

Einfluss von Restwasser aus dem Frischbetonrecycling auf die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton

Influence of recycled water from fresh concrete recycling systems on the properties of fresh and hardened concrete

Übersicht

Im Rahmen der gesetzlichen Pflicht zur Abfallvermeidung und -verwertung wird in nahezu allen Transportbeton- und Fertigteilwerken Deutschlands Restbeton aufbereitet. Stand der Technik ist es, den Restbeton einem anlageninternen Kreislauf, dem Frischbetonrecycling, zuzuführen. Das im Werk entstehende Restwasser und der ausgewaschene Restbetonzuschlag werden zur Produktion aller Standardbetone planmäßig wieder verwendet. Lediglich für Luftporenbetone und hochfeste Betone wurde die Verwendung von Restwasser im Regelwerk ausgeschlossen, weil für diese Sonderbetone noch nicht ausreichend bekannt war, wie Restwasser die Frisch- und Festboneigenschaften möglicherweise beeinflusst. Diesen Vorbehalt dehnten einige Auftraggeber unbegründet auf Standardbeton aus und stellten damit das Kreislaufwirtschaftsprinzip der Transportbetonindustrie in Frage. Es war deshalb notwendig, durch erweiterte Untersuchungen die allgemeine Verwendbarkeit von Restwasser und Restbeton praxisnah nachzuweisen.

Betone mit Restwasser sind dauerhaft und haben die gleichen Gebrauchseigenschaften wie Betone, die mit Trink- bzw. Frischwasser hergestellt wurden. Selbst Luftporenbetone konnten unter diesen Voraussetzungen mit Restwasser sicher hergestellt werden. Beim Mischungsentwurf muss nicht nur die Restwasserdichte, d.h. die eingetragene Menge von Feinstoffen in den frischen Beton, sondern auch das Restwasseralter beachtet werden.

Abstract

Residual concrete is processed in virtually all ready-mixed concrete and precast element plants in Germany as part of the legal obligation to avoid or utilize waste. The state of the art is to feed the residual concrete into a cycle within the plant – the fresh concrete recycling system. The recycled water generated in the plant and the aggregate which has been washed out of the residual concrete are systematically re-used for the production of all standard concretes. The regulations have excluded the use of recycled water only in the case of air-entrained concretes and high-strength concretes because for these special concretes not enough was yet known about the possible effects of recycled water on the properties of the fresh and hardened concrete. Without any reasons some clients extended this exclusion to standard concrete and therefore cast doubt on the recycling principle in the ready-mixed concrete industry. It was therefore necessary to carry out extended investigations under realistic conditions to prove the general usability of recycled water and residual concrete.

Concretes made with recycled water are just as durable and have the same working properties as concretes which have been produced with drinking water or fresh water. Even air-entrained concretes can be produced safely with recycled water. The mix design must take account not only of the recycled water density, i.e. the quantity of fines introduced into the fresh concrete, but also of the age of the recycled water.

1 Einleitung

Frischer Restbeton und Restmörtel müssen in Deutschland aufgrund gesetzlicher Regelungen sowie des Gebots zur Ressourcenschonung wieder verwendet werden. Als universell geeignet hat sich ein Verfahren erwiesen, bei dem der noch nicht erhärtete Beton oder Mörtel in Restzuschlag und in eine wässrige Suspension von Feinstoffen $\leq 0,25$ mm – das Restwasser – aufgetrennt wird. Der beim Auswaschen von Restbeton und Restmörtel abgetrennte Restbetonzuschlag umfasst anlagentechnisch bedingt Gesteinskörnungen ab einem Korndurchmesser von rd. 0,25 mm [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Die Wiederverwendung von Restwasser aus dem Frischbetonrecycling als Zugabewasser für Beton ist in nahezu allen Transportbeton- und Fertigteilwerken Stand der Technik und wird durch die „Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (Restwasserrichtlinie) [1] geregelt.

Bislang liegen nur wenige systematische Untersuchungsergebnisse zum Einfluss von Restwasser auf die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton vor. Das hat dazu geführt, den Einsatz von Restwasser ohne Begründung als risikobehaftet anzusehen und für einige Betonieraufgaben auszuschließen. So ist aufgrund mangelnder Erfahrungen die Verwendung von Restwasser für

1 Introduction

In Germany any fresh residual concrete and residual mortar must be re-used because of legal regulations and the requirement for conservation of resources. A method in which the concrete or mortar which has not yet hardened is separated into residual aggregate and an aqueous suspension of fines ≤ 0.25 mm – the recycled water – has proved universally suitable. Due to the nature of the plant the residual concrete aggregate separated during the washing of residual concrete and residual mortar comprises aggregates above a particle diameter of about 0.25 mm [1, 2, 3, 4, 5, 6].

The re-use of recycled water from the fresh concrete recycling plant as mixing water for concrete is state of the art in virtually all ready-mixed concrete plants and precasting plants and is controlled by the “Guideline for the production of concrete using recycled water, residual concrete and residual mortar” issued by the German Committee for Reinforced Concrete (Guideline for Recycled Water) [1].

Until now there have been few results available from systematic investigations into the influence of recycled water on the properties of fresh and hardened concrete. This has led to the situation where the use of recycled water is regarded, without any foundation, as risky and is ruled out for some concreting tasks. Due to lack

Luftporenbetone und hochfeste Betone bereits im Regelwerk untersagt [1, 7]. Unter Hinweis auf den Ausschluss von Restwasser für Luftporenbeton und für hochfesten Beton lehnen viele Kunden Transportbeton mit Restwasser generell ab. Die Verwendung von Restwasser aus dem Frischbetonrecycling anstelle von Frischwasser als Zugabewasser für Beton ist aber ein unverzichtbarer Baustein im Kreislaufwirtschaftssystem der Transportbetonindustrie. Durch systematische Untersuchungen an normal- und hochfesten Betonen sowie an Luftporenbetonen, die mit Restwasser hergestellt wurden, wird hier der Kenntnisstand über die Auswirkung von Restwasser auf die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton erweitert. Auf dieser Grundlage soll auch die zielgerichtete Herstellung von Beton, unter dem Aspekt einer noch umfassenderen Wiederverwendung des Restwassers abgesichert werden. Das Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministers für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert. Die Untersuchungen waren Bestandteil eines Forschungsvorhabens der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB) und wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf (FIZ) durchgeführt.

2 Stand der Erkenntnisse

Restwasser besteht in erster Linie aus dem Wasser-Zement-Feinstoffgemisch mit Feststoffanteilen bis rd. 0,25 mm Korngröße, das nach dem Abtrennen der größeren Gesteinskörnungen zurückbleibt, aber auch aus dem Spülwasser, das zum Auswaschen und Reinigen der zurückkehrenden Mischfahrzeuge, Betonpumpen etc. benutzt wird, sowie aus dem auf den Produktionsflächen anfallenden Niederschlagswasser. Beide Reststoffe, der ausgewaschene Restbetonzuschlag und das Restwasser werden gemäß der Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel des DAfStb (Restwasserrichtlinie) [1] zur Betonproduktion wiederverwendet.

Um die Verwendung von Restwasser bauaufsichtlich genehmigungsfähig zu machen und die anfallenden Mengen Restwasser ordnungsgemäß und einheitlich verwenden zu können, wurden in den 80er Jahren verfahrenstechnische und betontechnische Untersuchungen durchgeführt [5]. Die Auswertung der Versuche zeigte, dass eine vollständige Aufbereitung der Betonreste und deren Verwendung aus verfahrenstechnischer Sicht möglich ist. Die Labor- und Praxisversuche ergaben, dass die Verwendung von Restwasser als Zugabewasser für festlegende Betonrezepturen keine zu berücksichtigende Veränderung der Eigenschaften des Frisch- und Festbetons zur Folge hatte, sofern die mit dem Restwasser eingetragenen Feststoffgehalte auf 10 kg/m^3 begrenzt wurden. Diese Untersuchungen wurden der im September 1991 herausgegebenen ersten DAfStb-Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel [8] zugrunde gelegt. In [9] wird dargestellt, dass im Sinne einer sicheren Anwendung des Restwassers die Feststoffbelastung möglichst gleichmäßig niedrig sein und der Feinstoffeintrag mit dem Restwasser in den neuen Beton begrenzt werden muss. Die Restwasserrichtlinie [8] wurde u.a. auch diesbezüglich überarbeitet und erschien dann in der heute gültigen Fassung im August 1995 [1].

Danach ist der zurückgewonnene Restbetonzuschlag der größten Gesteinskörnung gleichmäßig im Massestrom unterzumischen, so dass die Toleranzwerte nach DIN 4226-1 [10] eingehalten werden. Restwasser ist vor seiner Wiederverwendung nach EN 206-1 [11] auf seine Eignung als Zugabewasser zu prüfen. Die in Restwasser dispergierten Feststoffe setzen sich aus Hydrationsprodukten des Zements, Zusatzstoffen und Feinstanteilen des Sandes bis zu 0,25 mm Durchmesser zusammen [6, 12]. Dem Frischbeton dürfen heute mit dem Restwasser im Normalfall bis zu 18 kg/m^3 und im Ausnahmefall (kurzzeitiger Betriebszustand) sogar bis zu 35 kg/m^3 dispergierte Feststoffe zugeführt werden, wenn die verlangten Eigenschaften des Betons durch entsprechende Erstprüfungen nachgewiesen wurden [1]. Die Verwendung von Restwasser für hochfesten Beton und Luftporenbeton blieb jedoch bisher untersagt.

Nach [2] können Unverträglichkeiten auftreten, wenn im Restwasser hohe Konzentrationen an verzögernden Zusatzmitteln

of experience the use of recycled water for air-entrained concretes and high-strength concretes, for example, is already forbidden in the regulations [1, 7]. Because of the exclusion of recycled water for air-entrained concrete and for high-strength concrete many customers universally reject ready-mixed concrete made with recycled water. However, the use of recycled water from a fresh concrete recycling plant instead of fresh water as the mixing water for concrete is an essential element in the recycling economy system of the ready-mixed concrete industry. The level of understanding of the effect of recycled water on the properties of fresh and hardened concrete is being extended here by systematic investigations on normal and high-strength concretes as well as on air-entrained concretes which have been produced with recycled water. This should assist the controlled production of concrete from the point of view of even more comprehensive re-use of the recycled water. The research project was supported by funds from the Ministry for Economic Affairs through the “Otto von Guericke” Federation of Industrial Research Associations (AiF). The investigations formed part of a research project of the FTB (Ready-Mixed Concrete Research Association) and was carried out at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry) in Düsseldorf.

2 Current state of knowledge

Recycled water consists primarily of the water-cement-fines mixture, with solid fractions up to about 0.25 mm particle size, that remains after the coarser aggregates have been removed, but it also includes the rinsing water which is used for washing and cleaning the returning mixer vehicles, concrete pumps etc., as well as the rain water collected from the production areas. Both recycled substances, namely the washed residual concrete aggregate and the recycled water, are re-used for concrete production in accordance with the “Guideline for the production of concrete using recycled water, residual concrete and residual mortar” issued by the DAfStb (Recycled Water Guideline) [1].

Process engineering and concrete technology investigations were carried out in the 80s so that the use of recycled water could be authorized by the building inspectorate and to enable the quantities of recycled water obtained to be used methodically and consistently [5]. Evaluation of the trials showed that from the process engineering point of view the concrete residues can be fully processed and utilized. The laboratory and practical trials showed that the use of recycled water as mixing water for predetermined concrete mix formulations did not result in any changes of the properties of the fresh and hardened concrete which have to be taken into account, provided the solids content introduced with the recycled water is limited to 10 kg/m^3 . These investigations were used as the basis for the first DAfStb guideline for the production of concrete using recycled water, residual concrete and residual mortar [8] issued in September 1991. In [9] it is shown that for the purposes of reliable use of the recycled water the solids content should be as uniformly low as possible and the solids input into the new concrete with the recycled water must be restricted. The recycled water guideline [8] was, among other things, revised in this respect and then appeared in the current version in August 1995 [1].

According to this the recovered residual concrete aggregate should be intermixed uniformly in the mass flow with the coarsest aggregate so that the tolerance values specified in DIN 4226-1 [10] are maintained. Before it is re-used the recycled water must be checked for its suitability as mixing water in accordance with EN 206-1 [11]. The solids dispersed in the recycled water are composed of the hydration products of the cement, additions and ultra-fine fractions of the sand up to 0.25 mm diameter [6, 12]. It is now permissible to add up to 18 kg/m^3 dispersed solids to the fresh concrete with the recycled water in normal circumstances and even up to 35 kg/m^3 in exceptional circumstances (short-term operating conditions) provided the required properties of the concrete have been verified by appropriate preliminary tests [1]. However, the use of recycled water for high-strength concrete and air-entrained concrete is still forbidden.

According to [2] the system can be incompatible if the recycled water contains high concentrations of retarding admixtures. No laboratory or practical trials were carried out into the influ-

aufzutreten. Labor- und Praxisversuche wurden zu den Einflüssen und Zusammenhängen nicht durchgeführt. Untersuchungen in [6] ergaben, dass die Basiswirkstoffe von Verflüssigern (Calciumligninsulfonat) und von Verzögerern (Tetrakaliumpyrophosphat) nahezu vollständig und irreversibel an die Zementpartikel gebunden werden und für weitere Reaktionen nicht mehr zur Verfügung stehen. Durch eine Modellrechnung konnte zudem gezeigt werden, dass sich die Wirkstoffkonzentration von Zusatzmitteln im Restwasser unter Produktionsbedingungen durch Aufkonzentration nicht nennenswert erhöhen kann und dass sie sich sehr schnell asymptotisch ihrem Grenzwert nähert. Selbst ohne Anrechnung der Sorption am Zement liegt dieser Grenzwert so weit unter der Ausgangskonzentration des Zusatzmittels, dass eine praxisrelevante Wirksamkeit dieser Zusatzmittelreste ausgeschlossen werden kann [6]. Untersuchungen in [13], [14] zum Eindringverhalten von umweltgefährdenden Flüssigkeiten in flüssigkeitsdichten Beton (FD-Beton), der mit Restwasser hergestellt worden war, ergaben, dass die Dichtheit durch das Restwasser nicht nachteilig beeinflusst und die Betondruckfestigkeit nur geringfügig reduziert wurde. In [15] wurde festgestellt, dass feststoffhaltige Restwässer das Ausbreitmaß der Betone, die Verarbeitbarkeit sowie die Festigkeiten geringfügig verringern. Der Frost- und Frost-Tausalz-widerstand und das Schwindverhalten wurden durch Restwasser kaum beeinflusst.

Insgesamt zeigt die Auswertung der Literatur, dass bislang kaum systematische Untersuchungsergebnisse zum Einfluss von Restwasser auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften unter praxisnahen Bedingungen vorliegen. Außerdem wurde der Tatsache, dass sich Restwassereigenschaften über die Lagerungszeit stark verändern können [6], meistens nicht Rechnung getragen.

3 Ziel und Umfang der Untersuchungen

Im Anschluss an die in [6] dargestellten Untersuchungen war das Ziel der im Folgenden vorgestellten Untersuchungen die Erweiterung des Erkenntnisstands über den Einfluss von Restwasser auf bestimmte Betoneigenschaften. Dabei sollte auch geklärt werden, ob die in der Richtlinie [1] genannten Einschränkungen für die Verwendung von Restwasser technisch begründet sind (s. Abschnitt 2).

Untersucht wurden normalfeste und hochfeste Betone sowie Luftporenbetone, (s. Tafel 1). Am Frischbeton wurde der Einfluss der Restwässer auf die Ausgangskonsistenz und das Ansteiferverhalten untersucht. Am Festbeton wurden die Druckfestigkeit im Alter von 2, 7, 28 und 91 Tagen und der statische Elastizitätsmodul im Alter von 28 Tagen ermittelt. An den Betonen B1a und B1b wurde außerdem das Schwind- und Kriechverhalten, der Frost- und Carbonatisierungswiderstand sowie das Elutionsverhalten gegenüber deionisiertem Wasser ermittelt. Die Luftporenbetone B2 wurden bezüglich des Frost-Tausalz-widerstands und der Luftporenkennwerte untersucht.

Wie in [6] dargestellt, verändert sich die chemische, physikalische und chemisch-mineralogische Beschaffenheit des Restwassers über die Lagerungsdauer durch Sorptions- und Hydratationsvorgänge. Deshalb ist es unmöglich, definiert zusammengesetzte Restwässer für Laborversuche aus der laufenden Produktion in Transportbetonwerken zu beziehen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, entsprechende Restwässer im Labor zu produzieren, um die Versuchsbetone mit Restwässern definierter, praxisgerechter Zusammensetzung und definierten Alters termingerecht herstellen zu können. Dabei wurden die Erkenntnisse aus [6] genutzt.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Labortechnische Herstellung von Betonrestwasser

Das als Zugabewasser verwendete Restwasser wurde aus „Restbeton“ gewonnen, der im Labor gesondert hergestellt wurde. Wie Tafel 2 zeigt, waren die Ausgangsstoffe Zement (z), Gesteinskörnung (g) und Zusatzstoff (f) sowie deren Einsatzmengen stets gleich. Um der Variationsbreite der in einem Transportbetonwerk anfallenden Restbetonmengen gerecht zu werden, wurde ein Zementgemisch aus 50 % CEM I 32,5 R und 50 % CEM III/B 32,5 NW/HS/NA verwendet. Der Zementgehalt (z) betrug

encing factors or relationships. Investigations in [6] showed that the basic active ingredients of plasticizing agents (calcium lignosulfonate), and of retarders (tetrapotassium pyrophosphate) are almost completely and irreversibly combined in the cement particles and are no longer available for other reactions. A model calculation also showed that the active ingredient concentration of admixtures in recycled water under production conditions cannot be appreciably increased by concentration and that it approaches its limit asymptotically and very rapidly. Even without including the sorption on cement in the calculation this limit is so far below the initial concentration of the admixture that any practically relevant effect of these residual admixtures can be ruled out [6]. The investigations described in [13], [14] into the penetration of pollutant liquids into liquid-impermeable concrete that has been produced with the recycled water showed that the impermeability is not adversely affected by the recycled water and that the concrete compressive strength is only negligibly reduced. In [15] it was established that recycled water containing solids slightly reduces the flow diameter of the concretes, the workability and the strengths. The recycled water has hardly any effect on the shrinkage behaviour or the resistance to freeze-thaw and to freeze-thaw with de-icing salt.

As a whole, evaluation of the literature shows that so far there have been hardly any results of systematic investigations concerning the influence of recycled water on the fresh and hardened concrete properties under realistic conditions. Nor had the fact that the properties of recycled water can change sharply during the storage time [6] been taken into account in most cases.

3 Aim and extent of the investigations

Following on from the investigations described in [6] the aim of the investigations described below was to extend the understanding of the effect of recycled water on certain concrete properties. The intention was also to clarify whether the restrictions on the use of recycled water stated in the Guideline [1] have any technical foundation (see Section 2).

Normal-strength and high-strength concretes as well as air-entrained concretes were examined (see Table 1). The effect of the recycled water on the initial consistency and the stiffening behaviour of fresh concrete was examined. The compressive strengths at 2, 7, 28 and 91 days and the static modulus of elasticity at 28 days were determined on the hardened concrete. The shrinkage and creep behaviour and the resistance to freeze-thaw and carbonation as well as the elution behaviour with de-ionized water were determined on concretes B1a and B1b. The air-entrained concretes B2 were examined with respect to the resistance to freeze-thaw with de-icing salt and the air void parameters.

As is shown in [6], the chemical, physical and chemico-mineralogical nature of the recycled water changes during the duration of storage due to sorption and hydration processes. It was therefore impossible to obtain recycled water of specific composition for laboratory trials from current production in ready-mixed concrete plants. This meant that it was necessary to produce appropriate recycled water in the laboratory in order to be able to produce the test concretes on schedule with recycled water of defined, realistic composition and specific age. The findings from [6] were used for this purpose.

4 Experimental procedure

4.1 Laboratory production of recycled water from concrete

The recycled water used as mixing water was obtained from “residual concrete” which was produced separately in the laboratory. As is shown by Table 2, the original materials, namely cement (z), aggregate (g) and addition (f), and the quantities used were always the same. A cement mixture consisting of 50 % CEM I 32,5 R cement and 50 % CEM III/B 32,5 NW/HS/NA cement was used in order to cope with the range of variation of the quantities of residual concrete obtained in a ready-mixed concrete plant. The total cement content (z) was 270 kg/m³. The cements complied with EN 197-1 [16] or DIN 1164 [17] and were tested in accordance with DIN EN 196 [18]. The aggregate consisted of coarse Rhine sand with the A32 / B32 grading curve and complied with DIN 4226

Tafel 1: Betonzusammensetzung, Frisch- und Festbetonkennwerte
Table 1: Concrete composition, characteristic values of fresh and hardened concrete

Beton Concrete	Zusammensetzung/Composition in kg/m ³ z Zement / Cement w Wasser / Water f Steinkohlenflugasche / Coal fly ash s Si-Staub / Si- fume		Ausbreitmaß in cm nach Spread in cm after				Wülfeldruckfestigkeiten Compressive strength f _{cm,cube,dry} in N/mm ² nach / after				Statischer E-Modul / Static modulus of elasticity in N/mm ²
			5 min	10 min ²⁾	45 min	120 min	2 d	7 d	28 d	91 d	
B1a (Referenz)	CEM I 32,5 R	Gesteinskörnung / Aggregate: Rheinkiesand / Rhenish gravelly sand A32/B32 Zugabewasser für: Mixing water for: • Referenzbetone Reference concrete: w = Trinkwasser Drinking water • Betone mit Restwasser Concretes with recycled water: 1/3 w = Trinkwasser Drinking water; 2/3 w = Restwasser Recycled water (Restwasserfeststoff im Stoffraum unberücksichtigt Volume of fines in recycled water not taken into account)	48	48	45	42	16,7	28,9	40,4	49,9	31 600
B1a-la			46	49 (0,2)	45	42	16,2	29,5	43,7	47,3	31 000
B1a-la ₇₂			46	49 (0,2)	44	41	18,2	28,1	41,0	48,0	29 150
B1a-lb			49	49	46	40	16,0	28,9	41,0	50,6	30 550
B1a-lc			45	49 (0,2)	45	42	17,3	30,8	45,0	53,6	31 750
B1a-lla			53	53	49	43	16,4	27,8	40,3	47,3	31 000
B1a-lla ₇₂			40	47 (0,5)	45	37	17,9	31	43,4	50,2	32 213
B1a-llb			53	53	49	46	16,9	28,8	40,9	49,8	35 276
B1a-llc			50	50	47	43	14,8	29,2	41,5	49,2	31 600
B1b (Referenz)			CEM III/B 32,5 NW/HS/NA	Ausbreitmaß-Klasse F3 ¹⁾ Flow class	44	50 (0,3)	45	37	7,1	23,6	40,0
B1b-la	46	50 (0,3)			42	38	7,5	22,2	37,3	46,0	27 000
B1b-la ₇₂	44	49 (0,3)			40	38	5,8	22,1	39,0	44,8	26 000
B1b-lb	43	48 (0,3)			42	38	7,7	25,5	45,1	49,1	28 450
B1b-lc	45	50 (0,3)			44	40	6,8	23,1	41,8	49,4	26 500
B1b-lla	49	49			43	38	7,8	22,8	36,9	43,3	25 109
B1b-lla ₇₂	37	46 (0,8)			37	⁴⁾	8,0	24,5	40,0	47,5	24 462
B1b-llb	51	50			46	40	9,0	25,4	41,1	46,5	24 189
B2 (Referenz)	CEM I 32,5 R	z = 330 w/z = 0,48 F2 ¹⁾ LP-Bildner / AEA ≈ 0,04 M.-% v. z; LP / Air ~ 5,0 Vol.-%	43	41	36	⁴⁾	19,4	30,3	40,0	44,1	26 779
B2-lla			43	42	39	35	18,9	28,5	38,5	40,6	28 586
B2-lla ₇₂			35	40 (0,5)	37	⁴⁾	20,2	31,5	41,8	44,8	25 762
B2-llc			41	40	37	34	20,4	30,0	42,0	43,1	27 364
B3 (Referenz) ³⁾	CEM I 42,5 R	z = 400 f = 50 s = 25 w/(z+0,4-f+s) = 0,35 F3 ¹⁾	50	47	46	40	51,0	66,7	90,6	96,8	32 562
B3-la ³⁾			52	48	46	40	46,0	61,1	84,0	90,0	n.b.
B3-lla ³⁾			54	53	51	43	47,6	63,9	84,3	92,2	32 529
B3-lla ₇₂ ³⁾			41	38	⁴⁾	⁴⁾	50,4	63,3	83,9	92,0	31 945

n.b. = nicht bestimmt / not determined

¹⁾ Ausbreitmaß-Klasse nach 45 min / Flow class after 45 min

²⁾ Werte in Klammern: nachträglich zugegebene Menge an BV zur Ansteifkorrektur in M.-% v. z
 Values in brackets: subsequently added amounts of plasticizer against stiffening in mass % of cement

³⁾ Betone enthalten 2,0 M.-% v. z FM / Dosage of superplasticizer 2.0 mass % of cement

⁴⁾ Ausbreitmaß nicht bestimmt, da Betone zerfallen / Flow diameter not determined, as concretes disintegrate

insgesamt 270 kg/m³. Die Zemente entsprachen EN 197-1 [16] bzw. DIN 1164 [17] und wurden nach DIN EN 196 [18] geprüft. Die Gesteinskörnung bestand aus Rheinkiesand der Sieblinie A32 / B32 und entsprach DIN 4226 [10]. Die Betone enthielten als Zusatzstoff 60 kg/m³ Steinkohlenflugasche (f) nach DIN EN 450 [19], die mit dem Faktor k = 0,4 auf den äquivalenten Wasserzementwert w/z (eq) angerechnet wurde.

Um zu untersuchen, ob und welchen Einfluss unterschiedliche Zusatzmittelwirkstoffe auf die Eigenschaften des Restwassers und die damit hergestellten Betone haben, wurden den Restbetonen verschiedene Zusatzmittelwirkstoffe zugegeben. So enthielten die Betone zur Herstellung von Restwasser (a) kein Zusatzmittel, von Restwasser (b) jeweils eine Dosierung von 0,5 M.-% Calciumlignin-sulfonat (BV-Wirkstoff), für Restwasser (c) eine Dosierung von 3,0 M.-% Naphthalinsulfonat (FM-Wirkstoff) und Restwasser (d) eine Dosierung von 0,2 M.-% Tetrakaliumpyrophosphat (VZ-Wirkstoff). Die Mengenangaben beziehen sich auf den Zementgehalt.

Die Restbetone wurden in einem Freifallmischer hergestellt. Die Gesamtmischzeit für einen Restbeton betrug ca. 3 Stunden, wobei der Beton alle 10 Minuten 1 Minute lang aufgemischt wurde. Damit sollte ein „Transportbeton“ bis zur Rückkehr ins Transportbetonwerk simuliert werden. Nach dieser Mischzeit

[10]. The concretes contained 60 kg/m³ coal fly ash (f) as an addition as defined in DIN EN 450 [19] which was catered for in the calculation of the equivalent water/cement ratio w/c (eq) by using the factor k = 0.4.

The active ingredients of various admixtures were added to the residual concretes in order to investigate whether and how the different active ingredients affect the properties of the recycled water and of the concretes produced with them. The concretes for producing recycled water (a) contained no admixture. For producing recycled water (b) they each contained 0.5 mass % calcium lignosulfonate (plasticizer active ingredient), for recycled water (c) they contained 3.0 mass % naphthalene sulfonate (superplasticizer active ingredient) and for recycled water (d) they contained 0.2 mass % tetrapotassium pyrophosphate (setting retarder active ingredient). The quantities given are relative to the cement content.

The residual concretes were produced in a free-fall batch mixer. The total mixing time for a recycled concrete was approximately 3 hours, during which the concrete was mixed for 1 minute every 10 minutes. This was intended to simulate a “ready-mixed concrete” up to the time when it is returned to the ready-mixed concrete plant. After this mixing time the residual concrete was washed with water (drinking water from the Düsseldorf mains supply) over a 0.25 mm screen into a container until the recycled water had a

Tafel 2: Zusammensetzung von Betonrestwasser und Alter bei Einsatz
Table 2: Composition of recycled concrete water and age at application

Bezeichnung Marking	Restwasserdichte Density in kg/dm ³	Zusammensetzung des Restbetons Composition of returned concrete		Verhältnis Auswaschwasser zu Zugabewasser Ratio of wash water to mixing water	Alter bei Einsatz Age at application in h ¹⁾
		z, w, g, f in kg/m ³	Zusatzmittel Admixture in M.-% v.z.		
Ia	1,07	z = 270 (50 % CEM I 32,5 R, 50 % CEM III/B 32,5 NW/HS/NA)	keine no admixture	20:1	3
IIa	1,15			10:1	
Ia ₇₂	1,07	w = 180 (Trinkwasser Drinking water)	0,5 Calciumligninsulfonat Calciumlignosulphonate (BV) ³⁾	20:1	72
IIa ₇₂	1,15			10:1	
Ib	1,07	g = 1800 (Rheinkiesand Rhenish gravelly sand A32 / B32)	3,0 Naphthalinsulfonat Naphthalenesulphonate (FM) ^{2) 3)}	20:1	3
IIb	1,15			10:1	
Ic	1,07	f = 60 (Steinkohlenflugasche Coal fly ash)	0,2 Tetrakaliumpyrophosphat Tetra potassium pyrophosphate (VZ) ³⁾	20:1	
IIc	1,15			10:1	
Id	1,07	w/(z+0,4·f) = w/z(eq) = 0,61		20:1	
IIId	1,15			10:1	

¹⁾ bezogen auf den Zeitpunkt der Zugabewassergabe / relative to the time of addition of the mixing water

²⁾ Wassergehalt des Fließmittels (FM) wurde auf das Zugabewasser angerechnet
 Water content of the superplasticizer was taken into account in the amount of mixing water

³⁾ Wirkstoffgehalt Calciumligninsulfonat, Naphthalinsulfonat = 40 M.-%, Tetrakaliumpyrophosphat = 100 M.-%
 Effective substance content of Calciumlignosulphonate, Naphthalenesulphonate = 40 mass %, Tetra potassium pyrophosphate = 100 mass %

wurde der Restbeton mit so viel Wasser (Trinkwasser aus dem Düsseldorfer Leitungsnetz) über einem 0,25-mm-Sieb in einen Behälter ausgewaschen, bis das Restwasser jeweils eine Dichte von 1,07 kg/dm³ (Restwasser I) bzw. 1,15 kg/dm³ (Restwasser II) aufwies. Das Verhältnis von „Auswaschwasser“ zu dem im Beton enthaltenen Zugabewasser betrug dabei rd. 20:1 bzw. rd. 10:1. Die Restwasserdichte 1,07 kg/dm³ stellt die Obergrenze des in [1] festgelegten Regelfalls und die Restwasserdichte 1,15 kg/dm³ die Obergrenze des Ausnahmefalls für den Feststoffeintrag über das Restwasser in den neuen Beton dar (s. Abschnitt 2).

Bezüglich großer Mengen an unhydratisiertem reaktivem Zement und der Gehalte an Zusatzmittelwirkstoffen sowie hoher Gehalte an gelösten Stoffen, z.B. Sulfate, stellt Restwasser mit geringem Alter einen Extremfall dar. Deshalb wurden Restwässer, die aus Betonen mit Zusatzmittelzugabe hergestellt wurden (Restwässer b, c, d), unmittelbar nach dem Auswaschen im Alter von rd. 3 Stunden, bezogen auf die Wasserzugabe, als Zugabewasser für die entsprechenden Versuchsbetone eingesetzt (s. Tafel 2). Drei Stunden altes Restwasser wird im Folgenden auch als frisches Restwasser bezeichnet. Um den Einfluss der Zeit auf die Eigenschaften des Restwassers und den damit hergestellten Beton zu untersuchen, wurden Restwässer bis zu 72 Stunden (Ia₇₂, IIa₇₂) in einem Restwasserbehälter gelagert. Bis zur Wiederverwendung wurde der Feststoff im Restwasser wie in der Praxis mittels Rührwerk in Suspension gehalten.

Um den Einfluss der im Restwasser gelösten Stoffe auf die Frischbetoneigenschaften zu untersuchen, wurde auch feststofffreies Restwasser als Zugabewasser eingesetzt. Dieses wurde durch Filtration von 3 bzw. 72 Stunden altem Restwasser IIa über einen Weißbandfilter gewonnen.

4.2 Physikalische, chemische und chemisch-mineralogische Restwasseranalyse

Vor der Verwendung wurde jedes Restwasser bezüglich seiner physikalischen, chemischen und chemisch-mineralogischen Beschaffenheit analysiert. Die Vorgehensweise ist ausführlich in [6] beschrieben. Für rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen wurde der Restwasserfeststoff zum jeweiligen Untersuchungszeitpunkt, unmittelbar nach Filtration der Restwasserprobe, mit flüssigem Stickstoff eingefroren. Danach erfolgte eine Gefrierdrying bis zur Massekonstanz. Unmittelbar vor den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden die Proben mit einer leitfähigen Oberfläche versehen.

density of 1.07 kg/dm³ (recycled water I) or 1.15 kg/dm³ (recycled water II). The ratios of “wash water” to the mixing water contained in the concrete were about 20:1 and about 10:1 respectively. The residual water density of 1.07 kg/dm³ represents the upper limit of the normal situation stipulated in [1] and the recycled water density of 1.15 kg/dm³ represents the upper limit of the exceptional case for input of solids into the new concrete via the recycled water (see Section 2).

Freshly prepared recycled water represents the extreme case with respect to large quantities of unhydrated reactive cement and the contents of residual admixture active ingredients as well as high levels of dissolved solids, e.g. sulfates. Recycled water which had been produced from concretes with added admixtures (recycled waters b, c, d) was used as mixing water for the corresponding test concretes directly after washing at the age of about 3 hours relative to the water addition (see Table 2). Recycled water which is three hours old is referred to below as a fresh recycled water. The recycled water was stored for up to 72 hours (Ia₇₂, IIa₇₂) in a recycled water container in order to investigate the influence of time on the properties of the recycled water and of the concrete manufactured with it. Until the recycled water was re-used the solids were kept in suspension with a stirrer in line with current practice.

Solids-free recycled water was also used as mixing water in order to investigate the influence of the materials dissolved in the recycled water on the fresh concrete properties. This was obtained by filtering recycled water IIa on a White Ribbon filter after 3 or 72 hours.

4.2 Physical, chemical and chemico-mineralogical analysis of recycled water

Before use each recycled water was analyzed for its physical, chemical and chemico-mineralogical properties. The procedure is described in detail in [6]. For the scanning electron microscopic investigations the solids in the recycled water were frozen with liquid nitrogen at the relevant investigation time directly after filtration of the recycled water sample. They were then freeze-dried to constant weight. These samples were given a conductive surface immediately before the scanning electron microscope investigations.

4.3 Concrete tests

4.3.1 Production of the reference and test concretes

Air-entrained concretes (B2) and high-strength concretes (B3) were produced in addition to the normal concretes (B1a and B1b), see Table 1. The concretes produced entirely with drinking water

4.3 Betonversuche

4.3.1 Herstellung der Referenz- und Versuchsbetone

Neben Normalbetonen (B1a und B1b) wurden Luftporenbetone (B2) sowie hochfeste Betone (B3) hergestellt, siehe Tafel 1. Die Betone werden, wenn sie vollständig mit Trinkwasser aus dem Düsseldorfer Leitungsnetz hergestellt wurden, als „Referenzbetone“ bezeichnet. Bei den Versuchsbetonen bestand das Zugabewasser jeweils zu $\frac{2}{3}$ aus Restwasser (s. Tafel 2) und zu $\frac{1}{3}$ aus Trinkwasser. Mit der Trinkwasserzugabe wurde die in der Praxis üblicherweise vorhandene Eigenfeuchte der Zuschläge simuliert. Das Volumen der im Restwasser enthaltenen Feststoffe wurde bei der Wasserzugabe berücksichtigt, um den Wasserelementwert der Versuchsbetone mit Restwasser gegenüber dem Referenzbeton mit Trinkwasser gleich groß zu halten. Um ungünstigen Verhältnissen Rechnung zu tragen, wurde der Restwasserfeststoff nicht auf das Volumen der Gesteinskörnungen angerechnet, d.h. dass die Versuchsbetone 18 kg/m^3 (Restwasser I) bzw. 35 kg/m^3 (Restwasser II) mehr Feinstoffe enthielten als die Referenzbetone. Zur Herstellung der Referenz- und Versuchsbetone sowie zur Herstellung der Betone zur Gewinnung des Restwassers wurden die gleichen Ausgangsstoffe verwendet. Die Normalbetone enthielten je Kubikmeter Frischbeton jeweils $260 \text{ kg CEM I 32,5 R}$ (B1a) bzw. $\text{CEM III/B 32,5 NW/HS/NA}$ (B1b) sowie $50 \text{ kg Steinkohlenflugasche}$ und wurden mit einem w/z (eq) = $0,60$ hergestellt. Die Luftporenbetone (B2) wurden mit $330 \text{ kg CEM I 32,5 R}$ und mit einem $w/z = 0,48$ hergestellt. Weiterhin wurde $0,04 \text{ M.-% v. z LP-Bildner}$ auf Basis von Wurzelharz eingesetzt. Hochfeste Betone (B3) waren aus $400 \text{ kg CEM I 42,5 R}$, $50 \text{ kg Steinkohlenflugasche}$, $25 \text{ kg Mikrosilicastaub}$ und $2,0 \text{ M.-% v. z Fließmittel}$ auf Basis von Naphthalinsulfonat zusammengesetzt und wiesen einen w/z (eq) = $0,35$ auf. Alle Betone enthielten als Gesteinskörnung Rheinkies-sand der Sieblinie A32 / B32.

Gemischt wurden die Betone in einem Zwangsmischer. Die Gesamt-mischzeit betrug ca. 2 Minuten. Die Zugabe des Fließmittels bzw. des Luftporenbildners erfolgte bei den entsprechenden Betonen direkt mit dem Zugabewasser, während der Betonverflüssiger (Calciumligninsulfonat) zum Ausgleich geringer Konsistenzschwankungen nachträglich dosiert wurde (s. Tafel 1). Der Wassergehalt des Fließmittels wurde auf das Zugabewasser angerechnet. Bei nachträglicher Dosierung wurde das Zusatzmittel ca. 20 Sekunden untergemischt.

4.3.2 Frischbetonuntersuchungen

Die Referenzbetone B1 und B3 waren so konzipiert, dass sie nach 45 Minuten eine weiche Einbaukonsistenz (KR nach DIN 1045 bzw. F3 nach EN 206-1) aufwiesen. Der Referenzbeton B2 hatte planmäßig eine plastische Einbaukonsistenz (KP nach DIN 1045 bzw. F2 nach EN 206-1) und zum Zeitpunkt des Einbaus einen Luftgehalt im Frischbeton von rd. 5 Vol.-%, (s. Tafel 1). Die Vorhaltemaße für die LP-Zugabe wurden vorab anhand kleinerer Eignungsprüfungen ermittelt. Bei allen Betonen wurden die Frischbetontemperatur, die Frischbetonrohddichte nach DIN 1048-1 [20] und der Luftgehalt mittels Druckausgleichverfahren im Luftporentopf gemessen. Weiterhin wurde unmittelbar nach dem Mischvorgang das Ausbreitmaß des Frischbetons mit dem Ausbreitversuch nach DIN 1048-1 [20] ermittelt. Die Konsistenz der Versuchsbetone wurde mit der Konsistenz des entsprechenden Referenzbetons verglichen. Anhand des Ausbreitmaßes a_s ließ sich der direkte Einfluss des Restwassers auf die Frischbetonkonsistenz ermitteln. Das Ansteifverhalten des Frischbetons wurde bis zu zwei Stunden nach Mischungsende untersucht. Dabei wurde das Ausbreitmaß jeweils nach 5, 10, 30, 45, 60, 90 und 120 Minuten bestimmt. Der Frischbeton lagerte vor Feuchtigkeitsverlusten geschützt im Freifallmischer und wurde unmittelbar vor jeder Entnahme für 10 Sekunden aufgemischt.

4.3.3 Festbetonuntersuchungen

Bei allen Betonen wurde die Betondruckfestigkeit an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge im Alter von 2, 7, 28 und 91 Tagen ermittelt. Außerdem wurde an Betonzylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm der statische E-Modul im Alter von 28 Tagen bestimmt. Die Herstellung, La-

from the Düsseldorf mains supply were designated “reference concretes”. The mixing water for the test concretes consisted in each case of $\frac{2}{3}$ recycled water (see Table 2) and $\frac{1}{3}$ drinking water. The addition of the drinking water simulated the natural moisture of the aggregates normally found in practice. The volume of solids contained in the recycled water was taken into account in the water addition to keep the water/cement ratio of the test concretes made with recycled water at the same level as in the reference concrete made with drinking water. To cater for unfavourable conditions the solids in the recycled water were not included in the calculation of the volume of the aggregate. I.e. the test concretes contained 18 kg/m^3 (recycled water I) or 35 kg/m^3 (recycled water II) more fines than the reference concretes. The same starting materials were used for producing the reference and test concretes as well as for producing the concretes for obtaining the recycled water. In each case the normal concretes contained $260 \text{ kg CEM I 32,5 R}$ cement (B1a) or $\text{CEM III/B 32,5 NW/HS/NA}$ cement (B1b) and $50 \text{ kg coal fly ash per cubic metre of fresh concrete}$, and were produced with a water/cement (eq) = 0.60 . The air-entrained concretes (B2) were produced with $330 \text{ kg CEM I 32,5 R}$ cement and a water/cement = 0.48 . 0.04 mass \% , relative to the cement, of air-entraining agent based on wood rosin was also used. High-strength concretes (B3) were composed of $400 \text{ kg CEM I 42,5 R}$ cement, $50 \text{ kg coal fly ash}$, $25 \text{ kg microsilica dust}$ and 2.0 mass \% (relative to cement) of superplasticizer based on naphthalene sulfonate, and had a water/cement (eq) = 0.35 . All concretes contained coarse Rhine sand with the A32 / B32 grading curve as aggregate.

The concretes were mixed in a mechanical forced mixer. The total mixing time was approximately 2 minutes. For the appropriate concretes the superplasticizer or air-entraining agent was added directly with the mixing water, while the concrete plasticizer (calcium lignosulfonate) was added later to even out small fluctuations in consistency (see Table 1). The water content of the superplasticizer was included in the calculation of the mixing water. When it was added subsequently the admixture was mixed in for about 20 seconds.

4.3.2 Fresh concrete investigations

The reference concretes B1 and B3 were designed so that after 45 minutes they had a soft placement consistency (KR as defined in DIN 1045 or F3 as defined in EN 206-1). The reference concrete B2 was designed to have a plastic placement consistency (KP as defined in DIN 1045 or F2 as defined in EN 206-1) and an air content in the fresh concrete of about 5 vol.% at the time of placement (see Table 1). The quantity of air-entraining agent which needed to be added was determined in advance with the aid of small suitability tests. For all concretes the fresh concrete temperature, the fresh concrete bulk density as defined in DIN 1048-1 [20], and the air content were measured by the pressure-compensation method in the air void test equipment. The flow diameter of the fresh concrete was also measured directly after the mixing process using the flow test defined in DIN 1048-1 [20]. The consistencies of the test concretes were compared with the consistencies of the corresponding reference concretes. The direct effect of the recycled water on the fresh concrete consistency can be determined from the flow diameter a_s . The stiffening behaviour of the fresh concrete was investigated for up to two hours after the end of mixing. In each case the flow diameter was determined after 5, 10, 30, 45, 60, 90 and 120 minutes. The fresh concrete was stored in a free-fall mixer protected from moisture loss and was mixed for 10 seconds directly before each removal.

4.3.3 Hardened concrete investigations

The concrete compressive strength was determined for all concretes on 150 mm cubes at 2, 7, 28 and 91 days. The static modulus of elasticity was also determined at 28 days on concrete cylinders with diameters of 150 mm and heights of 300 mm . The test pieces were produced, stored and tested in accordance with DIN 1048-5 [21].

The shrinkage and creep characteristics were investigated on cylinders with diameters of 150 mm and heights of 600 mm in accordance with the test method specified in [22]. The test pieces were produced as described in DIN 1048-5. The test pieces were

gerung und Prüfung der Probekörper erfolgte nach DIN 1048-5 [21].

Das Schwind- und Kriechverhalten wurde an Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 600 mm entsprechend dem in [22] angegebenen Prüfverfahren untersucht. Die Probekörper wurden nach DIN 1048-5 hergestellt. Sieben Tage nach der Herstellung wurden die Probekörper aus der Feuchtlagerung entnommen. Alle weiteren Untersuchungen erfolgten im Klimaraum bei 20 °C und 65 % r.F. vor Zugluft geschützt. Bei der Untersuchung des Kriechverhaltens wurden die Zylinder im Alter von 28 Tagen in Kriechstände eingespannt und mit einer konstanten Kriechspannung, die rd. $\frac{1}{3}$ der Druckfestigkeit entsprach, belastet. Die Verformungen wurden mit einem Setzdehnungsmesser über einen Zeitraum von rd. 365 Tagen ermittelt.

Die Prüfung des Frostwiderstands erfolgte mit dem Würfelverfahren [22] an Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm im Alter von 28 Tagen. Die Würfel wurden mit 2 Frost-Tau-Wechseln je Tag und insgesamt mit 100 Frost-Tau-Wechseln beansprucht. Bei den Luftporenbetonen erfolgte die Prüfung des Frost-Tausalz-widerstands mit dem Würfelverfahren an Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm im Alter von 28 Tagen in 3%iger Natriumchlorid-Lösung gemäß [22]. Die Würfel wurden mit 2 Frost-Tau-Wechseln je Tag und insgesamt mit 100 Frost-Tau-Wechseln beansprucht. Zusätzlich wurden an gesägten Betonprismen 150/100/40 mm³ der Luftgehalt (La), der Mikroluftporengehalt L300 und der Abstandsfaktor (AF) ermittelt.

Die Prüfung des Carbonatisierungswiderstands erfolgte entsprechend dem in [22] angegebenen Prüfverfahren an Betonbalken mit den Abmessungen 100/100/500 mm³ über einen Zeitraum von 365 Tagen.

Die Untersuchung des Elutionsverhaltens gegenüber deionisiertem Wasser erfolgte an Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm im Alter von 28 Tagen in Anlehnung an das Trogverfahren [23]. Das Verhältnis der Probekörperoberfläche zum Volumen des deionisierten Wassers betrug rd. 1:12. Nach 24-stündiger Beanspruchung der Probekörper wurden die Eluate bezüglich der Gehalte an As, Cd, Cr, Pb, Zn, Cl, Ca, K, Na, NO₃ und SO₄ analysiert.

5 Darstellung und Erörterung der Versuchsergebnisse

5.1 Restwasseranalyse

5.1.1 Physikalische, chemische und chemisch-mineralogische Beschaffenheit der Restwässer

Die Suspensionsdichte wurde bei den Restwässern I auf 1,07 kg/dm³ und bei den Restwässern II auf 1,15 kg/dm³ eingestellt. Die rechnerischen Feststoffgehalte der Restwässer I bzw. II betragen somit rd. 12 M.-% bzw. rd. 24 M.-%. Die experimentell ermittelten Feststoffgehalte für die im Labor hergestellten Restwässer I lagen im Mittel bei rd. 12 M.-% und für die Restwässer II bei rd. 21 M.-%. Die Dichten der Feststoffe in den 3 Stunden alten, also frischen Restwässern, betragen rd. 2,4 kg/dm³, die der über 72 Stunden gelagerten Restwässer aufgrund der fortschreitenden Zementhydratation rd. 2,3 kg/dm³. Die etwas höheren Feststoffdichten in den Restwässern Id und IId mit rd. 2,5 kg/dm³ resultierten aus dem im Frischbeton eingesetzten verzögernden Wirkstoff Tetrakaliumpyrophosphat. Insgesamt betrachtet lagen die bei diesen Versuchen ermittelten Feststoffdichten im Allgemeinen über der für Berechnungen in der Restwasserrichtlinie [1] angenommenen mittleren Dichte des Restwasserfeststoffs von rd. 2,1 kg/dm³.

Erwartungsgemäß wiesen die über 72 Stunden gelagerten Restwässer (RW Ia₂₂, RW IIa₂₂) gegenüber den 3 Stunden alten Restwässern (RW Ia, RW IIa) einen aufgrund der fortschreitenden Zementhydratation höheren Anteil an chemisch gebundenem Wasser auf. Bei den Restwässern, die aus verzögerten Betonen hergestellt wurden, enthielt der Feststoff die geringsten Anteile an chemisch gebundenem Wasser. Die bei den Untersuchungen ermittelten Mengen an chemisch gebundenem Wasser korrespondierten insgesamt mit den beobachteten Feststoffdichten. Die auf den Zementanteil im Restwasserfeststoff bezogenen Gehalte an chemisch gebundenem Wasser einer Restwassersuspension zeigt Bild 1. Bei der Ankunft des Restbetons im Transportbetonwerk nach rd. 3 Stunden hatte der Zementanteil im Restwasser erst

removed from moist storage seven days after production. All further investigations were carried out in a climatic chamber at 20 °C and 65 % r.h. protected from draught. For investigation of the creep behaviour the cylinder was clamped in a creep stand at 28 days and loaded with a constant creep stress, i.e. about $\frac{1}{3}$ of the compressive strength. The deformation was measured with a stress-probing extensometer over a period of about 365 days.

The freeze-thaw resistance was tested by the cube method [22] on 100 mm cubes at 28 days. The cubes were exposed to 2 freeze-thaw cycles per day and to 100 freeze-thaw cycles in total. For the air-entrained concretes the resistance to freeze-thaw with de-icing salt was tested by the cube method on 100 mm cubes at 28 days in 3 % sodium chloride solution as described in [22]. The cubes were exposed to 2 freeze-thaw cycles per day and to 100 freeze-thaw cycles in total. The air content (La), the micro air void content L300 and spacing factor (AF) were also determined on sawn 150/100/40 mm³ concrete prisms.

The carbonation resistance was tested on 100/100/500 mm³ concrete beams over a period of 365 days in accordance with the test procedure specified in [22].

The elution behaviour with de-ionized water was investigated on 100 mm cubes at 28 days following the procedure for the trough method [23]. The ratio of test piece surface area to volume of de-ionized water was about 1:12. After the test piece had been exposed for 24 hours the eluate was analyzed for the levels of As, Cd, Cr, Pb, Zn, Cl, Ca, K, Na, NO₃ and SO₄.

5 Representation and discussion of the test results

5.1 Analysis of the recycled water

5.1.1 Physical, chemical and chemico-mineralogical nature of the recycled water

The suspension density was adjusted to 1.07 kg/dm³ for recycled water I and to 1.15 kg/dm³ for recycled water II. The calculated solids contents of recycled water I and II were therefore about 12 mass % and about 24 mass % respectively. The experimentally determined solids content of recycled water I produced in the laboratory was on average about 12 mass % and of recycled water II was about 21 mass %. The density of the solids in the three-hour-old, i.e. fresh, recycled water was about 2.4 kg/dm³ and that in the recycled water stored for 72 hours was about 2.3 kg/dm³ because of the advancing cement hydration. The somewhat higher densities of the solids in the recycled waters Id and IId of about 2.5 kg/dm³ resulted from the retarding active ingredient tetrapotassium pyrophosphate used in the fresh concrete. Considered as a whole the densities of the solids determined in these trials were generally higher than the average density of the recycled water solids of about 2.1 kg/dm³ assumed for the calculations in the recycled water guideline [1].

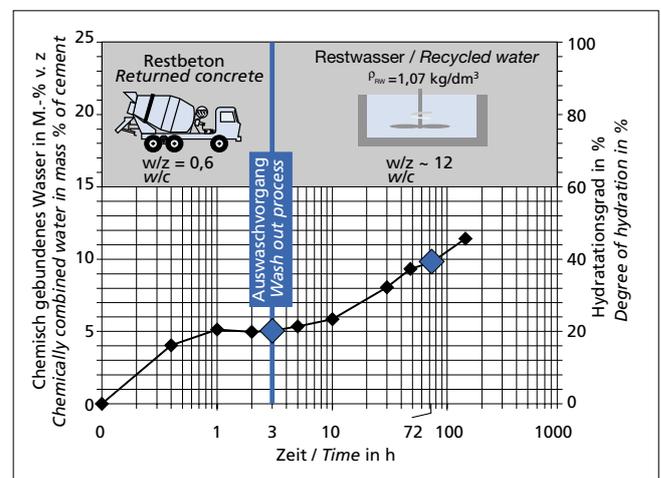


Bild 1: Gehalt des durch CEM I 32,5 R chemisch gebundenen Wassers

Figure 1: Content of water chemically combined by CEM I 32,5 R

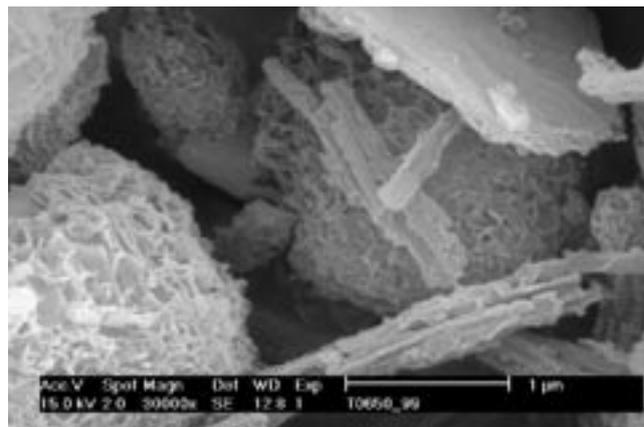
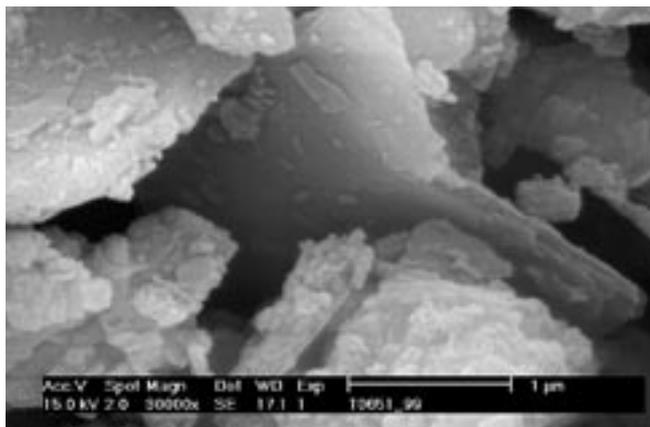


Bild 2: Restwasserfeststoff 30000fach vergrößert: links unmittelbar nach dem Auswaschvorgang und rechts nach rd. 72-stündiger Lagerung im Restwasserbehälter

Figure 2: Solids in recycled water, magnified 30 000 times: left – immediately after the wash out process; right – after about 72 hours' storage in the recycled water basin

rd. 5 M.-% Wasser chemisch gebunden und somit einen Hydrationsgrad von rd. 20 % erreicht. Der weitere Kurvenverlauf zeigt deutlich die fortschreitende Zementhydratation im Restwasserbecken. Der Zementanteil im Restwasser hatte nach rd. 72 Stunden die doppelte Menge an Wasser im Vergleich zur 3 Stunden alten Probe chemisch gebunden. Durch die im Verlauf der Zementhydratation gebildeten Hydratationsprodukte (z.B. Calciumsilicathydrate- CSH) veränderte sich mit der Morphologie auch die spezifische Oberfläche der Zementpartikel. Das verdeutlichen die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von Restwasserfeststoff im Alter von 3 bzw. 72 Stunden im Bild 2. 72 Stunden alter Restwasserfeststoff wies im Vergleich zu 3 Stunden altem Restwasserfeststoff eine wesentlich größere spezifische Oberfläche auf.

5.1.2 Chemische Beschaffenheit der Restwässer (feststofffrei)

Ausgewählte Ergebnisse der chemischen Analysen der feststofffreien Restwässer sind in Tafel 3 zusammengestellt. Die Restwässer waren bei der Analyse 3, 24 bzw. 72 Stunden alt.

Die Sulfatgehalte der Restwässer lagen weit unter dem Grenzwert von 2000 mg/l, der für feststofffreies Waschwasser von gips- oder anhydritgebundenen Restmörtel angegeben ist. Die höchsten Gehalte an gelöstem Sulfat wiesen die Restwässer II im frischen Zustand auf. Hierbei wurden Gehalte an gelöstem Sulfat von bis zu rd. 1200 mg/l in der flüssigen, feststofffreien Phase und bis zu rd. 2 M.-% im Feststoff ermittelt. Dies bedeutet, dass der weitaus größte Teil des Sulfats im Feststoff enthalten ist. Während der Lagerung des Restwassers nahmen die Anteile an gelöstem Sulfat erwartungsgemäß stark ab und die Sulfatgehalte im Feststoff zu.

Trotz relativ hoher Einsatzmengen an Calciumligninsulfonat (BV), Naphthalinsulfonat (FM) oder Tetrakaliumpyrophosphat (VZ) im Frischbeton konnten, wenn überhaupt, nur äußerst geringe Mengen gelöster Wirkstoffe im Restwasser nachgewiesen werden. Das Bild 3 zeigt, dass die Basiswirkstoffe für Verflüssiger und Fließmittel schon nach 3 Stunden zu rd. 85 % und nach 24 Stunden vollständig an die Zementpartikel gebunden waren. Der Verzögererwirkstoff war bereits nach 3 Stunden im Restwasser nicht mehr nachweisbar. Das deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen in [7] und [24].

5.2 Frischbetonuntersuchungen

Die umfangreichen Untersuchungen zum Ansteifen von Betonen mit Restwasser ergaben, dass Restwasser bis zu einer Dichte von 1,07 kg/dm³ (Restwasser I) die Ausgangskonsistenzen und das Ansteifen von Betonen nicht signifikant beeinträchtigte, siehe Tafel 1. Bild 4 zeigt die Entwicklung des Ausbreitmaßes von Beton B1a ohne jegliche korrigierende BV-Zugabe bis zu 45 Minuten. Die schnelle Wiederverwendung des feststoffreichen frischen Restwassers II direkt nach dem Auswaschvorgang (3 Stunden) führte bei den relativ mehlkornarmen Standardbetonen zu einer deutlichen

As expected, the recycled water stored for 72 hours (RW Ia₇₂, RW IIa₇₂) had a higher percentage of chemically combined water than the 3-hour-old recycled water (RW Ia, RW IIa) because of the advancing cement hydration. The solids in the recycled waters produced from retarded concretes contained the lowest percentage of chemically combined water. The quantities of chemically combined water determined in the investigations corresponded on the whole with the observed densities of the solids. Figure 1 shows the contents of chemically combined water in a recycled water suspension relative to the percentage of cement in the recycled water solids. When the residual concrete arrived at the ready-mixed concrete plant after about 3 hours the cement fraction in the recycled water had only chemically combined about 5 mass % water and hence reached a degree of hydration of about 20 %. The continuing shape of the curve shows clearly the advancing cement hydration in the recycled water basin. The cement fraction in the recycled water after about 72 hours contained double the quantity of chemically combined water when compared to the 3-hour-old sample. The specific surface area of the cement particles also changed with the morphology due to the hydration products (e.g. calcium silicate hydrates – CSH) formed in the course of the cement hydration. This is shown clearly by the scanning electron microscope photomicrographs of the solids in the recycled water at 3 and 72 hours in Figure 2. The 72-hour-old recycled water solids had a substantially larger surface area than the 3-hour-old recycled water solids.

5.1.2 Chemical nature of the recycled water (solids-free)

Selected results of the chemical analysis of the solids-free recycled water are listed in Table 3. At the time of analysis the recycled waters were 3, 24 or 72 hours old.

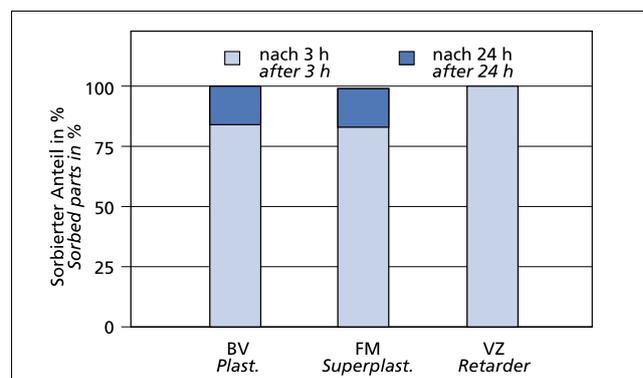


Bild 3: Sorbierte Anteile der Zusatzmittelwirkstoffe an den Zementpartikeln im Restwasser I und II nach 3 bzw. 24 Stunden

Figure 3: Percentage of active admixture ingredient sorbed on the cement particles in recycled water I and II after 3 and 24 hours

Tafel 3: Ergebnisse der Restwasseranalysen – feststofffrei
Table 3: Results of recycled water analysis – solid-free

Eigenschaft Property	Bezeichnung des Restwassers ¹⁾ Designation of the recycled water											
	la	la ₇₂	lb	lc	ld	lla	lla ₇₂	llb	llb ₂₄	llc	lld	
Chemische Beschaffenheit des feststofffreien Restwassers Chemical properties of the solid-free recycled water												
pH-Wert pH-value	-	12,7	13,3	12,7	12,6	12,8	12,8	12,9	12,9	13,0	12,8	12,6
PO ₄ ³⁻	mg/l	0,63	0,37	0,63	n.n.	0,39	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
SO ₄ ²⁻	mg/l	616,8	2,7	503,0	453,9	469,9	1155	6,4	1217	9,4	n.b.	943
Na	mg/l	65	90	75	n.b.	70	55	38	40	37	n.b.	38
K	mg/l	210	285	205	120	280	464	401	390	356	n.b.	312

¹⁾ Alter des Restwassers: ohne Index 3 h, sonst nach Index in h / Age of the recycled water: without subscript = 3 h, otherwise as per subscript in h
n.n. = nicht nachweisbar / not detectable
n.b. = nicht bestimmt / not determined

Verbesserung der Verarbeitbarkeit. Dagegen führte Restwasser nach 72-stündiger Lagerung zu wesentlich steiferen Konsistenzen und, wie der etwas steilere Abfall der unteren Linie zeigt, zu einem stärkeren Ansteifen als Restwasser geringeren Alters. Dies ist auf die während der Vorlagerung entstandenen Hydratationsprodukte und den damit verbundenen erhöhten Wasseranspruch des 72 Stunden alten Restwasserfeststoffs zurückzuführen – siehe Bild 2. Die Untersuchungen ergaben, dass besonders bei sehr feststoffreichen Restwässern der Restwasserfeststoff im Stoffraum bereits beim Mischungsentwurf berücksichtigt werden muss, wie es auch in der DAfStb-Richtlinie [1] verlangt wird. Untersuchungen mit feststofffreiem Restwasser ergaben, dass die im Restwasser enthaltenen gelösten Stoffe die Frischbetonkonsistenz und das Ansteifverhalten nicht signifikant beeinflussten.

5.3 Festbetonuntersuchungen

Bild 5 zeigt die Druckfestigkeit normalfester Betone (B1a), die mit CEM I 32,5 R und mit Restwasser I bzw. II verschiedener Zu-

The levels of sulfate in the recycled water lay far below the limit of 2 000 mg/l specified for solids-free wash water from gypsum- or anhydrite-bonded recycled mortar. The highest levels of dissolved sulfate were exhibited by recycled water II in the fresh state, in which levels of dissolved sulfate of up to about 1 200 mg/l were determined in the liquid, solids-free, phase and up to about 2 mass % in the solids. This meant that by far the majority of the sulfate was contained in the solids. During the storage of the recycled water the percentages of dissolved sulfate dropped sharply as expected and the sulfate levels in the solids increased.

In spite of the relatively large quantities of calcium lignosulfonate (plasticizer) naphthalene sulfonate (superplasticizer) or tetrapotassium pyrophosphate (setting retarder) used in the fresh concrete only extremely small quantities, if any, of dissolved active ingredients could be detected in the recycled water. Figure 3 shows that the basic active ingredients for plasticizers and superplasticizers were about 85 % combined in the cement particles after only 3 hours and were fully combined after 24 hours. The retarding active ingredient could no longer be detected in the recycled water after only 3 hours. This agrees with the findings in [7] and [24].

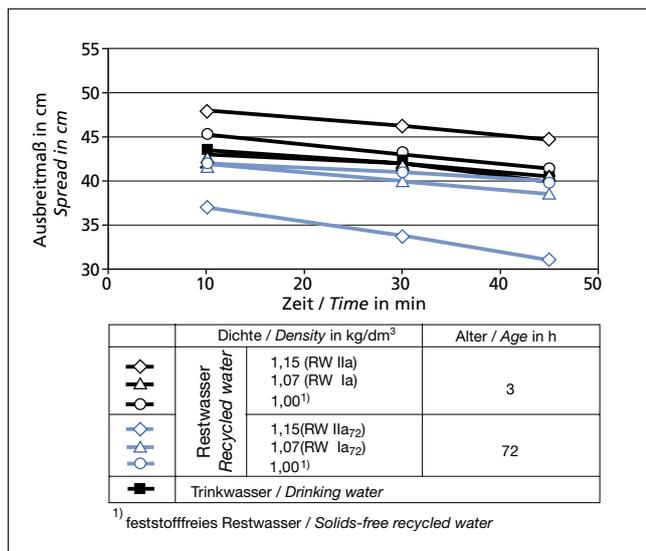


Bild 4: Einfluss von Restwasser mit verschiedener Dichte und unterschiedlichem Alter auf das Ausbreitmaß von Beton B1a ohne Ansteifkorrektur durch eine BV-Zugabe. Der Restwasserfeststoff wurde im Stoffraum nicht berücksichtigt.

Figure 4: Influence of recycled water of different densities and ages on the spread of concrete B1a, without addition of plasticizer to adjust stiffening. The solids in the recycled water were not taken into account when calculating the volume of the concrete mix proportions.

5.2 Fresh concrete investigations

The extensive investigations into the stiffening of concretes made with recycled water showed that recycled water up to a density of 1.07 kg/dm³ (recycled water I) had no significant adverse effect on the initial consistency or the stiffening of concretes, see Table 1. Figure 4 shows the change in the flow diameter of concrete B1a without any corrective addition of plasticizer up to 45 minutes. The rapid re-use of the solids-rich fresh recycled water II directly after the washing procedure (3 hours) led to a significant improvement in the workability with the relatively low-fines standard concretes. On the other hand, recycled water after 72 hours storage led to substantially stiffer consistencies and, as shown by the somewhat steeper downward slope of the bottom line, to greater stiffening than with the younger recycled water. This is attributable to the hydration products produced during the preliminary storage and the resulting increased water demand of the 72-hour-old recycled water solids – see Figure 2. The investigations showed that the volume occupied by the solids in the recycled water must be taken into account in the mix design, especially with very solids-rich recycled waters, as is also required by the DAfStb guideline [1]. The investigations with solids-free recycled water showed that the dissolved substances contained in the recycled water have no significant effect on the fresh concrete consistency or the stiffening behaviour.

5.3 Hardened concrete investigations

Figure 5 shows the compressive strength of normal-strength concretes (B1a) that had been produced with CEM I 32,5 R and with recycled water I or II of varying composition. The recycled water density and the recycled water age as well as the small quan-

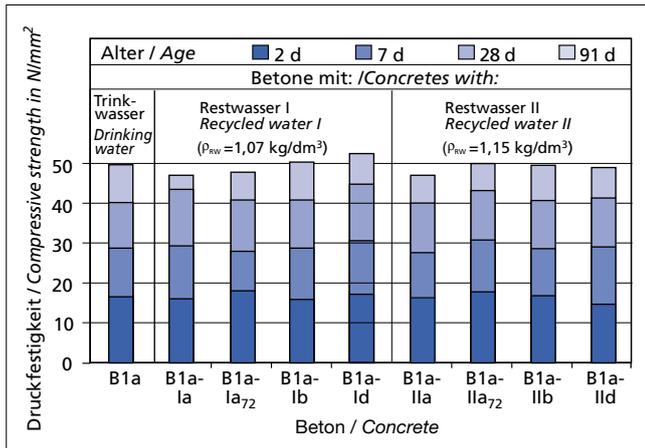


Bild 5: Druckfestigkeit normalfester Betone (B1a) mit Restwasser
Figure 5: Compressive strength of normal strength concretes (B1a) containing recycled water

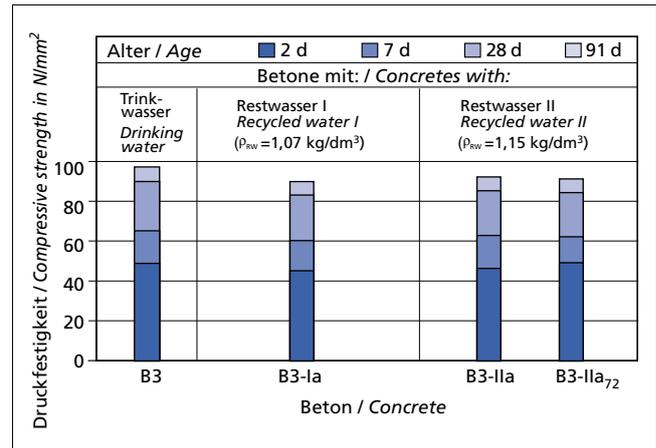


Bild 6: Druckfestigkeit hochfester Betone (B3) mit Restwasser
Figure 6: Compressive strength of high strength concretes (B3) containing recycled water

sammensetzung hergestellt wurden. Die Restwasserdichte und das Restwasseralter sowie die in geringen Mengen enthaltenen gelösten Zusatzmittelwirkstoffreste in den Restwässern hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Betondruckfestigkeit im Alter von 2, 7, 28 und 91 Tagen und auf den im Alter von 28 Tagen ermittelten statischen Elastizitätsmodul der Versuchsbetone (s. Tafel 1). Das traf auch auf die mit Hochofenzement hergestellten normalfesten Betone zu. Das Festigkeitsniveau hochfester Betone lag bei Verwendung von Restwasser nur geringfügig niedriger (Bild 6).

Bild 7 zeigt stellvertretend, dass das Schwindverhalten durch Restwasser im Allgemeinen nicht signifikant beeinträchtigt wurde. Bei Verwendung 72 Stunden alten feststoffreichen Restwassers II ($\rho_{RW} = 1,15 \text{ kg/dm}^3$) lagen die Schwindmaße geringfügig über denen des Referenzbetons. Ebenso wenig wurde das Kriechverhalten durch das Restwasser beeinflusst.

Wie Bild 8 zeigt, konnten Luftporenbetone selbst mit Restwasser II ($\rho_{RW} = 1,15 \text{ kg/dm}^3$) sicher hergestellt werden und nach den insgesamt vorliegenden Kenntnisstand ist eine Beeinträchtigung durch feststoffärmeres Restwasser nicht zu erwarten. Die Ausbildung eines stabilen Mikroluftporensystems wurde durch das Restwasser nicht beeinträchtigt. Der Gehalt an Mikroluftporen L300 und der Abstandsfaktor AF entsprachen den Anforderungen des „Merkblatts für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton“ [25]. Die Abwitterungsmengen lagen unter einem Masseprozent. Alle Luftporenbetone wiesen einen hohen Frost-Tausalz widerstand auf. Diese Versuchsergebnisse decken sich mit Ergebnissen in [26]. Hierbei wurden Luftporenbetone mit gleicher

tities of dissolved active admixture ingredients contained in the recycled water had no significant effect on the concrete compressive strength at 2, 7, 28 or 91 days or on the static modulus of elasticity of the test concretes determined at 28 days (see Table 1). This also applied to the normal-strength concretes produced with blast-furnace cements. The strength level of high-strength concretes was only very slightly lower when recycled water was used (Figure 6).

Figure 7 shows that in general the shrinkage behaviour is not significantly adversely affected by recycled water. When 72-hour-old solids-rich recycled water II ($\rho_{RW} = 1.15 \text{ kg/dm}^3$) was used the shrinkage was slightly higher than that of the reference concrete. The recycled water had equally little effect on the creep behaviour.

As is shown by Figure 8, air-entrained concretes could be produced reliably even with recycled water II ($\rho_{RW} = 1.15 \text{ kg/dm}^3$) and all available findings indicate that low-solids recycled water is not expected to have any adverse effect. The formation of a stable micro air void system was not adversely affected by the recycled water. The content of L300 micro air pores and the AF spacing factor met the requirements of the “Code of practice for the production and placement of air-entrained concretes” [25]. The weathering losses lay below one percent by mass. All air-entrained concretes exhibited high resistance to freeze-thaw with de-icing salt. The test results coincide with the results in [26] where air-entrained concretes with the same composition as B2 were produced with recycled water ($\rho_{RW} = 1.04 \text{ kg/dm}^3$) in the ready-mixed concrete plant. The concretes produced with recycled water also fulfilled the requirements of [25] with respect to air void parameters, and all concretes exhib-

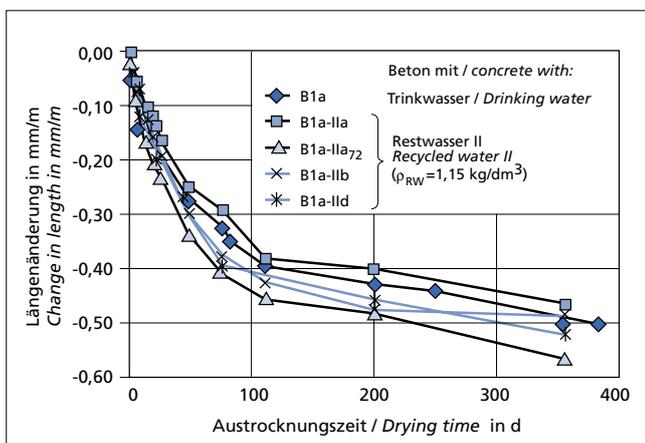


Bild 7: Schwindverhalten von Betonen (B1a) mit Restwasser II
Figure 7: Shrinkage of concretes (B1a) containing recycled water II

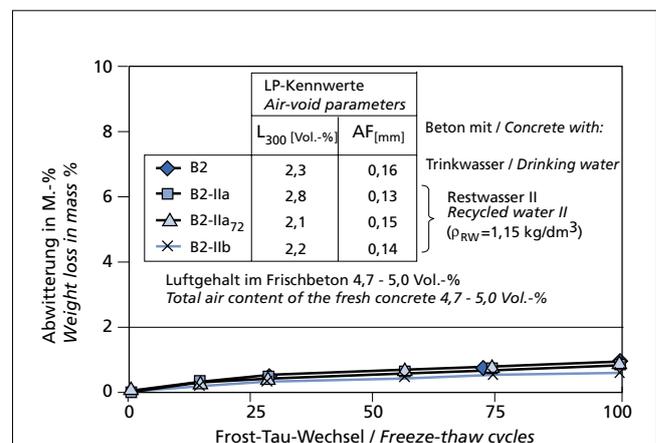


Bild 8: Frost-Tausalz widerstand und Luftporenkennwerte von LP-Betonen (B2) mit Restwasser II.
Figure 8: Freeze-thaw resistance with de-icing salt and air void parameters of air entrained concretes (B2) containing recycled water II

Zusammensetzung wie B2 mit Restwasser ($\rho_{RW} = 1,04 \text{ kg/dm}^3$) im Transportbetonwerk hergestellt. Die mit Restwasser hergestellten Betone entsprachen bezüglich der Luftporenkennwerte ebenfalls den Anforderungen von [25] und alle Betone wiesen einen sehr hohen Frost-Tausalz widerstand nach dem Würfelverfahren und dem CDF-Test auf.

Der Frostwiderstand und der Carbonatisierungswiderstand sowie das Elutionsverhalten der Versuchsbetone gegenüber deionisiertem Wasser wurden durch Restwasser nicht verändert.

6 Zusammenfassung

In einem Forschungsvorhaben wurde der Einfluss von Restwasser auf wesentliche Frisch- und Festbetoneigenschaften praxisüblicher Betone untersucht. Es wurden normalfeste Betone (z.B. für Innenbauteile), Luftporenbetone und hochfeste Betone mit Restwasser als Zugabewasser hergestellt. Restwasser I wies eine Suspensionsdichte von rd. $1,07 \text{ kg/dm}^3$ und Restwasser II eine Suspensionsdichte von rd. $1,15 \text{ kg/dm}^3$ auf. Um eventuelle Einflüsse von im Restwasser gelösten Zusatzmittelwirkstoffen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften zu ermitteln, wurden auch Restwässer aus Frischbetonen hergestellt, die entweder Calciumligninsulfonat (BV), Naphthalinsulfonat (FM) oder Tetrakaliumpyrophosphat (VZ) enthielten. Um den Einfluss des Restwasseralters auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften zu untersuchen, wurden einige Restwässer vor ihrer Verwendung als Zugabewasser bis zu 72 Stunden in einem Restwasserbehälter gelagert.

- Die Restwasseranalysen zeigten, dass alle verwendeten Restwässer den Anforderungen der DAfStb-Richtlinie „Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel“ [1] entsprachen.
- Entsprechend dem Hydrationsfortschritt des Zements nahmen im Allgemeinen mit zunehmendem Restwasseralter die Feststoffdichten ab und die Gehalte an chemisch gebundenem Wasser zu. Nach 72 Stunden war gegenüber dem Zustand nach 3 Stunden in etwa die doppelte Menge an Wasser chemisch gebunden. Durch die im Verlauf der Zementhydratation gebildeten Hydrationsprodukte veränderte sich die Morphologie auch die spezifische Oberfläche der Zementpartikel. So wies 72 Stunden alter Restwasserfeststoff im Vergleich zu 3 Stunden altem Restwasserfeststoff eine wesentlich größere spezifische Oberfläche auf.
- Die hier eingesetzten Basiswirkstoffe Calciumligninsulfonat bzw. Naphthalinsulfonat zur Verflüssigung und Tetrakaliumpyrophosphat zur Verzögerung wurden in kürzester Zeit nahezu vollständig und irreversibel an die Zementpartikel gebunden und stehen für weitere Reaktionen nicht mehr zur Verfügung.
- Durch die Verwendung von Restwasser I mit einer Suspensionsdichte von $1,07 \text{ kg/dm}^3$ als Zugabewasser wurden die Ausgangskonsistenz und das Ansteifverhalten der Versuchsbetone nur unwesentlich beeinflusst. Geringe Abweichungen gegenüber dem Ausgangsausbreitmaß des mit Trinkwasser hergestellten Referenzbetons, konnten durch Zugabe geringer Mengen an Calciumligninsulfonat (BV) ausgeglichen werden.
- Eine schnelle Wiederverwendung des feststoffreichen Restwassers II nach dem Auswaschvorgang führte im Allgemeinen zu einer Verbesserung der Frischbetonkonsistenz und zu keiner Beeinträchtigung des Ansteifens. Mit zunehmendem Restwasseralter hob sich dieser Vorteil auf. Bereits nach einer Lagerungsdauer des Restwassers von 72 Stunden ergaben sich beim Einsatz des gleichen Restwassers wesentlich steifere Konsistenzen und ein stärkeres Ansteifen. Das ist auf die sich im Verlauf der Hydratation vergrößernde spezifische Oberfläche und den damit verbundenen gestiegenen Wasseranspruch des Restwasserfeststoffs zurückzuführen. Restwasser II mit einer Dichte von $1,15 \text{ kg/dm}^3$ stellt in der Praxis eine Ausnahme dar. Insbesondere bei Verwendung von 72 Stunden altem Restwasser II muss die Sollkonsistenz i.d.R. mit Hilfe von verflüssigenden Zusatzmitteln eingestellt werden.
- Die im Restwasser enthaltenen gelösten Stoffe (z.B. Ca, K, Na, SO_4) beeinflussten die Frischbetonkonsistenz und das Ansteifverhalten nicht signifikant.

ited a very high resistance to freeze-thaw with de-icing salt by the cube method and the CDF test.

The freeze-thaw resistance and the carbonation resistance, as well as the elution behaviour of the test concretes to de-ionized water, were not changed by recycled water.

6 Summary

The influence of residual water on important properties of normal fresh and hardened concretes was investigated in a research project. Normal strength concretes (e.g. for interior components), air entrained concretes and high strength concretes were produced with recycled water as the mixing water. Recycled water I had a suspension density of about 1.07 kg/dm^3 and recycled water II a suspension density of about 1.15 kg/dm^3 . Recycled water was also produced from fresh concretes which contained either calcium lignosulfonate (BV), naphthalene sulfonate (FM) or tetrapotassium pyrophosphate (VZ) to determine any possible effect on the fresh and hardened concrete properties of residual active ingredients of admixtures dissolved in the recycled water. In order to examine the influence of the age of the recycled water on the fresh and hardened concrete properties some of the recycled water was stored for up to 72 hours in a recycled water tank before it was used as mixing water.

- The recycled water analysis showed that all the recycled water used complied with the requirements of the DAfStb guideline “Production of concrete using recycled water, recycled concrete and recycled mortar” [1].
- In general the solids density decreased and the content of chemically combined water increased with increasing age of the recycled water, corresponding to the advance of hydration of the cement. After 72 hours about double the quantity of water was chemically combined when compared with the situation after 3 hours. Due to the hydration products formed during the course of cement hydration the specific surface area of the cement particles also changed with the morphology. The solids in 72-hour-old recycled water, for example, exhibited a substantially greater specific surface area than the solids in 3-hour-old recycled water.
- The basic active ingredients used here, namely calcium lignosulfonate or naphthalene sulfonate for plasticizing and tetrapotassium pyrophosphate for retarding, were virtually completely and irreversibly combined with the cement particles after a very short time, and were no longer available for further reactions.
- The initial consistency and the stiffening behaviour of the test concretes were only negligibly affected by the use of recycled water I with a suspension density of 1.07 kg/dm^3 . Slight differences from the initial flow diameter of the reference concrete produced with drinking water could be offset by adding small quantities of calcium lignosulfonate (BV).
- Rapid re-use of the solids-rich recycled water II after the washing process generally led to an improvement in the fresh concrete consistency and had no adverse effect on the stiffening. This advantage disappeared with increasing age of the recycled water. After a storage time of the recycled water of only 72 hours a substantially stiffer consistency and greater slump loss occurred when using the same recycled water. This is attributable to the increasing specific area during the course of the hydration and the associated higher water demand of the solids in the recycled water. In practice, recycled water II with a density of 1.15 kg/dm^3 represents an exception. As a rule it is necessary to use plasticizing additives to achieve the required consistency when using 72-hour-old recycled water II.
- The dissolved substances (e.g. Ca, K, Na, SO_4) contained in the recycled water had no significant influence on the fresh concrete consistency or the stiffening behaviour.
- The concrete compressive strength of normal strength concretes at 2, 7, 28 and 91 days and the static elastic modulus at 28 days were not adversely affected by the use of recycled water I or II. The strength level of high-strength concretes was only very slightly lower when recycled water was used.

- Die Betondruckfestigkeit normalfester Betone im Alter von 2, 7, 28 und 91 Tagen sowie der statische Elastizitätsmodul im Alter von 28 Tagen wurden durch die Verwendung von Restwasser I bzw. II nicht beeinträchtigt. Das Festigkeitsniveau hochfester Betone lag bei Verwendung von Restwasser nur geringfügig niedriger.
- Restwasser I bzw. II beeinträchtigten das Schwind- und Kriechverhalten der Versuchsbetone nicht signifikant.
- Der Frostwiderstand und der Carbonatisierungswiderstand sowie das Elutionsverhalten der Versuchsbetone gegenüber deionisiertem Wasser wurden durch Restwasser nicht beeinträchtigt.
- Luftporenbetone konnten selbst mit Restwasser II ($\rho_{RW} = 1,15 \text{ kg/dm}^3$) sicher hergestellt werden. Die Ausbildung eines stabilen Mikroluftporensystems und der Frost-Tausalz-widerstand wurden durch Restwasser nicht beeinträchtigt. Alle Luftporenbetone wiesen einen hohen Frost-Tausalzwiderstand auf.
- Insgesamt hat sich gezeigt, dass Betone mit Restwasser dauerhaft sind und die gleichen Gebrauchseigenschaften wie Betone aufweisen, die mit Trink- bzw. Frischwasser hergestellt werden. Mit den gewonnenen Erkenntnissen konnten die Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Restwasser widerlegt werden.
- Recycled water I and II had no significant adverse effect on the shrinkage and creep behaviour of the test concretes.
- The freeze-thaw resistance and resistance to carbonation as well as the elution behaviour of the test concretes with de-ionized water were not adversely affected by recycled water.
- The air entrained concretes could be produced safely even with recycled water II ($\rho_{RW} = 1.15 \text{ kg/m}^3$). The formation of a stable micro air void system and the resistance to freeze-thaw with de-icing salt were not adversely affected by the recycled water. All air entrained concretes exhibited a high resistance to freeze-thaw with de-icing salt.
- As a whole, it was found that concretes made with recycled water are durable and exhibit the same service properties as concretes which have been produced with drinking water or fresh water. The results obtained have refuted the reservations concerning the use of recycled water.

Literatur / Literature

- [1] Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, August 1995
- [2] Bunke, N.: Erläuterungen zur Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restbeton, Restmörtel und Restwasser (Restwasser-Richtlinie). In: Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), Nr. 10, S. 254–257
- [3] Schuhmacher, W. (Hrsg.); Techn. Akademie Esslingen Weiterbildungszentrum (Veranst.): Fortschritte beim Transportbeton (Lehrgang: 11/93 Nr. 17552/80.161). Vortrag 8
- [4] Breitenbücher, R.: Recycling von Frisch- und Festbeton. In: Beton (1994), Nr. 9, S. 510–514
- [5] Friesenborg, B.; Genenger, R.; Orłowski, F.: Restbetonrecycling-Recycling of waste concrete. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik (1984), H. 12, S. 830–836
- [6] Rickert, J.; Grube, H.: Analyse von Restwasserinhaltsstoffen. In: beton 49 (1999), H. 7+8, S. 461–468
- [7] Richtlinie für hochfesten Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, August 1995
- [8] Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, September 1991
- [9] Harr, K.; Tax, M.: Einfluss von Betonrestwasser auf die zement- und beton-technologischen Eigenschaften. Weimar: Hochschule für Architektur und Bauwesen, Universität, 1994.- In: 12. Internationale Baustofftagung-ibaasil-, 22.–24. 9. 1994 in Weimar, Tagungsbericht Band 2, S. 429–437
- [10] Norm DIN 4226-1 1983-04. Zuschlag für Beton: Teil 1: Zuschlag mit dichtem Gefüge Begriffe, Bezeichnung und Anforderungen.
- [11] Norm EN 206-1 2000. Beton: Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [12] Dahlhoff, U.; Budnik, J.; Scholl, E.: Frischbetonrecycling im Transportbetonwerk. In: Beton 45 (1995), Nr. 11, S. 792–796
- [13] Schießl, P.; Brauer, N. (Bearb.): Eindringverhalten umweltgefährdender Flüssigkeiten in FD-Beton mit Restwasser. ibac: Aachen, 1996. Forschungsbericht F 575 (Abschlussbericht). Auftraggeber: BMFT, Aktenzeichen 13 RG 90 102 – A12.2
- [14] Schießl, P.; Brauer, N. (Bearb.): Eindringverhalten von umweltgefährdenden Flüssigkeiten in FD-Beton mit Restwasser aus Transportbetonwerken. ibac: Aachen, 1996. Forschungsbericht F 576 (Abschlussbericht). Auftraggeber: FTB
- [15] Dillmann, R.: Restwasser: Forschungsbericht DBV 183. – Stuttgart: IRB, 1999. – (IRB-Forschungsbericht T 2873)
- [16] Norm DIN EN 197-1-1 2001-02. Zement: Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- [17] Norm DIN 1164 2000-11. Zement mit besonderen Eigenschaften. Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis
- [18] Norm DIN EN 196-1 1995-05. Prüfverfahren für Zement: Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, Deutsche Fassung EN 196-1: 1994.
- [19] Norm DIN EN 450 1995-01. Flugasche für Beton: Definition, Anforderungen und Güteüberwachung, Deutsche Fassung EN 450:1994
- [20] Norm DIN 1048-1 1991-06. Prüfverfahren für Beton: Teil 1: Frischbeton.
- [21] Norm DIN 1048-5 1991-06. Prüfverfahren für Beton: Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper
- [22] Bunke, N.: Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. – Berlin: Beuth, 1991. – (DAfStb: Schriftenreihe 422)
- [23] Rechenberg, W.; Spanka, G.: Verfahren zur Prüfung des Auslaugverhaltens zementverfestigter Stoffe. In: Rilem-Workshop Auslaugverhalten von Beton und zementgebundenem Material, 1992, S. 21–26
- [24] Spanka, Gerhard; Thielen, G.: Untersuchungen zum Nachweis von verflüssigenden Zusatzmitteln und zu deren Sorptions- und Elutionsverhalten. In: Beton (1995), H. 5, S. 320–327
- [25] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Betonstraßen (1991)
- [26] Technischer Bericht BBt-TB-B1648: Frost-Tausalz-Widerstand von LP-Beton mit Restwasser. Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB), 2000