

# Betontechnologische Überlegungen zur Ausnutzbarkeit natürlicher Zuschlagvorkommen

Von Wilhelm Manns, Stuttgart \*)

## Übersicht

*Zukünftig wird es wegen der Ergiebigkeit und der Verfügbarkeit der Lagerstätten zunehmend schwieriger sein, die erforderlichen Mengen an Zuschlag für die Beton- und Mörtelherstellung, insbesondere die Menge von jährlich etwa 200 Mill. Tonnen an natürlich vorkommendem Kies und Sand zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund sollten die aufgeschlossenen Vorkommen möglichst vollständig ausgenutzt werden. Dem stehen vor allem die Begrenzung des Mehlkorngehaltes und die Bevorzugung sandärmerer Kornzusammensetzungen entgegen.*

*Die Festlegungen des Mehlkorngehaltes hinsichtlich Menge und Prüfkorngröße werden anhand von Versuchsergebnissen einer kritischen Beurteilung unterzogen. Sie deutet an, daß die Festlegungen zum Mehlkorn im Hinblick auf die bessere Ausnutzbarkeit der Zuschlagvorkommen neu überdacht werden sollten.*

*Die Bevorzugung der sandärmeren Kornzusammensetzungen geht vor allem auf Forschungen und Überlegungen in den dreißiger Jahren zurück, in denen Betone vorwiegend unter dem Aspekt des gleichen Mischungsverhältnisses Zement zu Zuschlag und gleicher Konsistenz betrachtet wurden. Der Kornzusammensetzung wurde dabei ein bestimmender Einfluß auf die Druckfestigkeit zugeschrieben. Mit der Betrachtung des Betons aus dem Blickwinkel des Wasserzementwertes und als Zweistoffsystem aus Zementstein und Zuschlag wurde die Bedeutung der Sieblinien gemindert. Sandärmer wird jedoch noch immer als günstig, sandreich noch immer als nur brauchbar beurteilt, obwohl der indirekte Einfluß sandreicher Kornzusammensetzungen auf die Festigkeit über den Wasseranspruch heute durch verflüssigende Zusatzmittel und/oder höhere Zementgehalte weitgehend abgebaut werden kann. Sandreicher Beton, dessen Konsistenz auf den Einbau mit verflüssigenden Zusatzmitteln eingestellt wird, dürfte für normale Anwendungen nach entsprechenden Eignungsprüfungen sandärmeren Betonen technisch und wirtschaftlich praktisch gleichwertig sein; eine Betonfestigkeitsklasse „B 20“ könnte sandreichere Betonmischungen und damit eine bessere Ausnutzung vieler natürlicher Zuschlagvorkommen fördern.*

\*) Nach einem Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '81 vom 23. bis 25. September in Nürnberg.

## 1. Einleitung

Beton ist ein künstlicher Stein, der aus einem Gemisch von Zement, Zuschlag und Wasser – gegebenenfalls auch mit Zusätzen – durch Erhärten des Zementleims entsteht. Diese Begriffsbestimmung zeigt, daß dem Zuschlag – hinter dem Zement an zweiter Stelle stehend – eine wichtige Bedeutung bei den Ausgangsstoffen zur Betonherstellung beigemessen wird. Betrachtet man die anteiligen Volumina im Betongefüge, so steht der Zuschlag mit rd. 70 Vol.-% sogar an erster Stelle, während der Zementstein aus Zement, Zusätzen und Wasser nur rd. 30 Vol.-% einnimmt. Vom Gewicht her betrachtet beträgt der Zuschlagbedarf etwa das 5- bis 8fache, im Mittel das 6- bis 7fache des Zements, das bedeutet beispielsweise bei einer jährlichen Zementproduktion von rd. 30 Millionen Tonnen für die Mörtel- und Betonherstellung einen Zuschlagbedarf von rd. 200 Millionen Tonnen.

Als Zuschlag steht eine Vielzahl von Stoffen zur Verfügung, die ihrer Rohdichte nach als Leichtzuschlag, als Normalzuschlag und als Schwerzuschlag angesprochen werden. Mengenmäßig treten Leichtzuschlag und Schwerzuschlag hinter den Normalzuschlag weit zurück, so daß die Situation für Normalzuschlag maßgeblich ist. Als Normalzuschlag wird neben künstlich hergestelltem Zuschlag, wie z. B. Hochofenschlacke, vor allem natürlicher Zuschlag verwendet, der als Kies und Sand aus Gruben, Flüssen und Seen sowie als gebrochenes Material vorwiegend durch Zerkleinern von Naturgestein gewonnen wird. Seit einiger Zeit wird auch in mehreren Ländern die Frage diskutiert und untersucht, ob und gegebenenfalls inwieweit aus Abbruchbeton gewonnener Zuschlag das Zuschlagangebot vermehren kann, siehe u. a. [1].

Insgesamt ist zu folgern, daß heute und auch in naher Zukunft natürlich vorkommender Kies und Sand und daraus gegebenenfalls auch durch Brechen gewonnener Zuschlag den weitaus überwiegenden Anteil am Zuschlag stellen wird, obwohl wahrscheinlich in Gegenden mit Mangel an Kies und/oder Sand zunehmend auch gebrochenes Naturgestein als Zuschlag verwendet werden wird.

Für eine jährlich benötigte Menge von rd. 200 Millionen Tonnen Zuschlag aus Kies und Sand ist bei einer hochgegriffenen Ergiebigkeit von 400 000 t je ha im Jahr ein Flächenbedarf von etwa 500 ha erforderlich. Diese Fläche ist in der dichtbesiedelten Bundesrepublik Deutschland – zumal bei zunehmendem Umweltbewußtsein – immer schwerer bereitzustellen. Aus diesem Grunde entsteht der Wunsch, wenn nicht sogar der Zwang, die aufgeschlossenen Zuschlagvorkommen möglichst vollständig zu nutzen.

Vom Ziel der vollständigen Ausnutzbarkeit der Vorkommen ist man noch mehr oder weniger weit entfernt. Bei den Bestandteilen der natürlichen Kiessandvorkommen, die zur Zeit nicht oder noch nicht verwendet werden können, handelt es sich vorwiegend um Feinsand bis 0,8 mm und Sand bis 2 mm.

Feinsand muß nahezu im gesamten Bundesgebiet ins Auskiesungsgelände zurückgespült werden, und zwar sind es zur Zeit im jährlichen Durchschnitt etwa 25 Millionen Tonnen. Nicht verwendbarer Sand 0/2 mm fällt in nennenswertem Umfang nur in Norddeutschland und in Nordrhein-Westfalen am Niederrhein an, dort sind es im



Bild 1 Nicht verwertbare Feinsandhalde in oberrheinischem Zuschlagwerk

jährlichen Durchschnitt etwa 15 Millionen Tonnen. Das sind mit insgesamt etwa 40 Millionen Tonnen an nicht verwertetem Zuschlag im Jahr etwa 20 % der für die Mörtel- und Betonherstellung verwendeten Zuschlagmenge. Diese Mengen dürften zukünftig noch anwachsen, da zunehmend geologische Formationen mit höherem Feinanteil abgebaut werden müssen. Der nicht verwertbare Zuschlag kann im Einzelfall schon jetzt Lagerprobleme mit sich bringen, siehe Bild 1. Im folgenden wird zunächst den Gründen nachgegangen, warum dieser Zuschlag z. Zt. nicht verwendet wird oder werden kann, und anschließend die Frage diskutiert, ob die Betontechnologie heute vielleicht Möglichkeiten bietet, zumindest einen Teil des bisher nicht verwerteten Zuschlags zur Betonbereitung zu nutzen.

## **2. Zur Verwendbarkeit von Feinsand bis 0,8 mm**

### **2.1 Allgemeine Bedeutung des Mehlkorns**

Feinsand wird aus dem Sand entfernt, um zum einen den Gehalt an Abschlämbbarem bis 0,063 mm, das heißt um den Gehalt an tonigen und schluffigen Bestandteilen, oder zum anderen um den Anteil bis 0,25 mm, den Gehalt an Mehlkorn, zu verringern. Aus verfahrenstechnischen Gründen läßt sich das Abtrennen auf einen bestimmten Korndurchmesser bei der Zuschlagaufbereitung nicht genau verwirklichen, so daß sich ein Feinsand mit etwa 0,8 mm Größtkorn ergibt, der je nach geologischem Vorkommen mehr oder weniger tonige und schluffige Bestandteile enthalten kann. Während ein hoher Gehalt an Abschlämbbarem aus vielerlei Gründen die Brauchbarkeit des Feinsandes in betontechnologischer Sicht erheblich beeinträchtigen dürfte, bestehen solche Bedenken gegenüber an Abschlämbbarem armen Feinsanden nicht. Ihre Verwendung stößt jedoch wegen der mengenmäßigen und korngrößenmäßigen Begrenzung des Mehlkorns in verschiedenen Bestimmungen auf Schwierigkeiten.

In der Betontechnologie wird als Mehlkorn allgemein die Summe aus Zement und den feinsten Bestandteilen des Zuschlags sowie –

soweit vorhanden – den Zusatzstoffen angesehen. Nach DIN 1045 wird das Mehlkorn zur Zeit durch das Prüfsieb 0,25 mm begrenzt. Eine Mindestmenge an Mehlkorn ist auf der einen Seite für eine ausreichende Verarbeitbarkeit notwendig, insbesondere wenn der Beton für Sichtbeton, wasserundurchlässigen Beton oder Pumpbeton benötigt wird; auf der anderen Seite sollte eine Höchstmenge an Mehlkorn nicht überschritten werden, um das Schwinden und Kriechen des grünen und des erhärteten Betons nicht nennenswert zu erhöhen, um die Gefahr einer Schrumpfrißbildung zu mindern und um den Widerstand gegenüber Frostbeanspruchung nicht zu beeinträchtigen.

Aus den vorstehenden Gründen wurden zum Teil Richtwerte für den Mehlkorngehalt genannt – wie in DIN 1045 [2] –, zum Teil Höchstwerte festgelegt – wie in den ZTV Beton 78 [3] und in den ZTV-K 80 [4], siehe Tafel 1.

Tafel 1 Richt- und Höchstwerte für den Mehlkorngehalt

Vorschrift	Bezugsgröße	Mehlkorngesamt kg/m <sup>3</sup>	
Richtwerte nach DIN 1045	Größtkorn	8 mm	525
	des	16 mm	450
	Zuschlags	32 mm	400
		63 mm	325
Höchstwerte nach ZTV Beton 78	allgemein		450
	Beton mit Fließmittel bei höherem Zementgehalt		500
Höchstwerte nach ZTV-K 80	Größtkorn	16 mm	470
	des Zuschlags	32 mm	430
	Beton für Kappen		400

Wird ein höherer Verbrauch an Feinstsand 0/0,25 mm angestrebt, so ließe sich das durch Senken der Prüfkorngröße des Mehlkorns, durch Erhöhen des zulässigen Mehlkorngehaltes oder durch Kombination beider Maßnahmen erreichen. Diese Maßnahmen sind jedoch nur dann zu rechtfertigen, wenn sie die Betonqualität nicht nennenswert beeinträchtigen. Einige Im Otto-Graf-Institut durchgeführte Untersuchungen zum Einfluß der Mehlkornzusammensetzung auf den Widerstand gegen Schrumpfrißbildung und zur Bedeutung des Mehlkornanteils für den Frost-Taumittel-Widerstand deuten an, daß Überlegungen in der geschilderten Art erfolgversprechend sein dürften. Obwohl diese nachfolgend beschriebenen, orientierenden Untersuchungen\*) nicht alle in diesem Zusammenhang bestehenden Fragen abklären können, geben sie doch schon wertvolle Hinweise.

\*) Diese Untersuchungen wurden von der Fachgruppe Sand und Kies im Industrieverband Steine und Erden, Baden-Württemberg, finanziert.

## 2.2 Mehlkornzusammensetzung und Schrumpfrißbildung

Der Einfluß der Kornzusammensetzung des Mehlkorns auf den Widerstand gegen Schrumpfrißbildung wurde an Betonplatten im Windkanal untersucht, siehe auch [5,6]. Die Versuchseinrichtung hierzu bestand im wesentlichen aus einer Stahlform für 8 cm dicke Betonplatten von 160 cm Länge und 60 cm Breite mit einer Randbewehrung, die den Proben das Verhalten einer dünnen, großflächigen Platte aufzwingt, und einem Windkanal, durch den Luft von 30°C mit einer relativen Feuchte von rd. 50 % mit einer Geschwindigkeit von rd. 5 m/s geleitet wurde (siehe Bild 2). Die Versuchsplatten wurden nach der Herstellung fortlaufend beobachtet, bis die Rißbildung entweder abgeschlossen oder keine Rißbildung mehr zu erwarten war.

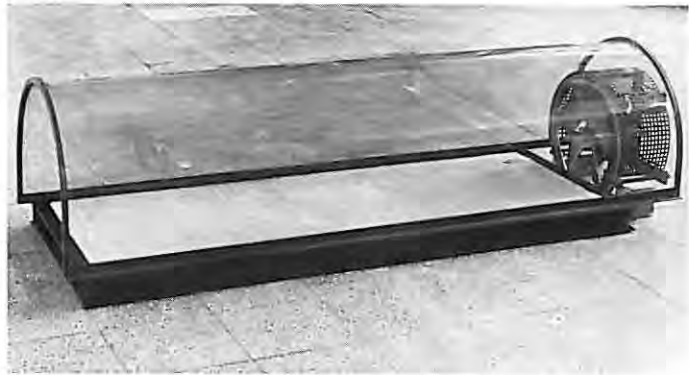


Bild 2 Versuchseinrichtung zur Schrumpfrißuntersuchung [5, 6]

Die untersuchten Betone mit einem Mischungsverhältnis von 1 : 4,30 : 0,75 und einer Sieblinie C 8 waren wegen ihres hohen Wassergehaltes von etwa 260 l/m<sup>3</sup> und ihres hohen Wasserrückhaltevermögens relativ schrumpfrißempfindlich [5,6]; die Betone unterschieden sich bei gleicher Betonzusammensetzung mit einem Mehlkorngehalt von etwa 660 kg/m<sup>3</sup> nur in der Kornzusammensetzung des Mehlkorns. Das Mehlkorn bestand aus rd. 350 kg Zement und rd. 310 kg Feinstsand, von dem etwa 180 kg aus dem Zuschlag stammten und etwa 130 kg gesondert in unterschiedlicher Feinheit zugegeben wurden, wobei das Größte – 0,25 genannt – dem Feinstsand aus dem Zuschlag entsprach und das Feinste – 0,03 genannt – feiner als Zement war. Die zugegebenen Feinststoffe wurden aus dem Feinstsand des Zuschlags durch Absieben gewonnen, lediglich der Zugabestoff 0,03 bestand aus Kalksteinmehl, weil ausreichende Mengen an Feinststoff dieser Feinheit nicht aus dem Feinstsand des Zuschlags herstellbar waren. Bei dem Feinstsand 0/0,25 im Zuschlag handelte es sich um ein nahezu ton- und glimmerfreies Gemisch aus Calcit, Quarz und anderen silicatischen Mineralien, wie es für weite Teile Baden-Württembergs charakteristisch ist. Die Streubreite der Kornzusammensetzung des Mehlkorns von der größten Mehlkornzusammensetzung, die mit 0,25 angereichert

etwa 60 % bis 0,125 mm enthält, bis zur feinsten, die mit 0,03 angereichert etwa 60 % bis 0,04 mm enthält, ist aus Bild 3 ersichtlich. Die Ergebnisse der Schrumpfrißuntersuchung (Bild 4) zeigen, daß nur der Beton mit der feinsten Mehlkornzusammensetzung Risse aufwies, während die anderen Betone ohne Risse blieben. Noch differenzierter sieht das zugehörige plastische Schwinden aus, siehe Bild 5. Die Betone mit erhöhtem Anteil bis 0,25 mm und bis 0,125 mm zeigten praktisch kein erhöhtes plastisches Schwinden. Das war beim Beton mit einem erhöhten Anteil bis 0,09 mm nicht mehr der Fall; obwohl noch keine Risse auftraten, wurde die Rißsicherheit schon nennenswert abgebaut. Wengleich hier nur der Korngrößen einfluß betrachtet und der Einfluß mineralogischer Unter-

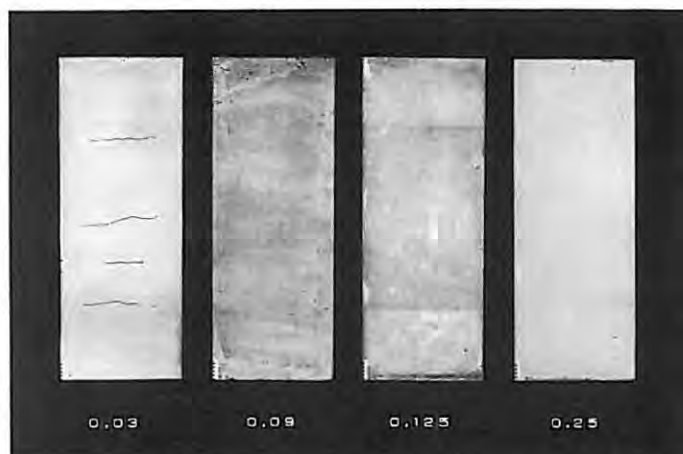
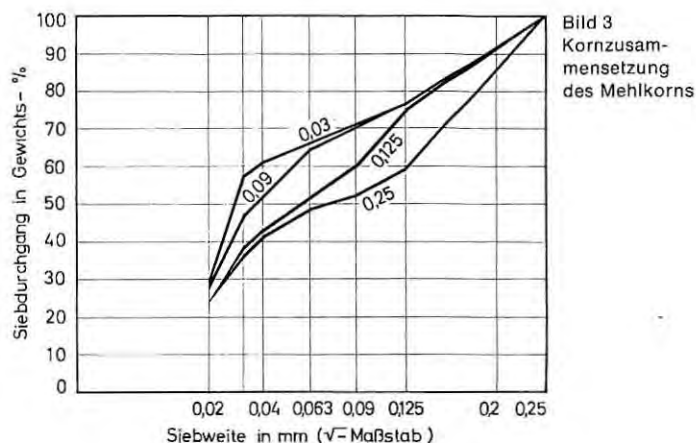
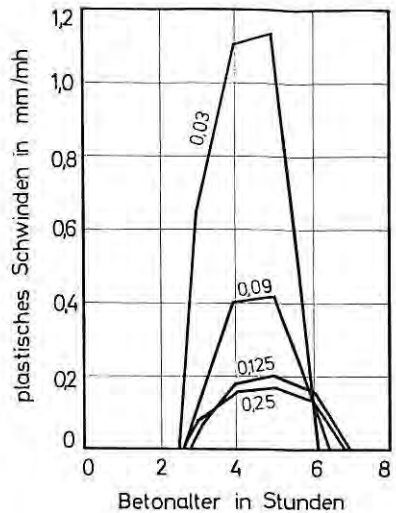


Bild 4 Rißbildung bei unterschiedlicher Kornzusammensetzung des Mehlkorns

Bild 5  
Plastisches Schwinden  
bei unterschiedlicher Korn-  
zusammensetzung  
des Mehlkorns



schiede vernachlässigt wurde, kann man vielleicht doch schon folgern, daß eine Begrenzung des Mehlkorns auf 0,125 mm aus der Sicht der Schrumpfrißbildung vertretbar sein dürfte.

### 2.3 Mehlkornanteil und Frost-Taumittel-Widerstand

Der Einfluß des Mehlkornanteils auf den Frost-Taumittel-Widerstand wurde an Betonproben nach dem Eintauchverfahren untersucht. Bei diesem Untersuchungsverfahren wird an 10-cm-Würfeln der beim Einfrieren und Auftauen in 3 % NaCl-Lösung aufgetretene Gewichtsverlust als Maß für die Widerstandsfähigkeit herangezogen [7]. In die Untersuchung wurden 3 Betone der Festigkeitsklasse B 35 und der Konsistenz K 3 bei einem angestrebten Luftporengehalt von 5,0 Vol.-% mit einem Zementgehalt von 350 kg/m<sup>3</sup> und einem Wasserzementwert von 0,45 einbezogen. Die Betone unterschieden sich wesentlich nur im Mehlkorngehalt, der rd. 430, 500 und 600 kg/m<sup>3</sup> betrug; davon ausgehend ergaben sich noch geringe Unterschiede bei der Kornzusammensetzung im Sandbereich bis 1 mm, siehe Tafel 2. Während sich bei Verwendung des Sandes 0/2 in

Tafel 2 Kornzusammensetzung des Zuschlags

Beton- bezeichnung (Soll- Mehlkorn- gehalt)	Anteil in Gew.-% bis zum Prüfsieb										
	0,09	0,125	0,20	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
430	0,2	0,7	2,4	4,2	16	19	25	31	53	71	100
500	0,4	1,3	4,5	8,2	18	20	25	31	53	71	100
600	3,7	8,4	11,1	13,7	20	22	25	31	53	71	100

Tafel 3 Kennwerte der Betone mit höherem Mehlkorngesamt

Beton- bezeich- nung	w/z- Wert	Zement- gehalt  kg/m <sup>3</sup>	Zusatzmittel		Mehlkorngehalt			Frischbeton		Festbeton nach 28 Tagen		
			LP <sup>1)</sup>  cm <sup>3</sup> /kg Z	FM <sup>1)</sup>  cm <sup>3</sup> /kg Z	≤0,125	≤0,20	≤0,25	Ausbreit- maß  cm	LP- Gehalt  Vol.-%	Roh- dichte  kg/dm <sup>3</sup>	Druck- festig- keit  N/mm <sup>2</sup>	Wasser- eindring- tiefe  cm
					kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>					
430	0,45	347	0,5	—	358	391	423	44	5,0	2,31	41	1,0
500	0,45	348	0,5	—	372	430	493	43	5,0	2,31	41	0,8
600	0,45	349	0,8	12	502	550	599	44	4,8	2,31	41	0,9

1) LP = Luftporenbildner; FM = Fließmittel



der angelieferten Zusammensetzung bei der gewählten Sieblinie des Zuschlags ein Mehlkorngelalt von  $500 \text{ kg/m}^3$  ergab, mußte für die Mehlkorngelalte  $430 \text{ kg/m}^3$  und  $600 \text{ kg/m}^3$  Feinstsand aus dem Sand abgeseibt bzw. Feinstsand dem Sand zugegeben werden. Bei dem Feinstsand handelte es sich um ein nahezu ton- und glimmerfreies Gemisch aus Calcit, Quarz und anderen silicatischen Mineralien (s. a. Abschn. 2.2). Um einen Gesamtluftporengehalt im Frischbeton von rd. 5 Vol.-% einhalten zu können, war beim Beton mit  $600 \text{ kg}$  Mehlkorn eine Erhöhung des Zusatzes an Luftporenbildner von 0,5 auf  $0,8 \text{ cm}^3/\text{kg}$  Zement notwendig. Um bei der Konsistenz ein Ausbreitmaß von 44 cm einhalten zu können, war bei dem Beton mit  $600 \text{ kg}$  Mehlkorn im Gegensatz zu den beiden anderen Betonen eine Fließmittelzugabe von  $12 \text{ cm}^3/\text{kg}$  Zement erforderlich. Die Druckfestigkeit war mit  $41 \text{ N/mm}^2$ , die Wassereindringtiefe mit rd. 1,0 cm bei allen Betonen nahezu gleich. Weitere Angaben zur Zusammensetzung, zu den Frisch- und Festbetoneigenschaften enthält Tafel 3.

Der Gewichtsverlust nach 50 Frosttauwechseln in 3%iger Natriumchloridlösung lag bei zu Beginn der Frosttauwechsel 35 Tage alten Proben bei 0,7 bis 1,2 Gew.-% und bei zu Beginn der Frosttauwechsel 103 Tage alten Proben etwas niedriger, bei 0,4 bis 0,6 Gew.-%, siehe Tafel 4. Bild 6 zeigt die Proben der Versuchsreihe mit 35 Tage altem Beton nach dem Versuch. Obwohl die Ergebnisse solcher Untersuchungen vorsichtig interpretiert werden sollten, kann man doch folgern, daß sich zwischen den Betonen keine nennenswerten Unterschiede ergeben haben und daß alle Ergebnisse sicher unterhalb derjenigen Grenze liegen, bis zu der man Betonen einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand zuschreibt [7]. Die festgestellten Unterschiede müssen Versuchsstreuungen zugeordnet werden [8].

Tafel 4 Gewichtsverlust bei Frost-Taumittel-Versuchen (Eintauchversuch in 3%-NaCl-Lösung)

Betonbezeichnung	Anzahl der FTW	Gewichtsverlust in %	
		Alter bei Prüfbeginn	
		35 Tage	103 Tage
430	10	< 0,1	< 0,1
	20	0,1	0,1
	30	0,2	0,2
	40	0,5	0,2
	50	1,0	0,4
500	10	< 0,1	< 0,1
	20	0,1	0,2
	30	0,2	0,3
	40	0,4	0,3
	50	0,7	0,6
600	10	< 0,1	< 0,1
	20	0,1	0,1
	30	0,2	0,2
	40	0,5	0,2
	50	1,2	0,4



Bild 6 Proben mit unterschiedlichem Mehlkorngelalt nach 50 Frosttauwchseln in 3 %-NaCl-Lösung (oben: 430 kg Mehlkorn/m<sup>3</sup>, Mitte: 500 kg/m<sup>3</sup>, unten: 600 kg/m<sup>3</sup>)

Auch bei dieser Untersuchung wurde dem Einfluß der mineralogischen Zusammensetzung des Mehlkorns nicht nachgegangen. Obwohl die Versuchsergebnisse daher noch nicht verallgemeinert werden können, zeigen sie dennoch, daß ein hoher Mehlkorngelalt bis 600 kg/m<sup>3</sup> den Frost-Tausalz-Widerstand nicht nachteilig beeinflussen muß, wenn entsprechende betontechnologische Maßnahmen ergriffen werden. Das erfordert insbesondere, daß die nachteiligen Auswirkungen des höheren Mehlkorngelaltes auf Luftporengehalt und Konsistenz durch Erhöhung der Luftporenbildnerzugabe und durch Verwendung eines Fließmittels ausgeglichen werden müssen.

Wenn auch die bisher vorliegenden Ergebnisse bei weitem noch nicht alle offenen Fragen zur betontechnologischen Bedeutung des Mehlkorngelaltes beantworten können, so hält es der Verfasser schon allein aufgrund dieser Versuche für nicht gerechtfertigt, über DIN 1045 oder über die ZTV Beton hinausgehende, schärfere Anforderungen an den Mehlkorngelalt zu stellen, wie es in den ZTV-K 80 geschieht, siehe Tafel 1. Die Versuchsergebnisse sollten im Gegenteil Anlaß sein, über eine Herabsetzung des Prüfkorndurchmessers für das Mehlkorn von 0,25 auf 0,125 mm nachzudenken. Ob und gegebenenfalls in welchem Maß in diesem Fall die Richt- bzw. Höchstwerte für den Mehlkorngelalt zu senken wären, müßte noch

Gegenstand entsprechender betontechnischer Versuche und Überlegungen sein.

Während in der Vergangenheit meist solche Untersuchungen und Überlegungen mit dem Ziel angestellt wurden, wie der Beton in seinen technischen Eigenschaften noch besser gestaltet werden könnte, muß aus den eingangs geschilderten Zwängen zur rationellen Rohstoffausnutzung wohl zukünftig das Hauptaugenmerk darauf gerichtet werden, welche technologischen Forderungen zu stellen sind, damit der Beton die gestellten Anforderungen noch sicher erfüllt. Für den Mehlkorngelalt gilt dann: Wie hoch darf der Mehlkorngelalt werden bzw. wie niedrig darf das Größtkorn des Mehlkorns angesetzt werden, ohne daß der Beton für den vorgesehenen Verwendungszweck nachteilig beeinflusst wird.

## **2.4 Folgerungen für Mehlkornregelungen**

Beispielsweise würde eine Erhöhung des Mehlkorngelaltes (bezogen auf den Prüfkorndurchmesser 0,25 mm) um durchschnittlich 100 kg/m<sup>3</sup> Beton, die nach Abklärung der offenen Fragen durchaus im Bereich des Möglichen liegt, bei einer Betonmenge von 100 Millionen m<sup>3</sup> zu einer Verringerung des bei der Zuschlagherstellung anfallenden Feinsandes um rd. 10 Millionen Tonnen führen.

In diesem Zusammenhang sollte auch bedacht werden, daß in der betontechnologischen Kenngröße Mehlkorngelalt der Zement, der Feinsand aus dem Zuschlag und die Betonzusatzstoffe zusammengefaßt sind. Eine Erhöhung der in DIN 1045 [2] genannten Mindestzementgelalte, wie sie zur Hebung der Dauerhaftigkeit des Betons empfehlenswert ist [9], würde bei gleichbleibendem Mehlkorngelalt eine möglichst vollständige Ausnutzung der natürlichen Zuschlagvorkommen ohne Veränderung der Mehlkornfestlegungen erschweren.

Auch bei einer maßvollen Erhöhung des Mehlkorngelaltes bzw. einer Senkung des Prüfkorndurchmessers für das Mehlkorn muß der Gesamtbetrag auf Zement, Feinsand und Betonzusatzstoff aufgeteilt werden. Bei der Aufteilung muß natürlich der für die Dauerhaftigkeit des Betons für notwendig erachtete Mindestzementgelalt den Vorrang haben, jedoch sollte der Aspekt nicht verkannt werden, daß Zemente mit einem größeren Anteil an puzzolanischen Stoffen oder der intensive Gebrauch solcher Stoffe als Betonzusatzstoff die Mehlkornbilanz belasten können. Auch aus dieser Blickrichtung scheint ein Überdenken der bisherigen Mehlkornregelungen dringend geboten.

## **3. Zur Verwendbarkeit von Sand bis 2 mm**

### **3.1 Allgemeine Bedeutung der Sieblinien**

Anforderungen an die Kornzusammensetzung des Zuschlags und damit auch des Sandes enthalten verschiedene Vorschriften und Bestimmungen; die größte Bedeutung hiervon haben die sogenannten Regelsieblinien der DIN 1045 erreicht. Die Regelsieblinien nach DIN 1045 für das Größtkorn 32 mm zeigt beispielhaft Bild 7. Der Bereich zwischen den Sieblinien A und B wird für die Betonherstel-

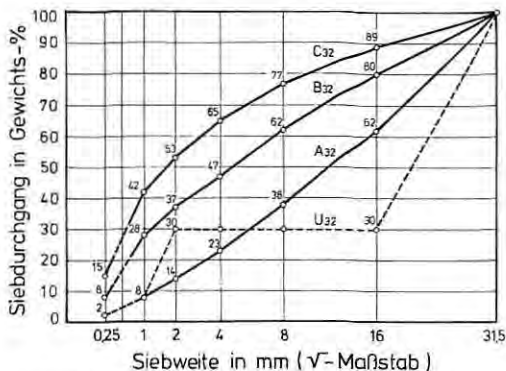


Bild 7 Regelsieblinie nach DIN 1045 für das Größtkorn 32 mm

lung als günstig, der Bereich zwischen den Sieblinien B und C als noch brauchbar und der Bereich oberhalb der Sieblinie C als zu sandreich angesehen.

Die in DIN 1045 ausgedrückte Bevorzugung der sandärmeren Kornzusammensetzung geht zum Teil auf Forschungen und Überlegungen in den dreißiger Jahren zurück, in denen Betone vorwiegend unter dem Aspekt des gleichen Mischungsverhältnisses Zement zu Zuschlag und gleicher Konsistenz betrachtet wurden. In diesem Fall ergeben sandärmere Mischungen wegen ihrer geringen spezifischen Oberfläche deutlich höhere Festigkeiten als sandreichere Mischungen. Wird die Festigkeit bei Sieblinie A 32 gleich 100 % gesetzt, so kann man bei üblichem Mischungsverhältnis nach Hummel [10] bei der Sieblinie B 32 mit rd. 80 % und bei Sieblinie C 32 mit rd. 40 % der Festigkeit bei Sieblinie A 32 rechnen. Dieser Sachverhalt führte sogar dazu, den einzelnen Kornzusammensetzungen einen Festigkeitsbildungswert zuzuordnen und bei der Betonherstellung nach einer Idealsieblinie zu streben. Als Idealsieblinien wurden lange Zeit die sog. Fullerkurven angesehen; ihre allgemeine Formel lautet:

$$A = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^n$$

Hierin bedeuten:

- A = Anteil bis d in Gew.-%
- d = Korndurchmesser in mm
- D = Größtkorn in mm
- n = Exponent

Von den möglichen Fullerkurven wurde insbesondere die sog. Fullerparabel mit dem Exponenten  $n = 0,5$  als günstig angesehen. Die Fullerparabel, die ungefähr in der Mitte des Sieblinienbereiches A/B liegt, ergibt bei einem Größtkorn von 32 mm für den Sandanteil (Anteil bis 4 mm) etwa 36 %; d. h. eine optimale Kornzusammensetzung ergibt sich bei etwa 40 % Sand und etwa 60 % Kies. Die Natur liefert jedoch über die Bundesrepublik gemittelt etwa 60 % Sand und 40 % Kies, so daß die vornehmliche Anwendung von Kornzusammenset-

zungen im günstigen Bereich zumindestens in einem Teil der Bundesrepublik zwangsläufig zu einem nennenswerten Überschuß an Sand führen muß.

### 3.2 Beton mit höherem Sandanteil

Mit der Betrachtung des Betons aus dem Blickwinkel des Wasserzementwertes und des Verhaltens als Zweistoffsystem aus Zementstein und Zuschlag wurde die Bedeutung der Sieblinien im größeren Bereich gemindert.

Betrachtet man einen Beton der heute am meisten produzierten Festigkeitsklasse B 25 der Konsistenz K 3 mit einem Zementgehalt von 300 kg/m<sup>3</sup> PZ 35 F und einem Wasserzementwert von 0,58, so hat solch ein Beton bei der Sieblinie A/B 32 – also einer sandärmeren Kornzusammensetzung im günstigen Bereich – für die Konsistenz K 3 einen Wasserbedarf von 175 l/m<sup>3</sup>. Bei dieser Sieblinie beträgt der Anteil bis 2 mm 26 Gew.-%, das bedeutet für einen Zuschlaggehalt von etwa 1890 kg/m<sup>3</sup> einen Anteil bis 2 mm von rd. 490 kg/m<sup>3</sup>. Beim Übergang auf die Sieblinie B/C 32 erhöht sich der Anteil bis 2 mm von 26 auf rd. 40 Gew.-% bzw. von 490 kg/m<sup>3</sup> auf im Mittel etwa 760 kg/m<sup>3</sup>, was eine Steigerung von etwa 50 % bedeutet. Um die Konsistenz bei gleichem Wasserzementwert im Ausbreitmaß konstant zu halten, ist entweder ein höherer Zementgehalt oder bei gleichem Zementgehalt eine Verflüssigung durch geeignete Zusätze notwendig.

Letztgenannter Möglichkeit wurde in einigen Tastversuchen nachgegangen, da ein höherer Zementgehalt in solchem Fall eine seit langem bewährte Maßnahme darstellt. Im Vergleich zum Ausgangsbeton mit der Sieblinie A/B 32 wurden drei Mischungen mit der Sieblinie B/C 32 untersucht. Der verwendete Sand 0/2 enthielt im Feinbereich bis 0,25 mm relativ wenig Anteile. Aus diesem Grunde wurde er – um bei der Kornzusammensetzung des Zuschlags der Sieblinie B/C 32 möglichst nahe zu kommen – mit Feinanteilen angereichert, erstens mit einem Gesteinsmehl aus Kalkstein, zweitens mit einem bei der Zuschlagherstellung abfallenden Feinsand, der beim 0,25-mm-Sieb einen Durchgang von rd. 50 % aufwies, und drittens mit einem Feinsand-Flugasche-Gemisch aus  $\frac{2}{3}$  des oben beschriebenen Feinsandes und  $\frac{1}{3}$  Flugasche mit Prüfzeichen. Zur Verflüssigung auf das Ausbreitmaß von etwa 43 cm wurde bei allen drei Betonen ein Verflüssiger auf der Basis von Naphthalinderivat verwendet. Der Verbrauch an Verflüssiger war unterschiedlich. Bei der Mischung mit dem Gesteinsmehl betrug er 18 g/kg Zement bzw. 5,5 l/m<sup>3</sup> Beton, bei der Mischung mit dem Feinsand betrug er 25 g/kg Zement bzw. 7,5 l/m<sup>3</sup> Beton, bei der Mischung mit dem Feinsand-Flugasche-Gemisch lag er mit 15 g/kg Zement bzw. 4,5 l/m<sup>3</sup> Beton erwartungsgemäß niedriger, da hier ein Teil der Verflüssigung von der Flugasche bewirkt wurde. Aus versuchstechnischen Gründen wurde das Zugabewasser nicht um den Wasseranteil des Zusatzmittels verringert, so daß sich der Wasserzementwert geringfügig auf 0,59 bis 0,60 erhöhte.

Die Zusammenstellung der Betonteigenschaften in Tafel 5 zeigt, daß sandreichere Betone mit der Sieblinie B/C 32 in etwa gleiche Frisch- und Festbetoneigenschaften aufweisen können wie vergleichbare

Tafel 5 Kennwerte der Betone mit höherem Sandanteil

Beton- bezeich- nung	w/z- Wert	Zement- gehalt  kg/m <sup>3</sup>	Fließ- mittel  cm <sup>3</sup> /kg Z	Zuschlaganteil bis 2 mm  kg/m <sup>3</sup>	Ausbreit- maß  cm	Festbeton- rohdichte  kg/dm <sup>3</sup>	Druck- festig- keit N/mm <sup>2</sup>	Wasser- eindring- tiefe cm
A/B 32	0,58	300	—	490	43	2,36	44	2,7
B/C 32 G <sup>1)</sup>	0,58	296	18	735	44	2,33	45	1,8
B/C 32 F <sup>2)</sup>	0,58	294	25	775	44	2,31	33	6,7
B/C 32 FA <sup>3)</sup>	0,58	297	15	755	42	2,34	49	1,6

1) Sand 0/2 mm mit Gesteinsmehl

2) Sand 0/2 mm mit Feinsand

3) Sand 0/2 mm mit Feinsand und Flugasche

sandärmere Betone. Die beim sandärmeren Beton mit  $44 \text{ N/mm}^2$  höher als nach dem Wasserzementwertgesetz [11] zu erwartende Druckfestigkeit ist auf eine an der oberen zulässigen Grenze liegende Zementnormfestigkeit zurückzuführen. Von den untersuchten sandreicheren Betonen wies allerdings der Beton, dessen Sand nur mit Feinsand angereichert war, mit  $33 \text{ N/mm}^2$  eine deutlich niedrigere Festigkeit und mit  $6,7 \text{ cm}$  eine deutlich höhere Wassereindringtiefe als die übrigen sandreichen Betone auf. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich vor allem in dem feinstsandarmen Kornaufbau des Feinsandes begründet. Obwohl der Kornaufbau von Feinsand zu Feinsand je nach Zuschlagvorkommen verschieden sein dürfte, zeigt der Tastversuch doch schon, daß bei sandreicherem Beton dem Kornaufbau des Sandes eine noch bedeutendere Rolle zukommt als bei sandarmem Beton und daß bei Verwendung von bei der Zuschlagaufbereitung abfallendem Feinsand eingehende Eignungsprüfungen notwendig sind. Bei einem an mehlfeinen Stoffen nicht so armen Sand  $0/2 \text{ mm}$  dürfte die Raumauffüllung und daher die Verdichtbarkeit besser sein und damit ein Festigkeitsabfall und eine hohe Wassereindringtiefe – wie bei dem untersuchten Beton – in der Regel nicht auftreten. Treten sie dennoch auf, so kann – wie die Versuchsergebnisse zeigen – durch Betonzusatzstoffe wie Gesteinsmehl und Flugasche der negative Einfluß abgebaut werden. Insgesamt kann man folgern, daß Beton heute – sandärmer oder sandreicher – bei Anwendung betontechnologischer Erkenntnisse in den Frisch- und Festbetoneigenschaften so herstellbar ist, daß er für normale Anwendungsgebiete gleich bewertet werden kann.

### 3.3 Bedeutung der Betonfestigkeitsklasse

Den Überlegungen in Abschnitt 3.2 lagen Betone gleicher Festigkeit und gleicher Konsistenz zugrunde. Betone niedriger Festigkeit und steiferer Konsistenz dürften wirtschaftlicher herzustellen sein. Auf eine für den Einbau günstige Konsistenz – wie sie die Konsistenz K 3 darstellt – wird wohl heute kaum verzichtet werden, so daß nachfolgend die Möglichkeit einer niedrigeren Betonfestigkeit diskutiert wird.

Bis zum Erscheinen der neuen DIN 1045 im Jahre 1972 wurden etwa 45 % des Transportbetons als B 225, 26 % als B 300 und 16 % als B 160 ausgeliefert. Nach der Umstellung – die Zahlen beziehen sich auf das Jahr 1979 – werden 58 % als B 25, 20 % als B 15 und 8 % als B 35 ausgeliefert [12]. In erster Näherung besagen diese Zahlen, daß an die Stelle des B 225 (gemessen in  $\text{kp/cm}^2$ ) der B 25 (gemessen in  $\text{N/mm}^2$ ) getreten ist, was beim ersten Blick auf eine geringe Anhebung der Festigkeit hindeutet und daher eine für die Dauerhaftigkeit des Betons nützliche Tatsache wäre.

Betrachtet man die Festigkeitsklassen im Hinblick auf ihren statistischen Hintergrund anhand der Mindestwerte für die 5%-Fraktile oder den Mittelwert der Dreierstichprobe (siehe Tafel 6), so zeigt sich, daß dem alten B 225 der neue B 15 näher kommt als der neue B 25. Daß in der Praxis der Übergang vom B 225 auf den B 25 statt auf den B 15 erfolgt ist, liegt wohl zum einen an der zahlenmäßigen Nähe der namengebenden Zahlen 225 und ursprünglich 250 und zum anderen daran, daß man keinen Beton unterhalb des B 225 ver-



Tafel 6 Statistische Kennwerte der Betonfestigkeitsklassen

Betonfestigkeitsklasse	5 %-Fraktile Mindestwert		Dreierstichprobe Mindestmittelwert	
	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%
B 225	≈ 18	100	≧ 22,5	100
B 15	15	83	≧ 20	89
B 25	25	139	≧ 30	133
B 20	20	111	≧ 25	111

wenden wollte, zumal der B 160 sich nicht voll für bewehrten Beton geeignet hat. Berücksichtigt man, daß Bauwerke aus B 225 bei sachgemäßer Herstellung und Zusammensetzung durchaus dauerhaft sind, so scheint die eingetretene Erhöhung bei der Nennfestigkeit um knapp 40 % nicht zu begründen zu sein und im Zeitalter knapper werdender Rohstoffe vielleicht sogar schon Verschwendung. Eine Festigkeitsklasse für Stahlbeton, die nicht unterhalb des alten B 225 liegt und sich gut in die Reihe der jetzigen Festigkeitsklassen einfügt, wäre eine Festigkeitsklasse B 20, die mit 20 N/mm<sup>2</sup> bei der 5 %-Fraktile und mit 25 N/mm<sup>2</sup> bei dem erforderlichen Wert der Dreierstichprobe um etwa 10 % über dem B 225 läge, was sicherlich im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit wünschenswert wäre, zumal sich die Korrelation Festigkeit zu Dauerhaftigkeit in der jüngsten Vergangenheit etwas zu ungunsten der Dauerhaftigkeit verschoben zu haben scheint.

Eine solche Festigkeitsklasse würde auch mit den CEB/FIP-Richtlinien für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton von 1978 im Einklang stehen, die bezogen auf die Zylinderdruckfestigkeit als untere Grenze für Stahlbeton die Festigkeitsklasse C 16 angibt [13].

Berücksichtigt man die unterschiedlichen Prüfbedingungen, vor allem den Prüfkörpereinfluß – Zylinder 15/30 gegenüber 20-cm-Würfel – mit dem Faktor 1,25, so entspricht diese Festigkeitsklasse nach deutschen Maßstäben einem B 20. Die Festigkeitsklasse B 20 bietet gegenüber der Festigkeitsklasse B 25 in bezug auf die Anwendung von sandreichen Mischungen den Vorteil, daß nur ein Teil des höheren Wasseranspruches durch verflüssigende Zusatzmittel oder eine erhöhte Zementzugabe zu kompensieren wäre. Die gegenüber dem B 25 geringere Druckfestigkeit dürfte bei üblichen Konstruktionen des Hochbaus, wo die Druckfestigkeit des Betons in biegebeanspruchten Bauteilen sowieso meist nicht ausgenutzt wird, nur zu einem unerheblichen Mehrverbrauch an Bewehrungsstahl führen, so daß in erster Näherung hier nur der Beton zu betrachten wäre. Wird aus Gründen der Dauerhaftigkeit der Zementgehalt konstant bei 300 kg/m<sup>3</sup> gehalten, so kann der Wasserzementwert bis auf 0,65 erhöht werden, wenn auch beim B 20 bei der Eignungsprüfung ein Vorhaltemaß von 10 N/mm<sup>2</sup> angestrebt wird. Diesem Wasserzementwert entspricht bei dem gewählten Zementgehalt ein Wassergehalt von 195 l/m<sup>3</sup>. Der Wasserbedarf für den Zuschlag der Sieblinie B/C 32 beträgt für die Konsistenz K 3 jedoch etwa 205 l/m<sup>3</sup>. Dieser Mehrbedarf kann durch ein betonverflüssigendes Zusatzmittel abgedeckt werden. Soll bei Außenbauteilen wegen der Dauerhaftigkeit der Wasserzementwert 0,65 bei der Ausführung nicht überschreiten, so empfiehlt sich ein geringfügig erhöhter Zementgehalt [9].



#### 4. Zusammenfassung

Aus den Betrachtungen zum Mehlkorn und zu sandreicheren Betonmischungen läßt sich Nachstehendes folgern:

4.1 Die Rohstoffsituation der Bundesrepublik Deutschland erfordert es, die betontechnologischen Festlegungen dahingehend zu überprüfen, ob sie der Forderung nach optimaler Verwertung der uns zur Verfügung stehenden Reserven ausreichend Rechnung tragen.

4.2 Zukünftig wird es wegen der Ergiebigkeit und der Verfügbarkeit der Lagerstätten zunehmend schwieriger sein, die zur Betonherstellung erforderlichen Mengen an Zuschlag, insbesondere die Menge von etwa 200 Mill. Tonnen an natürlich vorkommendem Kies und Sand zur Verfügung zu stellen. Zur Zeit können im Jahr etwa 25 Mill. Tonnen Feinsand bis 0,8 mm und 15 Mill. Tonnen Sand bis 2 mm aus aufgeschlossenen Vorkommen nicht verwendet werden.

4.3 Die aufgeschlossenen Zuschlagvorkommen sollten möglichst vollständig ausgenutzt werden. Dem stehen jedoch die Begrenzung des Mehlkorngehaltes und die Bevorzugung sandärmerer Korng Zusammensetzungen in verschiedenen Vorschriften und Bestimmungen entgegen.

4.4 Versuche zur Schrumpfrißbildung und zum Frost-Taumittel-Widerstand deuten an, daß die Festlegungen des Mehlkorngehaltes hinsichtlich Menge und Prüfkorngröße im Hinblick auf die bessere Ausnutzbarkeit von Zuschlagvorkommen neu überdacht werden sollten. Falls auch weitergehende Untersuchungen die jetzigen Mehlkornregelungen als zu scharf ausweisen, sollte der Prüfkorn-durchmesser auf 0,125 mm statt wie bisher auf 0,25 mm festgesetzt werden.

4.5 Versuche zum Vergleich sandärmerer und sandreicherer Betonmischungen zeigten, daß der höhere Wasseranspruch und damit der Einfluß sandreicherer Zuschlags auf Konsistenz und Festigkeit durch einen höheren Zementgehalt und/oder durch verflüssigende Zusätze weitgehend abgebaut werden kann. Eine Festigkeitsklasse „B 20“ könnte die Anwendung sandreicher Betone fördern.

4.6 Die praktische Anwendung betontechnologischer Erkenntnisse und Möglichkeiten können zur besseren Ausnutzbarkeit der Zuschlagvorkommen und damit zur Sicherstellung eines ausreichenden Zuschlagangebots für die Betonherstellung nennenswert beitragen.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Wesche, K., und R. Schulz: Beton aus aufbereitetem Altbeton – Technologie und Eigenschaften. beton 32 (1982) H. 2, S. 64/67, und H. 3, S. 108/112; ebenso Betontechnische Berichte 1982/83, Beton-Verlag, Düsseldorf 1984, S. 17/40.
- [2] DIN 1045 Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung (Ausgabe Dezember 1978).
- [3] ZTV Beton 78. Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

- [4] ZTV-K 80. Zusätzliche Technische Vorschriften für Kunstbauten. Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund.
- [5] Wischers, G., und W. Manns: Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton. beton 23 (1973) H. 4, S. 167/171, und H. 5, S. 222/228; ebenso Betontechnische Berichte 1973, Beton-Verlag, Düsseldorf 1974, S. 91/127.
- [6] Manns, W., und K. Zeus: Zum Einfluß von Zusatzmitteln auf die Entstehung sogenannter Schrumpfrisse. beton 29 (1979) H. 2, S. 63/66, und H. 3, S. 96/99; ebenso Betontechnische Berichte 1979, Beton-Verlag, Düsseldorf 1980, S. 13/28.
- [7] Bonzel, J., und E. Siebel: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. beton 27 (1977) H. 4, S. 153/158, H. 5, S. 205/221, und H. 6. S. 237/244; ebenso Betontechnische Berichte 1977, Beton-Verlag, Düsseldorf 1978, S. 55/104.
- [8] Frey, H., E. Siebel und H. Werse: Vergleich zweier Verfahren zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton. beton 31 (1981) H. 5, S. 185/188.
- [9] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: Empfehlungen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton. beton 32 (1982) H. 2, S. 58.
- [10] Hummel, A.: Das Beton-ABC. 12. Auflage. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1959.
- [11] Waiz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045. 2. Auflage. Beton-Verlag, Düsseldorf 1972.
- [12] Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie: Persönliche Mitteilung (unveröffentlicht).
- [13] CEB/FIP – Mustervorschrift für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton. 3. Ausgabe 1978. Vertrieb: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton.