

## **Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen; Untersuchungen zur Optimierung von Herstellung und Eigenschaften**

### **Ziel des Forschungsvorhabens:**

Um die Marktakzeptanz von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen zu fördern und den Anteil der Komponenten Hüttensand und Kalkstein über die bisher üblichen Bereiche hinaus zu steigern, hatte dieses Forschungsvorhaben zum Ziel, die Zementherstellung und Zement-eigenschaften zu optimieren. Es sollte geklärt werden, ob und wie durch eine zweckmäßige Wahl der Reaktivität und der Anteile der Zementkomponenten sowie durch darauf abgestimmte Korngrößenverteilungen und dementsprechend zweckmäßige Einstellung von Mühle und Sieber individualisierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen hergestellt werden können. Diese Zemente sollten für die jeweils vorgesehene Verwendung im Beton besonders günstige Eigenschaften (z. B. niedriger Wasseranspruch, hohe Frühfestigkeit) aufweisen.

### **Einleitung**

Die Herstellung von Portlandzementklinker und die Mahlung von Zement erfordern die Bereitstellung natürlicher Rohstoffe und einen großen Energieaufwand. Durch die Nutzung anderer Zementhauptbestandteile kann Klinker teilweise substituiert werden. Dies kann zu einer deutlichen Einsparung von Brennstoffenergie sowie zu einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Klinkererzeugung führen. Durch den Einsatz von Nebenprodukten aus anderen Industriezweigen können darüber hinaus bei der Zementherstellung natürliche Rohstoffe eingespart werden. Dabei wird angestrebt, den bisher schon üblichen Anteil von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen im Markt zu steigern und den Gehalt an anderen Hauptbestandteilen in diesen Zementen zu erhöhen. Dies bleibt jedoch nicht ohne Auswirkungen auf die Zementeigenschaften.

Die Leistungsfähigkeit von Zementen wird aufgrund der steigenden Bedeutung von Kompositzementen zunehmend durch die weiteren Hauptbestandteile neben dem Klinker bestimmt. Der Anreiz, Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen zu erzeugen, liegt außer in dem deutlich niedrigeren Energieverbrauch ferner in der Möglichkeit, Zemente herzustellen, die auf ihren Anwendungsfall hin optimiert sind (z.B. niedrige Hydratationswärme, geringer wirksamer Alkaligehalt). Die Nutzung anderer Hauptbestandteile führt jedoch in der Regel zu einer Reduzierung der Frühfestigkeiten und in einigen Fällen auch zu veränderten Verarbeitungseigenschaften. Die Erzielung hoher Frühfestigkeiten bei einer möglichst guten Verarbeitbarkeit der Zemente steht deshalb bei vielen Forschungsarbeiten im Vordergrund.

Die Zementeigenschaften werden vor allem von der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und der Reaktivität der eingesetzten Stoffe sowie von der beim Mahlen erzeugten Mahlfineinheit und Korngrößenverteilung der Zementkomponenten beeinflusst. Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen können heute einerseits durch gemeinsames Mahlen oder andererseits durch getrenntes Mahlen der Ausgangsstoffe (z. B. Klinker, Hüttensand, Kalk-

stein, Sulfatträger) und anschließendes Mischen der mehlfeinen Vorprodukte hergestellt werden. Bei der gemeinsamen Vermahlung können die Zusammensetzung, die Mahlfeinheit und die Korngrößenverteilung des Zements beeinflusst und somit bestimmte Zementeigenschaften erzeugt werden. Die Erzeugung gezielter Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten ist hier jedoch nicht möglich, da sich die schwerer mahlbare Komponente in den gröberen Fraktionen und die leichter mahlbare Komponente entsprechend in den feineren Fraktionen anreichert. Darüber hinaus zeigte sich bei einigen Untersuchungen, dass die Korngrößenverteilung der schlechter mahlbaren Komponente im Vergleich zur leichter mahlbaren Komponente ein etwas höheres RRSB-Steigungsmaß erreichte.

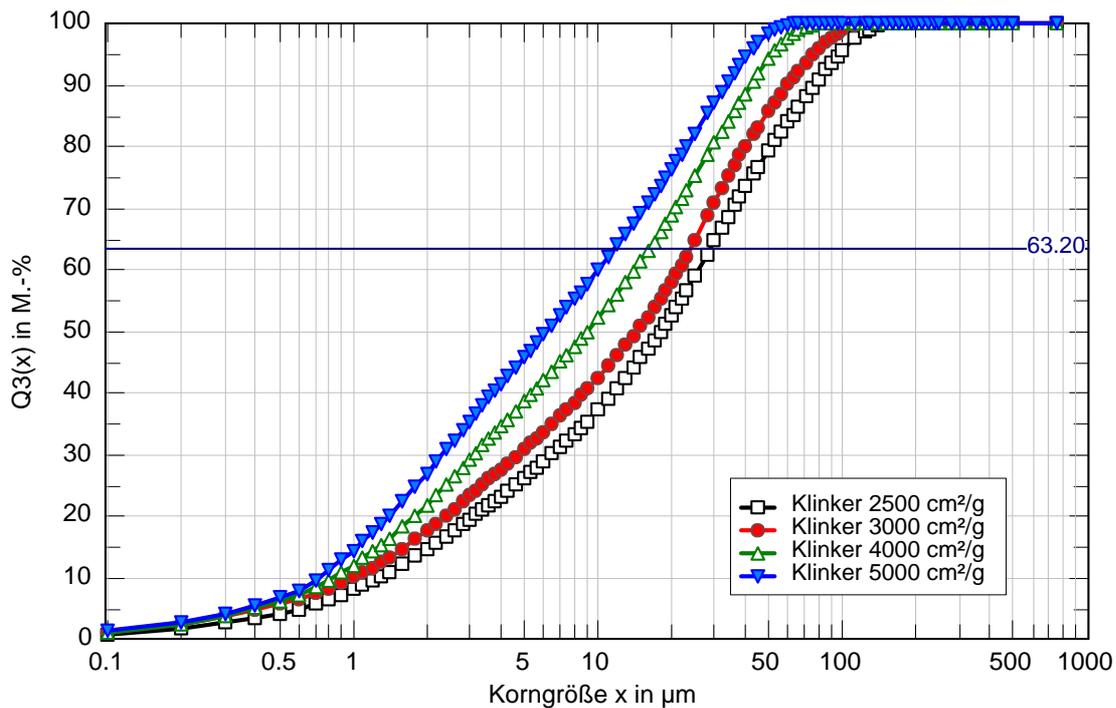
Getrennt gemahlene Zementkomponenten können hingegen in ihren Korngrößenverteilungen und Feinheiten exakt eingestellt werden und somit einen zusätzlichen Einfluss auf die Zementeigenschaften ausüben. Der zusätzliche Freiheitsgrad beinhaltet jedoch auch die Gefahr, dass sich ungewollte Schwankungen der Eigenschaften der Ausgangsstoffe in stärkerem Maße auf die Eigenschaften des Zements auswirken.

Zur Herstellung von Zementen und Zementkomponenten werden heute überwiegend Mahlanlagen eingesetzt, bei denen eine Mühle im Kreislauf mit einem Sieb arbeitet. Je nach Mahlbarkeit des Mahlgutes sowie Konstruktion und Betriebsweise von Mühle und Sieb entstehen dabei unterschiedliche Korngrößenverteilungen des gemahlenden Produkts.

Die Korngrößenverteilung des Zements kann Auswirkungen auf die Betoneigenschaften haben. Früheren Untersuchungen zufolge können die Auswirkungen auf die Betoneigenschaften umso deutlicher sein, je höher der Zementgehalt im Beton ist. So können unter anderem Zementmerkmale, wie beispielsweise die chemisch-mineralogische Zusammensetzung, die Kornform, die Feinheit und die Korngrößenverteilung Einfluss auf die Betonfestigkeiten ausüben. Da Zement ein wichtiger Bestandteil der Betonmatrix ist, besitzt er darüber hinaus auch einen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons.

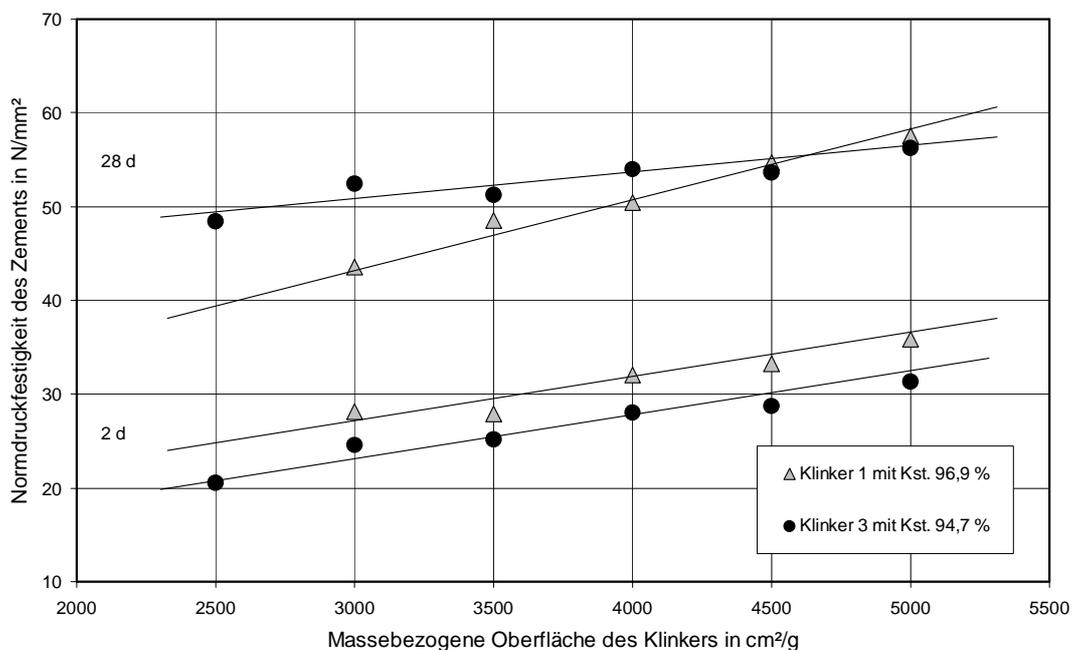
### **Einfluss der Korngrößenverteilungen**

Um den Einfluss der Korngrößenverteilung der Zementhauptbestandteile auf die Zement- und Betoneigenschaften zu untersuchen, wurden Klinker- und Hüttensandmehle entweder mit gleichem Steigungsmaß der Korngrößenverteilung, aber unterschiedlichen massebezogenen Oberflächen oder mit gleicher massebezogener Oberfläche, aber unterschiedlichen Steigungsmaßen der Korngrößenverteilung hergestellt. Im **Bild 1** sind beispielhaft die Korngrößenverteilungen von vier Klinkermehlen mit unterschiedlicher Feinheit, aber nahezu konstantem RRSB-Steigungsmaß dargestellt.



**Bild 1:** Korngrößenverteilungen von Klinkermehlen unterschiedlicher Feinheiten und einem RRSB-Steigungsmaß von etwa  $n = 0,8$

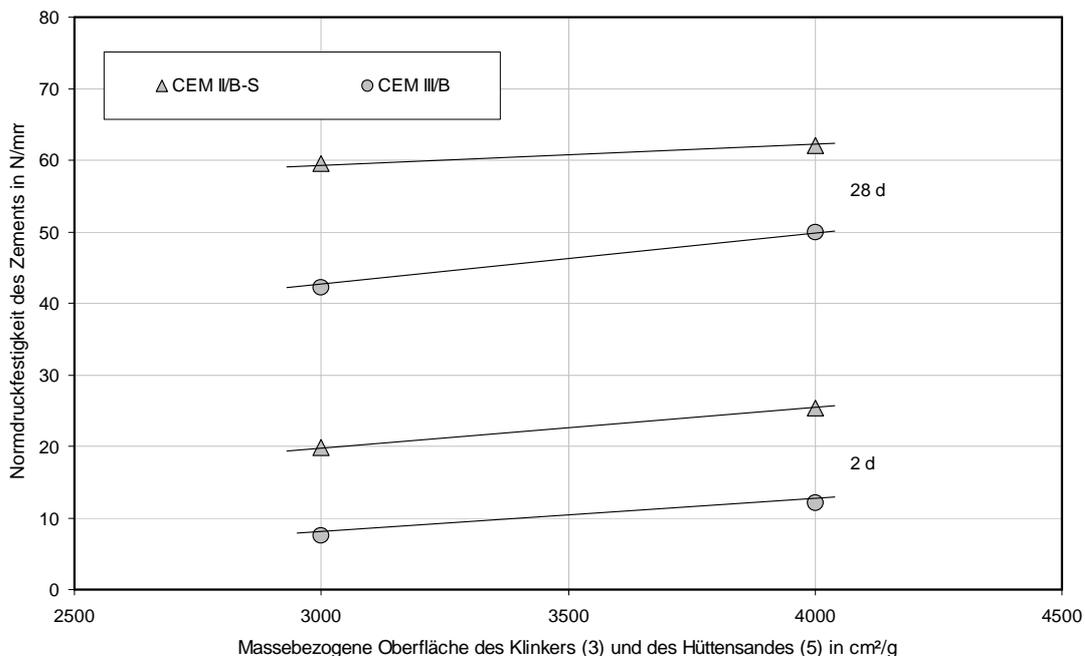
Die Normdruckfestigkeit des Zements stieg nach 2 und 28 Tagen bei gleichem Steigungsmaß der Korngrößenverteilung und konstanter Zementzusammensetzung in Abhängigkeit von der massebezogenen Oberfläche an (**Bild 2**). Damit wurden zunächst die Ergebnisse früherer Forschungsprojekte bestätigt. Die Steigerung der Festigkeit mit Zunahme der massebezogenen Oberfläche konnte auch bei der Betonprüfung nachgewiesen werden.



**Bild 2:** Druckfestigkeiten von Portlandzementen mit einem RRSB-Steigungsmaß der Korngrößenverteilung von  $n = 0,79$  bis  $n = 0,84$  in Abhängigkeit von der massebezogenen Klinkeroberfläche

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Betone wurden mit einheitlicher Sieblinie und einem Wasserzementwert von  $w/z=0,5$  hergestellt.

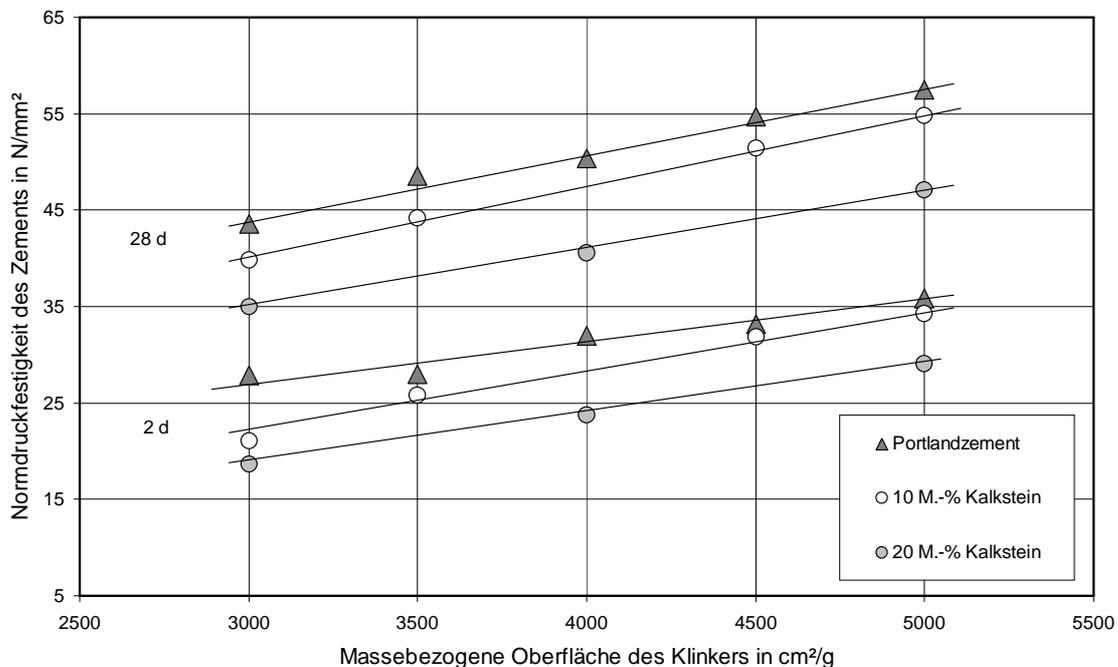
Der Wasseranspruch für Normsteife nahm bei den Zementen des Klinkers 3 von 24 M.-% bei  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$  auf 28 M.-% bei  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$  zu. Bei den Zementen des Klinkers 1 erhöhte sich dagegen der Wasseranspruch von 25 M.-% bei  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$  auf 33 M.-% bei  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Der physikalisch bedingte Teil des Wasseranspruchs nimmt zwar mit steigender Zementfeinheit zu; bei einer Steigerung der Zementfeinheit von  $3000$  auf  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$  dürfte die Zunahme jedoch nur 2 bis 4 M.-% betragen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei den feineren Zementen keine optimale Sulfatabstimmung vorlag. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde bei allen Laborzementen durch Zugabe von Sulfatträgern ein Gesamtsulfatgehalt von 3,5 M.-% eingestellt, wobei 50 % als leichtlösliches Sulfat (Halbhydrat und Klinker- $\text{SO}_3$ ) und 50 % als schwerlösliches Sulfat (Anhydrit) vorlagen. Bei einem Zement mit einer Feinheit von  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$  führt diese Sulfatabstimmung zum niedrigsten Wasseranspruch und zur längsten Erstarrungsverzögerung. Bei feineren Zementen stellt die gewählte Sulfatzugabe aber nicht die optimale Sulfatabstimmung dar. Feinere Zemente benötigen offenbar einen höheren Anteil an leichtlöslichem Sulfat um eine Bildung von Monosulfat während der Anfangshydratation zu verhindern und somit die besten Verarbeitungseigenschaften zu erzielen. Erwartungsgemäß verschlechterten sich auch die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons bei einer Feinheitssteigerung des Zements. Das Ausbreitmaß nach 10 Minuten verringerte sich von 500 auf 460 mm aufgrund einer Feinheitssteigerung des Klinkers 3 von  $3000$  auf  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Wurde der Frischbeton mit dem gröberen Zement noch in den Konsistenzbereich F4 als sehr weich eingeordnet, so lag der Frischbeton mit dem feineren Zement im Konsistenzbereich F3 (weich).



**Bild 3:** Druckfestigkeiten von CEM II/B-S-Zementen mit 25 M.-% Hüttensand und CEM III/B-Zementen mit 75 M.-% Hüttensand in Abhängigkeit von der massebezogenen Oberfläche der Hauptkomponenten bei einem RRSB-Steigungsmaß von  $n = 0,9$

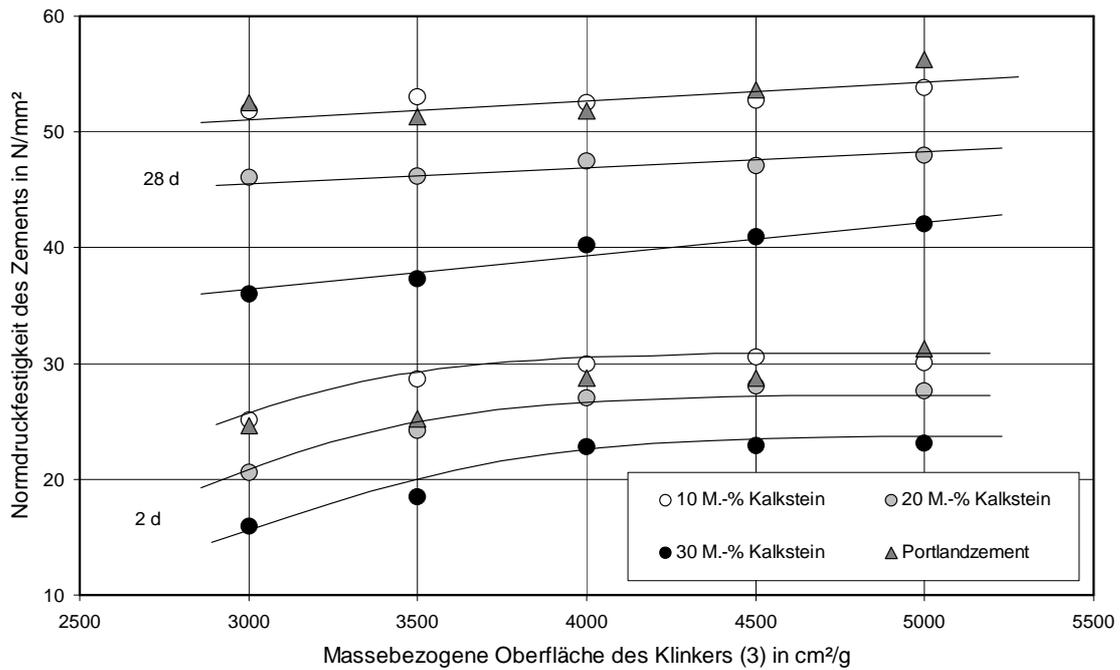
Im **Bild 3** sind die 2-Tage- und 28-Tage-Druckfestigkeiten von CEM II/B-S-Zementen mit 25 M.-% und CEM III/B-Zementen mit 75 M.-% Hüttensand in Abhängigkeit von der massebezogenen Oberfläche der Hauptkomponenten dargestellt. Das RRSB-Steigungsmaß betrug in diesem Beispiel  $n = 0,9$ . Aus dem Bild geht hervor, dass sich die Druckfestigkeiten mit zunehmender Feinheit der Hauptkomponenten erhöhen. Außerdem besitzen die Zemente mit 25 M.-% Hüttensand ein höheres Festigkeitsniveau als die Zemente mit einem Hüttensandgehalt von 75 M.-%. Bei den Betonuntersuchungen wurden die im Zement gefundenen Ergebnisse bestätigt.

Bei Portlandkalksteinzementen wurde der Einfluss von Klinkerfeinheit und Kalksteinanteil auf die Zementeigenschaften untersucht. Die massebezogene Oberfläche des Kalksteinmehls betrug ca.  $7000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Die Feinheit des Klinkers wurde stufenweise von  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$  auf  $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$  erhöht. Wie erwartet stiegen bei Verwendung von Klinker 1 die Festigkeiten mit zunehmender Mahlfeinheit an (**Bild 4**). Eine Erhöhung des Kalksteingehaltes hatte wie erwartet eine Abnahme der Zementfestigkeit zur Folge.



**Bild 4:** Druckfestigkeiten von Portlandkalksteinzementen in Abhängigkeit von der massebezogenen Oberfläche des Klinkers 1

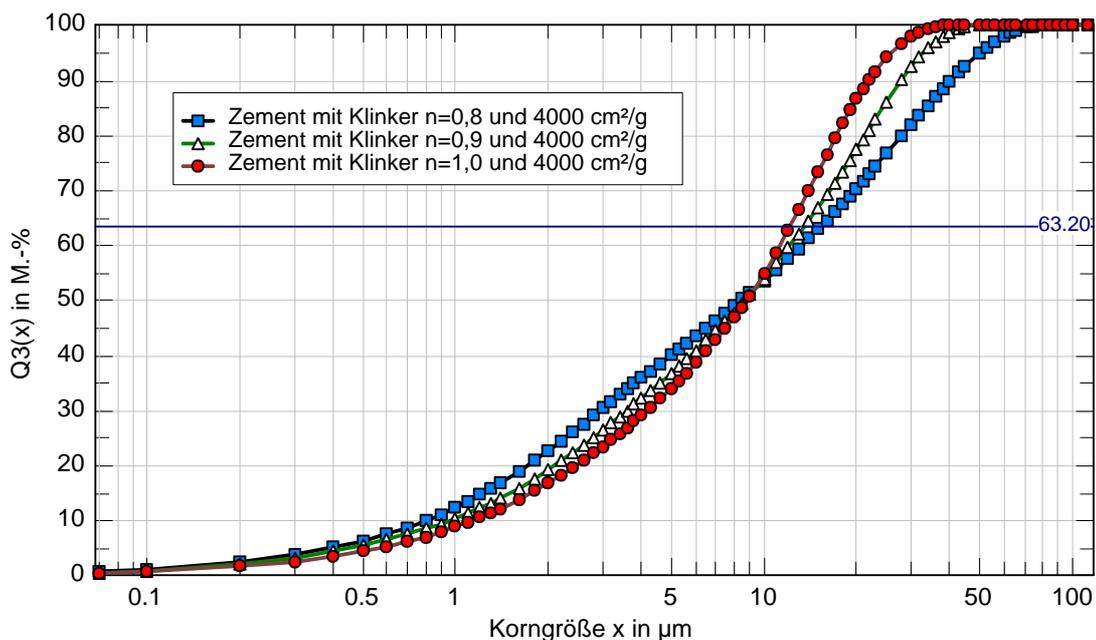
Bei den aus Klinker 3 hergestellten Portlandkalksteinzementen wurde eine deutliche Zunahme der 2-Tage-Festigkeit, jedoch nur eine geringfügige Zunahme der 28-Tage-Festigkeit über der Feinheit gemessen, was auf die chemisch-mineralogischen Eigenschaften des verwendeten Klinkers zurückzuführen ist (siehe **Bild 5**). Diese Zemente erreichten sehr schnell ein hohes Festigkeitsniveau, das durch eine feinere Aufmahlung nur noch wenig gesteigert werden konnte.



**Bild 5:** Druckfestigkeiten von Portlandkalksteinzementen in Abhängigkeit von der massebezogenen Oberfläche des Klinkers 3

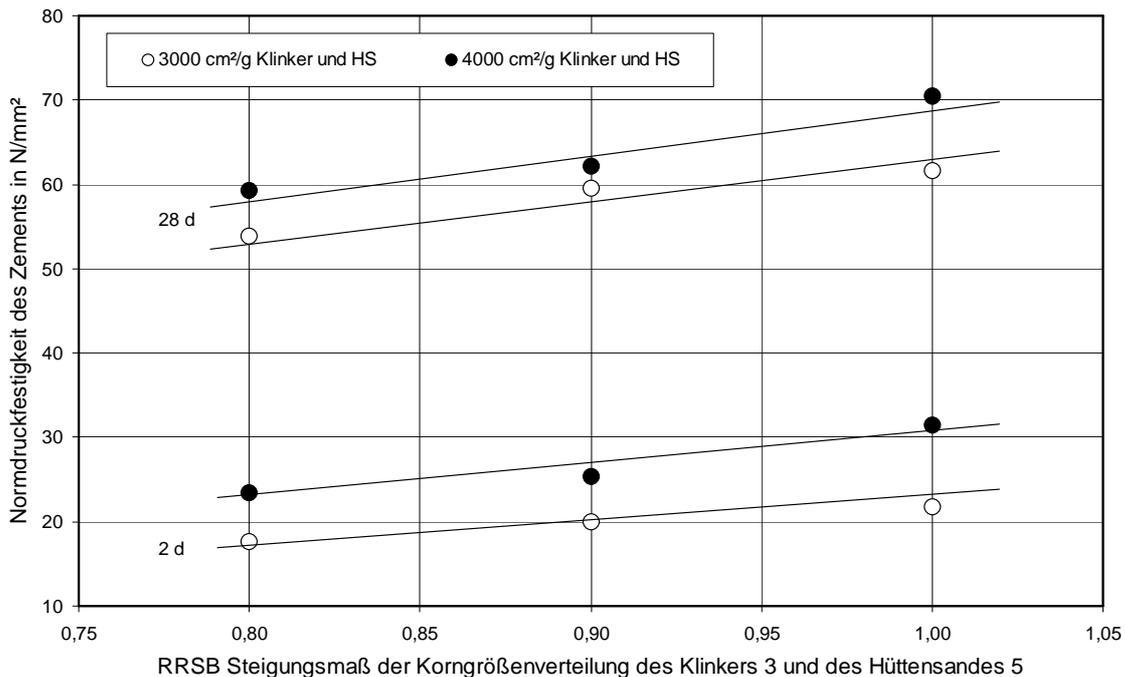
Um den Einfluss des Steigungsmaßes der Korngrößenverteilung auf die Zementeigenschaften zu untersuchen, wurden Klinker- und Hüttensandmehle der gleichen massebezogenen Oberfläche aber unterschiedlicher Steigungsmaße der Korngrößenverteilung hergestellt.

**Bild 6** zeigt beispielhaft die Korngrößenverteilungen von Portlandzementen mit unterschiedlichen Steigungsmaßen, aber gleicher massebezogener Oberfläche.



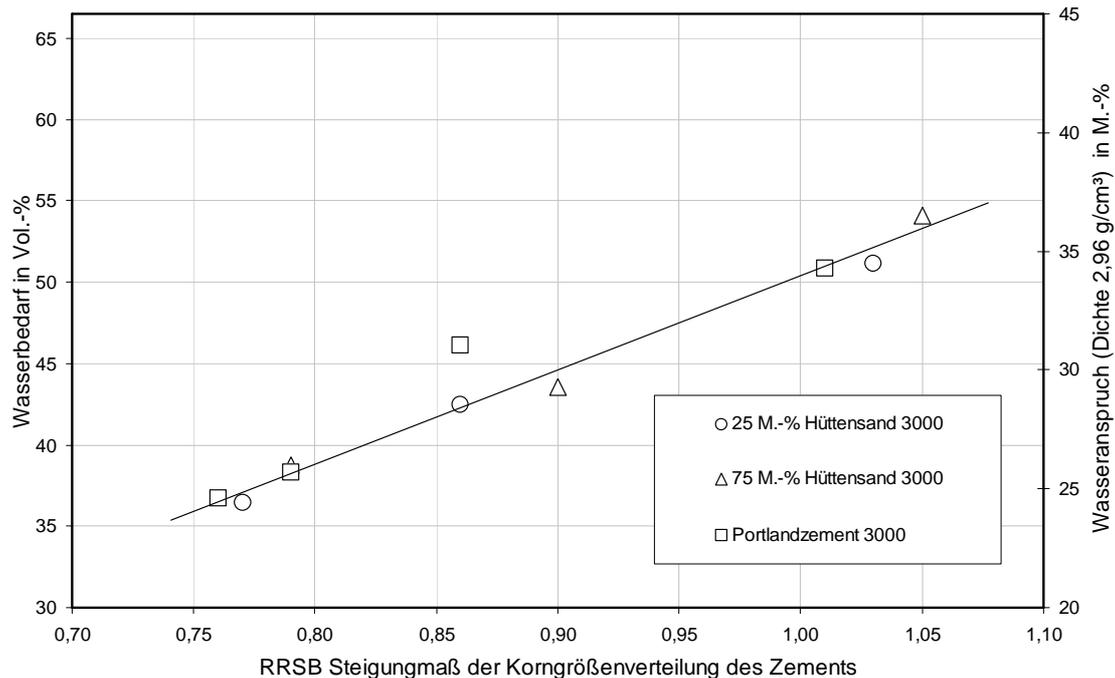
**Bild 6:** Korngrößenverteilungen von Portlandzementen mit etwa gleicher massebezogener Oberfläche (4330 cm²/g), aber unterschiedlichen RRSB-Steigungsmaßen

Die Erhöhung des Steigungsmaßes der Korngrößenverteilung bewirkte bei gleicher massebezogener Oberfläche sowohl bei CEM I-Zementen als auch bei CEM II/B-S-Zementen eine deutliche Zunahme der Zementdruckfestigkeiten nach 2 und 28 Tagen (siehe **Bild 7**). Somit wurden zunächst Erkenntnisse aus früheren Forschungsvorhaben bestätigt. Die Festigkeitssteigerung durch die Zunahme des Steigungsmaßes war auch im Beton nachweisbar. Bei Zementen mit höheren Hüttensandgehalten (CEM III/B) hatte das Steigungsmaß vorrangig einen Einfluss auf die 28-Tage-Druckfestigkeiten, während die 2-Tage-Festigkeitswerte nur sehr wenig durch das Steigungsmaß der Korngrößenverteilung beeinflusst wurden.



**Bild 7:** Druckfestigkeiten von CEM II/B-S-Zementen mit 25 M.-% Hüttensand bei konstanter Komponentenfeinheit in Abhängigkeit vom RRSB-Steigungsmaß der Korngrößenverteilung der Komponenten

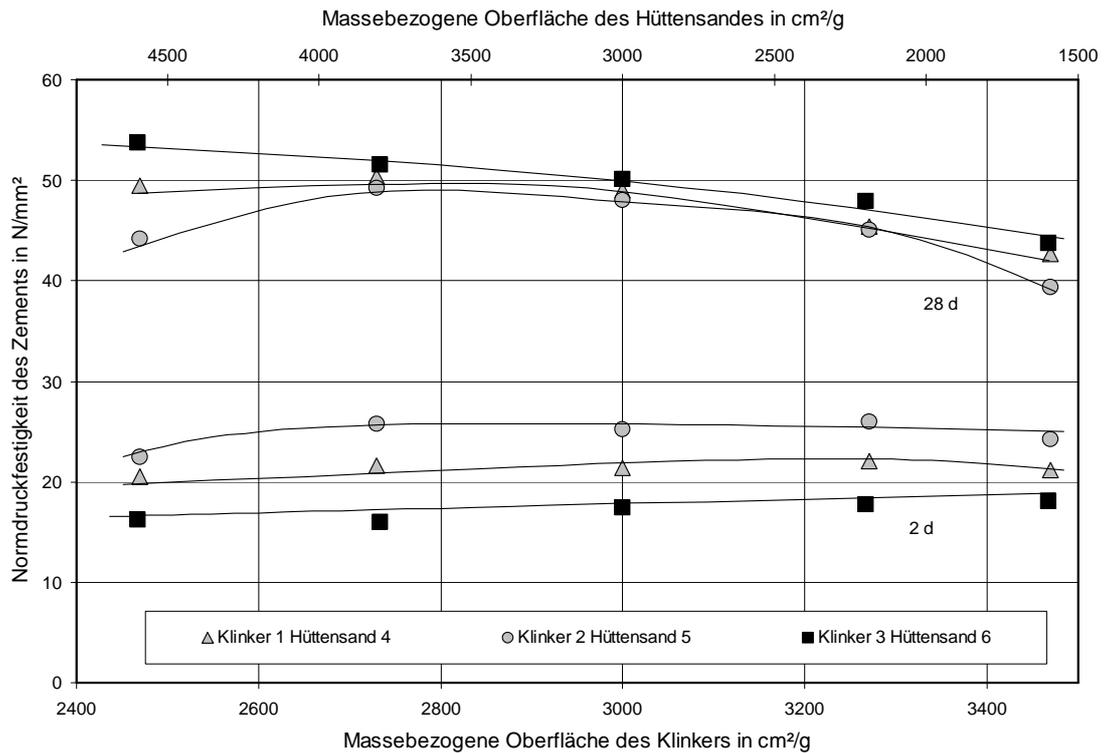
In **Bild 8** sind die Wasseransprüche von Portlandzementen, CEM II/B-S und CEM III/B-Zementen mit unterschiedlichen Steigungsmaßen der Korngrößenverteilung aber gleicher massebezogener Oberfläche dargestellt. Da die Zemente unterschiedliche Feststoffdichten aufweisen, wurden die Messwerte des Wasseranspruchs in M.-% in Werte des Wasserbedarfs in Vol.-% umgerechnet und auf der linken Ordinate aufgetragen. Auf der rechten Ordinate sind die zugehörigen Werte des Wasseranspruchs in M.-% für eine Feststoffdichte von 2,96 g/cm<sup>3</sup> dargestellt. Wie aus dem Bild hervorgeht, bewirkt ein erhöhtes Steigungsmaß der Korngrößenverteilung eine starke Zunahme des Wasseranspruchs. Die Frischbetonkonsistenz wurde ebenfalls deutlich vom Steigungsmaß der Korngrößenverteilung des Zements beeinflusst. Während Betone, die aus Zementen mit breiter Korngrößenverteilung hergestellt



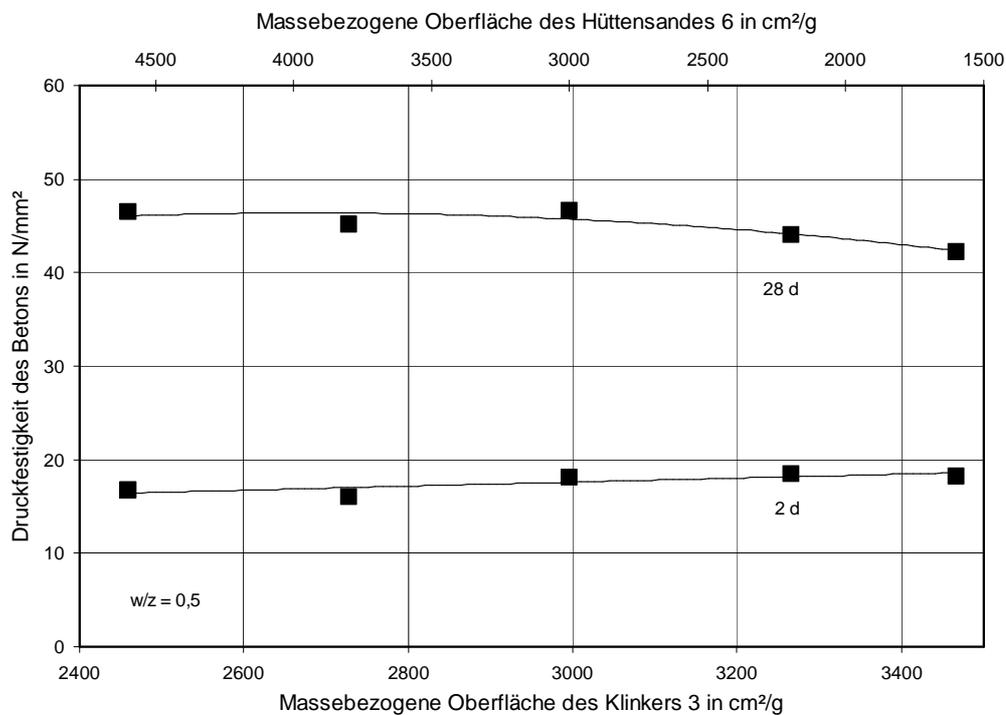
**Bild 8:** Wasserbedarf bzw. Wasseranspruch von Portlandzementen, CEM II/B-S- und CEM III/B-Zementen mit 25 M.-% bzw. 75 M.-% Hüttensand in Abhängigkeit vom RRSB-Steigungsmaß des Zements bei einer Komponentenfeinheit von 3000 cm<sup>2</sup>/g

wurden, dem Konsistenzbereich weich bis sehr weich zugeordnet werden konnten, wurde an Betonen aus Zementen mit enger Korngrößenverteilung eine weiche bis plastische Konsistenz ermittelt.

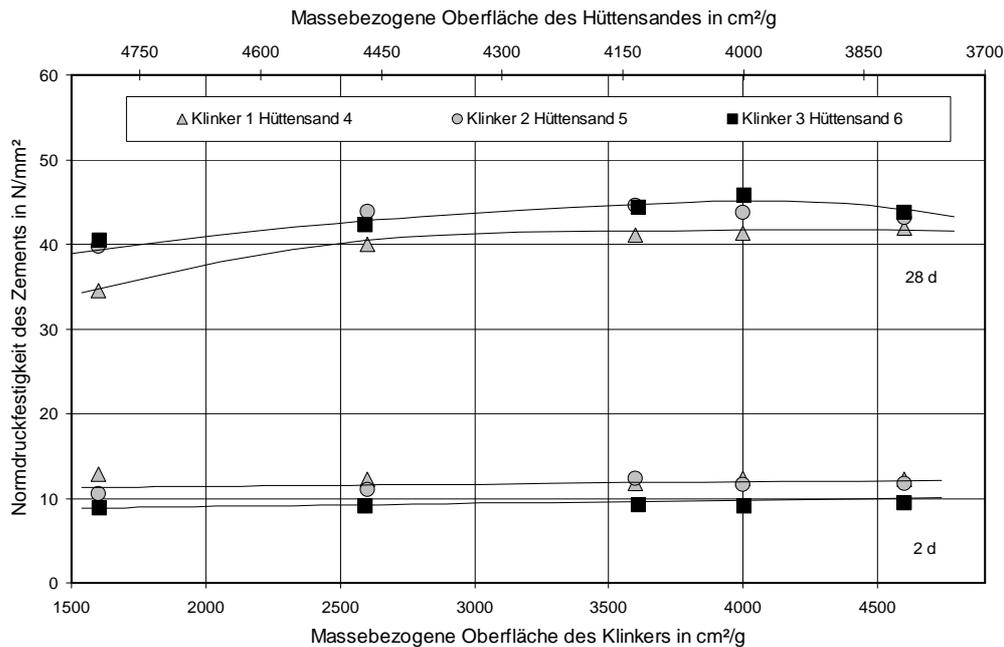
Weiterhin wurden Untersuchungen zum Einfluss der Feinheit der Komponenten Klinker und Hüttensand auf die Zementeigenschaften durchgeführt, wobei die Gemischfeinheit konstant blieb. Bereits in früheren Untersuchungen an CEM III/A-Zementen zeigte sich, dass die Festigkeitsentwicklung durch eine Kombination unterschiedlich feiner Komponenten nur in geringem Maße optimiert werden kann. Nunmehr wurden die Komponentenfeinheiten in etwas weiteren Grenzen variiert und andere Zementarten geprüft. Zemente mit 25 M.-% Hüttensand und einer Klinker-Hüttensand-Gemischfeinheit von 3000 cm<sup>2</sup>/g und Zemente mit 50 M.-% Hüttensand mit einer Gemischfeinheit von 3500 cm<sup>2</sup>/g wiesen geringfügig höhere Frühfestigkeiten auf, wenn die Klinkerkomponente sehr fein und die Hüttensandkomponente sehr grob gemahlen wurde. Gleichzeitig wurden bei diesen Zementen die geringsten Festigkeiten im Alter von 28 Tagen gemessen. Die höchste 28-Tage-Festigkeit wurde hingegen erzielt, wenn die Hüttensandkomponente sehr viel feiner als die Klinkerkomponente gemahlen wurde (**Bild 9**). Auch hier konnten die gefundenen Zusammenhänge im Beton bestätigt werden (**Bild 10**).



**Bild 9:** Druckfestigkeiten von Betonen aus CEM II/B-S-Zementen mit 25 M.-% Hüttensand mit konstanter Gemischfeinheit von 3000 cm<sup>2</sup>/g in Abhängigkeit von der Feinheit der Komponenten Klinker und Hüttensand.



**Bild 10:** Druckfestigkeiten von Betonen aus CEM II/B-S-Zementen mit 25 M.-% Hüttensand in Abhängigkeit von der Feinheit der Hauptkomponenten bei konstanter Zementfeinheit von 3000 cm<sup>2</sup>/g.



**Bild 11:** Druckfestigkeiten von CEM III/B-Zementen mit 75 M.-% Hüttensand in Abhängigkeit von der Feinheit der Hauptkomponenten bei konstanter Zementfeinheit von 4000 cm<sup>2</sup>/g

Bei Zementen mit 75 M.-% Hüttensand und einer Gemischfeinheit von 4000 cm<sup>2</sup>/g wurde kein Einfluss der unterschiedlichen Komponentenfeinheiten auf die Anfangsfestigkeiten festgestellt (**Bild 11**). Im Alter von 28 Tagen wurden im Mörtel und Beton etwas geringere Druckfestigkeiten ermittelt, wenn die Hüttensandkomponente im Vergleich zum Klinker deutlich feiner vorlag.

Der Wasseranspruch für Normsteife variierte aufgrund der unterschiedlichen Komponentenfeinheiten nur um etwa 1 M.-%. Das größte Ausbreitmaß des Frischbetons wurde mit Zementen unterschiedlicher Komponentenfeinheiten gemessen. Bei gleichfeinen Zementkomponenten verringerte sich das Ausbreitmaß deutlich. Der Erstarrungsbeginn verkürzte sich bei Zementen mit feinem Klinkermehl und grobem Hüttensandmehl.

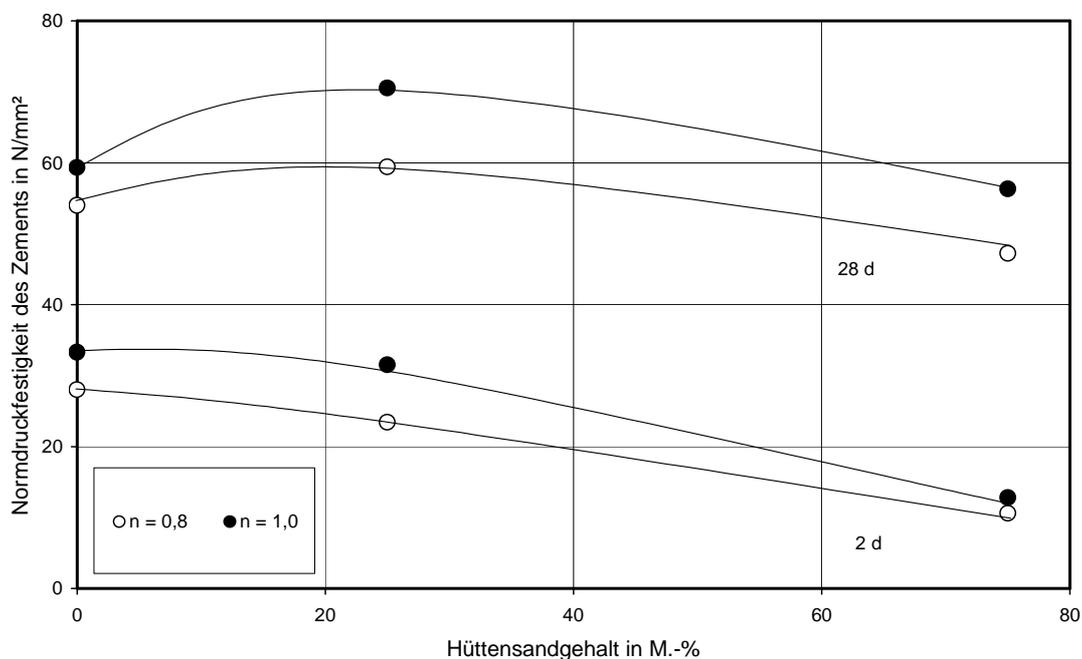
### **Einfluss von Anteil und Reaktivität der Hauptbestandteile**

Neben dem Einfluss der Korngrößenverteilung der Komponenten bzw. des Zements wurde auch der Einfluss der Anteile und Reaktivität der Zementkomponenten bei Portlandkalksteinzementen und hüttensandhaltigen Zementen untersucht.

Ein Kalksteingehalt von 10 M.-% hatte im Vergleich zu Portlandzementen mit gleicher Klinkerfeinheit nur sehr geringe Auswirkungen auf die Druckfestigkeiten von Portlandkalksteinzementen. Kalksteingehalte von 20 M.-% oder 30 M.-% führten zu einer deutlichen Verringerung der Druckfestigkeiten, welche jedoch durch eine stärkere Feinmahlung der Klinkerkomponente teilweise kompensiert werden konnte. Klinkersorten, die im Portlandzement eine

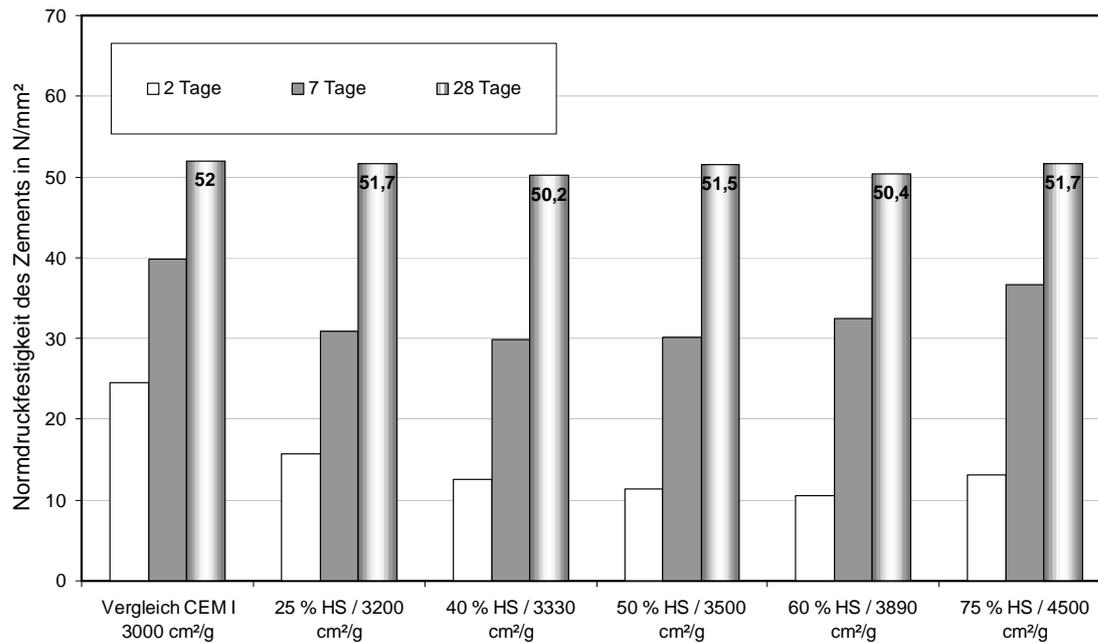
deutliche Festigkeitssteigerung in Abhängigkeit von der Feinheit aufweisen, sind besonders gut geeignet, um den Festigkeitsrückgang zu kompensieren.

Bei einer Zugabe von Hüttensandmehl mit einer massebezogenen Oberfläche von 3000  $\text{cm}^2/\text{g}$  und geringem RRSB-Steigungsmaß zu einem Klinkermehl mit gleicher Feinheit und Korngrößenverteilung nahmen vor allem die 2-Tage-Festigkeiten, aber auch die 28-Tage-Festigkeiten mit steigendem Hüttensandgehalt ab. Bei einer Kombination von feineren Klinker- und Hüttensandmehlen (4000  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) mit hohem Steigungsmaß konnten jedoch trotz eines Hüttensandgehaltes bis etwa 25 M.-% vergleichbare 2-Tage-Druckfestigkeiten erzielt werden, während die 28-Tage-Festigkeit deutlich höhere Werte als beim vergleichbaren Portlandzement erreichte (**Bild 12**). Eine weitere Erhöhung des Hüttensandgehaltes hatte jedoch eine Abnahme der Zementdruckfestigkeiten zur Folge. Auch hier spiegelten sich die am Normmörtel bestimmten Eigenschaften im Beton wieder.



**Bild 12:** Druckfestigkeiten von CEM I-, CEM II/B-S- und CEM III/B-Zementen mit einer Komponentenfeinheit von 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$  in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt

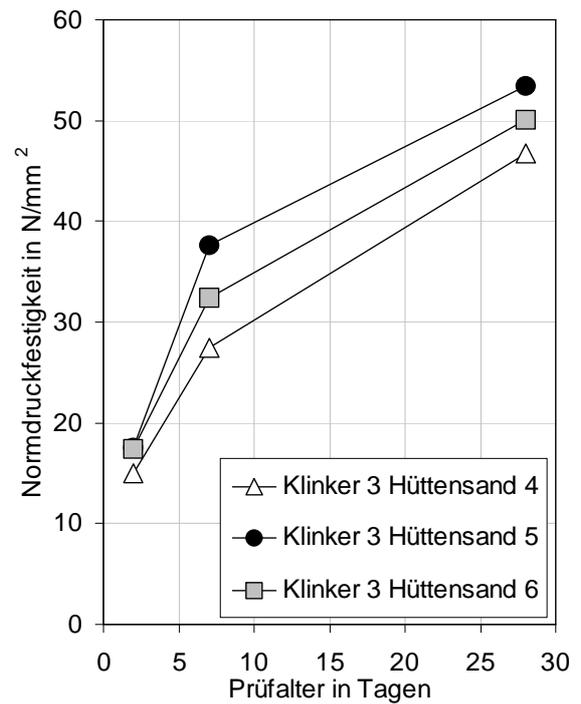
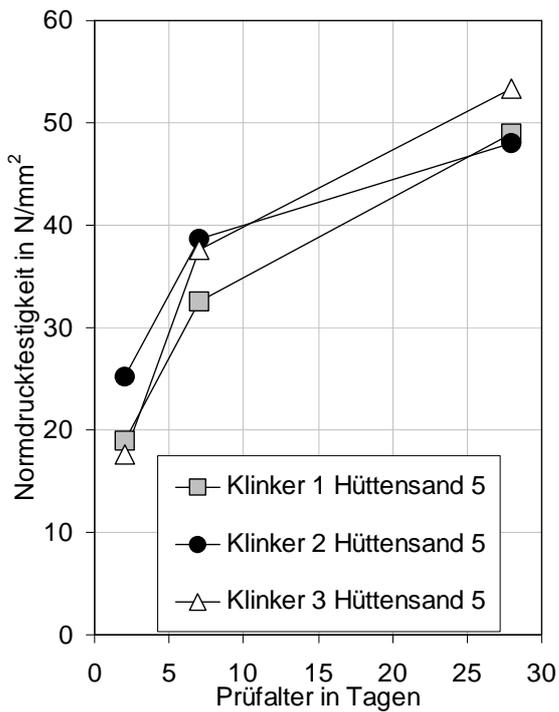
Weiterhin wurde untersucht, inwieweit die Festigkeitsabnahme infolge des Hüttensandeinsatzes durch eine stärkere Feinmahlung kompensiert werden kann. Mit zunehmendem Hüttensandgehalt musste die erforderliche Mahlfineinheit der Komponenten bzw. des Zements überproportional angehoben werden, um für alle Zemente eine vergleichbare 28-Tage-Festigkeit von etwa 50  $\text{N}/\text{mm}^2$  zu erreichen (**Bild 13**). Wurde z. B. der Hüttensandgehalt von 25 M.-% auf 40 M.-% angehoben, musste die massebezogene Oberfläche nur um ca. 100  $\text{cm}^2/\text{g}$  gesteigert werden. Sollte jedoch der Hüttensandgehalt von 60 M.-% auf 75 M.-% erhöht werden, so musste die massebezogene Oberfläche von Klinker und Hüttensand um etwa 600 bis 700  $\text{cm}^2/\text{g}$  angehoben werden, um eine vergleichbare 28-Tage-Festigkeit zu erzielen.



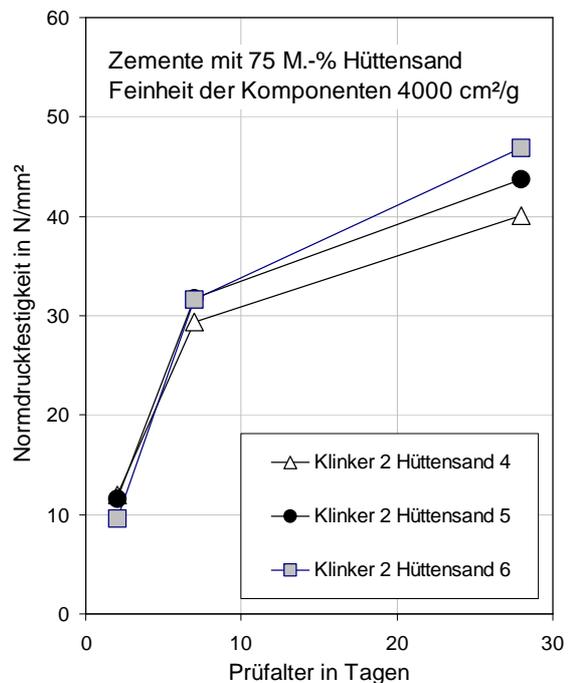
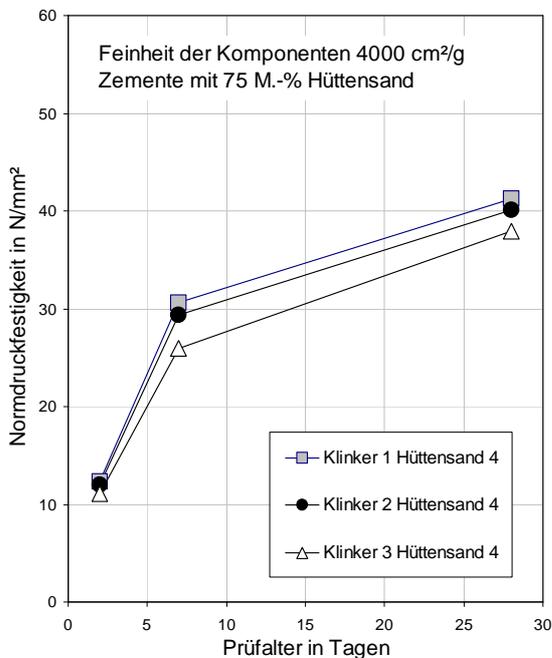
**Bild 13:** Druckfestigkeiten von Zementen in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt und von der Komponentenfeinheit zur Erzielung der 28-Tage-Druckfestigkeit von ca. 50 bis 52 N/mm<sup>2</sup>

Der Wasseranspruch der Zemente nahm mit steigender Zementfeinheit zu, und der Erstarungsbeginn verzögerte sich infolge des steigenden Hüttensandgehaltes. Auch hier ließen sich die gefundenen Ergebnisse weitestgehend auf den Beton übertragen.

Um die Auswirkungen der Reaktivitäten von Klinker und Hüttensand auf die Eigenschaften von hüttensandhaltigen Zementen zu untersuchen, wurden von unterschiedlichen Klinkern und Hüttensanden Mehle mit gleicher massebezogener Oberfläche und Korngrößenverteilung hergestellt und daraus entsprechende Zemente durch Mischen erzeugt. Bei hüttensandhaltigen Zementen hat die Reaktivität des Hüttensandes praktisch keinen Einfluss auf die 2-Tage-Festigkeit des Zements. Dagegen wurden die 7- und 28-Tage-Festigkeiten durch die Reaktivität des Hüttensandes deutlich beeinflusst. Die Reaktivität des Klinkers beeinflusst dagegen bei hüttensandarmen Zementen die 2-Tage-Festigkeit des Zements deutlich (**Bild 14**). Bei hüttensandreichen Zementen spielt die Reaktivität des Klinkers eine untergeordnete Rolle für die Frühfestigkeit (**Bild 15**). Auf die 7- und 28 Tage-Festigkeit wirkt sich die Reaktivität der Klinkers sowohl bei hüttensandarmen als auch bei hüttensandreichen Zementen aus. Auch hier ließen sich die unterschiedlichen Zementeigenschaften im Beton wiederfinden. Insbesondere die charakteristischen Merkmale des Klinkers wurden im Festigkeitsverlauf des Betons sichtbar.



**Bild 14:** Druckfestigkeiten von CEM II/B-S-Zementen auf der Basis des gleichen Hüttensands (5) in Kombination mit drei verschiedenen Klinkern (links) bzw. auf Basis des gleichen Klinkers (3) in Kombination mit verschiedenen Hüttensanden.



**Bild 15:** Druckfestigkeiten von CEM III/B-Zementen auf der Basis des gleichen Hüttensands (4) in Kombination mit drei verschiedenen Klinkern (links) bzw. auf Basis des gleichen Klinkers (2) in Kombination mit verschiedenen Hüttensanden.

### **Einfluss der Kreislaufmahlung**

Die Korngrößenverteilungen gemeinsam oder getrennt gemahlener Zementhauptbestandteile werden insbesondere von ihrer Mahlbarkeit, aber auch von den Produktionsbedingungen und den technischen Parametern einer Mahlanlage bestimmt. Deshalb wurden die Auswirkungen der Kreislaufmahlung auf die Entstehung der Korngrößenverteilungen der Hauptkomponenten untersucht, wobei insbesondere die gemeinsame Mahlung von unterschiedlich mahlbaren Stoffen im Vordergrund stand. Hierzu wurden Mahlversuche an einer halbtechnischen Mahlanlage und an Betriebsmahlanlagen durchgeführt sowie ein Simulationsprogramm eingesetzt, mit dessen Hilfe die Vorgänge in einem Mahlkreislauf simuliert werden können.

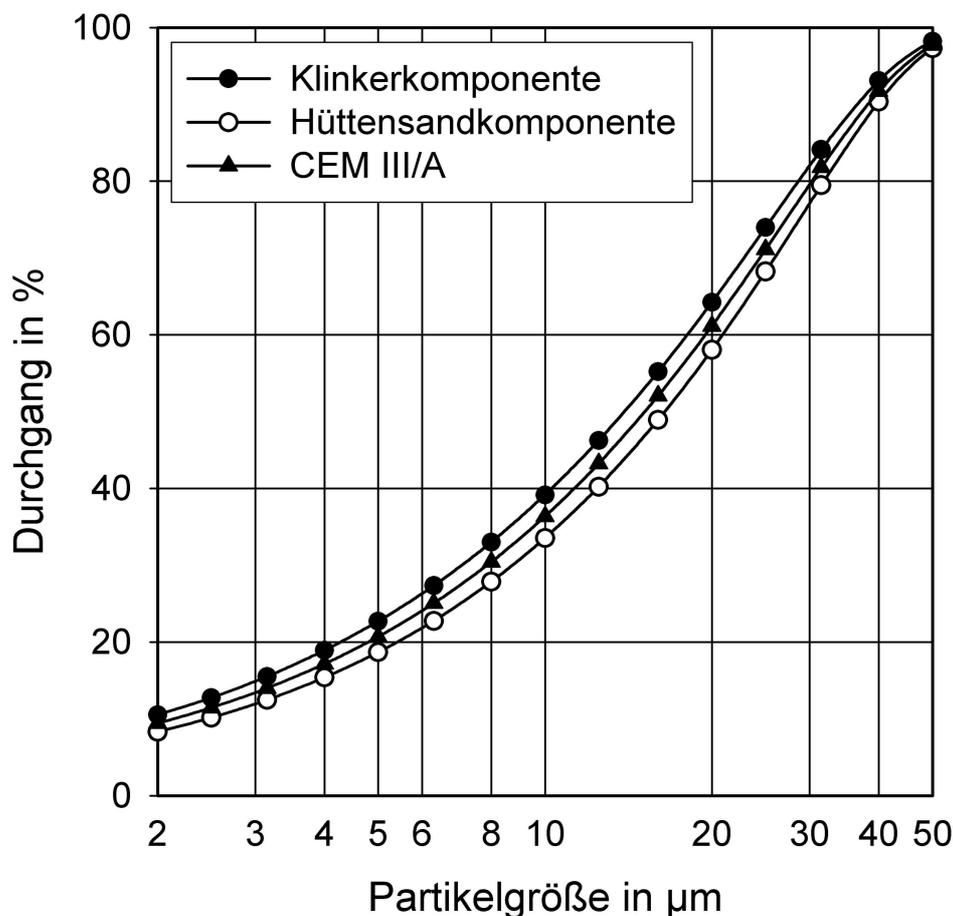
Zunächst wurde die Einkomponentenmahlung im einfachen Mahlkreislauf simuliert, um das Simulationsprogramm auf Plausibilität zu prüfen und weitere Erkenntnisse zum Einfluss des Frischgutmassenstroms, der Trennkorngröße und der Mahlbarkeit zu gewinnen. Wie bereits aus früheren Untersuchungen bekannt war, führte eine Reduzierung der Trennkorngröße des Sichters zu einem feineren Sichterfeingut, einem Anstieg des Umlaufmassenstroms und zu einer Erhöhung des Steigungsmaßes der Korngrößenverteilung. Eine Erhöhung des Frischgutmassenstroms hatte ein gröberes Sichterfeingut, einen Anstieg des Umlaufmassenstroms und ebenfalls eine Erhöhung des Steigungsmaßes der Korngrößenverteilung zur Folge. Eine Verschlechterung der Mahlbarkeit führte unter sonst gleichen Simulationsbedingungen zu einem gröberem Sichterfeingut, einem höheren Umlaufmassenstrom und ebenfalls zu einem größeren Steigungsmaß der Korngrößenverteilung.

Weiterhin wurden Betriebsversuche und Simulationsrechnungen zum Einfluss des ungesichteten Anteils und der Trennkorngröße des Sichters durchgeführt, wobei die Feinheit des Sichterfeingutes unverändert bleiben sollte. Eine Erhöhung des ungesichteten Anteils des Sichters führte zu einem größeren Grobgutmassenstrom, einem feineren Sichteraufgabegut und einer breiteren Korngrößenverteilung des Sichterfeingutes. Um bei einer Erhöhung des ungesichteten Anteils ein Sichterfeingut mit gleicher massebezogener Oberfläche zu erzeugen, musste der Frischgutmassenstrom reduziert und die Trennkorngröße des Sichters erhöht werden. Die Ergebnisse der Betriebsversuche stimmten mit den Ergebnissen der Simulationsrechnungen in vollem Umfang überein.

Der Einfluss des Mahlkreislaufs auf die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten bei der gemeinsamen Mahlung zweier unterschiedlich mahlbarer Komponenten war bisher nur unzureichend untersucht. Bei der gemeinsamen Mahlung können die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten nicht unabhängig voneinander beeinflusst werden. Sie werden durch die Mahlbarkeit der Komponenten und die Betriebsweise der Mahlanlage bestimmt. Die schwerer mahlbare Komponente reichert sich in den gröbereren Fraktionen an, die leichter mahlbare Komponente entsprechend in den feineren. Aus der Literatur ist bekannt, dass sich bei hüttensandhaltigen Zementen, die in Walzenschüsselmöhlen gemahlen wurden, die Korngrößen der Komponenten Hüttensand und Klinker nicht wesentlich voneinander unter-

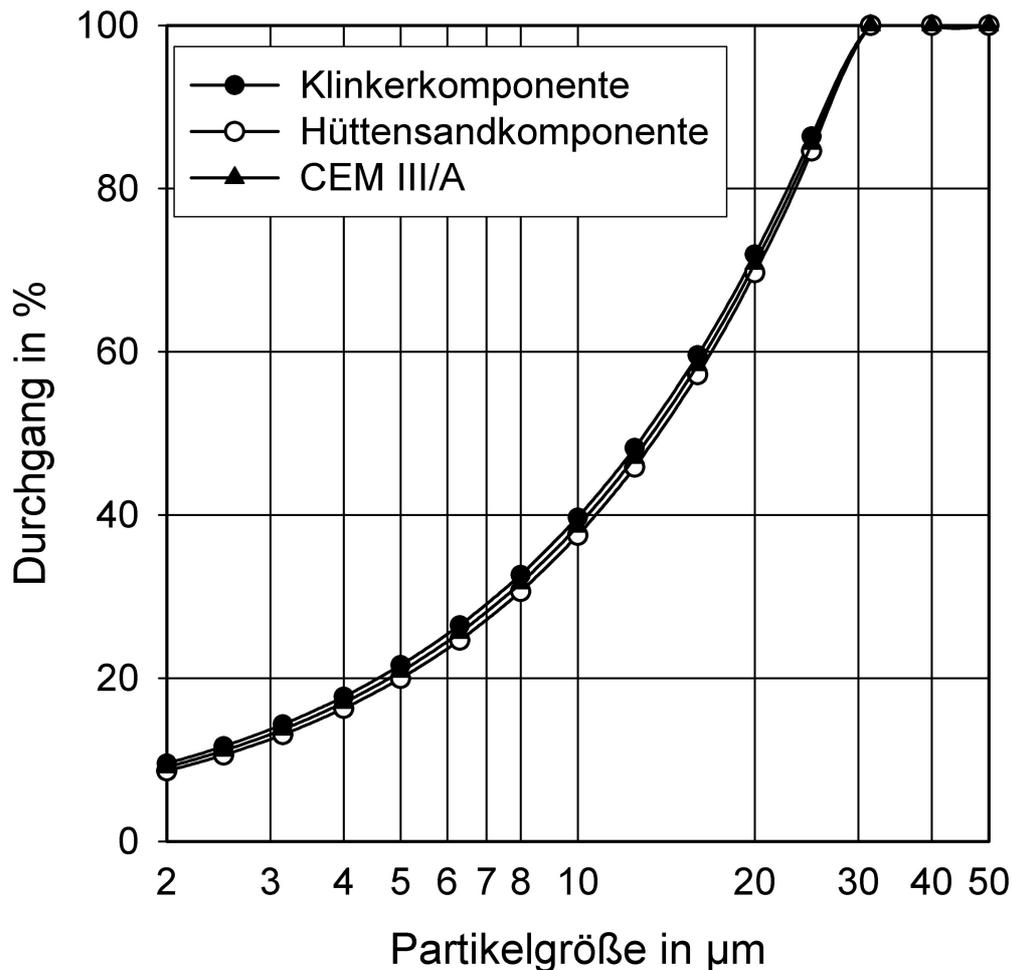
scheiden. Da in Walzenschüsselmühlen hohe interne Materialkreisläufe auftreten, stand insbesondere der Einfluss der Umlaufzahl im Vordergrund des Interesses.

Um den Einfluss der Umlaufzahl auf die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten zu untersuchen, wurden die Vorgänge in einem Mahlkreislauf bei Mehrkomponentenmahlung zunächst mit einem Computerprogramm simuliert. Die Simulationsrechnungen bestätigten den bekannten Zusammenhang, dass sich mit zunehmender Umlaufzahl das Steigungsmaß der Korngrößenverteilung des Sichterfeingutes erhöht. Bei geringen Umlaufzahlen wies auch die leichter mahlbare Komponente Klinker im gemeinsam gemahlene Gut eine höhere Feinheit als die Hüttensandkomponente auf (**Bild 16**).



**Bild 16:** Korngrößenverteilung des Sichterfeingutes und der Komponenten Klinker und Hüttensand bei geringer Umlaufzahl

Die Feinheitsunterschiede verringern sich jedoch mit zunehmender Umlaufzahl und die Korngrößenverteilungen der Komponenten Klinker und Hüttensand unterscheiden sich bei hohen Umlaufzahlen nur noch wenig voneinander (**Bild 17**). Somit kann der Effekt, dass bei hüttensandhaltigen Zementen, die in Walzenschüsselmühlen gemahlen wurden, sich die Korngrößenverteilungen der Komponenten Hüttensand und Klinker nicht wesentlich voneinander unterscheiden, durch die hohe Umlaufzahl in diesem Mühlen erklärt werden.

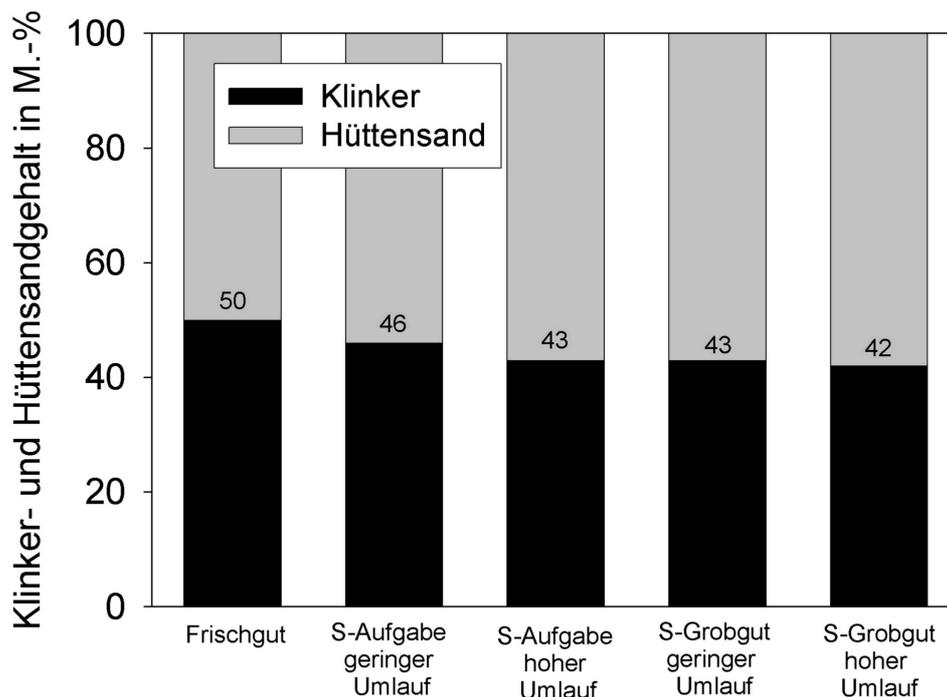


**Bild 17:** Korngrößenverteilung des Sichterfeingutes und der Komponenten Klinker und Hüttensand bei geringer Umlaufzahl

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen wurden durch Mahlversuche auf der halbtechnischen Mahlanlage der Forschungsinstituts überprüft. Als Mahlgut wurde ein Gemisch aus 50 % Klinker und 50 % Hüttensand verwendet. Zunächst wurde die Mahlanlage im Durchlauf betrieben. Anschließend wurden die Mahlungen im Umlauf mit dem Sichter durchgeführt, wobei sowohl eine geringe Umlaufzahl von 3 als auch eine hohe Umlaufzahl von 10 eingestellt wurde. Wie erwartet, wies das Mahlgut bei der Durchlaufmahlung mit  $n = 0,88$  eine relativ breite Korngrößenverteilung auf. Mit zunehmender Umlaufzahl wurde die Korngrößenverteilung des Mahlgutes enger und erreichte bei hoher Umlaufzahl ein Steigungsmaß von  $n = 1,06$ .

Die bei den Mahlversuchen erzeugten Sichterfeingut-, Sitergrob- und Sichterfeingüter sowie die Ausgangsstoffe Klinker und Hüttensand wurden chemisch analysiert und mittels Mischungsberechnung die Klinker- und Hüttensandgehalte der Proben bestimmt. Die Ergebnisse sind in **Bild 18** dargestellt. Wie aus dem Bild ersichtlich ist, reichert sich die schwerer mahlbare Komponente Hüttensand vorrangig im Sitergrobgut an. Hier wurden bis zu 8 M.-% höhere Hüttensandgehalte als im Frisch- bzw. Fertiggut festgestellt. Aber auch im Siteraufgabegut wurden höhere Hüttensandgehalte als im Frisch- bzw. Fertiggut gefunden. Durch

die Erhöhung der Umlaufzahl von 3 auf 10 verstärkte sich der Hüttensandgehalt im Sichtergrobgut von 57 auf 58 M.-% und im Sichteraufgabegut von 54 auf 57 M.-%.



**Bild 18** : Klinker- und Hüttensandgehalt des Sichteraufgabegutes und des Sichtergrobgutes in Abhängigkeit vom Umlaufzahl

Um die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten zu ermitteln wurden die Sichterfeingüter durch Siebung in Fraktionen zerlegt, chemisch analysiert und durch Mischungsberechnung die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten bestimmt. Die Ergebnisse der Mahlversuche bestätigen die Ergebnisse der Simulationsrechnungen. Bei dem mit geringer Umlaufzahl hergestelltem Zement unterschieden sich die Korngrößenverteilungen der Einzelkomponenten deutlich. Dagegen wurden bei dem mit hohen Umlaufzahlen hergestelltem Zement nur geringe Feinheitsunterschiede der Einzelkomponenten gefunden.

In einem Betriebsversuch wurde außerdem der Einfluss des Mühlenluftvolumenstroms untersucht. Bei dem Versuch zeigte die Reduzierung des Mühlenluftvolumenstroms keine Auswirkung auf die Feinheit und die Korngrößenverteilung des Zements, obwohl der Zerkleinerungsverlauf in der Grobmahlkammer der Mühle deutlich verändert wurde.

### Zusammenfassung

Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit aufbauend auf früheren Erkenntnissen weitere, detaillierte Grundlagen der Zementherstellung und der Erzeugung gezielter Korngrößenverteilungen von Zementhauptbestandteilen erarbeitet. Darüber hinaus wurden die Untersuchungen zu den Zementeigenschaften auf den Beton ausgeweitet und mit entsprechenden Ergebnissen aus verglichen. Es zeigte sich, dass sich Unterschiede im Wasseranspruch des

Zements in den Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons widerspiegeln. Unterschiede in der Druckfestigkeit des Zements lassen sich ebenfalls im Beton wiederfinden. Die granulometrischen Kenngrößen des Zements beeinflussen somit die Zement- und Betoneigenschaften. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ermöglichen somit den Zementherstellern, unter Berücksichtigung werks- und standortspezifischer Gegebenheiten, die Eigenschaften der Zemente weiter zu optimieren. Das Ziel dieses Forschungsprojektes wurde erreicht.

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e. V. (AIF) gefördert (AiF-Nr. 13198 N).