkoeffizient von  $R = 57,5 \text{ cm}^2/\text{J}$  gut in das Mischungsverhältnis der separat ermittelten Koeffizienten.



**Abbildung 38** Steinmehl - Spezifischer Energieeintrag

Bei den hellgelb hinterlegten Feldern der Tabelle 20 handelt es sich um rechnerisch ermittelte Kennwerte.

<b>a<sub>Spezifisch</sub></b> <b>[cm<sup>2</sup>/g]</b>	<b>e<sub>Spezifisch</sub></b> <b>[J/g]</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Umdrehungen KM</b>
5989,5	0	Ausgangsprobe	
6099,8	1,78	Durchlaufmahlung 1. DG	50
6210,1	3,60	Durchlaufmahlung 2. DG	50
6320,4	5,53	Durchlaufmahlung 3. DG	50
6540,9	9,57	Durchlaufmahlung 4. DG	100

**Tabelle 20** Steinmehl - Energieeintrag (KM... Kugelmühle)



### 3.04 Zusammenfassung Rohstoffanalyse

Für nachfolgende Berechnungen wurden die Werte der grau hinterlegten Felder herangezogen.

	Ritingerkoeffizient der Kreislaufmahlung	Ritingerkoeffizient der Durchlaufmahlung	Arbeitsindex der Kreislaufmahlung	Arbeitsindex der Durchlaufmahlung
	$R_{KLM}$	$R_{DLM}$	$W_{i,KLM}$	$W_{i,DLM}$
	[cm <sup>2</sup> /J]	[cm <sup>2</sup> /J]	[kWh/t]	[kWh/t]
Klinker	26	24,3	5	23,6
Hochofenschlacke	15	12,7	16	38,2
Gips	232	113,8	6,8	10
Mergel	40 (26,8)	129,4	15,3	20
Kalkstein	51	(100)	11,9	x
Stein	x	57,5	x	x
Flugasche	x	151	x	x

Tabelle 21 Zusammenfassung Ritingerkoeffizient und Arbeitsindex nach Bond

#### (a) Arbeitsindex nach Bond

Die Abschätzung des berechneten mittleren Arbeitsindex nach Bond von Produkten mit korngößenabhängigem Mahlwiderrstand erweist sich durchwegs als schwierig. Für die Gattierung der ersten Kammer der Zementmühle sollte der Arbeitsindex der Kreislaufmahlung herangezogen werden, da es sich dabei um gröbere Kornklassen handelt.

Schwierig gestaltet sich auch die Bestimmung der Werte für Kalkstein und Mergel, da sich die spezifisch erzeugte Oberfläche nicht direkt proportional den Rückstandswerten verhält. Bis zu einer bestimmten Mahldauer wird wenig Oberfläche erzeugt. Dies ist auf Spritzkorn, welches nur eine schlechte Verdichtung der Probe in der Messzelle des Blainegeräts zulässt, zurückzuführen. Ab dem Zeitpunkt für welchen das Grobkorn von einer Matrix eingeschlossen wird, kann durch die sehr guten Verdichtungsfähigkeiten der Sedimentgesteine eine hohe spezifische Oberfläche gemessen werden.

Die unterschiedlichen Mahlbarkeiten der vermahlenden Stoffe haben eine positive Auswirkung auf die Eigenschaften des produzierten Zements. So wirkt Kalkstein bei einer Mischung mit Klinker positiv auf die Mahlung, wobei er immer feiner gemahlen wird als Klinker und dadurch die Korngrößenverteilung des Klinkermahlgutes verbreitert, was einen positiven Einfluss auf die Qualität des Zements hat [16].

Nach dieser Erkenntnis müsste auch Hochofenschlacke aufgrund des erhöhten Mahlwiderstands gegenüber Klinker eine positive Auswirkung auf die gemeinsame Mahlung haben.

### **(b) Rittinger Koeffizient**

Eine Beurteilung der Mahlbarkeit mit dem spezifischen Energieverbrauch zur spezifischen Oberfläche hat sich vor allem bei den Sedimentgesteinen (Mergel und Kalkstein) als schwierig erwiesen. Da für die Zementproduktion jedoch die spezifische Oberfläche eine kennzeichnende Eigenschaft darstellt, sind die Werte der realistischen Oberflächenentwicklung zu wählen. Diese wird bei Mergel erst in der Durchlaufmahlung erreicht.

Unterschiedliches Agglomerationsverhalten und das sehr schlechte Siebverhalten von Mergel bewirken die großen Unterschiede zwischen den Gesteinen. So haftet das Feinstkorn der Zermahlungszonen aus der Kreislaufmahlung bei Mergel wahrscheinlich durch elektrostatische Agglomeration fast vollständig an den größeren Körnern. Mit dieser Annahme können die nicht ermittelten bzw. falsch erscheinenden Rittingerkoeffizienten für Kalkstein mit  $R_{DLM, KST} \approx 100 \text{ cm}^2/\text{g}$  und Mergel mit  $R_{KLM, Mergel} \approx 40 \text{ cm}^2/\text{g}$  angenommen werden.

In der folgenden Abbildung 39 werden die Kosten zweier Alternativen für ein Zementrezept gegenübergestellt. Der Arbeitsindex nach Bond und der Rittingerkoeffizient wurden für das Sichtergrobgut (chemische Analysen: 65 % Klinker und 35 % HOS) errechnet. Auch die spezifische Oberfläche wurde über den Kornformfaktor von Klinker und HOS ermittelt. Für die zu erzeugende massenspezifische Oberfläche  $a_{m \text{ Gesamt}}$  wurde von der durchschnittlichen spezifischen Oberfläche der Produktionsproben des Septembers ( $3796 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) die der jeweiligen rezeptabhängigen Mühlenaufgabe (Alternative 0:  $1482,5 \text{ cm}^2/\text{g}$ ; Alternative 1:  $1129,1 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) subtrahiert.

Rezept	Alternative 0		Alternative 1		Ritinger [cm <sup>2</sup> /J]	Work Index [kWh/t]
	Tonnen	Prozent	Tonnen	Prozent		
<b>Gesamt</b>						
Hos					12,7	38,2
Klinker					24,3	23,6
Gips					113,8	6,8
Stein					57,5	
Flugasche					151	
Mergel					129,4	20
Kalkstein					100	11,9
Sichtergrobgut					20,24	28,71
<b>Ritinger Rezept</b>		[cm <sup>2</sup> /J]	26,6	27,4		
<b>a<sub>m</sub> Gesamt</b>		[cm <sup>2</sup> /g]	2314	2667		
<b>Energie in J</b>		[J/g]	86,9	97,3		
<b>Energie in kWh</b>		[kWh/t]	24,2	27,0		
<b>Produktionsmenge / Jahr</b>	<b>400000</b>		9660461	10806469		
<b>Differenz</b>			1146008			
<b>Einsparungspotenzial</b>	<b>€</b>		74491			

Strompreis Okt. 09 Quelle: <http://www.e-control.at/de/industrie/strom/strompreis> 0,065 €/kWh

Abbildung 39 Gegenüberstellung der Rezeptkosten

## IV. Ist-Zustandsanalyse

### 4.01 Versuchsdurchführung

Am 11.11.09 wurde die Probenahme an der Zementmühle 5 durchgeführt. Im Zuge dieser Probenahme wurde die Bestimmung der Mahlkörperverteilung in den Mahlkammern durchgeführt und die so genannten Meterproben für die Längsabsiebung entnommen. Zur Vorbereitung wurde die Mühle ca. 6 h vor der Durchführung abgestellt und abgekühlt.

Die Bestimmung der Mahlkörperverteilung erfolgte laut dem Mitteilungsblatt des „Vdz - Bestimmung der Mahlkörperverteilung in Mahlkammern“. Für die Meterproben wurden in definierten Abständen Stichproben über den gesamten Querschnitt der Mühle entnommen.

Nach der Entnahme der Mahlkörper wurden diese zur Bestimmung der Verteilung gewogen, gezählt und in die Mühle zurückgegeben.

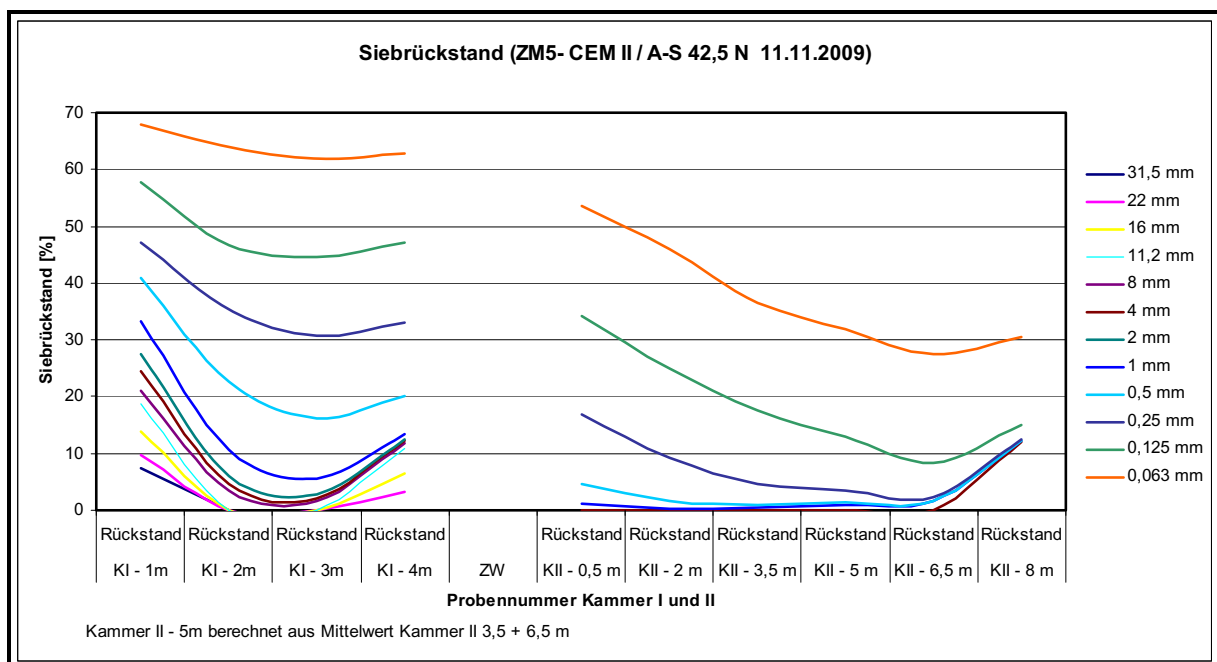
Die Meterproben wurden im Technikum der Firma Leube wie folgt aufbereitet und analysiert. Zuerst erfolgte die Bestimmung der Grobkornanteile auf einem Siebturm. Die Siebdauer wurde mit 15 min festgelegt wobei untere Fraktionen durch eine analysenscharfe Handsiebung (bis 250  $\mu\text{m}$ , teilweise bis 125  $\mu\text{m}$  Handsiebung) kontrolliert wurden. Die Korngrößenverteilung der unteren Kornanteile wurde mit einer Luftstrahlsiebung ermittelt. Die Proben wurden nach Feststellung der Massen separat beschriftet und verpackt. Um selektive Zerkleinerung bzw. Gehaltsanreicherungen in einzelnen Fraktionen feststellen zu können, wurde ein Teil dieser Proben mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse und einer nasschemischen Laugung zur Feststellung des Klinker-Hochofengehaltes und anderer Bestandteile analysiert. Die Röntgenfluoreszenzanalyse wurde mit der Einstellung für Normklinker durchgeführt. Weiters wurden aus den quantitativen und qualitativen chemischen Untersuchungen Werte wie der Kalkstandard, Gehalte der Klinkerphasen und der Module berechnet.

### 4.02 Mahlfortschrittsdiagramm

Werden die Siebrückstände der einzelnen Fraktionen über den Abstand der Probenahme zum Mühlenanfang aufgetragen, erhält man einen genauen Verlauf über den Mahlfortschritt in der Mühle. Interpretiert man nun die Ansteigungen vor der Trennwand der beiden Kammern und der Austragswand, kommt es vor diesen zu einer Aufstauung des Materials.

Auffällig ist ein sehr hoher Rückstand der Kornfraktion 8/1 mm vor der Austragswand. Bei diesem Material handelt es sich um schwer mahlbaren Klinker, der eine andere Phasenzusammensetzung als üblich aufweist. Es handelt sich dabei im Grobkornbereich um ein fast monodisperses Material mit einer Korngröße von 7-8 mm, das nach dem Erreichen der Größe der Austragsslitze vor dem Zyklon abgeschieden wird. Auf weitere Besonderheiten des Klinkers vor der Austragswand wird in der chemischen Analyse der einzelnen Fraktionen eingegangen.

An der Neigung zwischen den ersten beiden Probenahmestellen in der ersten Kammer ist der gewünschte Effekt der Grobgutmahlung ersichtlich. Fällt der Siebrückstand des 63 µm-Siebes nur sehr flach aus, was auf eine geringe Zerkleinerung dieser Kornklassen hindeutet, so ist ein deutlicher Abfall des Siebrückstandes des Grobguts zu erkennen. In Kammer II ist über die gesamte Kammerlänge ein grundsätzlich gleichmäßiger Mahlfortschritt zu erkennen. Vor der Austragswand kommt es auch in Kammer II zu einer Aufstauung des Materials.

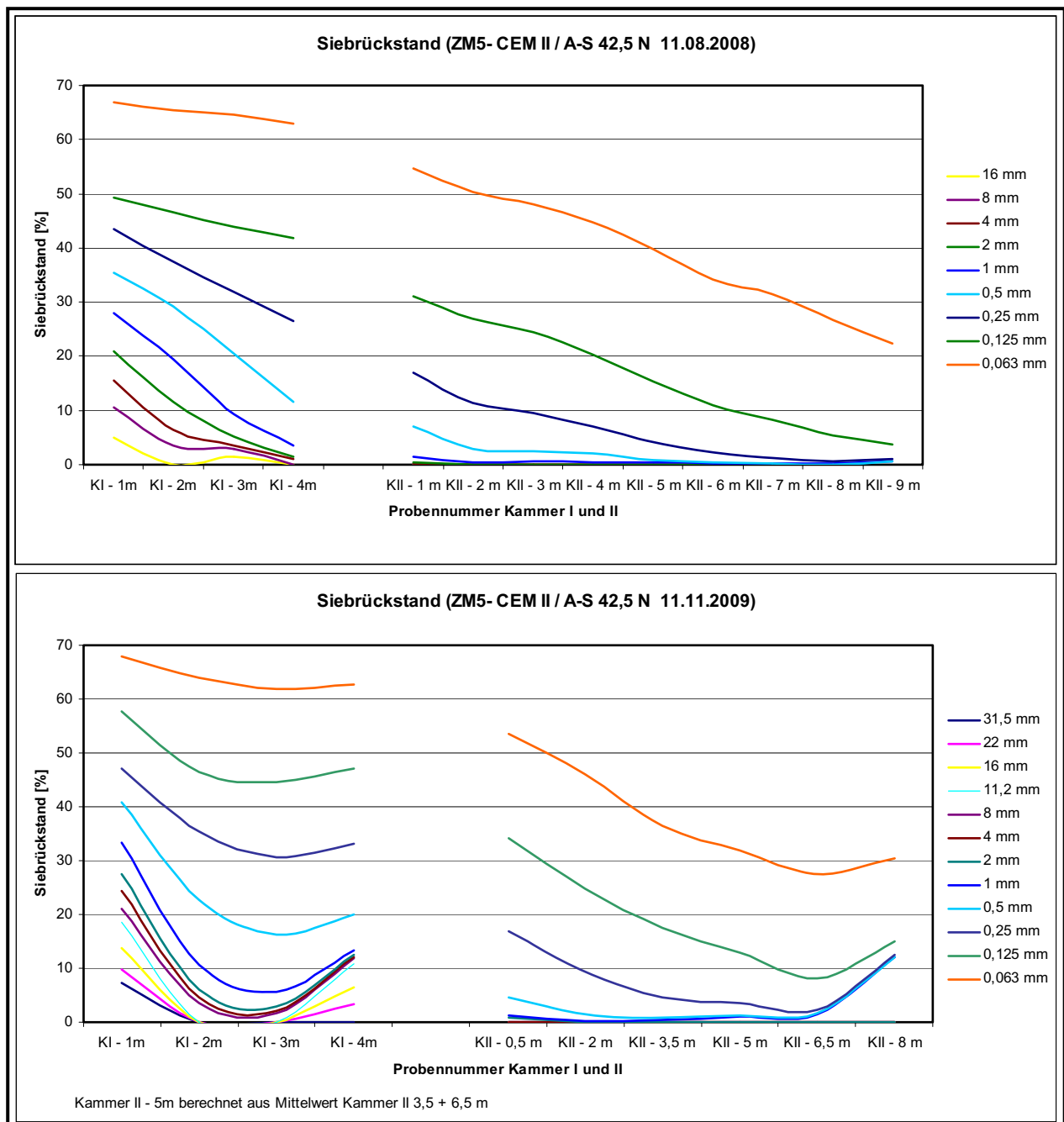


**Abbildung 40** Mahlfortschrittsdiagramm – Ordinate: Siebrückstand der einzelnen Fraktionen; Abszisse: Abstand zur Mühlenaufgabewand; ZW... Zwischenwand

Vergleicht man das Diagramm vom 11.11.09 mit dem Mahlfortschrittsdiagramm vom 11.8.08, so können vor allem zwei große Unterschiede beobachtet werden. Vor den Austragswänden der Kammern kommt es zu keinen Aufstauungen und der Mahlfortschritt der

ersten Kammer ist gleichmäßiger, was durch die geringere Neigung des Grobgutes erkennbar ist.

Beim Vergleich der beiden Diagramme ist auf eine unterschiedliche Beschriftung der Abszisse zu achten. Im Diagramm aus dem Jahr 2008 ist der 63  $\mu\text{m}$ -Siebrückstand bei 5 m um 8-10 % größer als im Diagramm aus dem Jahr 2009. Der 125  $\mu\text{m}$ -Siebrückstand ist jedoch bei 5 m fast identisch und weist nur am Anfang eine Abweichung auf.



**Abbildung 41** Siebrückstandsdiagramm: Vergleich 11.11.09 mit 11.08.08

In Abbildung 42 und Abbildung 43 ist zu beobachten, dass es sich bei den Aufstauungen nicht nur um einzelne Kornfraktionen handelt, sondern um das gesamte Kornspektrum.

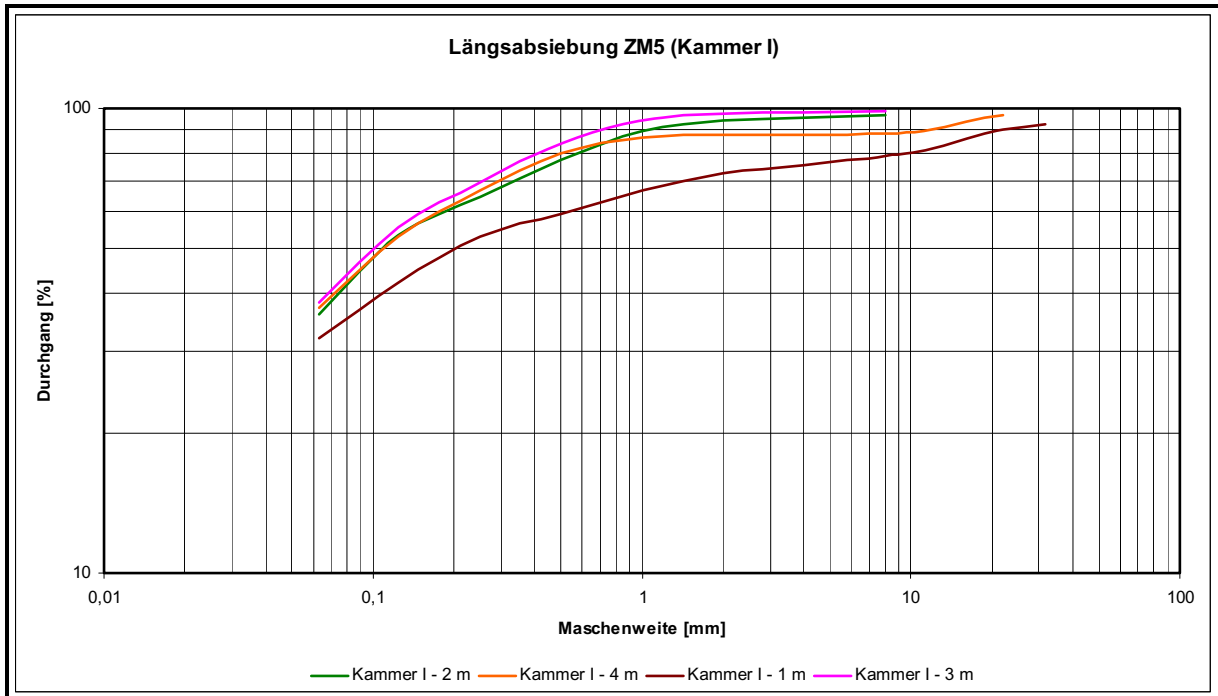


Abbildung 42 Mahlfortschrittsdiagramm - Korngrößenverteilung der Meterproben (KI)

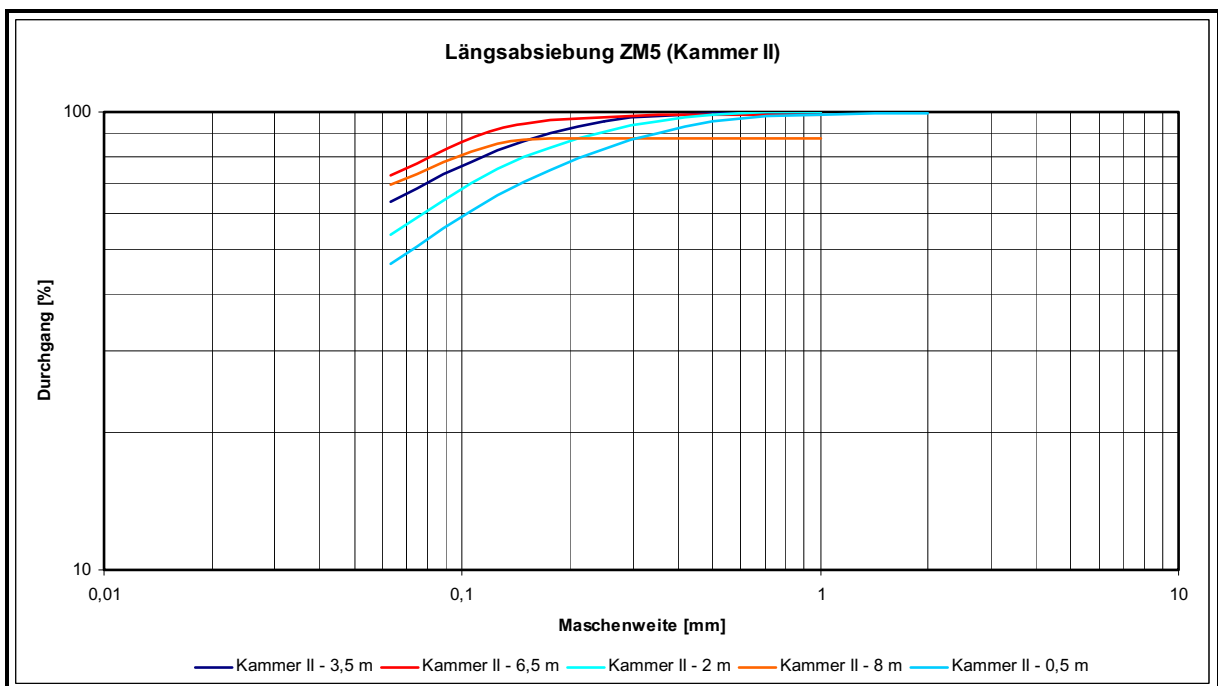


Abbildung 43 Mahlfortschrittsdiagramm - Korngrößenverteilung der Meterproben (KII)

## **Chemische Analysen des Mahlfortschrittdiagramms**

Siehe Abbildung 44 und Abbildung 45.

### **Vergleich einer Fraktion in Kammer I & II**

Unterschiede in der Mahlbarkeit der einzelnen Zuzahlstoffe bewirken eine Anreicherung des leichter mahlbaren Stoffes in der Feinfraktion. Um die Anreicherung in der Zementmühle nachzuweisen, wurden vier Meterproben der Fraktion 2/1 mm der Kammer I und fünf Proben der Fraktion 250/125 µm in Kammer II nasschemisch und mit RFA analysiert. In Kammer I ist eine Anreicherung des Klinkers in der Fraktion 2/1 mm zu beobachten. Dies ist auf die leichtere Mahlbarkeit der Hochofenschlacke in dieser Kornfraktion zurückzuführen. Bei beiden Stoffen, Hochofenschlacke und Klinker, kann von zwei bis drei Mahlbarkeitskennwerten abhängig von der Korngröße ausgegangen werden. Hochofenschlacke ist zwar im Mittel energieaufwendiger und schwerer zu mahlen als Klinker, aber gröbere Kornfraktionen sind durch die Sprödeheit des Materials leichter zu mahlen. Bei der energieaufwendigen Mahlung der feineren Kornfraktionen in Kammer II findet eine Anreicherung der Hochofenschlacke statt. Da dort in den Kornklassen bis 125 µm zu wenig Material vorhanden war, wurden für die beiden letzten Proben (KII - 6,5 m und 8 m) Kornfraktionen größer 125 µm zur chemischen Bestimmung verwendet. Grundsätzlich ist auch in diesen Fraktionen eine stetige Abnahme des Klinkers zu beobachten, diese wäre jedoch mit Sicherheit noch stärker, wenn für alle Versuche die gleiche Kornfraktion verwendet worden wäre. Da es sich bei den Analysen um eine Probe aus einer Mischung aus Hochofenschlacke und Klinker handelt, darf man aus den berechneten Werten keine Interpretationen über Klinkerphasen oder ähnliches machen.

### **Vergleich der verschiedenen Korngrößen einer Meterprobe**

Wie in den Proben über den Mahlfortschritt kann auch in den einzelnen Fraktionen einer Meterprobe eine Anreicherung beobachtet werden. Für diese Versuche wurden die Proben der Kammer I bei einem und drei Meter herangezogen. Untersucht wurden die Fraktionen > 4 und 2/1 mm bei der Einmeterprobe und die Fraktionen > 2, 2/1 und < 0,125 mm bei der Dreimeterprobe. Ist die geringe Anreicherung der gröberen Fraktionen noch auf die Gehalte der Aufgabekorngrößen zurückzuführen, so ist die Anreicherung der feineren Fraktionen der selektiven Zerkleinerung zuzuordnen.



Eine Anreicherung von Klinkerphasen ist auch in diesem Versuch durch das Vorhandensein von Hochofenschlacke und Klinker nur bedingt nachzuweisen.

### Vergleich des Sichters mit der letzten Meterprobe („Fastfertigprodukt“)

Klinker hat eine durchschnittliche Rohdichte von  $3,2 \text{ g/cm}^3$  und Hochofenschlacke  $2,9 \text{ g/cm}^3$ . Im Sichter kommen durch diesen Unterschied zwei unterschiedliche Trennkorngrößen zustande, wodurch der Unterschied der Mahlbarkeiten geringfügig ausgeglichen wird.

Vergleicht man die letzte Meterprobe der Zementmühle bei 8 m mit dem Rückgut, ist ebenfalls der Mehraustrag der Hochofenschlacke zu erkennen. Sind in der Meterprobe noch ca. 45 % HOS und 55 % Klinker vorhanden, so sind im Rückgut des Sichters 65 % Klinker und 35 % HOS.

### CEM II B-S 42,5 N Zementmühle 5

Probenbezeichnung ↑ ansteigend ↓ abnehmend			nasschemische Untersuchung				RFA							
			Klinker	Hüttensand	Sontiges Kalkstein	Summe ZM	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Summe RFA	Rest
Vergleich einer Fraktion in Kammer 1 & 2														
Kammer 1	K I	1m 2/1 mm	60,77	39,23	0 0	39,23	26,76	6,47	2,23	55,67	3,65	1,84	96,62	3,38
	K I	2m 2/1 mm	76,02	23,98	0 0	23,98	23,52	5,66	2,53	58,48	2,82	3,44	96,45	3,55
	K I	3m 2/1 mm	80,47	19,53	0 0	19,53	22,75	5,48	2,56	58,69	2,69	4,02	96,19	3,81
	K I	4m 2/1 mm	85,32 ↑	14,68 ↓	0 0	14,68 ↓	22,94 ↓	5,45 ↓	2,69 ↑	59,76 ↑	2,63 ↓	3,71 ↑	97,18 ↑	2,82
Kammer 2	K II	0,5m 25/125 µm	63,75	36,25	0 0	36,25	25,14	6,26	2,37	56,46	3,34	2,07	95,64	4,36
	K II	2m 25/125 µm	63,22	36,78	0 0	36,78	25,85	6,40	2,36	56,12	3,46	1,81	96,00	4,00
	K II	3,5m 25/125 µm	58,17	41,83	0 0	41,83	26,10	6,49	2,33	55,71	3,57	1,75	95,95	4,05
	K II	6,5m 1000/125 µm	54,03	45,97	0 0	45,97	28,14	6,99	2,22 ↓	53,89	4,07	1,24	96,55	3,45
	K II	8m 500/250 µm	54,99 ↓	44,63 ↑	0 0,38	45,01 ↑	30,19 ↑	7,16 ↑	2,87 ↑	51,47 ↓	4,52 ↑	0,94 ↓	97,15 ↑	2,85
Vergleich der unterschiedlichen Fraktionen einer m-Probe														
Kammer 1	K I	1m >4 mm	97,54	2,46	0 0	2,46	10,97	3,88	2,10	52,76	1,71	23,05	94,47	5,53
	K I	1m 2/1 mm	60,77 ↓	39,23 ↑	0 0	39,23 ↑	26,76 ↑	6,47 ↑	2,23 ↑	55,67	3,65 ↑	1,84 ↓	96,62 ↑	3,38
Kammer 1	K I	3m >2 mm	89,96	10,04	0 0	10,04	19,91	4,59	2,76	62,08	2,01	5,12	96,47	3,53
	K I	3m 2/1 mm	80,47	19,53	0 0	19,53	22,75	5,48	2,56	58,69	2,69	4,02	96,19	3,81
	K I	3m <0,125 mm	64,81 ↓	34,58 ↑	0 0,60	35,19 ↑	24,20 ↑	6,04 ↑	2,31 ↓	56,62 ↓	3,12 ↑	2,75 ↓	95,04 ↓	4,96
Vergleich Sichter Rückgut mit Produkt der Mühle ZM5 & Sichterrückgut / Sichterfeingut														
Sichter	K II	8m 500/250 µm	54,99 ↓	44,63 ↑	0 0,38	45,01 ↑	30,19 ↑	7,16 ↑	2,87 ↑	51,47 ↓	4,52 ↑	0,94 ↓	97,15 ↑	2,85
	Sichter	RG	64,47	35,10	0 0,43	35,53	26,63	6,40	2,40	56,69	3,50	1,15	96,77	3,23
	Sichter	FG	67,56	30,58	0 1,86	32,44	24,70	6,26	2,27	56,61	3,24	2,60	95,68	4,32
Vergleich schwer mahlbarers Grobgut in Kammer II bei 8 m mit Klinker Mittelwert Juni 2009														
Mittelwert Klinker DOII Normal Juni 09	K II	8m 8/1 mm	94,32	2,27	3 0,55	5,68	24,1	5,32	3,15	62,55	2,29	0,69	98,1	1,90
							21,69	5,17	3,54	66,23	1,94	0,76	99,33	0,67

Abbildung 44 Nasschemische und Röntgenfluoreszenz Analysen der Meterproben

### **Vergleich des schwer zu mahlenden Klinkers mit den Mittelwerten des Normklinkers**

Bei diesem Vergleich wird der Klinker, welcher sich vor der Austragskammer der Mühle ansammelt bzw. nach der Schlitzwand zum Schutz des Sichters vorabgeschieden wird, den Mittelwerten des Normklinkers DOII<sup>X</sup> (Juni 2009) gegenübergestellt. Weist der schwer mahlbare Klinker einen Gehalt von ca. 30 % an Tricalciumsilicat ( $C_3S$ ) und fast 50 % Dicalciumsilikat ( $C_2S$ ) auf, so sind es bei dem Normklinker ca. 63 %  $C_3S$  und 15 %  $C_2S$ . Die Gehalte der Klinkerphasen des Tricalciumaluminats ( $C_3A$ ) und des Tetracalciumaluminatferrits ( $C_4AF$ ) bleiben hingegen annähernd gleich. Dadurch kann die Aussage getroffen werden, dass Klinker nicht nur korngrößenabhängige Festigkeiten aufweist, sondern auch die betreffenden Klinkerphasen mit einem erheblichen Anteil die Mahlbarkeit des Klinkers beeinträchtigen.

Ein Nachweis über die selektive Zerkleinerung der Klinkerphasen in der Mühlenkammer II ist nicht möglich, da es sich bei den Proben um Mischungen zwischen Hochofenschlacke und Klinker handelt.

---

<sup>X</sup> Drehrohrofen II

Probenbezeichnung				Werteberechnung								
				KST (Lea, Parker + MgO)	TM (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	SM (ohne Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	KM	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Summe Phasen
				(TM=> 0,64); kein Freikalk abgezogen								
Kammer 1	K I	1m	2/1 mm	69,5	2,90	3,08	4,14	-28,65	98,33	13,38	6,79	89,85
	K I	2m	2/1 mm	81,7	2,24	2,87	4,16	7,87	61,50	10,72	7,70	87,79
	K I	3m	2/1 mm	84,5	2,14	2,83	4,15	14,09	54,60	10,20	7,79	86,67
	K I	4m	2/1 mm	85,3	2,03	2,82	4,21	17,90	52,27	9,90	8,19	88,25
Kammer 2	K II	0,5m	25/125 µm	74,3	2,64	2,91	4,02	-12,56	81,55	12,58	7,21	88,79
	K II	2m	25/125 µm	72,1	2,71	2,95	4,04	-19,53	88,84	12,97	7,18	89,47
	K II	3,5m	25/125 µm	71,0	2,79	2,96	4,02	-23,49	92,55	13,26	7,09	89,41
	K II	6,5m	1000/125 µm	64,4	3,15	3,06	4,03	-48,15	117,00	14,77	6,76	90,38
K II	8m	500/250 µm	57,8	2,49	3,01	4,22	-74,80	142,98	14,12	8,73	91,04	
Kammer 1	K I	1m	>4 mm	147,4	1,85	1,83	2,83	36,61	3,84	6,73	6,39	53,56
	K I	1m	2/1 mm	69,5	2,90	3,08	4,14	-28,65	98,33	13,38	6,79	89,85
Kammer 1	K I	3m	>2 mm	101,0	1,66	2,71	4,34	52,03	17,83	7,50	8,40	85,76
	K I	3m	2/1 mm	84,5	2,14	2,83	4,15	14,09	54,60	10,20	7,79	86,67
	K I	3m	<0,125 mm	77,2	2,61	2,90	4,01	-5,14	73,26	12,10	7,03	87,25
Sichter	K II	8m	500/250 µm	57,8	2,49	3,01	4,22	-74,80	142,98	14,12	8,73	91,04
	Sichter	RG		70,9	2,67	3,03	4,16	-21,31	92,42	12,90	7,30	91,32
	Sichter	FG		75,7	2,76	2,90	3,95	-9,98	78,34	12,75	6,91	88,02
Mittelwert Klinker DOII Normal Juni 09				84,8	1,69	2,85	4,53	29,27	47,01	8,77	9,59	94,64
				97,9	1,46	2,49	4,20	62,82	14,80	7,72	10,77	96,10

Abbildung 45 Werteberechnung der Meterproben

$$\text{Kalkstandard: } KST_{III} = \frac{100 * (CaO + 0,75 * MgO)}{2,80 * SiO_2 + 1,18 * Al_2O_3 + 0,65 * Fe_2O_3} \quad (11)$$

$$\text{Tonerdemodul: } TM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (12)$$

$$\text{Kieselerdemodul: } KM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (13)$$

$$\text{Silikatmodul: } SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + Mn_2O_3} \quad (14)$$

$$C_3S = 4,071 * CaO - 7,600 * SiO_2 - 6,718 * Al_2O_3 - 1,430 * Fe_2O_3 - 2,852 * SO_3 \quad (15)$$

$$C_2S = 2,867 * SiO_2 - 0,7544 * C_3S \quad (16)$$

$$C_3A = 2,650 * Al_2O_3 - 1,690 * Fe_2O_3 \quad (17)$$

$$C_4AF = 3,043 * Fe_2O_3 \quad (18)$$

### Vorzerkleinerung des Gips/Anhydritgemischs

Um eine Einschätzung über die Notwendigkeit eines Gipsvorbrechers treffen zu können, wurden grobe Kornfraktionen der Kammer I optisch ohne mikroskopische Hilfen beurteilt. Kann am Anfang der Kammer I noch ein Anteil an Gips in den groben Fraktionen gefunden werden, so ist dieser am Anfang der Kammer II mit freiem Auge nicht mehr zu erkennen. Dies lässt den Entschluss zu, dass Gips durch den sehr geringen Mahlwiderstand und den hohen Anteil an Feinkorn im Ausgangsprodukt keine vorgeschalteten Aggregate zur Vorzerkleinerung benötigt. Aggregate zur Gipsvorzerkleinerung könnten jedoch nötig werden, sollte sich das Ausgangsmaterial stark in der Korngrößenverteilung bzw. Zusammensetzung ändern.

Grundsätzlich wäre nach der Größtmahlkörperberechnung nach Bond und Papadakis auch eine feinere Gattierung ohne Vorbrecher möglich (siehe 4.03(a) Bemessung der Größtkugel). Die Möglichkeit der feineren Gattierung ist jedoch nicht nur vom Gipsgrößtkorn sondern auch vom schwer zerkleinerbaren Klinker (hoher Anteil der C<sub>2</sub>S-Phase) abhängig.

optische Beurteilung der Proben:		
KI - 2 m	> 8 mm	Einzelkorn Gips ca. 20 mm, Rest Klinker
KII - 0,5 m	> 2 mm	100% Klinker
KII - 0,5 m	2/1 mm	80% Klinker 20% HOS
KI - 1 m	>31,5 mm	75% Gips 25 % Klinker
KI - 1 m	31,5/22,4 mm	Klinker
KI - 1 m	22,4/16 mm	70% Klinker 30% Gips
KI - 1 m	16/11 mm	70% Klinker 30% Gips
KI - 1 m	11/8 mm	85% Klinker 15% Gips
KI - 1 m	8/4 mm	5% Gips 3% HOS, Rest Klinker
KI - 4 m	31,5/22,4 mm	80% Gips 20 % Klinker
KI - 4 m	22,4/16 mm	100% Klinker
KI - 4 m	16/11 mm	90% Klinker 10% Gips
KI - 4 m	11/8 mm	90% Klinker 10% Gips
KI - 4 m	8/4 mm	90% Klinker 10% Gips
KI - 4 m	4/2 mm	90% Klinker 10% Gips

Abbildung 46 Optische Beurteilung des Grobguts der Zementmühle

### **4.03 Gattierungsuntersuchungen**

Die Bestimmung der Mahlkörperverteilung in Mahlkammern<sup>XI</sup> wurde nach dem Mitteilungsblatt des Vdz durchgeführt. In Abbildung 47 ist die Gattierung vom 11.11.09 und die Gattierung vom 30.3.09 dargestellt. Der Vorschlag des Vdz sollte vor allem bei feineren Produkten von Vorteil sein.

Die Mahlkörper des Herstellers Magotteaux sind mit dem Galvanotechnik-Verfahren oberflächenbehandelt. Auf den Stahlkugeln (12 % Cr-Anteil in Kammer II, 17 % Cr-Anteil in Kammer I) wird dabei elektrochemisch eine Hardalloy-Beschichtung abgeschieden.

In Kammer I wird eine Hubpanzerung und in Kammer II eine Klassierpanzerung verwendet. Die Schlitzweite der Trennwand in Kammer I beträgt 7 mm, die Auslaufwand der Kammer II weist eine Schlitzweite von 10 mm auf.

---

<sup>XI</sup> Quelle: Vdz Deutsche Zementindustrie: Bestimmung der Mahlkörperverteilung in Mahlkammern

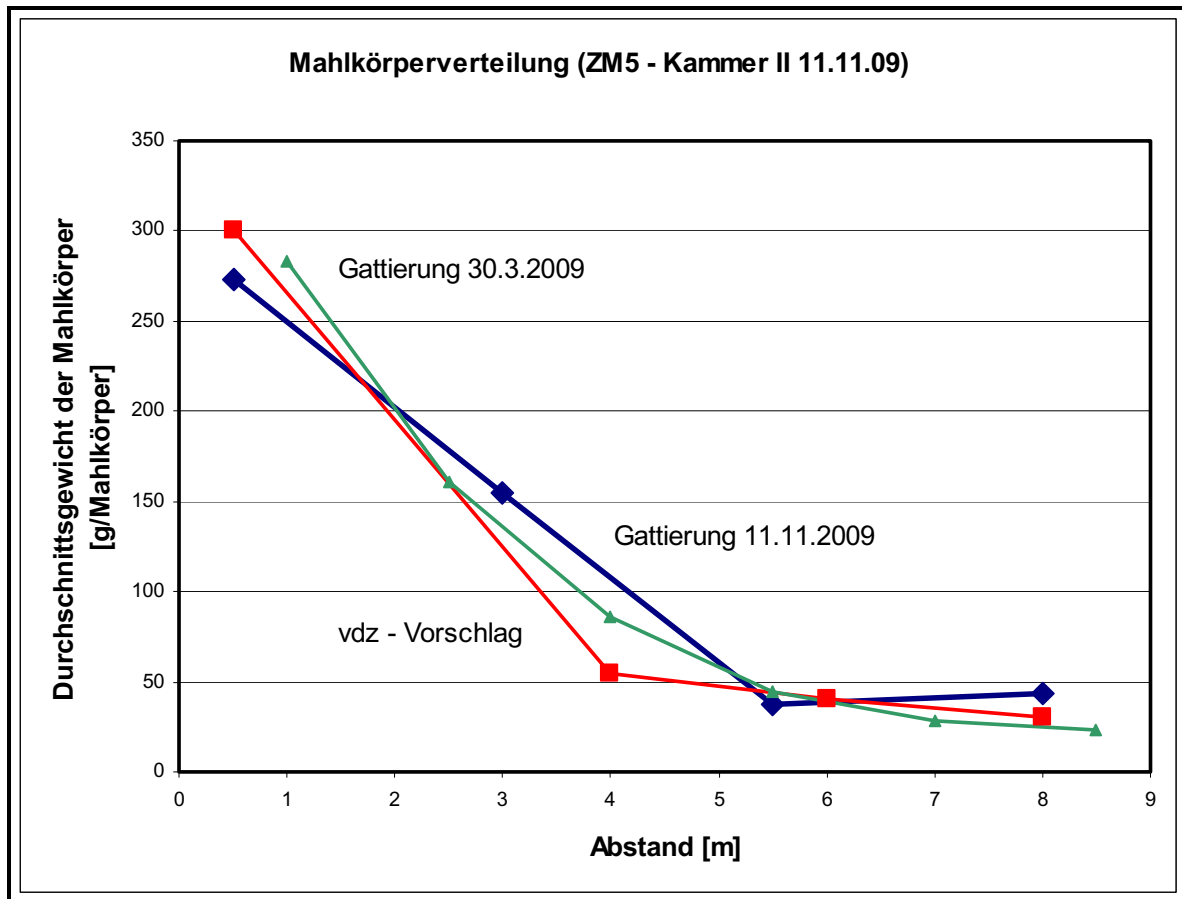


Abbildung 47 Mahlkörperverteilung Mahlkammer II (Vdz)

Durch ein niedriges Schüttgewicht (grobe Kugelfüllung) und relativ hohen Drehzahlen, wie sie vor allem bei Grobmahlungen gewählt werden, kommt es häufig zum Abrollen des Kugelbetts. Ein Indiz für diesen Zustand können eventuell die mit Rundungen ausgeschliffenen Mahlkörper sein.

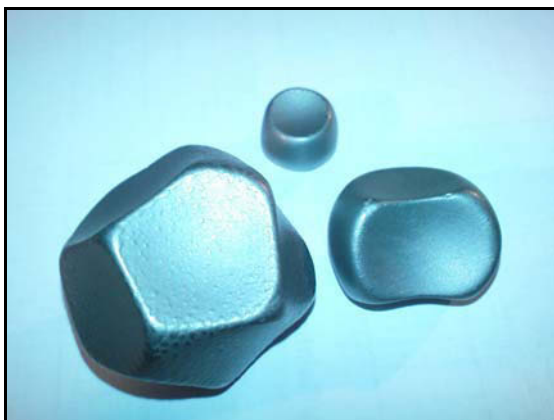


Abbildung 48 Deformierte Mahlkörper

### (a) Bemessung der Größtkugel

Zur Bestimmung der Größtkugel in Mahlräumen von Kugelmühlen sind die Mahlbarkeit und die Korngröße ausschlaggebend. Bei Klinker sollte für Kammer I die Anfangsmahlbarkeit und für Kammer II die Endmahlbarkeit zur Berechnung der Größtkugel herangezogen werden.

Die Bond'sche Formel verlangt eine möglichst genaue Kenntnis der Korngröße bei 80 % Durchgang der Sieblinie, da sie als Quadratwurzel in die Formel eingeht, während der Arbeitsindex als dritte Wurzel nur geringen Einfluss besitzt. Bei groben Körnungen kann es so zu einer zu groß berechneten Kugel kommen.

Bei der Auswahl der Größe der Mahlkörper muss bedacht werden, dass nicht nur die Zerkleinerungskinematik, sondern auch ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor, nämlich die Lebensdauer der Mantelplatten, stark davon abhängig ist.

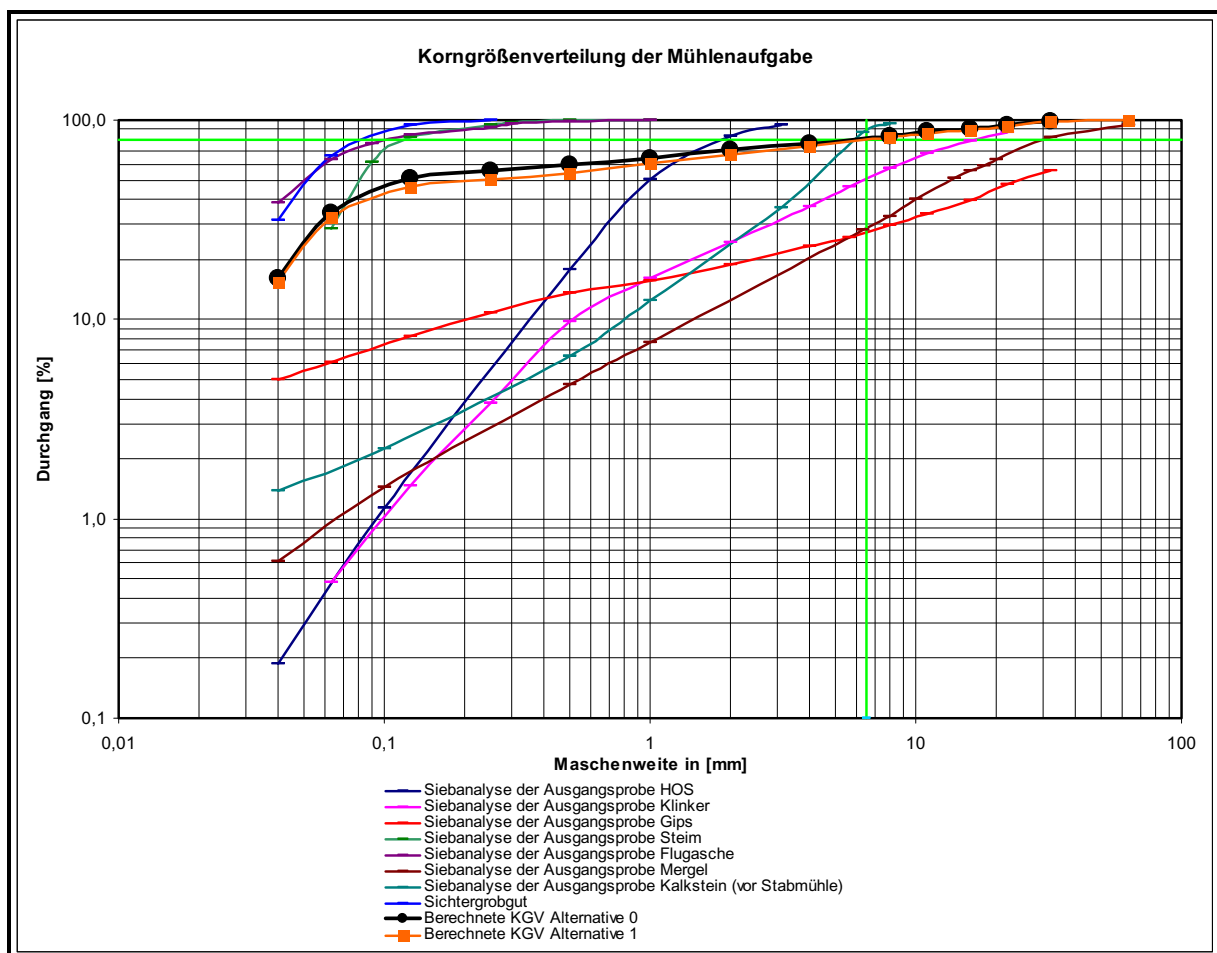


Abbildung 49 Korngrößenverteilung der Mühlenaufgabe

**Berechnungsmethode nach Bond:**

\*Literatur: Bond F. C.: Grinding ball size selection. Mining Engineering 10 (1958), 592.

\*\* Faustregel nach Papadakis

	F	K	w <sub>i</sub>	S	C	D	d <sub>max</sub> *	d <sub>max</sub> **
	Korngröße des Aufgabegutes in µm bei 80% Durchgang	Konstante: 335 - Trockenmühle mit offenem oder geschlossenem Kreislauf	Arbeitsindex in kWh/t auf 80% <100µm	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	relative Drehzahl n/n <sub>krit</sub> in %	lichter Mühlen-durchmesser in m	[mm]	[mm]
Klinker	6500	335	23,6	3,19	72,26	3,8	72	60
Klinker	6500	335	16	3,19	72,26	3,8	63	41
Hochofenschlacke	6500	335	38,2	2,9	72,26	3,8	82	97
Gips	6500	335	10	2,74	72,26	3,8	51	25
Mergel	6500	335	15,3	2,73	72,26	3,8	59	39
Kalkstein	6500	335	11,9	2,85	72,26	3,8	55	30
Flugasche								
Steinmehl								

Abbildung 50 Berechnung Größtkugel [14]

$$d_{\max} = 20,17 * \sqrt{\frac{F}{K}} * \sqrt[3]{\frac{w_i * \rho}{C * \sqrt{D}}} \dots \text{Berechnungsmethode nach Bond} \quad (19)$$

F... Korngröße des Aufgabegutes in µm bei 80 % Durchgang

K... Konstante: 335 für Trockenmühle mit offenem oder geschlossenem Kreislauf

W<sub>i</sub>... Arbeitsindex in kWh/tρ... Dichte in g/cm<sup>3</sup>C... relative Drehzahl n/n<sub>krit</sub> in %

D... lichter Mühlen-durchmesser

Die Zahl 20,17 ergibt sich aus der Umrechnung der Zoll und Fußeinheiten in das metrische System.

$$d_{\max} \approx i\sqrt{K} \dots \text{Faustregel nach Papadakis} \quad (20)$$

i = 13 für Zementklinker und 32 für Erz mittlerer Härte

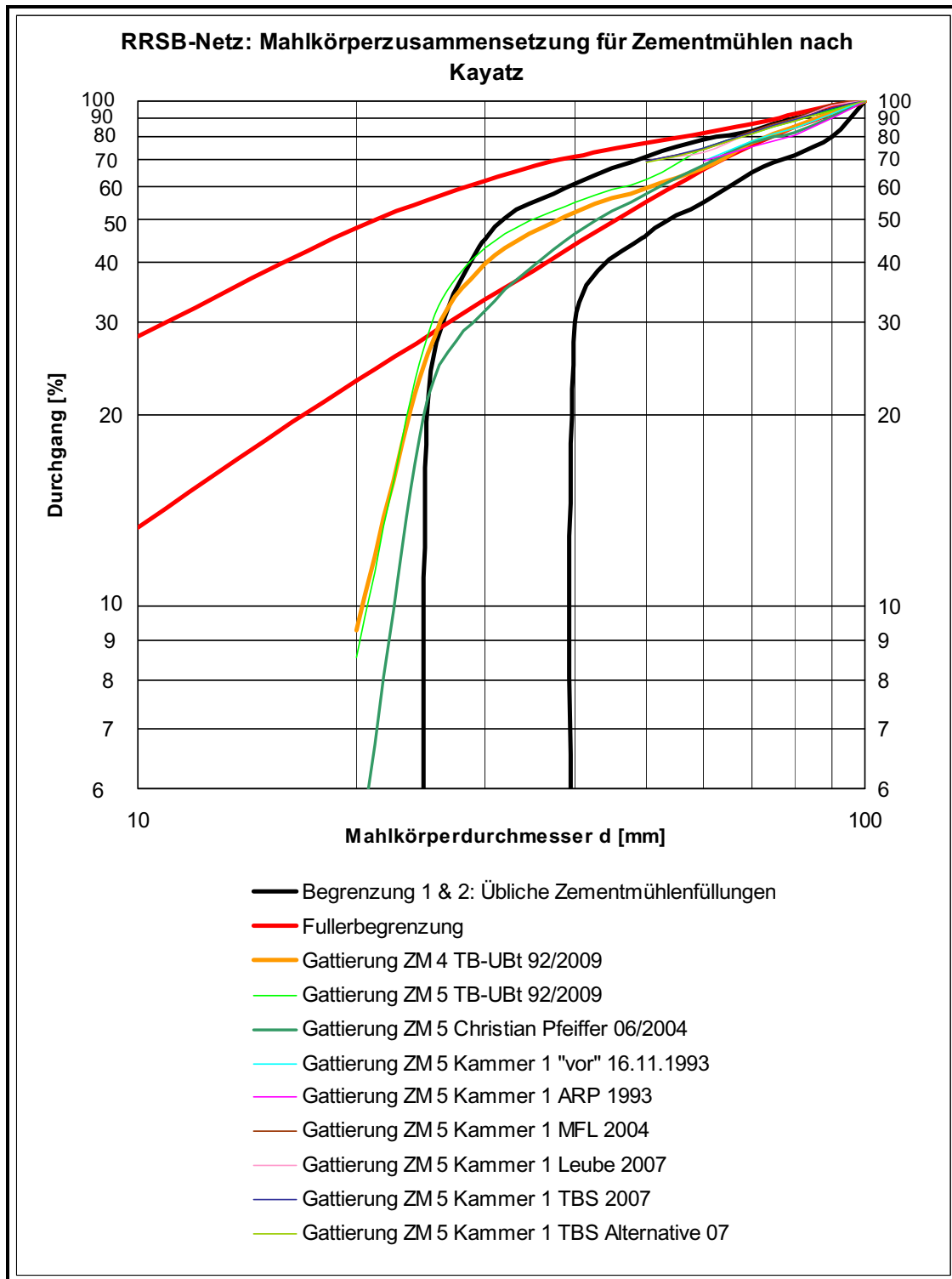
K... Korngröße



### **(b) Mahlkörperzusammensetzungen**

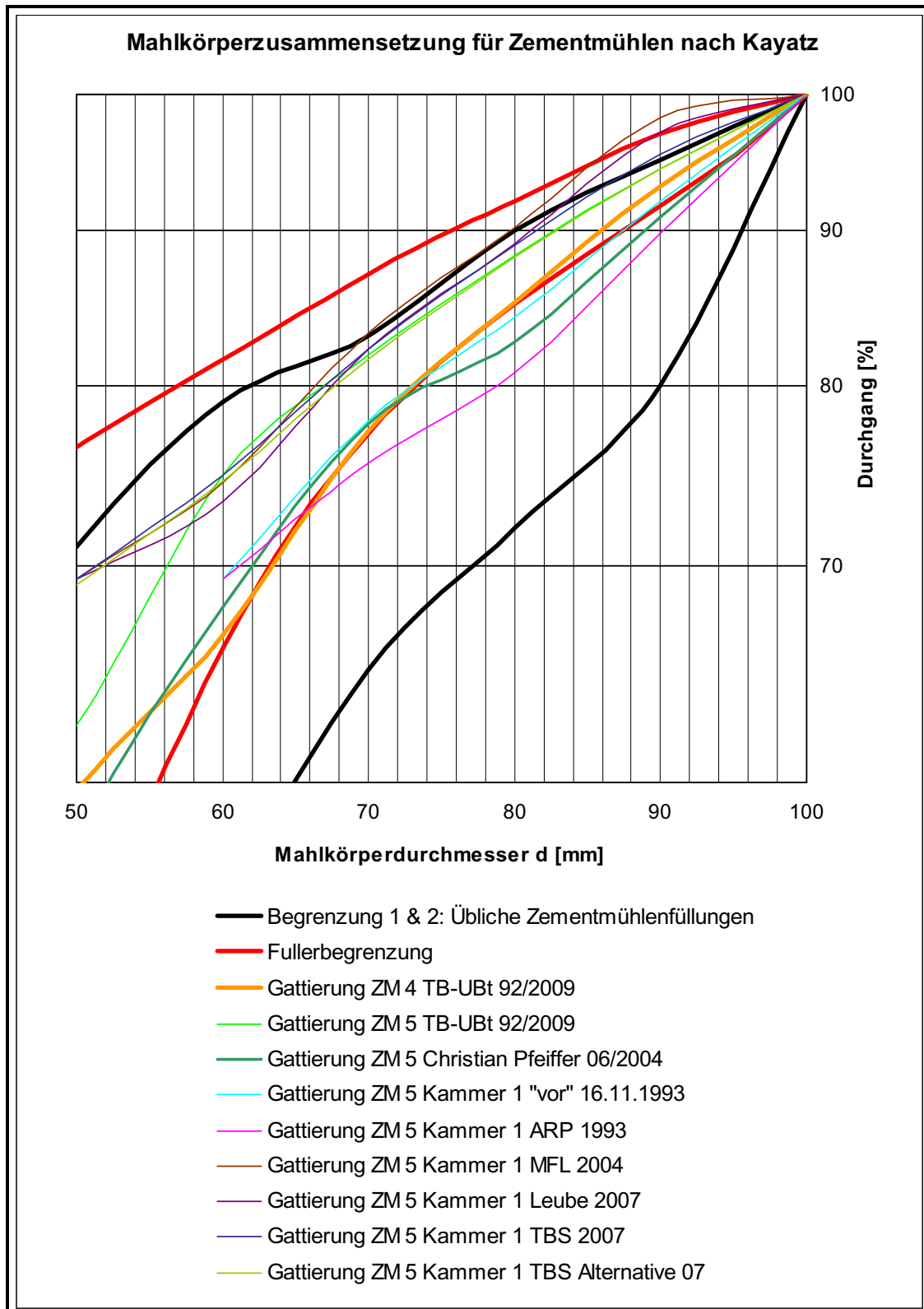
Die prozentuelle Zusammensetzungen und die Größe der Mahlkörper üblicher Zementmühlen sind in den beiden nachfolgenden Diagrammen abgebildet. Im Diagramm nach Kayatz sind die „Siebdurchgangslinien“ im log-log-Netz an der Ordinate und der Mahlkörperdurchmesser an der Abszisse abzulesen. Neben dem Bereich der üblichen Zementmühlengattierungen ist der Bereich der Fullerlinien eingezeichnet. Der Fullerbereich beschreibt den Idealbereich. In der Betontechnik begrenzt er die Zuschlagstoffkörnungen nach der größten Packungsdichte. In der Zementmahlung ist bei der Bestimmung der Mahlkörper auf einen möglichst geringen Mahlgutgehalt zu achten, da eine möglichst hohe Zerkleinerung erreicht werden soll. Kugelfüllungen stellen immer einen Kompromiss dar, da sowohl die Korngröße, als auch die Festigkeiten der unterschiedlichen Zumahlstoffe der Mühlenaufgabe oft großen Schwankungen ausgesetzt sind. [14]

In den folgenden Diagrammen wurden die Mahlkörperverteilungen bzw. die Vorschläge für Gattierungen verschiedener Institutionen eingezeichnet. Es kann dabei eine Zunahme der „Mahlkörperfeinheit“ im Laufe der Jahre beobachtet werden.



**Abbildung 51** Mahlkörperzusammensetzung nach Kayatz

Um vor allem Kammer I noch besser darstellen zu können wurde in Abbildung 52 keine logarithmische Darstellung der Abszisse gewählt.



**Abbildung 52** Mahlkörperzusammensetzung nach Kayatz (Ausschnitt)

### **Gattierungsvorschlag Kammer II**

Versuche mit Hochofenschlacke (3/10 mm) haben gezeigt, dass bei gleich bleibenden Bedingungen in einer Testmühle (1x0,5 m) feinere Kugelfüllungen (100 % < 20 mm Durchmesser) um 50-100 % höhere Blainewerte ergeben als grobe Kugelfüllungen (100 % < 50 mm Durchmesser). Dieselben Proben zeigten jedoch auch, dass sich der Siebrückstand nicht proportional dem Blainewert verhält. Die optimalen Werte für Siebrückstand und Blainewert konnten mit einer Mischung aus 40-25-20 Kugeln erreicht werden. [14]

Aus diesen Versuchen lässt sich schließen, dass eine feinere Gattierung der Kammer II möglicherweise eine bessere Zerkleinerung bedeuten würde. Dabei muss jedoch auch beachtet werden, dass es eventuell zu einem vermehrten Aufkommen des schwer mahlbaren Klinkers (C<sub>2</sub>S) kommen würde und dadurch die Schlitze der Austragswand verbreitert werden müssten (aktuell 10, ev. 12 mm).

## V. Optimierung / Ausblick

In den folgenden Abschnitten werden Erkenntnisse und Ergebnisse aus der Charakterisierung der Rohstoffe und der Ist-Zustandsanalyse sowie Literaturrecherchen gegenübergestellt. Es werden dabei auftretende Fragenstellungen gleichermaßen wie Vorschläge kurz erläutert und Optimierungspotentiale aufgezeigt. Die Ergebnisse der Abschlussbesprechung werden dabei miteinbezogen.

### 5.01 Gattierung

Grundsätzlich wäre eine noch feinere Gattierung der Kammer II möglich. Aus den Testmühlenversuchen kann geschlossen werden, dass eine feinere Gattierung der Kammer II möglicherweise eine bessere Zerkleinerung bedeuten würde. Dabei muss jedoch auch beachtet werden, dass es zu einem vermehrten Aufkommen des schwer mahlbaren Klinkers ( $C_2S$ ) kommen würde und dadurch die Schlitze der Austragswand „verbreitert“ werden müssten (aktuell 10, ev. 12 mm).

Grundsätzlich wäre auch nach der Größtmahlkörperberechnung nach Bond und Papadakis eine feinere Gattierung der Kammer I ohne Vorbrecher möglich. Die Möglichkeit der feineren Gattierung ist jedoch nicht nur vom Gipsgrößtkorn (4.02 Mahlfortschrittsdiagramm – Vorzerkleinerung des Gips-/Anhydritgemisches), sondern auch vom schwer zerkleinerbaren Klinker (hoher Anteil der  $C_2S$ -Phase) abhängig.

Durch ein niedriges Schüttgewicht (grobe Kugelfüllung) und relativ hohe Drehzahlen, wie sie vor allem bei Grobmahlungen gewählt werden, kommt es der Literaturrecherche zufolge häufig zum Abrollen des Kugelbetts. Dies kann ein Grund für die Entstehung von Mahlkörpern mit starken Deformierungen sein. Der Großteil der deformierten Mahlkörper entsteht in Kammer I und wird durch die Zwischenwand in die zweite Kammer eingetragen. Der Anteil der deformierten Mahlkörper wird im Einvernehmen mit der Betriebsleitung als gering eingestuft, es werden daher keine Maßnahmen gesetzt.

## 5.02 Vorzerkleinerung

Eine Implementierung eines Vorbrechers für Gips vor dem Vorratsbunker der Zementmühle, der Rohstoffhalde oder direkt beim Lieferanten ist durch die Gefahr der Bildung von Anpackungen im Bunker in einem nicht unproblematischen Licht zu sehen.

Sollte eine Vorzerkleinerung angedacht werden, so könnte diese entweder durch einen Brecher, der die Grobkornflanke der gesamten Mühlenaufgabe verarbeitet, oder mit Hilfe einer Gutbettwalzenmühlen [3], die alle Kornfraktionen der Mühlenaufgabe zerkleinert, realisiert werden. Zum Schutz der Gutbettwalzenmühlen müsste ein Brecher mit Vorabsiebung zur Zerkleinerung des Größtkorns vorgeschaltet werden. Vorzerkleinerungen sollten zur Optimierung der Energie im Kreislauf mit Vorabsiebung gestaltet werden.

## 5.03 Prozess

Eventuell würde die getrennte Mahlung des Sichtergröbguts - das sich aus etwa 65 % aus Klinker und 35 % aus HOS zusammensetzt - einen Vorteil bringen. Hierbei wird empfohlen, weitere energetische Berechnungen durchzuführen.

In der Literatur [17] wird der optimale mittlere Füllungsgrad ( $\varphi_K$ ) mit 26-28 % ( $\varphi_{K,Soll}$ ) angegeben. Die Verringerung des Mahlkörperfüllungsgrades ( $\varphi_{K,Ist} = 29\%$ ) um 1-2 % könnte Einsparungspotenzial von 1-2 kWh/t an Umlaufmassenstrom bezogen auf den Arbeitsbedarf schaffen. Die Variation von Mühlendrehzahl und/oder Mahlkörpergrößenverteilung führt zu keiner Veränderung im massebezogenen Energiebedarf, sondern beeinflusst die Feinheit des Mahlgutes. Die relative Drehzahl sollte ca. 0,75 betragen.

Eine Leistungssteigerung kann durch eine Kombimahlanlage – Rollenpresse/Gutbettwalzenmühle zur Vorzerkleinerung, dann Kugelmühle – realisiert werden. Energieeinsparungen von ca. 20 % und um etwa 35 % größere Durchsatzleistungen könnten dabei erreicht werden. Mit zunehmender Mahlfeinheit vermindert sich jedoch die Energieeinsparung. [17]

#### **5.04 Weitere Untersuchungen**

Der Hauptbestandteil des Klinkers, welcher sich vor der Austragswand der zweiten Mühlenkammer ansammelt, besteht zu einem großen Teil aus einer der  $C_2S$ -Phasen. Die Anteile der Phasen werden in der Drehrohrofenanlage gesteuert. Um eine Abschätzung des spezifischen Energieverbrauchs dieses Klinkers zu erhalten, ist eine weitere Mahlbarkeitsuntersuchung nötig.

Um sich weiteres Wissen bezüglich der selektiven Zerkleinerung und der gewünschten Korngrößenverteilungen der Zumahlstoffe anzueignen, wären die Korngrößenklassen des Zements einschließlich der Feinstfraktionen einzeln zu untersuchen.

Die Erstellung von Gesamtbilanzen (siehe HOS in dieser Arbeit), welche neben einem spezifischen Energieverbrauch auch spezifische Transportenergien bzw. Herstellenergien beinhalten, könnten Optimierungspotentiale aufzeigen.

In der Literatur (B. Schiller und H.-G. Ellerbrock: Mahlung und Eigenschaften von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen [18]) wird ein gerader Verlauf der natürlichen Bruchcharakteristik im Kornklassenbereich von  $1\ \mu\text{m}$  bis  $500\ \mu\text{m}$  prognostiziert. Da bei den Mahlbarkeitsuntersuchungen dieser Masterarbeit mehrere Wendepunkte ermittelt wurden, sind Untersuchungen  $< 40\ \mu\text{m}$  nötig, um den Verlauf der Korngrößenverteilung zu bestätigen.

---

**Literaturverzeichnis**

- [1] **A. Ehrenberg:** Untersuchungen zum Mahl widerstand von Hüttensand. In: ZKG International Vol.56 No.3/2003 Seite 70-80.
- [2] **H. Steiner:** Rahmengesetzmäßigkeiten der natürlichen Bruchcharakteristik von Mineralen und Gesteinen. In: Erzmetall 43 (1990), Nr.10 Seite 435-440.
- [3] **H. Steiner:** Zerkleinerungstechnische Eigenschaften von Gesteinen. In: Felsbau 16 (1998), Nr.5.
- [4] **G. Unland:** Die Beurteilung von Zementklinker, Teil1. In: ZKG International Vol. 54 No.2/2001.
- [5] **B. Schiller und H.-G. Ellerbrock:** Mahlbarkeit von Zement-Bestandteilen und Energiebedarf von Zementmühlen. Zement-Kalk-Gips (42. Jahrgang) Nr.11/1989 Seite 553-557.
- [6] **Luis Marcelo, Marko Crowell Cerqueira, João Jaime Iess:** Analysis of the grinding behaviour of various Portland cement clinkers. ZKG International Vol.62 No.4 2009 Page 95-104.
- [7] **H. Passow:** Die Hochofenschlacke in der Zementindustrie. Würzburg 1908.
- [8] **Vdz. Verein deutsche Zementindustrie:** Bestimmung der Mahlkörperverteilung in Mahlkammern.
- [9] **S. Matthes:** Mineralogie. 4. Auflage 1993 Springer-Lehrbuch
- [10] **Baumineral:** Leistungsfähigkeit von Flugasche nach DIN EN 450 als Betonzusatzstoff. Stand: 11/2001
- [11] **H. J. Steiner:** Characterization of Laboratory-Scale Tumbling Mills. Vortrag zum 8. Symposium "Zerkleinern", Stockholm 1994.
- [12] **H. Flachberger:** Theorie der Aufbereitungsprozesse. Skriptum des Instituts für Aufbereitung und Veredlung, Leoben 2009.
- [13] **F. Keil:** Zement – Herstellung und Eigenschaften. Springer-Verlag, 1971.
- [14] **H. Börner, Goslar:** Mahlkörperzusammensetzungen in Rohrmühlen der Zement- und Kalkindustrie. Zement-Kalk-Gips Nr. 8/1965 Seite 420-428.
- [15] **M. Deckers:** Über die Mahlbarkeit von Zementklinker. Zement-Kalk-Gips – Nr. 9 1972, Seite 445-448.
- [16] **L. Opoczky:** Verlauf der Korngrößenverteilung bei der gemeinsamen Mahlung einer Klinker-Kalkstein-Mischung. Zement-Kalk-Gips – Nr. 12 1992, Seite 648-652.



- [17] **B. Schiller und H.-G. Ellerbrock**: Energieaufwand zum Mahlen von Zement. Zement-Kalk-Gips – Nr.2 1988 (41. Jahrgang), Seite 57-63.
- [18] **B. Schiller und H.-G. Ellerbrock**: Mahlung und Eigenschaften von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen. Zement-Kalk-Gips - Nr. 7 1992 (45. Jahrgang), Seite 325-333.
- [19] **F.C. Bond**: Third Theory of Comminution, Trans. AIME, Vol. 193, 1952

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Berechnung der Korngrößenverteilung am Bsp. HOS.....	19
Tabelle 2 Stabmühlenauswertung Bsp. HOS .....	21
Tabelle 3 Kugelmühlenauswertung Bsp. HOS .....	23
Tabelle 4 Kalibrierung vor Mahlung (* 2 mm entsprechen 1 Skaleneinheit).....	23
Tabelle 5 Kalibrierung nach Mahlung (* 2 mm entsprechen 1 Skaleneinheit).....	24
Tabelle 6 Klinker - Energieeintrag.....	38
Tabelle 7 Proportionalität nach <i>Mußgnug</i> zwischen Schüttdichte und Mahlbarkeit .....	41
Tabelle 8 HOS Analyseverzeichnis.....	46
Tabelle 9 HOS - Klinker Energieeintrag.....	48
Tabelle 10 Gips/Anhydritgemisch - Mohskala und Dichte.....	54
Tabelle 11 Gips/Anhydritgemisch - Analysenverzeichnis.....	54
Tabelle 12 Gips/Anhydritgemisch - Energieeintrag.....	56
Tabelle 13 Mergel - Analyseverzeichnis.....	60
Tabelle 14 Mergel - Energieeintrag .....	61
Tabelle 15 Kalkstein - Analysenverzeichnis.....	65
Tabelle 16 Kalkstein - Energieeintrag.....	66
Tabelle 17 Flugasche - Analyseverzeichnis .....	68
Tabelle 18 Flugasche - Energieeintrag.....	69
Tabelle 19 Steinmehl - Analyseverzeichnis .....	71
Tabelle 20 Steinmehl - Energieeintrag (KM... Kugelmühle).....	72
Tabelle 21 Zusammenfassung Rittingerkoeffizient und Arbeitsindex nach Bond .....	73

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Rittingerkoeffizienten der Zementzumahlstoffe .....	10
Abbildung 2 Zusammenfassung der nasschemischen Untersuchungen und der RFA.....	10
Abbildung 3 Fließbild von Teilstromvermahlungen; 1... Kugelmühle, 2... Sichter, 3... Vertikalmühle oder Kugelmühle, 4... Alternative Rückführung, 5... Mühlenaufgabe.....	11
Abbildung 4 Schematische Darstellung der Stufen (i-1) bis (i+1) einer Optimierten Zerkleinerungskette. S = analysenscharfe Siebung, Z = Zerkleinerungsaggregat. Quelle: [3] .....	14
Abbildung 5 Schematische Darstellung zwischen dem spezifischen Energieaufwand und der spezifischen Oberfläche. Quelle: [3].....	15
Abbildung 6 Schematische Darstellung von Produkten der Optimierten Zerkleinerungskette. Quelle: [3] .....	16
Abbildung 7 Fließbild der Mahlbarkeitsuntersuchung.....	20
Abbildung 8 Kalibriergerade vor und nach der Mahlung .....	24
Abbildung 9 Prinzipskizze He-Pyknometer .....	26
Abbildung 10 Blaineauswertung Bsp. HOS.....	27
Abbildung 11 Prinzipskizze Blainewertmessung.....	28
Abbildung 12 Eigenschaften der Klinkerphasen [13] .....	30
Abbildung 13 Klinker - GGS-Netz .....	32
Abbildung 14 Klinker - RRSB Netz .....	33
Abbildung 15 Klinker - Korngrößenverteilung der Kreislaufmahlung.....	34
Abbildung 16 Klinker - Korngrößenverteilung der Durchlaufmahlung .....	35
Abbildung 17 Klinker - Analysenverzeichnis.....	36
Abbildung 18 Klinker - Energieeintrag.....	37
Abbildung 19 Spannweite der Mahlbarkeit von Hüttensand und Klinker. Quelle: [1].....	39
Abbildung 20 Energiebedarf von Hüttensand. Quelle: [1] .....	40
Abbildung 21 HOS - GGS-Netz der Kreislaufmahlung.....	43
Abbildung 22 HOS - Korngrößenverteilung der Durchlaufmahlung.....	44
Abbildung 23 HOS - RRSB-Netz .....	45
Abbildung 24 HOS - Energieeintrag.....	47
Abbildung 25 Gips/Anhydritgemisch - GGS-Netz Kreislaufmahlung .....	51
Abbildung 26 Gips/Anhydritgemisch - GGS-Netz Durchlaufmahlung.....	52
Abbildung 27 Gips/Anhydritgemisch - RRSB-Netz.....	53

---

Abbildung 28 Gips/Anhydritgemisch - Spezifischer Energieeintrag.....	55
Abbildung 29 Mergel - GGS-Netz.....	58
Abbildung 30 Mergel - RRSB-Netz.....	59
Abbildung 31 Mergel - Spezifischer Energieeintrag.....	61
Abbildung 32 Kalkstein - GGS-Netz.....	63
Abbildung 33 Kalkstein - RRSB-Netz.....	64
Abbildung 34 Kalkstein - Spezifischer Energieeintrag.....	65
Abbildung 35 Flugasche - GGS-Netz.....	68
Abbildung 36 Flugasche - Spezifischer Energieeintrag.....	69
Abbildung 34 Steinmehl - GGS-Netz.....	70
Abbildung 38 Steinmehl - Spezifischer Energieeintrag.....	71
Abbildung 39 Gegenüberstellung der Rezeptkosten.....	75
Abbildung 40 Mahlfortschrittsdiagramm – Ordinate: Siebrückstand der einzelnen Fraktionen; Abszisse: Abstand zur Mühlenaufgabewand; ZW... Zwischenwand.....	77
Abbildung 41 Siebrückstandsdiagramm: Vergleich 11.11.09 mit 11.08.08.....	78
Abbildung 42 Mahlfortschrittsdiagramm - Korngrößenverteilung der Meterproben (KI).....	79
Abbildung 43 Mahlfortschrittsdiagramm - Korngrößenverteilung der Meterproben (KII).....	79
Abbildung 44 Nasschemische und Röntgenfluoreszenz Analysen der Meterproben.....	81
Abbildung 45 Werteberechnung der Meterproben.....	83
Abbildung 46 Optische Beurteilung des Grobguts der Zementmühle.....	84
Abbildung 47 Mahlkörperverteilung Mahlkammer II (Vdz).....	86
Abbildung 48 Deformierte Mahlkörper.....	86
Abbildung 49 Korngrößenverteilung der Mühlenaufgabe.....	87
Abbildung 48 Berechnung Größtkugel [14].....	88
Abbildung 51 Mahlkörperzusammensetzung nach Kayatz.....	90
Abbildung 52 Mahlkörperzusammensetzung nach Kayatz (Ausschnitt).....	91

## Anhang

<b>ANHANG</b> .....	<b>1</b>
Probenahme / Probenvorbereitung .....	2
Tabellen Klinker.....	4
Tabellen Hochofenschlacke / Hüttensand .....	7
Tabellen Gips / Anhydritgemisch .....	10
Tabellen Mergel .....	13
Tabellen Kalkstein.....	15
Tabelle Flugasche.....	17
Tabelle Steinmehl.....	17

**Probenahme / Probenvorbereitung**

In der Besprechung am 1. Juli 2009 wurden die Rohstoffe für die Mahlbarkeitsuntersuchung und das Probenahmeschema festgelegt. Teilnehmende Personen waren Waldl, Lindenthaler, Kranabitzl, Mlekusch und Kurzböck.

Die Feuchtebestimmung sowie die Korngrößenanalysen aller Produkte erfolgten im Werkslabor von Leube. Um repräsentative Feuchtwerte zu erhalten, wurden Monatswerte statistisch ausgewertet. Damit sollte der Verfälschung durch lange Liegezeiten entgegengewirkt werden.

**Klinker:**

Für die Untersuchungen wurde der Klinker der Drehrohfenlinie 2 herangezogen, da angenommen wurde, dass dieser Klinker die geringsten Eigenschaftsabweichungen zu jenem der in Bau befindlichen Ofenanlage aufweisen wird.

Um eine repräsentative Probe zu erhalten, erfolgte die Probenahme über den Zeitraum einer Schicht. Die Sammelprobe wurde aus fünf Einzelproben zu je ca. 8 kg zusammengestellt. Die Probenahme wurde von Kurzböck durchgeführt. Probenahmedatum war Freitag, der 3. Juli 2009. Die Gesamtprobenmasse betrug 30-40 kg, bezogen auf das Größtkorn (30/40 mm).

**Hüttensand (HOS):**

Die Probenahme des Hüttensandes wurde durch werksinternes Personal unter der Leitung von Lindenthaler durchgeführt. Der Probenahmezyklus wurde auf eine Schicht begrenzt und die Probenmenge auf 15-20 kg festgelegt. Das Probenahmedatum war der 1. Juli 2009.

**Gipsgemisch (Anhydrit – Knorpelgips) der Firma Moldan:**

Da es sich bei diesem Material um eine angelieferte Mischung handelt, wurde eine Probenahmezeit über 3 Tage vereinbart (1. Juli 2009 – 3. Juli 2009). Es erfolgen vier bis fünf Lastkraftwagenlieferungen pro Tag. Durch die verlängerte Probenahmezeit wurde versucht, einer schlechten Vergleichmäßigung des Gemisches entgegenzuwirken. Ausgehend vom Größtkorn wurde eine Gesamtprobenmenge von ca. 240 kg festgelegt. Eine Teilprobe davon

wurde beim herstellenden Betrieb, der Firm Moldan auf den Gehalt an Anhydrit und Gips analysiert.

**Flugasche:**

Die Sammelprobe der Flugasche wurde durch das Qualitätslabor aus einer LKW-Lieferung entnommen. Zur Probeteilung wurde die Viertelmethode angewandt. Proben wurden für Leoben und das Qualitätslabor hergestellt.

**Steinmehl:**

Das von einer Walzenschüsselmühle erzeugte Produkt ist eine Mischung aus ca. 75 % Mergel und 25 % Hochofenschlacke aus Donawitz. Die Probemenge wurde mit ca. 15 kg fixiert. Die Probenahme erfolgte durch Lindenthaler. Es wurden Teilproben an zwei Tagen genommen und zu einer Gesamtprobe vereinigt.

**Kalkstein:**

Es wurde das sogenannte RSO 20/50 Material vom Kalkwerk Tagger in Golling beprobt. Die ca. 30 kg Probe wurden mit einem Mitarbeiter an einem Förderband entnommen. Die Probe wurde vor der Probeteilung mit einem Brecher zerkleinert.

**Mergel (AMZ):**

Um eine repräsentative Probe zu erhalten, wurde der mobile Brecher stillgesetzt und die Probe dahinter genommen. Von einer Teilprobe wurde die Korngrößenverteilung bestimmt.

## Tabellen Klinker

### Siebanalyse der Ausgangsprobe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	$n_{GGs}$	$k_{aqu}$	$a_v$	$a_m$
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
32	1370	6,30	6,30	93,70				
22	1650	7,59	13,89	86,11	0,23	26447,95	3,50	1,09
16	1720	7,91	21,80	78,20	0,30	18730,40	4,94	1,54
11	2150	9,89	31,69	68,31	0,36	13244,92	6,98	2,18
8	2390	10,99	42,68	57,32	0,55	9384,86	9,86	3,07
6	2455	11,29	53,97	46,03	0,61	6701,44	13,80	4,31
4	2015	9,27	63,23	36,77	0,67	4740,37	19,52	6,09
2	2710	12,46	75,70	24,30	0,60	2839,43	32,58	10,16
1	1790	8,23	83,93	16,07	0,60	1419,68	65,16	20,33
0,5	1370	6,30	90,23	9,77	0,72	713,29	129,70	40,45
0,25	1295	5,96	96,18	3,82	1,36	365,79	252,91	78,89
0,125	510	2,35	98,53	1,47	1,38	183,03	505,45	157,66
0,063	215	0,99	99,52	0,48	1,63	92,69	998,05	311,31
0,040	57	0,26	99,78	0,22**	1,73	51,27	1804,50	562,85
0	48	0,22	100	0			4934*	1539,19
Summe	21745	100						23,64

Kornformfaktor =  $k_{aqu} * a_v$  : 9,251\*

\* Kornformfaktor und Blainemessung < 0,040  $\mu\text{m}$  der Analyse des 2. Brecherproduktes entnommen

\*\*  $D_{0,04\text{ mm}}$  aus Diagramm abgelesen

### Siebanalyse nach 1. Brecherstufe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	$n_{GGs}$	$k_{aqu}$	$a_v$	$a_m$
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
14	0		0	100				
10	1450	17,00	17,00	83,00	0,55	11838,16	7,81	2,44
8	690	8,09	25,09	74,91	0,46	8942,77	10,34	3,23
6,3	758	8,89	33,97	66,03	0,53	7100,26	13,03	4,06
0	5632	66,03	100	0				
Summe	8530	100						

Kornformfaktor =  $k_{aqu} * a_v$  : 9,251\*

\*Kornformfaktor der 2. Brecherstufe

### Siebanalyse nach 2. Brecherstufe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	$n_{GGs}$	$k_{aqu}$	$a_v$	$a_m$	Massenstrom
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]	
6,3	0		0	100					
3,15	3710	41,81	41,81	58,19	0,78	4505,05	20,53	6,41	0,6985
1	2488,5	28,04	69,85	30,15	0,57	1789,03	51,71	16,13	0,3015
0,5	799,5	9,01	78,86	21,14	0,51	707,45	130,77	40,79	
0,1	1429,4	16,11	94,96	5,04	0,89	242,98	380,74	118,76	
0,04	288,1	3,25	98,21	1,79	1,13	66,07	1400,29	436,77	
0	158,8	1,79	100	0			4934,62	1539,19	
Summe	8874,3	100						71,72	

Kornformfaktor =  $k_{aqu} * a_v$  : 9,251

## Siebanalyse nach Stabmühle

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{\text{GGS}}$ [1]	$k_{\text{aqu}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$a_v$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$a_m$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1	0		0	100				
0,5	113,84	45,72	45,72	54,28	0,88	717,96	128,85	39,96
0,1	84,52	33,95	79,67	20,33	0,61	228,92	404,12	125,31
0,04	26,23	10,53	90,20	9,80	0,80	64,57	1398,80	433,75
0	24,40	9,80	100	0			6802,90	2109,50
Summe	248,99	100						313,22

Massen-  
strom

0,6985

Kornformfaktor =  $k_{\text{aqu}} * a_v$  : 9,032

## Berechnete KGV nach Stabmühle

Maschenweite [mm]	Inhalt [%%]	I-Verteilung [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{\text{GGS}}$ [1]	$k_{\text{aqu}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$a_v$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$a_m$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1	0		0	100				
0,5	34,65	43,90	43,90	56,10	0,83	716,59	126,96	39,44
0,1	28,57	36,19	80,08	19,92	0,64	230,56	394,59	122,57
0,04	8,34	10,56	90,65	9,35	0,82	64,69	1406,32	436,86
0	7,38	9,35	100	0			6239,58	1938,25
Summe	79	100						289,12

Massen-  
strom

0,4390

0,5610

Kornformfaktor =  $k_{\text{aqu}} * a_v$  : 9,098

## Siebanalyse nach Kugelmühle

Zerkleinerung der Fraktion 1000/500 $\mu\text{m}$ 

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{\text{GGS}}$ [1]	$k_{\text{aqu}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$a_v$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$a_m$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
0,5	416,5		0	100				
0,1	131,46	81,80	81,80	18,20	1,06	251,56	353,36	109,40
0,04	16,13	10,04	91,84	8,16	0,88	64,92	1369,30	423,93
0	13,11	8,16	100	0			7556,86	2339,59
Summe	160,7	100						322,91

Massen-  
strom

0,4390

Kornformfaktor =  $k_{\text{aqu}} * a_v$  : 8,889\* Dichte: mittlere Dichte der Fraktionen <40  $\mu\text{m}$  und 100/40  $\mu\text{m}$ 

## Berechnete KGV nach Kugelmühle

Maschenweite [mm]	Inhalt [%%]	I-Verteilung [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{\text{GGS}}$ [1]	$k_{\text{aqu}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$a_v$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$a_m$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
0,5	0		0	100				
0,1	56,21	74,58	74,58	25,42	0,85	240,92	373,83	115,95
0,04	10,33	13,71	88,29	11,71	0,85	64,79	1390,07	431,17
0	8,83	11,71	100	0			6817,82	2114,75
Summe	75	100						393,30

Kornformfaktor =  $k_{\text{aqu}} * a_v$  : 9,006

## Siebanalyse der 1. Durchlaufmahlung

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{\text{GGS}}$ [1]	$k_{\text{aqu}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$a_v$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$a_m$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1	0		0	100				
0,5	343,57	43,31	43,31	56,69	0,82	716,17	131,60	41,45
0,2	267,72	33,75	77,06	22,94	0,99	327,12	288,11	90,74
0,1	76,51	9,65	86,71	13,29	0,79	143,05	658,83	207,50
0,04	58,73	7,40	94,11	5,89	0,89	64,98	1450,43	456,81
0	46,71	5,89	100	0			6931,63	2183,10
Summe	793,24	100						230,97

Kornformfaktor =  $k_{\text{aqu}} * a_v$  : 9,425



**Siebanalyse der 2. Durchlaufmahlung**

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	$n_{\text{GGS}}$	$k_{\text{aqu}}$	$a_v$	$a_m$
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1	0		0	100				
0,5	18,61	2,45	2,45	97,55	0,04	694,13	132,52	41,33
0,2	227,52	29,98	32,43	67,57	0,40	314,05	292,90	91,36
0,1	183,34	24,16	56,59	43,41	0,64	142,20	646,85	201,76
0,04	167,99	22,14	78,72	21,28	0,78	64,48	1426,50	444,95
0	161,47	21,28	100	0			7836	2444,05
Summe	758,92	100						695,62

Kornformfaktor\* =  $k_{\text{aqu}} \cdot a_v$  9,199

\* Kornformfaktor berechnet

**Siebanalyse der 3. Durchlaufmahlung**

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	$n_{\text{GGS}}$	$k_{\text{aqu}}$	$a_v$	$a_m$
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1			0	100				
0,5		0,82	0,82	99,18	0,01	693,47	132,65	41,60
0,2		10,04	10,86	89,14	0,12	307,90	298,75	93,70
0,1		12,94	23,80	76,20	0,23	139,88	657,59	206,25
0,04	397,18	32,05	55,85	44,15	0,60	63,67	1392,33	436,71
0	340,03	44,15	100	0			8661	2716,51
Summe	737,2	100						1375,69

Kornformfaktor\* =  $k_{\text{aqu}} \cdot a_v$  8,865

\* Kornformfaktor berechnet

\*\* KGV berechnet

**Siebanalyse der 4. Durchlaufmahlung**

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	$n_{\text{GGS}}$	$k_{\text{aqu}}$	$a_v$	$a_m$
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1	0		0	100				
0,5	0		0	100				
0,2	0,53	0,08	0,08	99,92	0,00	305,45	285,89	89,67
0,1	50,20	7,33	7,41	92,59	0,11	139,24	627,16	196,71
0,04	253,46	37,01	44,42	55,58	0,56	63,50	1375	431,35
0	380,69	55,58	100	0			8961	2810,72
Summe	684,88	100						1736,44

Kornformfaktor =  $k_{\text{aqu}} \cdot a_v$  : 8,732

## Tabellen Hochofenschlacke / Hüttensand

### Siebanalyse der Ausgangsprobe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGs</sub>	k <sub>äqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>	Massenstrom
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]	
18	0	0	0	100					
3,15	268	5,43	5,43	94,57	0,03	6706,66	27,73	9,38	
2	545	11,03	16,46	83,54	0,27	2500,21	74,37	25,16	49,34
1	1624,5	32,89	49,34	50,66	0,72	1426,80	130,32	44,09	
0,5	1620	32,79	82,14	17,86	1,50	735,81	252,71	85,49	
0,1	826,5	16,73	98,87	1,13	1,72	285,66	650,94	220,22	50,66
0,04	46,6	0,94	99,81	0,19	1,97	69,85	2661,93	900,57	
0	9,2	0,19	100	0			6574,43	2224,22	
Summe	4939,8	100						95,31	

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> 18,595

### Siebanalyse nach Stabmühle (Kreislaufmahlung) - Zerkleinerung der Fraktion 3,15 / 1000 µm

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGs</sub>	k <sub>äqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>	Massenstrom
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]	
1	0	0	0	100					
0,5	176,08	71,75	71,75	28,25	1,82	744,98	168,62	57,44	
0,1	60,99	24,85	96,61	3,39	1,32	264,97	474,08	161,48	49,34
0,04	6,11	2,49	99,10	0,90	1,44	67,49	1861,28	634,00	
0	2,22	0,90	100	0			5485,69	1868,55	
Summe	245,4	100						114,03	

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> 12,562

### Berechnete KGV nach Stabmühle

Maschenweite	Inhalt	I-Verteilung	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGs</sub>	k <sub>äqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>	Massenstrom
[mm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]	
1	0	0	0	100					
0,5	52,02	69,35	69,35	30,65	1,71	741,62	210,59	71,49	69,35
0,1	20,74	27,65	97,00	3,00	1,44	271,66	574,88	195,15	
0,04	1,71	2,28	99,28	0,72	1,55	68,00	2266,78	769,49	
0	0,54	0,72	100	0			6036,98	2049,33	30,65
Summe	75	100						135,82	

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 15,617

### Siebanalyse nach Kugelmühle (Kreislaufmahlung) - Zerkleinerung der Fraktion 1000 / 500 µm

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGs</sub>	k <sub>äqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>	Massenstrom
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]	
0,5	0	0	0	100					
0,2	153,73	75,41	75,41	24,59	1,53	339,44	361,00	123,02	
0,1	28,7	14,08	89,49	10,51	1,23	145,57	841,81	286,86	69,35
0,04	14,93	7,32	96,81	3,19	1,30	66,85	1833,04	624,64	
0	6,5	3,19	100	0			6010,39	2048,14	
Summe	203,86	100						244,20	

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 12,254

## Berechnete KGV nach Kugelmühle

Maschenweite	Inhalt	I-Verteilung	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>aqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
0,5	0	0	0	100				
0,1	70,54	89,58	89,58	10,42	1,40	269,58	492,79	167,73
0,04	5,78	7,34	96,91	3,09	1,33	66,97	1965,97	669,15
0	2,43	3,09	100	0			6018,54	2048,50
Summe	79	100						262,60

Kornformfaktor = k<sub>aqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 13,285

## Siebanalyse der 1. Durchlaufmahlung (P37HOS, P38HOS)

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>aqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
1	0	0	0	100				
0,5	389,54	48,75	48,75	51,25	0,96	720,32	157,34	53,91
0,2	288,2	36,07	84,81	15,19	1,33	334,83	338,48	115,99
0,1	66,18	8,28	93,09	6,91	1,14	145,05	781,31	267,73
0,04	36,95	4,62	97,72	2,28	1,21	66,42	1706,19	584,65
0	18,24	2,28	100	0			6180,99	2118,00
Summe	799,1	100						165,66

Kornformfaktor = k<sub>aqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 11,333

## Siebanalyse der 2. Durchlaufmahlung (P39HOS, P40HOS)

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>aqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
1	0	0	0	100				
0,5	91,3	11,79	11,79	88,21	0,18	698,16	161,92	55,49
0,2	380,86	49,18	60,97	39,03	0,89	324,92	347,90	119,22
0,1	158,6	20,48	81,45	18,55	1,07	144,69	781,28	267,73
0,04	95,02	12,27	93,72	6,28	1,18	66,31	1704,84	584,23
0	48,62	6,28	100	0			6738,08	2309,04
Summe	774,4	100						336,67

Kornformfaktor = k<sub>aqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 11,304

## Siebanalyse der 3. Durchlaufmahlung (P33HOS, P34HOS)

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>aqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
1	0	0	0	100				
0,5	13,76	1,84	1,84	98,16	0,03	693,89	127,82	43,76
0,2	267,5	35,86	37,70	62,30	0,50	316,14	280,55	96,04
0,1	224,28	30,06	67,76	32,24	0,95	143,99	616,00	210,88
0,04	155,64	20,86	88,62	11,38	1,14	66,10	1341,82	459,35
0	84,88	11,38	100	0			6861,96	2349,08
Summe	746,1	100						461,72

Kornformfaktor = k<sub>aqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 8,869

## Siebanalyse der 4. Durchlaufmahlung (P41HOS, P42HOS)

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>aqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
1	0	0	0	100				
0,5	1,30	0,18	0,18	99,82	0,00	693,22	133,00	45,67
0,2	93,69	12,94	13,12	86,88	0,15	308,65	298,71	102,57
0,1	268,243439	37,04	50,16	49,84	0,80	143,14	644,11	221,17
0,04	240,709695	33,24	83,40	16,60	1,20	66,39	1388,79	476,87
0	120,235012	16,60	100	0			6461,10	2218,58
Summe	724,18	100						622,13

Kornformfaktor = k<sub>aqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 9,220

**Siebanalyse der 5. Durchlaufmahlung** (P43HOS, P44HOS)

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>äqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
1	0	0	0	100				
0,5	0	0	0	100				
0,2	17,95	2,53	2,53	97,47	0,03	306,02	289,83	100,29
0,1	210,111063	29,58	32,11	67,89	0,52	141,54	626,62	216,82
0,04	278,632357	39,23	71,34	28,66	0,94	65,22	1362,04	471,29
0	203,603892	28,66	100	0			6859,17	2373,41
Summe	710,3	100						931,88

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 8,883**Siebanalyse der 6. Durchlaufmahlung** (P45HOS, P46HOS)

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>äqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
1	0	0	0	100				
0,5	0	0,00	0,00	100,00				
0,2	1,90688109	0,28	0,28	99,72	0,00	305,49	290,33	100,67
0,1	114,081234	16,72	17,00	83,00	0,26	140,10	633,09	219,53
0,04	308,200112	45,18	62,18	37,82	0,86	64,84	1255,73	435,43
0	258,039344	37,82	100	0			7272,01	2521,61
Summe	682,2	100						1187,45

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 8,142

## Tabellen Gips / Anhydritgemisch

Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
= 1mm 2,74  
< 1mm 2,51

**Siebanalyse der Ausgangsprobe**

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	n <sub>ggs</sub> [1]	k <sub>äqu</sub> [μm]	a <sub>v</sub> [cm <sup>-1</sup> ]	a <sub>m</sub> [cm <sup>2</sup> /g]	Massenstrom
80				100					
32	35440	44,30	44,30	55,70	0,64	51087,80	2,23	0,81	
22	6260	7,83	52,13	47,88	0,40	26503,24	4,30	1,57	70,45
16	6720	8,40	60,53	39,48	0,61	18778,44	6,07	2,21	
11	4540	5,68	66,20	33,80	0,41	13253,20	8,60	3,13	
8	3400	4,25	70,45	29,55	0,42	9374,65	12,16	4,43	
5,6	3040	3,80	74,25	25,75	0,39	6685,19	17,06	6,21	
4	1970	2,46	76,71	23,29	0,30	4723,89	24,14	8,80	
2	3590	4,49	81,20	18,80	0,31	2806,91	40,62	14,80	
1	2520	3,15	84,35	15,65	0,26	1400,98	81,39	32,39	
0,5	1700	2,13	86,48	13,53	0,21	698,98	163,12	64,92	29,55
0,25	2200	2,75	89,23	10,78	0,33	351,13	324,72	129,23	
0,125	2000	2,50	91,73	8,27	0,38	175,94	648,06	257,91	
0,063	1710	2,14	93,86	6,14	0,44	88,52	1288,05	512,61	
0,04	910	1,14	95,00	5,00	0,45	50,16	2273,21	904,67	
0	4000	5,00	98,8625	1,1375			8270	3291,18	
Summe	80000	100						200,36	

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 11,402

Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
≥ 6,3mm 2,74  
< 6,3mm 2,72

**Siebanalyse nach ersten Brecherstufe**

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	n <sub>ggs</sub> [1]	k <sub>äqu</sub> [μm]	a <sub>v</sub> [cm <sup>-1</sup> ]	a <sub>m</sub> [cm <sup>2</sup> /g]	Massenstrom
18				100					
14	1498	11,36	11,36	88,64	0,48	15872,83	7,18	2,62	
10	2410	18,28	29,64	70,36	0,69	11852,97	9,62	3,51	43,73
8	650	4,93	34,57	65,43	0,33	8937,80	12,76	4,65	
6,3	1208	9,16	43,73	56,27	0,63	7103,73	16,05	5,85	
3,15	1825	13,84	57,57	42,43	0,40	4419,45	25,80	9,50	
1	1728	13,11	70,68	29,32	0,32	1734,67	65,73	24,21	
0,5	758	5,75	76,43	23,57	0,31	701,90	162,44	59,83	56,27
0,1	1564	11,86	88,29	11,71	0,43	220,51	517,07	190,43	
0,04	652	4,95	93,23	6,77	0,60	63,68	1790	659,39	
0	892	6,77	100	0			8270	3045,72	
Summe	13185	100						270,88	

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 11,402

Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
< 6,3mm 2,74

**Sieblinie nach zweiter Brecherstufe**

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	n <sub>ggs</sub> [1]	k <sub>äqu</sub> [μm]	a <sub>v</sub> [cm <sup>-1</sup> ]	a <sub>m</sub> [cm <sup>2</sup> /g]	Massenstrom
6,3				100					
3,15	2673	50,10	50,10	49,90	0,99	4526,95	21,18	7,72	
1	1197	22,44	72,54	27,46	0,52	1772,36	54,09	19,71	
0,5	340	6,37	78,91	21,09	0,38	703,75	136,21	49,63	43,73
0,1	566	10,61	89,52	10,48	0,43	220,50	434,73	158,41	
0,04	236	4,42	93,95	6,05	0,60	63,68	1505	548,51	
0	323	6,05	100	0			12194	4443,42	
Summe	5335	100						321,54	

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 9,586

Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
< 6,3mm 2,73

**Berechnete KGV nach 2. Brecherstufe**

Maschenweite [mm]	Inhalt [%]	I-Verteilung [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	n <sub>ggs</sub> [1]	k <sub>äqu</sub> [µm]	a <sub>v</sub> [cm <sup>-1</sup> ]	a <sub>m</sub> [cm <sup>2</sup> /g]
6,3				100				
3,15	29,70	39,39	39,39	60,61	0,71	4476,07	23,70	8,69
1	17,19	22,80	62,19	37,81	0,41	1751,50	60,56	22,20
0,5	6,02	7,99	70,18	29,82	0,34	702,67	150,96	55,34
0,1	11,31	15,01	85,18	14,82	0,43	220,51	481,06	176,34
0,04	4,72	6,26	91,44	8,56	0,60	63,68	1666	610,61
0	6,45	8,56	100	0			9986	3660,62
Summe	75,39	100						390,96

62,19

37,81

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 10,608

Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
< 1mm 2,78

**Siebanalyse nach Stabmühle (Kreislaufmahlung) Fraktion 6300 / 1000 µm**

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	n <sub>ggs</sub> [1]	k <sub>äqu</sub> [µm]	a <sub>v</sub> [cm <sup>-1</sup> ]	a <sub>m</sub> [cm <sup>2</sup> /g]
1				100				
0,5	108,90	44,07	44,07	55,93	0,84	716,72	151,35	54,42
0,1	83,45	33,77	77,84	22,16	0,58	227,22	477,41	171,66
0,04	25,51	10,32	88,16	11,84	0,68	64,06	1693	608,87
0	29,26	11,84	100	0			11601	4171,42
Summe	247,12	100						638,72

62,19

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 10,848

Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
< 1mm 2,76

**Berechnete KGV nach Stabmühle**

Maschenweite [mm]	Inhalt [%]	I-Verteilung [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	n <sub>ggs</sub> [1]	k <sub>äqu</sub> [µm]	a <sub>v</sub> [cm <sup>-1</sup> ]	a <sub>m</sub> [cm <sup>2</sup> /g]
1				100				
0,5	30,43	39,78	39,78	60,22	0,73	713,68	150,73	54,59
0,1	26,67	34,88	74,65	25,35	0,54	225,41	477,21	172,84
0,04	8,79	11,49	86,14	13,86	0,66	63,95	1683	609,52
0	10,60	13,86	100	0			10990	3980,59
Summe	76,49	100						703,69

39,78

60,22

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 10,76

Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
< 0,5mm 2,75

**Siebanalyse nach Kugelmühle (Kreislaufmahlung) Fraktion 1000/500µm**

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	n <sub>ggs</sub> [1]	k <sub>äqu</sub> [µm]	a <sub>v</sub> [cm <sup>-1</sup> ]	a <sub>m</sub> [cm <sup>2</sup> /g]
0,5				100				
0,2	122,56	62,43	62,43	37,57	1,07	328,95	320,61	116,62
0,1	29,28	14,91	77,34	22,66	0,73	142,72	738,95	268,79
0,04	20,06	10,22	87,56	12,44	0,65	63,93	1647	599,03
0	24,42	12,44	100	0			12372	4500,44
Summe	196,32	100						733,91

39,78

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 10,53

Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
< 1mm 2,76

**Berechnete KGV nach Kugelmühle**

Maschenweite [mm]	Inhalt [%]	I-Verteilung [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	n <sub>ggs</sub> [1]	k <sub>äqu</sub> [µm]	a <sub>v</sub> [cm <sup>-1</sup> ]	a <sub>m</sub> [cm <sup>2</sup> /g]
0,5				100				
0,1	51,77	68,08	68,08	31,92	0,71	233,82	456,48	165,62
0,04	10,98	14,44	82,52	17,48	0,66	63,94	1669	605,36
0	13,29	17,48	100	0			11540	4186,85
Summe	76	100						932,12

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 10,67

Dichte  $[g/cm^3]$   
< 1mm 2,72

**Siebanalyse nach Durchlaufmahlung 1. Durchgang**

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{ggs}$ [1]	$k_{aqu}$ [μm]	$a_v$ [cm <sup>-1</sup> ]	$a_m$ [cm <sup>2</sup> /g]
1				100				
0,5	83,03	11,31	11,31	88,69	0,17	697,94	127,81	46,92
0,2	253,81	34,57	45,88	54,12	0,54	317,09	281,31	103,28
0,1	134,39	18,30	64,19	35,81	0,60	141,96	628,35	230,70
0,04	115,05	15,67	79,86	20,14	0,63	63,81	1398	513,23
0	147,88	20,14	100	0			11788	4328,00
Summe	734	100						1035,46

Kornformfaktor =  $k_{aqu} * a_v$  : 8,92

Dichte  $[g/cm^3]$   
< 1mm 2,83

**Siebanalyse nach Durchlaufmahlung 2. Durchgang**

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{ggs}$ [1]	$k_{aqu}$ [μm]	$a_v$ [cm <sup>-1</sup> ]	$a_m$ [cm <sup>2</sup> /g]
1				100				
0,5	1,65	0,24	0,24	99,76	0,003	693,24	141,93	50,13
0,2	25,60	3,67	3,91	96,09	0,04	306,29	321,22	113,46
0,1	151,51	21,73	25,64	74,36	0,37	140,69	699,34	247,02
0,04	209,88	30,10	55,75	44,25	0,57	63,54	1548	546,96
0	308,51	44,25	100	0			14234	5027,65
Summe	697,2	100						2447,53

Kornformfaktor =  $k_{aqu} * a_v$  : 9,84

Dichte  $[g/cm^3]$   
< 1mm 2,84

**Siebanalyse nach Durchlaufmahlung 3. Durchgang**

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{ggs}$ [1]	$k_{aqu}$ [μm]	$a_v$ [cm <sup>-1</sup> ]	$a_m$ [cm <sup>2</sup> /g]
1				100				
0,5				100				
0,2	24,25	3,78	3,78	96,22	0,04	306,32	405,25	142,75
0,1	77,85	12,12	15,90	84,10	0,19	139,71	888,55	313,00
0,04	194,27	30,25	46,15	53,85	0,49	63,19	1965	692,04
0	345,8	53,85	100	0			17048	6005,49
Summe	642,2	100						3486,57

Kornformfaktor =  $k_{aqu} * a_v$  : 12,41

Dichte  $[g/cm^3]$   
< 1mm 2,79

**Siebanalyse nach Durchlaufmahlung 4. Durchgang**

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{ggs}$ [1]	$k_{aqu}$ [μm]	$a_v$ [cm <sup>-1</sup> ]	$a_m$ [cm <sup>2</sup> /g]
1				100				
0,5				100				
0,2	7,01	1,09	1,09	98,91	0,01	305,68	453,04	162,30
0,1	50,26	7,85	8,95	91,05	0,12	139,29	994,25	356,18
0,04	198,35	30,99	39,94	60,06	0,45	63,04	2197	786,95
0	384,43	60,06	100	0			19107	6844,77
Summe	640,05	100						4384,79

Kornformfaktor =  $k_{aqu} * a_v$  : 13,85

## Tabellen Mergel

Siebanalyse der Ausgangsprobe

Fraktion 6300/1000µm

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>äqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
110	0	0	0	100				
63	4488	5,33	5,33	94,67	0,10	82387,08	2,31	0,85
32	11014	13,07	18,40	81,60	0,22	44421,77	4,28	1,57
20	15306	18,16	36,56	63,44	0,54	25314,86	7,51	2,75
18	3762	4,46	41,03	58,97	0,69	18977,05	10,01	3,67
16	2796	3,32	44,35	55,65	0,49	16970,40	11,20	4,11
14	3544	4,21	48,55	51,45	0,59	14968,60	12,70	4,65
10	9356	11,10	59,65	40,35	0,72	11857,01	16,03	5,88
8	6410	7,61	67,26	32,74	0,94	8960,47	21,21	7,78
6,3	3902	4,63	71,89	28,11	0,64	7103,97	26,75	9,81
1	17231	20,45	92,34	7,66	0,71	2658,14	71,50	26,21
0,5	2470	2,93	95,27	4,73	0,70	712,67	266,67	97,76
0,1	2769	3,29	98,56	1,44	0,74	235,24	807,88	296,18
0,04	700	0,83	99,39	0,61	0,94	65,20	2914,80	1068,60
0	514	0,61	100	0			25271,69	9264,90
Summe	84262	100						86,32

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 19,005

\* Kornformfaktor der Analyse des 2. Brecherproduktes entnommen / Siebung erfolgte mit einer Siebmaschine

\*\* &lt; 6,3 mm KGV mit KGV der 2. Brecherstufe berechnet

Siebanalyse nach 2. Brecherstufe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>äqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
10	0							
6,3	3060		0	100				
1	5248	72,76	72,76	27,24	0,71	2658,14	71,50	26,21
0,5	752,2	10,43	83,18	16,82	0,70	712,67	266,67	97,76
0,1	843,21	11,69	94,87	5,13	0,74	235,24	807,88	296,18
0,04	213,21	2,96	97,83	2,17	0,94	65,20	2914,80	1068,60
0	156,6	2,17	100	0			25271,69	9264,90
Summe	7213,2	100						296,63

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 19,005Massen-  
strom

0,728

0,272

Siebanalyse nach Stabmühle

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	n <sub>GGS</sub>	k <sub>äqu</sub>	a <sub>v</sub>	a <sub>m</sub>
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[µm]	[cm <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /g]
6,3	0							
1	257,57		0	100				
0,5	127,97	53,88	53,88	46,12	1,12	724,69	215,18	78,89
0,2	64,34	27,09	80,97	19,03	0,97	326,64	477,40	175,02
0,1	22,69	9,55	90,53	9,47	1,01	144,30	1080,63	396,17
0,04	13,41	5,65	96,17	3,83	0,99	65,43	2383,22	873,72
0	9,09	3,83	100	0			20713,06	7593,66
Summe	237,50	100						467,74

Kornformfaktor = k<sub>äqu</sub> \* a<sub>v</sub> : 15,594

0,728



## Berechnete KGV nach Stabmühle

Maschenweite [mm]	Inhalt [%%]	l-Verteilung [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{\text{GGS}}$ [1]	$k_{\text{aqu}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$a_v$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$a_m$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1	0		0	100				
0,5	42,04	52,44	52,44	47,56	1,07	723,41	228,41	83,74
0,1	29,85	37,22	89,66	10,34	0,95	245,88	672,01	246,37
0,04	4,91	6,13	95,79	4,21	0,98	65,39	2528,05	926,81
0	3,38	4,21	100	0			21955,05	8048,98
Summe	80	100						531,34

0,524

0,476

Kornformfaktor =  $k_{\text{aqu}} \cdot a_v$  : 16,523

## Siebanalyse der 1. Durchlaufmahlung

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{\text{GGS}}$ [1]	$k_{\text{aqu}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$a_v$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$a_m$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1			0	100				
0,5	394	51,65	51,65	48,35	1,05	722,73	231,91	85,02
0,2	248	32,46	84,11	15,89	1,21	332,26	504,45	184,94
0,1	64	8,34	92,45	7,55	1,07	144,69	1158,42	424,69
0,04	34	4,41	96,85	3,15	0,96	65,28	2567,46	941,26
0	24	3,15	100	0			19081,25	6995,42
Summe	764	100						400,95

Kornformfaktor =  $k_{\text{aqu}} \cdot a_v$  : 16,761

## Siebanalyse der 4. Durchlaufmahlung

Maschenweite [mm]	Masse [g]	Fraktion [%]	Rückstand [%]	Durchgang [%]	$n_{\text{GGS}}$ [1]	$k_{\text{aqu}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$a_v$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	$a_m$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1	0							
0,5	0			100				
0,2	139,03	20,270	20	80	0,25	310,71	539,44	198
0,1	224	32,725	53	47	0,76	142,91	1172,82	430
0,04	137	20,005	73	27	0,61	63,71	2915	1069
0	185	27	100	0			25272	9265
Summe	686	100						2896,09

4416\*

KGV der Kornklassen 0,04/0 mm und 0,1/0,04 mm berechnet

Kornformfaktor =  $k_{\text{aqu}} \cdot a_v$  :

Blaine 0,04/0 mm und 0,1/0,04 mm der Ausgangsprobe

\* gemessener Blainewert

## Tabellen Kalkstein

KGV nach 1. Brecherstufe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
22	0	0	0	100
18	618	4,68	4,68	95,32
14	5624	42,62	47,30	52,70
10	2570	19,48	66,78	33,22
8	902	6,84	73,61	26,39
6,3	680	5,15	78,77	21,23
3,15	1619,1	12,27	91,04	8,96
1	780,4	5,91	96,95	3,05
0,5	190,3	1,44	98,39	1,61
0,1	139,5	1,06	99,45	0,55
0,04	27,7	0,21	99,66	0,34
0	45,0	0,34	100	0
Summe	13196	100		

\* < 6,3 mm mit KGV der 2. Brecherstufe berechnet

KGV nach 2. Brecherstufe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	$n_{GGS}$	$k_{\text{äqu}}$	$a_v$	$a_m$	Massenstrom
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]	
12									
8	602								
6,3	1178		0	100					
3,15	6428	57,79	57,79	42,21	1,24	4588,63	28,86	10,13	57,8
1	3098	27,85	85,64	14,36	0,94	1861,64	71,13	24,96	
0,5	755,5	6,79	92,43	7,57	0,92	719,16	184,12	64,60	
0,1	553,8	4,98	97,41	2,59	0,67	231,65	571,62	200,57	42,2
0,04	110,1	0,99	98,40	1,60	0,52	63,35	2090,08	733,36	
0	178,5	1,60	100	0			17371,48	6095,26	
Summe	11123,9	100						132,24	

Kornformfaktor =  $k_{\text{äqu}} \cdot a_v$  : 13,24

KGV nach Stabmühle 1. Durchgang

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	$n_{GGS}$	$k_{\text{äqu}}$	$a_v$	$a_m$
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
6,3								
3,15	248,1		0	100				
1	911,4	73,02	73,02	26,98	1,14	1902,42	62,78	22,03
0,5	138,26	11,08	84,10	15,90	0,76	714,57	167,15	58,65
0,1	128,1	10,26	94,36	5,64	0,64	230,61	517,95	181,74
0,04	25,85	2,07	96,44	3,56	0,50	63,25	1888,55	662,65
0	44,48	3,56	100	0			16762,07	5881,43
Summe	1248,09	100						264,57

\* 5 Zyklen gesiebt

Kornformfaktor =  $k_{\text{äqu}} \cdot a_v$  : 11,94

Stabmühle 1. OZK-Stufe (berechnete KGV)

Maschenweite	Inhalt	I-Verteilung	Rückstand	Durchgang	$n_{GGS}$	$k_{\text{äqu}}$	$a_v$	$a_m$	
[mm]	[%%]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]	
3,15	0	0	0	100					
1	53,95	71,36	71,36	28,64	1,09	1891,89	66,01	23,16	71,4
0,5	9,27	12,26	83,62	16,38	0,81	715,80	174,46	61,21	
0,1	8,03	10,62	94,24	5,76	0,65	230,87	540,89	189,79	
0,04	1,61	2,14	96,38	3,62	0,51	63,27	1973,63	692,50	28,6
0	2,74	3,62	100	0			17019,33	5971,69	
Summe	75,61	100						275,15	

Kornformfaktor =  $k_{\text{äqu}} \cdot a_v$  : 12,49

KGV nach Stabmühle 2. OZK-Stufe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang	$n_{GGS}$	$k_{\text{äqu}}$	$a_v$	$a_m$
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
1	246,13	97,30	0	100				
0,5	142,38	56,29	56,29	43,71	1,19	726,91	178,77	62,73
0,1	79,37	31,38	87,67	12,33	0,79	237,65	546,82	191,87
0,04	12,44	4,92	92,58	7,42	0,56	63,49	2046,80	718,17
0	18,76	7,42	100	0			18732,15	6572,69
Summe	252,95	100						618,29

Kornformfaktor =  $k_{\text{äqu}} \cdot a_v$  : 12,99

71,4

Stabmühle 2. OZK-Stufe (berechnete KGV)

Maschenweite	Inhalt	I-Verteilung	Rückstand	Durchgang	$n_{GGS}$	$k_{\text{äqu}}$	$a_v$	$a_m$
[mm]	[%%]	[%]	[%]	[%]	[1]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{cm}^{-1}$ ]	[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]
3,15	0							
1	0		0	100				
0,5	43,68	54,90	54,90	45,10	1,15	725,61	177,16	62,16
0,1	25,43	31,97	86,87	13,13	0,77	236,66	543,17	190,59
0,04	4,12	5,18	92,05	7,95	0,55	63,45	2025,84	710,82
0	6,33	7,95	100	0			18241,63	6400,57
Summe	79,56	100						641,03

Kornformfaktor =  $k_{\text{äqu}} \cdot a_v$  : 12,85

## Tabelle Flugasche

Siebanalyse der Ausgangsprobe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
1,5	0		0	100
1	0,51	0,51	0,51	99,49
0,5	1,31	1,31	1,82	98,18
0,3	2,81	2,81	4,63	95,37
0,25	4,18	4,18	8,81	91,19
0,125	7,13	7,13	15,94	84,06
0,09	8,12	8,12	24,06	75,94
0,063	12,85	12,85	36,91	63,09
0,04	24,86	24,86	61,77	38,23
0	38,23	38,23	100	0
Summe	100	100		

## Tabelle Steinmehl

Siebanalyse der Ausgangsprobe

Maschenweite	Masse	Fraktion	Rückstand	Durchgang
[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
1,5	0		0	100
1	0,23	0,23	0,23	99,77
0,5	0,43	0,43	0,66	99,34
0,3	1,70	1,70	2,36	97,64
0,25	2,84	2,84	5,20	94,80
0,125	12,67	12,67	17,87	82,13
0,09	20,84	20,84	38,71	61,29
0,063	32,67	32,67	71,38	28,62
0	28,62	28,62	100,00	0
Summe	100	100		