

Circuit high pressure grinding rolls (HPGR) in a cement grinding plant

Part 1: Evaluation of overall performance

Dr. Namik A. Aydogan, Dr. Levent Ergun*

Hacettepe University, Mining Engineering Department, Ankara/Turkey

Summary: In this paper, the performance of a closed circuit HPGR operation was evaluated by the data obtained from six measurements in a cement grinding circuit operating in Turkey. Flowrates of the streams and classifier performance were evaluated after mass balancing. The average specific energy consumption of the HPGR for six measurements was 9.62 kWh/t for grinding from 17.9 mm to 57 μm (80 % passing size). Reduction ratio increased with the increase in specific energy consumption. Although cut point and the bypass of the classifier varied in a rather wide range, reduced efficiency curve and imperfection values indicated that the sharpness of separation remained the same.

Im Kreislauf arbeitende Gutbett-Walzenmühle in einer Zementmahl-anlage

Teil 1: Bewertung der Gesamtleistung

Zusammenfassung: Im vorliegenden Artikel wird die Leistung einer im geschlossenen Kreislauf arbeitenden Gutbett-Walzenmühle anhand von Daten bewertet, die in sechs Messungen in einer Zementmahlanlage in der Türkei gewonnen wurden. Die Durchflussmengen der Materialströme und die Sichterleistung wurden nach dem Massenausgleich bewertet. Der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch der Gutbett-Walzenmühle betrug bei sechs Messungen 9,62 kWh/t bei Mahlgrößen von 17,9 mm bis 57 μm (80 % Durchgangsgröße). Der Zerkleinerungsgrad nahm mit ansteigendem spezifischen Energieverbrauch zu. Obwohl die Trennkorngröße und die Bypassmenge des Sichters in einem ziemlich großen Bereich schwankten, zeigten eine reduzierte Wirkungsgradkennlinie und Störungswerte, dass die Trennschärfe gleich blieb.

Broyeur à cylindres de fragmentation par compression du lit de matière travaillant en circuit fermé dans une cimenterie – Partie 1: Evaluation globale de la performance

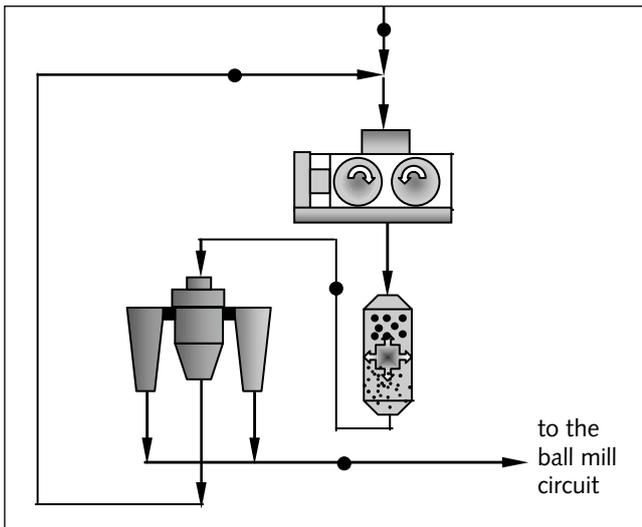
Résumé: Dans le présent article, la performance d'un broyeur à cylindres de fragmentation par compression du lit de matière travaillant en circuit fermé est évaluée sur la base de données recueillies par six relevés dans un atelier de broyage de ciment en Turquie. Les débits de matières et la performance de séparation ont été évalués par compensation de masse. La consommation spécifique moyenne d'énergie du broyeur à cylindres de fragmentation par compression du lit de matière, mesurée sur six relevés, était de 9,62 kWh/t pour des granulométries de 17,9 mm à 57 μm (80 % taux de passé). Le coefficient de réduction augmentait au fur et à mesure de l'accroissement de la consommation spécifique d'énergie. Quoique la maille de coupure et la quantité by-passée du séparateur variaient dans une plage relativement importante, la courbe caractéristique de rendement réduite et les valeurs de perturbation ont montré que la précision de coupure restait inchangée.

Molino de rodillos de alta presión en circuito en una planta de molienda de cemento

Parte 1: Evaluación de la capacidad general

Resumen: El presente artículo evalúa la capacidad de un circuito cerrado mediante los datos obtenidos en seis mediciones realizadas en una instalación de molienda de cemento en Turquía. Los caudales de corriente y el rendimiento de los separadores fueron evaluados después del balance de masas. El consumo específico de energía medio del molino de rodillos de alta presión en circuito en las seis mediciones fue de 9,62 kWh/t para tamaños de molienda desde 17,9 mm a 57 μm (80 % tamaño de paso). El grado de trituración aumentó con el incremento del consumo de energía específica. A pesar de que el tamaño de grano de corte y el bypass del separador variaron en un margen bastante amplio, la curva de la eficiencia reducida y valores no satisfactorios indicaron que la exactitud de la separación se mantuvo.

* Corresponding author/korrespondierender Autor: Namik A. Aydogan (naydogan@hacettepe.edu.tr)



1 Simplified flowsheet of the circuit and the sampling points
Vereinfachtes Fließbild des Kreislaufs und der Stellen der Probenentnahme

1 Introduction

Since their first application in 1985, HPGRs have been increasingly used in cement grinding circuits [1]. They have now stood the test in terms of capacity and energy efficiency increase in comparison to ball mill-air classifier circuits. Their success in the cement industry has attracted the attention of the mineral industry and the number of applications has been increasing rapidly [2–9].

Despite progress in technology and applications, relatively few data regarding operating plants have been published. In cement grinding, it was shown that more could be achieved when a larger part of the size reduction work is carried out by HPGR [10]. Air classifiers used in cement grinding circuits generate higher costs than wet classifiers and their performance is also critical in closed circuit HPGR applications. It was shown that the performance of an air classifier is largely affected by the operating variables [11].

In this study, the performance of closed circuit HPGR operation in a cement grinding plant was evaluated. In this first part, the overall performance of the circuit was evaluated in terms of specific energy consumption (ECS) and size reduction. The relationship between the operating parameters and the performance will be discussed in the second part [12].

2 Sampling and experimental studies

Six sampling measurements were performed at a cement grinding circuit in Turkey. A simplified flow sheet of the circuit and sampling points are given in **Figure 1**. Steady conditions were verified by examining the operating values recorded in the control room.

Fresh feed (clinker + gypsum) is introduced into the HPGR. The HPGR product is passed firstly through a disintegrator to break up the flakes and then the material is fed to a dynamic air classifier. The classifier fine stream is the feed for the ball mill-classifier circuit while the classifier coarse stream is returned to the HPGR. The design variables of the HPGR and the classifier and the variables recorded in the control room are given in **Table 1** and **Table 2**, respectively.

1 Einleitung

Seit sie 1985 zum ersten Mal eingesetzt wurden, sind Gutbett-Walzenmühlen in zunehmendem Maße in Zementmahlkreisläufen verwendet worden [1]. Sie haben sich nun hinsichtlich der Kapazität und einer höheren Energieeffizienz im Vergleich zu Kreisläufen mit Kugelmühlen und Windsichtern bewährt. Ihr Erfolg in der Zementindustrie hat auch die Aufmerksamkeit der Mineralstoffindustrie auf sich gezogen, und die Zahl ihrer Anwendungen hat schnell zugenommen [2–9].

Trotz Fortschritten in der Technologie und in den Anwendungen wurden nur relativ wenige Daten zu laufenden Anlagen veröffentlicht. In der Zementmahlung wurde nachgewiesen, dass mehr erreicht werden kann, wenn ein größerer Teil der Zerkleinerung durch Gutbett-Walzenmühlen erledigt wird [10]. Wenn Windsichter in Zementmahlkreisläufen eingesetzt werden, sind die Kosten höher als bei einer Nassklassierung. Außerdem ist auch ihre Leistung kritisch beim Einsatz von Gutbett-Walzenmühlen im geschlossenen Kreislauf. Es wurde aufgezeigt, dass die Leistung eines Windsichters stark durch Prozessvariable beeinflusst wird [11].

In der vorliegenden Studie wurde die Leistung einer im geschlossenen Kreislauf arbeitenden Gutbett-Walzenmühle in einer Zementmahlanlage bewertet. In diesem ersten Teil wird die Gesamtleistung des Kreislaufs anhand des spezifischen Energieverbrauchs und der Zerkleinerung bewertet. Das Verhältnis zwischen Betriebsparametern und der Leistung wird im zweiten Teil diskutiert werden [12].

2 Probenahme und experimentelle Studien

Es wurden sechs Messungen von Proben in einer Zementmahlanlage in der Türkei durchgeführt. **Bild 1** zeigt ein vereinfachtes Fließbild des Kreislaufs und die Stellen der Probenahme. Gleichbleibende Bedingungen wurden anhand von Betriebswerten, die in der Schaltkarte aufgezeichnet wurden, geprüft.

Frisches Aufgabegut (Klinker und Gips) wird der Gutbett-Walzenmühle zugeführt. Das Produkt aus der Gutbett-Walzenmühle wird zuerst zum Brechen der Schülpen durch einen Desagglomerator geschickt. Danach wird das Material einem dynamischen Windsichter aufgegeben. Der Feingutstrom des Sichters ist das Aufgabegut für den Kreislauf Kugelmühle-Sichter, während das Siebgroße zur Gutbett-Walzenmühle zurückgeführt wird. In **Tabelle 1** bzw. **Tabelle 2** sind die Konstruktionsangaben zur Gutbett-Walzenmühle und zum Sichter bzw. die in der Schaltkarte aufgezeichneten Werte enthalten.

Da ein Teil des Materials als Schülpen im Produkt der Gutbett-Walzenmühlen nach der Desagglomeration verbleibt, wurden die Proben zwecks einer vollständigen Desagglomeration in einer Trommel mit den Abmessungen $\varnothing 70 \times 50$ cm gestürzt.

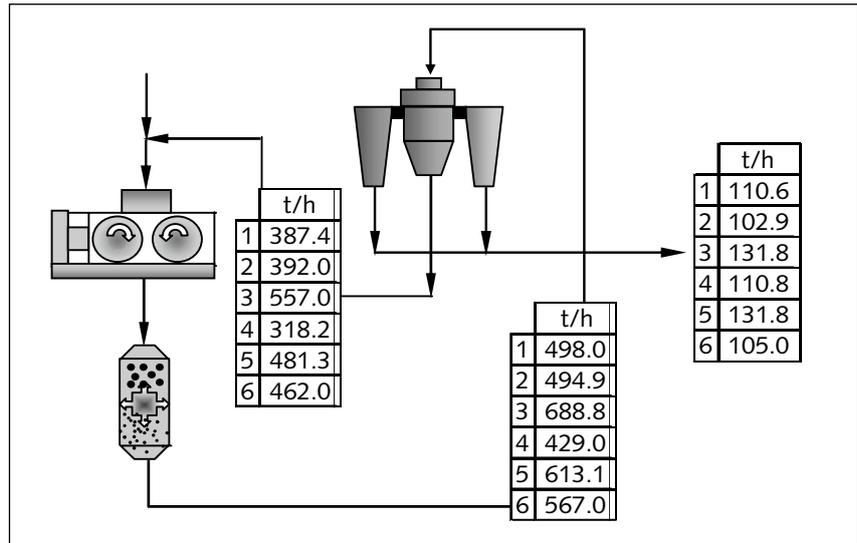
Tab. 1: Design variables of the HPGR and the classifier
Konstruktionsdaten der Gutbett-Walzenmühle und des Sichters

Variable/Größe	Value/Wert
Roll Length/Walzenlänge (mm)	1450
Roll Diameter/Walzendurchmesser (mm)	1000
Roll Speed/Walzendrehzahl (m/s)	1.5
Motor Power/Motorleistung (kW)	2 x 550
Classifier Diameter/Sichterdurchmesser (mm)	2500
Classifier Rotor Power/Leistung Sichterrotor (kW)	220
Classifier Fan Power/Leistung Sichtergebläse (kW)	350

Since some of the material remained as flakes in the HPGR product after disagglomeration, the samples were tumbled in a Ø 70 x 50 cm drum for complete disagglomeration. Size distributions of all samples were determined by dry sieving and laser sizing down to 1.8 µm.

3 Mass balancing studies

Mass balancing studies were carried out by using the size distributions and the measured flowrates. The mass balance module of the JKSimmet software was used in these studies. Calculated tonnages for all measurements after mass balancing are given in **Figure 2**. The size distributions of the streams before and after mass balancing are given in **Figure 3**. As can be seen from the figure, the observed and adjusted size distributions were rather close to each other, indicating that sampling was performed successfully.



2 Calculated tonnages of the streams around the circuit
Berechnete Materialstrommengen im Kreislauf

4 Evaluation of performance

The circulating load ratio (CLR, %), specific energy consumption (ECS, kWh/t) and reduction ratio (RR_x) were selected as performance measures.

$$CLR = U/F \times 100 \quad (1)$$

U and F are the tonnages of the classifier coarse product and feed, respectively.

$$RR_x = F_x/P_x \quad (2)$$

F_x and P_x are x % passing size of the fresh feed and final product (classifier fine) respectively.

4.1 Overall performance of the circuit

The feed rate to the circuit varied between 102.9 and 131.8 tph. The reason for the changes in feed rate was the fluctuation in the performance. It was necessary to find the reason for this change as the difference between the highest and lowest feed rate was 28 %.

The size distributions of the circuit fresh feed and circuit product (classifier fine product) are given in **Figure 4**. F50 and F80 of the fresh feed were in the range of 6.5–12 mm and 15.13–20.28 mm, respectively. As can also be seen from the figure, the variations in the feed size distributions were rather large. This also affected the size distribution of the HPGR feed (**Fig. 5**). It can be suggested that one of reasons for the changes in feed rate was the changes in feed size distribution.

Die Größenverteilungen aller Proben wurden durch Trockensiebung und eine Laser-Teilchenbestimmung bis herunter auf 1,8 µm ermittelt.

3 Studien zum Massenausgleich

Studien zum Massenausgleich wurden auf der Grundlage der Größenverteilungen und der gemessenen Durchflussmengen angestellt. In diesen Studien wurde das Massenausgleichsmodul der Software JKSimmet verwendet. Die berechneten Mengen in t für alle Messungen nach dem Massenausgleich sind in **Bild 2** enthalten. **Bild 3** zeigt die Größenverteilungen der Materialströme vor und nach dem Massenausgleich. Wie man dem Bild entnehmen kann, lagen die beobachteten und eingestellten Größenverteilungen ziemlich nah beieinander, was darauf hinweist, dass die Probenahme erfolgreich verlief.

4 Bewertung der Leistung

Als Leistungsmaße wurden die Umlaufmenge (CLR in %), der spezifische Energieverbrauch (ECS in kWh/t) und der Zerkleinerungsgrad (RR_x) ausgewählt.

$$CLR = U/F \times 100 \quad (1)$$

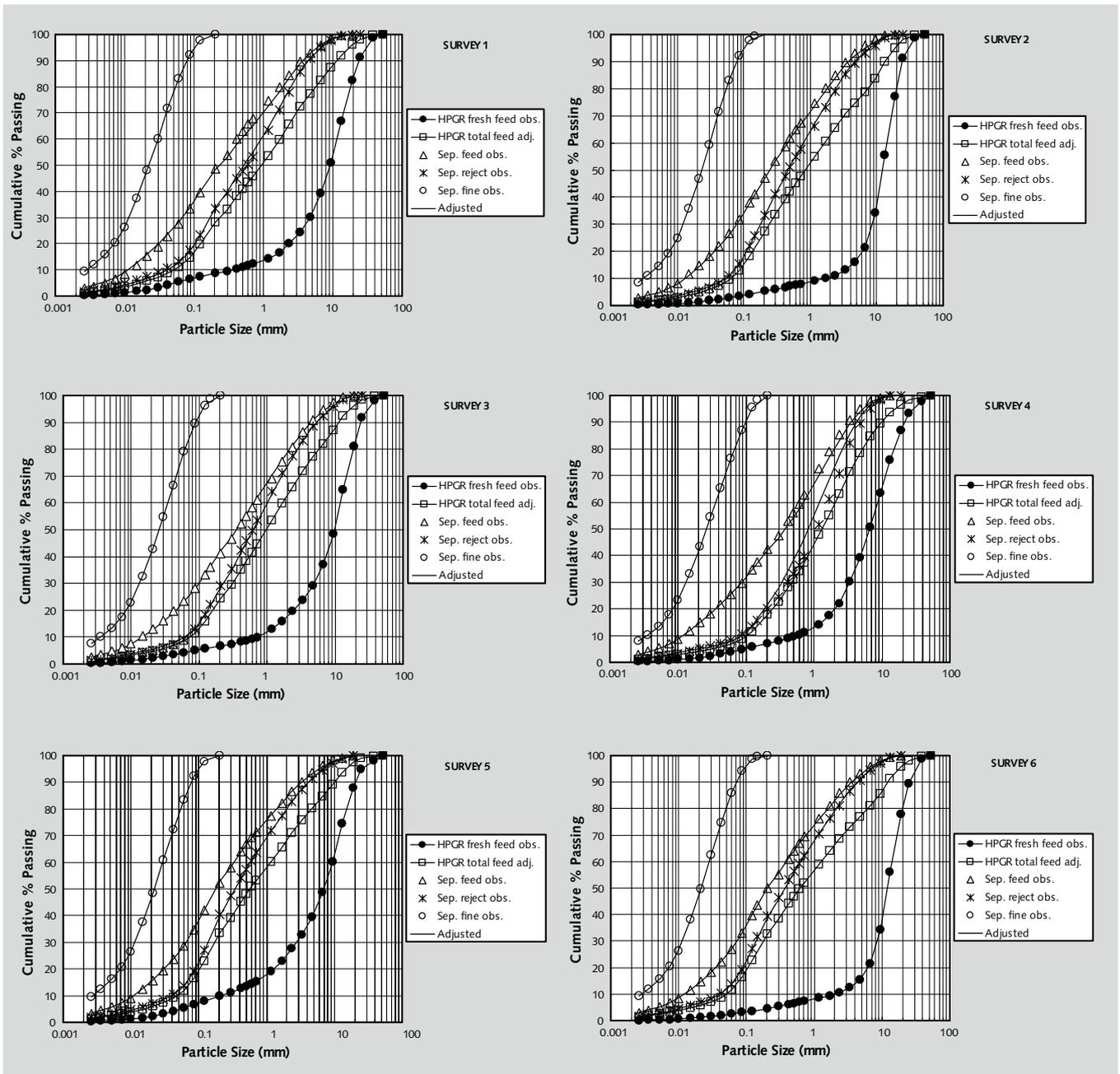
U und F sind die Mengen des groben Produkts des Sichters bzw. des Aufgabeguts in t.

$$RR_x = F_x/P_x \quad (2)$$

F_x und P_x sind x% der Durchgangsgröße des frischen Aufgabeguts bzw. des Endprodukts (Feingut aus dem Sichter).

Tab. 2: Operational variables of the circuit during sampling studies • Betriebswerte aus dem Kreislauf während der Probenahmestudien

Survey No/Messung Nr.	1	2	3	4	5	6
Clinker/Klinker (tph)	100.5	93.9	122.2	102.5	121.4	97.2
Gypsum/Gips (tph)	10.1	9.0	9.6	8.3	10.4	7.8
Circulating Load/Umlauflast (tph)	480.2	448.4	507.4	410.4	370.4	493.5
Working Gap/Arbeitspalt (mm)	29.3	27.0	37.6	24.0	33.1	30.6
Operational Pressure/Betriebsdruck (bar)	117.2	115.8	96.9	131.8	99.1	101.1
HPGR Power Draw/Leistungsaufnahme Gutbett-Walzenmühle (kW)	1041	1044	1058	1026	1047	1085
Classifier Air Flow Rate/Luftstrommenge Sichter (m ³ /h)	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000	216 000
Classifier Rotor Speed/Drehzahl Sichterrotor (rpm/min ⁻¹)	95	109	111	112	114	115



3 Comparison of experimental and mass balanced size distributions
 Vergleich experimenteller Größenverteilungen und solcher mit Massenausgleich

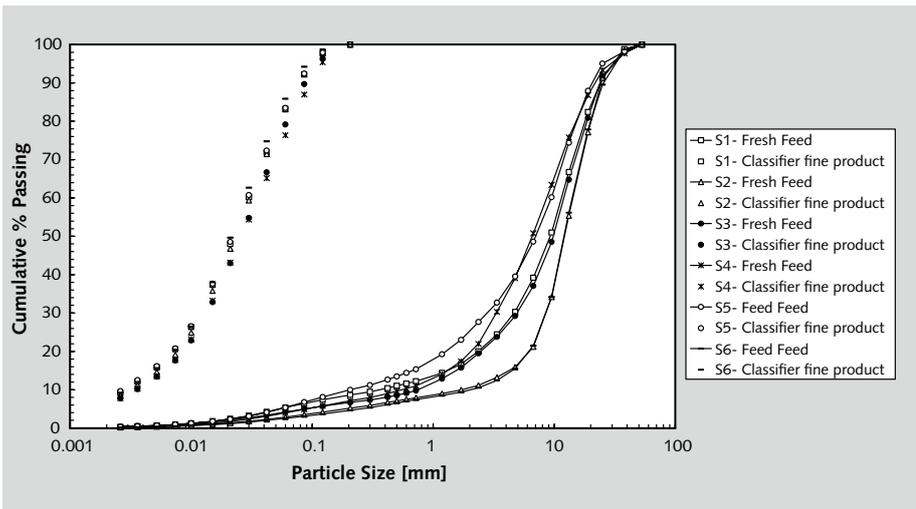
The performance figures for RR_{80} are summarized in Table 3. The ECS-reduction ratio relationship for all measurements is presented in Figure 6. Within the range of the studies, RR increased as ECS increased. There was a linear relationship between ECS and RR_{80} except for the data from measurement

4.1 Gesamtleistung des Kreislaufs

Die Aufgabemenge für den Kreislauf schwankte zwischen 102,9 und 131,8 t/h. Der Grund für die Änderungen in der Aufgabemenge waren die Schwankung in der Leistung. Der Grund dafür musste unbedingt gefunden werden, da der Unterschied

Tab. 3: Overall performance figures for all surveys • Gesamtleistungszahlen für alle Messungen

Survey No Messung Nr.	Fresh Feed Tonnage/Frisches Aufgabegut (tph)	ECS/Specz. Energieverbrauch (kWh/t)	CLR/Umlaufmenge (%)	F ₈₀ (mm)	P ₈₀ (mm)	RR ₈₀
1	110.6	9.41	350.25	18.11	0.054	334.2
2	102.9	10.15	381.04	19.95	0.054	368.13
3	131.8	8.03	422.76	18.62	0.062	299.23
4	110.8	9.26	287.18	15.13	0.068	223.27
5	131.8	7.94	365.10	15.31	0.053	287.08
6	105.0	10.33	440.00	20.28	0.050	407.38



4 Size distributions of fresh feed and final product for all survey
Größenverteilungen des frischen Aufgabeguts und des Endprodukts bei allen Messungen

No. 4. This measurement has the finest F_{80} and the the coarsest product. The circulating load for this measurement was also substantially lower than the others. Actually, on these sampling conditions, the results suggested that there was a margin for capacity increase in measurements No. 4.

4.2 Classifier Performance

Partition coefficient for each particle size was calculated using Eq. 3.

$$\text{Partition Coefficient} = \frac{U_{u_i}}{F_{f_i}} \quad (3)$$

whereas U the mass flowrate of classifier coarse product (tph), u_i the % retained at size i in classifier coarse stream, F the mass flowrate of classifier feed (tph), f_i % retained at size i in classifier feed in the range of 17–31%. The actual efficiency curves of the classifier for all measurements are given in Figure 7. The fish hook effect was also observed for the particles smaller than 20 μm . Measurement No. 4 has the coarsest cut size and the lowest bypass value. As mentioned earlier, the feed tonnage (t) to the classifier was also the lowest. Corrected and reduced efficiency curves of the classifier for all measurements are shown in Figure 8.

The efficiency of the classifier was evaluated using the imperfection value for each measurement and using the corrected efficiency curve given in Figure 7. The imperfection values were calculated using Equation 4:

$$I = \frac{(d_{75} - d_{25})}{2d_{50}} \quad (4)$$

d_{25} , d_{50} and d_{75} are the corresponding particle sizes where the partition coefficient values are 0.25, 0.50 and 0.75, respectively. The imperfection values are given in Table 4. The dust load, which is an important parameter in classifier design, was also calculated for both the classifier feed tonnage and fine product tonnage. Normal dust loads for the classifier feed and fine product are 2.5 and 0.8 kg/m^3 , respectively. Dust load values were calculated using Equation 5 and they are also given in Table 4.

$$\text{Dust load (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Tonnage (kg/h)}}{\text{Air flow rate through classifier (m}^3\text{/h)}} \quad (5)$$

zwischen der höchsten und geringsten Aufgabemenge 28 % betrug.

Bild 4 zeigt die Größenverteilungen des frischen Aufgabeguts und des Endprodukts (Feingut aus dem Sichter) des Kreislaufs. F50 und F80 des frischen Aufgabeguts lagen im Bereich von 6,5–12 mm bzw. 15,13–20,28 mm. Aus diesem Bild ist auch zu erkennen, dass die Schwankungen in der Größenverteilung des Aufgabeguts ziemlich gross sind. Das beeinflusste auch die Größenverteilung des Aufgabeguts der Gutbett-Walzenmühle (Bild 5). Es kann angenommen werden, dass einer der Gründe für die Änderungen in der Aufgabemenge in den Änderungen in der Größenverteilung des Aufgabeguts liegt.

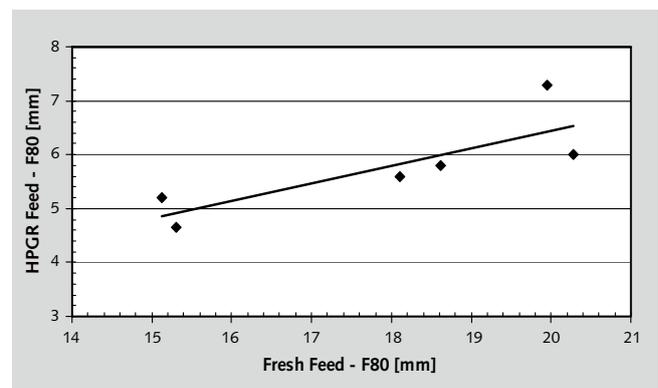
Die Leistungszahlen für RR_{80} sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Das Verhältnis zwischen dem spezifischen Energieverbrauch und dem Zerkleinerungsgrad aller Messungen wird in Bild 6 gezeigt. Bei den Studien in diesem Bereich nahm der Zerkleinerungsgrad mit zunehmendem spezifischen Energieverbrauch zu. Es gab ein lineares Verhältnis zwischen dem spezifischen Energieverbrauch und RR_{80} , mit Ausnahme der Daten von Messung Nr. 4. Bei dieser Messung erhielt man das feinste F_{80} und das grösste Produkt. Auch die Umlaufmenge war bei dieser Messung wesentlich geringer als bei den anderen. Tatsächlich ließen die Ergebnisse unter den gegebenen Probenahmebedingungen den Schluss zu, dass es bei der Messung Nr. 4 eine Grenze für den Kapazitätsanstieg gab.

4.2 Sichterleistung

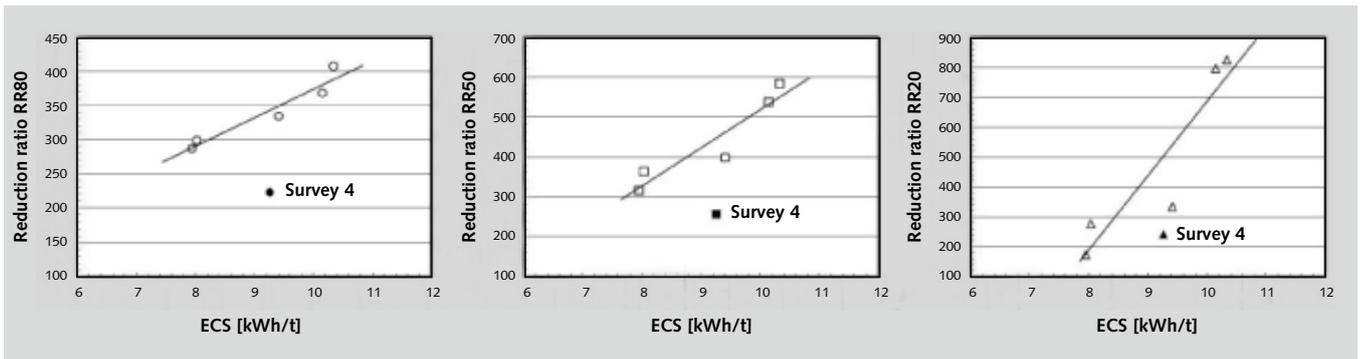
Die Abscheidungskonstante für jede Teilchengröße wurde nach Gleichung 3 berechnet.

$$\text{Abscheidungskonstante} = \frac{U_{u_i}}{F_{f_i}} \quad (3)$$

wobei U die Massenflussmenge des groben Produkts des Sichters (t/h), u_i die Prozentzahl für die bei der Größe i im Strom des groben Materials des Sichters zurückgehaltene Menge, F die Massenflussmenge des Sichteraufgabeguts (t/h) und f_i die



5 Effect of size distributions of fresh feed on HPGR feed
Wirkung der Größenverteilungen des frischen Aufgabeguts auf das Aufgabegut der Gutbett-Walzenmühle



6 The relationship between ECS and reduction ratio
Verhältnis zwischen spezifischem Energieverbrauch und Zerkleinerungsgrad

The results indicated that according to the feed dust load, the classifier was operating at higher dust loads than the normal values for measurements No. 3 and 5. However, it was operating within normal limits for the fine product dust load. The imperfection values and reduced efficiency curves (Fig. 8) suggested that the efficiency of the classifier remained the same under rather different operating conditions, except for measurement No. 4 in which the classifier shows a slightly better performance probably due to lower feed tonnage and hence dust loads.

5 Discussion

The feed rate to the circuit varied between 105 tph and 131.8 tph. The results showed that one of the reasons is the size distribution of fresh feed, which varied within a wide range particularly for the 1–10 mm size range (Fig. 4). The correlation between HPGR feed and discharge fineness is given in **Figure 9**. The results suggest that there is a correlation between medium size of the HPGR feed and the ones of the end product.

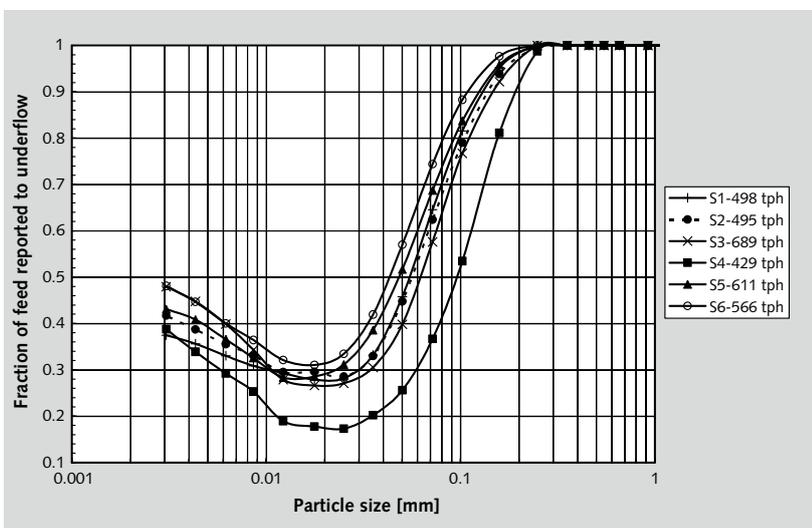
With the same classifier settings, a coarser classifier feed would increase the circulating load tonnage and hence, the HPGR feed tonnage. This could be tolerated up to a limit set at the design stage of the circuit. Beyond this limit, the whole system will be overloaded and a shutdown may be required. Therefore, the circulating load tonnage is measured by a belt scale and displayed in the control room to help the operators. When the

bei der Größe i im Sichteraufgabegut im Bereich von 17–31% zurückgehaltene Menge bedeuten. Die tatsächlichen Wirkungsgradkennlinien des Sichters für alle Messungen sind in **Bild 7** dargestellt. Bei Teilchen $< 20 \mu\text{m}$ wurde auch der Fish-Hook-Effekt beobachtet. Bei der Messung Nr. 4 traten die größte Trenngrenze und der geringst Bypasswert auf. Wie bereits erwähnt, war auch die Aufgabemenge zum Sichter am kleinsten. **Bild 8** zeigt die korrigierten und reduzierten Wirkungsgradkennlinien des Sichters bei allen Messungen.

Der Wirkungsgrad des Sichters wurde bei jeder Messung mit Hilfe des Störungswerts bewertet. Es wurde die korrigierte Wirkungsgradkennlinie aus **Bild 7** verwendet. Die Störungswerte wurden nach Gleichung 4 berechnet:

$$I = (d_{75} - d_{25}) / 2d_{50} \quad (4)$$

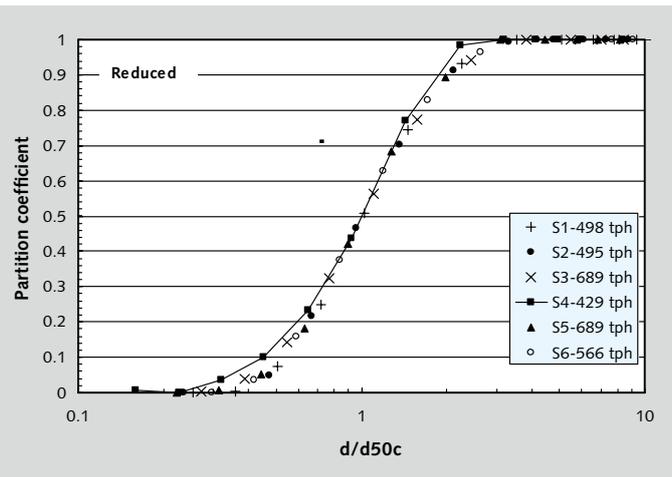
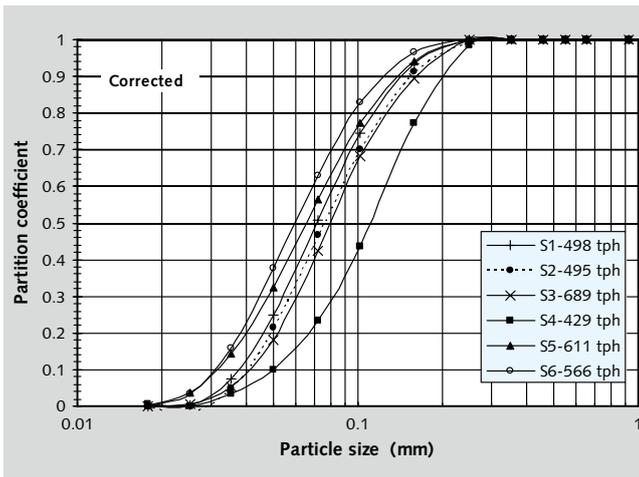
d_{25} , d_{50} und d_{75} sind die entsprechenden Teilchengrößen, wo die Werte der Abscheidungskonstante 0,25, 0,50 bzw. 0,75 betragen. Die Störungswerte sind in **Tabelle 4** enthalten. Die Staubbelastung, die ein wichtiger Parameter bei der Sichterlegung ist, wurde auch für die Menge des Aufgabeguts zum Sichter und für die Menge des fertigen Feinguts berechnet. Normale Staubbelastungen für das Aufgabegut und Feingut des Sichters betragen 2,5 bzw. 0,8 kg/m^3 . Die Werte der Staubbelastung wurden nach Gleichung 5 berechnet und sind ebenfalls in **Tabelle 4** enthalten.



7 Partition curves of the classifier different feed rates
Abscheidungskurven des Sichters bei unterschiedlichen Aufgabemengen

$$\text{Staubbelastung (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Menge (kg/h)}}{\text{Luftstrom durch den Sichter (m}^3\text{/h)}} \quad (5)$$

Die Ergebnisse zeigten, dass entsprechend der Staubbelastung der Sichter bei den Messungen Nr. 3 und 5 mit höheren Staubbelastungen als bei Normalwerten betrieben wurde. Jedoch lief er innerhalb der normalen Grenzwerte für die Staubbelastungen von Feingut. Die Störungswerte und reduzierten Wirkungsgradkennlinien (**Bild 8**) ließen den Schluss zu, dass der Wirkungsgrad des Sichters unter recht unterschiedlichen Betriebsbedingungen gleich blieb, mit Ausnahme bei Messung Nr. 4, wo der Sichter ein leicht bessere Leistung aufwies, was wahrscheinlich auf die geringere Aufgabemenge und damit geringere Staubbelastungen zurückzuführen ist.



8 Corrected and reduced efficiency curves of the classifier for all surveys
Korrigierte und reduzierte Wirkungsgradkennlinien des Sichters bei allen Messungen

circulating load is increased, it is possible to compensate this, to some extent, by decreasing the classifier rotor speed with some loss of the fineness of classifier fine product. However, it is a more common practice to reduce the feed rate to the circuit. In the case of an increase in the feed tonnage due to an increase in the circulating load, the HPGR will not be able to handle the capacity, which exceeds the limit determined by the gap. Opening the gap will reduce the size and consequently further increase the circulating load. Following discussions with plant staff, it was concluded that the changes in fresh feed size distributions were due to the segregation in the silo and mechanical solutions were found to be necessary for uniform feeding.

Apart from the feed size distribution, grindability may also have an effect on the capacity fluctuations. Although the material characteristics for each measurement were not determined, serious fluctuations were not expected as there is an effective control system for the blending of raw material and kiln operation.

To evaluate the energy efficiency of the HPGR, two approaches were used. Since a direct comparison with a ball mill-air classifier circuit is not possible, the power consumption of the ball mill for the same size reduction was calculated by using the Bond method [13]. The ball mill Bond work index of the fresh feed was measured and results in 11.5 kWh/t. The specific energy consumption was calculated as follows applying the dry grinding factor which is 1.3 [14]:

$$W_i = 10 \times 11.5 \times \left(\left(\frac{1}{\sqrt{57}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{17900}} \right) \right) \times 1.3 = 18.7 \text{ (kWh/t)}$$

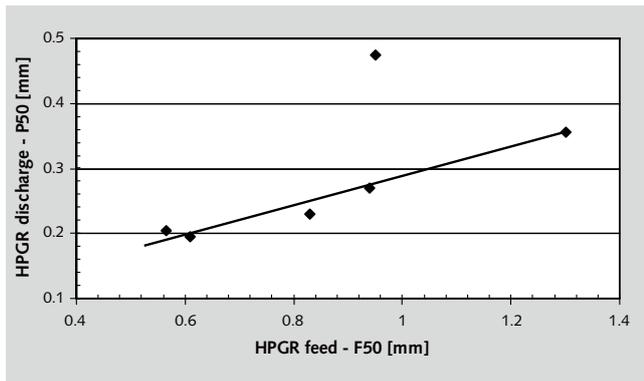
5 Diskussion

Die Aufgabemenge zum Kreislauf schwankte zwischen 105 t/h und 131,8 t/h. Die Ergebnisse zeigten, dass einer der Gründe die Größenverteilung beim frischen Aufgabegut ist, die in einem recht großen Bereich schwankte, besonders im Größenbereich 1-10 mm (Bild 4). Bild 9 zeigt die Korrelation zwischen dem Aufgabegut der Gutbett-Walzenmühle und der Austragsfeinheit. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass es eine Korrelation zwischen der mittleren Größe des Aufgabeguts der Gutbett-Walzenmühle und des Endprodukts gibt.

Bei gleicher Sichtereinstellung würde ein größeres Sichter-aufgabegut die Umlauflast (t) und damit das Aufgabegut zur Gutbett-Walzenmühle (t) erhöhen. Das könnte bis zu einer gewissen Grenze toleriert werden, die bei der Auslegung des Kreislaufs festgelegt wird. Wird dieser Grenzwert überschritten, würde das gesamte System überlastet werden, und ein Abfahren wäre vielleicht erforderlich. Daher wird die Umlauflast mit einer Bandwaage gemessen und in der Schaltwarte angezeigt, damit die Anlagenfahrer eine Hilfestellung bekommen. Wenn die Umlauflast erhöht wird, ist es möglich, das bis zu einem gewissen Grad zu kompensieren, indem die Rotordrehzahl des Sichters herabgesetzt wird, was etwas zu Lasten des Feingutanteils des Sichters geht. In der Praxis ist es jedoch gängiger, die Aufgabemenge zum Kreislauf zu reduzieren. Falls die Aufgabemenge wegen einer erhöhten Umlauflast erhöht wird, ist die Gutbett-Walzenmühle nicht in der Lage, die Kapazität zu beherrschen, die den durch den Spalt bestimmten Grenzwert überschreitet. Wenn man den Spalt öffnen würde, würde die Zerkleinerung zurückgehen und folglich die Umlauflast weiter

Tab. 4: Dust loads calculated for classifier feed and fine product • Berechnete Staublasten für Sichter-aufgabegut und Feingut

Survey No Messung Nr.	Fine Product Tonnage Feingut (tph)	Classifier Feed Tonnage Sichteraufgabegut (tph)	Classifier rotor speed Drehzahl Sichterrotor (m/s)	Dust Load for Feed Staublast Aufgabegut (kg/m³)	Dust Load for Fine Product Staublast Feingut (kg/m³)	Imperfection Störung
1	110.6	498	12.44	2.31	0.51	0.377
2	102.9	495	14.27	2.29	0.48	0.388
3	131.8	689	14.53	3.19	0.61	0.374
4	110.8	429	14.66	1.99	0.51	0.356
5	131.8	613	14.92	2.84	0.61	0.413
6	105.0	567	15.05	2.63	0.49	0.380



9 HPGR feed and discharge size distributions (F50-P50)

Größenverteilungen des Aufgabeguts und Austrags (F50-P50) der Gutbett-Walzenmühle

Secondly, the operating work index was calculated according to the ball mill air classifier circuits used in Turkey. The average operating work index was calculated back to 20 kWh/t to grind from fresh feed to cement size. Using this figure, the specific energy consumption was calculated as

$$W_i = 10 \times 11,5 \times \left(\left(\frac{1}{\sqrt{57}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{17900}} \right) \right) = 25 \text{ (kWh/t)}$$

The average specific energy consumption of the HPGR for six measurements result in 9,62 kWh/t. Comparing this figure with 18,62 kWh/t and 25 kWh/t for ball mill power energy consumption, it is clear that the HPGR-air classifier is far more energy efficient than ball mill air classifier circuits. It was also shown that closed circuit HPGR is more energy efficient than other HPGR configurations used in cement grinding circuits [10].

For a mineral processing plant, the optimum application would be after secondary crushing and closed circuit with an air classifier, where the moisture content of the material is low. It is possible to obtain a flotation feed with P80 of 50 μm . Classifier operation is largely affected by the changes in operating variables [15, 11]. The rotor speed of the classifier was between 12,44–15,05 m/s. As the rotor speed increases, the cut size of the classifier decreases. Since the feed rate and size distribution changed significantly, this effect was masked in the available data.

The fish hook effect is evident with all data. Due to electrostatic effects, fine particles are attached onto coarser particles and carried with them to the classifier underflow. It was reported that the fish hook effect is an inherent behavior due to the sudden drop in relatively coarser particles settling velocities in a centrifugal force field [16] and particle concentration and particle size distribution of the feed play an important role [17]. The fish hook effect was also observed in other studies on cement grinding [10].

For optimum classification performance, excessive feed rates should be avoided. In wet hydrocyclones, an increase in feed rate can be tolerated by increasing the number of operating cyclones, whereas the bypass in air classifiers linearly increases with the feed rate [11]. The reduced efficiency curves given in Figure 7 showed that the efficiency of the classifier remained the same under normal operating conditions.

erhöht werden. Nach Diskussionen mit dem Betriebspersonal kam man zu der Auffassung, dass die Änderungen in der Größenverteilung des frischen Aufgabeguts auf eine Entmischung im Silo zurückzuführen ist. Es wurden mechanische Lösungen gefunden, die für eine einheitliche Aufgabe erforderlich sind.

Neben der Größenverteilung des Aufgabeguts kann auch die Mahlbarkeit Auswirkungen auf die Kapazitätsschwankungen haben. Obwohl die Materialkennwerte bei den einzelnen Messungen nicht bestimmt wurden, waren keine ernsthaften Schwankungen zu erwarten, da es ein wirksames Kontrollsystem für die Mischung des Rohmaterials und den Ofenbetrieb gibt.

Um die Energieeffizienz der Gutbett-Walzenmühle zu bewerten, wurden zwei Methoden verwendet. Da es nicht möglich ist, einen direkten Vergleich mit einem Kreislauf Kugelmühle-Windsichter anzustellen, wurde der Energieverbrauch der Kugelmühle bei gleicher Zerkleinerung nach der Methode von Bond [13] berechnet. Der Arbeitsindex der Kugelmühle nach Bond wurde mit 11,5 kWh/t für frisches Aufgabegut gemessen. Der spezifische Energieverbrauch wurde wie folgt berechnet, wobei der Faktor für die Trockenvermahlung mit 1,3 angesetzt wurde [14]:

$$W_i = 10 \times 11,5 \times \left(\left(\frac{1}{\sqrt{57}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{17900}} \right) \right) \times 1,3 = 18,7 \text{ (kWh/t)}$$

Zweitens wurde der Arbeitsindex für den Betrieb nach Kreisläufen Kugelmühle-Windsichter berechnet, die in der Türkei im Einsatz sind. Der durchschnittliche Betriebsarbeitsindex wurde auf 20 kWh/t zurückgerechnet, um frisches Aufgabegut auf Zementgröße zu vermahlen. Unter Verwendung dieser Zahl wurde der spezifische Energieverbrauch mit

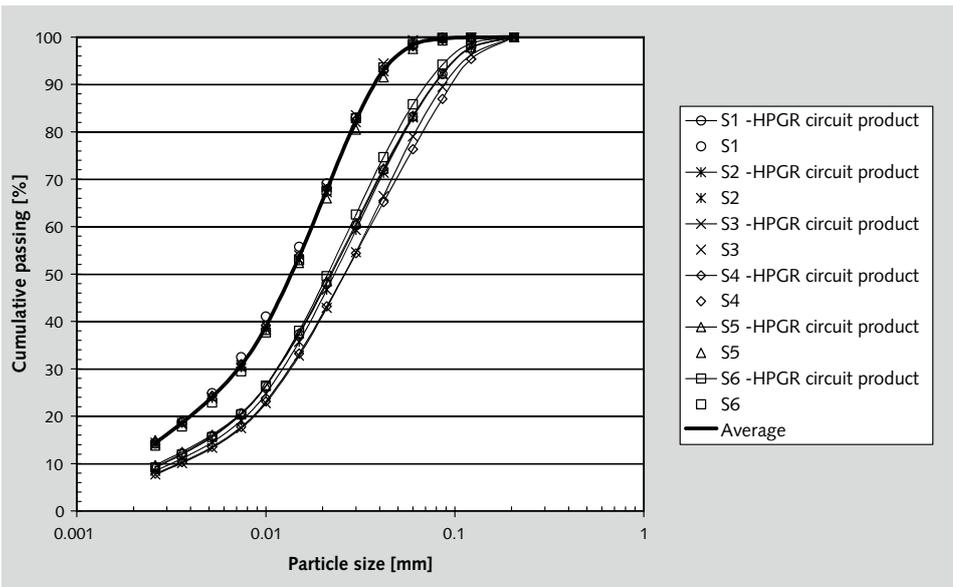
$$W_i = 10 \times 11,5 \times \left(\left(\frac{1}{\sqrt{57}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{17900}} \right) \right) = 25 \text{ (kWh/t)}$$

berechnet.

Der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch der Gutbett-Walzenmühle bei sechs Messreihen betrug 9,62 kWh/t. Wenn man diese Zahl mit dem Energieverbrauch von 18,62 kWh/t und 25 kWh/t bei Kugelmühlen vergleicht, ist es klar, dass der Windsichter der Gutbett-Walzenmühle weitaus energieeffizienter ist als Kreisläufe mit Kugelmühle und Windsichter. Es wurde weiterhin gezeigt, dass die im geschlossenen Kreislauf arbeitende Gutbett-Walzenmühle energieeffizienter ist als andere Konfigurationen mit einer Gutbett-Walzenmühle, die in Zementmahanlagen Verwendung finden [10].

Für eine Aufbereitungsanlage wäre die optimale Anwendung nach einer Mittelzerkleinerung ein geschlossener Kreislauf mit Windsichter bei einem geringen Feuchtigkeitsgehalt des Materials. Es ist möglich, ein Flotationsaufgabegut mit P80 und 50 μm zu erhalten. Der Sichterbetrieb wird weitgehend durch die Schwankungen bei den Betriebsgrößen beeinflusst [15, 11]. Die Rotordrehzahl des Sichters lag zwischen 12,44 und 15,05 m/s. Bei zunehmender Rotordrehzahl nimmt die Trenngrenze des Sichters ab. Da die Aufgabemenge und die Größenverteilung beachtlichen Änderungen unterworfen waren, wurde diese Wirkung bezüglich der verfügbaren Daten verschleiert.

Bei allen Daten ist der Fish-Hook-Effekt offensichtlich. Aufgrund elektrostatischer Wirkungen haften feine Teilchen an größeren und werden mit ihnen zum Sichterunterlauf getra-



10 Size distributions of HPGR circuit product and final cement products for all survey
 Größenverteilung des Endprodukts des Kreislaufs der Gutbett-Walzenmühle sowie des Endprodukts Zement bei allen Messungen

The product of the HPGR circuit is fed to a ball mill-classifier circuit to produce the final cement product. The size distributions of the HPGR circuit product and the final cement product are shown in **Figure 10**. Since the strength of the concrete prepared with the cement end product is the main quality criterion and is dependent on the size distribution of the product, it is strictly controlled. P80 of the HPGR circuit product varied between 50 to 68 μm , whereas P80 of the cement product was 28 μm . This suggested that for optimization of the entire plant, a good balance should be maintained to carry out the size reduction work between the HPGR and ball mill. It is logical to feed the HPGR circuit product to the air classifier since it contained a large amount of finished size material. The effect of the operating parameters on closed circuit HPGR operation will be discussed in the second part [12].

Since there is also a ball mill circuit using the HPGR circuit product as a feed, overall energy consumption for the product cement was more important than the performance of the HPGR circuit itself. The product of the ball mill circuit and the power consumption of the ball mill was the same for all measurements. Therefore, the optimum operating gap and pressure were 37.6 mm and 96.9 bar, respectively. With this particular application, the lowest ECS was achieved.

6 Conclusions

Based on the data obtained from six measurements, the average specific energy consumption of the HPGR was found to be 9.18 kWh/ton for grinding F80 = 17.9 mm to P80 = 57 μm . The average total energy consumption of the circuit including the classifier was 14.0 kWh/t. The size reduction ratio increased as the specific energy consumption increased. The performance of the air classifier changed significantly as the operating parameters changed.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Hacettepe University Research Unit and the Turkish Scientific and Technical Research Council (TUBITAK MISAG 160 and MISAG 190) for their

gen. Es wurde berichtet, dass der Fish-Hook-Effekt ein inhärentes Verhalten darstellt auf Grund des plötzlichen Abfalls der Sinkgeschwindigkeit relativ größerer Teilchen in einem Fliehkraftfeld [16]. Die Teilchenkonzentration und Korngrößenverteilung des Aufgabeguts spielen eine wichtige Rolle [17]. Der Fish-Hook-Effekt wurde auch bei anderen Studien zur Zementvermahlung beobachtet [10].

Überschüssige Aufgabemengen sollten zwecks einer optimalen Sichtleistung vermieden werden. Bei Nasshydrozyklonen kann eine Zunahme der Aufgabemenge durch eine Erhöhung der Anzahl der Zyklone toleriert werden, wogegen die Bypassmenge bei Windsichtern linear mit der Aufgabemenge zunimmt [11]. Die

reduzierten Wirkungsgradkennlinien in Bild 7 haben gezeigt, dass der Wirkungsgrad des Sichters bei normalen Betriebsbedingungen gleich bleibt.

Um das Endprodukt Zement herzustellen, wird das Produkt der Gutbett-Walzenmühlen einem Kreislauf Kugelmühle/Sichter zugeführt. **Bild 10** zeigt die Größenverteilung des Endprodukts des Kreislaufs der Gutbett-Walzenmühle sowie das Endprodukt Zement. Da die Festigkeit von Beton, der mit dem Endprodukt Zement hergestellt wird, das Hauptkriterium für die Qualität ist und von der Größenverteilung des Produkts abhängt, wird dieses streng kontrolliert. P80 des Produkts des Kreislaufs der Gutbett-Walzenmühle schwankte zwischen 50 und 68 μm , während P80 des Produkts Zement 28 μm betrug. Das bedeutete, dass für die Optimierung der Gesamtanlage ein guter Ausgleich für die Zerkleinerungsarbeit von Gutbett-Walzenmühle und Kugelmühle aufrechterhalten werden sollte. Es ist logisch, das Produkt des Kreislaufs der Gutbett-Walzenmühle dem Windsichter aufzugeben, da es bereits einen hohen Betrag des Materials mit der Endgröße enthält. Die Wirkung der Betriebsparameter auf den Betrieb einer Gutbett-Walzenmühle im geschlossenen Kreislauf wird im zweiten Teil diskutiert werden [12].

Da das Produkt des Kreislaufs einer Gutbett-Walzenmühle auch als Aufgabegut für den Kreislauf mit einer Kugelmühle verwendet wird, war der Energieverbrauch für das Produkt Zement wichtiger als der Kreislauf mit einer Gutbett-Walzenmühle selbst. Das Produkt des Kreislaufs mit Kugelmühle und die Leistungsaufnahme der Kugelmühle war bei allen Messungen gleich. Daher betragen der optimale Spalt und Druck 37,6 mm bzw. 96,9 bar. Bei dieser speziellen Anwendung wird damit der niedrigste spezifische Energieverbrauch erreicht.

Schlussfolgerungen

Auf der Grundlage der aus sechs Messungen erhaltenen Daten betrug der durchschnittliche spezifische Energieverbrauch 9,18 kWh/t, um F80 = 17,9 mm auf P80 = 57 μm zu mahlen. Der durchschnittliche Gesamtenergieverbrauch des Kreislaufs

financial support. Thanks are also given to Aysun Gunlu, Ilkay Celik, Seyfi Erdem, Can Ozer and Omurden for their assistance.

Literaturverzeichnis/Literature

- [1] Kellervessel, H., 1990. High-pressure material-bed comminution in practice. *Translation ZKG. 2* (90), 57–64.
- [2] Patzelt, N., 1992. High pressure grinding rolls, a survey of experience. *IEEE Cement Industry Technical Conference, Dallas/Texas. 10* (14), 180.
- [3] Kellervessel, H., 1993. High pressure particle bed comminution of mineral raw materials. *AUFBEREITUNGS-TECHNIK. 5*, 243–249.
- [4] Sergeant, P. J., 1995. The high-compression roller mill an overview, colloquium, interactions between comminution and downstream processing Mintek, Randburg, pp. 1–15.
- [5] Bleifuss, R.L.; Goetzman, H.E.; Benner, B.R.; Zhong, S.; 1997. Evaluation of a high pressure roller press for taconite comminution. In: Kawatra, I.S. (Ed.), *Comminution Practice*. SME, Denver, pp. 127–135.
- [6] Thompsen, L.G., 1997. Operational performance of grinding rolls at Cyprus Sierrita Corporation, in: *Comminution Practice*, Kawatra, I.S. (Ed.), SME, Denver, pp. 107–110.
- [7] Klymowsky, R.; Patzelt, N.; Knecht, J.; Burchardt, E.; 2002. Selection and sizing of high pressure grinding rolls. In: Mular, A. L.; Halbe, D. N.; Barratt, D. J. (Eds.), *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control*, SMI, Colorado, pp. 636–668.
- [8] Daniel, M. J. and Morrell, S., 2004. HPGR model verification and scale up. *Mineral Engineering. 17*, 1149–1161.
- [9] Plath, H., 2005. High pressure grinding rolls for copper–gold ores and other mineral applications. *McGill Professional Development Seminar Notes*.
- [10] Aydogan, N. A.; and Ergun, L.; Benzer, H., 2006. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry, *Minerals Engineering. 19*, 130–139.

einschließlich Sichter betrug 14,0 kWh/t. Der Zerkleinerungsgrad nahm mit zunehmendem spezifischen Energieverbrauch zu. Bei sich ändernden Betriebsparametern änderte sich auch die Leistung des Windsichters beachtlich.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Forschungsabteilung der Hacettepe Universität sowie dem Türkischen Wissenschaftlich-Technischen Forschungsrat (TUBITAK MISAG 160 und MISAG 190) für ihre finanzielle Unterstützung. Der Dank geht auch an Aysun Gunlu, Ilkay Celik, Seyfi Erdem, Can Ozer und Omurden für ihre Hilfe.

- [11] Gunlu, A., 2006. Mathematical modeling of air separators used in cement grinding circuits, Hacettepe University, PhD thesis.
- [12] Aydogan, N. A.; and Ergun, L., 2010. Analysis of a closed circuit high pressure grinding rolls (HPGR) operation in a cement grinding plant – Part 2: evaluation of overall performance. (Submitted to *International Journal of Mineral Processing*)
- [13] Bond, F. C. The Third Theory of Comminution, 1952. Meeting of AIME in Mexico City, October 1951, in *Mining Engineering*. May, 484–494
- [14] Rowland, Jr., C. A. and Kjos, D. M. 1980. Rod and ball mills, in *Mineral Processing Plant Design*, Mular A. L. and Bhappu, R. B. (eds.) 2nd edn., SME-AIME, New York
- [15] Benzer, H.; Ergun, L.; Lynch, A.J.; Oner, M.; Gunlu, A.; Celik, I.B.; Aydogan, N., 2001. Modelling cement grinding circuits. *Mineral Engineering. 14* (11), 1469–1482.
- [16] Majumder, A.K., Yerriswamy, P., Barnwal, J.P., 2003. The Fish–Hook phenomenon in centrifugal separation of fine particles. *Minerals Engineering. 7*, 1005–1007.
- [17] Neesse, Th.; Dueck, J.; Minkov, L., 2004. Separation of finest particles in hydrocyclones, *Minerals Engineering. 17*, 689–696.