

Zusammensetzung und Eigenschaften von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel

Von Justus Bonzel und Eberhard Siebel, Düsseldorf

Übersicht

Seit Einführung der Fließbeton-Richtlinien wurden umfangreiche Erfahrungen mit der Herstellung und Anwendung von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel gesammelt, durch die nun eine Überarbeitung der Richtlinien veranlaßt wurde. Um einen weiteren Aufschluß über einige inzwischen aufgetretene Fragen zu bekommen, wurden dazu im Forschungsinstitut der Zementindustrie in den Jahren 1975 bis 1982 mit finanzieller Unterstützung durch die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) umfangreiche Untersuchungen an leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel durchgeführt. Sie erstreckten sich zunächst auf die Optimierung von Betonzusammensetzung und Frischbetonverhalten. Weiterhin wurde eingehend untersucht, ob der erhärtete Beton mit Fließmittel dieselben Gebrauchseigenschaften wie der Beton ohne Fließmittel aufweist. Hierzu wurden die Druckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit, der Elastizitätsmodul, die Wasserundurchlässigkeit, das Kriechen und das Schwinden der Betone mit und ohne Fließmittel verglichen. Die Festigkeiten, die Wasserundurchlässigkeit und das Schwinden der leicht verarbeitbaren Betone mit Fließmittel und der Ausgangsbetone unterschieden sich praktisch nicht. Bei einigen Betonen mit Fließmittel war der E-Modul etwas kleiner und das Kriechen etwas größer als beim Ausgangsbeton.

1. Allgemeines

Unter leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel wird Beton verstanden, der ein gutes Zusammenhaltevermögen aufweist und der in der Regel mit nur sehr geringem Verdichtungsaufwand einzubauen ist. Bei ihm wird die leichte Verarbeitbarkeit durch das nachträgliche Zumischen eines Fließmittels (stark wirkender Betonverflüssiger) zu einem sachgerecht zusammengesetzten Rüttelbeton erreicht.

Derzeit werden in der Bundesrepublik Deutschland vorwiegend folgende drei Arten von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel angewendet:

- a) Fließbeton
- b) leicht verarbeitbarer Beton mit Fließmittel
- c) frühhochfester, leicht verarbeitbarer Beton mit Fließmittel

Fließbeton (a) nach den deutschen Bestimmungen ist ein Beton mit gutem Fließvermögen und gutem Zusammenhaltvermögen und mit einem Ausbreitmaß zwischen 51 und 60 cm. Er wird im Hoch- und Tiefbau angewendet. Bei seiner Herstellung und Verarbeitung über DIN 1045 hinaus zu beachtende Bestimmungen sind in den Fließbeton-Richtlinien [1] festgelegt, die zur Zeit überarbeitet werden.

Der leicht verarbeitbare Beton mit Fließmittel (b) und der frühhochfeste, leicht verarbeitbare Beton mit Fließmittel (c) werden bei der Herstellung von Verkehrsflächen angewendet. Je nach Anwendungsfall liegt bei diesen beiden Betonarten die Frischbetonkonsistenz im weichen und/oder im Fließbeton-Konsistenzbereich. Ihr Ausbreitmaß darf 41 cm nicht unter- und 60 cm nicht überschreiten. Innerhalb dieses Bereichs sind ein Ausbreitmaß zwischen 45 und 55 cm sowie die Einhaltung des gewählten Ausbreitmaßes mit ± 3 cm anzustreben. Der frühhochfeste, leicht verarbeitbare Beton mit Fließmittel muß bestimmte Druckfestigkeitsanforderungen bereits im Alter von 2 Tagen erfüllen [2].

Werden Fließmittel nicht zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons (d. h. nicht zur Herstellung der Betone a), b) oder c)), sondern nur zur Verringerung des Wassergehalts w und des w/z -Wertes eingesetzt, dann ist wie bei der Anwendung normaler Betonverflüssiger vorzugehen und sind bei nachträglichem Zumischen des Fließmittels die Fließbeton-Richtlinien sinngemäß zu beachten.

Allgemein dürfen in der Bundesrepublik Deutschland Fließmittel dem Beton nach DIN 1045 oder den Straßenbauvorschriften [2] nur zugesetzt werden, wenn sie ein Prüfzeichen des Instituts für Bautechnik besitzen und einer Überwachung, bestehend aus Eigen- und Fremdüberwachung, unterliegen. Sie gelten dann für die Anwendung grundsätzlich als wirksam und unschädlich; die Eignung im einzelnen Anwendungsfall muß durch entsprechende Eignungsprüfungen nachgewiesen werden [1, 3].

2. Stand der Erkenntnisse

Den Stand der Erkenntnisse über Beton mit Fließmittel geben zahlreiche Anwendungsbeispiele und zahlreiche Veröffentlichungen wieder, die teilweise über Untersuchungen und Anwendungen vorwiegend im allgemeinen Bauwesen [4 bis 37] und teilweise über Untersuchungen und Anwendungen vorwiegend im Straßenbau [38 bis 53] berichten.

Im folgenden wird nur der mit Hilfe eines Fließmittels leicht verarbeitbar gemachte Beton behandelt – d. h. der Fließbeton (a), der leicht verarbeitbare Beton mit Fließmittel (b) und der frühhochfeste, leicht verarbeitbare Beton mit Fließmittel (c) –, nicht jedoch der Beton, bei dem das Fließmittel ausschließlich zur Wassereinsparung eingesetzt wird und der, abgesehen von der ggf. nachträglichen Zugabe des Fließmittels, DIN 1045 entspricht.

Fließmittel können unterschiedlich zusammengesetzt sein und unterschiedliche Hauptbestandteile enthalten. Im allgemeinen werden als Hauptbestandteile Stoffe auf der Basis von

- a) Melaminsulfonat,
- b) Naphthalinsulfonat,
- c) Ligninsulfonat oder
- d) Kohlehydraten oder organischen Säuren

verwendet. Fließmittel gibt es in flüssiger und in pulverförmiger Form. In der Bundesrepublik Deutschland besitzen zur Zeit jedoch nur flüssige Fließmittel ein Prüfzeichen des Instituts für Bautechnik.

Um einen Aufschluß über die Wirkungsweise der Fließmittel zu erhalten, wurden orientierende Untersuchungen über den Einfluß der Fließmittel auf Wasser, Zementleim und Frischbeton durchgeführt. Alle Fließmittel bewirken zunächst eine Änderung der Oberflächeneigenschaften der Zementkörner, die eine bessere Dispergierung zur Folge hat. Es wird zum Teil angenommen, daß die Änderung der Oberflächeneigenschaften durch eine Adsorption der Fließmittel an den Zementkörnern zustandekommt und daß die verflüssigende Wirkung bei zunehmender chemischer Bindung zwischen Fließmittel und Zement wieder abnimmt. Welche Rolle dabei die auf den Zementkörnern entstandenen schwerlöslichen organischen Calciumverbindungen spielen, ist noch nicht geklärt. Fließmittel auf der Basis von Ligninsulfonat oder von Kohlehydraten und organischen Säuren setzten die Oberflächenspannung des Wassers deutlich herab und führten dadurch zu einer besseren Benetzbarkeit der Zementkörner mit Wasser [10, 21, 23, 35, 36, 56, 57].

Wie andere Betonzusatzmittel können auch Fließmittel Nebenwirkungen haben. Während Fließmittel auf der Basis von Melaminsulfonat oder von Naphthalinsulfonat das Erstarren von Zement praktisch nicht beeinflussen, konnten andere Fließmittel das Erstarren und das Erhärten unterschiedlich stark verlängern. Gegen die gleichzeitige Verwendung eines verzögernd wirkenden Fließmittels mit einem Verzögerer wurden wegen der dadurch möglicherweise vergrößerten Gefahr eines Frühanstehens in der Vergangenheit Bedenken laut, die aber entfallen dürften, wenn bei Verwendung eines Verzögerers die in Kürze herauskommende Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitungszeit (verzögerter Beton) beachtet wird. – Da Fließmittel eine Luftporenbildung zur Folge haben können, wird ihnen meist ein Entschäumungsmittel zugegeben, was möglicherweise die Entstehung von Luftporen im Frischbeton bei Zugabe von Luftporenbildnern beeinflussen kann. Daher muß bei leicht verarbeitbarem Luftporenbeton mit Fließmittel – d. h. bei gleichzeitiger Anwendung von Luftporenbildner und Fließmittel – vor Verwendung im Rahmen einer Wirksamkeitsprüfung nachgewiesen worden sein, daß der damit hergestellte Luftporenbeton einen ausreichenden Gehalt an Mikroluftporen aufweist [2, 10].

Die Viskosität von Zementleim wurde durch die Zugabe eines Fließmittels je nach Fließmittel unterschiedlich stark herabgesetzt. Ein eindeutiger Einfluß der Fließmittelart konnte dabei jedoch nicht festgestellt werden. Das Absetzen (Wasserabsondern) von Zementleim mit Fließmittel war zwar etwas größer als beim sonst gleichen Zementleim ohne Fließmittel, aber stets kleiner als beim Zementleim ohne Fließmittel, der aufgrund eines etwas größeren Wassergehalts gleiche Viskosität aufwies wie der Zementleim mit Fließmittel. Das Gesamtabsetzmaß war bei Zementleim mit einem verzögernd wir-

kenden Fließmittel in der Regel am größten, weil die Fließfähigkeit dieser Leime länger erhalten blieb. Die an den Zementleimen gewonnenen Versuchsergebnisse sind jedoch nicht einfach auf den Beton übertragbar [10, 35].

Die Frischbetonverarbeitbarkeit kann durch die Zugabe eines Fließmittels wesentlich verbessert werden. Die dafür erforderliche Zugabemenge des Fließmittels ist von der Konzentration des Fließmittels, von den Ausgangsstoffen, von Zusammensetzung, Konsistenz und Temperatur des Ausgangsbetons sowie von der angestrebten Verbesserung der Verarbeitbarkeit abhängig. Der Einfluß des Zements soll bei Fließmittel auf der Basis von Ligninsulfonat oder von Kohlehydraten und organischen Säuren ausgeprägter sein als bei Fließmittel auf der Basis von Melaminsulfonat oder von Naphthalinsulfonat.

Bei orientierenden Versuchen mit verschiedenen Zementen war für eine bestimmte Konsistenz eine unterschiedliche Fließmittelmenge erforderlich. Inwieweit hierbei die Zementart, die Granulometrie der Zemente oder andere Einflüsse von Bedeutung waren, ist bisher noch nicht geklärt.

Die Fließmittelmenge liegt für leicht verarbeitbaren Beton mit Fließmittel etwa zwischen 8 und 20 cm³ je kg Zement und für leicht verarbeitbaren, frühhochfesten Beton mit Fließmittel etwa zwischen 20 und 40 cm³ je kg Zement. Über einen allgemeingültigen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Basis des Fließmittels und der Größe der Verbesserung der Verarbeitbarkeit wurde bisher nicht berichtet.

Für die Herstellung eines sachgerechten Fließbetons soll der Ausgangsbeton (Frischbeton) gut zusammenhängend, nicht zu zäh und nicht wesentlich wasserabsondernd sein. Das Ausbreitmaß des Ausgangsbetons soll nach den bestehenden Vorschriften [1, 2] für Fließbeton (a) etwa zwischen 38 und 42 cm und für frühhochfesten, leicht verarbeitbaren Beton mit Fließmittel (c) etwa zwischen 25 und 33 cm (Verdichtungsmaß etwa zwischen 1,20 und 1,40) liegen und für leicht verarbeitbaren Beton mit Fließmittel (b) 40 cm nicht überschreiten.

Für Beton mit Fließmittel können alle Zemente verwendet werden, für frühhochfesten Beton mit Fließmittel für Verkehrsflächen ist Zement höherer Anfangsfestigkeit wie Z 45 F zweckmäßig. Bei sehr fein gemahlene Zementen und bei sehr hohen Zement- und Mehlkorngelalten kann ein sehr zäher Ausgangsbeton entstehen, der sich mit einem Fließmittel nur schwer verflüssigen läßt. Nach bisherigen Erfahrungen sollte für Fließbeton (a) und für leicht verarbeitbaren Beton mit Fließmittel (b) der Zementgehalt zwischen 300 und 350 kg/m³ und der Mehlkorngelhalt etwa zwischen 360 und 450 kg/m³ liegen; für frühhochfesten, leicht verarbeitbaren Beton mit Fließmittel (c) ist etwa ein Zementgehalt zwischen 360 und 400 kg/m³ und ein Mehlkorngelhalt etwa zwischen 400 und 500 kg/m³ zweckmäßig. Die Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches sollte nicht zu sandreich und nicht zu grobkörnig sein. Bewährt hat sich eine Kornzusammensetzung in der oberen Hälfte des Sieblinienbereichs A/B der DIN 1045, allerdings ist auch die Verwendung noch sandreicherer Zuschlaggemische möglich. Als Zuschlag ist in der Bundesrepublik Deutschland in der Regel Normalzuschlag nach

DIN 4226 Teil 1 verwendet worden. Die verflüssigende Wirkung ist unter sonst gleichen Verhältnissen bei Kiessandbeton im allgemeinen etwas ausgeprägter als bei Beton mit gebrochenem Zuschlag, so daß letzterer meist einen etwas größeren Feinmörtelgehalt benötigt. Bei Verwendung von dafür geeignetem Schwer- oder Leichtzuschlag müssen zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung von Entmischungen vorgesehen werden, jedoch liegen dazu keine ausreichenden Erfahrungen und Untersuchungsergebnisse vor [1, 2, 10, 13, 15, 25, 29, 35]. Ob oder inwieweit ein Stabilisierer zur Verbesserung des Zusammenhaltevermögens von Fließbeton mit Leichtzuschlag beitragen kann [54], wurde noch nicht hinreichend untersucht.

Bei bisherigen Untersuchungen war die verflüssigende Wirkung der Fließmittel bei nachträglichem Zumischen meist etwas größer als bei Zugabe mit den übrigen Betonausgangsstoffen. Da die verflüssigende Wirkung der Fließmittel mit der Zeit zurückgeht und im allgemeinen je nach Fließmittel und Beton nur etwa zwischen 30 und 90 Minuten vorhanden ist, werden die Fließmittel dem Beton in der Regel nachträglich – bei Transportbeton unmittelbar vor Übergabe auf der Baustelle – zugemischt. Bei Fließmittel mit verzögernder Wirkung nimmt die verflüssigende Wirkung des Fließmittels im allgemeinen etwas langsamer ab als bei anderen Fließmitteln. Die verflüssigende Wirkung der Fließmittel ist von der Frischbetontemperatur abhängig und nimmt nach bisherigen Feststellungen mit der Zeit um so stärker ab, je höher die Frischbetontemperatur ist. Mit einer erneuten Zugabe eines Fließmittels nach Rückgang der verflüssigenden Wirkung (Nachdosieren) konnte die angestrebte leichte Verarbeitbarkeit wieder erreicht werden, jedoch wurde bei mehrmaligem Nachdosieren eine etwas geringere Druckfestigkeit festgestellt. Ein sachgerechter Beton mit Fließmittel erfordert bei nachträglichem Zumischen des Fließmittels eine nicht zu kleine Fließmittelmenge sowie ein intensives und ausreichend langes Mischen. Die einschlägigen deutschen Bestimmungen enthalten Angaben über die mindestens erforderliche Mischzeit sowie über die in einem Arbeitsgang mindestens zuzugebende und über die größtzulässige Fließmittelmenge. Auch leicht verarbeitbarer Beton mit Fließmittel benötigt im allgemeinen eine gewisse Verdichtung, wie z. B. durch Stochern oder leichtes Rütteln [1, 2, 10, 22, 29, 35].

Nach bisherigen Feststellungen unterscheiden sich die Druckfestigkeit, die Biegezugfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und die Wasserundurchlässigkeit des Fließbetons (a), des leicht verarbeitbaren Betons mit Fließmittel (b) und des frühhochfesten, leicht verarbeitbaren Betons mit Fließmittel (c) im allgemeinen nicht systematisch von denen des dazugehörigen Ausgangsbetons. Obwohl umfangreiche Untersuchungen dazu noch nicht geführt wurden, kann das im allgemeinen auch für den chemischen Widerstand und für den Frostwiderstand angenommen werden. Lediglich bei Verwendung eines Fließmittels mit verzögernder Wirkung war die Festigkeit der Betone mit Fließmittel (a bis c) in sehr geringem Alter etwas geringer als die des dazugehörigen Ausgangsbetons.

Über den Frost-Tausalz-Widerstand der Betone mit Fließmittel (a bis c) findet man in der Literatur unterschiedliche Angaben. Während in einigen Fällen über einen geringeren Frost-Tausalz-Widerstand der Betone mit Fließmittel (a bis c) und über eine Verschlechterung ihrer

Luftporenkennwerte berichtet worden ist, wurde bei den meisten Untersuchungen für die Betone mit Fließmittel (a bis c) ein ebenso hoher Frost-Tausalz-Widerstand wie für die entsprechenden Luftporenbetone ohne Fließmittel festgestellt, wenn auch die Betone mit Fließmittel einen für hohen Frost-Tausalz-Widerstand ausreichenden Gehalt an Mikroluftporen aufwiesen. Ein Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen ist nur schwer möglich, da die Ausgangsvoraussetzungen, wie z. B. Zugabemenge des Luftporenbildners, Mischzeit und insbesondere Verdichtung der Probekörper, nicht oder nur teilweise in den Veröffentlichungen beschrieben sind [1, 2, 10, 22, 35]. Untersuchungen über Elastizitätsmodul und Schwinden brachten keine signifikanten Unterschiede zwischen den leicht verarbeitbaren Betonen mit Fließmittel (a bis c) und den dazugehörigen Ausgangsbetonen [15, 34, 35].

Orientierende Untersuchungen über das Kriechen führten noch nicht zu einem einheitlichen Bild. Während Brooks, Wainwright und Neville [35] für Betone mit Fließmittel ein deutlich größeres Kriechen und Kasami, Ikeda und Yamane [35] ein etwas vergrößertes Kriechen fanden, ergaben sich bei den Untersuchungen von Ryan und Mann [35] und Klug [34] keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Kriechen von Beton mit und ohne Fließmittel

3. Aufgabe und Ziel der Untersuchungen

Da eine Reihe von Fragen über die Frisch- und Festbetoneigenschaften, insbesondere über das Schwinden und Kriechen von Fließbeton, von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel und von frühhochfestem, leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel einer weiteren Klärung bedürfen, wurden in den Jahren 1975 bis 1980 die im folgenden dargestellten umfangreichen Untersuchungen (Kriech- und Schwindversuche bis 1982) im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführt und dankenswerterweise von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) sehr wesentlich gefördert.

Zur Optimierung der Betonzusammensetzung für ein günstiges Frischbetonverhalten (leichte Verarbeitbarkeit und gutes Zusammenhaltvermögen) wurden der Zementgehalt, der Mehlkorngelalt, die Kornzusammensetzung des Zuschlags sowie Art und Menge des Fließmittels variiert, aber auch der Einfluß der Frischbetontemperatur betrachtet. Insbesondere für die Anwendung im Straßenbau sollten die Untersuchungen auch einen Aufschluß über die Zusammensetzung von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel und von frühhochfestem, leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel sowie einen Anhalt über die Zusammensetzung und das Einbauen von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel bei Bauteilen mit geeigneter, nicht geschalter Oberfläche geben.

Zur weiteren Klärung der Frage, ob oder inwieweit der erhärtete Beton mit Fließmittel keine schlechteren Gebrauchseigenschaften als der Beton ohne Fließmittel aufweist oder zusätzliche Maßnahmen, wie sie z. B. für das Schwinden und Kriechen in den Fließbeton-Richtlinien [1] festgelegt sind, erfordert, wurden Festigkeiten, Festigkeitsverlauf, Wasserundurchlässigkeit, Elastizitätsmodul, Schwinden und Kriechen systematisch untersucht. Die gleichzeitig

durchgeführten Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton mit Fließmittel wurden bereits in [55] veröffentlicht. Die Untersuchungen ergaben, daß Beton mit Fließmittel dann einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand hat, wenn er bei auch sonst sachgerechter Herstellung und Verarbeitung einen ausreichenden Mikroluftporengehalt hat. Neuere Mitteilungen [56], nach denen für Fließbetone die Anforderungen an die Luftporenkennwerte für einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand gesenkt werden könnten, bedürfen jedoch weiterer Bestätigungen.

4. Art, Umfang und Durchführung der Untersuchungen

4.1 Betonausgangsstoffe

In die Untersuchungen wurden drei Zemente (zwei PZ 35 F und ein PZ 45 F) einbezogen. Die Zemente entsprachen DIN 1164, ihre wichtigsten Kennwerte gehen aus Tafel 1 hervor. – Als Zugabewasser wurde Düsseldorfer Leitungswasser verwendet.

Als Zuschlag wurden Rheinkiesand der Korngruppen 0/2 mm, 2/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm aus dem Raume Düsseldorf, Quarzmehl 0/0,25 mm und Quarzsand 1/2 mm aus dem Raume Köln und Basaltspilt der Korngruppen 8/12 mm, 12/18 mm und 18/22 mm aus dem Westerwald verwendet. Der Betonzuschlag entsprach aufgrund der Angaben des Lieferwerks, augenscheinlicher Beurteilung und einiger Prüfungen den Anforderungen von DIN 4226 Teil 1. Die Kornzusammensetzung der bei der Betonherstellung verwendeten Zuschlaggemische geht aus Bild 1 hervor.

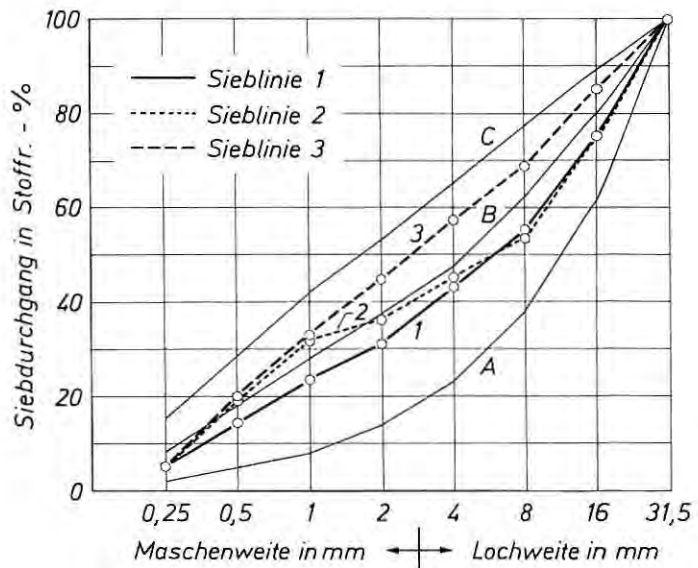


Bild 1 Sieblinien 1 bis 3 der untersuchten Betone

Tafel 1 Zemente

Zement	Art und Festigkeitsklasse	Mahlfeinheit (Blaine) cm ² /g	Erstarrungsbeginn ende		Wasseranspruch Gew.-%	2-Tage-Druckfestigkeit N/mm ²	28-Tage-Druckfestigkeit N/mm ²	Klinkerphasen nach Bogue Gew.-%			
			Stunden					C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1	PZ 35 F Werk A	3050	2,2	3,8	25,0	22	48	58	17	12	6
2	PZ 45 F Werk B	3550	2,8	4,7	30,0	29	50	63	13	12	5
3	PZ 35 F Werk D	3020	2,3	3,5	25,5	24	51	56	18	14	5

Tafel 2 Betonzusatzmittel

Bez.	Betonzusatzmittel (flüssig)	Prüfzeichen des Instituts für Bautechnik als	Vom Hersteller		Vom Hersteller angegebener Gehalt an		Herabsetzung der Oberflächenspannung des Wassers
			angegebene Hauptbestandteile	empfohlene Dosierung cm ³ /kg Zement	Feststoffen Gew.-%	verflüssigenden Wirkstoffen Gew.-%	
A	Fließmittel Werk A	BV mit Zusatz Fließmittel	sulfoniertes Melaminformaldehydkondensat	15	20	20	sehr gering
B	Fließmittel Werk B	BV mit Zusatz Fließmittel	sulfoniertes Melaminformaldehydkondensat	16	20	20	sehr gering
C	Fließmittel Werk C	BV mit Zusatz Fließmittel	sulfoniertes Melaminformaldehydkondensat	15	20	20	sehr gering
D	Fließmittel Werk D	—	Naphthalin-sulfonatformaldehydkondensat	7 bis 8	— ¹⁾	—	sehr gering

¹⁾ nach orientierender Bestimmung > 40 Gew.-%

Tafel 2 Betonzusatzmittel (Fortsetzung)

Bez.	Betonzusatzmittel (flüssig)	Prüfzeichen des Instituts für Bautechnik als	Vom Hersteller		Vom Hersteller ange- gebener Gehalt an		Herabsetzung der Oberflächen- spannung des Wassers
			angegebene Haupt- bestandteile	empfohlene Dosierung cm ³ /kg Zement	Feststoffen Gew.-%	verflüssi- genden Wirkstoffen Gew.-%	
E	Fließmittel Werk A	—	Ligninsulfonat	10	30	25 bis 26	sehr stark
F	Fließmittel Werk E	BV mit Zusatz Fließmittel	Ligninsulfonat	7	35	35	sehr stark
G	Fließmittel Werk F	BV mit Zusatz Fließmittel	sulfoniertes Amidharz	10 bis 12	30	30	stark
H	Fließmittel Werk G	BV mit Zusatz Fließmittel	Ligninsulfonat aromatische Sulfonsäure- derivate	10 bis 15	23	23	stark
J	Fließmittel Werk C	BV mit Zusatz Fließmittel	Ligninsulfonat sulfoniertes Melaminformal- dehydkondensat	10	15	15	mittel
K	Fließmittel Werk B	—	Ligninsulfonat Naphthalin- sulfonsäure- derivat	15	21	19	mittel
L	Fließmittel Werk F	BV mit Zusatz Fließmittel	Ligninsulfonat Melaminformal- dehydkondensat Aryl-Alcyl-Sulfo- nat	15	18	18	sehr stark
M	Verzögerer Werk C	VZ	Ligninsulfonat	8	33	33	stark
N	Luftporen- bildner Werk H	LP	Vinsol Resin	0,4 bis 0,8	—	—	—

Als Betonzusatzmittel wurden 11 verschiedene Fließmittel, ein als Fließmittel eingesetzter Verzögerer und ein Luftporenbildner in die Untersuchungen einbezogen. Alle Betonzusatzmittel waren flüssig. Weitere Angaben über die Betonzusatzmittel enthält Tafel 2. Soweit bekannt, lagen nach Angaben der Hersteller sowohl der Gehalt der Fließmittel an verflüssigenden Wirkstoffen als auch der an Feststoffen bis auf eine Ausnahme zwischen 15 und 35 Gew.-%. Mit Hilfe eines „Interfacial-Tensiometers K 8600“ (Versuchsdurchführung nach Angabe des Geräteherstellers) wurde der Einfluß der verschiedenen Fließmittel und des als Fließmittel eingesetzten Verzögerers auf die Oberflächenspannung von destilliertem Wasser bestimmt. Die Zugabemenge des Fließmittels entsprach dabei der empfohlenen Zusatzmenge für Beton mit einem Zementgehalt von 300 kg/m³ und einem w/z-Wert von 0,56. Die Ergebnisse gehen ebenfalls aus Tafel 2 hervor.

4.2 Beton

4.2.1 Allgemeines

Die Betonversuche wurden an drei Versuchsserien durchgeführt. Im Rahmen der Versuchsserie 1 wurden der Einfluß der Betonzusammensetzung und der Fließmittel auf die Frischbetoneigenschaften und die wichtigsten Festbetoneigenschaften von Fließbeton (a) und von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel (b) sowie der Einfluß der Frischbetontemperatur auf ihr Frischbetonverhalten untersucht. Im Rahmen der Versuchsserie 2 wurde frühhochfester, leicht verarbeitbarer Beton mit Fließmittel (c) für die Anwendung im Betonstraßenbau auf Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Die Versuche der Serie 3 sollten einen ersten Aufschluß über Zusammensetzung, Frischbetoneigenschaften und Betoniermaßnahmen von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel (b) für Bauteile des Straßenbaus mit geneigter, nicht geschalter Betonoberfläche geben.

4.2.2 Betonzusammensetzung

4.2.2.1 Betone der Versuchsserie 1

Die Zusammensetzung der Betone der Serie 1 (Betone 1.1 bis 1.7) geht aus Tafel 3, Art und Menge der den Betonen 1.1 und 1.6 zugegebenen Zusatzmittel gehen aus Tafel 4 hervor. Die Betone wurden mit einem Portlandzement Z 35 F mittlerer Beschaffenheit (Zement 1 nach Tafel 1) und mit einem Zuschlaggemisch aus Rheinkiessand, Quarzsand und Quarzmehl der Sieblinien 1, 2 und 3 nach Bild 1 hergestellt. Die Betone 1.1 bis 1.3 enthielten 300 kg Zement und rd. 400 kg Mehlkorn je m³ Beton, die Betone 1.4 bis 1.6 350 kg Zement und rd. 400 kg Mehlkorn je m³ Beton. Den Betonen 1.1 bis 1.6 wurde so viel Wasser zugegeben, daß das Ausbreitmaß des Ausgangsbetons zwischen 38 und 41 cm lag. Dadurch ergab sich für die Betone 1.1 bis 1.3 ein w/z-Wert zwischen 0,56 und 0,58 und für die Betone 1.4 bis 1.6 ein w/z-Wert zwischen 0,49 und 0,51. Die dadurch für die

Tafel 3 Betonzusammensetzung der Versuchsserien 1 und 2 (Zusatzmittel siehe Tafel 4)

Versuchs- serie	Beton		Zement		Kiessand Sieblinie nach Bild 1	w/z	Mehlkorn- gehalt kg/m ³
	Bezeich- nung	nach Tafel 1	Gehalt kg/m ³				
1	1.1	1	300		1	0,56	400
	1.2	1	300		2	0,57	400
	1.3	1	300		3	0,58	400
	1.4	1	350		1	0,49	440
	1.5	1	350		2	0,50	440
	1.6	1	350		3	0,51	440
	1.7	1	370		1	0,56	460
2	2.1	2	380		1	0,40	470

Ausgangsbetone 1.1 bis 1.6 festgelegte Zusammensetzung wurde auch bei Herstellung der entsprechenden Betone mit Fließmittel beibehalten. Die Zugabemenge des Fließmittels entsprach in der Regel der vom Hersteller empfohlenen Menge, in einigen Fällen zusätzlich aber auch der 1,5- und der 2fachen empfohlenen Zugabemenge. – Nur zum Vergleich mit den Fließbetonen des Ausgangsbetons 1.1 wurde der Beton 1.7 ohne Zusatzmittel, aber so zementreich ($z = 370 \text{ kg/m}^3$) hergestellt, daß er bei gleichem w/z-Wert von 0,56 und gleichem Zuschlag ein den Fließbetonen ähnliches Ausbreitmaß von 57 cm aufwies.

4.2.2.2 Beton der Versuchsserie 2

Die Zusammensetzung des Betons der Serie 2 (Beton 2.1), die auf die Belange des Betonstraßenbaus abgestimmt wurde, geht ebenfalls aus Tafel 3, Art und Menge der dem Beton 2.1 zugegebenen Betonzusatzmittel (Luftporenbildner und Fließmittel) gehen wiederum aus Tafel 4 hervor. Der Beton wurde mit einem Kiessandgemisch der Sieblinie 1 nach Bild 1 und, da er als frühhochfester, leicht verarbeitbarer Beton mit Fließmittel (c) nach [2] bereits im Alter von 2 Tagen bestimmte Festigkeitsanforderungen erfüllen muß, mit einem Portlandzement Z 45 F mittlerer Beschaffenheit (Zement 2 nach Tafel 1) sowie einem w/z-Wert von 0,40 hergestellt. Für den Ausgangsbeton wurde ein Ausbreitmaß von 30 bis 32 cm angestrebt. Dadurch ergab sich für diesen Beton ein Zementgehalt von 380 kg und ein Mehlkorngehalt von rd. 470 kg je m³ Beton. Zur Erzielung eines für hohen Frost-Tausalz-Widerstand erforderlichen Luftgehalts wurde dem Beton 1 cm³ Luftporenbildner (Betonzusatzmittel N nach Tafel 2) je kg Zement zugegeben. Die dadurch für den Ausgangsbeton festgelegte Zusammensetzung wurde auch bei Herstellung der entsprechenden Betone mit Fließmittel beibehalten. Die Zugabemenge des Fließmittels entsprach der 1,5- bis 2fachen vom Hersteller empfohlenen Menge.

Tafel 4 Frischbetoneigenschaften

Zusatzmittel nach Tafel 2		Zugabe- menge cm ³ /kg	Luft- gehalt Vol.-%	Roh- dichte kg/dm ³	Ausbreitmaß in cm vor nach Zumischen des Fließmittels	Abnahme des Ausbreit- maßes in cm 15 30 45 60 75 90 Minuten nach Zumischen des Fließmittels					
Beton 1.1											
–	–	1,0	2,40	40	–	3	4	3	5	3	5
A	15	0,6	2,40	40	53	1	7	10	12	14	15
B	16	1,1	2,38	38	54	5	10	12	14	15	17
C	15	0,6	2,40	39	55	7	11	11	13	13	18
D	7	1,1	2,38	38	57	3	9	12	10	16	16
E	10	2,0	2,38	38	55	3	3	4	6	6	8
F	7	2,1	2,37	39	57	7	11	15	15	18	17
G	12	0,8	2,39	40	56	3	5	6	4	7	11
H	10	3,2	2,33	38	53	7	8	9	9	11	13
H	15	2,0	2,39	41	58	–	7	–	–	–	–
I	10	2,1	2,37	39	54	4	7	6	13	13	14
K	15	1,2	2,37	38	52	6	9	11	12	14	14
L	15	1,5	2,37	38	56	5	6	6	8	10	12
M	8	2,0	2,37	40	59	9	11	15	17	19	18
Beton 1.2											
–	–	1,1	2,39	38	–	1	1	1	2	1	0
B	16	1,9	2,37	38	49	5	7	11	10	11	10
G	12	2,0	2,35	39	56	3	8	8	10	13	12
Beton 1.3											
–	–	2,7	2,30	41	–	1	3	4	4	4	5
B	16	2,5	2,36	39	43	3	3	3	3	5	7
B	24	1,7	2,36	40	48	7	6	7	8	8	10
B	32	1,3	2,34	41	45	0	1	0	2	6	6
E	10	2,3	2,34	40	40	0	0	0	0	1	2
G	12	4,0	2,30	40	44	4	5	4	4	5	6
G	18	3,9	2,30	38	47	2	6	4	7	6	5
G	24	2,1	2,29	39	46	2	0	0	0	4	2

Zusatzmittel nach Tafel 2	Zugabe- menge cm ³ /kg	Luft- gehalt Vol.-%	Roh- dichte - kg/dm ³	Ausbreitmaß in cm		Abnahme des Ausbreit- maßes in cm					
				vor	nach Zumischen des Fließmittels	15	30	45	60	75	90
Minuten nach Zumischen des Fließmittels											
Beton 1.4											
-	-	1,1	2,40	39	-	3	4	2	4	5	2
A	15	1,5	2,42	43	56	-	4	-	-	-	-
B	16	0,8	2,39	36	57	7	10	12	15	18	19
D	7	1,2	2,38	37	62	5	7	14	16	22	25
G	12	1,5	2,38	39	63	9	11	12	14	12	16
H	10	2,8	2,38	38	51	-	9	-	-	-	-
K	15	1,4	2,37	35	49	4	6	11	10	11	13
L	15	1,5	2,36	37	56	3	5	10	13	15	14
M	8	2,5	2,41	38	56	-	7	-	-	-	-
Beton 1.5											
-	-	1,0	2,40	39	-	2	3	2	2	5	-
B	16	2,5	2,35	39	52	4	9	11	13	14	15
G	12	1,2	2,37	37	54	6	12	11	12	13	15
Beton 1.6											
-	-	1,5	2,38	39	-	0	1	3	2	2	1
B	16	2,7	2,34	37	49	4	9	8	11	11	12
G	12	3,0	2,33	37	54	6	7	8	11	9	11
Beton 1.7											
-	-	2,4	2,39	57	-	5	6	5	7	8	8
Beton 2.1											
N	1	3,8	2,35	32	-	-	-	-	-	-	-
N	1	5,5	2,31	32	62	-	7	-	-	-	-
A	30										
N	1	6,3	2,33	30	59	-	3	-	-	-	-
D	11										
N	1	5,4	2,28	31	55	-	11	-	-	-	-
G	20										

4.2.2.3 *Betone der Versuchsserie 3*

Die Zusammensetzung der Betone der Serie 3 (leicht verarbeitbarer Beton mit Fließmittel für Bauteile des Straußenbaus mit geneigter, nicht geschalter Betonoberfläche) geht aus Tafel 5 hervor. Die Betone wurden mit 350 kg – in einigen Fällen mit 360 kg – Portlandzement Z 35 F (Zement 3 nach Tafel 1) je m³ Beton, mit einem w/z-Wert von 0,45 – in einigen Fällen von 0,40 – und mit einem Zuschlaggemisch nach bzw. annähernd nach Sieblinie 1 (Bild 1) hergestellt, das in den meisten Fällen aus Rheinkies sand 0/32 mm und in einigen Fällen aus Rheinkies sand 0/8 mm und Basaltsplitt 8/22 mm bestand. Zur Herstellung des leicht verarbeitbaren Betons mit Fließmittel mit angestrebten Ausbreitmaßen zwischen 50 und 60 cm wurde diesen Ausgangsbetonen das Fließmittel A (Tafel 2) in Mengen zwischen 10 und 20 cm³ je kg Zement zugegeben.

4.2.3 *Herstellung und Lagerung*

4.2.3.1 *Frischbeton*

Bei Herstellung des Betons der Versuchsserien 1, 2 und 3 wurden die Betonausgangsstoffe (Zement, Zuschlag, Zugabewasser, Luftporenbildner und Fließmittel) gewichtsmäßig zugegeben, der Luftporenbildner mit dem Zugabewasser. Die Ausgangsbetone (Betone ohne Fließmittel) wurden nach Zugabe aller Ausgangsstoffe rd. 2 min je nach herzustellender Betonmenge im 150-l- bzw. 250-l-Tellermischer mit guter Mischwirkung gemischt. Das Fließmittel wurde dem fertiggemischtem Ausgangsbeton stets nachträglich, im 150-l-Tellermischer rd. 3 min und im 250-l-Tellermischer rd. 5 min zuge-mischt.

Die Frischbetontemperatur lag im allgemeinen bei etwa 20 °C. Bei einigen Betonen betrug die Frischbeton- und die Lagerungstemperatur des Frischbetons für die Prüfung der Frischbetoneigenschaften 5, 20 und 30 °C.

4.2.3.2 *Festbetonprüfkörper*

Von den Betonen 1.1 und 1.4 ohne und mit jeweils einem der Zusatzmittel A, D, G, H und M, dem Beton 1.7 (ohne Fließmittel) und dem Beton 2.1 ohne und mit jeweils einem der Fließmittel A, D und G (siehe auch Tafeln 2, 3 und 4) wurden für die Prüfung der Druckfestigkeit 20-cm-Würfel, für die Prüfung der Spaltzugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls Zylinder mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 30 cm, für die Prüfung des Schwindens und des Kriechens Zylinder mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 60 cm und für die Prüfung der Wasserundurchlässigkeit Platten 20 cm x 20 cm x 12 cm (stehend) bei den Fließbetonen ohne Aufsatzkasten und bei den übrigen Betonen mit Aufsatzkasten nach bzw. in Anlehnung an DIN 1048 Teil 1 hergestellt. Die Betone mit Fließmittel wurden während des Einfüllens in die Formen intensiv gestochert, die Prüfkörper aus Beton ohne Fließmittel wurden auf einem Rütteltisch (rd. 3000 U/min und 1 mm Schwingungsbreite) verdichtet.

Die Festbetonprüfkörper lagerten in der Regel bis zum Entformen im Alter von 1 Tag unter feuchten Tüchern, anschließend bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser und danach bis zur Prüfung an Luft mit 65 % rel. Luftfeuchte, und zwar stets bei 20 °C. Davon abweichend lagerten die Spaltzugprüfkörper nach dem Ausschalen bis zur Prüfung unter Wasser bei 20 °C und einige Schwindprüfkörper des Betons 2.1 bereits ab dem Alter von 2 Tagen an Luft mit 65 % rel. Luftfeuchte und 20 °C.

4.2.4 Prüfung und Ergebnisse

4.2.4.1 Frischbeton

An den Ausgangsbetonen und den Betonen mit Fließmittel der Serien 1, 2 und 3 wurden die Frischbetonbeschaffenheit augenscheinlich beurteilt sowie die Rohdichte, der Luftgehalt mit dem Druckausgleichsverfahren im 8-l-Luftgehaltsprüfgerät und zur Beurteilung der Konsistenz das Ausbreitmaß nach DIN 1048 Teil 1 bestimmt. Das Ausbreitmaß der Ausgangsbetone und der Betone mit Fließmittel wurde stets unmittelbar und 30 Minuten nach der Betonherstellung bestimmt, bei den meisten Betonen der Serien 1 und 2 alle 15 Minuten bis zu 90 Minuten nach der Betonherstellung. Die Ergebnisse der Frischbetoneigenschaften sind für die Betone der Serien 1 und 2 in der Tafel 4 und für die Betone der Serie 3 in Tafel 5 zusammengestellt.

Mit den Betonen der Serie 3 (siehe Tafel 5) wurde das Verhalten des Frischbetons bei und nach dem Einbau in plattenförmige Bauteile mit geneigter, nicht geschalter oberer Betonfläche orientierend untersucht. Dazu wurde in einer großformatigen, in Längsrichtung rd. 3 % geneigten Stahlform eine Betonplatte rd. 150 cm x 70 cm x 17 cm hergestellt. Die geneigte Innenfläche der Bodenschalung bestand aus einer glatten Stahlplatte oder aus einer Polystyrolplatte, die zur Aufrauung eine rd. 1 mm dicke Zementsteinschicht mit aufgestreutem Quarzsand 1/2 mm aufwies. Der Beton wurde in 1 oder 2 Lagen eingebaut und mit einer Rüttelbohle mit unterschiedlicher Fliehkraft, Frequenz und Rütteldauer, teilweise auch nach einer Wartezeit von 1 Stunde nach Einbringen des Betons verdichtet. Die Rüttelbohle lief bei einigen Versuchen auf den seitlichen Begrenzungswänden der Stahlform, die zur Behinderung von Schwingungsübertragungen vorher mit einer 1 cm dicken Polystyrolplatte und lose aufgelegter Preßspanplatte abgedeckt war. Sie wurde teilweise aber auch so geführt, daß sie nicht mit der Schalung, sondern nur mit dem Beton in Berührung kam. Die Einzelheiten der Versuchsdurchführung, die Zuordnung der Versuchsvarianten und die Ergebnisse gehen aus Tafel 5 hervor.

4.2.4.2 Festbeton

Von den Betonen 1.1 und 1.4 ohne und mit jeweils einem der Zusatzmittel A, D, G, H und M, dem Beton 1.7 ohne Fließmittel und dem Beton 2.1 ohne und mit jeweils einem der Fließmittel A, D und G (siehe auch Tafeln 2, 3 und 4) wurden die Druckfestigkeit an nach DIN 1048 gelagerten Prüfkörpern im Alter von 2, 7, 28, 91 und 365

Tafel 5 Betone und Betonierversuche der Versuchsserie 3 (R = Rheinkies sand 0/32 mm; B = Rheinkies sand 0/8 mm und Basaltspalt 8/22 mm)

Versuch Nr.	Zuschlag nach Sieblinie 1	Gehalt Zement 1 kg/m ³	w/z	Menge Fließmittel A cm ³ /kg	Ausbreitmaß in cm			Rüttler		Rüttel-dauer s	Rüttelbohle aufgelegt auf	Beurteilung während des Rüttelvorgangs
					Ausgangs-beton	Beton mit Fließmittel 0 30' nach Zumischen d. Fließmittels		Flieh-kraft N	Fre-quenz Hz			
3.1	R	350	0,45	16	37	57	46	450	25	30	Preßspan-platte mit Polystyrol-zwischen-schicht auf Schalungs-rand lose aufgelegt	starkes Abfließen
3.2	R	350	0,45	14	41	55	50	100	25	30		geringes Abfließen
3.3	R	350	0,45	20	38	62	52	100	10	30		starkes Abfließen
3.4	R	350	0,45	14	43	58	50	100	10	30		starkes Abfließen
3.5	R	350	0,45	14	43	58	50	100	10	30		kein Abfließen
3.6	R	350	0,45	10	39	53	42	100	10	nach 1 h Wartezeit 30 nach 1 h Wartezeit	kein Abfließen	
3.7	R	350	0,45	18	40	60	56	70	10	40	Preßspan-platte mit Polystyrol-zwischen-schicht auf Schalungs-rand lose aufgelegt	geringes Abfließen
3.8	R	350	0,45	16	39	59	48	70	10	40		geringes Abfließen
3.9	R	350	0,45	12	39	54	47	70	10	40		geringes Abfließen
3.10	R	350	0,45	10	39	53	42	70	10	40		kein Abfließen
3.11	B	350	0,45	20	41	58	49	100	10	15	starkes Abfließen	
3.12	R	360	0,40	18	33	49	38	625	25	15	Preßspan-platte mit Polystyrol-zwischen-schicht auf Schalungs-rand lose aufgelegt	starkes Abfließen
3.13	R	360	0,40	18	33	49	38	100	10	25		kein Abfließen

Tafel 5 (Fortsetzung)

Versuch Nr.	Zuschlag nach Sieblinie 1	Gehalt Zement 1 kg/m³	w/z	Menge Fließmittel A cm³/kg	Ausbreitmaß in cm			Rüttler		Rütteldauer s	Rüttelbohle aufgelegt auf	Beurteilung während des Rüttelvorgangs
					Ausgangsbeton	Beton mit Fließmittel 0 30' nach Zumischen d. Fließmittels		Fliehkraft N	Frequenz Hz			
3.14	R	350	0,45	14	42	57	47	2500	50	15	Beton	geringes Abfließen
3.15	R	350	0,45	14	42	57	47	625	25	15		geringes Abfließen
3.16	R	350	0,45	14	41	54	49	625	25	20		geringes Abfließen
3.17	R	350	0,45	14	42	57	47	450	25	15		kein Abfließen
3.18	R	350	0,45	14	41	55	50	100	25	15		kein Abfließen
3.19	R	350	0,45	14	42	57	47	100	10	15		kein Abfließen
3.20	R	350	0,45	14	41	54	49	100	10	30		kein Abfließen
3.21	R	360	0,40	18	33	49	39	2500	50	15		starkes Abfließen
3.22	R	360	0,40	18	33	49	39	650	25	15		kein Abfließen
3.23	R	360	0,40	18	33	49	39	100	10	15		kein Abfließen
3.24	R	350	0,45	20	36	60	57	100	10	1. Schicht gestochert 2. Schicht 30	- 1)	kein Abfließen geringes Abfließen
3.25	R	350	0,45	16	40	60	55	650	25	1. Schicht 15 2. Schicht 30	Beton 1)	geringes Abfließen starkes Abfließen
3.26	B	350	0,45	16	39	58	49	650	25	1. Schicht 20 2. Schicht 20	Beton 1)	kein Abfließen geringes Abfließen

1) Preßspanplatte mit Polystyrolzwischen-schicht auf Schalungsrand lose aufgelegt

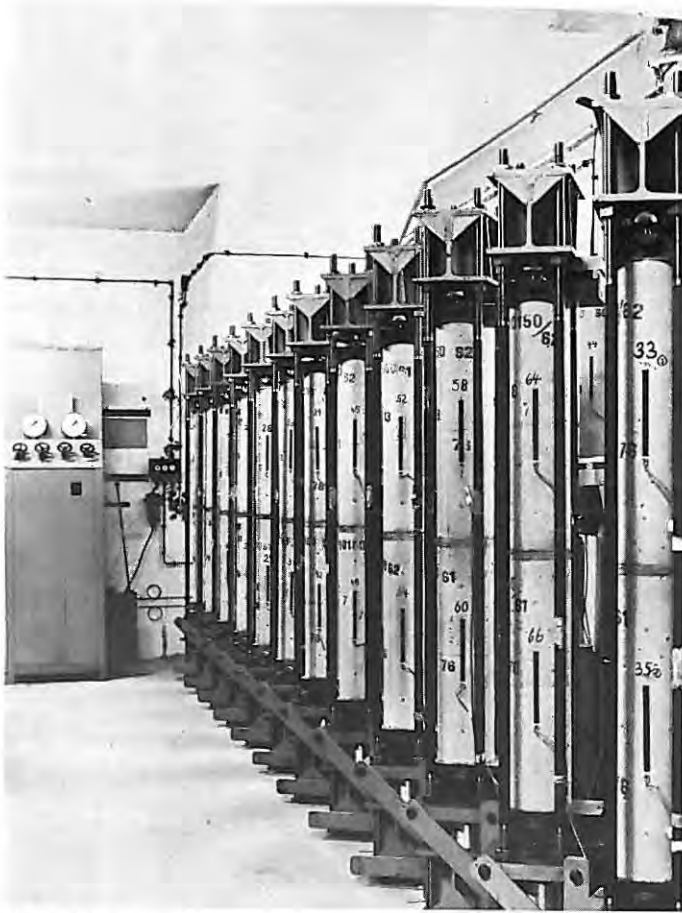


Bild 2 Kriechstände

Tagen (bei Beton 2.1 auch im Alter von 1 Tag), die Spaltzugfestigkeit im Alter von 2, 7, 28 und 91 Tagen, der Druck-Elastizitätsmodul im Alter von 7, 28, 91 Tagen, 1 und 3 Jahren, die Wasserundurchlässigkeit im Alter von 28 Tagen, das Schwinden vom 7. Tag (bei Beton 2.1 zusätzlich vom 2. Tag) bis zum Alter von rd. 5 Jahren und das Kriechen vom 28. Tag bis zum Alter von rd. 5 Jahren geprüft.

Die Prüfung der Rohdichte, der Druckfestigkeit, der Spaltzugfestigkeit, des Elastizitätsmoduls und der Wasserundurchlässigkeit wurden nach DIN 1048 Teil 1 durchgeführt.

Zur Ermittlung des Kriechens wurden je Beton 2 Zylinder 15/60 cm im Betonalter von 28 Tagen in Kriechstände gemäß Bild 2 eingebaut und mit einer konstanten Belastung (ein Drittel der 28-Tage-Zylinderdruckfestigkeit) belastet. Die Verformung der Schwind- und der Kriechzylinder (Schwindzylinder Nullmessung bei Umlagerung im

Alter von 7 Tagen bzw. von 2 Tagen) wurde sowohl mit einem Setzdehnmessmer (Meßlänge 40 cm), der jeweils auf zwei gegenüberliegenden Mantellinien der Zylinder angesetzt wurde, als auch mit Hilfe von zwei gegenüberliegend angebrachten 15 cm langen Dehnungsmeßstreifen im klimatisierten Raum bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte bestimmt. Das Kriechen wurde als Differenz der beim Kriechversuch ermittelten Gesamtverformung, der elastischen Verformung und des Schwindens ermittelt und als auf die Prüfspannung bezogene Kriechwerte errechnet.

5. Erörterung der Untersuchungsergebnisse

5.1 Frischbetoneigenschaften

5.1.1 Verarbeitbarkeit

5.1.1.1 Allgemeines

Die am Beton mit unterschiedlichen Zementgehalten, Kornzusammensetzungen des Zuschlags und Fließmitteln durchgeführten Untersuchungen bestätigen, daß die für den leicht verarbeitbaren Beton mit Fließmittel wichtigste Eigenschaft, seine leichte Verarbeitbarkeit, mit dem Ausbreitversuch nach DIN 1048 Teil 1 hinreichend beurteilt werden kann, wenn dazu außer dem festgestellten Ausbreitmaß (siehe Tafeln 4 und 5) auch die augenscheinliche Beurteilung des Zusammenhaltevermögens und der Homogenität des Frischbetons beim Ausbreitversuch und ggf. im Mischer oder beim Entleeren des Mixers herangezogen wird. Für leicht verarbeitbaren Beton mit Fließmittel ist nicht nur ein dem jeweiligen Verwendungszweck angemessenes Ausbreitmaß (siehe u. a. [1], [2]) notwendig, sondern auch erforderlich, daß der Frischbeton dabei Grobkorn, Zementleim und Wasser nicht nennenswert absondert. Nicht erfüllt war diese Forderung bei Vorversuchen mit 2 min Mischzeit im 150-l-Tellermischer und mit 3 min Mischzeit im 250-l-Tellermischer für das nachträgliche Zumischen des Fließmittels. Sie war aber erfüllt, wenn die Mischzeit für das nachträgliche Zumischen des Fließmittels im 150-l-Tellermischer mindestens 3 min und im 250-l-Tellermischer mindestens 5 min betrug, was für die Betone der Tafeln 4 und 5 zutrif.

Die verflüssigende Wirkung der Fließmittel auf die einbezogenen Betone, bestimmt als Vergrößerung des Ausbreitmaßes des Frischbetons, war bei den verschiedenen Betonen sehr unterschiedlich und abhängig von der Frischbetontemperatur. Das Ausbreitmaß des leicht verarbeitbaren Betons mit Fließmittel nahm mit der Zeit wieder ab, was ja bereits aus früheren Versuchen bekannt ist. Diese Abnahme war erwartungsgemäß im allgemeinen um so größer, je mehr das Ausbreitmaß des Ausgangsbetons durch die Fließmittelzugabe vergrößert worden war. Das Ausbreitmaß des Ausgangsbetons wurde je nach Beton und je nach Frischbetontemperatur im allgemeinen 45 bis 120 min nach Zumischen des Fließmittels wieder erreicht. Beim Beton 1.7, der zur Erlangung eines Ausbreitmaßes von 57 cm zwar ohne Fließmittel, aber zementleimreicher hergestellt

wurde und ein geringeres Zusammenhaltevermögen aufwies als die Betone 1.1, war die Abnahme des Ausbreitmaßes mit der Zeit größer als beim Ausgangsbeton 1.1, aber – abgesehen von einer Ausnahme – geringer als bei den Betonen 1.1 mit Fließmittel.

Von den Betonen mit größerem Ausbreitmaß als 60 cm (siehe Tafel 4) wiesen die Frischbetone 1.4 mit Fließmittel G (Ausbreitmaß 63 cm) sowie 2.1 mit Fließmittel A (Ausbreitmaß 62 cm) ein gutes Zusammenhaltevermögen auf, während der Frischbeton 1.4 mit Fließmittel D (Ausbreitmaß 62 cm) trotz angemessen langer Mischzeit beim Ausbreitversuch bereits leichtes Absondern von Wasser und Zementleim zeigte. Auch bei diesem Versuch erwies sich daher die Begrenzung des Ausbreitmaßes für Fließbeton auf höchstens 60 cm als eine für den Regelfall zweckmäßige und auf der sicheren Seite liegende Maßnahme.

5.1.1.2 Einfluß der Betonzusammensetzung

Aus den Versuchsergebnissen der Tafel 4 geht deutlich hervor, daß die verflüssigende Wirkung der Fließmittel auf die einbezogenen Betone bei gleicher Ausgangskonsistenz des Frischbetons und bei gleicher Fließmittelzugabe (Marke und Menge) in starkem Maße von der Zuschlagkornzusammensetzung sowie von dem Zement- und möglicherweise auch von dem Mehlkorngehalt abhängig ist. Die durch die Fließmittelzugabe bedingte mittlere Vergrößerung des Ausbreitmaßes der unmittelbar vergleichbaren Frischbetone mit 16 cm³ Fließmittel B und 12 cm³ Fließmittel G je kg Zement ist für die Betone 1.1 bis 1.6 dafür als Beispiel in Tafel 6 zusammengestellt.

Tafel 6 Mittlere Vergrößerung des Ausbreitmaßes

Beton nach Tafel 4 mit Fließmittel B und G	Mittlere Vergrößerung des Ausbreitmaßes durch Fließmittel bei empfohlener Zugabemenge	
	cm	%
1.1	16	41
1.2	14	36
1.3	4	10
1.4	22	60
1.5	15	36
1.6	14	39

Diese Zusammenstellung zeigt, daß die Vergrößerung des Ausbreitmaßes durch Fließmittelzugabe im untersuchten Bereich mit abnehmendem Sandanteil des Zuschlags und mit wachsendem Zementgehalt zunimmt. Sie ist jedoch bei den Betonen 1.1, 1.2, 1.5 und 1.6 nicht sehr unterschiedlich, aber beim Beton 1.3 (Zementgehalt 300 kg/m³ und sandreiche Zuschlagsieblinie 3) deutlich geringer und beim Beton 1.4 (Zementgehalt 350 kg/m³ und sandarme Zuschlagsieblinie 1) deutlich größer als bei den Betonen 1.1, 1.2, 1.5 und 1.6. Die gleiche Aussage ergibt sich, wenn man für die Betongruppen 1.1, 1.3 und 1.4 statt der Mittelwerte der für die Betrachtung

des Einflusses von Zementgehalt und Zuschlagkornzusammensetzung unmittelbar vergleichbaren beiden Betone jeweils die Mittelwerte aller untersuchten Betone dieser Gruppen einsetzt.

Aus diesen Ergebnissen und dem bisherigen Stand der Erkenntnisse ist zu folgern, daß der Zementgehalt für leicht verarbeitbare Betone mit Fließmittel 300 kg/m³ nicht unterschreiten sollte, daß die Kornzusammensetzung von Kiessandgemischen 0/32 für eine möglichst große verflüssigende Wirkung in der oberen Hälfte des günstigen Bereichs des entsprechenden Sieblinienbildes der DIN 1045 liegen sollte und daß bei Zuschlagsieblinien im brauchbaren Bereich im allgemeinen höhere Zementgehalte von z. B. 350 kg/m³ erforderlich sind.

5.1.1.3 Einfluß des Fließmittels

Will man mit Hilfe der Ergebnisse dieser Versuche eine Antwort auf die immer wieder interessierende Frage nach dem Einfluß von Art, Zusammensetzung und Menge des Fließmittels auf seine verflüssigende Wirkung geben, so ist dazu anzumerken, daß eine exakte Aussage darüber und über die Wirksamkeit der Stoffgruppen nicht möglich ist, weil genauere Angaben über Art und Menge der verflüssigenden Wirkstoffe sowie über die Zusammensetzung des Fließmittels, aber auch über die Grundsätze für die Wahl der vom Hersteller empfohlenen Zugabemenge nicht zu erhalten waren. Möglich und interessant ist jedoch eine vergleichende Betrachtung der verflüssigenden Wirkung der Fließmittel auf das Ausbreitmaß der hier untersuchten Betone bei einfacher oder mehrfacher vom Hersteller empfohlenen Zugabemenge. Selbst dieser Vergleich kann aber nur als roher Anhalt für die Beurteilung der verflüssigenden Wirkung der Fließmittel angesehen werden, u. a., weil die Betone 1.1 bis 1.6 nur mit einem Portlandzement Z 35 F und mit einem Rheinkiesand aus dem Raum Düsseldorf hergestellt worden sind und weil die innerhalb der einzelnen Betongruppen 1.1 bis 1.6 trotz gleicher Betonzusammensetzung unterschiedlichen Ausbreitmaße der Ausgangsbetone, je nachdem, ob sie durch stoffliche Streuung oder durch Prüfverfahrensstreuung bedingt sind, die Auswirkungen des Fließmittels auf den Beton ebenfalls beeinflußt haben können.

Die unter diesen Voraussetzungen bei der vom Hersteller empfohlenen Fließmittelzugabe erhaltenen und vergleichbaren Ausbreitmaßvergrößerungen lagen beim Beton 1.1 zwischen 19 und 13 cm, beim Beton 1.3 zwischen 9 und 0 cm, beim Beton 1.4 zwischen 25 und 13 cm und bei den Betonen 1.2, 1.5 und 1.6 zwischen 17 und 11 cm. Mittelt man diese Ergebnisse, so läßt sich – unter den vorher erwähnten Voraussetzungen und unter der Einschränkung, daß nur die Fließmittel B und G mit allen 6 Betonen (1.1 bis 1.6), die Fließmittel D, M, E, L, B, G, H, K und A nur mit zwei Betonen (1.1 und 1.4 bzw. 1.1 und 1.3) und die übrigen Mittel nur mit einem Beton (1.1) geprüft worden sind – daraus folgern, daß insgesamt gesehen das Fließmittel D die größte, die Fließmittel M, L, F, E, B, C und G eine noch große und die Fließmittel H (bei 10 cm³/kg), I, K und A eine geringere verflüssigende Wirkung ergeben. Bei den Betonen 2.1, die mit 380 kg/m³ eines Portlandzements Z 45 F hergestellt worden sind, war die verflüssigende Wirkung – unter Berücksichtigung, daß die

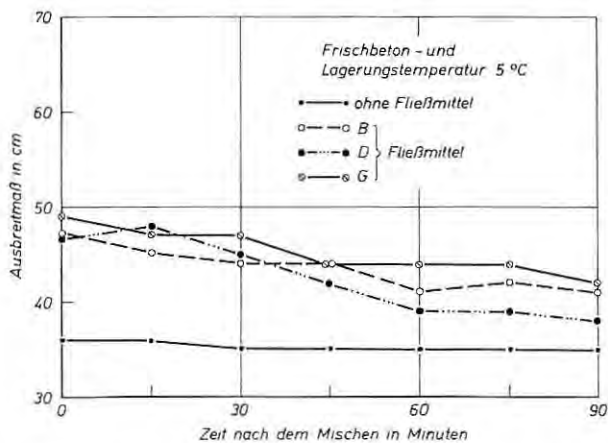
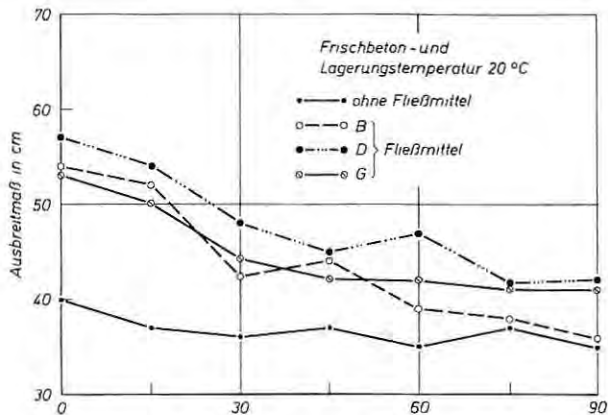
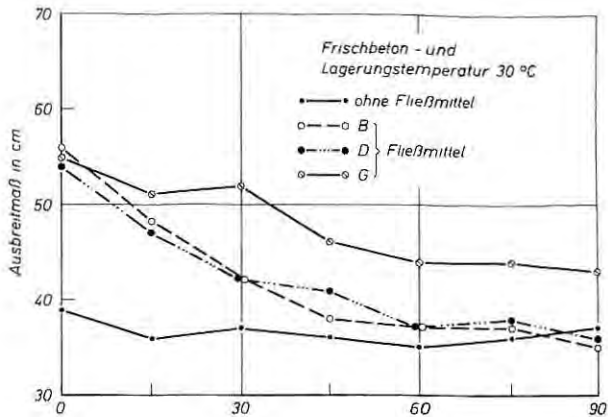


Bild 3 Ausbreitmaß von Beton 1.1 mit verschiedenen Fließmitteln in Abhängigkeit von der Zeit – Frischbeton- und Lagerungstemperatur rd. 5 °C, rd. 20 °C und rd. 30 °C

Fließmittelzugabe, bezogen auf die empfohlene Menge, bei den drei Betonen mit Fließmittel unterschiedlich war – beim Fließmittel D am größten und bei den Fließmitteln A und G etwa gleich. Eine Aussage über den Einfluß der Fließmittelgrundstoffe auf die verflüssigende Wirkung der Fließmittel ist mit diesen Ergebnissen jedoch nicht möglich. Aus den Ergebnissen der Betone 1.3, die wegen des sandreichen Zuschlaggemisches und eines Zementgehalts von nur 300 kg/m³ mit Fließmittel nur wenig zu verflüssigen waren, geht hervor, daß die verflüssigende Wirkung auf den Beton mit wachsender Fließmittelmenge nicht unbegrenzt zunimmt. Sie war dort bei 1,5-facher empfohlener Fließmittelmenge der Mittel G und B größer als bei einfacher und bei zweifacher empfohlener Menge.

Der Abbau der verflüssigenden Wirkung (die Abnahme des Ausbreitmaßes) mit der Zeit war trotz der größeren Verflüssigung bei den Fließmitteln D und E (Beton 1.1), beim Fließmittel L (Betone 1.1 und 1.4) und beim Fließmittel G (alle Betone der Serie 1, Beton 1.3 jedoch nur bei 1,5- und bei zweifacher empfohlener Zugabemenge) geringer als bei den übrigen Fließmitteln.

5.1.1.4 Einfluß der Frischbetontemperatur

Der Einfluß der Frischbetontemperatur auf die Verarbeitbarkeit des leicht verarbeitbaren Betons mit Fließmittel und des dazugehörigen Ausgangsbetons, beurteilt mit dem Ausbreitmaß, geht für den Beton 1.1 und die Fließmittel B, D und G, die nach Abschnitt 5.1.1.3 eine deutliche Verbesserung der Verarbeitbarkeit bewirkten, aus dem Bild 3 hervor. Durch das Zumischen eines Fließmittels wurde das Ausbreitmaß des Ausgangsbetons bei 5 °C im Mittel um 11 cm (34 %), bei 20 °C im Mittel um 15 cm (37 %) und bei 30 °C im Mittel um 17 cm (45 %) vergrößert. Das Ausbreitmaß lag unmittelbar nach dem Zumischen des Fließmittels bei 5 °C im Mittel bei 47 cm und bei 20 und 30 °C im Mittel bei 55 cm. Die durch das Fließmittel bedingte Vergrößerung des Ausbreitmaßes war zwar bei 5 °C mit Fließmittel G, bei 20 °C mit Fließmittel D und bei 30 °C mit Fließmittel B am größten, die durch das jeweilige Fließmittel bedingten Unterschiede sind jedoch sehr gering und liegen innerhalb der Prüfstreuung.

Die mittlere Abnahme des Ausbreitmaßes der Betone 1.1 mit den Fließmitteln B, D und G mit der Zeit ist für die Frischbetontemperaturen 5, 20 und 30 °C in Tafel 7 zusammengestellt.

Daraus geht hervor, daß die mittlere Abnahme des Ausbreitmaßes bei 20 und 30 °C nicht sehr verschieden, aber deutlich größer als bei

Tafel 7 Mittlere Abnahme des Ausbreitmaßes

Frischbeton- temperatur	Mittlere Abnahme des Ausbreitmaßes nach					
	30 min		60 min		90 min	
	cm	%	cm	%	cm	%
5 °C	2	4	5	10	7	11
20 °C	10	18	12	22	15	27
30 °C	10	17	16	28	17	31

5 °C ist. Die Abnahme des Ausbreitmaßes der einzelnen Betone war nach 60 und 90 min bei 5 °C für das Fließmittel D 1 bis 4 cm größer, bei 20 und 30 °C für das Fließmittel B 2 bis 9 cm größer und bei 30 °C für das Fließmittel G 6 bis 9 cm kleiner als für die jeweils beiden übrigen Fließmittel. 90 min nach dem Zumischen des Fließmittels lag das Ausbreitmaß der 20- und der 30 °C-Betone mit Fließmittel B sowie der 5- und der 30 °C-Betone mit Fließmittel D wie bei den Ausgangsbetonen zwischen 35 und 38 cm, aber das des 5 °C-Betons mit Fließmittel B, des 20 °C-Betons mit Fließmittel D und der 5-, 20- und 30 °C-Betone mit Fließmittel G zwischen 41 und 43 cm.

5.1.2 Luftgehalt

Der Luftgehalt des Frischbetons lag bei den Ausgangsbetonen 1.1, 1.2, 1.4, 1.5 und 1.6 zwischen 1,0 und 1,5 % und betrug beim Ausgangsbeton 1.3 wegen des sandreichen Zuschlaggemisches und eines Zementgehalts von nur 300 kg/m³ 2,7 %. Von den leicht verarbeitbaren Betonen mit Fließmittel zeigten die Betone 1.1 mit den Fließmitteln E, F, H, I und M, die Betone 1.2 und 1.6 (Fließmittel B und G), zwei der Betone 1.3 mit Fließmittel G, die Betone 1.4 mit den Fließmitteln H und M und der Beton 1.5 mit Fließmittel B einen gegenüber dem Ausgangsbeton erhöhten Luftgehalt. Eine unmittelbare Vergrößerung oder Verminderung des Luftgehalts durch Fließmittel kann aus den vorliegenden Versuchsergebnissen im allgemeinen nicht abgeleitet werden. Lediglich bei den Fließmitteln H und M war eine systematische Vergrößerung des Luftgehaltes nicht auszuschließen. Die nach Zugabe des Fließmittels festgestellten Luftgehaltsänderungen, die teilweise bei demselben Fließmittel nicht systematisch sind, können auch durch Änderung der Zusammensetzung und der Konsistenz des Betons bedingt sein.

Bei den Betonen 2.1 wiesen die Luftporenbetone mit Fließmittel stets einen deutlich größeren Luftgehalt als der sonst gleich zusammengesetzte Beton ohne Fließmittel auf. Auch dies dürfte im wesentlichen auf den Konsistenzunterschied zurückzuführen sein.

5.1.3 Betonieren bei geneigten Flächen

Bei Vorversuchen erwies sich eine glatte Stahlplatte als geneigte Bodenschalung für ein möglichst geringes Abfließen des leicht verarbeitbaren Betons mit Fließmittel als ungeeignet. Tafel 5 enthält daher nur die Ergebnisse der Versuche, die auf einer mit Zementstein und Quarzsand beschichteten, rd. 3 % geneigten Polystyrolplatte als Bodenschalung durchgeführt wurden (siehe auch Abschnitt 4.2.4.1). Bei diesen lediglich orientierenden Untersuchungen der Tafel 5 neigte leicht verarbeitbarer Beton mit Fließmittel beim Einbau in schwach geneigte Bauteile mit freier, nicht geschalter Oberfläche, wie z. B. bei Betonfahrbahndecken, um so weniger zum Abfließen, je geringer die Frequenz, die Fliehkraft und die Rütteldauer für praktisch vollständige Verdichtung sowie je größer das Zusammenhaltevermögen und je geringer das Fließvermögen des Betons waren.

Bei diesen Versuchen (siehe Tafel 5) konnte unter den gewählten Versuchsbedingungen das Abfließen von Fließbeton für den Beton-

straßenbau mit einem Ausbreitmaß bis 60 cm bei rd. 3 % geneigter Fläche am stärksten verhindert oder sogar vermieden werden, wenn die Rüttelschwingungen nicht über die Schalung, sondern unmittelbar von der Rüttelbohle in den Beton eingeleitet wurden. In solchen Fällen führten eine Fliehkraft bis zu 650 N, eine Frequenz bis zu 25 Hz und eine Rütteldauer bis zu 20 s im allgemeinen zu keinem oder zu nur einem geringen Abfließen des Betons. In einem Fall (Versuch 3.14) ergab sich ein nur geringes Abfließen des Betons selbst bei einer Fliehkraft von 2500 N, einer Frequenz von 50 Hz und einer Rütteldauer von 15 s. Nur eine sehr kleine Fliehkraft, Frequenz und Rütteldauer konnten bei solchen Betonen angewendet werden, wenn die Rüttelbohle mit Zwischen-Isolierschichten – zur möglichst weitgehenden Verhinderung der Schwingungseinleitung – über die seitlichen Schalungen lief. – Ein Abfließen des Betons bei rd. 3 % geneigter Fläche konnte auch weitgehend oder ganz verhindert werden, wenn der leicht verarbeitbare Beton mit weniger Fließmittel, kleinerem Ausbreitmaß und/oder einem Zuschlaggemisch mit gebrochenem Zuschlag hergestellt und/oder in zwei Schichten frisch auf frisch, aber mit einer gewissen Wartezeit eingebracht und verdichtet wurde.

Die Versuchsergebnisse der Tafel 5 sind zwar nicht ohne weiteres auf die Praxis übertragbar. Sie zeigen aber Tendenzen für Maßnahmen auf, mit denen in der Praxis ein sachgerechter Einbau von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel in schwach geneigte Bauteile ohne Einschalung der geneigten Oberfläche möglich ist. Hierfür sind – wie auch ein vor kurzem herausgekommener Untersuchungsbericht über Einbauverfahren für Beton mit Fließmittel [58] bestätigt – eine auf die jeweiligen Verhältnisse abgestimmte Betonzusammensetzung und Konsistenz (wie z. B. ggf. Verwendung von gebrochenem Betonzuschlag und/oder bei Neigungen über 3 % eines Ausbreitmaßes unter 50 cm) sowie eine rauhe Oberfläche der Unterlage (möglichst keine glatte Folie) erforderlich.

5.2 Festbetoneigenschaften

5.2.1 Festigkeit

Die Festigkeitsergebnisse der gemäß Abschnitte 4.2.3.2 und 4.2.4.2 hergestellten, gelagerten und geprüften Ausgangsbetone und Betone mit Fließmitteln (außer Beton 1.7) sowie einige weitere im Forschungsinstitut der Zementindustrie an Fließbeton und zugehörigem Ausgangsbeton gewonnene Festigkeitsergebnisse sind für die Druckfestigkeit bis zum Alter von 365 Tagen in Bild 4 und für die Spaltzugfestigkeit bis zum Alter von 91 Tagen in Bild 5 aufgetragen. Die Ergebnisse des Bildes 4 machen deutlich, daß ein systematischer Unterschied zwischen der Druckfestigkeit von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel und von zugehörigem Ausgangsbeton im allgemeinen nicht festgestellt wurde. Lediglich bei den leicht verarbeitbaren Betonen mit einem verzögernd wirkenden Fließmittel war die Druckfestigkeit bis zum Alter von 1 oder 2 Tagen systematisch geringer als die des zugehörigen Ausgangsbetons. – Ähnliche Folgerungen gelten auch für die Spaltzugfestigkeit. In Bild 5 liegt jedoch der deutlich größere Anteil der Festigkeitsergebnisse ober-

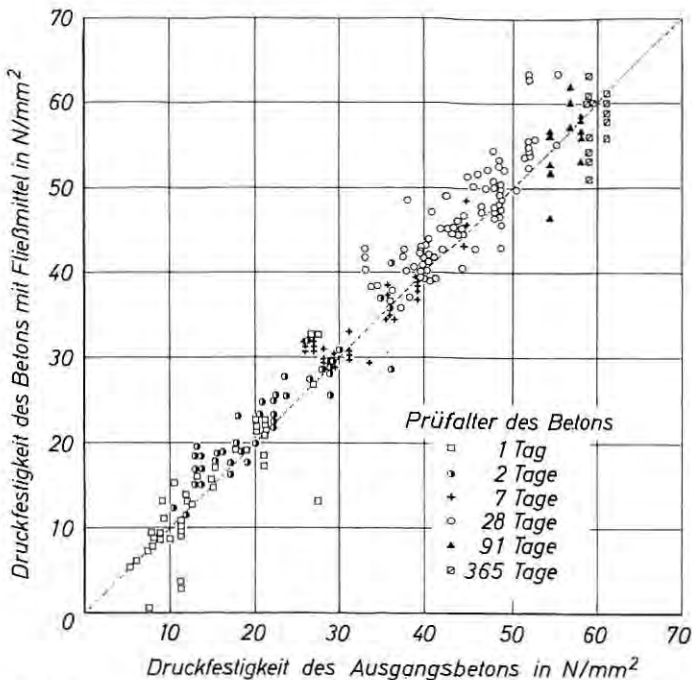


Bild 4 Druckfestigkeit aller untersuchten leicht verarbeitbaren Betone mit Fließmittel und der dazugehörigen Ausgangsbetone

halb der 45 Grad-Achse. Dies deutet an, daß die Spaltzugfestigkeit von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel – abgesehen von einer ggf. vorhandenen Anfangsverzögerung – im Mittel geringfügig größer sein dürfte als die des zugehörigen Ausgangsbetons.

Die absoluten Festigkeitswerte der verschiedenen Betone der Gruppen 1.1, 1.4 und 2.1 lagen in der aufgrund ihrer Zusammensetzung und ihres Prüfalters zu erwartenden Größenordnung. Eine Ausnahme davon machte – abgesehen von den Anfangsverzögerungen bei verzögernd wirkenden Fließmitteln – nur der Beton 1.1 mit Zusatzmittel M, dessen Druck- und Spaltzugfestigkeit zu allen Prüfterminen deutlich geringer als die entsprechende Festigkeit des Ausgangsbetons und der Betone mit den übrigen Fließmitteln waren. Da die Minderfestigkeiten des Betons 1.1 mit Fließmittel M – wie auch ein Vergleich mit den übrigen Betonen zeigt – mit dem vergrößerten Luftgehalt und mit dem Fließmittel nicht zu erklären war, sondern vermutlich auf einen systematischen Versuchsfehler zurückzuführen ist, wurden seine Ergebnisse in die Bilder 4 und 5 nicht eingetragen. – Erwartungsgemäß war die Druckfestigkeit des zementleimreicheren Betons 1.7 (ohne Zusatzmittel) etwas geringer und seine Spaltzugfestigkeit etwas größer als die des vergleichbaren Betons 1.1.

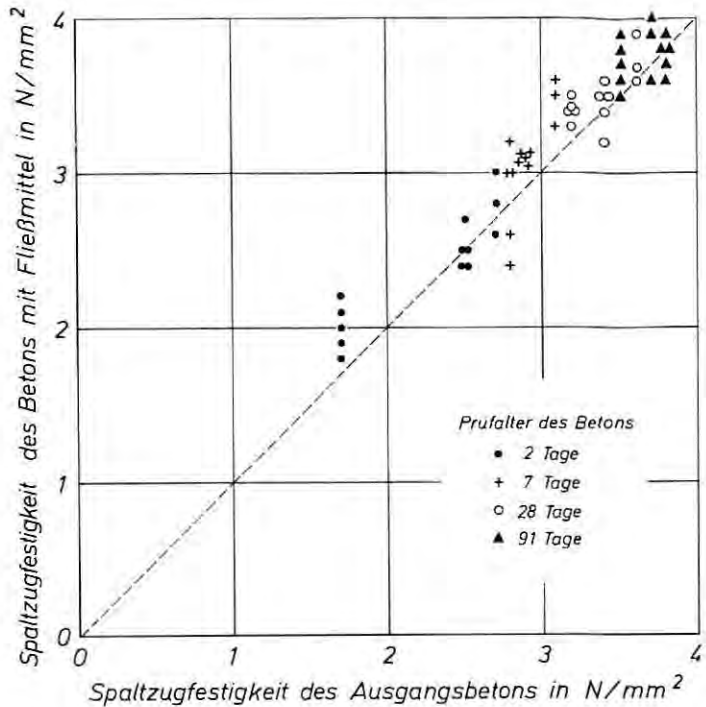


Bild 5 Spaltzugfestigkeit der untersuchten Betone mit Fließmittel und der dazugehörigen Ausgangsbetone

5.2.2 Druck-Elastizitätsmodul

Der Druck-Elastizitätsmodul der unterschiedlichen Betone (1.1, 1.4, 1.7 und 2.1, siehe Tafeln 3 und 4 sowie Abschnitt 4.2.4.2) lag im Prüfalter zwischen 7 Tagen und 3 Jahren bei den Betonen ohne Fließmittel insgesamt zwischen $28,5$ und $37,8 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ und bei den leicht verarbeitbaren Betonen mit Fließmittel insgesamt zwischen $27,7$ und $41,2 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$. Er nahm bei allen geprüften Betonen mit dem Alter bis zum 91. Tag, im allgemeinen auch noch darüber hinaus, zu. Bis zum Prüfalter von 28 Tagen fiel der Druck-Elastizitätsmodul des leicht verarbeitbaren Betons 1.1 mit Fließmittel M – wie bei der Festigkeit (siehe Abschnitt 5.2.1) – offensichtlich etwas zu gering aus.

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge sind die Druck-Elastizitätsmoduli der leicht verarbeitbaren Betone mit Fließmittel und der dazugehörigen Ausgangsbetone bis zum Alter von rd. 3 Jahren in Bild 6 aufgetragen. Gemittelt über die Prüftermine bis zu 3 Jahren war der Druck-Elastizitätsmodul des Ausgangsbetons bei Beton 1.1 3 % und bei Beton 2.1 8 % größer als das Mittel der zugehörigen Betone mit Fließmittel und bei Beton 1.4 ebenso groß wie das Mittel der zugehörigen Betone mit Fließmittel. Eine systematische Verände-

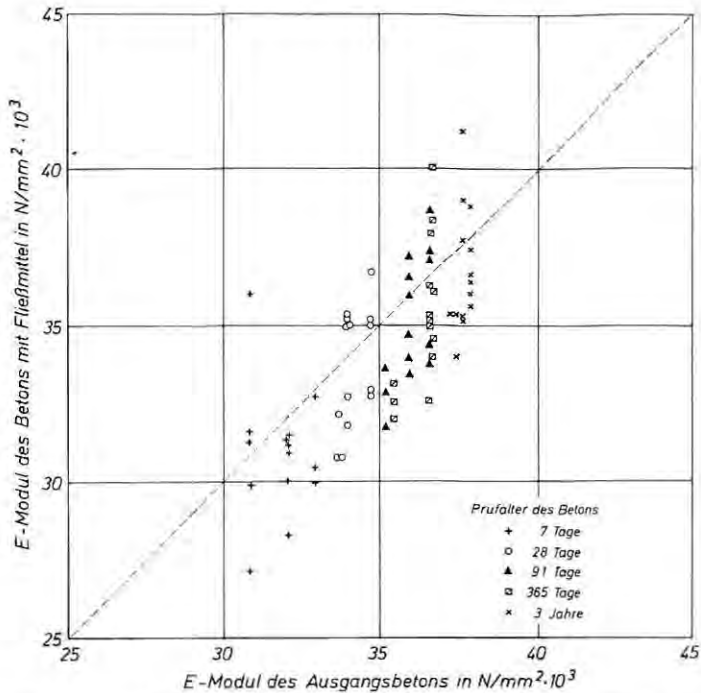


Bild 6 Druck-Elastizitätsmodul der untersuchten Betone mit Fließmittel und der dazugehörigen Ausgangsbetone

rung dieser Verhältniswerte mit dem Alter des Betons wurde nicht festgestellt. Während beim Beton 2.1 der Druck-Elastizitätsmodul des Ausgangsbetons zu allen Prüfterminen durchweg etwas größer als die entsprechenden Werte der Betone mit Fließmittel war, erreichten beim Beton 1.1 die Werte der Betone mit den Fließmitteln A, H und G im Mittel die Größenordnung des Ausgangsbetons und lagen beim Beton 1.4 die Werte der Betone mit den Fließmitteln A, D und G deutlich über den Werten des Ausgangsbetons. – Erwartungsgemäß war der Druck-Elastizitätsmodul des zementleimreicheren Betons 1.7 (ohne Zusatzmittel) etwas geringer (im Mittel etwa 14 %) als der des Ausgangsbetons von Beton 1.1.

5.2.3 Schwinden

Der Verlauf des Schwindens, gemessen mit dem Setzdehnungsmesser, ist für die Betone 1.1 und 1.7 in Bild 7 a, für die Betone 1.4 in Bild 7 b und für die Betone 2.1 in Bild 7 c in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Im Betonalter von 5 Jahren lag das Schwinden der Betone 1.1 zwischen 0,57 und 0,62 mm/m, der Betone 1.4 zwischen 0,51 und 0,62 mm/m und der Betone 2.1 zwischen 0,47 und 0,56 mm/m. Es war zu diesem Zeitpunkt bei Beton 1.4 ($w/z = 0,49$; etwa gleicher Wassergehalt w ; 7 % mehr Zementleim) im Mittel 7 % und

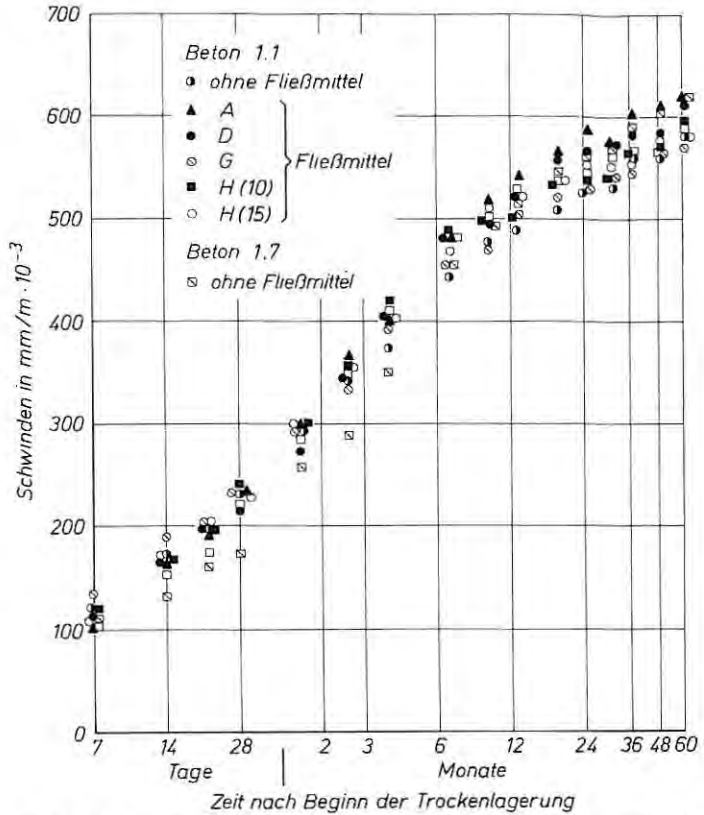


Bild 7a Schwinden des Betons 1.1 ohne und mit Fließmittel und des Betons 1.7

bei Beton 2.1 ($w/z = 0,40$; 10 % kleinerer Wassergehalt w ; 4 % mehr Zementleim) im Mittel 12 % kleiner als bei Beton 1.1 ($w/z = 0,56$). Der Beton 1.7 (23 % mehr Zementleim) wies in jungem Alter ein kleineres, im Alter von 5 Jahren jedoch ein um 7 % größeres Schwinden auf als der Beton 1.1.

Die Schwindunterschiede zwischen den Betonen einer Gruppe waren beim Beton 1.1 gering (nach 5 Jahren maximal 10 %), bei den Betonen 1.4 und 2.1 aber etwas größer (nach 5 Jahren maximal 20 %). Nach 5 Jahren war das Schwinden der Betone 1.4 mit den Fließmitteln D, H und M im Mittel um 15 % größer als der entsprechende Wert der Betone 1.4 ohne und mit den Fließmitteln A und G sowie das Schwinden der Betone 2.1 mit den Fließmitteln A, D und G im Mittel 16 % größer als das Schwinden des dazugehörigen Ausgangsbetons. Im Gegensatz zum Beton 1.1 lagen die Schwindwerte des Ausgangsbetons bei den Betonen 1.4 und 2.1 stets im unteren Bereich.

Die Schwindwerte der im Betonalter von zwei Tagen umgelagerten Prüfkörper der Betone 2.1 (frühhochfester leicht verarbeitbarer Beton mit Fließmittel) wiesen die gleiche Größenordnung auf wie die im Alter von 7 Tagen umgelagerten Prüfkörper.

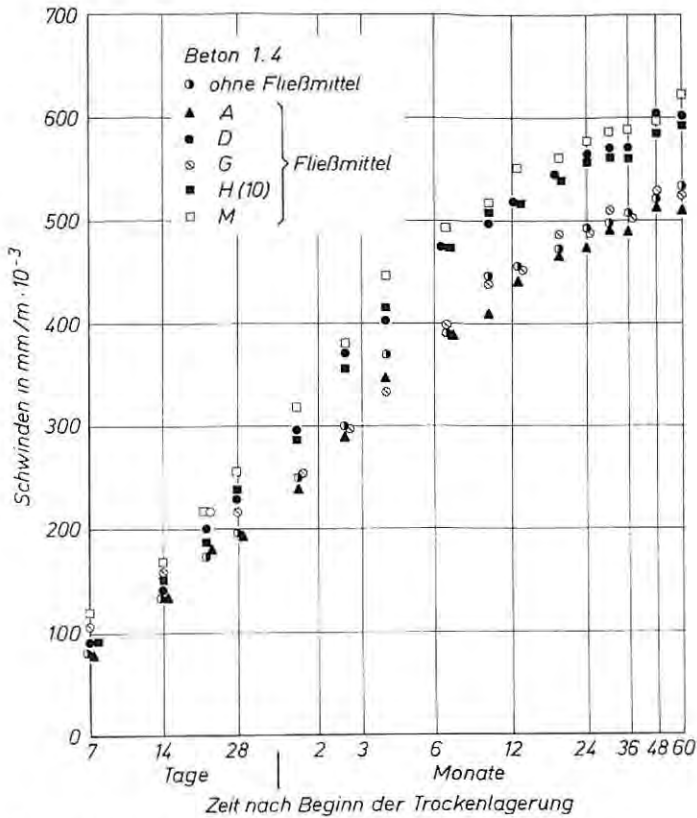


Bild 7b Schwinden des Betons 1.4 ohne und mit Fließmittel

Zusammenfassend ist festzustellen, daß beim Ausgangsbeton das Schwinden von Beton 1.1 ($w/z = 0,56$) größer als das Schwinden der geringfügig zementleimreicheren Betone 1.4 ($w/z = 0,49$) und 2.1 ($w/z = 0,40$), aber insgesamt gesehen kleiner als das des zementleimreicheren Betons 1.7 ($w/z = 0,56$) war. Das Schwinden der Betone mit Fließmittel lag bei Beton 1.1 überwiegend in der Größenordnung des Ausgangsbetons, war jedoch bei Beton 1.4 mit einigen Fließmitteln und bei allen fließmittelhaltigen Betonen 2.1 zwischen 10 und 20 % größer als beim zugehörigen Ausgangsbeton.

5.2.4 Kriechen

Als Ergebnis des Kriechens sind die mittels Setzdehnmessler ermittelten, auf die Prüfspannung bezogenen Kriechwerte für die Betone 1.1 und 1.7 in Bild 8a, für Beton 1.4 in Bild 8b und für Beton 2.1 in Bild 8c in Abhängigkeit von der Belastungsdauer (ab Belastungsalter von 7 Tagen) aufgetragen. Zum Vergleich mit den Normfestlegungen enthalten die Bilder auch die nach DIN 4227 Teil 1 (De-

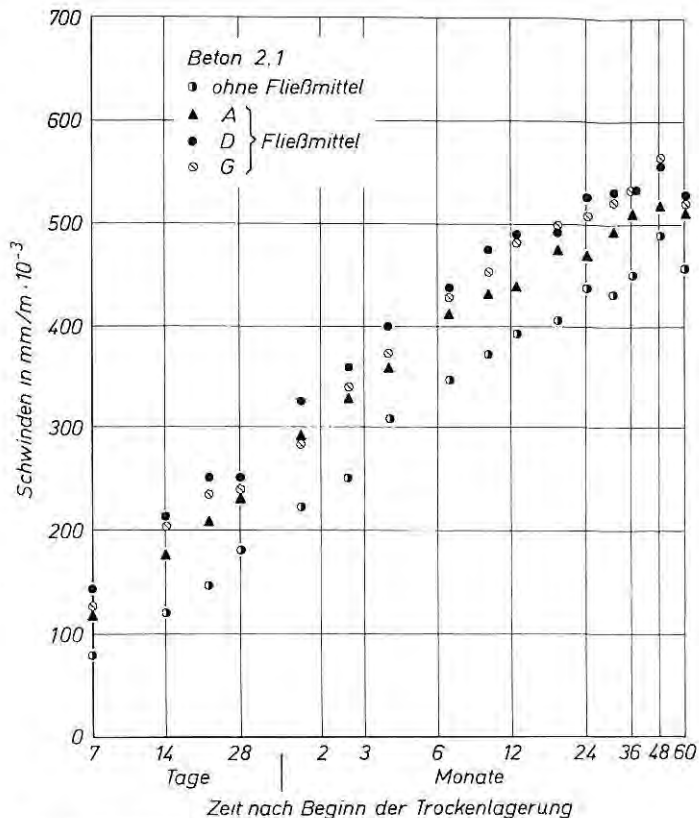


Bild 7c Schwinden des Betons 2.1 ohne und mit Fließmittel

zember 1979) bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 %, einer Frischbetonkonsistenz von K2 und K3 und einem Elastizitätsmodul von $34\,000 \text{ N/mm}^2$ anzunehmenden, auf die Prüfspannung bezogenen Kriechwerte.

Wie Bild 8 a zeigt, war das auf die Prüfspannung bezogene Kriechen der leicht verarbeitbaren Betone mit Fließmittel beim Beton 1,1 ($z = 300 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,56$) unterschiedlich sowie etwa ebenso groß oder größer als das des zugehörigen Ausgangsbetons. Abgesehen vom Beton 1,1 mit Fließmittel M, dessen Festigkeit und Elastizitätsmodul ebenfalls nicht erklärbare Abweichungen zeigten, und vom Beton 1,1 mit Fließmittel G, dessen Kriechwerte etwa denen des Ausgangsbetons entsprachen, betrug diese Vergrößerung des Kriechens der Betone mit Fließmittel 9 bis 30 %, im Mittel 17 %. Der zementleimreiche Beton 1,7 (ohne Fließmittel; $w/z = 0,56$) wies nach einer Belastungsdauer zwischen 1 und 5 Jahren ein um 28 bis 39 % größeres bezogenes Kriechen auf als der Ausgangsbeton 1,1.

Aus Bild 8 b geht hervor, daß die leicht verarbeitbaren Betone 1,4 ($z = 350 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,49$) mit Fließmittel nach einer Belastungs-

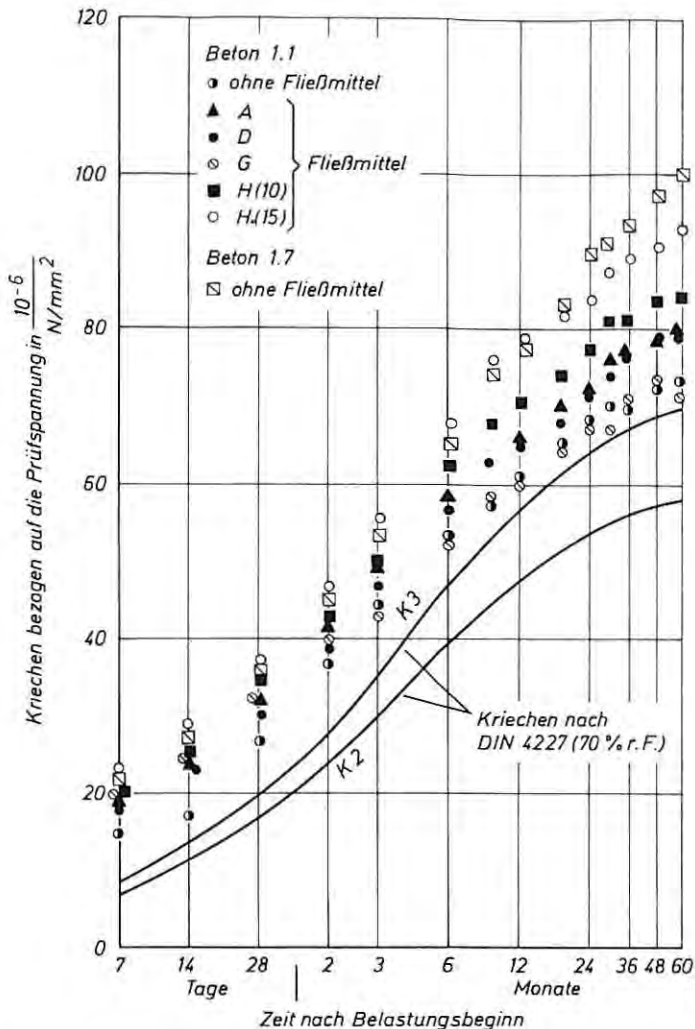


Bild 8a Mit Setzdehnungsmesser bestimmtes, auf die Prüfspannung bezogenes Kriechen von Beton 1.1 ohne und mit Fließmittel und von Beton 1.7

dauer von 5 Jahren ein um 7 bis 29 %, im Mittel um 20 %, größeres bezogenes Kriechen aufwiesen. Das bezogene Kriechen war zu diesem Zeitpunkt beim Ausgangsbeton 1.4 im Mittel 16 % und bei den Betonen mit Fließmittel (Beton mit Fließmittel M wegen der nicht erkläraren Abweichungen bei 1.1 nicht einbezogen) im Mittel 10 % kleiner als das der entsprechenden Betone 1.1.

Bild 8c verdeutlicht, daß nach einer Belastungsdauer von 2 Jahren und mehr beim Beton 2.1 (frühhochfester Straßenbeton; $z = 380 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0.40$) der Beton ohne Fließmittel und der Beton mit

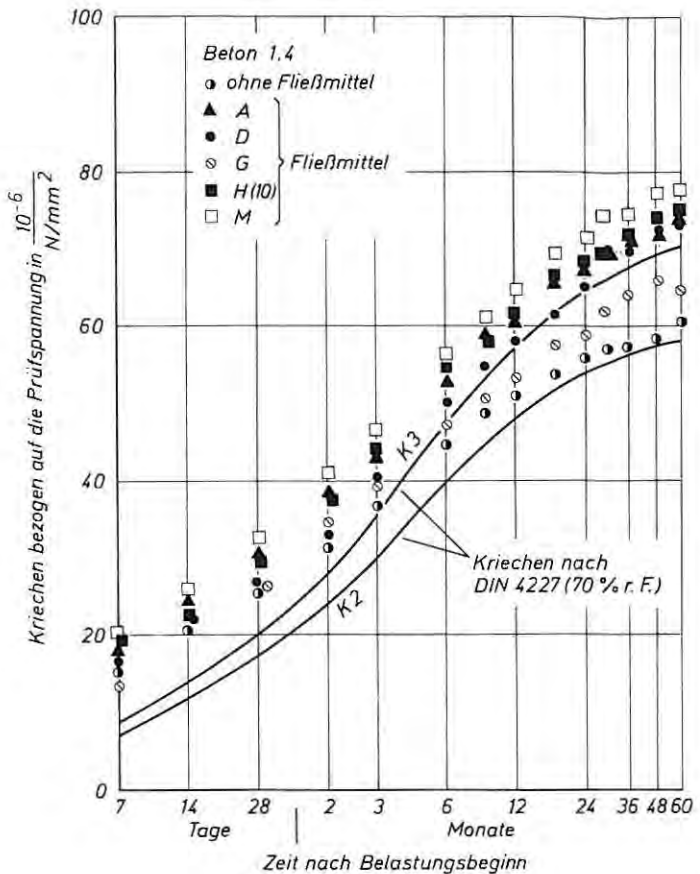


Bild 8b Mit Setzdehnmessler bestimmtes, auf die Prüfspannung bezogenes Kriechen von Beton 1.4 ohne und mit Fließmittel

Fließmittel G ein rd. 10 % größeres bezogenes Kriechen als der Beton mit Fließmittel A und ein rd. 30 % kleineres bezogenes Kriechen als der Beton mit Fließmittel D aufweisen. Ein größeres bezogenes Kriechen von Beton mit Fließmittel D wurde auch von Brooks, Wainwright und Neville [35] gefunden. Das auf die Prüfspannung bezogene Kriechen von Beton 2.1 war nach einer Belastungsdauer von 2 Jahren und mehr beim Ausgangsbeton im Mittel 16 % kleiner als das des Ausgangsbetons 1.1 und im Mittel ebenso groß wie das des Ausgangsbetons 1.4.

Vergleicht man trotz der deutlich größeren Fließmittelzugabemengen auch das Kriechen der fließmittelhaltigen Betone 2.1 mit dem der fließmittelhaltigen Betone 1.1 und 1.4, so ist für die Belastungsdauer von 2 Jahren und mehr das bezogene Kriechen von Beton 2.1 beim Fließmittel A im Mittel 28 % kleiner als das der Betone 1.1 und 1.4, bei Fließmittel G im Mittel 16 % kleiner als das von Beton 1.1 und

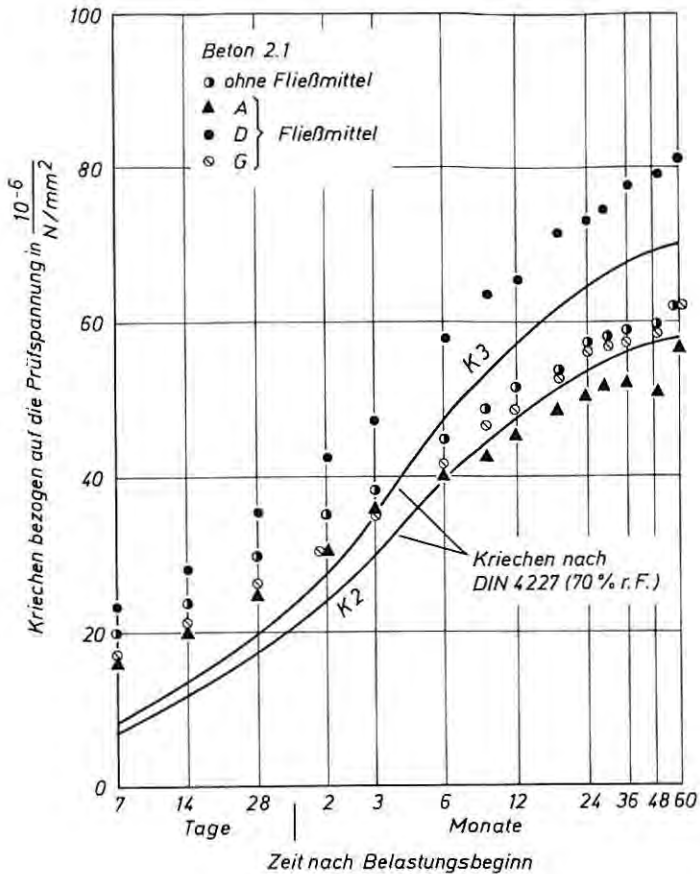


Bild 8 c Mit Setzdehnungsmesser bestimmtes, auf die Prüfspannung bezogenes Kriechen von Beton 2.1 ohne und mit Fließmittel

im Mittel 5 % kleiner als das von Beton 1.4 sowie bei Fließmittel D etwa so groß wie das von Beton 1.1 und im Mittel 11 % größer als das von Beton 1.4.

Die nach DIN 4227 Teil 1 (Dezember 1979) für 70 % rel. Luftfeuchtigkeit und die Konsistenzen K2 und K3 unter Zugrundelegen eines Elastizitätsmoduls von 34000 N/mm^2 errechneten bezogenen Kriechwerte lagen beim Beton 1.1 (Konsistenz des Ausgangsbetons Grenzbereich K2/K3) stets unterhalb der ermittelten Versuchsergebnisse. Bei den Betonen 1.4 (Konsistenz des Ausgangsbetons Grenzbereich K2/K3) und 2.1 (Konsistenz des Ausgangsbetons K2) lagen diese Werte nach einer Belastungsdauer von etwa 6 Monaten und mehr für die Konsistenz K2 nahe der unteren Grenze und für die Konsistenz K3 etwa in der Mitte des Bereichs der Versuchsergebnisse.

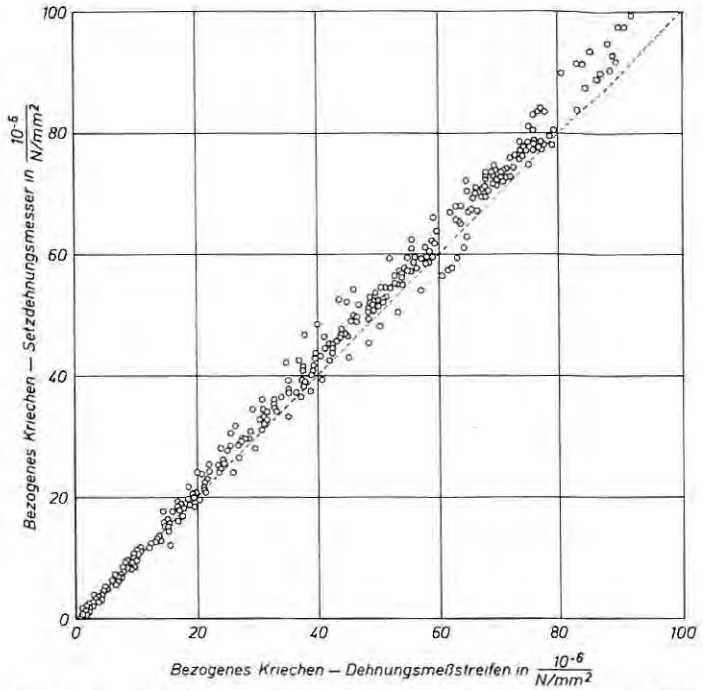


Bild 9 Zusammenhang zwischen dem mit Dehnungsmeßstreifen und dem mit Setzdehnungsmessern ermittelten, auf die Prüfspannung bezogenen Kriechen für Prüftermine von 1 Stunde bis zu 5 Jahren

Bild 9, in dem die bezogenen Kriechwerte bis zum Alter von 5 Jahren enthalten sind, macht deutlich, daß der Zusammenhang zwischen dem mit Dehnungsmeßstreifen und dem mit Setzdehnungsmessern bestimmten bezogenen Kriechen gut ist. Mit größer werdendem Kriechen wurde das mit Setzdehnungsmessern bestimmte bezogene Kriechen im Mittel jedoch geringfügig größer als das mit Dehnungsmeßstreifen bestimmte. Bei Langzeitverformungsmessungen, die nur mit Dehnungsmeßstreifen durchgeführt werden, sollte in größeren zeitlichen Abständen eine zusätzliche Messung mit einem Setzdehnungsmesser durchgeführt werden.

Zusammenfassend ist für das Kriechen herauszustellen, daß beim Ausgangsbeton (Beton ohne Fließmittel) das bezogene Kriechen vom Beton 1.1 ($z = 300 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,56$) größer als das etwa gleich große Kriechen der Betone 1.4 ($z = 350 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,49$) und 2.1 ($z = 380 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,40$), aber deutlich kleiner als das des zementleimreicheren Betons 1.7 ($z = 370 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,56$) ist. Wenn auch eine eindeutige und allgemeingültige Aussage über den Einfluß des Fließmittels auf das Kriechen von Beton aus den Versuchsergebnissen nicht abgeleitet werden kann, so ist dazu für die Belastungsdauer zwischen 2 und 5 Jahren und die einbezogenen Fließmittel jedoch festzustellen, daß das bezogene Kriechen bei den Betonen 1.1 und 1.4 mit den Fließmitteln A, M, D und H sowie beim Beton 2.1 mit

Fließmittel D stets deutlich größer und beim Beton 2.1 mit Fließmittel A kleiner war als das des zugehörigen Ausgangsbetons. Das bezogene Kriechen des Betons mit Fließmittel G entsprach bei allen untersuchten Betonen (1.1, 1.4 und 2.1) dem des zugehörigen Ausgangsbetons.

5.2.5 Wasserundurchlässigkeit

Die Wasserundurchlässigkeit von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel kann mit den Ergebnissen der Betone 1.1, 1.4, 1.7 und 2.1 beurteilt werden (siehe Tafel 8). Die größte Wassereindringtiefe nach DIN 1048 Teil 1 war innerhalb der Betongruppen nicht sehr unterschiedlich und lag für Beton 1.1 ($z = 300 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,56$) im Mittel bei 1,2 cm (Mittelwert der größten Wassereindringtiefe) und bei 2,1 cm (größter Einzelwert), für Beton 1.4 ($z = 350 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,49$) im Mittel bei 0,6 cm (Mittelwert der größten Eindringtiefe) und bei 1,5 cm (größter Einzelwert), für Beton 1.7 ($z = 370 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,50$) bei 0,5 cm (Mittelwert der größten Eindringtiefe) und bei 1,4 cm (größter Einzelwert) und für Beton 2.1 ($z = 380 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,40$) im Mittel bei 0,7 cm (Mittelwert der größten Eindringtiefe) und bei 1,2 cm (größter Einzelwert). Alle untersuchten Betone erfüllten bei der Wasserundurchlässigkeitsprüfung gut die Anforderungen der DIN 1045 sowohl für wasserundurchlässigen Beton (Mittelwert der größten Wassereindringtiefe nicht größer als 5 cm) als auch für Beton mit hohem Widerstand gegen starke chemische Angriffe (Mittelwert der größten Wassereindringtiefe nicht größer als 3 cm).

Sowohl der Mittelwert der größten Wassereindringtiefe als auch der größte Einzelwert war bei den Betonen 1.4, 1.7 und 2.1 etwas gerin-

Tafel 8 Wasserundurchlässigkeit (28 Tage)

Beton nach Tafel 3	Betonzusatzmittel nach Tafel 2	Größte Wassereindringtiefe nach DIN 1048	
		Mittelwert	Größtwert
		cm	
1.1	–	0,8	2,2
	A	0,8	1,6
	G	1,5	2,4
	H (10)	1,1	2,0
	H (15)	1,7	2,3
	M	1,0	2,2
1.4	–	0,2	2,0
	A	0,5	1,3
	D	0,7	1,5
	G	0,9	1,7
	H	0,8	1,3
	M	0,5	0,9
1.7	–	0,5	1,4
2.1	–/N	0,5	1,2
	A/N	0,9	1,5
	D/N	0,8	1,1
	G/N	0,5	1,1

ger als die vergleichbaren Werte bei Beton 1.1. Ein systematischer Unterschied zwischen dem Beton ohne Fließmittel und den Betonen mit Fließmittel hinsichtlich der Wassereindringtiefe war bei den untersuchten Betongruppen 1.1, 1.4 und 1.7 und 2.1 nicht feststellbar.

6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Bei den im Forschungsinstitut der Zementindustrie in den Jahren 1975 bis 1982 durchgeführten Untersuchungen über Zusammensetzung und Eigenschaften von leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel ergaben sich folgende Ergebnisse.

6.1 Betonzusammensetzung, Herstellung und Frischbetoneigenschaften

6.1.1 Zu geringe Feinmörtelmengen und zu hohe Feinsandgehalte behindern das Entstehen eines guten Fließvermögens. Für leicht verarbeitbaren Beton mit Fließmittel sollte der Zementgehalt 300 kg/m^3 nicht unterschreiten und die Kornzusammensetzung von Kiessandgemischen 0 bis 32 mm für eine möglichst große verflüssigende Wirkung in der oberen Hälfte des günstigen Siëblinienbereiches nach DIN 1045 liegen. Bei Zuschlaggemischen im brauchbaren Siëblinienbereich sind höhere Zementgehalte erforderlich. Für frühhochfesten Beton mit Fließmittel für Verkehrsflächen ist im allgemeinen ein Zementgehalt von mindestens 370 kg/m^3 notwendig.

6.1.2 Die verflüssigende Wirkung war bei der vom Hersteller empfohlenen Dosierung für die verschiedenen Fließmittel und Betone unterschiedlich. Eine Folgerung über den Einfluß der Grundstoffe der Fließmittel ließ sich daraus jedoch nicht ableiten. Das Ausbreitmaß der Betone mit Fließmittel nahm mit zunehmender Zeit nach Zumischen des Fließmittels unterschiedlich stark ab und erreichte je nach Fließmittel und Beton etwa 45 Minuten bis 2 Stunden nach dem Zumischen des Fließmittels die Werte des Ausgangsbetons.

6.1.3 Die verflüssigende Wirkung der Fließmittel und ihr Abbau mit der Zeit waren bei einer Betontemperatur von 20 und 30 °C etwa gleich, bei einer Betontemperatur von 5 °C jedoch deutlich geringer als bei 20 und 30 °C; diese Unterschiede waren auch abhängig vom Fließmittel.

6.1.4 Die Begrenzung des Ausbreitmaßes auf maximal 60 cm erwies sich zur Vermeidung von Entmischungen als eine für den Regelfall zweckmäßige und auf der sicheren Seite liegende Maßnahme.

6.1.5 Für die nachträgliche Zugabe des Fließmittels erwies sich beim 250-l-Tellermischer eine Mischzeit von mindestens 5 Minuten als erforderlich.

6.1.6 Die vorliegenden Versuche ergaben lediglich für zwei Fließmittel eine systematische Erhöhung des Frischluftgehaltes.

6.1.7 Orientierende Laboruntersuchungen lassen erwarten, daß leicht verarbeitbarer Beton mit Fließmittel auch bei Platten mit einer

Neigung von 3 % und etwas mehr ohne Einschalung der geneigten Oberfläche sachgerecht eingebaut werden kann, wenn die Betonzusammensetzung, die Konsistenz und das Einbauverfahren darauf abgestimmt werden und die Oberfläche der Unterlage hinreichend rau ist.

6.2 Festbetoneigenschaften

6.2.1 Die untersuchten leicht verarbeitbaren Betone wiesen im Mittel die gleiche Druckfestigkeit wie die dazugehörigen Ausgangsbetone auf. Die Anfangsfestigkeiten bis zum Betonalter von 2 Tagen waren etwas geringer als die des Ausgangsbetons, wenn ein Fließmittel mit verzögernder Wirkung verwendet wurde.

6.2.2 Die Spaltzugfestigkeit der leicht verarbeitbaren Betone mit Fließmittel war im Mittel geringfügig größer als die der Ausgangsbetone.

6.2.3 Der Druck-Elastizitätsmodul des leicht verarbeitbaren Betons mit Fließmittel entsprach bei empfohlener Fließmittelzugabe im Mittel etwa dem des Ausgangsbetons. Bei den frühhochfesten Betonen mit Fließmittel war er dagegen im Mittel etwas kleiner als der des Ausgangsbetons.

6.2.4 Das Schwinden der leicht verarbeitbaren Betone mit Fließmittel war bei den Betonen mit 300 kg/m^3 Zement (Beton 1.1) in etwa gleich groß wie das der dazugehörigen Ausgangsbetone. Größer als das des zugehörigen Ausgangsbetons war es aber teilweise bei den zementreicheren und immer bei den fließmittelreicheren Betonen. – Von den Ausgangsbetonen wies der Beton mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,56$ ein größeres Schwinden auf als die zementreicheren Betone mit kleinerem w/z -Wert.

6.2.5 Das Kriechen der leicht verarbeitbaren Betone mit Fließmittel war im allgemeinen gleich oder größer als das der dazugehörigen Ausgangsbetone. Eine allgemeingültige Aussage über den Einfluß der Fließmittelart auf das Kriechen ist aus den Versuchen jedoch nicht ableitbar.

6.2.6 Ein systematischer Unterschied zwischen der Wasserundurchlässigkeit des leicht verarbeitbaren Betons mit Fließmittel und des dazugehörigen Ausgangsbetons war aus den Versuchsergebnissen nicht abzuleiten.

SCHRIFTTUM

[1] Richtlinien für die Herstellung und Verarbeitung von Fließbeton, Fassung Mai 1974. beton 24 (1974) H. 9, S. 342/344; ebenso Betontechnische Berichte 1974, Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 143/149.

[2] Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton (ZTV Beton 78) sowie die Ergänzung zur ZTV Beton 78 über Fahrbahndecken aus Beton mit Fließmittel von 1980 (ZTV Beton, Erg. 80) und die Ergänzungen zur ZTV Beton 78 von 1982, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Allgemeine Rundschreiben Nr. 16/1978 vom 15. 12. 1978, Nr. 10/1980 vom 27. 5. 1980, Nr. 21/1982 vom 22. 7. 1982 und Nr. 24/1982 vom 15. 9. 1982.

- [3] Richtlinien für die Zuteilung von Prüfzeichen für Betonzusatzmittel, Fassung März 1973. Mitteilungen Institut für Bautechnik 4 (1973) Nr. 3, S 86/88.
- [4] Aignesberger, A., und H. Krieger: Zusatz von anionischen Melaminharzlösungen zu Zement und Gips. Zement-Kalk-Gips 21 (1968) H 10, S. 415/419.
- [5] Aignesberger, A., Th. Rey und W. Schräml: Elektronenmikroskopische Studien der Erhärtungsvorgänge von Zement mit Zusätzen von Melaminharzen. Zement-Kalk-Gips 22 (1969) H. 7, S 297/305.
- [6] Lehmann, H., und H. Dörr: Der Einfluß wasserlöslicher anionischer Melaminharzlösungen auf die Eigenschaften von Zementmörteln. Tonindustrie-Zeitung 96 (1972) H. 6, S. 143/149.
- [7] Breuckmann, K.: Fließbeton. Bauwirtschaft 27 (1973) H. 22, S. 933/935; ebenso Betonwerk + Fertigteil-Technik 39 (1973) H. 7, S. 517/519.
- [8] Freese, D., und B. Grunau: Beton in Abhängigkeit von der Verwendungsart. Baugewerbe 53 (1973) H. 13, S. 48/59.
- [9] Aignesberger, A., und H. G. Rosenbauer: Langzeitverhalten eines Betons mit Zusatz eines anionischen Melamin-Formaldehyd-Kondensationsproduktes. Tonindustrie-Zeitung 97 (1973) H. 8, S. 205/207.
- [10] Bonzel, J., und E. Siebel: Fließbeton und seine Anwendungsmöglichkeiten. Beton 24 (1974) H. 1, S. 20/24, und H. 2, S. 59/63; ebenso Betontechnische Berichte 1974, Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 21/44.
- [11] Wolf, H.: Fließbeton. Technologie und Anwendung. Der Deutsche Baumeister BDB (1974) H. 5, S. 335/337.
- [12] Nitsche, J. W.: Einsatz von Melment in Fertigteilwerken. Betonwerk + Fertigteil-Technik 40 (1974) H. 5, S. 356/358.
- [13] Lewandowski, R., und P. Peterfy: Superverflüssiger und Fließbeton-Herstellung. Bauwirtschaft 28 (1974) H. 29, S. 1265/1269, und H. 34, S. 1447/1452.
- [14] Rixom, M. R.: Development of an admixture to produce flowing or self-compacting concrete. Precast Concrete 5 (1974) H. 11, S. 633/637.
- [15] Aignesberger, A., und A. Tambour: Fließbeton – Herstellung und Anwendung. Zement und Beton 19 (1974) Nr. 77, S. 1/5.
- [16] Weber, R.: Fließbeton. Beton-Informationen des Montanzement-Verbandes (1974) H. 6, S. 75/83.
- [17] Hayek, E., und P. Dierkes: Röntgenografische Untersuchungen der Wirkung von Melment bei der Hydratation von Gips und den Zementphasen C_3A und C_2S . Melment-Symposium 1973. Süddeutsche Kalkstickstoffwerke AG, Trostberg, S. 5/24.
- [18] Van der Zanden, J. P. A. J.: Vloeibeton. Cement XXVII (1974) H. 4, S. 148/155.
- [19] Lewandowski, R.: Einsatz von Betonzusatzmitteln in Transportbetonwerken – Erfahrungen, Untersuchungen, Anforderungen. Bauwirtschaft 29 (1975) H. 20, S. 657/664.
- [20] Neville, A. M., und J. J. Brooks: Time-dependent behaviour of concrete containing a plasticiser. Concret 9 (1975) H. 10, S. 33/35.
- [21] Superplasticizing admixtures in concrete. Report of a Joint Working Party of the Cement Admixtures Association and the Cement and Concrete Association. Cement and Concrete Association, Wexham Springs 1976.
- [22] Bonzel, J.: Fließbeton. Zement-Taschenbuch 1976/77, Bauverlag, Wiesbaden 1976, S. 327/351.

- [23] Rauen, A.: Zum Wirkungsmechanismus von Betonverflüssigern auf der Basis von wasserlöslichen Melaminharzen. *Cement and Concrete Research* 6 (1976) H. 1, S. 57/61.
- [24] Braun, R.: Einsatz von Fließmitteln in Betonfertigteilwerken. *Neues vom Bau* 22 (1976) H. 2, S. 12/14, H. 3, S. 13/15, und H. 4, S. 16/18.
- [25] Müller, H.: Fließbeton in der Praxis. *Bauwirtschaft* 30 (1976) H. 9., S. 423/429, und H. 13, S. 620/624.
- [26] Superplasticizers – a new dimension in precasting. *Precast Concrete* 7 (1976) H. 8, S. 407/408.
- [27] Ketterer, B.: Anwendung von Fließbeton unter besonderer Berücksichtigung der notwendigen Verdichtung. *Baumaschine + Bautechnik* 23 (1976) H. 8, S. 404/406.
- [28] Hewlett, P., und R. Rixom: Superplasticised concrete. *Concrete* 10 (1976) H. 9, S. 39/42.
- [29] Kern, E., und H.-J. Koch: Anwendung von Fließbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 71 (1976) H. 12, S. 285/289.
- [30] Nischer, P.: Einführung von künstlichen Luftporen in Fließbeton. *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 43 (1977) H. 6, S. 285/288.
- [31] Fließbeton. *Cementbulletin* 46 (1978) Nr. 6.
- [32] Sasse, H. R., und H.-P. Preiß: Rationelle Estrichherstellung – F 44 – Forschungsbericht, angefertigt im Auftrag des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Januar 1978, Fraunhofer-Gesellschaft, IRB D003474.
Preiß, H.-P.: Fließmittel zur Herstellung von Fließmörteln. Effektivität und Kosten. *Baugewerbe* 60 (1980) H.6, S. 45/49.
- [33] Reul, H.: Rheologische Untersuchungen an Zementsuspension mit Fließmittel. *beton* 28 (1978) H. 10, S. 360/361.
- [34] Klug, P.: Verformungsverhalten von Beton mit Fließmittel. *beton* 29 (1979) H. 5, S. 175/177.
- [35] Superplasticizers in Concrete. *Proceedings of an International Symposium*, 29. bis 31. Mai 1978 in Ottawa, Kanada; herausgegeben von V. M. Malhotra, E. E. Berry und T. A. Wheat. Volume I und Volume II.
- [36] Becker, T.: Wirkungsmechanismus von Betonverflüssigern. Dissertation TU Clausthal. 1979.
- [37] Lukas, W.: Einfluß von Melment auf die Hydratation der Klinkerphasen im Zement. V. Internationales Melment-Symposium, München 1979.
- [38] Schubenz, D.: Dauerhafte Befestigung ländlicher Wege und Hofflächen. Fließbeton – eine neue wirtschaftliche Möglichkeit. *Beton-Landbau* 13 (1976) H. 1, S. 7/12.
- [39] Boertjes, J.: Fietspad te Hardenberg in vloei beton. *Cement XXVII* (1976) Nr. 3, S. 136/137.
- [40] Von Stosch, H.-J.: Frühhochfester Fließbeton im Straßenbau. *Strasse und Autobahn* 27 (1976) H. 6, S. 215/219.
- [41] Teubert, J.: Fließbeton als Straßenbeton. *Strasse und Autobahn* 27 (1976) H. 12, S. 480/483.
- [42] Kohout, O.: Erfahrungen beim Einsatz von Fließbeton für die Instandsetzung von Betonfahrbahndecken. *Zement und Beton* 22 (1977) H. 2, S. 48/50.
- [43] Schmincke, P.: Praxis des Fließbetons in der BRD. *Zement und Beton* 22 (1977) H. 2, S. 44/47.
- [44] Bermel, H. J., und J. Teubert: Fließbeton beim Bau einer Tankanlage. *beton* 27 (1977) H. 3, S. 89/92.

- [45] Bonzel, J.: Frühhochfester Beton mit Fließmittel für Verkehrsflächen. *beton* 27 (1977) H. 10, S. 394/399; ebenso *Betontechnische Berichte* 1977, Beton-Verlag, Düsseldorf 1978, S. 149/164.
- [46] Sommer, H.: Der erreichte Stand des Straßenbetons mit Fließmittel. *Zement und Beton* 23 (1978) H. 4, S. 155/158.
- [47] Löwenberg, H.: Fließbeton als neue Anwendungsmöglichkeit im Straßenbau. *Strasse und Autobahn* 28 (1977) H. 6, S. 223/227.
- [48] Blümel, O. W., und W. Lukas: Entmischungsuntersuchungen an einem Straßenbeton mit Fließmittel. Streiflichter vom Betonstraßenbau. AG „Betonstraßen“ der Forschungsgesellschaft Straßenwesen im Österreichischen Ingenieur- und Architektenverein (1978).
- [49] Streit, G.: Einbauverfahren für Fließbeton im Straßenbau. *Straße und Autobahn* 29 (1978) H. 7, S. 282/285.
- [50] Gauert, G.-E.: Auswechseln von Fahrbahndecken. Einbau von frühhochfestem Beton mit Fließmittel in Hamburg. *beton* 28 (1978) H. 9, S. 326/328.
- [51] Gierse, K., und A. Rühle: Eine Problemlösung für den kommunalen Straßenbau – Beton mit Fließmittel. *Strasse und Autobahn* 30 (1979) H. 1, S. 21/24.
- [52] Kohout, O.: Frühhochfester Straßenbeton mit Fließmittel. Erfahrungen in Österreich. *Straßen- und Tiefbau* 33 (1979) H. 3, S. 8/10.
- [53] Fließbeton im Straßenbau. Bericht 5 aus den Berichten vom XVI. Welt-Straßenkongreß vom 16. bis 21. 9. 1979 in Wien.
- [54] Meyer, A., u. M. Lütkehaus: Stabilisatoren – Eine neue Möglichkeit zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften. *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 43 (1977) H. 6, S. 289/293.
- [55] Bonzel, J., u. E. Siebel: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. *beton* 27 (1977) H. 4, S. 153/157, H. 5, S. 205/211, und H. 6, S. 237/244; ebenso *Betontechnische Berichte* 1977, Beton-Verlag, Düsseldorf 1978, S. 55/104.
- [56] Malhotra, V. M.: Developments in the Use of Superplasticizers. Second International Conference on Superplasticizers in Concrete. Ottawa 1981, American Concrete Institute. Publication SP-68, Detroit 1981.
- [57] Goretzki, L., und O. Henning: Zum Wirkungsmechanismus der Verflüssigung von Frischmörteln durch Tenside. *Tonindustrie-Zeitung* 106 (1982) H. 9, S. 654/657.
- [58] Gutsche, H. K., und M. Hermanns: Einbauverfahren für Beton mit Fließmittel. Forschungsbericht T. A. 8.060 G 79 M des Bundesministeriums für Verkehr, Bonn.