

Chimia 52 (1998) 202–207
 © Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft
 ISSN 0009–4293

Zusatzmittel im Betonbau

Frank Jacobs*

Admixtures in Concrete Construction

Abstract. Concrete is traditionally composed of water, cement and aggregates (sand, gravel). Through the variation of type and amount of these three components, many different types of concrete can be produced. By the addition of chemical admixtures, the field of concrete application has been extended during the last decades. In this paper, admixtures like superplasticizers, air-entraining agents, accelerators, retarders are beyond the scope. In the field of concrete technology, it is the aim to predict more precisely how admixtures work. New knowledge in the field of superplasticizers is presented. The influence of electrostatic and steric repulsive force on the dispersion of cement particles is shown. Beside the technical aspects, environmental concerns arose due to the increasing use of admixtures. Many questions may be answered today and show the environmental benefit due to the use of admixtures, but some are still open.

1. Einleitung

Zemente im modernen Sinn werden seit mehr als 150 Jahren hergestellt. Die Produktion von Zement und Beton nahm erst langsam, nach dem 2. Weltkrieg jedoch sprunghaft zu. Beton steht heute weltweit mengenmässig auf dem ersten Platz der von Menschen produzierten Stoffe. Bei der Wertschöpfung wird er jedoch vom Erdöl, der Kohle und dem Erdgas übertroffen. Beton wird traditionell aus Zement, Wasser und Zuschlägen (Sand und Kies) hergestellt. Durch Variation der Gehalte und Arten dieser drei Materialien eröffnet sich ein sehr breites Anwendungsspektrum. Als Beispiele sind zu nennen:

- Betone für Hausbau
- Betone für Pisten-, Strassen- und Brückenbau
- Betone für Staudämme
- Betone für Sichtbetonfassaden
- Betone zur Verfüllung von Hohlräumen
- Betone für spezielle Anwendungen wie beispielsweise chemisch aggressive Umgebung, hohe Temperaturen, stark verschleissende Beanspruchungen, zur Abschirmung radioaktiver Strahlung.

Um diese vielfältigen Anwendungsgebiete zu ermöglichen, werden von der schweizerischen Zementindustrie verschiedene Zemente gemäss Norm SIA 215.002, aus etwa 150 möglichen, angeboten:

- Portlandzemente, Portlandzemente mit hoher Sulfatbeständigkeit (CEM I)
- Portlandkalksteinzemente, Portlandsilicastaubzemente, Portlandkompositzemente, Flugaschezement (CEM II)
- Hochofenzement (CEM III).

Dank dieses Angebots an Zementen können gute, vielen Anforderungen gerecht werdende Betone hergestellt werden. Doch nicht immer genügen diese Betone allen speziellen Anforderungen an

die Betoneigenschaften und den gewünschten Bauablauf. Deshalb werden seit mehreren Jahrzehnten – und mit steigender Tendenz – Zusätze, d.h. Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe, bei der Herstellung von Betonen eingesetzt.

Pro Jahr werden in der Schweiz etwa 15 Mio. Kubikmeter Beton hergestellt. Die Zahlen beruhen auf Schätzungen und sind insbesondere bei den Betonzusatzstoffen mit Unsicherheiten behaftet. Mengemässig dominieren die drei traditionellen Betonausgangsstoffe Zuschlag, Zement und Wasser (Tab. 1).

Bevor auf die Betonzusatzmittel selber eingegangen wird, wird kurz auf die Hydratation des Zements, d.h. die Reaktionen zwischen Zement und Wasser, eingegangen, da die Betonzusatzmittel teilweise in diese Reaktionen eingreifen.

2. Hydratation von Zement

Zement besteht aus Klinker, der in einem Drehrohrofen gesintert wird, und Stoffen, die mit dem Klinker vermahlen werden. Die mineralischen Rohstoffe für die Klinkerherstellung, das sogenannte Rohmehl, haben eine Zusammensetzung, die ungefähr der eines Mergels, einem kalkreichen Ton, entspricht. Dieses Rohmehl verbleibt ca. 20 min bei 2000°, es erhitzt sich dadurch auf etwa 1450°. Beim Aufheizen und Verbleiben des Rohmehls bei 1450° sowie der nachfolgenden Abkühlung kommt es zur Bildung verschiedener Klinkerphasen. Diese Klinkerphasen bedingen die Zementeigenschaften, z.B., dass Zement ein hydraulisches Bindemittel ist, also im Gegensatz zu Kalk auch unter Wasser aushärten kann. Ver-

Tab. 1. Jährliche Stoffströme in der Schweiz für Betonausgangsstoffe zu Beginn der 90er Jahre, aus [1]; Betonzusatzstoffe sind pulverförmige, mineralische Stoffe, die im Beton reaktiv oder inert sein können

	Jährlicher Verbrauch in		Anmerkungen
	[1000 t]	[1000 m ³]	
Zement	4000	1300	
Zuschlag	20000	7700	Gesamte Bauindustrie: 60 Mio. t
davon Leichtzuschlag			
Bims	8	25	
Leca	20	70	Gesamte Bauindustrie 30000 t
Wasser	2000	2000	
Betonzusatzmittel	14		
Betonzusatzstoffe	> 70		
Expandiertes Polystyrol	0,3	15	

*Korrespondenz: Dr. F. Jacobs
 Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton
 (Technical Research and Consulting on Cement and Concrete)
 Lindenstrasse 10
 CH-5103 Wildeggen
 Tel.: +41 62 887 73 32
 Fax.: +41 62 893 16 27
 E-Mail: tfb@box.echo.ch

einfachend kann man von der Bildung von vier Klinkerphasen ausgehen:

- Alit: C_3S [2]: ca. 63 M.-% (= Massenprozent) im Klinker, bestimmt vor allem die Festigkeit von Beton während der ersten Wochen, weist Wärmefreisetzung von etwa 500 J/g auf.
- Belit: C_2S : ca. 16 M.-% im Klinker, trägt zur Festigkeit von Beton im hohen Alter bei, weist Wärmefreisetzung von etwa 250 J/g auf.
- Aluminat: C_3A : ca. 11 M.-% im Klinker, bestimmt Erhärtungsverlauf und Wärmeentwicklung während der ersten Stunden, weist Wärmefreisetzung von etwa 1340 J/g auf.
- Ferrit: C_4AF : ca. 8 M.-% im Klinker, Nebenprodukt, durch den Eisengehalt bedingt es die graue Färbung des Zements, weist Wärmefreisetzung von etwa 420 J/g auf.

Reagieren diese Klinkerphasen mit Wasser, entstehen u.a. Calciumsilicathydrate (C-S-H), Calciumaluminathydrate (C-A-H) und $Ca(OH)_2$ (CH).

Würde Klinker mit Wasser in Kontakt kommen, wäre eine sofortige Erstarrung der Mischung die Folge. Um die geforderte, mehrere Stunden dauernde Verarbeitung von Beton zu gewährleisten, wird deshalb dem Klinker ca. 3 M.-% SO_3 als Sulfat (Gips, Halbhydrat, Anhydrit) zugegeben. Mit dem Sulfat bildet sich bei der Hydratation des Klinkers Ettringit, ein sulfathaltiges C-A-H.

3. Zusatzmittel

3.1. Allgemeines

Bereits zu Zeiten der Römer wurde wahrscheinlich zufällig erkannt, dass die Einsatzgebiete des römischen Betons durch den Zusatz bestimmter Substanzen erweitert werden konnten. Die Römer stellten jedoch keinen Beton im heutigen Sinne her, jedoch ähnliche Baustoffe, die heute 'Opus caementitium (römischer Beton)' genannt werden [3][4]. Die eingesetzten Substanzen umfassten Eiweissstoffe (Milch, Eier, Tierblut) und Teer, Wachse, Öle. Auch die modernen Betonzusatzmittel wurden primär zufällig entdeckt. Bei der Einfärbung von Fahrbahnplatten in den USA mit Russ wurden Dispergiermittel zur besseren Verteilung verwendet. Diese so hergestellten Fahrbahnplatten wiesen im Verlauf der nächsten Jahre weniger Schäden als übliche Fahrbahnplatten auf. Dies wurde im Nachhinein als Folge der im Beton neu vorhandenen, kugeligen Luftporen erklärt, die durch die Dispergiermittel eingebracht wurden.

Heute sind die Entdeckungen weniger zufallsbedingt. Aufgrund der komplexen Reaktionen von Zement mit Wasser sowie einem Zusatz von Betonzusatzmitteln finden jedoch immer noch vereinzelt Überraschungen statt, die positiv, aber auch negativ (z.B. Betonierprobleme auf der Baustelle) sein können.

3.2. Arten und Wirkungsweisen von Betonzusatzmitteln

Ein Betonzusatzmittel (BZM) ist nach Schweizer Norm SIA V 162.051 (ENV 206); 'Beton: Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis' ein 'Produkt, das in geringen Mengen vor oder während des Mischens oder während eines zusätzlichen Mischvorgangs zugegeben wird und die Eigenschaften des Betons in der geforderten Weise ändert'. Weiter heisst es: 'In der Betonmischung darf der Gesamtanteil an Zusatzmitteln, sofern diese verwendet werden, 50 g/kg Zement nicht überschreiten und soll 2 g/kg nicht unterschreiten. Geringere Mengen an Zusatzmitteln sind nur zulässig, wenn sie in einem Teil des Zugabewassers gelöst werden. Flüssige Zusatzmittel in Mengen über 3 l/m³ Beton sind bei der Berechnung des Wasserzementwertes zu berücksichtigen'.

Auf dem Markt befinden sich hauptsächlich folgende Betonzusatzmittel:

- Verflüssiger (BV), Hochleistungsbetonverflüssiger (HBV): Auf die Wirkungsweise wird weiter unten eingegangen.
- Luftporenmittel (LP): Einführung kugeliger Luftporen ($\varnothing < 1$ mm) in Beton durch Seifen wie z.B. Vinsolharze.
- Verzögerer (VZ), Beschleuniger (BE): Eingreifen in die chemischen Reaktionen von Zement mit Wasser; als Wirkstoffe für VZ werden zumeist Saccharosen, Hydroxycarbonsäuren, Gluconate, Phosphate, Phosphonate und für BE Calciumformiat, Calciumnitrat, Aluminiumsulfat, Alkalicarbonate, -hydroxide, -aluminat benutzt.
- Dichtungsmittel (DM) setzen die Durchlässigkeit von Beton herab; sie können physikalisch (Verengen, Verstopfen von Poren) und chemisch (hydrophobierend) wirken.

Der jährliche Verbrauch der BZM in der Schweiz beträgt etwa 14 000 t (Tab. 2). HBV sind die weitaus am meisten eingesetzten BZM. In der Schweiz werden etwa ein Drittel aller Betone und etwa zwei Drittel der höherwertigen, klassifizierten Betone mit BZM hergestellt. In Europa liegt der durchschnittliche Verbrauch an BZM in der Grössenordnung von 0,3%, in Deutschland bei 0,6%, in Norwegen bei

1% und in der Schweiz bei 0,35% der Zementmasse. Ebenso unterscheiden sich die mengenmässigen Anteile der einzelnen BZM in den Ländern. Klimatische Gründe und die jeweilig üblichen Bauverfahren zeichnen hierfür verantwortlich.

3.3. Ökologische Anforderungen an Betonzusatzmittel

In den letzten Jahrzehnten erkannte man, dass nicht alles technisch Machbare auch ökologisch oder ökonomisch sinnvoll war. Deshalb entstanden in den letzten Jahren auch seitens der Bauherren Merkblätter zum ökologischen Bauen. Man wollte vermeiden, dass partikuläre Interessen wie ein schneller Baufortschritt oder die preisgünstige Herstellung von Baustoffen zu Problemen während der Nutzung der Gebäude, aber auch zu kostspieligen Entsorgungen der Baustoffe beim Rückbau führte. Diese Entwicklung betraf auch Betonzusatzmittel. Es war anfangs nicht klar, ob diese Mittel überhaupt notwendig waren und ob durch deren Verwendung zusätzliche Probleme entstünden. Beispielsweise wurde befürchtet, dass BZM-haltige Betone beim Kontakt mit Wasser das Wasser übermässig belasten oder beim Rückbau und bei der nachfolgenden Entsorgung des BZM-haltigen Betons Probleme entstünden. Deshalb ist es auch von Interesse zu wissen, wie die BZM mit den Bindemitteln wechselwirken. Damit können nähere Aussagen über mögliche Abbauprodukte oder die Mobilität von HBV oder deren Derivate gemacht werden. Über einzelne Aspekte hierzu wird weiter unten berichtet.

Heute liegen viele Studien vor, die aufzeigen, wann ein Einsatz von BZM vorteilhaft ist (Zusammenfassung z.B. in [5]). Zusätzlich wurde ein ökologisches Gütesiegel für BZM in der Schweiz entwickelt [6], das dem Anwender bei der Beurteilung auf einfache Weise helfen soll.

Damit sind aber noch nicht alle Diskussionen und Ängste behoben. Es besteht heute ein Bedarf an Untersuchungen von BZM-haltigen Betonen, die auf wissenschaftlicher Basis die positiven und negativen Auswirkungen von deren Herstellung über die Baustoff- und Gebäudeherstellung bis zum Rückbau und dem Betonrecycling betrachten.

4. Hochleistungsbetonverflüssiger

4.1. Einleitung

Betonverflüssiger und Hochleistungsbetonverflüssiger (HBV) haben in der Schweiz mit über 70% den grössten Markt-

anteil bei den Betonzusatzmitteln (Tab. 2). Sie werden eingesetzt, um die Fließfähigkeit des Betons zu erhöhen, d.h. den Beton flüssiger zu machen, damit er besser eingebaut (in die Schalung gefüllt)

werden kann. Die verflüssigende Wirkung wird durch verschiedene empirisch entwickelte Tests sowie in den letzten Jahren zunehmend durch rheologische Messungen untersucht (Fig. 1). Durch den Einsatz

Tab. 2. *Betonzusatzmittel: Dosierung und jährlicher Verkauf in der Schweiz in der ersten Hälfte der 90er Jahre; Bindemittel siehe [11]*

Typ BZM	Dosierung [% des Bindemittels]	Verkauf [t]
BV	0,35–0,55	1100
HBV	0,5–1,5	10 600
DM	0,5	200
VZ	0,2–2,5	900
LP	0,2–1,2	500

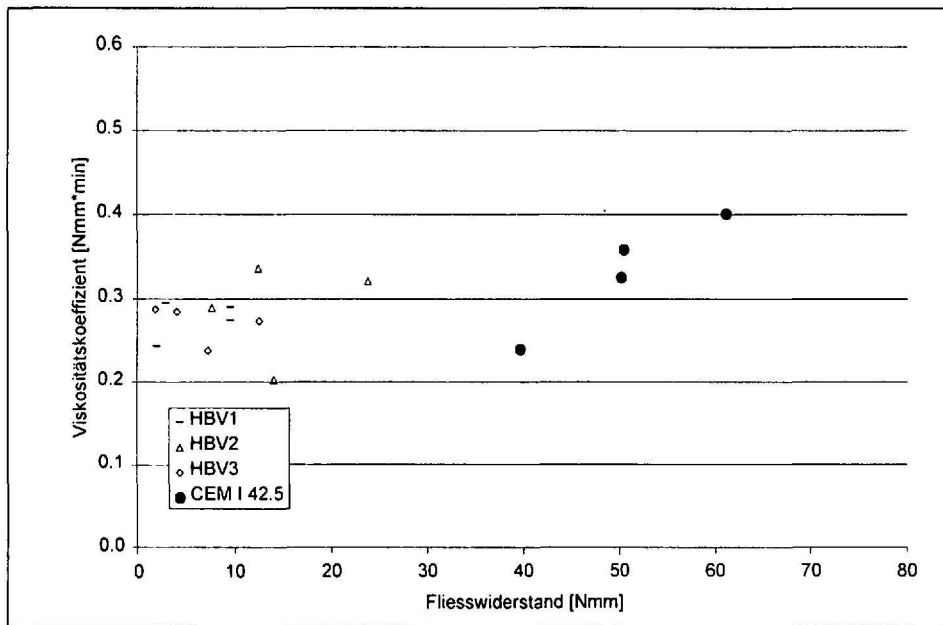


Fig. 1. *Rheologische Kenngrößen von Zement-Wasser-Suspensionen aus vier gleichen Zementarten (CEM I), jedoch unterschiedlichen Lieferwerken, jeweils ohne und mit verschiedenen HBV (1: Kunstharzcopolymer, 2: Vinylcopolymer, 3: Kombination aus Naphthalinsulfonat mit Kunstharzcopolymer)*

von HBV nimmt der Fließwiderstand ab, der Viskositätskoeffizient bleibt nahezu unverändert.

HBV werden häufig in das zur Betonherstellung benutzte Wasser gegeben. Jedoch wirken sie im allgemeinen besser, wenn sie bei der Betonherstellung als letztes zugegeben werden. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Zement, insbesondere das im Zement enthaltene Klinkermineral Tricalciumaluminat (C₃A), beim Befeuchten mit Wasser zu hydratisieren beginnt und dabei auf seiner Oberfläche adsorbiertes HBV 'überwachsen' kann.

Bis heute kann die Wirkung eines HBV bei einer Kombination mit verschiedenen Zementen und Zuschlägen nicht immer genau genug vorhergesagt werden. Vorversuche mit der vorgesehenen Betonrezeptur sind unerlässlich.

4.2. Wirkstoffe und Wirkungsmechanismen von HBV

Durch HBV werden die Zementkörner dispergiert. Eine Auswahl verwendeter Wirkstoffe ist in Tab. 3 und deren Strukturformeln in Fig. 2 dargestellt. Der größte Teil der dem Beton zugegebenen HBV wird auf den Feststoffoberflächen adsorbiert und entfaltet dadurch seine Wirkung.

Die verflüssigende Wirkung von HBV beruht u.a. auf deren chemischer Zusammensetzung. Bei der Untersuchung der heute noch am meisten eingesetzten HBV, also denen auf Lignin-, Melamin- und Naphthalinsulfonatbasis, zeigte sich eine Abhängigkeit vom Gehalt an sulfonierten Gruppen. Bei Ligninsulfonaten kann als Nebenwirkung eine zunehmende verzögernde Wirkung mit zunehmendem Sulfonierungsgrad auftreten. Zusätzlich wird die Wirkung durch die Substitution hydrophiler Wasserstoffatome durch Metallionen und durch das Verhältnis zwischen den hydrophilen Gruppen (z.B. SO₃H) und den daraus gebildeten Metallsalzen (z.B. SO₃M) beeinflusst. Die verflüssi-

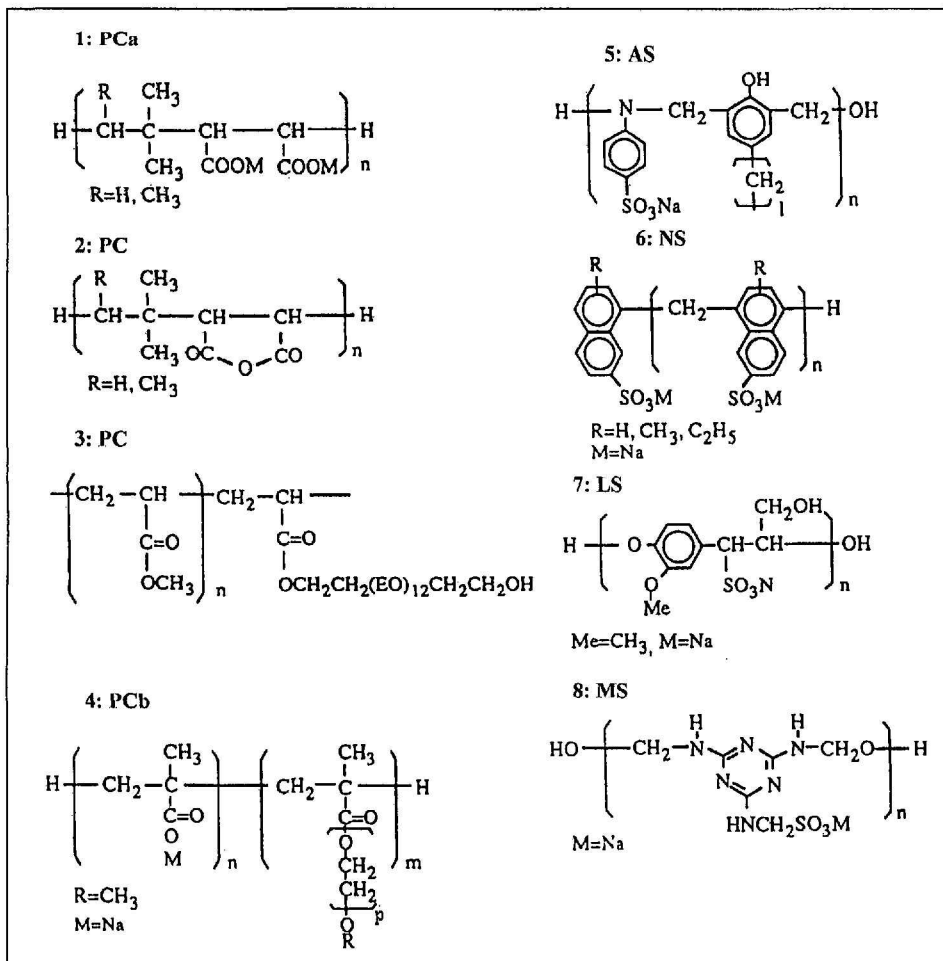


Fig. 2. *Strukturformeln der Hauptkomponenten von HBV und BV, aus [7]; 2: PCa mit langer Wirkungsdauer, 3: PCa mit spät einsetzender Wirkung; weitere Angaben siehe Tab. 3*

Tab. 3. Auswahl an Wirkstoffen für HBV, nach [7]; BM siehe [11]

Art	Hauptbestandteil	Hydrophober Teil	Funktionelle Gruppe	C _{org} [%]	Mittlere Molekularmasse	Übliche Dosierung [% v BM]	Dispergierung durch
PCa	Copolymer aus Olefin mit Maleinsäure	Alkane	Carboxygruppe	18,0	7000	1,0	elektrostatische und sterische Abstossung
PCb	Copolymer aus Acrylsäure mit Acrylester	Alkane	Carboxygruppe, Etherbindungen	8,2	10000	1,0	elektrostatische und sterische Abstossung
AS	3-dimensionales Polykondensat aus aromatischer Aminosulfonsäure mit Trimethylphenol	Alkylbenzen Aminobenzen	Sulfonatgruppe, Hydroxygruppe	19,4	10000	2,0	elektrostatische Abstossung und Benetzung
NS	β -Naphthalinsulfonat-kondensat mit Formalin	Naphthalin	Sulfonatgruppe	25,1	5500	1,0	elektrostatische Abstossung
LS	Ligninsulfonat, Polyol	Alkylbenzen	Sulfonat-, Methoxy- und Hydroxygruppe	24,2	7500	0,25	elektrostatische Abstossung
MS	Melaminsulfonat-kondensat mit Formaldehyd	Melamin	Sulfonatgruppe	17,5	20000	2,0	elektrostatische Abstossung

gende Wirkung nimmt mit zunehmender Substitution hydrophiler Gruppen, vor allem durch Alkalimetalle (z.B. Na) und weniger durch Erdalkalimetalle (z.B. Ca), zu.

Bei der Gruppe der Polycarboxylate (Fig. 2) werden zwei Arten unterschieden:

- Copolymere aus Olefinen mit Carboxylaten, letztere als Maleinsäure (Nr. 1). Zwei Untergruppen sind hier noch von Bedeutung. Solche mit langer Wirkungsdauer (PCa-IW, Nr. 2) und solche mit spät einsetzender Wirkung (PCa-sW, Nr. 3). PCa-IW entfalten ihre Wirkung erst, wenn sie zu Maleinsäure hydrolisieren. Dies wird durch die Freisetzung von Ca- und Alkaliionen bei der Zementhydratation ausgelöst. PCa-sW sind vernetzte PCa mit einer hohen Molekularmasse.

- Copolymere von Acrylsäuren mit Acrylsäureestern (Nr. 4). Das Sauerstoffatom in der Etherbindung weist eine Wasserstoffbrückenbindung zu einem Wassermolekül auf und bildet dadurch einen hydrophilen, sterischen Schutzfilm, der dispergierend wirkt.

Bei HBV auf der Basis von Naphthalinsulfonat zeigt sich auch zumeist eine Abnahme der Wirkung mit abnehmendem Polymergehalt (Fig. 3) sowie abnehmendem Kondensationsgrad und mittleren Molekulargewicht. Bei geringen Kondensationsgraden wird dies auf eine geringe Adsorption auf der Zementkornoberfläche zurückgeführt. Eine breite Verteilung des Molekulargewichts kann zusätzlich die Verflüssigung begünstigen; die kleinen Moleküle können zwischen den grossen Molekülen auf der Zementkornober-

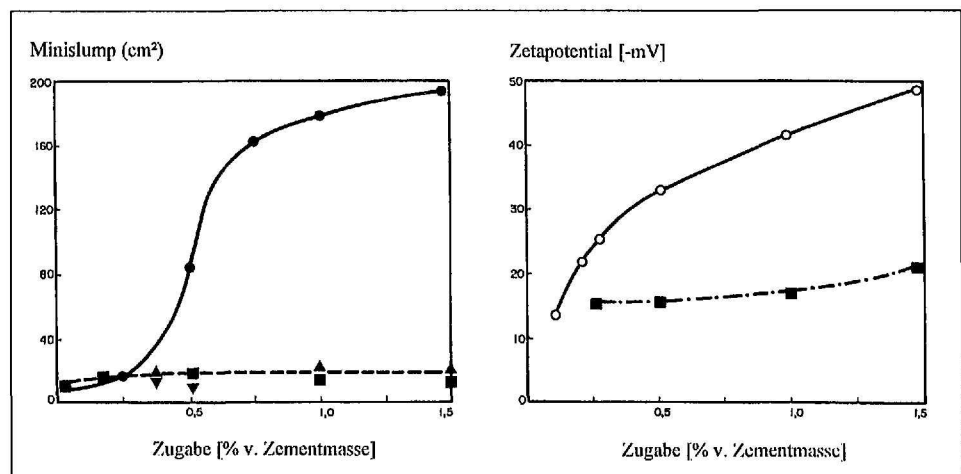


Fig. 3. Einfluss des Gehaltes an Monomeren (---) und Polymeren (—) von Natriumnaphthalinsulfonat auf das Fließvermögen (Minislump) und Zetapotential von einer Zement-Wasser-Suspension, aus [8]

fläche adsorbiert werden. Somit werden die Zementkörner durch den höheren Gehalt an HBV stärker dispergiert.

Einerseits zeigte sich der Einfluss des Chemismus der HBV auf deren Wirkung, andererseits galt es abzuklären, wie sie wirken. Als Ursachen der verflüssigenden Wirkung von HBV für die Dispersion der Zementpartikel wird betrachtet:

- Abbau von Oberflächenspannungen, Reduktion des Kontaktwinkels
- Zunahme der Oberflächenladungen
- Sterische Effekte.

Wird dem Zement Wasser zugegeben, lagert sich das Wasser an der Zementkornoberfläche an. Durch die *van-der-Waals*-Kräfte können sich benetzte Zementkörner aneinander lagern und eine Flockenstruktur bilden. Ist der Kontaktwinkel zwischen dem Wasser und den in Flockenstruktur vorliegenden Zementkörnern kleiner 90°, wird durch Kapillarkräfte

Wasser zwischen die Zementkörner 'gesaugt' und treibt diese auseinander. Wird die Oberflächenspannung des Wassers reduziert, lagert sich weniger Wasser an die Zementkörner an bzw. nimmt der Kapillardruck ab, durch den Wasser zwischen Zementkörner 'gesaugt' wird.

Die Adsorption von HBV ist nicht einheitlich für die verschiedenen Klinkerphasen (Tab. 4). Für die in Tab. 3 aufgelisteten HBV sind die adsorbierten Mengen auf den Klinkerphasen angegeben. Die Dosierung der HBV hing von deren Wirkungsweise ab und wurde wie angegeben variiert. Am meisten HBV wurde auf C₃A, C₄AF und CaO und geringfügig weniger auf Ca(OH)₂ adsorbiert. Geringe Adsorption fand auf C₃S, C₂S, Steinkohlenflugasche und Silicastaub und Kalkstein statt [9]. Auf Hydratationsprodukten des Zementes (C-S-H) wurde mehr HBV adsorbiert als auf C₃S und C₂S. Demgegenüber

nahm die Adsorption auf den Hydratationsprodukten (hier Ettringit) von C₃A und C₄AF im Vergleich zu den nichthydratisierten Klinkerphasen ab.

HBV auf der Basis von Aminosulfonsäuren (AS) und Naphthalinsulfonaten (NS) werden in einer ähnlichen Masse und stärker als solche auf der Basis von Copolymeren (PC) und Ligninsulfonaten (LS) adsorbiert (Tab. 4). Gelangen Sulfationen infolge der Hydratation des Zements in die Suspension, können sie sich auch an

der Zementkornoberfläche anlagern und dadurch eine spätere Adsorption von HBV mit Sulfonaten reduzieren. Die Schichtdicken der adsorbierten HBV liegen im Bereich von etwa 0,050 bis 0,2 µm. Durch die Adsorption sind die HBV relativ fest gebunden. Sie können unter praxisnahen Bedingungen deshalb kaum noch aus Beton ausgewaschen werden.

Die Abstossung infolge von Oberflächenladungen stellt man sich wie in Fig. 4 dargestellt vor. Zementkörner weisen

Durchmesser im Bereich von 1–100 µm auf. In einer Suspension von Wasser mit Zement werden auf der Zementkornoberfläche HBV und weitere Ionen adsorbiert (sog. Sternschicht). An diese Schicht ist eine elektrische Doppelschicht angelagert. Diese Doppelschicht weist mit abnehmender Entfernung zur Sternschicht eine immer negativere Ladung auf. Innerhalb dieser Doppelschicht befindet sich zumeist die Gleitschicht zwischen den Partikeln und der Flüssigkeit. Um den Einfluss der

Tab. 4. Zusammensetzung und adsorbierte Menge an HBV auf verschiedenen Klinkerphasen (KI), Zementen (CEM), Betonzusatzstoffen (BZS: SFA = Steinkohlenflugasche, HS = Hüttensand, MS = Silicastaub, Kalk = Kalksteinmehl [9]) und Hydraten (Ettring = Ettringit), aus [7]; Blaine und BET sind zwei gebräuchliche Methoden, um Oberflächen zu quantifizieren; Abkürzungen siehe Text

		Chemische Zusammensetzung [%]								Freies CaO	Mineralog. Zusammensetzung [%]				Spez. Oberfläche	
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	[%]	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Blaine [cm ² /g]	BET [m ² /g]
CEM	1	21,5	5,3	3,3	64,8	1,1	2,3	0,51	0,49	0,3	53	21	9	10	3300	
	2	21,6	5,2	3,4	64,5	1,4	2,1	0,46	0,23	1,3	51	23	8	10	3450	
	3	23,3	3,9	4,1	63,4	1,3	1,9	0,05	0,52	0,5	44	34	3	13	3250	
	4	27,9	2,8	3,2	62,6	1,1	1,6	0,29	0,02	0,3	21	67	2	10	3400	
KI	C ₃ S	26,2	0,6	0,5	73,6	1,0		0,4							3450	
	C ₂ S	34,6	0,6	0,5	65,2	0,5	0,5	0,4							3520	
	C ₃ A		37,5		62,0	0,5	0,5	0,4							3500	
	C ₄ AF		22,2	31,4	46,2	0,5	0,5	0,4							3570	
	CaO				96,2										3530	
BZS	SFA	60,3	17,9	10,1	4,5	1,5	0,2	0,73	0,88						3820	
	HS	33,9	15,1	0,4	42,9	6,3	0,9	0,22	0,58						3450	
	MS	83,4	1,6	2,1	1,4	0,9	0,3	0,8	1,2							21,5
	Kalk	1,0	0,8	0,2	52,2	0,7	0,1	0,1	0,2							5
Hydrate	C-S-H	30,7			48,6											250
	Ettring		8,3		27,5		19,6									6
	CH				74,9											5

Zugegebene HBV-Menge		Adsorbierte Menge an Betonverflüssiger (HBV) in [mg/g]															
HBV [%]	[mg/g]	Klinkerphasen					Betonzusatzstoff				Hydrate			Zemente			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO	SFA	HS	MS	Kalk	C-S-H	Ettring	CH	1	3	4	
PC	1	10	3,9	3,1	9,5		9,1	7,2	6,3	5,9	7,4	9,2	8,5	8,6	6,6	6,9	7,0
	2	20		5,9	19,3		18,9								10,1		
	10	100			25,4	17,4	19,5					19,4					
AS	2	20	5,1	4,2	19,2		18,6	7,6	8,9	3,7	7,7	13,4	15,4	12,8	12,0	13,1	11,6
	20	200			43,4	32,5	35,2					28,7					
NS	1	10	2,6	5,8	9,8	9,8	9,2	4,4	6,9	0,3	5,3	8,2	9,0	8,3	7,0	7,7	6,1
	2	20	5,9	11,1	19,6	19,6	19,2	9,1	4,9			17,1	19,0	16,6	10,9	15,8	10,2
	10	100			94,3	91,5	62,2					37,4					
LS	0,25	2,5	1,8	1,2	2,3	2,1	1,8	1,6	0,9	0,3	1,2	1,6	2,4	2,0	1,0	1,3	1,5
	0,5	5	2,5	2,6	4,7	4,5	4,2	2,5	1,3			2,9	4,4	4,2	2,7	2,8	2,1
	2,5	25			23,4	6,4	15,1					19,6					

Tab. 5. Zetapotentiale von Zementkörnern in wässrigen Suspensionen mit HBV, aus [10]

HBV	Zetapotential [mV]
NS	-11,0
PCa	-9,1
PCb	-1,5
Ohne HBV	-1,8

HBV auf die Ladungsverhältnisse zu messen, wird das Potential der Gleitschicht, das sogenannte Zetapotential, gemessen. Das Zetapotential wird durch die Ionen der Doppelschicht mit zur Sternschicht umgekehrter Ladung bestimmt. Es ist üblicherweise niedriger als das Potential der Zementpartikel.

Tab. 5 zeigt Ergebnisse von Messungen des Zetapotentials von Suspensionen aus Wasser, HBV und Zement. Beim Vergleich des rheologischen Verhaltens von Zement-Wassersuspensionen mit dem gemessenen Zetapotential ergab sich jedoch keine Korrelation. Vielmehr wurde bei den hier untersuchten Wirkstoffen eine Korrelation zwischen dem rheologischen Verhalten und den Wechselwirkungskräften festgestellt. Daraus wurde abgeleitet, dass eine andere 'Kraft' die rheologischen Kenngrößen der Zementsuspensionen bestimmt, und dies wurde primär als Ursache des sterischen Effekts (sterische Hinderung) gedeutet. Durch den auf den Zementkörnern adsorbierten HBV werden die Zementkörner dispergiert; zusätzlich wird die Hydratation der Zementkörner verlangsamt. In Fig. 5 sind die Wechselwirkungskräfte zwischen den Zementkörnern sowie der Anteil infolge elektrostatischer Abstossung (Zetapotential) dargestellt. Die Differenz beider Kräfte gibt Anhaltspunkte für das Ausmass des sterischen Effekts.

5. Ausblick

Der Einsatz von Betonzusatzmittel und anderer Stoffe im Beton wird in der Schweiz noch zunehmen. Die bisherigen Erkenntnisse sind deshalb zu überprüfen und zu erweitern.

Zusätzlich nehmen die Anforderungen an Beton, in technischer und ökologischer Richtung, stetig zu und verlangen u.a. die Kenntnis der im Beton ablaufenden Reaktionen.

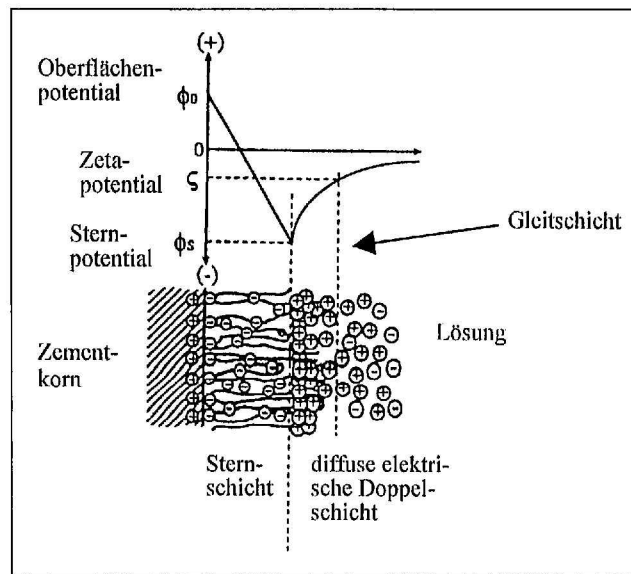


Fig. 4. Schematische Darstellung der Abstossung von Zementpartikeln infolge Oberflächenladungen, aus [10]

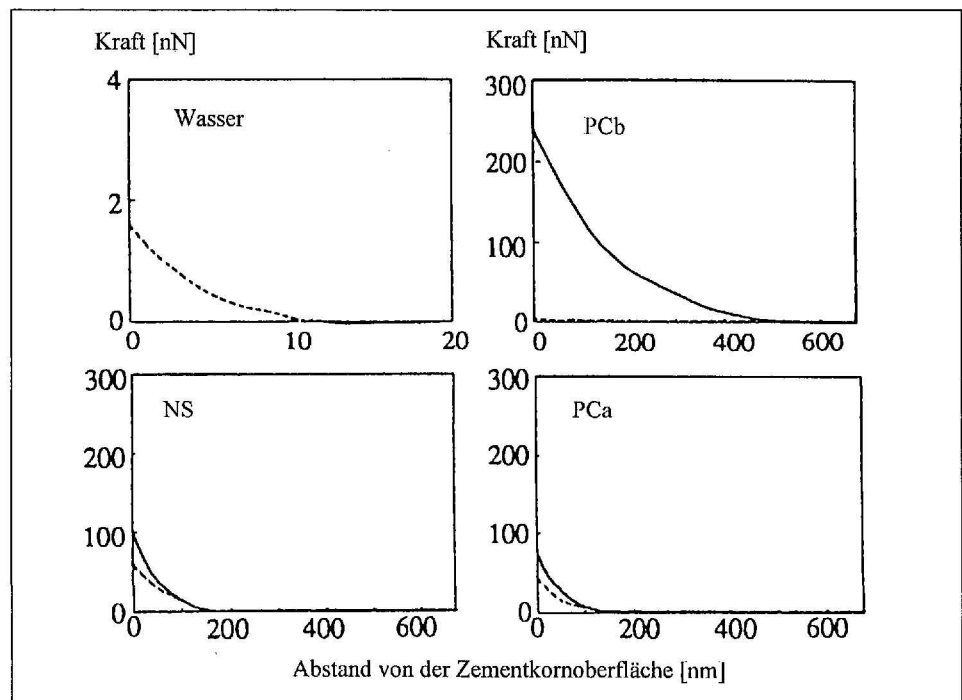


Fig. 5. Wechselwirkungskräfte (ausgezogene Linie) zwischen Zementpartikeln und der Anteil infolge elektrostatischer Abstossung (gestrichelte Linie), aus [10]; Abkürzungen siehe Tab. 3

[2] In dieser Kurznotation steht C für CaO, S für SiO₂, A für Al₂O₃, F für Fe₂O₃ und H für H₂O.
 [3] H.-O. Lambrecht, 'Opus caementitium', Beton-Verlag, Düsseldorf, 1993.
 [4] F. Jacobs, 'Römischer Beton', in 'Jahresbericht 1990 der Gesellschaft Pro Vindonissa', 1991.
 [5] SIA, 'Umweltaspekte von Beton' SIA D 0146, soll Ende 1998 erscheinen.
 [6] FSHBZ, 'FSHBZ-Gütesiegel, Kriterien und Prüfverfahren', Fachverband schweizerischer Hersteller von Betonzusatzmitteln (FSHBZ), Zürich, 1997.
 [7] H. Uchikawa, 'Hydration of cement and structure formation and properties of cement paste in the presence of organic admixtures', J. Research Chichibu onoda cement corporation 1995, 46.
 [8] M. Collepardi, 'Influence of admixtures on concrete rheological properties', Il cemento 1982, 4.
 [9] Steinkohlenflugasche stammt aus Kohlekraftwerken, Silicastaub aus der Ferrosiliciumindustrie und Kalkstein aus Kalksteinbrüchen; diese Stoffe werden dem Zement oder Beton zugegeben, um Betoneigenschaften gezielt zu beeinflussen.
 [10] H. Uchikawa, S. Hanehara, D. Sawaki, 'Effect of electrostatic and steric repulsive force of organic admixture on the dispersion of cement particles in fresh cement paste', J. Research Chichibu onoda cement corporation 1997, 48.
 [11] Unter Bindemittel wird die Summe der Zementmasse und Betonzusatzstoffmasse verstanden. Arten von Betonzusatzstoffe siehe [9].

[1] F. Jacobs, 'Zusätze in Beton', Die Schweizer Baustoff-Industrie 1996, 6.