

Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton

Self compacting concrete – another stage in the development of the 5-component system of concrete

Übersicht

Selbstverdichtender Beton wurde vor rund zehn Jahren in Japan erstmals unter der Bezeichnung „Self Compacting Concrete“ hergestellt. Er weist die besondere Frischbetoneigenschaft auf, allein unter dem Einfluß der Schwerkraft zu entlüften und bis zum Niveausgleich zu fließen. Grundlage dieses Betons sind ein hoher Mehlkorn- und Fließmittelgehalt bei normalem Zementgehalt und Wasserzementwert. Vorteilhaft kann dieser Beton besonders dann sein, wenn die Rüttelverdichtung wegen starker Bewehrung oder ungünstig geformter Bauteile besonders schwierig ist, aber auch bei hohen Sichtbetonwänden oder Fertigteilen. Da selbstverdichtender Beton weder im Mehlkorngehalt noch in der Konsistenz den Vorgaben der DIN 1045 entspricht, wurden im Forschungsinstitut erste vergleichende Untersuchungen an einem Rüttelbeton und einem entsprechenden selbstverdichtenden Beton mit dem Ziel vorgenommen, die Anwendbarkeit abzusichern. Beide Betone erfüllten im übrigen die Anforderungen der DIN 1045 an einen Beton für Außenbauteile. Beschrieben werden die rheologischen Grundlagen sowie Durchführung und Ergebnisse von Frisch- und Festbetonprüfungen.

Abstract

Self compacting concrete (SCC) was first produced about 10 years ago in Japan. The unset concrete has the special property that it deaerates just under the influence of gravity and flows to a uniform level. The basis of this concrete is a high content of ultrafines and super-plasticizer with a normal cement content and water/cement ratio. This concrete can be especially advantageous where vibration compaction is particularly difficult because of heavy reinforcement or unfavourably shaped components, and also with high fair-face concrete walls or precast units. Self compacting concrete does not comply with the requirements of DIN 1045 in respect of either the consistency or the content of ultrafines, so preliminary comparative investigations were carried out at the Research Institute on a vibrated concrete and a corresponding self compacting concrete with the object of confirming its usability. In fact, both concretes fulfilled the requirements of DIN 1045 for a concrete for external components. A description is given of the rheological principles and of the procedure and results of the tests on the unset and hardened concretes.

1 Einleitung

Die Eigenschaften von Beton werden nach Frischbeton- und Festbetoneigenschaften unterschieden. Wichtige Frischbetoneigenschaften sind z.B. Verarbeitbarkeit (Konsistenz), Wasserrückhaltevermögen („Bluten“), Verarbeitbarkeitszeit, Grünstandfestigkeit und Kapillarschwinden (Frühschwinden).

Wichtige Festbetoneigenschaften, die auch als „Gebrauchseigenschaften“ bezeichnet werden, sind z.B. Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, E-Modul, Austrocknungsschwinden, Frostwiderstand und Karbonatisierungswiderstand.

Alle Betoneigenschaften beruhen auf der Variation der Ausgangsstoffe Zement, Zuschlag, Wasser, Zusatzstoffe und Zusatzmittel (5-Stoff-System) nach Art und Menge, siehe Bild 1.

Seit jeher stand die zielsichere Herstellung der gewünschten Festbetoneigenschaften an der Spitze der betontechnischen Entwicklung. Die wichtigste Steuergröße in dieser Hinsicht war und ist der Wasserzementwert, der die Festigkeit und die Dichtheit des Zementsteins und des Betons überwiegend bestimmt. Solange nur das 3-Stoff-System Zement, Zuschlag, Wasser bekannt war, mußte die Konsistenz des Frischbetons im wesentlichen über den Zementleimgehalt, d.h. das Volumen von Zement und Wasser je Kubikmeter Beton, gesteuert werden [1]. Da der Zementleim mit abnehmendem Wasserzementwert zunehmende Viskosität (Zähigkeit) aufweist, begrenzte die erforderliche Verarbeitbarkeit die Herstellung von Betonen mit höchstmöglicher Festigkeit. Beton-

1 Introduction

With concrete a distinction is made between the properties of fresh concrete and hardened concrete. Important fresh concrete properties include workability (consistency), water retention (“bleeding”), workability time, green stability and capillary shrinkage (early shrinkage).

Important hardened concrete properties, also known as “working properties” include compressive strength, flexural tensile strength, elastic modulus, drying shrinkage, freeze-thaw resistance and carbonation resistance.

All concrete properties are based on variations in the type and quantity of the constituents – cement, aggregate, water, additions and admixtures (5-component system) – see Fig. 1.

Concrete technology development has always focussed on reliable production of the required hardened concrete properties. The most important manipulated variable in this respect was, and is, the water/cement ratio, which is predominantly responsible for the strength and impermeability of the hardened cement paste and of the concrete. When the only known system was the 3-component system comprising cement, aggregate, and water the consistency of the fresh concrete had essentially to be controlled by the cement paste content, i.e. the volume of cement and water per cubic metre of concrete [1]. Cement paste exhibits increasing viscosity with decreasing water/cement ratio, so the production of concretes with very high strengths was restricted by the necessary workability.

technische Entwicklungen auf dem Gebiet der Zusatzmittel, wie Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM) ermöglichen es seit rund 30 Jahren, Betonkonsistenz und Wasserzementwert zunehmend unabhängig voneinander steuern zu können. Die erforderlichen hohen Betonierleistungen für große Bauwerke und die steigenden Lohnkosten führten zunächst dazu, daß die erweiterte Möglichkeit zur Verflüssigung des Zementleims überwiegend zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit genutzt wurde. Daraus ergab sich die Einführung der Regelkonsistenz KR und des Fließbetons [2] in Deutschland.

Die zweite Entwicklungsrichtung, bei der die verflüssigende Wirkung von BV und FM überwiegend zur Wassereinsparung mit dem Ziel der Steigerung der Dichtheit und Festigkeit des Betons benutzt wurde (siehe Folgeausgaben von [2]), wurde besonders aktuell, als der Zusatzstoff Silicastaub verfügbar war. Dieser sehr reaktive Zusatzstoff aus fast reinem SiO₂ bildet mit einem Teil des bei der Zementhydratation entstehenden Calciumhydroxids zusätzliches Calciumsilikathydrat, das für die Festigkeitsbildung maßgebend ist. Nicht nur die Festigkeit des Zementsteins selbst, sondern vor allem auch der Verbund zu den Zuschlagoberflächen konnte damit erheblich verbessert werden. Die Verwendung von Fließmitteln und von hohen Zementgehalten war bei der Herstellung von Betonen mit Silicazusatz unumgänglich. Das Ergebnis war der „Hochfeste Beton“ mit Druckfestigkeiten von über 100 N/mm² [3]. Bereits hier fiel auf, daß bestimmte hochfeste Betone, insbesondere solche mit vermindertem Größtkorn, ein bis dahin nicht beobachtetes rheologisches Verhalten aufwiesen: Die Betone ließen sich in eng bewehrte Bauteile pumpen, füllten jeden freien Raum innerhalb der Schalung ohne Rüttelverdichtung aus und neigten zum vollständigen Gefälleausgleich [4].

Die Weiterentwicklung der Fließmittel in Japan und die Umsetzung der neu geschaffenen Möglichkeiten durch die technologischen Zentren japanischer Baukonzerne führten vor rund zehn Jahren zur Entwicklung eines Betons im normalen Festigkeitsbereich, den die Japaner „Self Compacting Concrete“ (SCC), zu deutsch „Selbstverdichtender Beton“ (SVB), nannten [5, 6]. Kennzeichnende Eigenschaften dieses Betons sind:

- entmischungsfreies Fließen, „wie Honig“, fast bis zum vollständigen Niveausausgleich,
- fast vollständiges Entlüften des Betons während des Fließens,
- Ausfüllen jedes Hohlrums innerhalb der Schalung einschließlich aller Aussparungen, Bewehrungszwischenräume usw., und dies ohne die aufwendige Verdichtungsarbeit mit dem Rüttler.

Stoff	Beispiele für die Varianten
Zement	<ul style="list-style-type: none"> • Zementarten • Zementfestigkeitsklassen • besondere Eigenschaften
Zuschlag	<ul style="list-style-type: none"> • normal, leicht, schwer • natürlich, künstlich <ul style="list-style-type: none"> · Sand, Kies · Brechsand, Splitt • Kornaufbau, Sieblinie
Wasser	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzung betonschädlicher Inhaltsstoffe
Zusatzstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • Flugasche, Traß, Silicastaub • Gesteinsmehl • Pigmente, Kunststoff(-dispersion) • Fasern (Stahl, Glas, Kunststoff)
Zusatzmittel	<ul style="list-style-type: none"> • BV, FM, LP, DM, VZ, BE, ST, CR, RH

Bild 1: Beton als 5-Stoff-System

Concrete technology developments in the field of admixtures, such as plasticizers and super-plasticizers, has made it possible for about the last 30 years for concrete consistency and water/cement ratio to be controlled increasingly independently of one another. The high level of concrete performance required for large structures and the rising cost of labour meant that at first the increased ability to liquefy the cement paste was mainly used to improve the workability. This resulted in the introduction in Germany of the KR standard consistency and of flow concrete [2].

The second direction of the development, in which the liquefying action of plasticizers and super-plasticizers was used predominantly to save water with the aim of raising the impermeability and strength of the concrete (see subsequent issues of [2]), was particularly relevant because silica fume was available as an addition. This very reactive addition made of almost pure SiO₂ reacts with part of the calcium hydroxide produced during cement hydration to form additional calcium silicate hydrate, which governs the strength formation. This greatly improved not only the strength of the hardened cement paste itself but also, in particular, the bond with the surface of the aggregate. The use of super-plasticizers and high cement contents was unavoidable when producing concretes with added silica. The result was “high strength concrete” with compressive strengths of over 100 N/mm² [3]. At this stage it had become apparent that certain high strength concretes, especially those with reduced quantities of the top aggregate size, exhibited a rheological behaviour which had not previously been observed: the concretes could be pumped into components with closely spaced reinforcement, filled all the free space within the formwork without vibrated compaction, and tended to produce complete self-levelling [4].

Further development of super-plasticizers in Japan, and utilization of the newly created potential by the technological centres of Japanese building companies, led about 10 years ago to the development of a concrete in the normal strength range which the Japanese called “Self Compacting Concrete” (SCC) [5, 6]. The characteristic properties of this concrete are:

- it flows “like honey” with no segregation, until almost completely level,
- almost complete de-aeration of the concrete while it is flowing,
- every void within the formwork is filled, including all recesses, interstitial spaces in the reinforcement, etc.,

and this is without any expensive compaction work with a vibrator.

These properties are achieved by a substantially increased content of ultrafines (grain size ≤ 0.125 mm) [4, 5, 7, 8] which, together with the water and super-plasticizer, form the supportive, highly viscous, suspension (paste), in which all the coarser aggre-

Material	Examples of the variables
Cement	<ul style="list-style-type: none"> • Cement types • Cement strength classes • Special properties
Aggregate	<ul style="list-style-type: none"> • normal, light-weight, heavy • natural, synthetic <ul style="list-style-type: none"> · Sand, Gravel · Crusher sand, Chippings • Particle structure, Grading curve
Water	<ul style="list-style-type: none"> • Limitation of contents harmful to concrete
Additions	<ul style="list-style-type: none"> • Fly ash, Trass, Silica fume • Stone dust • Pigments, Synthetic dispersion • Fibres (Steel, Glass, Plastic)
Admixtures	<ul style="list-style-type: none"> • Plasticizer, Super-plasticizer, Accelerator, Retarder etc.

Fig. 1: Concrete as a 5-component system

Die genannten Eigenschaften werden durch einen wesentlich erhöhten Mehlkorngehalt (Korn $\leq 0,125$ mm) erreicht [4, 5, 7, 8], der mit Wasser und Fließmittel die tragfähige Suspension (Leim) hoher Viskosität bildet, in der alle größeren Zuschlagkörner entmischungsfrei „schwimmen“. Dabei ist es grundsätzlich gleichgültig, ob das Mehlkorn z.B. aus Zement, Flugasche, Metakaolin, Silicastaub oder inertem Gesteinsmehl besteht, sofern nur die Suspension im Zusammenwirken mit dem Fließmittel die erforderliche rheologische Eigenschaft aufweist.

Das bisher geltende Prinzip für Rüttelbetone, eine möglichst weitgehende Hohlraumfüllung im Beton durch Zuschlag mit Korn $> 0,125$ mm zu erreichen – in der Regel sind dies rd. 70 Vol.-% des Betons –, kann für SVB nicht aufrechterhalten werden. Bei diesem muß der Anteil der Mehlkornsuspension rd. 40 Vol.-% oder mehr betragen, damit die größeren Zuschläge die Fließbewegung nicht behindern [5]. Die Zusammensetzung des Mehlkorns innerhalb der Suspension richtet sich nach den gewünschten Festbeeigenschaften, z.B. begrenzter Wasserzementwert für Außenbauteile ($w/z \leq 0,60$) oder $w/z < 0,30$ für die Festigkeitsklasse B 115.

Die extensive Nutzung der Variationsmöglichkeiten im 5-Stoff-System Beton reichen heute vom Beton normaler Festigkeitsklasse als Rüttelbeton oder SVB, über den Hochfesten Beton bis zum „Béton de Poudre Réactive“ [9, 10, 11]. Bei letzterem handelt es sich um einen selbstverdichtenden Beton mit Druckfestigkeiten über 200 N/mm^2 , der in den letzten Jahren in Frankreich entwickelt wurde. Das Größtkorn beträgt dabei nur $0,5 \text{ mm}$! Die Bilder 2 und 3 zeigen eine Übersicht über die Volumina der Bestandteile in den genannten Betonen und die jeweils dazugehörigen Festigkeitsbereiche. Über erste Bauausführungen mit normalfesten und hochfesten selbstverdichtenden Betonen wird aus Kanada, Frankreich, Japan, den Niederlanden, Österreich und den USA [15, 17, 14, 16, 4] berichtet. Bild 4 zeigt einen Teil der Fassade des Königlichen Schauspielhauses in Den Haag, die aus normalfestem selbstverdichtenden Beton geschößweise „aus einem Guß“ hergestellt wurde.

Man kann davon ausgehen, daß SVB keinen höheren Mindestzementgehalt erfordert als nach DIN 1045 verlangt wird; z.B.

gate grains “float” without segregation. In principle this is equally true whether the ultrafines consist of, for example, cement, fly ash, metakaolin, silica fume or inert stone meal, provided only that the suspension in conjunction with the super-plasticizer exhibits the required rheological property.

The principle which has applied to vibrated concretes, of filling the voids in the concrete as completely as possible with aggregates of grain size $> 0.125 \text{ mm}$ – as a rule this constitutes about 70 vol.% of the concrete – cannot be maintained for self compacting concrete. In this case the percentage of the ultrafines suspension has to be about 40 vol.% or more so that the coarser aggregate does not hinder the flow movement [5]. The composition of the ultrafines in the suspension is governed by the hardened concrete properties required, e.g. restricted water/cement ratio for external components ($w/c \leq 0.60$) or $w/c < 0.30$ for the B 115 strength class.

The extensive utilization of the possible variations within the 5-component system which constitutes concrete now ranges from concrete of the normal strength class in the form of vibrated concrete or SCC, by way of high strength concrete to „Béton de Poudre Réactive“ [9, 10, 11]. This last is a self compacting concrete with compressive strengths of over 200 N/mm^2 which has been developed in recent years in France. The top aggregate size is only 0.5 mm ! Figs. 2 and 3 provide an overview of the volumes of the constituents in the concretes mentioned and the associated strength ranges. There are reports from Canada, France, Japan, the Netherlands, Austria and the USA [15, 17, 14, 16, 4] on initial experience with construction work using normal strength and high strength self compacting concretes. Fig. 4 shows part of the façade of the Royal Theatre in the Hague built in storeys “in one pour” with normal strength, self compacting, concrete.

It can be assumed that SCC does not require a higher minimum cement content than is required by DIN 1045; e.g. exterior component concrete in the form of self compacting concrete with a minimum cement content of 270 kg/m^3 and $w/(c+k.f) \leq 0.60$. SCCs run contrary to the stipulations of DIN 1045, firstly because of the ultrafines content, which exceeds the maximum values in DIN 1045, Table 3, and secondly because of the flow diameter of over 70 cm

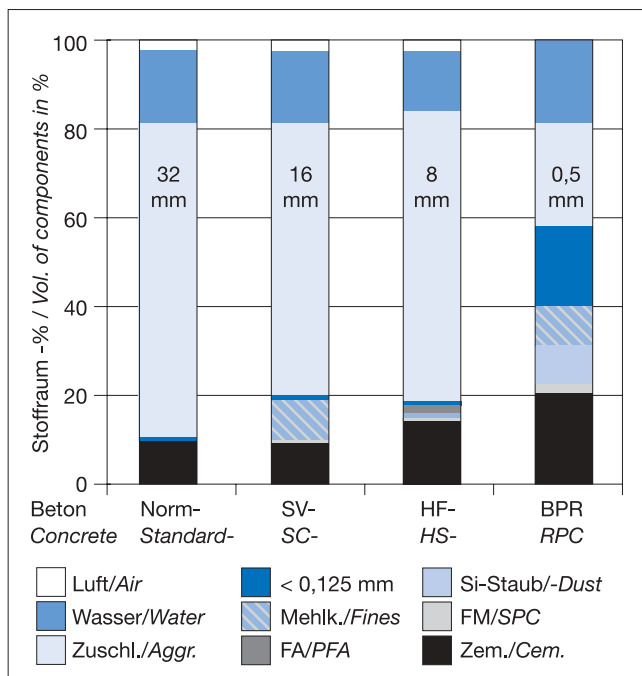


Bild 2: Stoffraumanteile für Rüttelbetone (Normalfester Beton, Hochfester Beton) sowie für Selbstverdichtende Betone (Normalfester Beton, Béton de Poudre Réactive)

Fig. 2: Percentage of components by volume in vibrated concretes (normal strength concrete, high strength concrete) and in self compacting concretes (normal strength concrete, Reactive Powder Concrete)

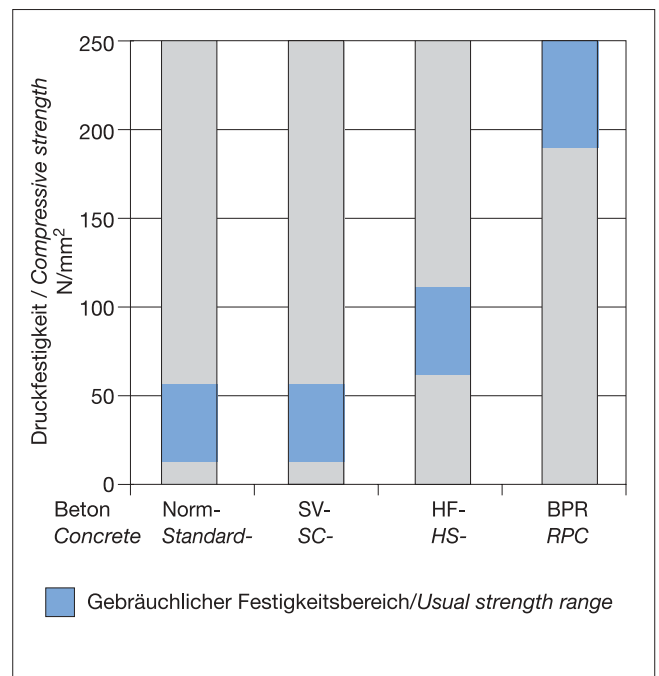


Bild 3: Festigkeitsbereiche der Betone aus Bild 2
Fig. 3: Strength ranges of the concretes in Fig. 2



Bild 4: Teil der Fassade des Königlichen Schauspielhauses in Den Haag. Geschößweise hergestellt aus selbstverdichtendem Beton „in einem Guß“; als Detail die Oberfläche mit Ankerlöchern
 Fig. 4: Part of the façade of the Royal Theatre in the Hague. Built in storeys with self compacting concrete "in one pour". The detail shows the surface with anchor holes.
 Foto: SPOB

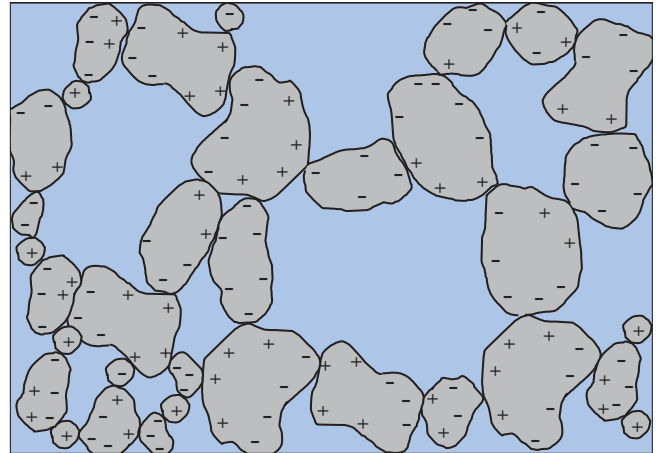


Bild 5: Agglomeration des Mehlkorns im Beton aufgrund unterschiedlicher Oberflächenladungen
 Fig. 5: Agglomeration of the ultrafines in the concrete as a result of differing surface charges

Außenbauteilbeton als SVB mit Mindestzementgehalt 270 kg/m^3 und $w/(z+k.f) \leq 0,60$. Gegen die Festlegungen von DIN 1045 verstoßen die SVB einmal wegen des Mehlkorngehalts, der die Höchstwerte der DIN 1045 Tabelle 3 überschreitet, zum anderen wegen des Ausbreitmaßes von über 70 cm ohne einen einzigen Schlag, was außerhalb der Vorstellungswelt zur Zeit der Erstellung dieser Norm lag.

Die Anwendung von SVB für tragende Bauteile bedarf demnach zur Zeit in Deutschland einer bauaufsichtlichen Zulassung oder einer Zustimmung im Einzelfall. Um diese einer Anwendung entgegenstehenden Schwierigkeiten auszuräumen wurde die Verwendbarkeit eines SVB im Forschungsinstitut orientierend im Vergleich zu einem entsprechenden Rüttelbeton untersucht. Die Untersuchungen betreffen das rheologische Verhalten, die Nachbehandlungsempfindlichkeit sowie die eingangs genannten Festbetoneigenschaften.

Nachstehend werden zunächst die rheologischen Grundlagen für den Selbstverdichtenden Beton dargestellt.

2 Rheologie des Selbstverdichtenden Betons

Die Zemente und die anorganischen pulverförmigen Zusatzstoffe im Bild 1 werden als Betonbestandteil sämtlich zum Mehlkorn (Korn- $\varnothing \leq 0,125 \text{ mm}$) gerechnet. In wäßriger Suspension weisen die einzelnen Körner entsprechend ihrer chemisch unterschiedlichen Zusammensetzung unterschiedliche Oberflächenladungen auf, siehe Bild 5 [12]. Da gegensätzliche Ladungen einander anziehen, neigen die mineralischen Bestandteile der Suspension zur Agglomeration, und zwar unabhängig davon, ob es sich z.B. um eine reine Zementsuspension, um eine Zement-Flugasche-Silicastaub-Suspension oder um eine reine Flugaschesuspension handelt. Wie in [12] anhand von Versuchsergebnissen dargestellt wird, verhalten sich alle diese Suspensionen rheologisch weitgehend wie Bingham-Körper, siehe Bild 6. Kennzeichen dafür sind eine ausgeprägte Fließgrenze und ein mit der Schergeschwindigkeit zunehmender Scherwiderstand, dessen Verlauf bei abnehmender Schergeschwindigkeit näherungsweise als geradlinig angenommen werden kann. Die Steigung der Geraden ist ein Maß für die dynamische Viskosität. Für hohe Wasser-Feststoff-Verhältnisse in der Suspension geht die Fließgrenze wegen der großen mittleren Entfernung der Partikel gegen Null, und die dynamische Viskosität nähert sich der von Wasser. Für geringe Wasser-Feststoff-Verhältnisse steigt die Fließgrenze wegen der hohen Agglomerationsneigung stark an, ebenso die dynamische Viskosität. In [12] wurde ausführlich dargestellt, daß die Wirkung von Fließmitteln im wesentlichen darin besteht, die Oberflächenladungen (Zeta-Potential) an allen Feststoffpartikeln in der Disper-

without any rapping, which was inconceivable at the time when this standard was compiled.

The use of SCC for loadbearing components in Germany therefore currently requires building inspectorate authorization or approval in each individual case. In order to remove these obstacles to its use the suitability of SCC as compared with a corresponding vibrated concrete was investigated in the FIZ. The investigations concerned the rheological behaviour, the sensitivity to curing and the properties of hardened concrete mentioned at the outset.

Firstly, a description is given below of the fundamental rheological principles of self compacting concrete.

2 The rheology of self compacting concrete

The cements and powdered inorganic additions in Fig. 1 which form constituents of the concrete are all counted as ultrafines (particle size diameter $\leq 0.125 \text{ mm}$). In aqueous suspension the indivi-

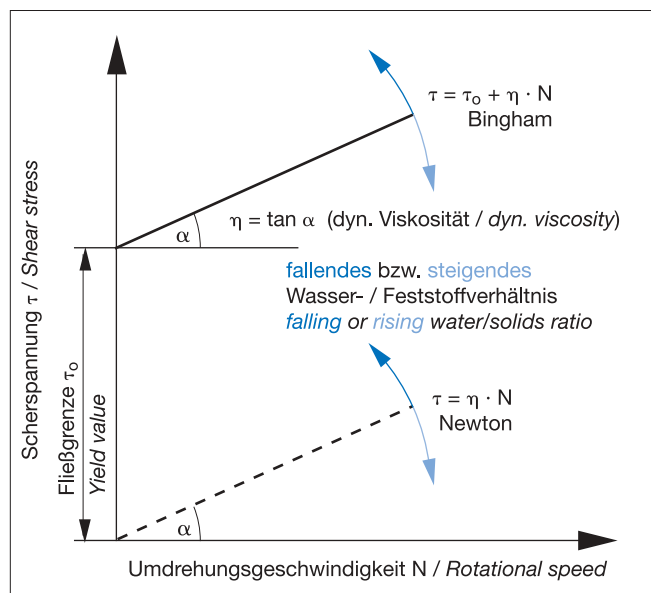


Bild 6: Rheologisches Verhalten von Mehlkorn/Wassersuspensionen, ohne Fließmittel (\approx Bingham-Körper), mit Fließmittel (\approx Newton-Flüssigkeit)

Fig. 6: Rheological behaviour of ultrafines/water suspensions without super-plasticizer (\approx Bingham solid), and with super-plasticizer (\approx Newtonian fluid)

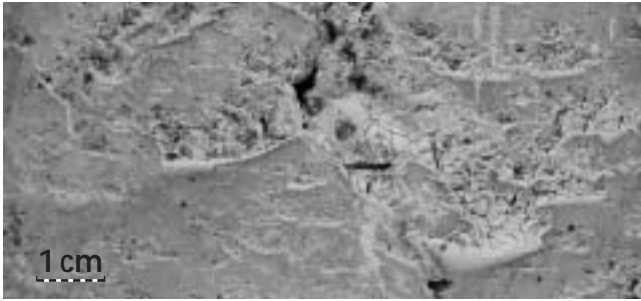


Bild 7: Oberflächenstruktur eines in glatter Schalung verdichteten Rüttelbetons mit zu geringem Mehlkorngesamt und zu hoher Fließmitteldosierung

Fig. 7: Surface structure of a vibrated concrete compacted in smooth formwork with too low an ultrafines content and too high an addition of super-plasticizer

sion auszugleichen und so die Partikel zu desagglomerieren. Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Fließmittel zeigen [6], daß auch sterische und tribologische Effekte eine große Rolle für die Beweglichkeit der einzelnen Feststoffpartikel spielen. So werden z.B. Polycarboxylate speziell mit einem entsprechend erweiterten Leistungsspektrum entwickelt. Stets ist mit zunehmender Fließmitteldosierung ein Abbau der Fließgrenze gegen Null verbunden, während die dynamische Viskosität der Suspension sich dann weitgehend nach dem Wasser-Feststoff-Verhältnis richtet, d.h. nach der mittleren Wasserschichtdicke zwischen den Feststoffpartikeln, siehe Bild 6.

Für zementfeine Feststoffe mit Wasser-Feststoff-Verhältnissen von z.B. 0,6; 0,5 und 0,4 erreicht man mit zunehmender Fließmitteldosierung sehr bald den sogenannten „Sättigungspunkt“ [12, 13], von dem an im Rotationsviskosimeter bei gleichbleibender Umdrehungsgeschwindigkeit keine Verringerung des Scherwiderstandes mehr meßbar ist. Wegen des erheblichen wassergefüllten Freiraums um die desagglomerierten Feststoffpartikel neigen diese zum Absetzen, sobald die Suspension nicht mehr gerührt wird. Entsprechend den physikalischen Gesetzmäßigkeiten sinken die groben Körner schneller als die feineren. Die feineren, schon weitgehend einzeln in der Suspension hydratisierten Zementkörner kommen so erst nach längerer Zeit in Kontakt miteinander, und sind dann nicht mehr in der Lage, die gewünschte feste Hydratstruktur miteinander zu entwickeln. Sie stellen sich als kreideweiche Oberflächenschicht dar. Betone mit zu hoher Fließmitteldosierung und zu geringem Mehlkorngesamt können dann die im

dual grains exhibit different surface charges depending on their chemically differing compositions, see Fig. 5 [12]. Opposite charges attract one another, so the mineral constituents of the suspension tend to agglomerate, and this is regardless of whether, for example, a pure cement suspension, a cement – fly ash – silica fume suspension, or a pure fly ash suspension is involved. It is shown in [12] with the aid of test results that the rheological behaviour of all these suspensions is substantially that of a Bingham solid, see Fig. 6. The characteristic features of this are a pronounced yield value and a shear resistance which increases with shear rate and can be assumed to be approximately linear with decreasing shear rate. The gradient of the straight line is a measure of the dynamic viscosity. At high water/solids ratios in the suspension the yield value approaches zero because of the large average distance between the particles, and the dynamic viscosity approaches that of water. At low water/solids ratios the yield value increases sharply because of the high tendency to agglomeration, and so does the dynamic viscosity. In [12] it is demonstrated in detail that the action of super-plasticizers is essentially to equalize the surface charges (zeta potential) on all solid particles in the dispersion and in this way to disagglomerate the particles. New developments in the field of super-plasticizers [6] show that steric and tribological effects also play a large part in the mobility of the individual solid particles. Polycarboxylates, for example, are being developed specifically with a correspondingly extended performance spectrum. Increasing addition of super-plasticizer is always associated with a drop in yield value towards zero, but the dynamic viscosity of the suspension is governed largely by the water/solids ratio, i.e. by the average thickness of the water layer between the solid particles, see Fig. 6.

With increasing addition of super-plasticizer, cement-fine solids with water/solids ratios of, for example, 0,6, 0,5 and 0,4, very soon reach the so-called “saturation point” [12, 13], after which no further reduction of the shear resistance can be measured in a rotating viscometer operating at constant rotational velocity. Because of the large amount of water-filled free space around the disagglomerated solid particles these tend to settle as soon as the suspension is no longer stirred. The coarser particles sink faster than the finer ones in accordance with the laws of physics. The finer cement grains, which individually have already been substantially hydrated in the suspension, therefore only come into contact with one another after a fairly long period, and are no longer capable of developing the required solid hydrate structure with one another. They appear as a chalk-white surface layer. Concretes with excessively high additions of super-plasticizer and excessively low ultrafines content may then exhibit the typical faults shown in Fig. 7 during the production of fair-face concrete [12].

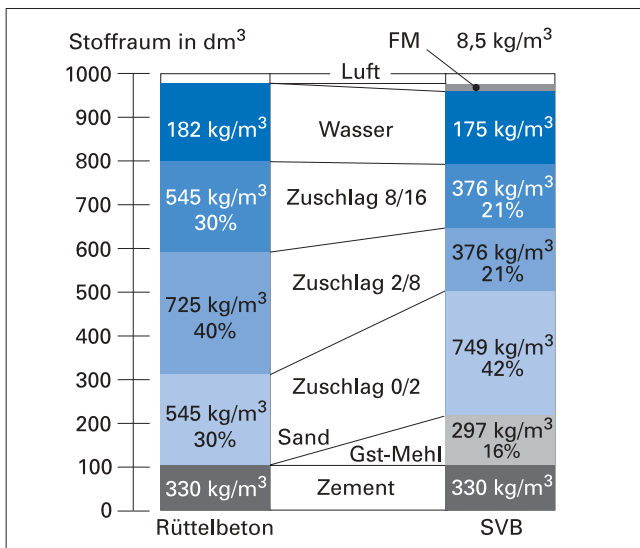


Bild 8: Stoffraumanteile des verwendeten Rüttelbetons und des Selbstverdichtenden Betons mit $w/z = 0,55$

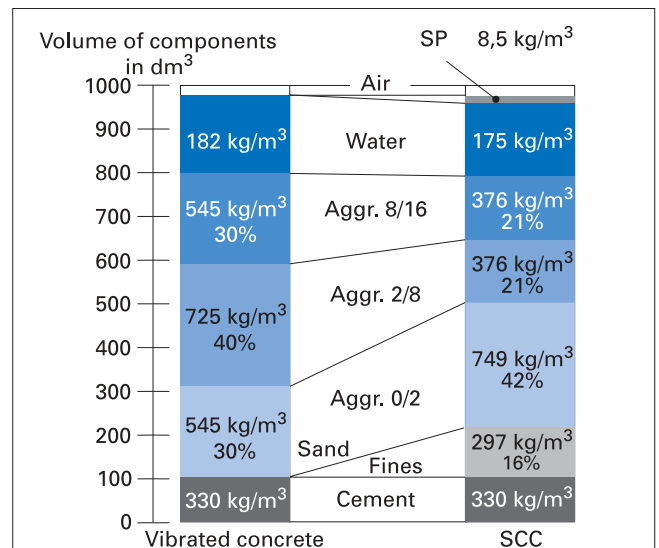


Fig. 8: Percentage of components by volume in the vibrated concrete used and in the self compacting concrete with $w/c = 0,55$

Bild 7 dargestellten typischen Mängel bei der Sichtbetonherstellung [12] zeigen.

Grundlage der Herstellung selbstverdichtender Betone ist eine Mehlkornsuspension, die zwar keine Fließgrenze mehr aufweist, deren desagglomerierte Feststoffpartikel jedoch einen so geringen Abstand haben, daß sie in ihrer Lage gehalten werden und sich nicht mehr absetzen können. Die Suspension fließt in der Tat wie eine hochviskose Newtonflüssigkeit, z.B. wie Honig oder hochviskose Mineralöle, bis zum vollständigen Niveaueausgleich allein unter dem Einfluß der Schwerkraft. Hierdurch wird auch verständlich, warum z.B. in [5, 7, 8] dargelegt wird, wie sich die gewünschten Eigenschaften selbstverdichtender Betone in den Stufen „selbstverdichtender Leim“, „selbstverdichtender Mörtel“ und „selbstverdichtender Beton“ entwickeln lassen. Ein Gewichtsverhältnis von Wasser zu Mehlkorn von rd. 0,3 kann für zementfeine Stoffe als Anhaltswert dienen, um mit geeigneten Fließmitteln eine selbstverdichtende entmischungsfreie Suspension herzustellen.

3 Durchgeführte Untersuchungen

3.1 Frischbeton

Das Ziel der durchgeführten Untersuchung bestand darin, einen normalen, für Außenbauteile gemäß DIN 1045 geeigneten Rüttelbeton der Konsistenz KR so abzuwandeln, daß er zusätzlich das Fließvermögen und die Eigenschaft der „Selbstverdichtung“ aufwies, wie sie in den Abschnitten 1 und 2 beschrieben sind. Die in Bild 8 angegebenen Betonzusammensetzungen in Gewichts- und Stoffraumanteilen haben gleiche Zementgehalte ($z = 330 \text{ kg/m}^3$) und gleiche Wasserzementwerte ($w/z \approx 0,55$). Die Zusammensetzung des SVB weist lediglich einen fast doppelt so hohen Mehlkorngehalt auf wie der Rüttelbeton und eine wesentlich erhöhte Fließmitteldosierung. Als Mehlkorn wurde hier zementfeines Kalksteinmehl verwendet, d.h. ein inerter Betonzusatzstoff eingesetzt.

Die Betonzusammensetzung wurde aufgrund von Voruntersuchungen an der Mehlkorn-Wasser-Suspension und aus Literaturangaben, z.B. [5], ermittelt. Die Zusammensetzung wurde nicht bezüglich z.B. Verarbeitbarkeitszeit, Stoffkosten oder ähnlichem optimiert.

Die Betonausgangsstoffe wurden in einem 200 l fassenden Laborzwangsmischer gemischt. Die Konsistenz beider Frischbetone wurde auf dem Ausbreittisch ermittelt, und zwar beim Rüttelbeton mit 15 Schlägen gemäß DIN 1048 und beim SVB ohne Schlag (Bild 9). Wegen der besseren Vergleichsmöglichkeit mit den Ergebnissen der ausländischen Literatur wurde der etwas größere Setztrichter nach ASTM verwendet.

Um das Fließvermögen des SVB anschaulich und praxisnah zu überprüfen, wurde der SVB einseitig in ein U-Rohr aus Acrylglas mit 100 mm Durchmesser gefüllt (Bild 10). Die Länge des unteren

The basis of the production of self compacting concretes is an ultrafines suspension which no longer has any yield value but the disagglomerated solid particles of which are so closely spaced that they are held in their positions and are no longer able to settle. In fact, the suspension flows like a highly viscous Newtonian fluid, i.e. like honey or highly viscous mineral oils, until a completely uniform level is reached solely under the influence of gravity. This also explains why in, for example, [5, 7, 8] it is pointed out how the desired properties of self compacting concretes can be developed in the stages „self compacting paste“, „self compacting mortar“, and „self compacting concrete“. A weight ratio of water to ultrafines of about 0.3 can be used as a reference value for cement-fine materials for producing a self compacting, non-segregating, suspension with suitable super-plasticizers.

3 Investigations carried out

3.1 Fresh concrete

The aim of the investigation was to modify a normal vibrated concrete with KR consistency suitable for exterior components in accordance with DIN 1045 so that it also exhibited the flowability and „self compacting“ characteristic described in Sections 1 and 2. The concrete compositions specified in Fig. 8 in percentages by weight and by volume have the same cement contents ($c = 330 \text{ kg/m}^3$) and the same water/cement ratios ($w/c \approx 0,55$). However, the SCC contains almost twice the ultrafines content of the vibrated concrete and has a substantially increased addition of super-plasticizer. Cement-fine limestone meal, i.e. an inert concrete addition, was used here as the ultrafines.

The concrete composition was determined on the basis of preliminary investigations with the ultrafines/water suspension and from data in the literature, e.g. [5]. The composition was not optimized with respect to, for example, workability time, material costs or the like.

The concrete constituents were mixed in a forced mixer with a capacity of 200 l. The consistencies of the two fresh concretes were measured on the flow table – with 15 raps for the vibrated concrete in accordance with DIN 1048 and without any rapping for the SCC (Fig. 9). The somewhat larger cone specified in ASTM was used to obtain better comparability with the results in the foreign literature.

In order to check the flowability of the SCC in a way which was both expressive and realistic the SCC was filled into one side of a U-tube made of acrylic glass with a diameter of 100 mm (Fig. 10). The bottom section and the two limbs each had a length of about 1 m. Four crosses of reinforcing steel were installed in the horizontal section. A flat slide made it possible to fill one vertical limb completely without the concrete flowing into the horizontal sec-



Bild 9: Ausbreitmaß des SVB (rd. 70 cm ohne Schlag)
Fig. 9: Flow diameter of the SCC (about 70 cm without impact)



Bild 10: Fließen des Selbstverdichtenden Betons im Acrylglasrohr Ø 100 mm
Fig. 10: Flow of the self compacting concrete in the 100 mm diameter acrylic glass tube

Tafel: Ergebnisse der Festbetonprüfungen

Betoneigenschaft		Einheit	Rüttelbeton	SVB
Druckfestigkeit	2d	N/mm ²	17,8	22,3
	7d		28,5	31,6
	28d		39,0	39,5
Biegezugfestigkeit (28d)			4,6	4,4
Statischer E-Modul			28150	28250
Schwindmaß ϵ_s (90d)		‰	-0,371	-0,414
Karbonisierungstiefe d_c (90d)		mm	6	5
Masseverlust nach 100 FTW		M.-%	3,2	5,0
Nachbehandlungsempfindlichkeit		-	normal	hoch

Steges und der beiden Schenkel betrug jeweils rund 1 m. In dem horizontalen Steg waren vier Kreuze aus Bewehrungsstahl eingebaut, die axial durch einen Bewehrungsstab fixiert waren. Ein Flachschieber ermöglichte die vollständige Füllung des einen vertikalen Schenkels, ohne daß der Beton in den horizontalen Steg floß. Nach Öffnen des Schiebers wurde weiterer Beton nachgefüllt. Es sollte gezeigt werden, daß der Beton allein aufgrund unterschiedlicher statischer Höhe die Bewehrungskreuze und die Fließwiderstände an den Rohrwandungen überwinden und im zweiten vertikalen Rohr möglichst bis auf Einfüllhöhe aufsteigen kann.

Außerdem wurde untersucht, ob sich die beiden Frischbetone hinsichtlich der Ribbildung auf freien Oberflächen infolge Kapillarspannungen unterschieden. Dazu wurden beide Betone in plattenförmige Schalungen mit den Abmessungen 30 cm x 100 cm gefüllt. Die rund 3 cm dicken Platten waren mit Baustahlgewebe zweilagig bewehrt, um die Verformung in Plattenebene zu behindern. Beide Betonoberflächen wurden direkt nach dem Abziehen einem Luftstrom ausgesetzt, der durch einen Ventilator erzeugt wurde.

3.2 Festbetonprüfungen

Alle Prüfkörper für die Festbetonprüfungen wurden für den Rüttelbeton nach DIN 1048 und für den SVB ohne Verdichten hergestellt. Die Tafel zeigt links die durchgeführten Festbetonprüfungen und das jeweilige Prüfalter. Die Druckfestigkeiten wurden an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge ermittelt. Die Biegezugfestigkeiten wurden an Balken 100 x 100 x 500 mm³ bestimmt. Die Ermittlung des statischen E-Moduls, des Schwindmaßes und der Karbonisierungstiefe erfolgte an Zylindern mit \varnothing 150 mm und $h = 300$ mm. Für die Prüfung des Frostwiderstands wurden jeweils zwei Würfel mit 100 mm Kantenlänge hergestellt.

Alle Probekörper wurden im Alter von 1 d ausgeschalt. Die Probekörper für die Ermittlung der Druckfestigkeit, der Biegezugfestigkeit und des E-Moduls wurden bis zur Prüfung in Folie („konserviert“) bei 20 °C gelagert. Die Zylinder, an denen das Schwindmaß und die Karbonisierungstiefe ermittelt wurden, lagerten ab dem Alter von 1 d im Klimaraum bei 20 °C/65 % r. F. Die Würfel zur Prüfung des Frostwiderstands wurden gemäß DAfStb-Heft 422 (Würfelverfahren) gelagert und geprüft.

4 Prüfergebnisse

4.1 Frischbeton

Das Ausbreitmaß des Rüttelbetons betrug $a_{10} \approx 45$ cm. Der selbstverdichtende Beton breitete sich ohne Schlag auf ein Ausbreitmaß von rd. 70 cm aus, siehe Bild 9. Er durchfloß das Acrylglasrohr mit vier Bewehrungskreuzen (siehe Bild 10) und erreichte im Anstieg fast die Einfüllhöhe ($\Delta h \approx 3$ cm). Von den mit dem Ventilator belüfteten Platten (siehe Bild 11) wies der Rüttelbeton nach dem Erhärtungsbeginn keine Risse auf, während der SVB ein ausgeprägtes Ribbild zeigte. Die Ribbreiten betragen nur rd. 0,15 mm. Sie sind auf dem Bild kräftig nachgezeichnet, um sie erkennbar zu machen.

4.2 Festbeton

Die Ergebnisse der Festbetonprüfungen sind in der Tafel angegeben. Bemerkenswert sind die etwas höhere Frühfestigkeit des SVB und die etwas geringere Karbonisierungstiefe, die auf die dichte-

Table: Results of the concrete tests

Concrete property		Unit	Vibrated concrete	SCC
Compressive strength	2d	N/mm ²	17.8	22.3
	7d		28.5	31.6
	28d		39.0	39.5
Flexural tensile strength (28d)			4.6	4.4
Static modulus of elasticity			28150	28250
Shrinkage ϵ_s (90d)		mm/m	-0.371	-0.414
Depth of carbonation d_c (90d)		mm	6	5
Loss in mass after 100 FT-Cycles		% by mass	3.2	5.0
Sensitivity to curing		-	normal	high

tion. More concrete was added after the slide had been opened. The intention was to show that the concrete could overcome the reinforcement crosses and the flow resistance at the tube walls and rise up in the second vertical tube as closely as possible to the level on the filling side solely as a result of the static height difference.

Possible differences between the two fresh concretes with respect to cracking at exposed surfaces as a result of capillary stresses were also examined. Both concretes were filled into 30 cm x 100 cm slab-shaped formwork. The slabs, about 3 cm thick, were reinforced with two layers of steel fabric to prevent any deformation in the plane of the slab. Directly after striking off, both concrete surfaces were exposed to an air flow generated by a fan.

3.2 Hardened concrete tests

All the test pieces for the hardened concrete tests were produced in accordance with DIN 1048 for the vibrated concrete and without compaction of the SCC. The hardened concrete tests which were carried out, and the respective test ages, are shown on the left of the table. The compressive strengths were measured on cubes of 150 mm edge length, and the flexural tensile strengths were determined on 100 x 100 x 500 mm³ beams. The static elastic modulus, shrinkage value and depth of carbonation were measured on cylinders of 150 mm diameter and 300 mm height. Two cubes of 100 mm edge length were produced for each test for the freeze-thaw resistance.

All the test pieces were removed from the mould at 1 day. The test pieces for measuring the compressive strength, the tensile flexural strength and the elastic modulus were wrapped in film („protected“) and stored at 20 °C until tested. The cylinders on which the shrinkage values and carbonation depths were measured were stored after the first day in a climatic chamber at 20 °C/65 % r.h. The cubes for testing the freeze-thaw resistance were stored and tested in accordance with DAfStb Pamphlet 422 (cube method).

4 Test results

4.1 Fresh concrete

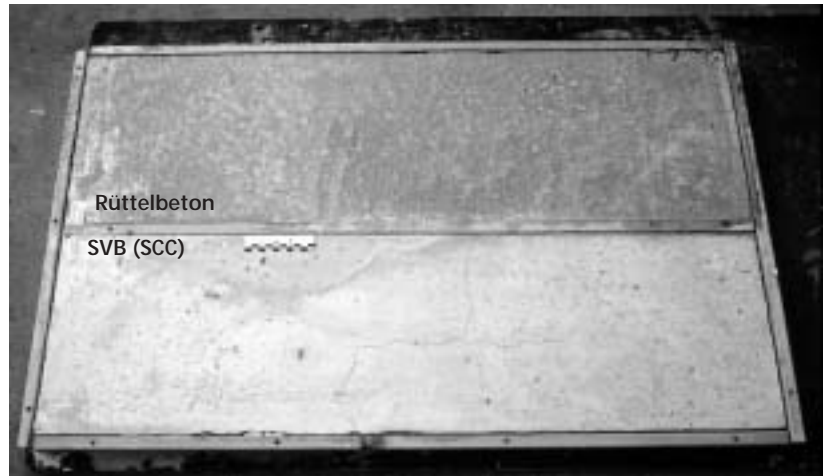
The flow diameter of the vibrated concrete was $a_{10} \approx 45$ cm. The self compacting concrete spread without any rapping to a flow diameter of about 70 cm, see Fig. 9. It flowed through the acrylic glass tube with four reinforcement crosses (see Fig. 10) and rose to almost the same level as on the filling side ($\Delta h \approx 3$ cm). Of the slabs exposed to forced air flow from the fan (see Fig. 11) the vibrated concrete showed no cracks after the start of hardening while the SCC showed a distinct cracking pattern. The crack widths were only about 0.15 mm. They have been strongly retraced in the figure to make them visible.

4.2 Hardened concrete

The results of the concrete tests are given in the table. Noteworthy are the somewhat higher early strength of the SCC and the somewhat smaller depths of carbonation, which may well be due to the denser packing of the grains. On the other hand, the shrinkage value and the mass loss in the freeze-thaw test were somewhat larger for the SCC than for the vibrated concrete. The compressive

Bild 11: Platten aus Rüttelbeton und Selbstverdichtendem Beton zur Ermittlung der Rißbildung infolge Kapillarschwindens (Luftstrom durch Ventilator)

Fig. 11: Slabs made of vibrated concrete and self-compacting concrete for measuring the cracking caused by capillary shrinkage (forced air flow)



re Kornpackung zurückzuführen sein dürfte. Das Schwindmaß und der Masseverlust im Frostversuch waren beim SVB hingegen etwas größer als beim Rüttelbeton. Die Druckfestigkeit, die Biegezugfestigkeit und der statische E-Modul im Alter von 28 Tagen erreichten bei beiden Betonen ungefähr gleiche Werte.

5 Zusammenfassung

Untersucht wurden ein Rüttelbeton mit der Konsistenz KR und ein selbstverdichtender Beton (SVB) mit einem Ausbreitmaß von rund 70 cm (ohne Schlag) mit gleichem Zementgehalt von $z = 330 \text{ kg/m}^3$ und gleichem Wasserzementwert von $w/z \approx 0,55$. Die selbstverdichtenden Eigenschaften des SVB wurden durch Zugabe von zementfeinem Gesteinsmehl und durch eine erhöhte Fließmitteldosierung erreicht. Der SVB zeigte das erwartete Fließverhalten auf dem Ausbreittisch und durchfloß ein U-förmiges Acrylglasrohr mit Hindernissen aus Bewehrungsstahl fast bis zum Niveausgleich.

Der selbstverdichtende Beton hatte bei fehlender Nachbehandlung eine etwas größere Neigung zur Bildung von Kapillarschwindrissen als der entsprechende Rüttelbeton. Da Betone mit dem Mehlkorngehalt und der Konsistenz eines SVB nicht DIN 1045 entsprechen, wurden die Gebrauchseigenschaften beider Betone unter dem Gesichtspunkt der Eignung für Außenbauteile vergleichend geprüft. Dabei ergab sich folgendes:

- Bei etwa gleicher Druckfestigkeit beider Betone von rund 39 N/mm^2 im Alter von 28 Tagen lag die 2-Tage-Festigkeit des SVB rund 25 % höher als die des Rüttelbetons.
- Die Biegezugfestigkeit und der statische E-Modul im Alter von 28 Tagen waren bei beiden Betonen ungefähr gleich.
- Das Schwindmaß nach 90tägiger Lagerung im Klimaraum bei $20^\circ\text{C}/65\% \text{ r. F.}$ war beim SVB ca. 11 % größer als beim Rüttelbeton.
- Die Karbonatisierungstiefe des SVB war im Alter von 90 Tagen rund 15 % kleiner als die des Rüttelbetons.
- Beide Betone wiesen einen hohen Frostwiderstand auf. Jedoch lag der Masseverlust des SVB, bezogen auf den des Rüttelbetons, um ca. 50 % höher.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß der untersuchte selbstverdichtende Beton – mit gleichem Zementgehalt und gleichem Wasserzementwert wie der vergleichbare Rüttelbeton – alle für einen Außenbauteilbeton nach DIN 1045 erforderlichen Gebrauchseigenschaften aufwies. Wie erste Einsätze selbstverdichtender normalfester Betone im Ausland zeigen, liegen die Vorteile bei den geringen Einbaukosten und bei der hohen Zuverlässigkeit, mit der z.B. Sichtbetonwände aus Ortbeton und komplizierte Fertigteile ohne Rüttler fehlstellenfrei hergestellt werden können. Diese Vorteile müssen die erhöhten Stoffkosten für zusätzliches Mehlkorn und Fließmittel auffangen. Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung sind umfangreiche Eignungsprüfungen, die auch die Transportzeit und die Transportbedingungen einbeziehen. Zur Zeit bedarf die Anwendung eines SVB in Deutschland noch einer bauaufsichtlichen Zustimmung.

strengths, the flexural tensile strengths and the static elastic moduli at 28 days reached approximately the same values for the two concretes.

5 Summary

Investigations were carried out on a vibrated concrete with KR consistency and a self compacting concrete (SCC) with a flow diameter of about 70 cm (without impact) with the same cement content of $c = 330 \text{ kg/m}^3$ and the same water/cement ratio of $w/c \approx 0,55$. The self compacting properties of the SCC were achieved by the addition of cement-fine stone meal and the increased addition of superplasticizer. The SCC exhibited the expected flow behaviour on the flow table and flowed through a U-shaped acrylic glass tube with obstacles made of reinforcing steel until the levels were virtually equal.

With inadequate curing the self compacting concrete had a somewhat greater tendency than the corresponding vibrated concrete to form capillary shrinkage cracks. As concretes with the ultrafines content and consistency of an SCC do not comply with DIN 1045 the working properties of the two concretes were subjected to comparative testing from the aspect of suitability for external components. This gave the following results:

- For approximately the same compressive strength of the two concretes of about 39 N/mm^2 at 28 days the 2-day strength of the SCC was about 25 % higher than that of the vibrated concrete.
- The flexural tensile strength and static elastic modulus at 28 days were approximately the same for the two concretes.
- The shrinkage after storage for 90 days in a climatic chamber at 20°C and 65 % r.h. was about 11 % greater with the SCC than with the vibrated concrete.
- The depth of carbonation of the SCC at 90 days was about 15 % smaller than in the vibrated concrete.
- Both concretes exhibited a high freeze-thaw resistance. However, the mass loss from the SCC was about 50 % higher than that of the vibrated concrete.

As a whole it was found that the self compacting concrete investigated – with the same cement content and the same water/cement ratio as the comparable vibrated concrete – exhibited all the working properties required by DIN 1045 for an external component concrete. Initial use of self compacting, standard strength, concretes abroad has shown that the advantages lie in the lower placing costs and in the high level of reliability with which, for example, fair-face concrete walls made with in situ cast concrete and complicated precast units can be produced without vibrators and without any defects. These advantages have to be set against the increased costs for the additional ultrafines and superplasticizer. Extensive suitability tests which also incorporate the transport time and transport conditions are a basic requirement for successful application. At present the use of an SCC in Germany still requires building inspectorate approval.

Literatur

- [1] Anleitung für die Zusammensetzung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. Mit Erläuterungen von K. Walz. Verlag Wilh. Ernst & Sohn, 2. Aufl. Berlin-München 1963
- [2] DAfStb-Richtlinie für die Herstellung und Verarbeitung von Fließbeton (Mai 1974). Weitere Fassungen 1986 und 1995. Beuth-Verlag GmbH, Berlin und Köln
- [3] DAfStb-Richtlinie für hochfesten Beton (Fassung August 1995). Beuth-Verlag, Berlin und Köln
- [4] Kern, E.: Technologie des hochfesten Betons. Beton 43 (1993) H. 3, S. 109-115
- [5] Okamura, Hajime; Ozawa, Kazumasa: Mix Design for Self-Compacting Concrete. Concrete Library of ISCE No. 25, June 1995 (Translation from Proc. of ISCE, No. 496 (V-24, 1994.8))
- [6] Ohta, A.; Siguyama, T.; Tanaka, J.: Fluidizing Mechanism and Application of Polycarboxylate Based Superplasticizers. 5th CANMET-ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete, 1997, SP 173-19, S. 359-378
- [7] Takada, K.; Pelova, G. I.; Walraven, J. C.: Influence of Mixing Efficiency on the Mixture Proportion of General Purpose Self-Compacting Concrete. Int. Symp. on High Performance Concrete and Reactive Powder Concrete. 16.-20. Aug., 1998, Sherbrooke, Canada
- [8] Takada, K.; Pelova, G. I.; Walraven, J. C.: Self-Compacting Concrete Produced by Japanese Method with Dutch Materials. Congress of European Ready Mixed Concrete Organization, ERMCO 98, Lisbon, 23.-26. June 1998
- [9] Cheyrezy, M.; Maret, V.; Frouin, L.: Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, 1995, S. 1491-1500
- [10] Bonneau, O.; Poulin, C.; Dugat, J.; Richard, P.; Oitcin, P.-C.: Reactive Powder Concretes; From Theory to Practice. Concrete International, April 1996, S. 47-49
- [11] Fa. Bouyges: Les Bétons de Poudres Réactives, 1997 (Firmeneigene Veröffentlichung)
- [12] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. Beton 45 (1995), H. 11, S. 802-808 und H. 12, S. 876-881 ; ebenso Betontechnische Berichte 1995-1997, S. 45-60
- [13] Tattersall, G. H. : Rheology of Portland Cement Paste. British Journal of Applied Physics 6 (1955) Nr. 5, S. 165-167
- [14] Yurugi, M.; Sakai, G.: A Proven QA System for Flowable Concrete. Concrete International, October 1998, S. 44-48.
- [15] Clergue, Christian: Un exemple d'application de béton auto-plaçant. Journée Technique de l'Industrie Cimentière. 21. Jan. 1998 Paris
- [16] Karner, Anton: Millennium Tower-Self Compacting Concrete. Zement+Betton, 4/98, S. 4-8
- [17] Tarlet, Alain: Développement et perspectives des bétons auto-plaçants. Journée Technique de l'Industrie Cimentière. 21. Jan. 1998 Paris

