

Erweiterte Grundlagen für die Betonzusammensetzung

Extended basis for concrete composition

Volker Hanke, Eberhard Siebel; Düsseldorf

Übersicht

Die Art der Ausgangsstoffe sowie deren mengenmäßige Anteile in der Betonzusammensetzung sind von entscheidender Bedeutung für die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Regeln für den Mischungsentwurf basieren auf empirisch gefundenen Zusammenhängen, wie z.B. der Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Wasserzementwert.

Die zielgerechte Betonherstellung in stationären Anlagen der Transportbeton-, Betonwaren- oder Betonfertigteilindustrie erfordert die Kenntnis aller maßgebenden Zusammenhänge zwischen einerseits den Ausgangsstoffen und der Mischungszusammensetzung sowie andererseits den Frisch- und den Festbetoneigenschaften. Im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, wurde hierzu ein Versuchsprogramm durchgeführt, mit dem, ausgehend von den Haupteinflußgrößen Wasserzementwert und Zementnormfestigkeit, weiteren durch die Zuschlagsieblinie und durch Betonzusatzstoffe bedingten Einflüssen nachgegangen wurde. Darüber hinaus wurde ein einfacher Rechenansatz entwickelt, der unter Berücksichtigung praxisrelevanter, leicht zu bestimmender Kennwerte der Betonausgangsstoffe eine verbesserte Vorhersage der Betondruckfestigkeit ermöglicht.

1 Einleitung

Die Umstellung der früher üblichen Herstellung des Betons auf der Baustelle auf die heute überwiegend praktizierte industrielle Fertigung in Transportbeton- und Betonfertigteilwerken ist mit neuen Fragestellungen verbunden, deren Beantwortung zu erweiterten Erkenntnissen in der Betontechnologie führt. Voraussetzung für eine gezielte industrielle Betonherstellung ist eine möglichst zuverlässige Kenntnis des Einflusses der einzelnen Ausgangsstoffe des Betons auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften.

Bei der industriellen Betonherstellung werden höhere Anforderungen an die Zuverlässigkeit gestellt, mit der die Frisch- und Festbetoneigenschaften bei Verwendung der jeweils vorhandenen Betonausgangsstoffe zu erreichen sind. Die vielfältige Betonanwendung fordert Betone mit sehr unterschiedlichen Leistungsmerkmalen, wodurch sich die Zahl der anzubietenden Betonsorten erhöhte. Die Auswirkungen vorgegebener Schwankungen der Ausgangsstoffe müssen beherrscht und bei der täglichen Betonherstellung ohne erneute Eignungsprüfungen berücksichtigt werden. Zusätzlich erfordern wechselnde Transport- und Verarbeitungsbedingungen kurzfristige Anpassungen der Mischungszusammensetzung, besonders hinsichtlich der geforderten Verarbeitungseigenschaften.

Die hier dargestellten Untersuchungen wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführt und von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) finanziell gefördert.

2 Stand der Erkenntnisse

Der klassische Betonentwurf basiert in erster Linie auf Erkenntnissen von Abrams [1] und wurde in den 50er Jahren von Walz [2] weiterentwickelt. In dieser Zeit wurde der Beton fast ausschließlich aus Zement, Zuschlag und Wasser zusammengesetzt und auf der Baustelle gemischt. Maßgebende Frisch- und Festbetoneigenschaften waren die Konsistenz und die Druckfestigkeit. Die Betonzusammensetzung wurde auch in den folgenden Jahren nach den bekannten Regeln festgelegt, die für die Bestimmung des notwendigen Wassergehalts, des zur Erzielung der geforderten Betonfestigkeit erforderlichen Wasserzementwertes sowie des sich aus der Stoffraum-

Abstract

The nature of the basic materials and their quantitative proportions in the concrete compositions are of crucial importance for the properties of unset and hardened concrete. Rules for the mix design are based on empirical relationships such as, for example, the dependence of compressive strength on the water/cement ratio.

Concrete production for a specific purpose in plants in the ready-mixed concrete, concrete product, or precast concrete element industries requires a knowledge of all the influential relationships between the starting materials and the mix composition on the one hand, and the properties of the unset and hardened concrete on the other. A test programme was carried out at the Research Institute of the Cement Industry in Düsseldorf for this purpose; it started from the main influencing variables of water/cement ratio and standard strength of the cement, and investigated other influencing factors caused by the aggregate grading curve and the concrete additions. A simple calculation formula was also developed which used practical, easily determined, characteristic values of the concrete starting materials to enable a better prediction to be made of the concrete strength.

1 Introduction

The change from the previous custom of producing concrete on site to the current practice of industrial production in ready-mixed concrete and precast concrete element plants has thrown up new problems, and solving these problems is leading to a wider understanding of concrete technology. One precondition for accurately controlled industrial concrete production is an extremely dependable understanding of the effects of the individual basic materials in the concrete on the properties of the unset and hardened concrete.

During industrial production of concrete quite high standards are set for the reliability with which the properties of the unset and hardened concrete can be achieved when using the particular basic concrete materials available. The wide variety of concrete applications requires concretes with very different performance characteristics, which increases the number of types of concrete on offer. The effects of fluctuations inherent in the basic materials must be controlled and taken into account during routine concrete production without repeated suitability tests. Changing transport and working conditions also require short-term adjustments of the mix composition, especially with respect to the required workability properties.

The investigations described here were carried out at the Research Institute of the Cement Industry and were assisted financially by the AiF (Syndicate of Industrial Research Associations).

2 Current state of knowledge

Classical concrete design is based primarily on the findings of Abrams [1] and was developed further in the 50s by Walz [2]. At that time the concrete consisted almost exclusively of cement, aggregate and water, and was mixed on site. The important properties of the unset and hardened concrete were its consistency and compressive strength. In subsequent years the concrete composition was also laid down in accordance with the known rules which applied to the determination of the required water content, of the water/cement ratio needed to achieve the required concrete strength, and of the quantities of cement and aggregate given by calculation of the mate-

rechnung ergebenden Zement- und Zuschlaggehalts gelten [3, 4]. Mit Eignungsprüfungen war nachzuweisen, daß die geforderten Eigenschaften erreicht wurden.

Die Erfahrungswerte für den erforderlichen Wassergehalt zum Erreichen einer bestimmten Zielkonsistenz sind Mittelwerte und führen im Einzelfall zu Abweichungen von bis zu $\pm 15 \text{ l/m}^3$. Ähnliches gilt für die Druckfestigkeit. Der Zusammenhang zwischen der auf die Normfestigkeit des Zements bezogenen Betondruckfestigkeit und dem Wasserzementwert ist in Bild 1 aufgetragen. Darin ist neben Versuchsdaten unterschiedlicher Quellen die 5%-Fraktile der von Walz berücksichtigten Versuchsergebnisse [5] eingetragen. Diese Kurve wird bisher als Grundlage für den Mischungsentwurf im Hinblick auf die Druckfestigkeit herangezogen. Das Bild verdeutlicht, daß bei einem konstanten Wasserzementwert im Einzelfall Abweichungen der zu erwartenden Betondruckfestigkeit von bis zu 100% auftreten können. Für eine industrielle Betonherstellung ist eine solche Basis nicht mehr ausreichend. Hinzu kommt, daß neue Ausgangsstoffe verfügbar wurden [6 bis 14].

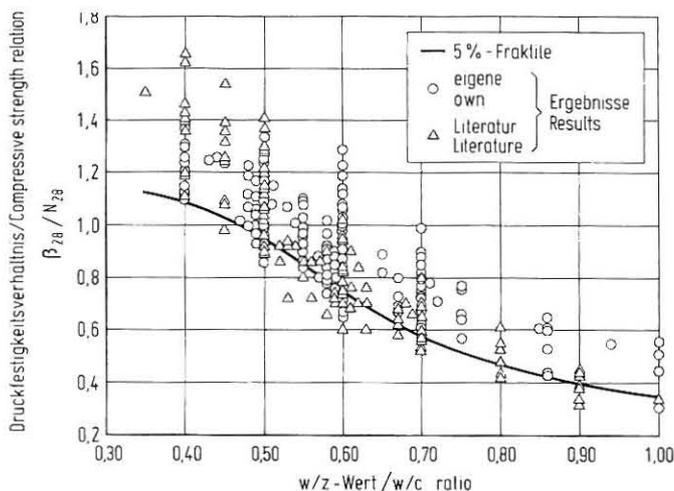


Bild 1 Zusammenhang zwischen Wasserzementwert und der auf die Zementnormfestigkeit N_{28} bezogenen Betondruckfestigkeit β_{28}

Fig. 1 Relation between the water-cement ratio and the standard strength of the cement N_{28} related to the compressive strength of concrete β_{28}

So muß das bisherige 3-Stoff-System Zement/Zuschlag/Wasser wegen des Einsatzes von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln auf ein 5-Stoff-System erweitert werden. Die Zusammenhänge werden wesentlich komplexer, da die einzelnen Ausgangsstoffe nicht nur jeder für sich die Eigenschaften des Betons beeinflussen, sondern sie sich auch gegenseitig in ihrer Wirksamkeit beeinflussen können.

3 Ziel und Umfang der Untersuchung

Da die Abschätzung des erforderlichen Wassergehaltes anhand der Sieblinie und der angestrebten Druckfestigkeit anhand der Wasserzementwert-Kurve nicht mehr ausreicht, wurden für die Zielgrößen Verarbeitbarkeit und Druckfestigkeit die wesentlichen Abhängigkeiten gezielter untersucht. Dabei wurden nur solche Kenngrößen einbezogen, die einen dominierenden Einfluß auf die zu erzielenden Betoneigenschaften besitzen und die sich zudem einfach, schnell, mit vertretbarem Aufwand und nach Möglichkeit direkt bestimmen oder hinreichend genau abschätzen lassen. Dies sind die Zementleimmenge sowie Kennwerte der Zuschlagsieblinien und der verschiedenen Zusatzstoffe.

Die Dauerhaftigkeit wurde in den vorliegenden Untersuchungen nur durch einige wenige Tastversuche zum Frostwiderstand erfaßt. Den Fragen der Dauerhaftigkeit von Betonen gleicher Festigkeit, aber mit sehr unterschiedlichen Zusammensetzungen gehen weitere Arbeiten im Forschungsinstitut nach. Über sie wird zu einem späteren Zeitpunkt berichtet. Auch der Einfluß von Fließmittel auf Konsistenz und Zusammenhaltevermögen wird in einem getrennten Bericht dargestellt [15].

rial volume [3, 4]. Suitability tests had to be used to prove that the required properties had been achieved.

The empirical values for the water content required to achieve a certain target consistency are average values and in individual instances lead to deviations of up to $\pm 15 \text{ l/m}^3$. The same applies to compressive strength. The relationship between the concrete compressive strength relative to the standard strength of the cement and the water/cement ratio is plotted in Fig. 1. The plot includes not only test data from various sources but also the 5% fractile of the test results considered by Walz [5]. Until now this curve has been used as the basis for mix design with respect to compressive strength. The diagram makes it clear that in individual instances deviations of up to 100% may occur in the expected concrete compressive strength at a constant water/cement ratio. Such a basis is no longer adequate for industrial concrete production. Added to this is the fact that new basic materials have become available [6 to 14].

The previous 3-material system of cement, aggregate and water must be extended to a 5-material system because of the use of additions and admixtures. The relationships become considerably more complex, as not only do each of the individual starting materials influence the properties of the concrete but they can also have a mutual effect on each other.

3 Objective and scope of the investigation

It is no longer sufficient to estimate the required water content from the grading curve, or the target compressive strength from the water/cement ratio curve, so the essential relationships were investigated in greater detail for the target variables, namely workability and compressive strength. Only those parameters were included which have a dominant influence on the concrete properties to be achieved and which, in addition, can be determined simply, rapidly, with justifiable expenditure and, if possible, directly, or else estimated with sufficient accuracy. These are the quantity of cement paste and the parameters of the aggregate grading curves and of the various additions.

In these investigations the durability was only covered by a few exploratory trials of freeze-thaw resistance. The question of the durability of concretes of equal strength but with very different compositions is being examined in further work at the Research Institute, and a report on this subject will be made later. The influence of plasticizing agents on consistency and cohesive ability is also described in a separate report [15].

4 Test procedure

4.1 Basic materials

4.1.1 Cement

Portland and blastfurnace cements of the Z 35 and Z 45 strength classes were used which were representative of the cements manufactured in Germany as far as chemical and mineralogical composition and particle size distribution were concerned. The results of the cement tests are listed in Tables 1 to 3.

4.1.2 Additions

The additions used were two registered coal fly ashes with test marks, three quartz fines with different levels of fineness, and limestone fines. The chemical compositions of the fly ashes are listed in Table 1, and the physical properties of all the additions in Table 2.

4.1.3 Aggregate and mixing water

Rhenish gravel and sand in the 0/2 mm, 2/8 mm, 8/16 mm and 16/32 mm size fractions from the Düsseldorf area, and 0/0.25 quartz fines and 0/1 mm quartz sand from the Cologne area were used as aggregate. Tap water was used for the mixing water.

4.2 Concrete composition and production

To assess the influence of the grading curves these were varied systematically between A 32 and C 32. The additions mentioned in Section 4.1.2 were added to determine the influence of the fines (see Table 4), and concretes with A/B 16 grading curves were produced.

Tafel 1
Chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Zemente und der Flugaschen in Gew.-%

Table 1
Chemical and mineralogical composition of the cements and the fly ashes in weight-%

	Zement / Cement					Flugasche Fly ash	
	PZ 35 F	PZ 45 F	HOZ 35 L – NW/HS	HOZ 35 L	HOZ 45 L	A	B
Glühverlust Loss of ignition	2,3	2,6	1,9	1,8	1,5	2,4	1,2
SiO ₂	21,1	21,4	30,1	26,7	25,9	50,0	44,5
Al ₂ O ₃	6,4	5,3	10,2	8,5	7,1	27,7	29,8
TiO ₂	0,3	0,4	0,7	0,6	0,4	1,2	1,2
P ₂ O ₅	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4
Fe ₂ O ₃	2,7	2,5	1,0	1,9	1,8	9,2	9,9
Mn ₂ O ₃	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
CaO	64,0	64,6	47,8	53,6	57,6	3,0	5,1
MgO	1,2	1,3	6,2	4,7	4,1	3,1	2,6
SO ₃	2,8	3,0	2,1	2,2	1,2	0,3	1,5
K ₂ O	1,1	1,2	0,8	0,8	0,7	4,7	3,8
Na ₂ O	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,6	1,2
C ₃ S	43,0	48,9					
C ₂ S	28,1	24,5					
C ₃ A	13,3	11,2					
C ₄ AF	8,4	7,7					
Hüttensandgehalt Slag content			71	55	38		

4 Versuchsdurchführung

4.1 Ausgangsstoffe

4.1.1 Zement

Es wurden Portland- und Hochofenzemente der Festigkeitsklassen Z 35 und Z 45 verwendet, die hinsichtlich der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung sowie ihrer Kornverteilung ein mittleres Verhalten der in Deutschland hergestellten Zemente aufwiesen. Die Ergebnisse der Zementprüfung sind in den Tafeln 1 bis 3 zusammengestellt.

4.1.2 Zusatzstoffe

Als Zusatzstoffe kamen zwei zugelassene Steinkohlenflugaschen mit Prüfzeichen, drei Quarzmehle unterschiedlicher Feinheit und ein Kalksteinmehl zur Anwendung. Die chemische Zusammensetzung der Flugaschen ist in Tafel 1, die physikalischen Eigenschaften aller Zusatzstoffe sind in Tafel 2 zusammengestellt.

4.1.3 Zuschlag und Zugabewasser

Als Zuschlag wurde Rheinkiessand der Fraktionen 0/2 mm, 2/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm aus dem Raum Düsseldorf und Quarzmehl 0/0,25 mm und Quarzsand 0/1 mm aus dem Raum Köln verwendet. Als Zugabewasser wurde Leitungswasser verwendet.

The concrete was mixed for 2 minutes in batches of about 100 l in a 150 l laboratory pan-type mixer.

For the compressive strength and freeze-thaw tests and for determining the air content by the pressure method the concrete was fully compacted in steel moulds or the pressure vessel on a vibrating table (3000 rpm, vibration amplitude ± 1 mm).

All concrete test pieces were stored as specified in DIN 1048, i.e. they remained for 24 hours in the work room at about 20 °C under moist cloths until demoulded, then for 6 days moist in a cloud chamber at 20 °C at about 100% r.h. – the 10 cm cubes for measuring the freeze-thaw resistance were stored in water – and then in the climatic chamber at 20 °C and 65% r.h. until tested.

4.3 Tests

4.3.1 Unset concrete

The consistency of the unset concrete was determined 10 min after producing the concrete, using the flow test as specified in DIN 1048. For the stiffer unset concretes the compaction test specified in DIN 1048 was carried out after 10 minutes instead of the flow test. The air content of the unset concrete was measured 5 min after production, using the pressure equalization test method (air void test equipment) as specified in DIN 1048.

Zement / Zusatzstoffe Cement / Addition	Rohdichte Density kg/dm ³	Spez. Oberfläche Specific surface cm ² /g	Anteil in Gew.-% Content weight-%				Wasseranspruch Water demand DIN EN 196 Gew.-%	
			<8 μm	<16 μm	<32 μm	<64 μm		
PZ 35 F	3,12	3310	29	45	67	93	28,0	
PZ 45 F	3,11	4020	37	56	87	100	31,0	
HOZ 35 L–NW/HS	2,95	3870	36	55	83	100	27,0	
HOZ 35 L	3,02	3310	29	45	71	96	26,5	
HOZ 45 L	3,01	4000	36	52	77	99	25,5	
Flugasche / Fly ash A	2,44	4090	60	37	86	94	19,0	
Flugasche / Fly ash B	2,23	3270	21	41	64	82	31,0	
Quarzmehl Quartz fines	{ grob / coarse mittel / middle fein / fine	2,64	1070	9,5	15	25	46	27,5
		2,64	5280	42	69	93	100	36,0
		2,65	14500	92	99	99	100	36,0
Kalksteinmehl / Limestone fines	2,72	4810	44	72	95	100	28,5	

Tafel 2
Physikalische Eigenschaften der Zemente und Zusatzstoffe

Table 2
Physical properties of the cements and the additions

4.2 Betonzusammensetzung und -herstellung

Zur Beurteilung des Einflusses der Sieblinien wurden diese zwischen A 32 und C 32 systematisch verändert. Zur Ermittlung des Feinstkorneinflusses wurden die in Abschnitt 4.1.2 genannten Zusatzstoffe zugegeben (siehe Tafel 4) und Betone mit der Sieblinie A/B 16 hergestellt.

Der Beton wurde in Chargen von rd. 100 l in einem 150-l-Laborzwangsmischer 2 min lang gemischt.

Für die Druckfestigkeits- und Frostprüfung bzw. die Bestimmung des Luftgehalts mit dem Druckausgleichverfahren wurde der Beton in Stahlformen bzw. im Drucktopf auf einem Rütteltisch (3000 U/min, Schwingungsbreite ± 1 mm) vollständig verdichtet.

Alle Betonprüfkörper wurden gemäß DIN 1048 gelagert, d. h. sie verblieben bis zum Entformen 24 Stunden im Arbeitsraum bei rd. 20° C unter feuchten Tüchern, dann 6 Tage feucht in einer Nebelkammer bei 20° C sowie rd. 100% r.F. – die 10-cm-Würfel zur Bestimmung des Frostwiderstandes in Wasser – und anschließend bis zur Prüfung im Klimaraum bei 20° C sowie 65% r.F.

4.3 Prüfungen

4.3.1 Frischbeton

Die Frischbetonkonsistenz wurde mit Hilfe des Ausbreitversuches nach DIN 1048 10 min nach der Betonherstellung ermittelt. Für die steiferen Frischbetone wurde anstelle des Ausbreitversuches der Verdichtungsversuch nach DIN 1048 nach 10 min durchgeführt. Die Luftgehalte der Frischbetone wurden rd. 5 min nach der Herstellung mit dem Druckausgleichverfahren (LP-Topf) nach DIN 1048 ermittelt.

4.3.2 Festbeton

Die Betonfestigkeit wurde als Mittel aus drei 15-cm-Würfeln im Alter von 2, 7, 28 und 91 Tagen nach DIN 1048 bestimmt. Der Frostwiderstand wurde in einigen Zusatzversuchen mit dem Würfelverfahren [16, 17] ermittelt.

5 Darstellung und Erörterung der Versuchsergebnisse

5.1 Allgemeines

Beton ist ein Verbundwerkstoff, bei dem die Zuschläge in einem als Matrix bezeichneten Feinmörtel eingebettet und durch diesen kraftschlüssig miteinander verbunden werden. Dieser wie ein Kleber wirkende Feinmörtel setzt sich aus Zement, Wasser und Feinstbestandteilen des Sandes ($\leq 0,125$ mm) und ggf. Zusatzstoffen und Zusatzmitteln zusammen. Sowohl die Menge des Feinmörtels als auch seine Zusammensetzung beeinflussen Konsistenz und Druckfestigkeit des Betons. Zur Veranschaulichung der zum Teil gegenläufigen Tendenzen – Verbesserung der Verarbeitbarkeit und Reduzierung der Druckfestigkeit – wird, soweit möglich, der Einfluß jeweils eines Parameters auf Konsistenz und Druckfestigkeit des Betons zusammenhängend behandelt.

5.2 Zusammenhang zwischen Zementnormfestigkeit und Betondruckfestigkeit

Die Beziehung zwischen dem Wasserzementwert und der auf die Normfestigkeit des Zements bezogenen Druckfestigkeit des Betons setzt einen ausreichend guten Zusammenhang zwischen Zementnormfestigkeit und Betondruckfestigkeit voraus. Für die vorliegenden Zemente wurde dieser Zusammenhang näher untersucht. Die in Bild 2 aufgetragenen Ergebnisse zeigen für die 2- und 7-Tage-Festigkeit eine enge Korrelation zwischen der Druckfestigkeit der Zementmörtelprismen und der Betonwürfel. Für die 28- und 91-Tage-Festigkeiten ist diese Korrelation weniger gut, was mit folgenden Einflüssen zusammenhängt: Durch die Wasserlagerung der Zementmörtelprismen bis zur Prüfung und der davon ab 8. Tag abweichenden Klimaraumlagerung (20/65) der Betonwürfel erreichen die Mörtelprismen einen höheren Hydratationsgrad. Der dadurch eintretende Festigkeitserfolg wird jedoch durch die Prüfung im wassergesättigten Zustand gemindert. Diese beiden gegenläufigen Einflüsse sind bei verschiedenen Zementen unterschiedlich stark ausgeprägt. Insgesamt besteht bei jeweils gleicher Betonzusammensetzung ein ausreichend guter Zusammenhang zwischen Zementnorm- und Be-

Tafel 3 Erstarren und Zementnormfestigkeit der Zemente (DIN EN 196)

Table 3 Setting and standard strength of the cements (DIN EN 196)

Zement Cement	Erstarren Setting		Zementnormfestigkeit im Alter von Cement strength at the age of			
	Beginn Start h	Ende End h	2 d	7 d	28 d	91 d
PZ 35 F	2:10	3:00	25,1	38,1	45,8	52,3
PZ 45 F	2:30	3:20	33,8	46,5	56,0	60,1
HOZ 35 L–NW/HS	4:00	5:00	9,3	28,5	47,1	57,0
HOZ 35 L	3:00	4:00	16,4	32,4	48,7	63,8
HOZ 45 L	2:40	3:20	19,2	37,5	56,2	66,6

Tafel 4 Mischungszusammensetzungen zur Untersuchung des Feinststoffeinflusses

Table 4 Different mix designs to test the influence of fines

Zusatzstoff Addition	Wasser- gehalt Water content l/m ³	Zement- gehalt Cement content kg/m ³	Wasser- zementwert Water- cement ratio	Zusatzstoff- gehalt Content of addition kg/m ³
Quarzmehl grob	162-240	257-600	0,40-0,70	0-250
Quarzmehl mittel	180	257-360	0,50-0,70	0-160
Quarzmehl fein	180-220	257-440	0,50-0,70	0-260
Kalk- steinmehl	180-220	257-440	0,50-0,70	0-260
Flugaschen	173-200	150-500	0,40-1,20	0-200

4.3.2 Hardened concrete

The concrete strength was determined as the average value from three 15 cm cubes at the ages of 2, 7, 28 and 91 days in accordance with DIN 1048. The freeze-thaw resistance was measured in a few additional trials using the cube method [16, 17].

5 Description and discussion of the test results

5.1 General

Concrete is a composite material in which the aggregates are embedded in a fine mortar, described as the matrix, which binds them non-positively together. This very fine mortar, which acts like an adhesive, is composed of cement, water and the very fine constituents of the sand ($\leq 0,125$ mm) and also, if applicable, of the additions and admixtures. The quantity and composition of the fine mortar both affect the consistency and compressive strength of the concrete. To illustrate the sometimes opposing trends – improvement of workability and reduction in compressive strength – the influence of each parameter on the consistency and compressive strength of the concrete is, as far as possible, dealt with one at a time but coherently.

5.2 Connection between cement standard strength and concrete compressive strength

The relationship between the water/cement ratio and the compressive strength of the concrete relative to the standard strength of the cement presupposes that there is a sufficiently good connection between cement standard strength and concrete compressive strength. This connection was investigated more closely for the cements used. The results plotted in Fig. 2 show a close correlation between the compressive strengths of the cement mortar prisms and of the concrete cubes for the 2- and 7-day strengths. This correlation is less good for the 28- and 91-day strengths, which involves the following

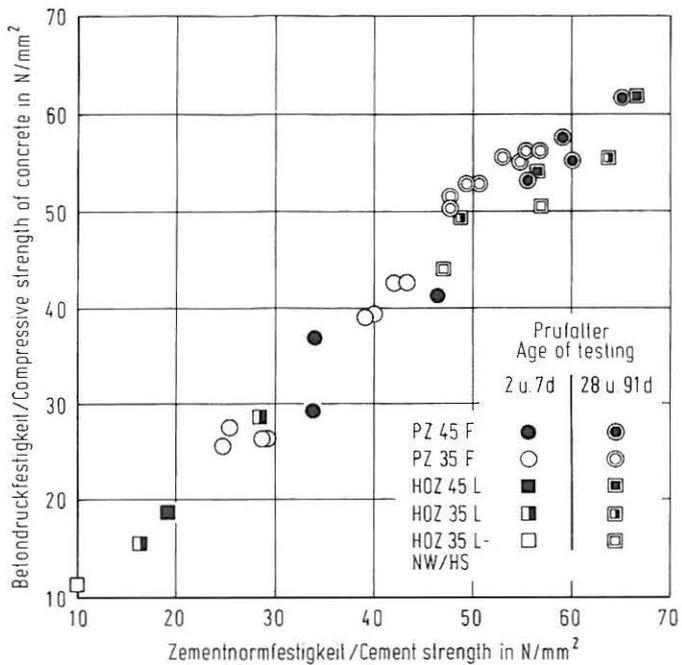


Bild 2 Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Zementnormfestigkeit im Alter von 2 bis 91 Tagen für unterschiedliche Zemente

Fig. 2 Relation between compressive strength of concrete and standard strength of cement at the age of 2 to 91 days for different cements

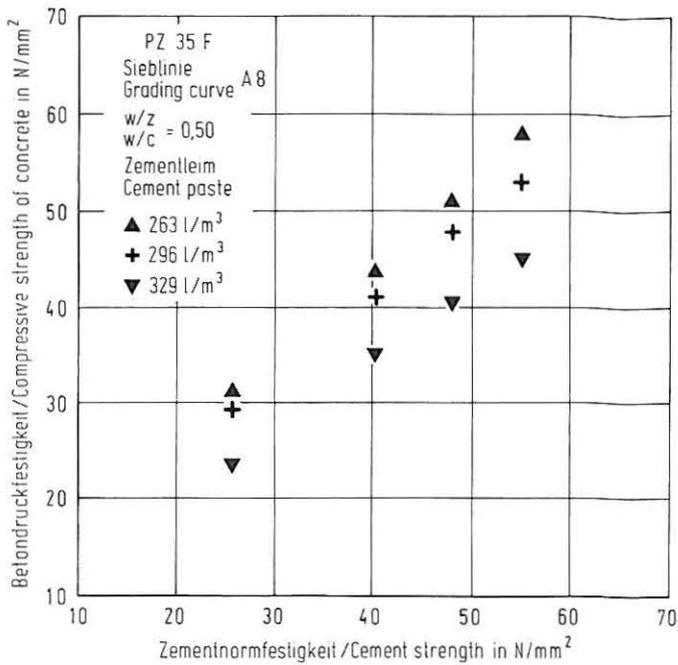


Bild 3 Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Zementnormfestigkeit im Alter von 2 bis 91 Tagen für unterschiedliche Zementleimgehalte

Fig. 3 Relation between compressive strength of concrete and standard strength of cement at the age of 2 to 91 days for different contents of cement paste

tondruckfestigkeit für die untersuchten Zemente. Wenn die Mischungsparameter der Betonzusammensetzung, d.h. Zementgehalt, w/z-Wert und Sieblinie, verändert werden, geht diese enge Korrelation verloren. Wird z.B. der Zementleimgehalt geändert (siehe Bild 3), so ändert sich die Beziehung zwischen Zement- und Betonfestigkeit. Mit zunehmender Zementleimmenge sinkt die Betondruckfestigkeit etwas ab. Dieser Einfluß wird im folgenden näher untersucht.

5.3 Einflüsse auf Konsistenz und Festigkeit

5.3.1 Zementleimmenge und -zusammensetzung

Bild 4 oben zeigt anhand des Ausbreitmaßes den Einfluß des Zementleimgehaltes bei drei verschiedenen Wasserzementwerten aber sonst gleicher Betonzusammensetzung auf die Konsistenz. Erwartungsgemäß steigt das Ausbreitmaß bei diesen w/z-Werten mit zunehmendem Zementleimgehalt auch für zementreiche Mischungen annähernd proportional an. Die Konsistenz („Beweglichkeit“) des Zementleims hat hierbei einen Einfluß. Um das Ausbreitmaß von 40 auf 50 cm zu erhöhen, war bei einem w/z-Wert von 0,40 eine Zugabe von rd. 60 l Zementleim und bei einem w/z-Wert von 0,60 von rd. 35 l Zementleim erforderlich. Anzumerken ist, daß ein gleiches Ausbreitmaß bei unterschiedlichen Betonzusammensetzungen nicht unbedingt ein Indiz für gleiche Verarbeitbarkeit in der Praxis ist. Um diese Zusammenhänge aufzuhellen, sind weitergehende Untersuchungen, z.B. mit einem Betonviskosimeter, erforderlich [18, 19].

Wie vorher erwähnt, hängt die Betondruckfestigkeit nicht nur von der Zusammensetzung bzw. Qualität des als Kleber bezeichneten Zementleims, d.h. von dessen w/z-Wert, sondern auch von der Kleberdicke ab, die durch den Zementleimgehalt verändert wird. Eine Erhöhung des Zementleimgehaltes führte bei unterschiedlichen w/z-Werten zu einer ungefähr gleichen Minderung der Betondruckfestigkeit (Bild 4 unten). Eine Zementleimerhöhung um 10 l/m³ ergab eine Abnahme der Druckfestigkeit von etwa 1 N/mm². Somit führt eine deutliche Vergrößerung des Ausbreitmaßes durch eine Erhöhung des Zementleimgehaltes nur zu einer relativ geringen Festigkeitseinbuße. Diese Gesetzmäßigkeit gilt nur für übliche Zusammensetzungen von Konstruktionsbetonen.

5.3.2 Sieblinie

Als weitere Einflußgröße wurden unterschiedliche Zuschlagsieblinien in ihrer Auswirkung auf Frischbetonkonsistenz und Festigkeit unter-

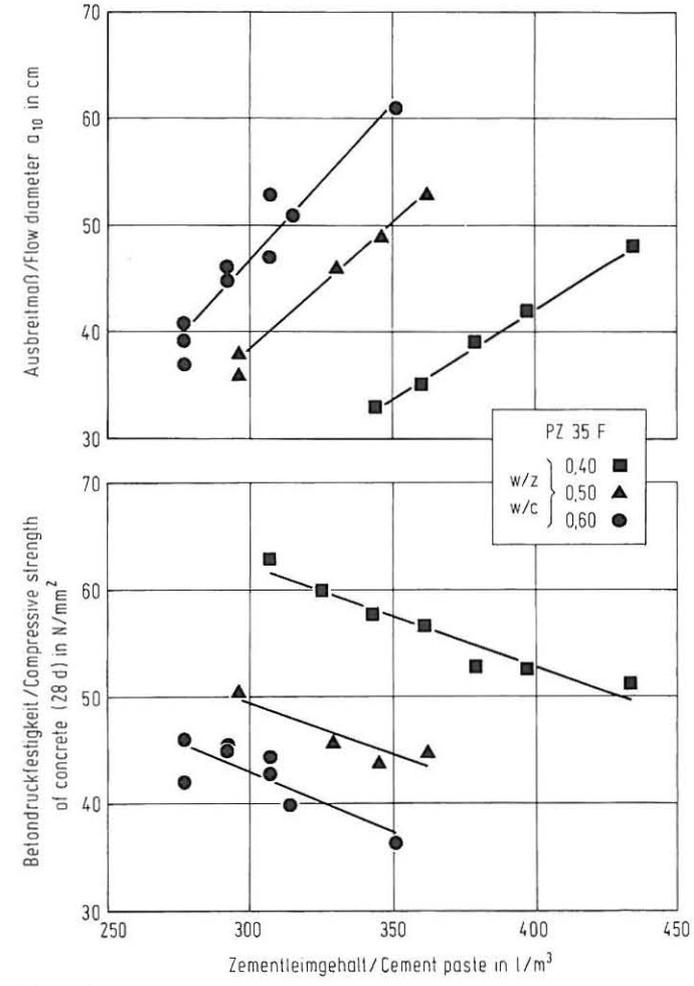


Bild 4 Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß (oben) bzw. Betondruckfestigkeit (unten) und Zementleimgehalt für unterschiedliche Wasserzementwerte

Fig. 4 Relation between flow diameter (above) and compressive strength of concrete respectively (below) and the content of cement paste for different water-cement ratios

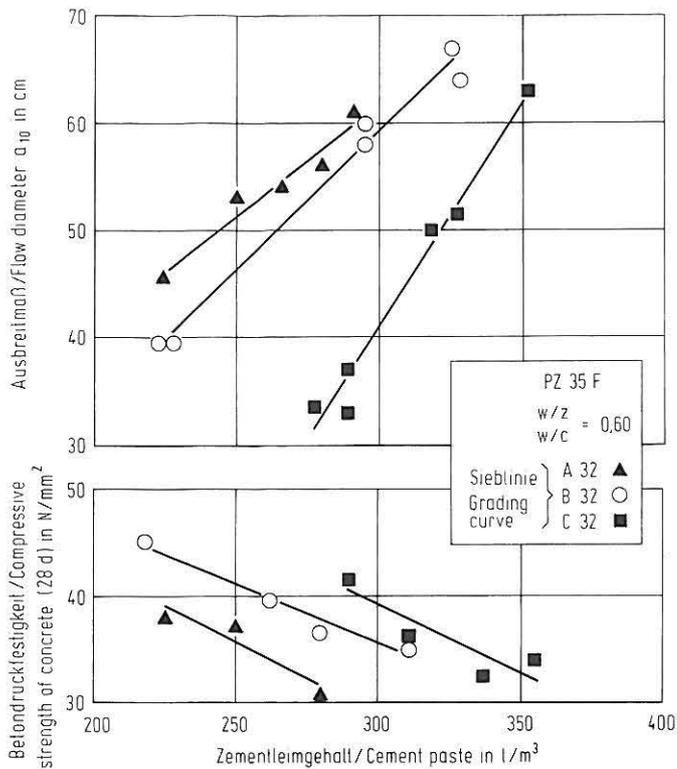


Bild 5 Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß (oben) bzw. Betondruckfestigkeit (unten) und Zementleimgehalt für unterschiedliche Sieblinien

Fig. 5 Relation between flow diameter (above) and compressive strength of concrete respectively (below) and the content of cement paste for different grading curves

sucht. Bild 5 oben zeigt den Einfluß der Zuschlagsieblinie auf die Ausbreitmaße von Betonen gleichen Wasserzementwerts ($w/z = 0,60$), aber unterschiedlicher Zementleimgehalte. Mit steigendem Feinstkornanteil von 1% (20 kg/m^3) bei der Sieblinie A 32 über 3% (rd. 60 kg/m^3) bei der Sieblinie B 32 bis zu 5% (rd. 100 kg/m^3) bei der Sieblinie C 32 wurde der Beton erwartungsgemäß deutlich steifer.

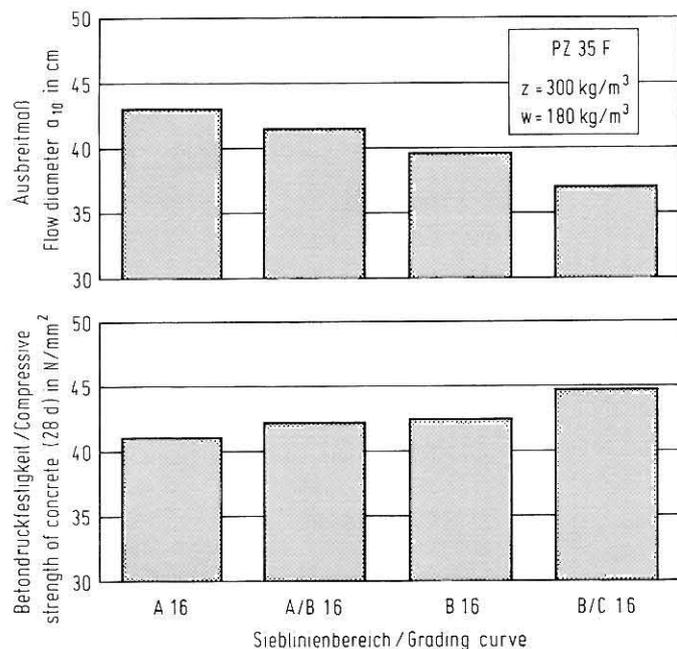


Bild 6 Ausbreitmaß (oben) und Betondruckfestigkeit (unten) in Abhängigkeit von den Sieblinien oberhalb von $0,125 \text{ mm}$

Fig. 6 Flow diameter (above) and compressive strength of concrete (below) in relation to the grading curves above $0,125 \text{ mm}$

factors: because the cement mortar prisms are stored in water until tested while the concrete cubes are stored in a climatic chamber (20/65) from the 8th day on the mortar prisms reach a higher degree of hydration. However, the gain in strength which this produces is reduced because the test is carried out in a water-saturated state. These two opposing influences develop to differing extents with different cements. For the same concrete composition there is, on the whole, a fairly good connection between cement standard strength and concrete compressive strength for the cements investigated. When the mix parameters of the concrete composition, i.e. cement content, water/cement ratio and grading curve, are changed then this close correlation is lost. If, for example, the cement paste content is changed (see Fig. 3) then the relationship between cement strength and concrete strength alters. The concrete compressive strength drops somewhat with increasing quantity of cement paste. This effect is examined more closely below.

5.3 Factors affecting consistency and strength

5.3.1 Quantity and composition of the cement paste

Fig. 4 (top) uses the flow diameter to show the effect of the cement paste content on the consistency at three different water cement ratios, but with otherwise identical concrete compositions. As expected, the flow diameter at these w/c ratios increases approximately proportionally with increasing cement paste content, even for mixes which are rich in cement paste. The consistency („mobility“) of the cement paste has an effect here. Additions of about 60 l cement paste at a w/c ratio of 0.40 and of about 35 l cement paste at a w/c ratio of 0.60 were needed to increase the flow diameter from 40 to 50 cm. It should be noted that identical flow diameters with different concrete compositions are not necessarily an indication of identical workability under practical conditions. Further investigations, e.g. with a concrete viscometer, are needed to clarify these relationships [18, 19].

As mentioned previously, the concrete compressive strength depends not only on the composition or quality of the cement paste, described as the adhesive, i.e. on its w/c ratio, but also on the thickness of the adhesive, which is changed by the cement paste content. Increases in cement paste content at different w/c ratios led to approximately equal reductions in concrete compressive strength (Fig. 4, bottom). An increase in cement paste by 10 l/m^3 produced a drop in compressive strength of about 1 N/mm^2 . This meant that a significant increase in flow diameter caused by raising the cement paste content led to only a relatively small loss of strength. This relationship only applies to structural concretes of normal composition.

5.3.2 Grading curves

The effects of different aggregate grading curves on unset concrete consistency and on strength were investigated as further influencing variables. Fig. 5 (top) shows the effect of the aggregate grading curve on the flow diameters of concretes with the same water/cement ratio ($w/c = 0.60$) but different cement paste contents. As expected, the concrete became significantly stiffer with increasing proportion of fines of 1% (20 kg/m^3) for grading curve A 32, and 3% (about 60 kg/m^3) for grading curve B 32 up to 5% (about 100 kg/m^3) for grading curve C 32.

Fig. 5 (bottom) shows the dependence of the concrete compressive strength on the aggregate grading curve. The strength level increases from A 32 to C 32 with increasing proportion of fines in the grading curve, and hence better void filling.

With the given grading curves both the proportion of fines $< 0.125 \text{ mm}$ and the specific surface area of the aggregate mix $> 0.125 \text{ mm}$ changed, so the influence of the „coarse grading curve“ ($> 0.125 \text{ mm}$) was investigated on its own for the concretes shown in Fig. 6. For this purpose the content and composition of the fines in the mixes under investigation were kept constant by adding 50 kg/m^3 quartz sand in each case. The differences shown in Fig. 6 are then of secondary importance. In the range between A/B 16 and B/C 16 normally used there was a reduction in flow diameter of about 4 cm and an increase in strength of about 2.5 N/mm^2 , i.e. the differences lie within the range of dispersion of the test results.

5.3.3 Type and quantity of the fines

The effect of different aggregate grading curves on concrete compressive strength and consistency is therefore based on the content

In Bild 5 unten ist die Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit von der Zuschlagsieblinie wiedergegeben. Das Festigkeitsniveau stieg mit steigendem Feinstkornanteil der Sieblinie und somit besserer Hohlraumfüllung von A 32 bis zu C 32 an.

Da sich bei den vorgegebenen Sieblinien sowohl der Feinstkornanteil $< 0,125$ mm als auch die spezifische Oberfläche des Zuschlagsgemisches $> 0,125$ mm änderte, wurde bei den in Bild 6 dargestellten Betonen der Einfluß der „Grosbsieblinie“ ($> 0,125$ mm) allein untersucht. Dazu wurde durch Zugabe von jeweils 50 kg/m^3 Quarzsand der Feinstkorngehalt und -aufbau der untersuchten Mischungen konstant gehalten. Die dann vorhandenen in Bild 6 dargestellten Unterschiede sind von untergeordneter Bedeutung. Im üblicherweise verwendeten Bereich zwischen A/B 16 und B/C 16 ergab sich eine Abnahme des Ausbreitmaßes von rd. 4 cm und eine Zunahme der Festigkeit von rd. $2,5 \text{ N/mm}^2$, d.h. die Unterschiede liegen im Bereich der Prüfstreuungen.

5.3.3 Feinststoffart und -menge

Der Einfluß unterschiedlicher Zuschlagsieblinien auf Betondruckfestigkeit und Konsistenz liegt also im Feinstkorngehalt und -aufbau der Sieblinien begründet. Diesem Einfluß wurde weiter nachgegangen. Bild 7 oben zeigt Ausbreitmaße von Betonen gleicher Zusammensetzung und Grosbsieblinie, denen drei verschiedene Betonzusatzstoffe, nämlich Flugasche, Quarzmehl bzw. Kalksteinmehl, und zum Vergleich auch Zement in unterschiedlichen Mengen zugegeben wurden.

Durch Zugabe von Zement oder von Zusatzstoffen wurden die Ausbreitmaße immer verringert. Diese Verringerung war bei der Zugabe von Zement, der eine spezifische Oberfläche von rd. $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ hatte, bzw. von fein aufgemahlenem Quarz- bzw. Kalksteinmehl mit rd. $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$, in etwa gleich. Hieran zeigt sich, daß die größere Feinheit der inerten Feinststoffe in etwa die gleiche Wirkung wie die chemische Anfangsreaktivität des im Vergleich dazu weniger fein gemahlene Zements hatte. Die Flugasche, die gleich fein war wie der Zement, zeigt im Vergleich zum Zement eine geringfügig verflüssigende Wirkung, da die Anfangsreaktivität gegenüber Zement sehr gering ist.

In Bild 7 unten ist die Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der zusätzlichen Zugabemenge von Zement, Flugasche, Quarz- und Kalksteinmehl dargestellt. Die Erhöhung des Feinstkorngehaltes führte bei gleichem Wassergehalt immer zu einer Festigkeitssteigerung. Die ausgeprägteste Steigerung der 28-Tage-Betondruckfestigkeit ergab sich erwartungsgemäß bei Erhöhung des Zementgehaltes. Am wenigsten ausgeprägt war die Festigkeitssteigerung bei Zugabe von inertem Gesteinsmehl. Durch die puzzolansische Reaktion ist die Festigkeitssteigerung bei Flugaschezugabe höher als bei Zugabe der Gesteinsmehle. Inwieweit sich neben der Zugabemenge auch die Kornform und Korngrößenverteilung verschiedener Zusatzstoffe auf Verarbeitbarkeit und Festigkeitsentwicklung von Beton auswirken, wird derzeit in weiteren Untersuchungen geklärt.

5.4 Dauerhaftigkeit

Die Untersuchungen zeigen, daß durch Einbeziehung zusätzlicher Einflußgrößen die Betondruckfestigkeit wesentlich genauer als nur unter Berücksichtigung des w/z -Werts und der Normfestigkeit des Zements abgeschätzt werden kann. Eine ausreichende Festigkeit kann aber nicht mit einer ausreichenden Dauerhaftigkeit gleichgesetzt werden. Gefüge und Porosität des Feinstmörtels und der Verbund zwischen Feinstmörtel und Zuschlag beeinflussen die Dauerhaftigkeit in stärkerem Maße als die Festigkeit. Bild 8 zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen Frostwiderstand, ausgedrückt als Gewichtsverlust nach 50 Frost-Tau-Wechseln beim Würfelverfahren, und Betondruckfestigkeit für unterschiedliche Betone mit und ohne Flugasche. Es geht daraus hervor, daß für die untersuchten Betone mit Flugasche mit rd. 37 N/mm^2 eine höhere Druckfestigkeit für einen ausreichenden Frostwiderstand – d.h. Gewichtsverlust höchstens 5 Gew.-% nach 50 Frost-Tau-Wechseln [17] – erforderlich war, als für die Betone ohne Flugasche, bei denen rd. 30 N/mm^2 ausreichten. In weiteren Forschungsvorhaben soll deshalb gezielt die Wirkung verschiedener Zusatzstoffe, insbesondere unter Beachtung des Zusammenwirkens aller Feinststoffe, auf die Dauerhaftigkeit des Betons untersucht werden.

and composition of the fines in the grading curves. This effect was examined further. Fig. 7 (top) shows flow diameters of concretes of the same composition and coarse grading curve to which three different concrete additions, namely fly ash, quartz fines and limestone fines, and also cement by way of comparison, had been added in differing quantities.

The flow diameters were always reduced by the addition of cement or of additions. These reductions were approximately the same for the addition of cement, which had a specific surface area of about $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, or of finely ground quartz or limestone fines at about $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$. From this it is apparent that the greater fineness of the inert fines had roughly the same effect as the initial chemical reactivity of the comparatively less finely ground cement. The fly ash, which had the same fineness as the cement, exhibited an insignificant plasticizing effect when compared with the cement as the initial reactivity is much lower than that of cement.

Fig. 7 (bottom) shows the concrete compressive strength as a function of the extra quantities of cement, fly ash, quartz fines or limestone fines added. For the same water content an increase in the content of fines always led to an increase in strength. The most marked increase in 28-day concrete compressive strength occurred, as expected, on raising the cement content. Least marked was the strength increase on adding inert stone fines. Due to the pozzolanic reaction the increase in strength on adding fly ash is greater than on adding the stone fines. Further investigations are at present clarifying the extent to which not only the quantity but also the shape and size distribution of the particles of the various additions affect the workability and strength development of the concrete.

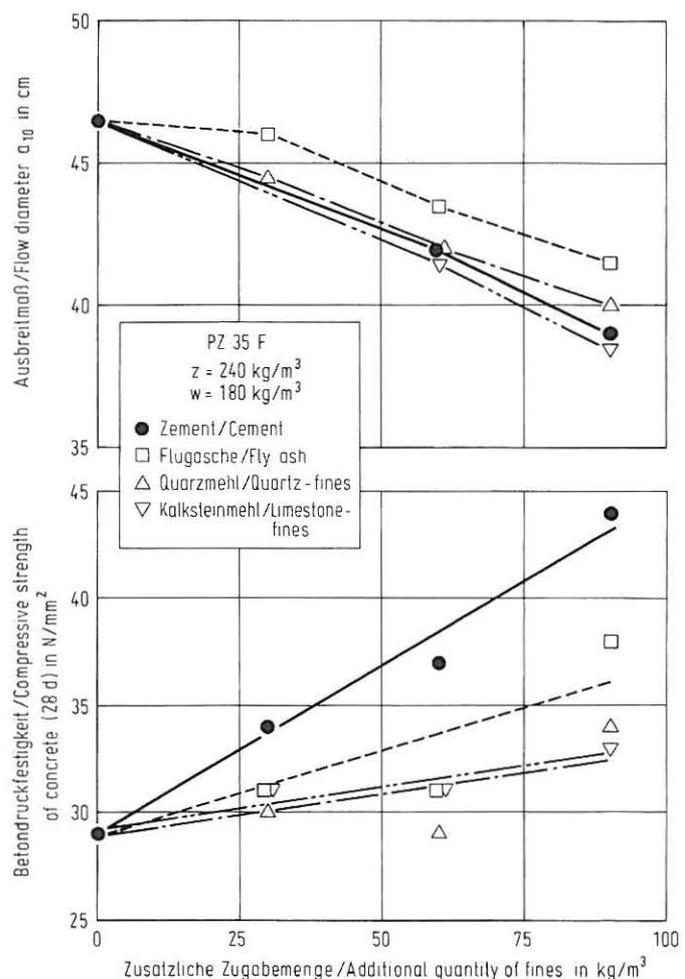


Bild 7 Einfluß einer zusätzlichen Zugabe von Zement, Flugasche, Quarz- oder Kalksteinmehl auf Ausbreitmaß (oben) und Betondruckfestigkeit (unten)

Fig. 7 Influence of the addition of cement, fly ash, quartz-fines or limestone fines on the flow diameter (above) and on the compressive strength of concrete (below)

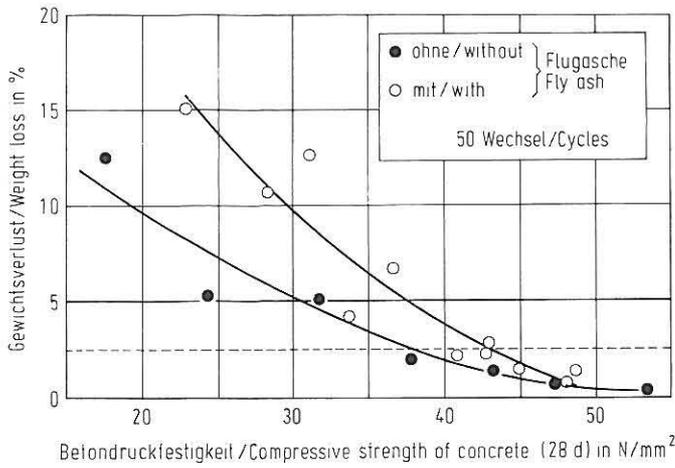


Bild 8 Zusammenhang zwischen Frostwiderstand (Gewichtsverlust beim Würfelverfahren) und der Betondruckfestigkeit für Betone ohne und mit Flugasche

Fig. 8 Relation between freeze-thaw resistance (weight loss with the cube method) and the compressive strength of concrete for concretes without and with fly ash

6 Verbesserung der Vorhersage der Betondruckfestigkeit

Angaben aus der Literatur und die dargestellten Untersuchungen machen deutlich, daß eine auf Wasserzementwert und Normfestigkeit des Zements basierende Vorhersage der Betondruckfestigkeit durch Einbeziehen einiger leicht zu ermittelnder weiterer Parameter wesentlich verbessert werden kann. Ein wissenschaftlich fundiertes Konzept der wesentlichen die Betondruckfestigkeit beeinflussenden Zusammenhänge müßte den Kornaufbau und die Kornform des Zuschlags, den Wasser- und Feinststoffgehalt und damit die Wasserfilm- und Feinstmörtelschichtdicke, die Granulometrie und Reaktivität des Zements und anderer Feinststoffe sowie den Luftgehalt des Betons berücksichtigen. Hierfür liegen jedoch noch nicht genügend abgesicherte Untersuchungen vor. Die für den praktischen Betonentwurf wesentlichen Einflüsse können jedoch für einen ersten Schritt vereinfachend zusammengefaßt werden. Dazu wird im folgenden ein pragmatischer Ansatz gewählt, der auf der Beziehung zwischen Wasserzementwert und Betondruckfestigkeit aufbaut und alle Stoffe gewichtsmäßig berücksichtigt. Der modifizierte Wasserzementwert enthält einen Wasser-Feinststoffwert (Qualität des Klebers) [A] sowie den Zementleimgehalt (Schichtdicke des Klebers) [B]. In den Wasser-Feinststoffwert gehen sowohl der Zementgehalt (z) und der Festigkeitsbeitrag ($c_m \cdot m$) der Feinststoffe (Flugasche, Gesteinsmehl, Mehlkorn des Zuschlags) infolge deren Füllerwirkung als auch der über die Füllerwirkung hinausgehende Festigkeitsbeitrag ($c_f \cdot f$) der Flugasche infolge ihrer pozzolanischen Reaktivität ein.

Nicht erfaßt wurde der Einfluß der Kornform des Zuschlags, der in diesen Untersuchungen nicht einbezogen worden war. Der Einfluß unterschiedlicher Sieblinien oberhalb 0,125 mm ist gering und wurde außer acht gelassen.

$$\frac{\beta_{28}}{N_{28}} = a + b \cdot [A + B] \quad (1)$$

$$\frac{\beta_{28}}{N_{28}} = a + b \cdot \left[\frac{w}{z + c_f \cdot f + c_m \cdot m} + c_{z1} \cdot \frac{z + w}{100} \right] \quad (2)$$

modifizierter Wasserzementwert

- β_{28} = Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen
- N_{28} = Zementnormfestigkeit im Alter von 28 Tagen
- a, b = Koeffizienten zur Festlegung der Lage und Steigung der Funktion
- w = Wassergehalt in kg/m^3
- z = Zementgehalt in kg/m^3
- f = Flugaschegehalt < 0,064 mm in kg/m^3
- m = Feinststoffgehalt < 0,064 mm in kg/m^3 (Flugasche + Gesteinsmehl + Mehlkorn des Sandes)
- c_f = Faktor für die Reaktivität der Flugasche

5.4 Durability

The investigations show that by including additional influencing variables the concrete compressive strength can be estimated substantially more accurately than when only the w/c ratio and the standard strength of the cement are taken into account. Adequate strength cannot, however, be equated with adequate durability. The structure and porosity of the very fine mortar and the bond between the very fine mortar and the aggregate have a greater effect on the durability than the strength. Fig. 8 shows an example of the relationship between freeze-thaw resistance, expressed as weight loss after 50 freeze-thaw cycles using the cube method, and concrete compressive strength for different concretes with and without fly ash. From this it is clear that for those concretes with fly ash which were investigated a higher compressive strength of about $37 \text{ N}/\text{mm}^2$ was required for adequate freeze-thaw resistance – i.e. maximum weight loss of 5 wt.% after 50 freeze-thaw cycles [17] – than for the concretes without fly ash for which about $30 \text{ N}/\text{mm}^2$ was sufficient. The specific effects of different additions on the durability of concrete, taking particular account of the interaction of all the fines, are therefore to be investigated in further research projects.

6 Improving the prediction of concrete compressive strength

Information from the literature and the investigations described here make it clear that any prediction of concrete compressive strength based on water/cement ratio and standard cement strength can be improved substantially by including some other, easily determined, parameters. A scientifically based scheme for the important relationships which affect concrete compressive strength would have to take account of the particle composition and particle shape of the aggregate, the amount of water and fines, and hence the thickness of the water film and very fine mortar layer, and the granulometry and reactivity of the cement and of the other fines, as well as the air content of the concrete. There are no sufficiently reliable investigations available for this yet, but as a first step the factors which are essential for concrete design can be simplified and combined. A pragmatic approach is chosen for this, see below, which builds on the relationship between water/cement ratio and concrete compressive strength and takes all materials into account on a weight basis. The modified water/cement ratio contains a water-fines value (quality of the adhesive) [A] and the cement paste content (thickness of the adhesive layer) [B]. The water-fines value incorporates not only the cement content (z), and the strength contribution ($c_m \cdot m$) of the fines (fly ash, stone fines, fines from the aggregate) resulting from their filler effect, but also the strength contribution ($c_f \cdot f$) of the fly ash over and above its filler effect as a result of its pozzolanic activity.

Not covered is the effect of the aggregate particle shape, which has not been included in these investigations. The influence of different grading curves above 0.125 mm is slight and was also disregarded.

$$\frac{\beta_{28}}{N_{28}} = a + b \cdot [A + B] \quad (1)$$

$$\frac{\beta_{28}}{N_{28}} = a + b \cdot \left[\frac{w}{z + c_f \cdot f + c_m \cdot m} + c_{z1} \cdot \frac{z + w}{100} \right] \quad (2)$$

modified water/cement ratio

- β_{28} = concrete compressive strength at 28 days
- N_{28} = cement standard strength at 28 days
- a, b = coefficients for defining the position and slope of the function
- w = water content in kg/m^3
- z = cement content in kg/m^3
- f = fly ash content < 0.064 mm in kg/m^3
- m = fines content < 0.064 mm in kg/m^3 (fly ash + stone fines + fines from the sand)
- c_f = factor for the reactivity of the fly ash
- c_m = factor for the contribution resulting from the filler effect of the fines
- c_{z1} = factor for cement paste content

The coefficients a and b and the factors c_f , c_m , and c_{z1} were determined using non-linear regression [20]. Taking the 350 concrete mixes

c_m = Faktor für den Festigkeitsbeitrag infolge Füllerwirkung der Feinststoffe
 c_{z1} = Faktor für Zementleimgehalt

Die Koeffizienten a und b sowie die Faktoren c_f , c_m und c_{z1} wurden mittels einer nichtlinearen Regression [20] ermittelt. Unter Berücksichtigung der diesen Untersuchungen zugrunde liegenden 350 Betonmischungen ergaben sich dabei folgende Werte:

$a = 2,48$; $b = -2,22$; $c_f = 0,150$; $c_m = 0,218$; $c_{z1} = 0,030$

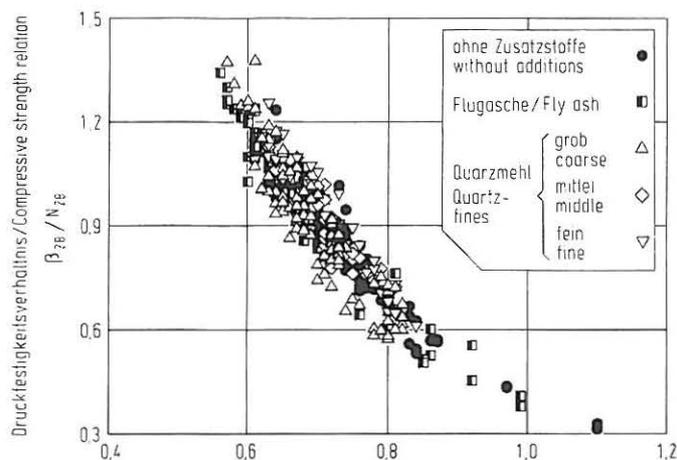


Bild 9 Zusammenhang zwischen modifiziertem Wasserzementwert (siehe Funktion (2)) und der auf die Zementnormfestigkeit N_{28} bezogenen Betondruckfestigkeit β_{28}

Fig. 9 Relation between modified water-cement ratio (see function (2)) and the compressive strength of concrete β_{28} related to the standard strength of cement N_{28}

Bild 9 gibt die Beziehung für die untersuchten 350 Betone wieder. Ein Vergleich mit Bild 1 verdeutlicht, daß die Vorhersage der Betondruckfestigkeit verbessert werden konnte. Da die Betonausgangsstoffe in einem Transportbeton- bzw. Betonwerk weniger variieren als bei den hier untersuchten 350 Betonmischungen, kann die mit diesem Ansatz erzielbare Vorhersagegenauigkeit bei Neuberechnung der Koeffizienten und Faktoren für die jeweils vorhandenen Betonausgangsstoffe noch verbessert werden. Unter Umständen lassen sich die aus Schwankungen der Ausgangsstoffe herrührenden Druckfestigkeitsschwankungen dann besser abschätzen.

Bild 9 zeigt weiterhin, daß auch im Bereich niedriger Wasserzementwerte im Gegensatz zum Abflachen der w/z -Kurve des Bildes 1 die Kurve weiter ansteigt. Der in Bild 1 gezeigte flachere Verlauf im Bereich niedriger w/z -Werte ist zum Teil auf einen höheren Anteil an Verdichtungsstellen zurückzuführen, da die diesen Betonen früher zugrundeliegenden Betonmischungen ohne verflüssigende Zusatzmittel hergestellt wurden und deshalb Verdichtungsmängel aufwiesen. Zudem wurde der Einfluß großer Zementleimmengen nicht berücksichtigt, die bei Fehlen von Fließmitteln für eine ausreichende Verarbeitbarkeit bei geringen Wasserzementwerten erforderlich waren [8].

7 Zusammenfassung und Folgerungen

Die Untersuchungen liefern einen Beitrag, um in Abhängigkeit von den Ausgangsstoffen zu einer sichereren Vorhersage der Konsistenz und der Festigkeit des Betons zu kommen. Sie stellen somit einen Schritt auf dem Weg zu einem Meß- und Regelkonzept für die industrielle Betonherstellung dar. In die Untersuchungen wurden handelsübliche Zemente und unterschiedliche Zusatzstoffe einbezogen. Die Zuschlaggemische aus Rheinkies sand wurden in Anlehnung an DIN 1045 hinsichtlich der Sieblinie variiert. Darüber hinaus wurde durch die Verwendung verschiedener Feinststoffe und Zugabemengen dem Einfluß des Feinstkornes gezielt nachgegangen. In Anbetracht des zwar umfangreichen, gegenüber den praktischen Variationsmöglichkeiten jedoch eingegrenzten Umfangs der Laborversuche gelten die Schlußfolgerungen nur für die untersuchten Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen. Für ihre Anwen-

on which these investigations are based into account gave the following values:

$a = 2,48$, $b = -2,22$, $c_f = 0,150$, $c_m = 0,218$, $c_{z1} = 0,030$

Fig. 9 shows the relationship for the 350 concretes investigated. Comparison with Fig. 1 makes it clear that prediction of concrete compressive strength has been improved. The concrete starting materials in a ready-mixed concrete plant or precast concrete element plant vary less than in the 350 concrete mixes investigated here, so the accuracy of prediction which can be achieved with this approach can be improved still further if the coefficients and factors are recalculated for the concrete starting materials available in any given case. Under some circumstances it is then possible to make better estimates of the fluctuations in compressive strength attributable to fluctuations in the starting materials.

Fig. 9 also shows that the curve also becomes steeper in the region of low water/cement ratios in contrast to the flattening of the w/c curve in Fig. 1. The flatter curve shown in Fig. 1 in the region of low w/c ratios is to some extent attributable to a higher proportion of compaction pores. This is because the concrete mixes on which these concretes were based in the past were made without plasticizing admixtures and were therefore not fully compacted. In addition to this no account was taken of the effect of large quantities of cement paste which were needed in the absence of plasticizing agents to achieve adequate workability at low water/cement ratios [8].

7 Summary and conclusions

The investigations contribute to a more reliable prediction of the consistency and strength of the concrete on the basis of the starting materials. They therefore represent a further step to come to a control scheme for industrial concrete production. The investigations covered normal commercial cements and various additions. The grading curves of the aggregate mixes of Rhenish gravelly sand were varied in conformity with DIN 1045. Specific investigations were also carried out into the influence of very fine particles by using different fine materials in differing quantities. In view of the extent of the laboratory investigations, which were in fact extensive but were still limited when compared with the possible practical variations, the conclusions are only valid for the basic materials and concrete compositions under investigation. Where they are applied to practical situations they must be adapted appropriately to the factors prevailing at the time.

7.1 There is a satisfactorily accurate relationship for the connection between cement standard strength and concrete compressive strength provided it always involves the same concrete composition.

7.2 The trials confirmed that the cement paste content has a very strong influence on the consistency of the concrete and to a lesser extent on its strength.

7.3 For a constant maximum particle size the grading curve above 0.125 mm has little effect on consistency and strength.

7.4 The content of very fine particles both in the sand and in the additions had a noticeable effect on consistency and strength. The influence of the pozzolanic reactivity of the fly ash must be taken into account separately.

7.5 Durability, which did not form part of this investigation and was only examined in some exploratory trials, requires separate consideration. For compressive strengths of less than 40 N/mm² there is no consistent relationship between strength and freeze-thaw resistance; it depends on whether the concretes were produced with or without fly ash.

7.6 A calculation formula which, in addition to the water/cement ratio and the standard strength of the cements, also takes account of the content of very fine particles, the quantity of cement paste, and the pozzolanicity of the fly ash, has increased the accuracy of prediction of compressive strength and therefore of the specification of the concrete composition.

dung in der Praxis müssen sie sinngemäß auf die jeweils vorliegenden Gegebenheiten übertragen werden.

7.1 Für die Beziehung zwischen Zementnormfestigkeit und Betondruckfestigkeit gibt es bei gleicher Betonzusammensetzung eine hinreichend enge Beziehung.

7.2 Die Versuche bestätigen, daß der Zementleimgehalt sehr stark die Konsistenz und in geringerem Maße die Festigkeit des Betons beeinflußt.

7.3 Die Sieblinie oberhalb von 0,125 mm beeinflußt bei gleichbleibendem Größtkorn nur in geringem Maße Konsistenz und Festigkeit.

7.4 Der Mehlkorngelalt des Sandes und die Zusatzstoffe haben einen spürbaren Einfluß auf Konsistenz und Festigkeit. Dabei muß der Einfluß der puzzolanischen Reaktivität der Flugasche gesondert berücksichtigt werden.

7.5 Die Dauerhaftigkeit, die nur in wenigen Tastversuchen einbezogen wurde, bedarf einer getrennten Betrachtung. Für Druckfestigkeiten von $< 40 \text{ N/mm}^2$ ergab sich kein einheitlicher Zusammenhang zwischen Festigkeit und Frostwiderstand, wenn Betone mit und Betone ohne Flugasche geprüft wurden.

7.6 Ein rechnerischer Ansatz, der neben dem Wasserzementwert und der Normfestigkeit der Zemente auch den Feinstkorngelalt, die Zementleimmenge und die Puzzolanität der Flugasche berücksichtigt, verbessert die Vorhersagegenauigkeit für die Druckfestigkeit und damit für die Festlegung der Betonzusammensetzung.

SCHRIFTTUM/ LITERATURE

- [1] Abrams, D.A.: Design of concrete mixtures. Bulletin of the Structural Materials Research Laboratory. Lewis Institute, Nr. 1, Chicago 1918.
- [2] Walz, K.: Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. Beton- und Stahlbetonbau 53 (1958) H. 6, S. 163/169.
- [3] Walz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045, 2. Auflage, Beton-Verlag, Düsseldorf 1972.
- [4] Bonzel, J., und J. Dahms: Über den Wasseranspruch des Frischbetons. Beton 28 (1978) H. 9, S. 331/336, H. 10, S. 362/367, und H. 11, S. 413/416; ebenso Betontechnische Berichte 19 (1978), Beton-Verlag, Düsseldorf 1979, S. 121/156.
- [5] Walz, K.: Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit. Beton 20 (1970) H. 11, S. 499/503.
- [6] Day, K.W.: Computer mix design. Concrete International 6 (1984) Nr. 9, S. 26/31.
- [7] Day, K.W.: Concrete Mix Design, Quality Control and Specification. E. u. FN Spon London 1995.
- [8] Weigler, H., und S. Karl: Arten, Herstellung, Eigenschaften. Ernst u. Sohn, Berlin 1989.
- [9] Brusin, M.: Données pratiques pour la détermination des compositions de béton. Document Sériel No. 6, Janvier 1984, CERIB, Epervon, France.
- [10] Schübler, K.H., und O.P. Mcdlov-Petrosjan: Der Baustoff Beton. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1990.
- [11] Wesche, K.-H., und P. Schubert: Feinststoffe im Beton – Einfluß auf die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons. Betontechnik 6 (1985) H. 3, S. 69/71.
- [12] Krell, J., und G. Wischers: Einfluß der Feinststoffe im Beton auf die Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Beton 38 (1988) H. 9, S. 356/359, und H. 10, S. 401/404; ebenso Betontechnische Berichte 24 (1986-88), Beton-Verlag, Düsseldorf 1989, S. 175/197.
- [13] Lewandowski, R.: Einfluß unterschiedlicher Flugaschequalitäten und -zugabemengen auf die Betoneigenschaften. Betonwerk und Fertigteilechnik 49 (1983) H. 1, S. 11/15, H. 2, S. 105/110, und H. 3, S. 152/158.
- [14] Popovics, S.: Strength relationships for fly ash concrete. ACI Journal 79 (1982) Nr. 1, S. 43/49.
- [15] Spanka, G., H. Grube und G. Thielen: Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln. Beton 45 (1995) (in Vorbereitung).
- [16] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: Prüfung von Beton. Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, H. 422, Berlin 1991.
- [17] Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – Beurteilung mittels Würfelverfahren. Beton 42 (1992) H. 9, S. 496/501; ebenso Betontechnische Berichte 26 (1992-94), Beton-Verlag, Düsseldorf 1995.
- [18] Tattersall, G.H., und P.F.G. Banfill: The Rheology of Fresh Concrete. Pitman, London 1983.
- [19] Banfill, P.F.G., und F. Hornung: Zweipunktmessung im ViscoCorder – Bestimmung der Fließkurven von Frischmörteln. Beton 42 (1992) H. 2, S. 84/88.
- [20] M.J. Norusis: SPSS/PC + 4.0 Base Manual for the IBM PC/AT and PS/2. SPSS Inc. Chicago 1990.