

Spritzbeton aus der Sicht des Zementherstellers Shotcrete From The Cement Manufacturer's Point Of View

Mag. Dipl.-Ing. Dr. Franz R. Koubowetz, Zementwerk Eiberg, Kufstein

Spritzbeton ist grundsätzlich an keine Zementsorte gebunden; alle in Österreich und Deutschland genormten Zemente können verwendet werden. Während man in der Literatur noch gelegentlich Hinweise darauf findet, daß höhere Gehalte an C_3A im Klinker die Eignung des Zementes für Spritzbeton verbessern, zeigt die Praxis ganz klar, daß selbst Zemente ohne C_3A sich vorzüglich zum Spritzen eignen, wenn die Anforderungen hinsichtlich Feinheit des Zementes und Abstimmung der entsprechenden Erstarrungsbeschleuniger erfüllt sind. Die Mahlfineheit des Zementes bzw. seine Kornverteilung (charakterisiert durch Blaine-Wert, Lageparameter und Steigungsmaß), dürften insbesondere bei Zementen mit Zumahlungen von Hochofenschlacke oder Flugasche - in Österreich sind diese Zemente genormt - jene Größen sein, die die Betoneigenschaften am nachhaltigsten beeinflussen. Dies gilt umso mehr bei Zementen mit höheren, über die von der Norm vorgesehenen Grenzen hinausgehenden Gehalten an Flugasche. Auf die Gleichmäßigkeit dieser Einflußgrößen wird vom Zementwerk größter Wert gelegt, und es dürfte auch mit angemessenem Aufwand nirgendwo eine bessere Homogenisierung erreicht werden, als bei der Zumahlung im Zementwerk. Einflüsse, die sich aus der chemischen Zusammensetzung ergeben, scheinen dagegen von untergeordneter Bedeutung und letztlich über die Zusatzmittel steuerbar zu sein, wie an einigen Beispielen gezeigt wird.

Basically, any type of cement can be used for the production of shotcrete, in Austria and Germany any of the standard cements can be employed. Occasionally technical publications still point out that higher C_3A contents in the clinker make the cement more suitable for shotcrete production, but practical experience has clearly shown that even cements without C_3A are well adapted for shotcrete if all requirements concerning the fineness of the cement and the selection of the appropriate accelerating agents are met.

The fineness of grinding of the cement or else its grain-size distribution (Blaine-number, position-parameter, slope) seem to be most decisive for the concrete properties, especially in case of cements with blast-furnace slag or fly ash intergrinding (in Austria there are standard specifications for these cements). The above statement applies even more to cements with higher fly ash contents exceeding the limits prescribed by the standard specifications.

In the cement mill utmost attention is paid to the uniformity of these decisive factors, so nowhere else outside the cement mill, not even with considerable efforts, a better homogenization could be achieved. On the other hand, influences resulting from the chemical composition seem to be of minor importance and to be controllable by means of the additive, as will be shown by several examples.

Wenn heute über Spritzbeton gesprochen wird, dann steht die Technologie derart im Vordergrund, daß den hohen Qualitätsanforderungen an die Ausgangsmaterialien in diesen Diskussionen wenig Raum gewidmet wird. In der Tat ist es so - Sie gestatten mir, daß ich mich bei meinen Ausführungen im wesentlichen auf den Zement beschränke - daß die Zementwerke heute in der Lage sind, ihre Produkte in einer praktisch gleichbleibenden Qualität anzubieten; sind die Spezifikationen einmal definiert, kann davon ausgegangen werden, daß die Schwankungen sich im Bereich minimaler Standardabweichungen bewegen. Aber auch die Technologie hat sich derart entwickelt, daß praktisch alle in Österreich und Deutschland genormten Zemente verwendet werden können und je nach Aufgabenstellung und Zielsetzung verwendet werden. Es ist zweifellos das Ergebnis der guten Zusammenarbeit aller Beteiligten, daß heute - insbesondere was die Bindemittel betrifft - manches Stand der Technik ist, was vor nicht allzulanger Zeit noch heftige Auseinandersetzungen heraufbeschworen hatte.

Spritzbeton stellte für den Zementhersteller insofern eine gewisse Herausforderung dar, als man lange Zeit herumrätselte, durch welche Parameter das doch gelegentlich recht unterschiedliche Verhalten mancher Zemente bestimmt wurde. Die Auffassung, daß der Schlüssel für einen "taylor made cement", einen maßgeschneiderten Zement für Spritzbeton in der chemischen Zusammensetzung des PZ-Klinkers zu suchen sei, war sehr weit verbreitet und man findet auch heute noch in der Literatur Hinweise auf bestimmte Gehalte an C_3A und C_3S im Klinker (1), (2). Die Meinung, daß Zemente mit höheren Gehalten an C_3A sich besser für Spritzbeton eignen, hielt sich jedenfalls sehr lange. Aus heutiger Sicht wissen wir, daß diese Auffassung unhaltbar ist und ein sehr eindrucksvoller Beweis wird beim U-Bahnbau in Wien erbracht (3), wo mit einem Zement, der 0 % C_3A enthält, mit großem Erfolg gearbeitet wird. Man könnte damit das Thema C_3A für erledigt erklären, ich möchte aber noch ein paar Worte dazu sagen, zu lange hat die Diskussion um dieses Thema die Fachleute beschäftigt. Zemente, die höhere Gehalte an C_3A aufweisen, neigen im allgemeinen zu steileren Erhärtungskurven (Abb. 1), das bedeutet, daß die Erhärtung früher einsetzt und damit zum Beispiel die Druckfestigkeit nach einem Tag (gemessen nach ÖNORM B 3310) im Vergleich etwas höher liegt als bei Zementen mit niedrigeren Gehalten; häufig geht aber dieser Gewinn an Frühfestigkeit zu Lasten der "späteren Festigkeiten".

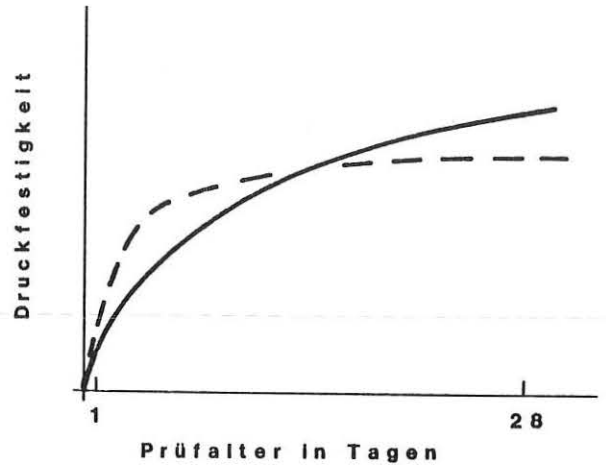


Abb. 1: Erhärtungsverlauf zweier Zemente

Die theoretische Begründung des Phänomens der frühen Erhärtung läuft auf eine Reaktion zwischen C_3A und dem Sulfatträger hinaus, deren Ergebnis Ettringit ist (4), (5) (Abb. 2).

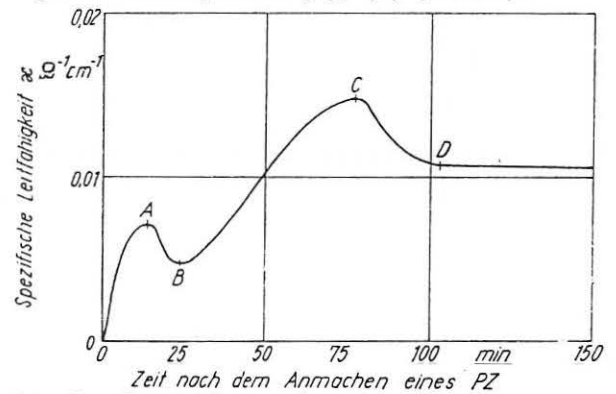


Abb. 2: 0 - A Lösungsphase
 A - B Bildung erster Reaktionsprodukte (z.B. Ettringit)
 B - C Anstieg der Ca^{2+} - und OH^- -Konzentration bis zur Übersättigung
 C - D Ausscheidung von CSH-Phasen und Pordlandit
 ab D Lösungs- und Ausscheidungsprozesse im Gleichgewicht

Da diese Reaktion im Verhältnis zu den anderen, die an Erstarrung und Erhärtung des Zementleimes beteiligt sind, unverhältnismäßig schnell abläuft und wie schon gesagt, den Anlaß der früheren Erhärtung bildet, lag die Auffassung, daß höhere Gehalte an C_3A günstig seien, zumindest nahe - nicht zuletzt deshalb, weil man über den Chemismus die praktisch einzige wirksame Möglichkeit hatte, die Eigenschaften des Zementes in gewissen Grenzen zu beeinflussen.

Heute wissen wir, daß das Verhalten eines Zementes gerade in Bezug auf Spritzbeton viel

nachhaltiger und wirkungsvoller von zwei anderen Parametern beeinflusst wird, von der Mahlfineinheit einerseits (charakterisiert durch die Blaine-Zahl) und der Kornverteilung (charakterisiert durch Lageparameter und Steigungsmaß) andererseits. Die Mahlfineinheit eines Zementes kann grundsätzlich durch Siebung, Sichtung, Sedimentation etc. beschrieben werden; die Blaine-Zahl beschreibt den Zement sicherlich nicht besser, ist ihrem Wesen nach kompakter, wenn auch in der Aussage komplexer als etwa eine Siebanalyse, die ein viel direkteres Bild liefert. Die Angabe "spezifische Oberfläche nach Blaine" resultiert aus einer Messung, deren Prinzip ich ganz kurz erläutern möchte. Durch ein genau definiertes Zementbett tritt eine bestimmte Luftmenge in einer bestimmten Zeit durch, die physikalische Meßgröße ist das $\int v_L \cdot dt = v_{Luft}$, die Geschwindigkeit dieses Luftdurchtritts, die naturgemäß bei einem Bett aus gröberem Zement größer sein wird als bei feinem Zement. Über eine Modellrechnung erhält man dann aus der Messung die Blaine-Zahl.

Wenn man davon ausgeht, daß die klassischen Methoden zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche, nämlich Stickstoffadsorption nach BET (6), Farbstoff- oder Säureadsorption usw. den wahren Sachverhalt hinreichend beschreiben, haben die Blainezahlen in der Regel mit der tatsächlichen spezifischen Oberfläche eines Zementes wenig zu tun, da die Ergebnisse der vorher genannten Methoden und der Bestimmung nach Blaine um Größenordnungen differierende Resultate liefern.

Vergleich der spezifischen Oberflächen nach Blaine und BET		
Fluasit [®]	Blaine	BET
	cm ² ·g ⁻¹	m ² ·g ⁻¹
Probe 1	4400	6,72
Probe 2	4280	6,62
Probe 3	4480	7,04

Abb. 3:

Die Abb. 3 zeigt solche Ergebnisse, die zwar mit FLUASIT[®] erhalten wurden, für Zement aber zu gleichen Ergebnissen führen. Trotz alledem ist der Blaine-Wert eine nützliche Kennzahl, man muß sich nur der Grenzen seiner Aussagekraft bewußt sein! Ein niedriger Blaine-Wert (3000) bedeutet, daß wenig Feinteile vorliegen, das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen klein ist und die Reaktionen (sowohl im Zement selbst, als auch zwischen Zement und Erstarrungsbeschleuniger) aufgrund der geringen reaktiven Oberfläche träge verlaufen werden.

Ist der Blaine-Wert hoch (4500 - 5000), so muß das nicht notwendigerweise auf einen feinen Zement hinweisen, es heißt nur, daß sich in diesem Zement ein gewisser Anteil Feinstkorn befindet. In der Regel kennen die Bauleiter, Betonwerke, Prüfstellen etc. jedoch die Zemente der Lieferwerke so gut, daß sie die Blaine-Werte der gelieferten Zemente entsprechend zuordnen können; Nur bei Kenntnis der spezifischen Eigenheiten eines Zementes kann der Aussagekraft des Blaine-Werts technologische Relevanz zugeschrieben werden.

Es ist daher nicht möglich, eine "optimale Blaine-Zahl" für SB-Zement anzugeben, allerhöchstens ein Band zwischen 3500 und 4500, wobei Zemente mit Werten von über 4500 nicht selten gewählt werden, Werte unter 3500 im allgemeinen wenig Verbreitung gefunden haben. Grob gemahlene Zemente (um 3000) neigen eher zum Wasserabstoßen, sie sind nicht nur aus diesem Grund als SB-Zemente nicht geeignet.

Fein gemahlene Zemente (um 5000) reagieren schnell und setzen auch ihre Abbindewärme innerhalb kurzer Zeit frei, was die Temperaturen in die Höhe treibt. Man darf nicht vergessen, daß die Wärmeentwicklung von 100 kg Zement etwa der von einem Liter Heizöl gleichkommt und der Verlauf dieser Wärmeentwicklung als Funktion der Zeit über die Mahlfineinheit beeinflussbar ist.

Nochmals möchte ich mit allem Nachdruck darauf hinweisen, daß der Blaine-Wert ein sehr nützliches Charakteristikum darstellt, seine Aussagekraft aber keinesfalls überschätzt werden darf, dies gilt ganz besonders, wenn man Zemente verschiedener Provenienz miteinander vergleichen muß.

Wesentlich aufschlußreicher ist die Kenntnis der Kornverteilung, die ein viel direkteres Bild von der Feinheit eines Zementes gibt (7). Diese Darstellungsweise ist relativ neu, da das hierfür notwendige Instrumentarium sich eigentlich erst in den letzten Jahren als seriöses Analysengerät einen fixen Platz am Markt geschaffen, und aus diesem Grunde anfänglich recht zögernd Eingang in die Zementlabors gefunden hat. Eine Kornanalyse, wie man sie mit einem solchen "Laser-Granulometer" erhält, hat folgendes Aussehen (Abb. 4). Wie Sie sehen, ist es sowohl möglich, die einzelnen Fraktionen der Mahlung summarisch, als auch für sich getrennt in Histogrammform darzustellen. Trägt man die summarischen Werte in ein

SIZE BAND		CUMULATIVE WT BELOW [%]	WEIGHT IN BAND [%]
UPPER [μ]	LOWER		
188.0	87.2	99.3	0.7
87.2	53.5	96.3	3.1
53.5	37.6	89.3	7.0
37.6	28.1	79.2	10.1
28.1	21.5	68.5	10.7
21.5	16.7	58.9	9.6
16.7	13.0	49.5	9.4
13.0	10.1	40.1	9.5
10.1	7.9	30.9	9.2
7.9	6.2	23.6	7.3
6.2	4.8	17.2	6.4
4.8	3.8	11.5	5.7
3.8	3.0	7.7	3.8
3.0	2.4	5.1	2.6
2.4	1.9	3.2	1.9

Abb. 4: Kornverteilung

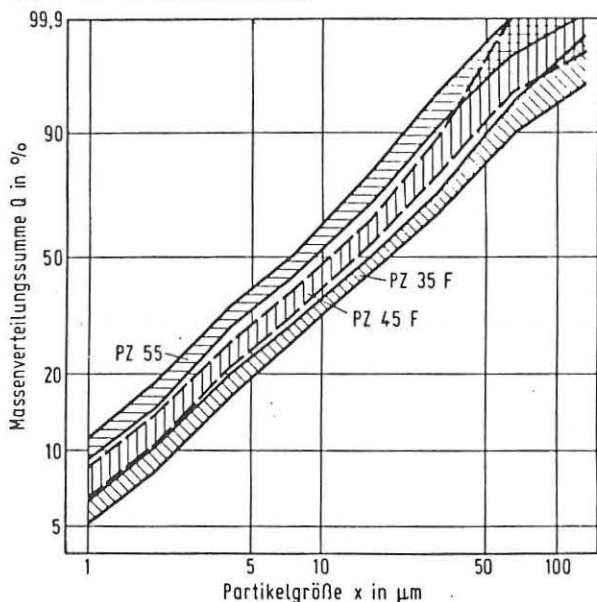


Abb. 5: Darstellung der KV im RRSB - Netz

RRSB-Netz ein (Abb. 5), so erhält man eine Regressionsgerade. Die beiden, diese Gerade bestimmenden Größen sind ein Punkt und der Anstieg. Man nennt den Anstieg $n = \tan \alpha$ das Steigungsmaß und jenen Abszissenpunkt, der sich ergibt, wenn die Gerade beim Ordinatenwert 63,2 geschnitten wird, den Lageparameter x . Das Steigungsmaß gibt die Breite der Kornverteilung wieder, das heißt, je breiter die Kornverteilung, umso kleiner wird der Wert für n .

Der Lageparameter charakterisiert die Lage der Verteilung, denn die Kornverteilungsbreite sagt ja nicht aus, in welchem Bereich man sich befindet. Im Jahre 1985 wurde vom VDZ-Düsseldorf eine Studie veröffentlicht, die (meines Wissens erstmalig) Zemente nach diesen Gesichtspunkten charakterisiert (8). Der Tabelle (Abb. 6) können wir entnehmen, wo etwa die Bereiche für die verschiedenen Zemente anzusetzen sind, wobei die bemerkenswerte Streuung der Werte beispielsweise beim PZ 35 F auffällt, bei der großen Zahl von Untersuchungen -68- die Zemente aus verschiedensten Gebieten Deutschlands beinhaltet, aber verständlich ist. Für Österreich gibt es eine derartige Untersuchung leider noch nicht und man sollte sich auch vor allzu direkten Vergleichen hüten, da durch die verschiedene Normensituation zum Beispiel ein in Österreich als Portlandzement nach ÖNORM B 3310 deklarierter Zement in der BRD entweder als EPZ 35 F oder überhaupt nur mit Zulassung der DIN 1164 entspricht, jedenfalls nicht als Portlandzement; eine Vereinheitlichung ist derzeit im Zuge der CEN-Gespräche in Diskussion.

Zementorte			PZ 35 F	PZ 45 F	PZ 55	EPZ 35 F	HÖZ 35 L	HÖZ 45 L	
Zahl der Zemente			68	60	26	29	34	18	
Produktionsanteil			%	49,9	20,4	3,0	8,1	14,3	2,0
Dichte	H	g/cm ³	3,15	3,18	3,15	3,12	3,04	3,04	
	M		3,10	3,10	3,10	3,05	2,98	3,01	
	N		3,03	3,03	3,05	3,00	2,92	2,96	
Lageparameter der Kornverteilung im RRSB-Netz	H	x' μ m	31,3	21,0	13,0	27,6	26,5	19,7	
	M		24,8	16,0	10,8	22,7	18,8	16,5	
	N		19,6	11,3	8,6	15,3	14,5	15,0	
Steigungsmaß der Kornverteilung im RRSB-Netz	H	n	0,99	1,11	1,14	1,09	1,12	1,12	
	M		0,90	0,99	1,02	0,94	0,98	0,99	
	N		0,80	0,84	0,92	0,83	0,85	0,82	
massenbezogene Oberfläche nach Blaine	H	O_m cm ² /g	3850	4730	6400	3850	5800	5240	
	M		3040	3920	5290	3220	3600	3980	
	N		2540	3200	4570	2690	3090	3220	
2-Tage Normdruckfestigkeit	H	β_{D2} N/mm ²	31	39	49	28	37 ¹⁾	24	
	M		22	31	42	18	30 ¹⁾	19	
	N		11	23	34	11	23 ¹⁾	16	
28-Tage Normdruckfestigkeit	H	β_{D28} N/mm ²	55	65	77	54	55	63	
	M		48	59	68	49	50	57	
	N		41	55	61	42	36	51	
Beginn des Erstarrens	H	EB h-min	4,00	3,40	3,20	4,20	5,30	3,40	
	M		2,30	2,15	1,50	2,50	3,35	2,40	
	N		1,40	1,20	1,05	1,50	2,00	2,10	
Ende des Erstarrens	H	EE h-min	6,00	5,20	4,50	6,00	7,00	5,30	
	M		3,55	3,25	3,10	4,10	5,00	4,10	
	N		2,50	2,40	2,00	3,20	3,50	3,20	
Wasseranspruch (DIN 1164)	H	WA Gew.-%	29,0	32,0	35,0	28,0	34,5	30,0	
	M		26,0	27,5	30,0	26,0	28,0	28,0	
	N		23,0	24,5	27,0	23,5	25,5	25,0	

¹⁾ Beim HÖZ 35 L 7-Tage Normdruckfestigkeit, 2-Tage Druckfestigkeit nicht normiert
H = Höchstwert, M = Mittelwert, N = Niedrigwert

Abb. 6: Dichte, Kornverteilungsparameter und Werte wichtiger Eigenschaften verschiedener Zementarten

Lange Zeit hindurch wurden allgemein enge Kornverteilungen angestrebt, weil diese Zemente in Bezug auf die Festigkeitsentwicklung viele Vorteile aufwiesen; höhere Frühfestigkeiten bei kaum (meist gar nicht) reduzierten Spätfestigkeiten sei nur als ein Beispiel genannt. Nun zeigte aber gerade die Beschäftigung mit SB, daß diese Zemente nicht das brachten, was man von ihnen erwartete, der Wasseranspruch war höher und auch eine gewisse

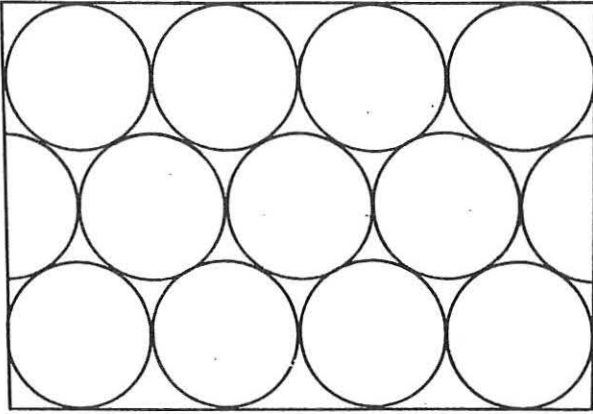


Abb. 7: Entstandenes Lückenvolumen wird mit Wasser gefüllt.

Neigung zur nachträglichen Wasserabsonderung zeigte sich deutlich. Es brauchte einige Zeit, bis man das Rätsel gelöst hatte; die enge Kornverteilung brachte naturgemäß größere Hohlräume (Abb. 7), die zuerst mit Wasser aufgefüllt wurden und den beschriebenen Effekt erzeugten. Weiters muß bedacht werden, daß mit enger werdender Kornverteilung auch der C_3A -Umsatz zunimmt. Das bedeutet, daß in den ersten Minuten nach dem Kontakt Zement-Wasser auch bei optimaler Abstimmung des Sulfatzusatzes auf den höheren C_3A -Umsatz umso mehr Hydratationsprodukte entstehen, je enger die Kornverteilung ist. Man tendiert daher heute zu etwas breiteren Kornverteilungen, das heißt, zu geringeren Steigungsmaßen. Außerdem haben Portlandzemente in Österreich Zumahlungen von hauptsächlich Hochofenschlacke und/oder Flugasche, diese Zumahlungen beeinflussen die Kornverteilung - bei gleicher massebezogener Oberfläche - dahingehend, daß der Wasseranspruch vermindert wird (9), (10).

Unserer Meinung nach dürfte dies mit ein Grund sein, warum sich Zemente mit Flugasche für Spritzbeton gut eignen, Zemente mit Hochofenschlacke sind ja schon seit längerer Zeit für diesen Zweck mit Erfolg im Einsatz. Diskutiert wird noch darüber, ob es einen optimalen Wert bei Flugaschezement gibt und wenn ja, bei wieviel Prozent Flugasche dieser liegt. Hier ein endgültiges Wort sprechen zu wollen, ist zweifelsohne verfrüht, nach langen Überlegungen sind wir aber zu der Auffassung gelangt, daß der als "Tunnelzement" von uns bezeichnete PZ 275 (F)F mit 20 % Flugasche, in dessen Entwicklung alle vorher angezogenen Überlegungen eingegangen sind, den Wünschen weitestgehend entsprechen sollte, ganz abgesehen davon, daß dieser Zement die volle Deckung der ÖNORM hat, was sicher in Streitfällen nicht ohne

Belang sein dürfte. Nun gehen manche Anwender in Bezug auf den Aschegehalt im Zement noch weiter - die hohe Qualität von Zement und Zusatzmittel lassen dies zu - aus der Sicht des Zementherstellers ist es schwer, dazu Stellung zu nehmen, hier hat allein der Beton-technologe das Wort.

Die Problematik der Feinheit und der Kornverteilung erhält bei den zuletzt besprochenen Zementen eine neue Dimension. Wir dürfen davon ausgehen, daß bei gemeinsamer Vermahlung von PZ-Klinker und Flugasche in der Zementmühle ein optimal homogenes Gemenge entsteht. Die recht unterschiedlichen Mahlbarkeiten von Klinker und Flugasche verschieben das Mahlgleichgewicht und die Folge ist, daß die Blaine-Zahl keinen realistischen Wert mehr liefert, nichtsdestoweniger aber bei wiederholten Messungen als recht gutes Maß für die Gleichmäßigkeit gewählt werden darf; die gute Reproduzierbarkeit der Messung konnte durch einen im Rahmen des Vereins Österreichischer Zementwerke durchgeführten Ringversuch kürzlich auch an Flugasche nachgewiesen werden. Die Kornverteilung zeigt auch hier die wahren Verhältnisse besser, wenngleich die Interpretation naturgemäß anders anzusetzen ist als bei Zementen mit anderen oder ohne Zumahlstoffe - die Gleichmäßigkeit hat man jedenfalls noch besser im Griff, da man Auskunft über die einzelnen Kornfraktionen erhält. Für SB ist diese Gleichmäßigkeit eine unabdingbare Notwendigkeit und man kann davon ausgehen, daß den werkskonfektionierten Zementen in puncto Homogenität und Gleichmäßigkeit nur die bei Größtbaustellen installierten pneumatischen Homogenisieranlagen gleichkommen. Baustellenmischungen sind immer problematisch, weil die Eingrenzung von Fehlern auf Grund der Vielfalt der Einflußgrößen de facto kaum möglich ist und außerdem gerade bei Spritzbeton kleinste Schwankungen zu unliebsamen Überraschungen führen können.

Zum Schluß möchte ich Ihnen noch drei Beispiele zeigen. Es handelt sich um Zemente, die sich für SB ausgezeichnet bewährt haben. Zement A ist einer ohne C_3A , Zement B hat im Klinker 12,26 % und Zement C ist der bereits diskutierte FAZ 20 oder PZ 275 (F)F. Die drei Zemente sind von ihrem Chemismus her gesehen sehr unterschiedlich, durch Abstimmung auf die Zusatzmittel und - wie Sie den Diagrammen entnehmen können - entsprechende mahltechnische Behandlung kann der Einfluß der Chemie des Klinkers praktisch vollständig kompensiert werden (Abb. 8,9,10).

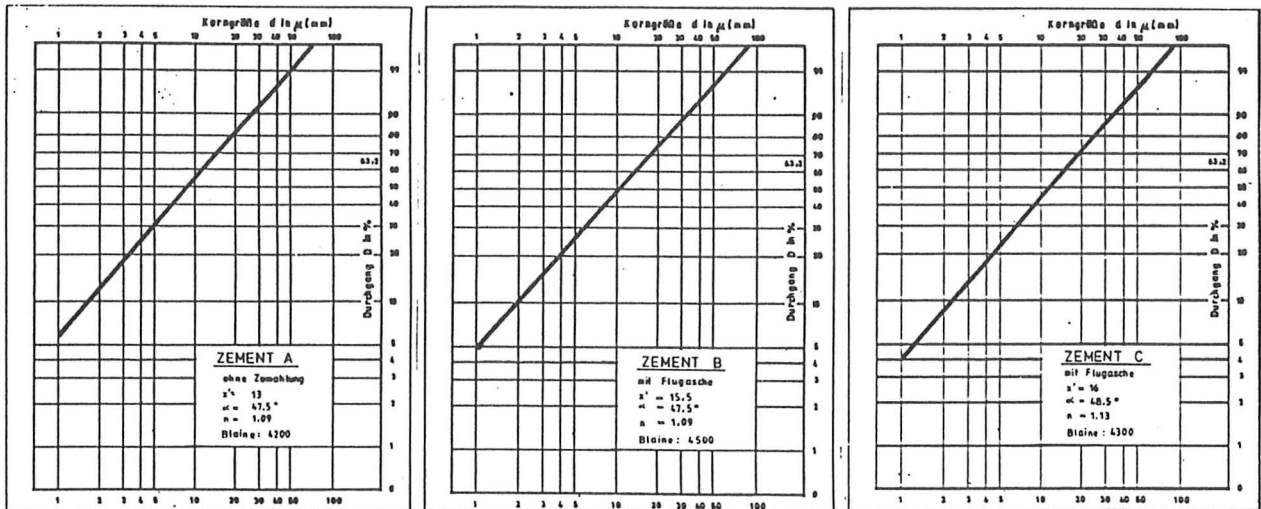


Abb. 8,9,10 : Korngrößenverteilung von 3 Zementen mit und ohne Zumahlung

Ich habe die Frage der Mahlfineinheit und der sich daraus ergebenden Konsequenzen in das Zentrum meiner Ausführungen gerückt. Diese Betrachtungsweise ist nicht neu, seit Beginn der industriellen Zementherzeugung war dieses Problem immer präsent und ich erlaube mir, mit einem Zitat (11) aus einem Buch über Portlandzementherzeugung zu schließen: "...Handelt es sich um die Prüfung eines Portlandzementes, so ist zunächst die Feinheit des Kornes zu berücksichtigen, die sehr groß sein muß und für die besondere Vorschriften bestehen. Überhaupt ist das ganze Verfahren bei der Prüfung von Zement auf Brauchbarkeit durch amtliche Vorschriften aufs Genaueste geregelt. Das spezifische Gewicht soll etwa 3,2 sein ..." (Zit. Ende) Leipzig, im Jahre 1904.

Literatur:

- (1) G. Brux, R. Lindner, G. Ruffert: Spritzbeton, Spritzmörtel, Spritzputz; Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln-Braunsfeld, 1981
- (2) O.W. Blümel, H. Lutsch: Spritzbeton; Springer-Verlag Wien - New York 1981
- (3) H. Huber private communication
- (4) O. Henning, D. Knöfel: Baustoffchemie; Bauverlag Wiesbaden und Berlin 1978
- (5) W. Czernin: Zementchemie für Bauingenieure; Bauverlag Wiesbaden und Berlin 1980
- (6) S. Brunauer, P.H. Emmett, E. Teller; J. Am. Chem. Soc., 60/309(1938)
- (7) R. Springenschmid, R. Breitenbüchner; Betontechnik und Fertigteil-Technik Heft 11/1986
- (8) K. Kuhlmann, H. Ellerbrock, S. Sprung; ZKG Heft 4/1985
- (9) Forschungsinstitut der Zementindustrie: Tätigkeitsbericht 1978 - 1981 S. 35 - 36; Tätigkeitsbericht 1981 - 1984 S. 37 - 39, 94
- (10) G. Wischers, W. Richartz; Beton 32/1982 Heft 9 S. 337 - 341 und Heft 10 S. 379 - 386
- (11) G. Rauter: Die Industrie der Silikate, der künstlichen Bausteine und des Mörtels; Göschensche Verlagshandlung Leipzig 1904