

Jürgen Macht, Peter Nischer

## Weiche Betone – kostengünstige Herstellung durch gute Mehlkornabstufung und gute Mischwirkung

DI Dr. Jürgen Macht, Forschungsinstitut der VÖZ

DI Dr. Peter Nischer, Forschungsinstitut der VÖZ

office@voezfi.at, www.zement.at

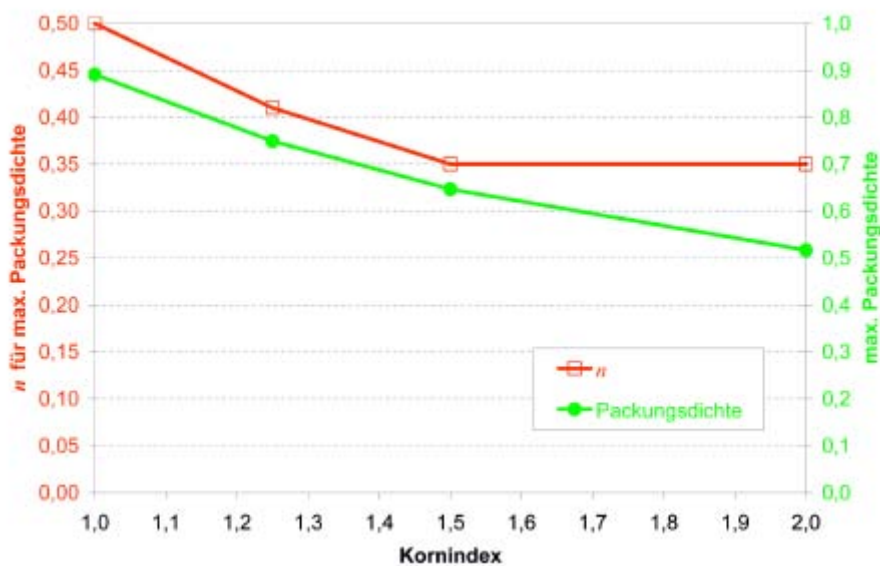


Bild 1: Zusammenhang zwischen Kornindex L/E (L = Kornlänge, E = Korndicke), größtmöglicher Packungsdichte und hierfür erforderlichem Koeffizienten n gemäß Gleichung (1)  
Grafiken: © VÖZFI

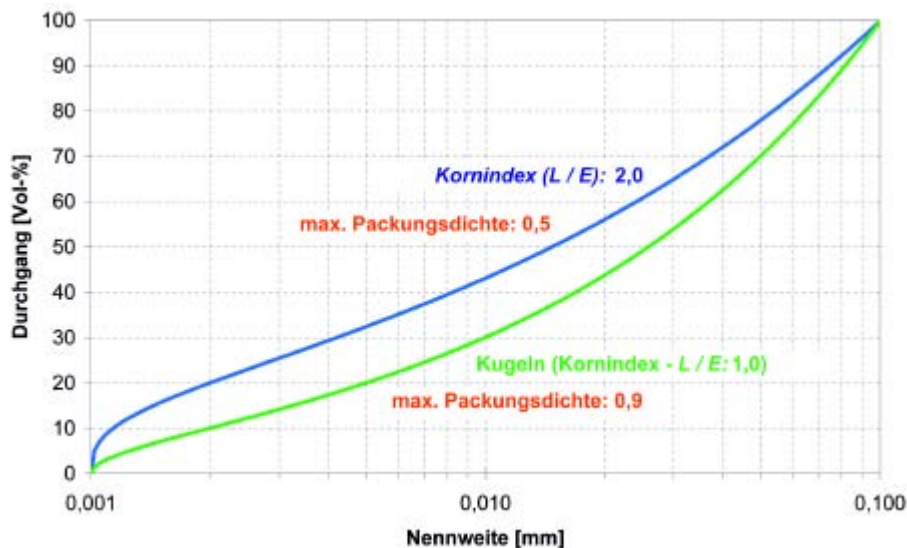


Bild 2: Erforderliche Korngrößenverteilung für höchstmögliche Packungsdichte bei Kornindex L/E = 1,0 bzw. 2,0 (L = Kornlänge, E = Korndicke)

Damit auch weiche und sehr weiche Betone gut verarbeitet werden können und sich nicht absetzen und entmischen, ist nicht nur eine ausreichende Menge Mehlkorn (Korn < 0,125 mm) erforderlich, sondern dieses muss auch eine möglichst glatte Kornoberfläche, günstige Kornform und Korngrößenverteilung aufweisen und im Beton gut dispergiert, d. h. gut durchgemischt, sein. Letzteres ist besonders bei weichen und sehr weichen Betonen schwierig.

Die tatsächlichen Korneigenschaften können – auch am Frischbeton – mit mikroskopischer Bildanalyse ermittelt werden. Der Beitrag zeigt auf, dass – entgegen der landläufigen Meinung – auch im Bereich < 0,063 mm und sogar < 0,02 mm noch ein relativ großer Kornanteil im Beton vorhanden sein muss.

Am Frischbeton kann untersucht werden, ob ein auf Grund seiner Parameter günstiges Mehlkorn auch gut dispergiert und damit wirksam ist. Hiermit können die Mischfolge und Mischzeit optimiert werden.

### 1 Problemstellung

Rückmeldungen aus der Baupraxis berichten häufig über Probleme bei der Verarbeitung weicher Betone. Beim Transport und Einbau kommt es zu Entmischungen und sowohl beim Verdichten als auch nach dem Verdichten zu Absetzerscheinungen. Dies führt zu einer geringen Betongüte in den oberflächennahen Bereichen. Ein Frischbeton kann als stabil bezeichnet werden, wenn diese Probleme nicht auftreten.

In den derzeitigen Normen und Richtlinien fehlen Angaben über eine zweckmäßige Kornzusammensetzung des Betons im Mehlkornbereich (Anteil < 0,125 mm), obwohl aus der Praxis bekannt ist, dass gerade diese Bestandteile den Wasseranspruch, die Verarbeitbarkeit und die Festbetoneigenschaften entscheidend beeinflussen.

**2 Einfluss der Kornparameter des Mehlkorns auf die Stabilität weicher Betone**

Fuller und Thomson [1] erkannten bereits im Jahre 1907 den Einfluss einer hohen Packungsdichte auf die Eigenschaften von Beton. Aus diesen experimentellen Untersuchungen stammt die so genannte „Fuller-Kurve“, eine Parabel, die für einen stetigen Verlauf der Korngrößenverteilung bei runden Körnern (Kugeln) die optimale Packungsdichte ergibt. Die zugehörige Gleichung lautet

$$D_i = \left( \frac{d_i}{d_{max}} \right)^n \text{ mit } n = 0,5 \quad (1)$$

mit  $D_i$  als kumulativer Anteil der Korndicke  $d_i$  sowie  $d_{max}$  als maximale Korndicke. Bereits Fuller hat festgestellt, dass nicht nur die Korngrößenverteilung, sondern auch die Kornform einen Einfluss auf die Packungsdichte hat.

Speziell der Einfluss der Kornform auf die Packungsdichte wurde in [2], [3] und [4] untersucht. Diese Untersuchungen fanden einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen dem Kornindex (Verhältnis L/E) und der Packungsdichte. Proske und Ramge [3] geben den durchschnittlichen Kornindex von Kiesen und gebrochenem Korn mit 1,4 bis 2,0 an.

Eine Berechnung der Packungsdichte mit unterschiedlichen Koeffizienten  $n$  (siehe Gleichung 1), die je nach Kornform zu wählen sind, ergibt: Für ideale Kugeln wird mit  $n = 0,50$  die maximal mögliche Packungsdichte von ca. 0,9 erreicht (das heißt, dass der verbleibende Hohlraumgehalt etwa 10 % beträgt) – diese Sieblinie entspricht dem Original von Fuller [4].

Für unregelmäßige, nicht ausgerichtete Körner gelten andere Verhältnisse: Für Körner mit einem Kornindex (Verhältnis L/E) von 2,0 wird die theoretisch maximal mögliche Packungsdichte von etwa 0,55 bei einem Koeffizienten von  $n = 0,35$  erreicht. Dieser Koeffizient entspricht in etwa dem von Andreasen und Andersen [5] gefundenen Koeffizienten für die maximale Packungsdichte natürlicher Gesteinsvorkommen.

Den Zusammenhang zwischen Kornindex, größtmöglicher Packungsdichte und erforderlichem Koeffizienten  $n$  zeigt Bild 1.

In Bild 2 sind die erforderlichen Verteilungen im Korngrößenbereich 0,001 mm bis 0,1 mm für ideale Kugeln und unregelmäßige Körner mit einem Kornindex L/E von  $\geq 1,5$ , jeweils für die höchstmögliche Packungsdichte, abgebildet. Deutlich erkennbar ist die Tatsache, dass für die maximal erzielbare Packungsdichte bei unregelmäßigen Körnern der erforderliche Gehalt an Feinteilen entscheidend höher ist als bei idealen Kugeln. Allerdings ist die maximal erreichbare Packungsdichte auch trotz dieser Maßnahme bei Weitem geringer als bei idealen Kugeln.

Die für die größtmögliche Packungsdichte bei GK 16 und GK 32 erforderlichen Gesamtsieblinien (Gestein und sonstiges Mehlkorn aus Zement und Zusatzstoffen) sind in Tabelle 1 zusammengestellt, und zwar sowohl für ideale Kugeln als auch für Körner mit  $L/E \geq 1,5$ . Daraus ergeben sich Mehlkorngehalte gemäß Tabelle 2. Deutlich ist aus dieser Tabelle der erforderliche hohe Feinteilgehalt, z. B. kleiner 0,01 mm, insbesondere bei nicht kugelförmigen Körnern, ersichtlich. Bei einem Kornindex  $\geq 1,5$  wird Mehlkorn gemäß Tabelle 2 für  $L/E \geq 1,5$  benötigt. Kantige und raue Körner erfordern erfahrungsgemäß noch größere Mehlkormengen. Eine Berechnung des Mehrbedarfs ist derzeit noch nicht möglich.

Da die Korneigenschaften des Mehlkorns somit von entscheidendem Einfluss auf die Betoneigenschaften sind, erscheint eine zuverlässige Ermittlung dieser Korneigenschaften unbedingt notwendig.

Tabelle 1: Erforderliche Siebdurchgänge (Gestein + Zement + Zusatzstoff) für größte Packungsdichte

	Siebdurchgang in Vol. -% bei mm															
	0,005	0,01	0,02	0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	11	16	22	32
GK16 <sup>1)</sup>	1,8	3	4	6	8	9	13	18	25	35	50	71	83	100		
GK16 <sup>2)</sup>	6	8	10	14	16	18	23	30	38	48	62	79	88	100		
GK32 <sup>3)</sup>	1,3	1,8	2,5	4	5	6	9	13	18	25	35	50	59	71	83	100
GK32 <sup>4)</sup>	5	6	8	11	13	14	18	23	30	38	48	62	69	79	88	100

<sup>1)</sup> Kugeln GK 16: theoretischer Wert für größte Packungsdichte:  $(d_i;d_{16})^{0,5}$   
<sup>2)</sup> Körnern  $L/E \geq 1,5$ ; GK 16: größte Packungsdichte:  $(d_i;d_{16})^{0,35}$   
<sup>3)</sup> Kugeln GK 32: theoretischer Wert für größte Packungsdichte:  $(d_i;d_{32})^{0,5}$   
<sup>4)</sup> Körnern  $L/E \geq 1,5$ ; GK 32: größte Packungsdichte:  $(d_i;d_{32})^{0,35}$

Tabelle 2: Erforderliche Mehlkorngelhalte in kg/m<sup>3</sup>

erforderliches Mehlkorn [kg/m <sup>3</sup> ] bei Korngröße					
	0,005	0,010	0,020	0,063	0,125
GK16 <sup>1)</sup>	40	65	90	135	200
GK16 <sup>2)</sup>	140	175	225	310	400
GK32 <sup>3)</sup>	25	45	60	85	130
GK32 <sup>4)</sup>	110	135	175	240	310

<sup>1)</sup> GK16, theoretischer Wert: Gestein und Mehlkorn = Kugeln  
<sup>2)</sup> GK16, Gestein und Mehlkorn = Körner L/E ≥ 1,5  
<sup>3)</sup> GK32, theoretischer Wert: Gestein und Mehlkorn = Kugeln  
<sup>4)</sup> GK32, Gestein und Mehlkorn = Körner L/E ≥ 1,5

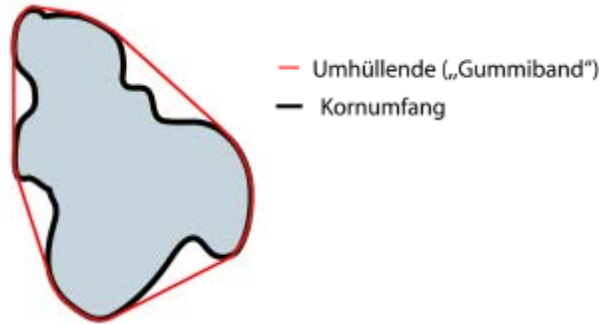


Bild 3: Kornumfang UA und Umhüllende des Kornes Grafiken: © VÖZFI

### 3 Möglichkeiten zur Ermittlung der Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung gibt die Anteile der in einem Korngemisch vorhandenen Korngruppen an. Sie wird in der Praxis mit den nachfolgenden Verfahren bestimmt: Korngrößen über etwa 0,04 mm (i. A. 0,063 mm) können durch Siebung, Korngrößen unter etwa 0,125 mm durch Sedimentation, Laserbeugung oder mikroskopische Kornanalysen ermittelt werden.

Bei mikroskopischer Kornanalyse ist eine Auswertung über die Korndicke E möglich, was auch eine Angabe der Korngröße, die für die Berechnung der optimalen Korngrößenverteilung (Schlupfkorn) notwendig ist, ermöglicht. Die in Abschnitt 4 angeführte mikroskopische Kornanalyse (FPIA) liefert neben der Korngrößenverteilung auch verschiedene Korneigenschaften, die die Kornform charakterisieren.

### 4 Korneigenschaften ermittelt mit mikroskopischer Kornanalyse

Für Untersuchungen zur Beurteilung der Eignung des Mehlkornes (Kornanteil < 0,125 mm) von pulverförmigen Stoffen wurden die wesentlichen Korneigenschaften mikroskopisch mit dem Sysmex FPIA-3000 (flow particle image analyzer, Fa. Malvern) mit Nassaufbereitung der Probe in Wasser ermittelt.

Mit dieser Technologie kann auch an Frischbeton untersucht werden, ob ein auf Grund seiner Korneigenschaften gut geeignetes Mehlkorn auch gut dispergiert und damit als Schlupfkorn wirksam ist. Mit diesen Ergebnissen können die Mischfolge und die Mischzeit optimiert werden.

Folgende Korneigenschaften werden dabei zweckmäßigerweise an einer Teilprobe mit mindestens 1 Million einzeln vermessenen Körnern ermittelt:

- maximale Kornabmessung L: größtmögliche Distanz zweier Punkte des Kornes. Entspricht Kornlänge gemäß EN 933-4 [6]
- minimale Kornabmessung E: 90°-Projektion der max. Kornabmessung. Entspricht Korndicke gemäß EN 933-4
- Kornindex: Kornlänge L/Korndicke E. Der Kornindex erscheint als wesentliche Einflussgröße für das erforderliche Mehlkorn.

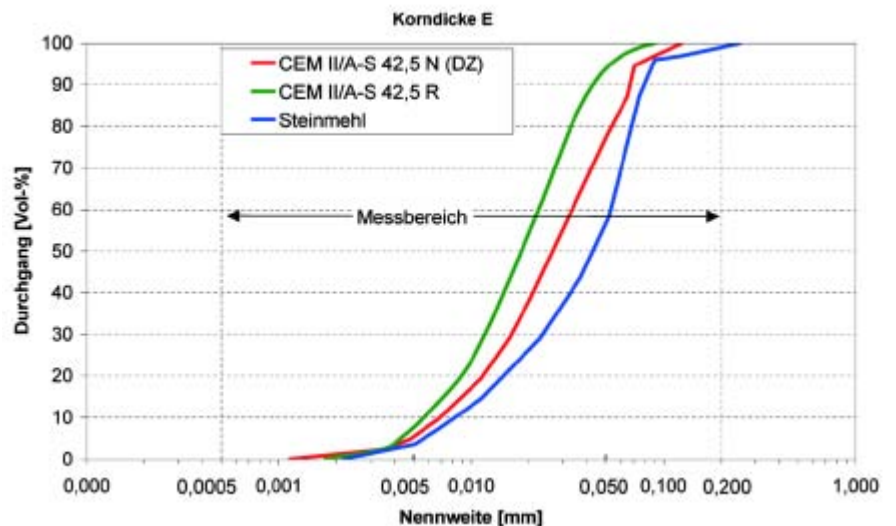


Bild 4: Korngrößenverteilung der gemäß Abschnitt 5 verwendeten Zemente und des verwendeten Steinmehls

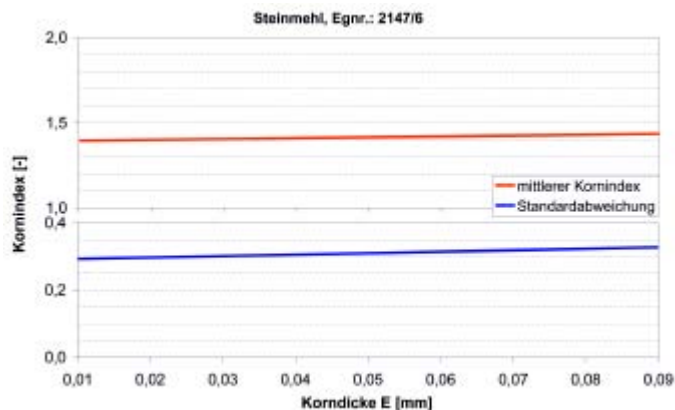


Bild 5: Kornindex des verwendeten Steinmehls in Abhängigkeit von der Korngröße

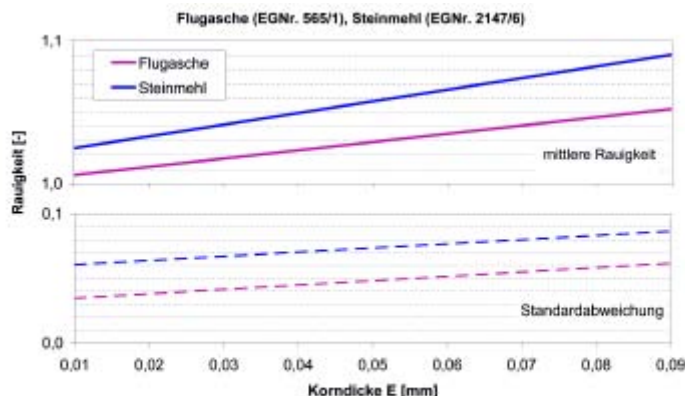


Bild 6: Rauigkeit des verwendeten Steinmehls und einer Flugasche in Abhängigkeit von der Korngröße

Gute mehlfine Stoffe dürften einen mittleren Kornindex  $< 1,4$ , mit einer Standardabweichung von maximal  $0,20$ , aufweisen.

- Durchmesser des flächengleichen Kreises: Durchmesser eines Kreises mit der gleichen Fläche wie das abgebildete Korn (i. A. größte Fläche)
- Kornumfang  $U_A$ : abgewickelter Umfang unter Berücksichtigung aller Unebenheiten des Kornes
- Rauigkeit: Kornumfang  $U_A$ /Umhüllende (Kornumfang der gleichen Ansichtsfläche, der durch ein imaginäres um das Korn angeschmiegtes „Gummiband“ erhalten wird, Bild 3).

Die Rauigkeit erscheint als wesentliche Einflussgröße für die Beweglichkeit der Teilchen und damit für die Verarbeitbarkeit des Betons. Gute mehlfine Stoffe dürften eine mittlere Rauigkeit  $< 1,05$  aufweisen.

Die Korngrößenverteilung der Zemente und des Zusatzstoffs der Betone gemäß Abschnitt 5 zeigt Bild 4, den Kornindex des Steinmehls Bild 5 und die Rauigkeit Bild 6, die Gesamtsieblinien der Betone Tabelle 3.

Flugaschekörner mit unregelmäßiger Kornoberfläche zeigt Bild 7. Körner mit guter Kornform und geringer Rauigkeit zeigt Bild 8. Auf Grund unzureichender Mischwirkung bei der Betonherstellung schlecht dispergierte Körner sind in Bild 9 zu sehen.

Tabelle 3: Fließmittel- und Mehlgorgehalt (Zement und Zusatzstoff) der Betone gemäß Bild 11

Beton	Fließmittel	Zement			Zusatzstoff		
	kg/m <sup>3</sup>	Sorte	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>	Sorte	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>
1	1,96	42,5N	280	93	-	-	-
2	2,30	42,5N	280	93	Steinm.	92	34
3	1,96	42,5R	280	93	-	-	-

Flugasche EGNr. 565/1				
Kornlänge L [mm]	0,084	0,076	0,071	0,065
Korndicke E [mm]	0,043	0,038	0,049	0,039
Kornindex (L/E) [-]	1,97	2,00	1,46	1,66
Rauigkeit [-]	1,09	1,12	1,11	1,11

Bild 7: Flugaschekörner mit unregelmäßiger Kornform

Steinmehl EGNr. 2147/6				
Kornlänge L [mm]	0,161	0,119	0,117	0,085
Korndicke E [mm]	0,143	0,112	0,093	0,078
Kornindex (L/E) [-]	1,13	1,06	1,25	1,10
Rauigkeit [-]	1,03	1,02	1,01	1,01

Bild 8: Steinmehlkörner mit guter Kornform





Bild 10: Gerät zur Durchführung von Druckpressversuchen Fotos: © VÖZFI

In den dargestellten Bildern ist die große mögliche Bandbreite, von sehr gut bis weniger gut geeignet, bei den verschiedenen Korneigenschaften ersichtlich. Die Auswirkung dieser Korneigenschaften auf die Stabilität und Verarbeitbarkeit weicher Betone wird in Abschnitt 5 behandelt.

## 5 Stabilität des Frischbetons bei weichen Betonen

Durch eine gezielte Auswahl des Mehlkorns kann dessen Packungsdichte erhöht und damit der verbleibende Hohlraumgehalt verringert werden. Im Allgemeinen nimmt hierdurch der Wasseranspruch ab, obwohl meist die Oberfläche des Korngemisches zunimmt. Wenn mehr Feinteile zugegeben werden als zum Füllen der Hohlräume erforderlich oder sehr feines Korn mit einer sehr großen Oberfläche (z. B. Mikrosilica) zugegeben wird, kann jedoch wieder eine größere Wassermenge für die Bildung der Gleitfilme erforderlich sein und damit der Wasseranspruch wieder zunehmen. Wenn für eine gleiche Verarbeitbarkeit mehr Wasser und/oder Fließmittel erforderlich ist, kann die Stabilität des Frischbetons abnehmen.

Bei der Betonierung hoher Bauteile mit weichem Beton kann, insbesondere bei nicht entsprechender Sieblinie, durch die im Beton wirkende Auflast eine Anreicherung von Wasser und Feinteilen in den oberen Bereichen entstehen. Zur Prüfung dieser Anreicherung haben sich Druckpressverfahren bewährt.

Das von der bps Lanzendorf entwickelte Gerät (Bild 10) besteht aus einem druckdichten 10-l-Topf von 19,2 cm Höhe. Auf den Topf wird ein Deckel druckdicht aufgesetzt. Über den Deckel wird der gewünschte Luftdruck von 3 bar, geregelt mit einem Druckventil und gemessen mit einem geeichten Manometer, 15 Minuten lang aufgebracht. Nach Prüfende wird der Deckel abgenommen und der Wassergehalt des Betons in den oberen 2 cm durch Trocknen ermittelt. Je größer die Zunahme des Wassergehalts gegenüber dem Ausgangswassergehalt ist, umso geringer ist die Stabilität des Betons.

Das Prüfverfahren erscheint aussagekräftig und für Baustellen geeignet. Auf Grund der bis dato vorliegenden Ergebnisse erscheinen

als Wert für den zulässigen Wasseranstieg in den oberen 2 cm bei 3 bar Prüfdruck und 15 Minuten Prüfdauer bei einem Ausbreitmaß von 55 cm maximal 15 % und bei einem von 65 cm maximal 25 % des Ausgangswassergehaltes geeignet.

Charakteristische Ergebnisse für das Wasserauspressen, und damit die Stabilität des Frischbetons, von Betonen GK 16 mm mit 208 l/m<sup>3</sup> Wasser zeigt Bild 11. Die Zement-, Zusatzstoff- und Fließmittelgehalte sind in Tabelle 3, die Gesamtsieblinie in Tabelle 4 zusammengestellt. Beton 1 hatte ein Ausbreitmaß von 64 cm, Beton 2 und 3 eines von 66 cm. Offensichtlich waren alle Betone an der Grenze zur Entmischung und hätten keine größere Wasser- oder Fließmittelbeigabe vertragen.

Tabelle 4 zeigt, dass die Kornverteilung von CEM II/A-S 42,5R am besten der Sollsieblinie entspricht. Ob die Unterschreitung der theoretisch erforderlichen Kornanteile im Bereich  $\leq 0,01$  wegen des verringerten Wasseranspruches günstig oder wegen des Fehlens von feinem Schlupfkorn nachteilig ist, kann heute noch nicht gesagt werden.

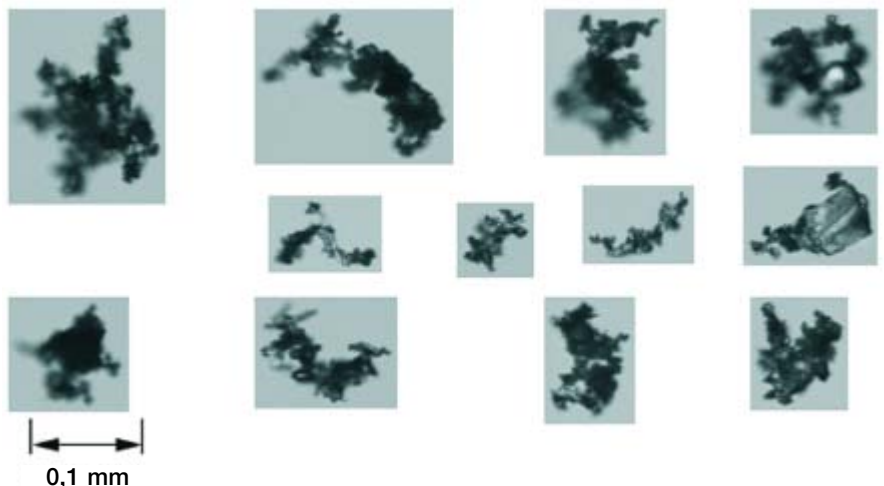


Bild 9: Unvollständig dispergierte Körner aus schlecht gemischtem Beton

Beton 1 und 3 unterscheiden sich nur in der Zementart und haben über 0,125 mm die gleiche Gesamtsieblinie, unterschreiten aber unter 0,5 mm die Sollsieblinie. Die im Verhältnis zu Beton 1, bei Beton 3 bedeutend geringere Abweichung im Bereich  $\leq 0,09$  mm erklärt das günstige Verhalten gemäß Bild 11.

Beton 2 entspricht mit seiner Sieblinie im Bereich 0,09 bis 0,25 mm der Sollsieblinie, weist aber im Bereich  $\leq 0,09$  mm eine größere Sieblinienabweichung als Beton 3 auf, außerdem benötigt er für das gleiche Ausbreitmaß mehr Fließmittel und hat somit einen höheren Wasseranspruch, was gemäß Bild 11 gegenüber Beton 1 eine bessere Stabilität, gegenüber Beton 3 aber eine schlechtere Stabilität des Frischbetons bewirkt.

Druckpressversuch

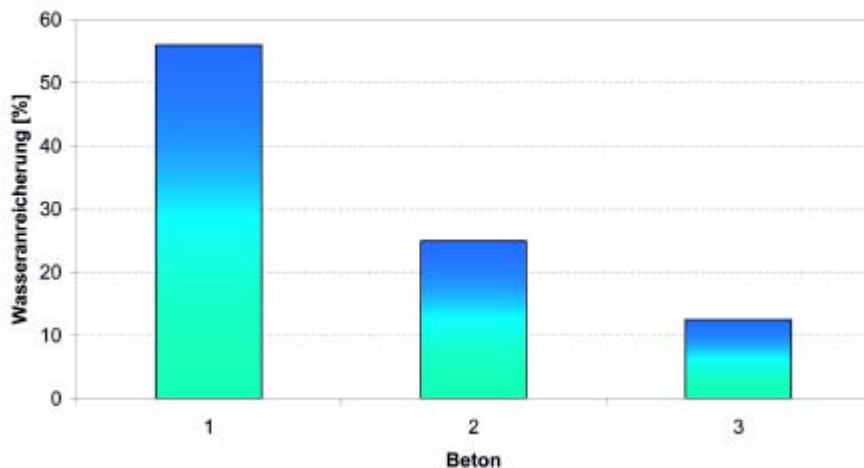


Bild 11: Wasseranreicherung in den oberen 2 cm der Betone gemäß Tabelle 3 nach Prüfung mit Druckpressversuch (Gerät gemäß Bild 10) Grafik: © VÖZFI

6 Literatur

[1] Fuller, W. B.; Thomson, S. E.: The laws of proportioning concrete. American society of civil engineers 33 (1907), S. 223–298.

[2] Kwan, A. K. H.; Mora, C. F.: Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. Magazine of Concrete Research, 2001, 53, No. 2, April, S. 91–100.

[3] Proske, T.; Ramge, P.: Influence of the particle shape on the packing density of aggregates. Darmstadt Concrete – Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, Vol. 19, Darmstadt 2004.

[4] Stark, U.; Müller, A.: Particle size and shape – important factors for packing density. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, 13.–15. September 2004.

[5] Andreasen, A. H. M.; Andersen, J.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten), Kolloid-Zeitschrift 50 (1930), S. 217–228.

[6] EN 933-4: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl.

Tabelle 4: Gesamtsieblinie (Gestein + Zement + Zusatzstoff) der Ausgangsstoffe und der Betone gemäß Tabelle 3

	Siebdurchgang in Vol. -% bei mm														
	0,005	0,01	0,02	0,063	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	11	16	22
Gestein	0	0	0	1	2	4	8	18	30	42	57	79	83	94	100
CEM 42,5N	2	7	15	54	97	99	100								
CEM 42,5R	7	24	55	97	100	100									
Steinmehl	3	9	19	55	96	97	100								
Soll GK 0,09	36	46	59	88	100										
Soll GK 16	6	8	10	14	16	18	23	30	38	48	62	79	88	100	
Beton 1	0,2	0,8	1,8	7,4	13	16	19	28	38	49	62	82	85	95	100
Beton 2	0,4	1,2	2,6	9,5	17	19	23	31	41	51	64	82	86	95	100
Beton 3	0,8	2,9	6,6	12,5	14	16	19	28	38	49	62	82	85	95	100