

Analyse von Restwasserinhaltsstoffen

Analysis of recycled water components

Übersicht

Die Wiederverwendung von Betonrestwasser aus dem Frischbetonrecycling als Zugabewasser für Beton ist in nahezu allen Transportbetonwerken in Deutschland Stand der Technik. Sie ist in der „Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel“ (Restwasserrichtlinie) des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton geregelt. Der darin enthaltene Ausschluß von Restwasser für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand und für hochfesten Beton beruht nicht auf nachgewiesenen nachteiligen Einflüssen des Restwassers. Der Vorbehalt ist vielmehr so zu verstehen, daß für diese speziellen Betone die entsprechenden Nachweise über die Verwendbarkeit von Restwässern noch nicht vorliegen.

Die Forschungsarbeit, über die hier berichtet wird, hatte zum Ziel, erweiterte Kenntnisse über die Zusammensetzung von Restwasser in repräsentativ ausgewählten Transportbetonwerken zu gewinnen. In dieser Veröffentlichung wird ein umfassender Überblick über die chemische, physikalische und chemisch-mineralogische Zusammensetzung von Restwässern aus elf verschiedenen Transportbetonwerken gegeben. Des weiteren wird über Arbeiten berichtet, mit denen die Auswirkungen möglicher Gehalte von Zusatzmittelwirkstoffresten in Restwässern untersucht wurden. Diese Untersuchungen wurden an labortechnisch praxisnah hergestellten Restwässern aus definiert zusammengesetzten Betonen durchgeführt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß sämtliche Restwasserproben den Anforderungen der Restwasserrichtlinie entsprachen. Messungen der Zusatzmittelkonzentration im Restwasser sowie Modellrechnungen verdeutlichen, daß eine technisch relevante Aufkonzentration von Zusatzmittelwirkstoffen im Restwasser einer Recyclinganlage ausgeschlossen werden kann.

Abstract

The re-use of recycled water from the recycling of unset concrete as mixing water for concrete is common practice in virtually all ready-mixed concrete plants in Germany. It is regulated by the “Guidelines for the Production of Concrete using Recycled Water, Recycled Concrete and Recycled Mortar (Recycled Water Guidelines)” issued by the German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb). The fact that these guidelines exclude the use of recycled water for concrete with high resistance to freeze-thaw attack with de-icing salt and for high-strength concrete is not based on proven detrimental effects of the recycled water. In fact this reservation should be understood as a lack of certification for the suitability of recycled water as mixing water for concretes with these special properties.

The research work, which is reported here, was therefore aimed at obtaining a wider understanding of the composition of recycled water in a representative selection of ready-mixed concrete plants. This paper gives a comprehensive review of the chemical, physical, and chemical-mineralogical compositions of recycled water from eleven different ready-mixed concrete plants. A report is also given of work in which the effects of possible levels of residual active admixture agents in the recycled water were investigated. These investigations were carried out on recycled water of defined composition adjusted in the laboratory to simulate practical conditions.

The results of the investigations show that all the recycled water samples met the requirements of the “Recycled Water Guidelines”. Measurements of the admixture concentration in the recycled water as well as model calculations make it clear that any effective build-up of active agents from admixtures in the recycled water from a recycling plant can be ruled out.

1 Einleitung

Die weitgehende Vermeidung von Abfall und die möglichst restlose Verwertung unvermeidbarer Abfälle sind nicht nur augenfällig notwendige Aufgaben, sondern eine durch Gesetz und Verordnung geregelte Verpflichtung. Der Gesetzgeber schreibt auch für den Bereich der Transportbetonindustrie die möglichst vollständige Verwertung der im eigenen Produktionsbereich anfallenden Produktionsrückstände vor. Insbesondere das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) [1] und die Technische Anleitung Abfall [2] machen die Abfallvermeidung und -verwertung zur gesetzlichen Pflicht. Die Rahmen-Abwasser-Verwaltungsvorschrift [3] untersagt die Einleitung des bei der Betonherstellung anfallenden Restwassers in Gewässer, und die darauf abgestimmten kommunalen Verordnungen verbieten die Einleitung von Stoffen mit pH-Werten über 10 in öffentliche Entwässerungsanlagen. Deshalb müssen die anfallenden Restbetonmengen einem anlageninternen Kreislauf, dem Frischbetonrecycling, zugeführt werden.

Darin wird der noch nicht erhärtete Beton in Restbetonzuschlag und in eine wäßrige Suspension von Feinstoffen $\leq 0,25$ mm aufgetrennt. Beide Reststoffe, der ausgewaschene Restbetonzuschlag und das Restwasser (RW), werden zur Betonproduktion wiederverwendet. Die Verwendung dieser Recyclingbaustoffe erfolgt gemäß der „DAfStb-Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel“ [5].

1 Introduction

Extensive avoidance of waste, and utilization of unavoidable waste materials, are not only clearly necessary, they are also obligations controlled by law and statutory regulations. The legislators stipulate that the ready-mixed concrete sector should also make the greatest possible use of the production residues which are generated in its own production area. In particular, the KrW-/AbfG (German Waste Management and Recycling Act) [1] and the Technical Code of Waste [2] make waste avoidance and utilization a legal obligation. The framework legislation dealing with the management of waste water [3] forbids the introduction into the water body of the recycled water generated during concrete production, and the relevant municipal regulations forbid the introduction into public sewerage systems of substances with pH values above 10. The residual quantities of concrete generated therefore have to be fed into an internal plant cycle, the fresh concrete recycling system. The unset concrete is separated into recycled aggregate and an aqueous suspension of fines ≤ 0.25 mm. The two recycled materials, the washed recycled aggregate and the recycled water (RW), are both re-used for producing concrete. These recycled building materials are utilized in accordance with the “Guidelines for the Production of Concrete using Recycled Water, Recycled Concrete and Recycled Mortar” issued by the DAfStb (German Committee for Reinforced Concrete) [5].

Die fehlende Erlaubnis zur Verwendung von Restwasser für Sonderbetone in [4, 5, 6] führt dazu, daß Transportbetonhersteller immer wieder mit undifferenzierten Bedenken ihrer Kunden bezüglich der Verwendung von Restwasser als Betonzugabewasser selbst für Standardbetone konfrontiert werden. Um die Verwendung und Akzeptanz von Restwasser auf eine breitere Grundlage zu stellen, sind erweiterte Kenntnisse über die chemische, physikalische und chemisch-mineralogische Zusammensetzung von Restwasser aus Transportbetonwerken (TBW) notwendig. Die Untersuchungen, über die hier berichtet wird, dienen daher auch als Datenbasis für ein weiteres Forschungsvorhaben, in dem der Einfluß des Restwassers auf alle relevanten Frisch- und Festboneigenschaften gezielt ermittelt wird.

Die Untersuchungen wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) durchgeführt und von der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB) finanziert und betreut.

2 Stand der Erkenntnisse

In Deutschland werden über 60 Mio. m³ Transportbeton pro Jahr hergestellt und verarbeitet. Die Gesamtmenge des dabei anfallenden Restbetons beträgt ca. 3 % der Betonproduktion, also rund 1,8 Mio. m³ pro Jahr. Bauaufsichtlich anerkannt ist das Verfahren zum Frischbetonrecycling gemäß der „Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel“ des DAfStb [5], bei dem der noch nicht erhärtete Beton oder Mörtel in Restzuschlag und in eine wäßrige Suspension von Feinstoffen ≤ 0,25 mm – das Restwasser – aufgetrennt wird. Der beim Auswaschen von Restbeton und Restmörtel abgetrennte Restbetonzuschlag umfaßt anlagentechnisch bedingt Zuschlag ab einem Korndurchmesser von rd. 0,125 bis 0,250 mm [4, 5, 7, 8, 9]. Bei der Betonherstellung ist der zurückgewonnene Restbetonzuschlag dem Zuschlag der größten Korngruppe gleichmäßig im Massestrom so zuzugeben, daß die Toleranzwerte für die Sieblinien nach DIN 1045 [10] eingehalten werden.

Das Restwasser besteht in erster Linie aus dem Wasser-Zement-Feinstoff-Gemisch, das nach dem Abtrennen des Zuschlags zurückbleibt, aber auch aus dem Wasser, das zum Auswaschen und Reinigen der zurückkehrenden Mischfahrzeuge, Betonpumpen usw. benutzt wird, sowie aus dem Niederschlagswasser, das auf den Produktionsflächen anfällt. Restwasser enthält Mehlkorn, z.B. hydratisierten und unhydratisierten Zement, Betonzusatzstoffe und Feinsand mit Korndurchmessern bis zu 0,25 mm. Weiterhin können Spuren von Betonzusatzmitteln sowie gelöste Sulfate, Chloride usw. vorangegangener Betonlieferungen enthalten sein. Dem Frischbeton dürfen gemäß der Richtlinie mit dem Restwasser im Normalfall bis zu 18 kg/m³ und im Ausnahmefall als kurzzeitiger Betriebszustand bis zu 35 kg/m³ Feststoffe über das Restwasser zugeführt werden. Für beide Fälle fordert die Richtlinie gesonderte Eignungsprüfungen, wenn es sich um Betone gemäß DIN 1045 handelt. Dabei ist nachzuweisen, daß alle an den Beton gestellten Anforderungen erfüllt werden.

Für Betone mit besonderen Eigenschaften wie LP-Betone und hochfeste Betone wird der Einsatz von Restwasser im Regelwerk [5, 6] bislang untersagt. Es handelt sich dabei um eine Vorsichtsmaßnahme, die aufgrund der noch relativ geringen Erfahrungen mit dem Einsatz von Restwasser getroffen wurde [11]. Dieser Ausschluß führt jedoch häufig zu einem grundsätzlichen Vorbehalt gegenüber der Verwendung von Restwasser im Beton. Im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes erscheint es deshalb erforderlich, die Kenntnisse über Betone mit Restwasser zu erweitern und unbegründete Vorbehalte gegebenenfalls auszuräumen.

3 Ziel und Umfang der Untersuchungen

Ziel der Untersuchung der Restwasser aus repräsentativ ausgewählten Transportbetonwerken war die Erstellung einer Datenbasis für die Restwasserbeschaffenheit, aus der sich die Schwankungsbreite der festen und gelösten Restwasserinhaltsstoffe bezüglich Art und Menge sowie physikalischer, chemischer und chemisch-mineralogischer Beschaffenheit ergibt. Hierzu wurden insgesamt zwölf Restwasser aus elf verschiedenen Transportbetonwer-

The lack of permission to use recycled water for special concretes in [4, 5, 6] has led to the situation where producers of ready-mixed concrete are repeatedly confronted by the indiscriminate misgivings of their customers with respect to the use of recycled water as concrete mixing water, even for standard concretes. In order to place the utilization and acceptability of recycled water on a firmer footing it is necessary to have a more extensive understanding of the chemical, physical and chemico-mineralogical composition of recycled water from ready-mixed concrete plants. The investigations reported here will also provide a database for a further research project which will carry out a carefully directed determination of the effect of recycled water on all relevant fresh and solid concrete properties.

The investigations were carried out at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry) and financed and managed by the FTB (Ready-Mixed Concrete Research Association).

2 Current state of knowledge

Over 60 million m³ of ready-mixed concrete are produced and placed in Germany every year. The total quantity of residual concrete generated is about 3 % of the concrete production, i.e. about 1.8 million m³ per year. The process for recycling fresh concrete in accordance with the “Guidelines for the Production of Concrete using Recycled Water, Recycled Concrete and Recycled Mortar” issued by the DAfStb [5], in which the unset concrete or mortar is separated into recycled aggregate and an aqueous suspension of fines ≤ 0.25 mm – the recycled water – is approved by the building inspectorate. The recycled aggregate separated during the washing of residual concrete and residual mortar comprises aggregate above a particle size diameter of approximately 0.125 to 0.250 mm depending on the plant technology [4, 5, 7, 8, 9]. In the production of concrete the recovered recycled aggregate has to be added uniformly to the aggregate of the largest particle size group in a mass flow such that the tolerance values for the grading curves specified in DIN 1045 [10] are maintained.

The recycled water consists primarily of the mixture of water, cement and fines which remains after removal of the aggregate, but it also includes the wash water used for washing and cleaning the returning mixer trucks, concrete pumps etc., as well as the precipitation water collected on the production areas. Recycled water contains ultrafines, e.g. hydrated and unhydrated cement, concrete additions and fine sand with particle diameters up to 0.25 mm. It can also contain traces of concrete admixtures as well as dissolved sulphates, chlorides, etc. from previous concrete deliveries. According to the guidelines up to 18 kg/m³ solids may be added to fresh concrete via recycled water in normal situations, and up to 35 kg/m³ solids in exceptional cases as a short-term operating situation. For both cases the guidelines require separate performance testing if concretes specified in DIN 1045 are involved. It is necessary to prove that all the concrete specifications are fulfilled.

So far the regulations [5, 6] have forbidden the use of recycled water for concretes with special properties, such as air-entrained concretes and high-strength concretes. This is a precautionary measure which was taken because of the relatively slight experience with the use of recycled water [11]. However this exclusion often leads to a basic reservation about the use of recycled water in concrete. For the purposes of the German Waste Management and Recycling Act it therefore appears essential to extend the understanding of concretes made with recycled water and if necessary to dispel unfounded reservations.

3 Aim and extent of the investigations

The aim of investigating recycled water from representative ready-mixed concrete plants chosen was to compile a database for the recycled water properties which gives the range of fluctuation of the solid and dissolved contents of the recycled water with respect to type and quantity as well as the physical, chemical and chemico-mineralogical properties. For this purpose a total of 12 samples of recycled water were taken from 11 different ready-mixed concrete plants in North Rhine-Westphalia, Saxony Anhalt, Bavaria and Baden Württemberg. Two of these samples were split and exam-

ken in Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt, Bayern und Baden-Württemberg entnommen. Zwei dieser Proben wurden geteilt und nach 72 Stunden noch einmal untersucht, so daß insgesamt 14 Proben analysiert wurden.

Um das Verhalten einzelner Zusatzmittelwirkstoffe im Restwasser und deren Konzentration zu ermitteln, wurden zusätzlich zwei verschiedene Restwassertypen (RW-TYP I und II) im Labor des FIZ künstlich hergestellt, aus denen jeweils drei Restwässer untersucht wurden (Tafel 1). Im Hinblick auf weitere Untersuchungen an Frisch- und Festbetonen sollte in dem hier geschilderten ersten Forschungsvorhaben auch das Vorgehen zur planmäßigen, praxisnahen Reproduktion von Restwässern im Labor entwickelt werden. Die zwei Restwassertypen wurden in je sechs aufeinanderfolgenden Auswaschvorgängen hergestellt. RW-TYP I wurde durch das Auswaschen von definiert zusammengesetzten, mit Calciumligninsulfonat verflüssigten Betonen erzeugt. Die Herstellung des RW-TYP II erfolgte analog, wobei jedoch die auszuwaschenden Frischbetone mit Tetrakaliumpyrophosphat verzögert waren.

An zwei Restwasserproben aus den Transportbetonwerken und an den beiden im Labor erzeugten Restwassertypen wurde der zeitliche Einfluß auf die physikalische, chemische und chemisch-mineralogische Beschaffenheit der Restwässer untersucht.

In einer Modellrechnung wurde die Entwicklung der Zusatzmittel-Wirkstoffkonzentration im Restwasser überprüft.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Probenahme

Die Entnahme der Restwasserproben in den Transportbetonwerken erfolgte stets am Ende der Einschaltdauer des Rührwerks, d.h. es wurde Restwasser in dem Zustand entnommen, in dem es als Zugabewasser bei der Betonherstellung zum Einsatz kommt. Das Volumen jeder Restwasserprobe betrug rd. 3l, wobei jeweils eine 2-Liter-PE-Weithalsflasche und eine 1-Liter-Glasflasche – zur Bestimmung der insgesamt enthaltenen organischen Bestandteile (TOC) – gefüllt wurden.

Nach der Probenahme wurden die sorgfältig verschlossenen Proben unverzüglich im FIZ untersucht. Die Zeitspanne zwischen der Probenahme und der Analyse wurde stets so klein wie möglich gehalten. Sie betrug in der Regel 1 h bis 24 h.

Um, wie in Abschnitt 3 ausgeführt, den zeitlichen Einfluß auf die Restwasserbeschaffenheit zu untersuchen, wurden die beiden Restwässer nach 72stündiger Lagerung im Labor erneut analysiert. Während der Lagerung wurde der Feststoff mittels Rührer in Suspension gehalten.

Bei der Restwasserherstellung im Labor erfolgte die Entnahme der Proben ebenfalls am Ende der Einschaltdauer des Rührwerks direkt aus der Suspension. Diese Proben wurden stets nach dem Auswaschen der Betone (siehe Abschnitt 4.2) entnommen, um die Entwicklung der Zusammensetzung der Restwässer schrittweise über eine Zeitdauer bis zu drei Tagen verfolgen zu können.

4.2 Labortechnische Herstellung von Betonrestwasser

Im Transportbetonwerk wird in der Regel 1 m³ Rückbeton mit rd. 4 m³ Wasser ausgewaschen. Das Spülwasser kann aus Frischwasser oder aus Restwasser mit vernachlässigbar geringen Mengen an Feststoff bestehen. Im allgemeinen entsteht dabei ein Restwasser mit einer Dichte von rd. 1,06 kg/dm³. Gemäß [5] können Restwässer bis zu einer Dichte von $\rho_{RW} \leq 1,07$ kg/dm³ als alleiniges Zugabewasser verwendet werden, weil dadurch nicht mehr als rd. 18 kg/m³ Feinstoffe $\leq 0,25$ mm, d.h. rd. 1 M.-% des Gesamtzuschlags, über das Restwasser in den neuen Beton gelangen können. Betrachtet man den „Wasserhaushalt“ eines Transportbetonwerks, so wird deutlich, daß mit den unter diesen Bedingungen anfallenden Restwassermengen der Bedarf an Zugabewasser nahezu vollständig abgedeckt werden kann. Die Vorgehensweise beim Frischbetonrecycling, 1 m³ Beton mit rd. 4 m³ Wasser auszuwaschen, verbürgt bei einem gleichmäßigen Anfall der Restbetonmengen einen in bezug auf die zu erwartenden Restwasserdichten und die anfallenden Restwassermengen „sicheren“ Betrieb der Recyclinganlage.

Neben diesem Regeleinsatz von Restwasser wurde in [5] die Möglichkeit eröffnet, im Ausnahmefall bis zu rd. 35 kg/m³ Feinstoffe über das Restwasser in den neuen Beton einzutragen. Diese

Tafel 1: Untersuchte Restwässer

Table 1: Investigated recycled waters

14 Restwässer aus dem Praxisbetrieb 11 verschiedener Transportbetonwerke in BW, BY, LSA, NW,	6 Laborrestwässer (3 Proben je RW-TYP) 6 artificial recycled waters (3 samples of TYP I, II respectively)	
	RW-TYP I Beton mit 0,5 M.-% vom Zement Calciumligninsulfonat (BV)	RW-TYP II Beton mit 0,5 M.-% vom Zement Tetrakaliumpyrophosphat (VZ)
14 recycled waters from practice of 11 different ready-mixed concrete plants in BW, BY, LSA, NW	Concretes with 0,5% by mass ¹⁾ Calciumlignosulphonate	Concretes with 0,5% by mass ¹⁾ Tetra potassium pyrophosphate

1) relative to cement content

ined again after 72 hours, so that a total of 14 samples were analyzed.

Two different types of recycled water (RW types I and II) were also produced artificially in the FIZ laboratory, from each of which three samples of recycled water were investigated (Table 1) in order to determine the behaviour and concentrations of individual active agents from the admixtures in the recycled water. In view of further investigations of fresh and solid concretes the first research project described here was also intended to develop a procedure for systematic, realistic reproduction of recycled water in the laboratory. The two types of recycled water were each produced in six successive washing procedures. RW type I was produced by washing concretes of defined composition plasticized with calcium lignosulphonate. RW type II was produced in the same way, but the fresh concretes which were washed had been retarded with tetra potassium pyrophosphate.

The influence of time on the physical, chemical and chemico-mineralogical properties of the recycled water was examined on two samples of recycled water from the ready-mixed concrete plants and on the recycled water samples produced in the laboratory.

The trend of the concentration in the recycled water of the active agents from the admixtures was checked in a model calculation.

4 Experimental procedure

4.1 Sampling

In the ready-mixed concrete plants the recycled water samples were always taken at the end of the operating cycle of the stirrer, i.e. the recycled water was taken in the state in which it is used as mixing water in concrete production. The volume of each recycled water sample was about 3 litres; a two litre PE wide-necked bottle and a 1 litre glass bottle – for determining the total organic constituents (TOC) – were filled each time.

After the sampling the carefully sealed samples were examined immediately at the FIZ. The time between sampling and analysis was always kept as short as possible. As a rule it was 1 to 24 h.

In order to investigate the influence of time on the properties of the recycled water, as discussed in Section 3, the two recycled water samples were analyzed again in the laboratory after 72 hours' storage. During the storage the solids were kept in suspension by a stirrer.

In the production of recycled water in the laboratory the samples were also taken directly from the suspension at the end of the operating cycle of the stirrer. These samples were always taken after washing the concretes (see Section 4.2) so that the trend of the composition of the recycled water could be followed in stages over a time period of up to 3 days.

4.2 Laboratory production of recycled water from concrete

In a ready-mixed concrete plant 1 m³ residual concrete is normally washed with about 4 m³ water. The wash water can be fresh water or recycled water containing negligibly small quantities of solids. In general this produces a recycled water with a density of about

besondere Regelung ist notwendig, um in den Anlagen Spitzmengen von Restbeton ohne Betriebsstörung verarbeiten zu können.

In Anlehnung an das beschriebene Praxis-konzept, 1 m³ Rückbeton mit rd. 4 m³ Spülwasser auszuwaschen, wurden im Labor zwei Restwassertypen, RW-TYP I und RW-TYP II, zur weiteren Untersuchung hergestellt, die sich jeweils aus zwei, vier und sechs einzelnen, ungefähr gleich großen Restwassermengen mit unterschiedlichem Alter zusammensetzten (siehe Bild 1). Zur Herstellung eines Restwassers wurde der Frischbeton nach jeweils drei Stunden Mischzeit mit so viel Frischwasser (Leitungswasser) über einem 250-µm-Sieb in einen Behälter ausgewaschen, bis das Restwasser jeweils eine Dichte von 1,07 kg/dm³ aufwies. Das Verhältnis von Spülwasser zu dem im Beton enthaltenen Zugabewasser betrug dabei jeweils rd. 18:1. Das so erzeugte Restwasser wurde mit den vorangehend erzeugten Restwässern in einem gemeinsamen Restwasserbehälter gesammelt. Die Feinteile des Restwassers wurden mit einem Rührgerät stets in Suspension gehalten.

Die Restwasserproben des ersten Tags wurden nach sechs Stunden aus dem Restwasser der Frischbetone B1 und B2 gewonnen und bestanden aus einem Gemisch ungefähr gleicher Volumenteile von drei und sechs Stunden „altem“ Restwasser (RW1 und RW2) bezogen auf den Zeitpunkt der Zugabe des Anmachwassers. Nach Hinzufügung der Restwässer der Betone B3 und B4 in den Sammelbehälter wurden am zweiten Tag die nächsten Proben entnommen. Diese setzten sich somit aus Restwasserteilmengen (RW1 bis RW4), die ein Alter von 3, 6, 27 und 30 Stunden aufwiesen, zusammen. Am dritten Tag wurden in einem letzten Schritt die Betone B5 und B6 hergestellt und nach drei Stunden Mischzeit ausgewaschen. Die dritte und letzte Probenahme erfolgte dann jeweils aus dem Gesamtrestwasser (RW1 bis RW6).

Die Ausgangsstoffe Zement, Zuschlag, Zusatzstoff und Zusatzmittel sowie deren Einsatzmengen waren für jeden Beton gleich. Als Zement wurde ein CEM I 32,5 R verwendet. Der Zementgehalt (z) betrug 270 kg/m³. Der Zuschlag bestand aus Rheinkiesand mit einer Sieblinie A/B 32. Weiterhin enthielten die Betone als Zusatzstoff 60 kg/m³ Steinkohlenflugasche (f) nach DIN EN 450, die mit dem Faktor k = 0,4 als Bindemittel angerechnet wurde. Für den Ausgangsbeton „B1“ wurden rd. 176 l/m³ Frischwasser als Zugabewasser (w) verwendet ($w/(z+k \cdot f) = 0,60$). Für die übrigen Betone (B2 bis B6) bestand das Zugabewasser zu $\frac{2}{3}$ aus Restwasser des Sammelbehälters und zu $\frac{1}{3}$ aus Frischwasser. Mit der Frischwasserzugabe wurde die in der Praxis üblicherweise vorhandene Eigenfeuchte der Zuschläge simuliert. Das Volumen der im Restwasser enthaltenen Feststoffe wurde bei der Wasserzugabe berücksichtigt, jedoch nicht auf den Zuschlag angerechnet ($w/(z+k \cdot f) = 0,60 = \text{konst.}$). Die sechs

1.06 kg/dm³. According to [5] recycled water can be used as the sole mixing water up to a density of $\rho_{RW} \leq 1.07 \text{ kg/dm}^3$ because this means that not more than about 18 kg/m³ fines $\leq 0.25 \text{ mm}$, i.e. about 1 % by mass of the total aggregate, can pass into the new concrete via the recycled water. When the “water regime” of a ready-mixed concrete plant is considered, it is clear that the need for mixing water can be nearly fully covered by the quantities of recycled water generated under these conditions. For a consistent quantity of residual concrete the procedure with fresh concrete recycling – washing 1 m³ concrete with about 4 m³ water – guarantees “safe” operation of the recycling plant with respect to the expected recycled water density and the quantities of recycled water generated.

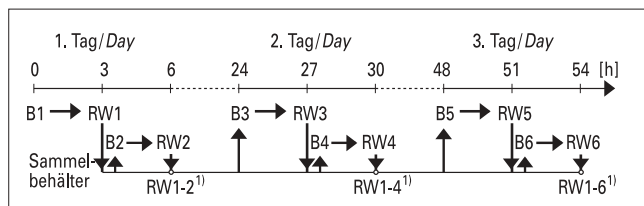
In addition to this routine use of recycled water the possibility was discussed in [5] of introducing up to about 35 kg/m³ fines into the new concrete via the recycled water in exceptional cases. This special provision is necessary so that peak quantities of residual concrete can be processed in the plants without interrupting the operation.

In imitation of this system used in practice of washing 1 m³ residual concrete with about 4 m³ wash water, two types of recycled water, RW type I and RW type II, were produced in the laboratory for further examination. They each consisted of two, four or six individual quantities of recycled water of approximately the same size but of different ages (see Fig. 1). To produce the recycled water the fresh concrete, after a mixing time of three hours, was washed with fresh water (tap water) over a 250 µm screen into a container until in each case the recycled water had a density of 1.07 kg/dm³. In every case the ratio of wash water to the mixing water contained in the concrete was about 18:1. The recycled water produced in this way was combined in a common recycled water container with the recycled water samples produced previously. The fines fractions in the recycled water were kept in suspension at all times with a stirrer.

The recycled water samples from the first day were obtained after six hours from the recycled water from fresh concretes B1 and B2, and consisted of a mixture of approximately equal parts by volume of 3 and 6 hours “old” recycled water (RW1 and RW2) relative to the moment of addition of the mixing water. The next samples were taken on the second day after adding the recycled water samples from concretes B3 and B4 to the collecting container. These were therefore composed of recycled water fractions (RW1 to RW4) which had ages of 3, 6, 27 and 30 hours. On the third day in a final step the concretes B5 and B6 were produced, and then washed after a mixing time of 3 hours. The third and last sampling was then carried out from the combined recycled water (RW1 to RW6).

The same constituents – cement, aggregate, addition and admixture – and quantities were used for each concrete. A CEM I 32,5 R cement was used as the cement. The cement content (c) was 270 kg/m³. The aggregate was Rhenish gravelly sand with an A/B 32 grading curve. As an addition the concretes also contained 60 kg/m³ coal fly ash (f) complying with DIN EN 450, which was included in the calculation as a binder using the factor k = 0.4. About 176 l/m³ fresh water was used as mixing water (w) for the first concrete “B1” ($w/(c+k \cdot f) = 0.60$). For the remaining concretes (B2 to B6) the mixing water consisted of $\frac{2}{3}$ recycled water from the collecting container and $\frac{1}{3}$ fresh water. The natural moisture normally present in aggregates was simulated by the addition of fresh water. The volume of solids contained in the recycled water was taken into account in the addition of water but was not included in the calculation of the aggregate ($w/(c+k \cdot f) = 0.60 = \text{constant}$). The six concretes which were washed to produce RW type I each contained an addition of 0.5 % by mass of calcium lignosulphonate, relative to the cement, with a solids content of about 40 %. For RW type II 0.5 % by mass of tetra potassium pyrophosphate, relative to the cement, was added to the concretes in solution in the mixing water.

The concretes were produced in a free fall mixer. The total mixing time for a concrete was about 3 hours, during which the concrete was mixed for a period of 5 minutes every 20 minutes. This was intended to simulate a “ready-mixed concrete” up to the time when it is brought back to the ready-mixed concrete plant.



¹⁾ Probenahmen/Taking samples

Bild 1: Ablaufschema für Restwasserherstellung (RW-TYP I und II) im Labor

Fig. 1: Production procedure of artificial recycled water (RW-TYP I and II) in the laboratory

Betone, die zur Herstellung von RW-TYP I ausgewaschen wurden, enthielten jeweils eine Dosierung von 0,5 M.-% des Zements Calciumligninsulfonat mit einem Feststoffgehalt von rd. 40 %. Für RW-TYP II wurde den Betonen 0,5 M.-% des Zements Tetra-kaliumpyrophosphat im Zugabewasser gelöst zugegeben.

Die Betone wurden in einem Freifallmischer hergestellt. Die Gesamt-mischzeit für einen Beton betrug ca. drei Stunden, wobei der Beton alle 20 Minuten fünf Minuten lang aufgemischt wurde. Damit sollte ein „Transportbeton“ bis zur Rückkehr ins Transportbetonwerk simuliert werden.

Eigenschaft Property		Transportbetonwerk Ready-mixed concrete plant	Restwasser-Typ I Recycled water type I	Restwasser-Typ II Recycled water-type II
Physikalische Beschaffenheit des Restwassers (Suspension) Physical properties of the recycled water (Suspension)				
Dichte der Suspension Density of the susp.	g/cm ³	1,01-1,14	1,07	1,07
Feststoffgehalt Solids content	M.-%	2,3-24,8	10,4-12,3	10,6-11,3
Leitfähigkeit Conductivity	mS/cm	7,3-14,9	9,9-13,6	6,9-12,0
Chemisch-mineralogische und physikalische Beschaffenheit der Feststoffe Chemical-mineralogical and physical properties of the solids				
Feststoffdichte Density of solids	g/cm ³	1,95-2,34	2,05-2,44	2,51-2,75
Chem. gebund. Wasser Chem. combined water	M.-%	6,4-9,9	5,2-6,3	2,3-3,9
Zementgehalt Cement content	M.-%	27-66	52-59	45-47
SO ₃ im Feststoff SO ₃ content of solids	M.-%	1,9-3,1	1,4-1,7	1,3-1,7
TOC im Feststoff TOC of solids	M.-%	0,15-0,66	0,35-0,38	0,23-0,27

Tafel 2: Ergebnisse der Restwasseranalysen (Min.-/Max.-Werte)¹⁾ der Suspension

Table 2: Results of recycled water analysis (min.-/max. values)¹⁾ of the suspension

¹⁾ Die Einzelwerte kann der Leser auf Anfrage erhalten / Individual values available on request

4.3 Physikalische, chemische und chemisch-mineralogische Untersuchungen

Nach einer visuellen Beurteilung gemäß Richtlinie [5] wurde die Suspensionsdichte der Restwasserproben mittels Aräometerspindel und zur Kontrolle über die Wägung eines definierten Volumens (Meßzylinder) bestimmt. Nach der Bestimmung des pH-Werts und der Leitfähigkeit wurden die Feststoffe durch Filtration der Restwasserprobe über einen Weißbandfilter abgetrennt und die Dichte der flüssigen, feststofffreien Phase ermittelt. Die Feststoffanteile wurden im Trockenschrank bei 40 °C bis zur Massekonstanz getrocknet (Feststoffgehalt), dann homogenisiert und auf ihren Sulfat-, TOC- (Total Organic Carbon) und Zementgehalt sowie auf den Gehalt an „chemisch gebundenem Wasser“ untersucht. Als „chemisch gebundenes Wasser“ wurden hier jene Wasseranteile berücksichtigt, die sich nach einer Trocknung bei 105 °C noch in der Feststoffprobe befanden und erst im Glühversuch bis rd. 900 °C freigesetzt wurden.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgte mittels Lasergranulometer (CILAS) an getrockneten, aufbereiteten Feststoffproben und z.T. direkt an den Restwasser-Suspensionen. Die Feststoffdichte wurde nach Aufmahlung mit Hilfe eines Flüssigkeitspyknometers bestimmt.

Ein Teil der flüssigen, feststofffreien Phase der Restwasserproben wurde mit Salpetersäure chemisch stabilisiert. An diesen Proben wurden die gelösten Gehalte an K, Na, Cr, Zn, Pb, As, Cd mittels AAS bzw. ICP-MS gemessen. Der Phosphat-, Sulfat-, Chlorid- und Nitratgehalt der flüssigen, feststofffreien Phase wurde ionenchromatographisch und der TOC-Gehalt durch thermisch-katalytische Oxydation/IR-Detektion bestimmt.

Die Ermittlung des Gehalts an Calciumligninsulfonat an Proben der reproduzierten Restwässer (RW-TYP I) erfolgte UV-spektroskopisch. Die Proben des RW-TYP II wurden auf ihren Phosphatgehalt hin, wie oben beschrieben, ionenchromatographisch untersucht.

5 Darstellung und Erörterung der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse sämtlicher Restwasseranalysen sind in den Tafeln 2 und 3 zusammengefaßt. Nachfolgend wird die physikalische und chemische Beschaffenheit der Restwässer und der Feststoffe aus der Suspension gesondert dargestellt und bewertet.

5.1 Physikalische Beschaffenheit der Restwässer

Wie Bild 2 zeigt, lagen gemäß [5] die Suspensionsdichten der in den Transportbetonwerken entnommenen Restwasserproben mit

4.3 Physical, chemical and chemico-mineralogical investigations

After a visual assessment in accordance with guidelines [5] the suspension density of the recycled water sample was determined using an areometer and, as a check, by weighing a specific volume (measuring cylinder). After determination of the pH value and conductivity the solids were removed by filtering the recycled water sample on a White Ribbon filter and the density of the liquid, solids-free, phase was measured. The solids fractions were dried in a drying cabinet at 40 °C to constant weight (solids content),

Tafel 3: Ergebnisse der Restwasseranalysen (Min.-/Max.-Werte)¹⁾ – feststofffrei

Table 3: Results of recycled water analysis (min.-/max. values)¹⁾ – solids-free

Eigenschaft Property		Transportbetonwerk Ready-mixed concrete plant	Restwasser-Typ I Recycled water type I	Restwasser-Typ II Recycled water type II
Chemische Beschaffenheit des feststofffreien Restwassers Chemical properties of the solid-free recycled water				
pH-Wert pH-value	-	12,7-13,4	12,8-13,0	12,9-13,2
PO ₄ ³⁻	mg/l	n.n.-0,97	n.n.	n.n.
SO ₄ ²⁻	mg/l	n.n.-9,5	39,7-541,1	10,4-530,4
Cl ⁻	mg/l	6,2-55,4	61,3-80,3	85,4-97,9
NO ₃ ⁻	mg/l	3,2-44,8	6,7-35,7	11,6-15,2
Cr	µg/l	<1,0-48,8	20,2-33,7	10,3-31,9
Zn	µg/l	12,5-69,0	7,8-66,8	<10,0-91,1
Pb	µg/l	<1,0	<1,0	<1,0
As	µg/l	<1,0-1,3	2,1-3,8	<1,0
Cd	µg/l	<0,1-1,0	0,1-0,5	0,2-0,8
Na	mg/l	30-220	80-90	80-100
K	mg/l	110-750	350-410	480-510
TOC	mg/l	5,8-27,8	18,4-26,3	12,7-17,5

¹⁾ Die Einzelwerte kann der Leser auf Anfrage erhalten
Individual values available on request
n.n. = nicht nachweisbar / not detectable

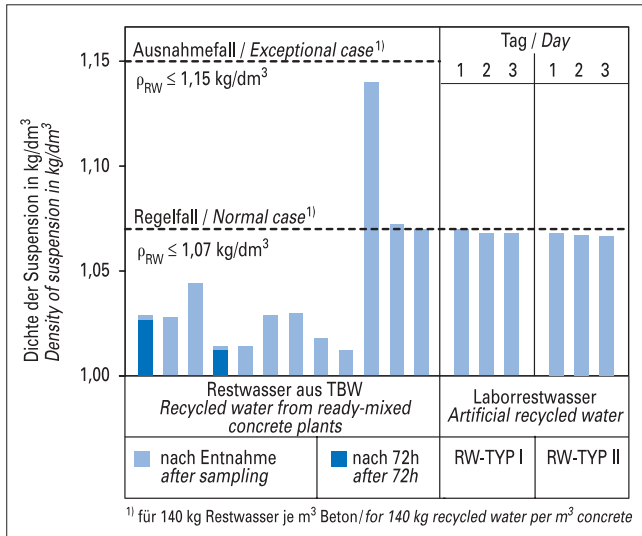


Bild 2: Suspensionsdichten der Restwasserproben
Fig. 2: Densities of recycled water suspensions

einer eindeutigen Ausnahme im Bereich des Regelfalles mit $\rho_{RW} \leq 1,07 \text{ kg/dm}^3$, d.h. der Feststoffeintrag würde bei Verwendung der Restwässer als alleiniges Zugabewasser wie gefordert unter 1 M.-% und bei dem Ausnahmefall unter 2 M.-% liegen. Die Ergebnisse decken sich mit den Feststellungen in [12]. Bei den über 72 Stunden im Labor gelagerten Restwasserproben aus Transportbetonwerken ergaben sich bezüglich der Suspensionsdichte keine signifikanten Veränderungen gegenüber den unmittelbar nach der Entnahme untersuchten Proben. Auch die im Labor hergestellten Restwässer wiesen eine nahezu konstant bleibende Suspensionsdichte auf. Die feststofffreien Restwässer waren farblos bis schwach gelblich, enthielten kaum Huminstoffe und höchstens Spuren von Öl und Fett sowie nur geringe Mengen an Chlorid (siehe Abschnitt 5.4). Damit erfüllten sie die Anforderungen der Restwasserrichtlinie [5].

5.2 Physikalische Beschaffenheit der Feststoffe

Die Ergebnisse der Dichtemessung am Feststoff, dargestellt in Bild 3, bestätigten die für Berechnungen in der Restwasserrichtlinie [5] angenommene mittlere Dichte des Feststoffs von rd. 2,1 kg/dm³ und entsprachen den Angaben in [11, 13]. Die jeweils geringeren Feststoffdichten der 72 Stunden gelagerten Proben gegenüber den Referenzproben unmittelbar nach der Entnahme sowie das Absin-

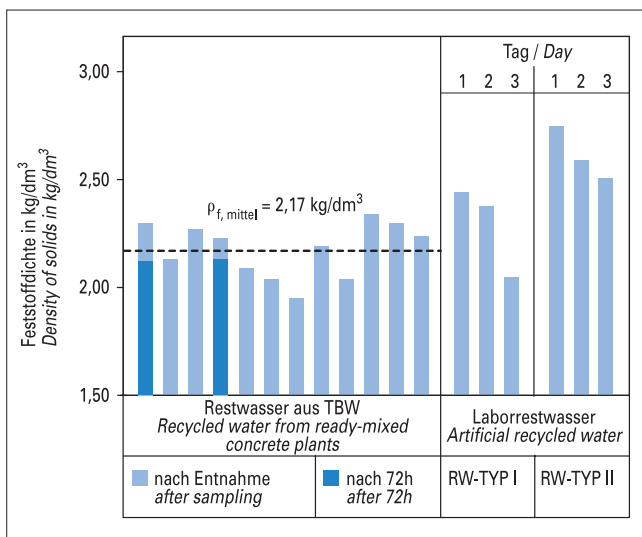


Bild 3: Dichten der Feststoffe im Restwasser
Fig. 3: Densities of solids in the recycled water

then homogenized and tested for sulphate, TOC (Total Organic Carbon) and cement contents and for the content of "chemically combined water". "Chemically combined water" was taken here to be those water fractions which were still present in the solids sample after drying at 105 °C and were only released in the ignition test at about 900 °C.

The particle size distribution was determined with a laser granulometer (CILAS) on dried, processed solids samples and in some cases directly on the recycled water suspensions. The solids density was measured with the aid of a liquid pycnometer after grinding.

Part of each of the liquid, solids-free phases of the recycled water sample was chemically stabilized with nitric acid. These samples were used to measure the dissolved contents of K, Na, Cr, Zn, Pb, As, and Cd by AAS or ICP-MS. The phosphate, sulphate, chloride and nitrate contents of the liquid, solids-free phase were determined by ion chromatography, and the TOC content by thermo-catalytic oxidation/IR detection.

The content of calcium lignosulphonate in the samples of the reproduced recycled water (RW type I) was measured by UV spectrometry. The phosphate content of the RW type II samples was measured, as described above, by ion chromatography.

5 Presentation and discussion of the test results

The results of all the recycled water analyses are summarized in Tables 2 and 3. The physical and chemical properties of the recycled water samples and of the solids from the suspensions are presented and evaluated separately below.

5.1 Physical properties of the recycled water

Fig. 2 shows that, in conformity with [5], the suspension densities of the recycled water samples taken in the ready-mixed concrete plants lay, with one definite exception, in the normal range with $\rho_{RW} \leq 1.07 \text{ kg/dm}^3$, i.e. if the recycled water were used as the sole mixing water the input of solids would lie, as required, under 1 % by mass, and in the exceptional case under 2 % by mass. The results coincide with the findings in [12]. With the recycled water samples from ready-mixed concrete plants which had been stored for 72 hours in the laboratory there were no significant changes in the suspension density when compared with the samples examined immediately after sampling. The recycled water samples produced in the laboratory also exhibited a virtually constant suspension density. The solids-free recycled water samples were colourless to slightly yellow, contained hardly any humic matter and, at the most, traces of oil and fat, as well as only small quantities of chloride (see Section 5.4). They therefore fulfilled the requirements of the recycled water guidelines [5].

5.2 Physical properties of the solids

The results of the density measurements on the solids, shown in Fig. 3, confirmed the average density of the solids of about 2.1 kg/dm³ assumed for the calculations in the recycled water guidelines [5], and corresponded to the data in [11, 13]. The solids densities of the samples stored for 72 hours, which in all cases were lower than for the reference samples directly after sampling, and the drop in solids density with time during the production of recycled water samples in the laboratory, can be attributed to advancing cement hydration. The solids densities of the RW type II, which were higher than the solids densities of the RW type I normally found in practice, are probably a result of the retarding active agent, tetra potassium pyrophosphate, used in the fresh concrete.

The solids in the recycled water consist of a mixture of cement particles of varying degrees of hydration, and therefore of different volumes, depending on the age of the recycled water, as well as particles of aggregates, additions and fine sand. During the attempt to measure the particle size distribution the solid particles agglomerated so strongly during the drying process that even the ultrasound used for disagglomeration had hardly any effect. As realistic and reproducible disagglomeration of the fines particles was not possible it can be assumed that the particle size distributions measured on the dry solids are considerably distorted towards larger particle diameters. In a second stage the CILAS measurement was carried out directly on the recycled water suspension in order to avoid the se-

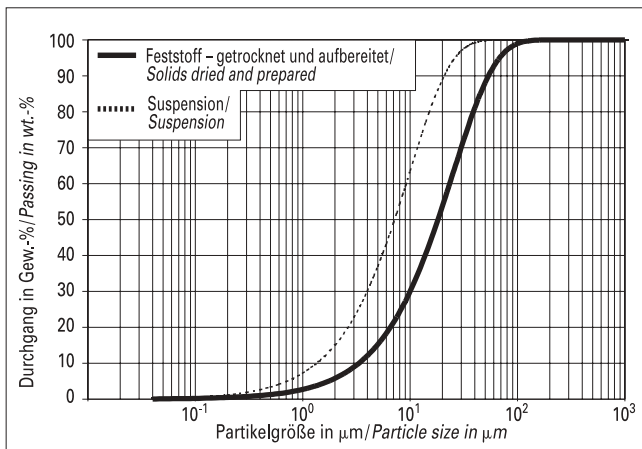


Bild 4: Einfluß der Probenaufbereitung auf die Korngrößenverteilung
Fig. 4: Influence of sample preparation on particle size distribution of the solids

ken der Feststoffdichten im zeitlichen Verlauf der Restwasserherstellung im Labor sind auf die fortschreitende Zementhydratation zurückzuführen. Die gegenüber den praxisüblichen Feststoffdichten des RW-TYP I höheren Feststoffdichten des RW-TYP II resultieren wahrscheinlich aus dem im Frischbeton eingesetzten verzögernden Wirkstoff Tetrakaliumpyrophosphat.

Der Feststoff im Restwasser besteht aus einem Gemisch von je nach Restwasseralter mehr oder weniger hydratisierten und somit unterschiedlich voluminösen Zementteilchen sowie Zuschlag-, Zusatzstoff- und Feinsandpartikel. Bei dem Versuch, die Korngrößenverteilung zu ermitteln, agglomerierten die Feststoffpartikel während des Trocknungsvorgangs so stark, daß selbst der zur Desagglomeration eingesetzte Ultraschall kaum Wirkung zeigte. Da eine wirklichkeitsnahe und reproduzierbare Desagglomeration der Feinstoffkörner nicht möglich war, ist davon auszugehen, daß die am getrockneten Feststoff ermittelten Kornverteilungen erheblich zu größeren Korndurchmessern hin verfälscht sind. Um die durch Trocknung entstehende starke Agglomeration der Feststoffe zu umgehen, wurde in einem zweiten Schritt die CILAS-Messung direkt an der Restwassersuspension durchgeführt. Dabei wurde das Restwasser als Suspension in das CILAS-Gerät eingespritzt. Die so ermittelten Kornverteilungen unterschieden sich in erheblichem Maße von denen, die an getrocknetem Feststoff gemessen wurden (Bild 4). Allerdings erwies sich die Entnahme einer repräsentativen Probe als äußerst schwierig, da sich die größeren Feststoffpartikel sehr schnell bei der Probenahme absetzten. Zusammenfassend muß gesagt werden, daß aufgrund dieser Schwierigkeiten zur Zeit noch keine repräsentative Korngrößenverteilung von Restwasserfeststoffen ermittelt werden kann. Wie sich unter den gegebenen Verhältnissen der Parameter „Korngröße“ überhaupt definieren läßt und inwieweit sich mittels spezieller Naßsiebungsverfahren wirklichkeitsnahe und reproduzierbare Meßergebnisse erzielen lassen, ist Gegenstand weiterer derzeit angestellter Überlegungen.

5.3 Chemisch-mineralogische Beschaffenheit der Feststoffe
Der Gehalt an „chemisch gebundenem Wasser“ des Feststoffs (Bild 5) lag bei den Restwasserproben aus der Praxis zwischen 6 M.-% und 10 M.-%, bezogen auf den Feststoff. Die 72 Stunden gelagerten Restwasserproben wiesen gegenüber den Referenzproben einen aufgrund der fortschreitenden Zementhydratation erwartungsgemäß etwas höheren Anteil an „chemisch gebundenem Wasser“ auf. Deutlich niedrigere Werte ergaben sich wegen des geringen Hydratationsfortschritts erwartungsgemäß bei den im Labor hergestellten RW-TYP II. Dieser geringere Hydratationsfortschritt des Zements ist, wie im Abschnitt 5.2 beschrieben, vermutlich auf den im Frischbeton eingesetzten verzögernden Wirkstoff Tetrakaliumpyrophosphat zurückzuführen. Die ermittelten Mengen an „chemisch gebundenem Wasser“ entsprechen insgesamt den beobachteten Feststoffdichten.

vere Agglomeration der Solids caused by the drying. The recycled water was injected as a suspension into the CILAS unit. The particle size distributions measured in this way differed substantially from those measured on the dried solids (Fig. 4). However, it proved extremely difficult to take a representative sample as the coarser solid particles settled very rapidly during the sampling. It has to be said that due to these difficulties it is not at present possible to determine representative particle size distributions of the solids in the recycled water. How the parameter “particle size” can actually be defined under the given conditions, and the extent to which realistic and reproducible test results can be achieved by means of special wet screening methods, are currently the subject of continued deliberations.

5.3 Chemico-mineralogical properties of the solids

In the recycled water samples taken under practical conditions the content of “chemically combined water” in the solids (Fig. 5) lay between 6% and 10% by mass relative to the solids. The recycled water samples stored for 72 hours exhibited, as expected, a somewhat higher percentage of “chemically combined water” than the reference samples due to advancing cement hydration. Significantly lower values were found, as expected, with the samples of the RW type II produced in the laboratory because of the low degree of hydration. This lower degree of hydration of the cement is, as described in Section 5.2, presumably attributable to the retarding active agent, tetra potassium pyrophosphate, used in the fresh concrete. The quantities of “chemically combined water” measured correspond on the whole to the observed densities of the solids.

The cement contents (Table 2) measured in the solids of the recycled water samples from the ready-mixed concrete plants varied between 27% and 66% by mass relative to the solids. On average, 85% to 90% by mass were found in [11]. The cement contents can only be determined with limited accuracy as not all characteristic values can be determined quantitatively and in unfavourable cases individual constituents cannot even be detected qualitatively. In the view of the cut point of fresh concrete recycling plants the cement contents measured in the recycled water from the ready-mixed concrete plants and from RW type I actually all appear to be realistic, in spite of the limited accuracy of the test method [14]. The cement contents in the solids from the samples of RW type II of about 46% by mass were lower than expected. The cement content of the solids in the recycled water samples of defined composition ought to be about 60% by mass. Possible reasons could be the above-mentioned limited accuracy of the method of determination during the analysis of solids in recycled water and the properties of the solids samples from the fresh concretes retarded with tetra potassium pyrophosphate; these contain large percentages of cement which is only slightly hydrated and therefore led to difficulties during

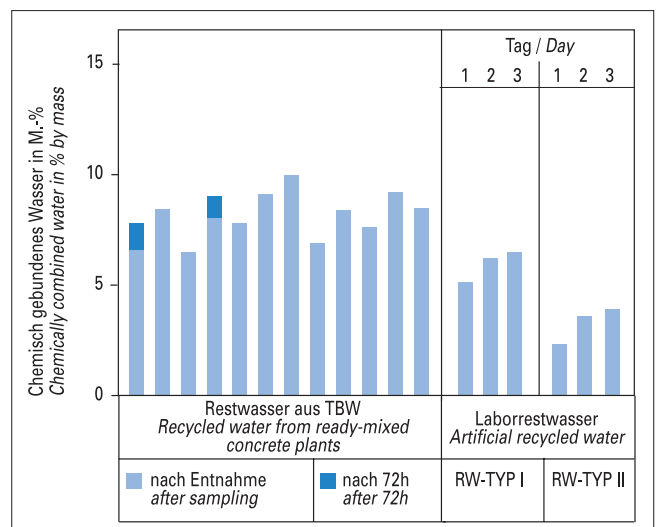


Bild 5: Gehalt an chemisch gebundenem Wasser im Feststoff
Fig. 5: Chemically combined water content of the solids

Die im Feststoff ermittelten Zementgehalte (Tafel 2) der Restwasserproben aus den Transportbetonwerken variierten zwischen 27 M.-% und 66 M.-%, bezogen auf den Feststoff. In [11] wurden durchschnittlich 85 M.-% bis 90 M.-% gefunden. Der Zementgehalt läßt sich nur mit begrenzter Genauigkeit bestimmen, da nicht alle Kennwerte quantitativ ermittelt und einzelne Bestandteile in ungünstigen Fällen auch nicht qualitativ nachgewiesen werden können. Im Hinblick auf den Trennschnitt von Frischbetonrecyclinganlagen erscheinen die ermittelten Zementgehalte der Restwässer aus den Transportbetonwerken und des RW-TYP I, trotz begrenzter Genauigkeit des Untersuchungsverfahrens [14], durchaus als realistisch. Niedriger als erwartet waren mit ca. 46 M.-% die Zementgehalte in dem Feststoff der Proben des RW-TYP II. Der Zementgehalt der Feststoffe in den definiert zusammengesetzten Restwässern müßte bei rd. 60 M.-% liegen. Die oben beschriebene begrenzte Genauigkeit des Bestimmungsverfahrens bei der Analyse von Restwasserfeststoffen sowie die Beschaffenheit der Feststoffproben aus den mit Tetrakaliumpyrophosphat verzögerten Frischbetonen, welche große Anteile an wenig hydratisiertem Zement enthielten und deshalb durch ein Zusetzen des Filters zu Schwierigkeiten bei der Zementgehaltsbestimmung führten, könnten mögliche Ursachen dafür sein.

Messungen der TOC-Gehalte der Ausgangsstoffe für die Laborbetone zeigten, daß sich die organischen Bestandteile im wesentlichen im Restwasserfeststoff wiederfanden. Die gegenüber RW-TYP II erhöhten TOC-Werte im Feststoff des RW-TYP I zeigen, daß der organische Wirkstoff Calciumligninsulfonat durch die Hydratation in starkem Maße in den Zementstein eingebunden wird (siehe Abschnitt 5.4).

5.4 Chemische Beschaffenheit der Restwässer (feststofffrei)

Die pH-Werte der Restwasserproben lagen zwischen 12,7 und 13,4. Sie überstiegen damit stets den pH-Wert einer gesättigten Calciumhydroxidlösung, der bei pH 12,5 liegt.

Phosphate sind die Basiswirkstoffe vieler handelsüblicher verzögernd wirkender Betonzusatzmittel. Beim Auswaschen von verzögerten Frischbetonen oder Frischmörteln können Phosphate in das Restwasser gelangen. Die Untersuchung des Phosphatgehalts (Tafel 3) zeigte, daß Phosphat, wenn überhaupt nachweisbar, nur in sehr geringen Konzentrationen gefunden werden konnte. Die Proben des RW-TYP II entstanden im Labor durch das Auswaschen von Frischbetonen, die mit Tetrakaliumpyrophosphat verzögert worden waren. Auch hier lagen die Phosphatgehalte unterhalb der Nachweisgrenze. Daraufhin zusätzlich durchgeführte Untersuchungen an 3, 8, 12 und 24 h alten Restwasserproben zeigten, daß bereits unmittelbar nach dem Auswaschen des rd. drei Stunden lang gemischten „Transportbetons“ Phosphate in der flüssigen und feststofffreien Phase nicht mehr nachweisbar waren. Die Phosphate bilden schwerlösliche Verbindungen und fallen aus. Eine nachträgliche Freisetzung im Verlauf der Wiederverwendung und damit eine Wirkung im Beton ist nach derzeitigem Kenntnisstand auszuschließen.

In den Proben des RW-TYP I wurde mittels UV-Spektroskopie ein Gehalt an Calciumligninsulfonat von maximal 12 mg/l ermittelt. Das entspricht nur rd. 0,4% der ursprünglich im Zugabewasser des Betons gelösten Wirkstoffmenge. Dieser Wert besagt unter Berücksichtigung des Verdünnungsverhältnisses von rd. 1 : 18 beim Auswaschen des Restbetons im Labor, daß bereits zum Untersuchungszeitpunkt rd. 93% des Wirkstoffs fest am Zementstein sorbiert waren. Hieraus wird deutlich, daß die hier eingesetzten Basiswirkstoffe Calciumligninsulfonat und Tetrakaliumpyrophosphat nahezu vollständig und irreversibel an die Zementpartikel gebunden werden, für weitere Reaktionen nicht mehr zur Verfügung stehen und daß sie sich auch aus diesem Grund nicht im Restwasser aufkonzentrieren können [18].

Zement enthält Sulfat zur Erstarrungsregelung, das auf die unmittelbar in Lösung gehende Menge an Tricalciumaluminat abgestimmt ist. Durch Messung des Sulfatgehalts im Feststoff (als SO_3 angegeben) und in der flüssigen Phase (als SO_4^{2-} angegeben) sollte festgestellt werden, welche Sulfatmengen über das Restwasser überhaupt in den „neuen“ Beton gelangen können. Die Sulfatgehalte der Restwässer lagen weit unter dem Grenzwert von 2 000 mg/l, der für feststofffreies Waschwasser von gips- oder anhy-

the determination of the cement content due to clogging of the filter.

Measurements of the TOC contents of the ingredients for the laboratory concretes showed that most of the organic constituents reappeared in the recycled water solids. The higher TOC values in the solids from the RW type I, when compared with the RW type II, show that the organic active agent, calcium lignosulphonate, is substantially combined in the hardened cement paste by the hydration (see Section 5.4).

5.4 Chemical properties of the recycled water (solids-free)

The pH values of the recycled water samples lay between 12.7 and 13.4. They therefore always exceeded the pH value of 12.5 of saturated calcium hydroxide solution.

Phosphates are the basic active agents in many normal commercial concrete admixtures with retarding actions. During the washing of retarded fresh concretes or fresh mortars the phosphates can pass into the recycled water. Examination of the phosphate content (Table 3) showed that, where it could be detected at all, phosphate was only found in very low concentrations. The samples of the RW type II were produced in the laboratory by washing fresh concretes which had been retarded with tetra potassium pyrophosphate. Here again the phosphate levels were below the limit of detection. Additional investigations carried out on 3, 8, 12 and 24 hours old recycled water samples showed that even immediately after washing the “ready-mixed concrete” which had been mixed for about 3 hours it was no longer possible to detect phosphates in the liquid, solids-free phase. The phosphates form sparingly soluble compounds and are precipitated. According to current understanding any subsequent liberation during re-use, and therefore any effect on the concrete, can be ruled out.

A maximum content of calcium lignosulphonate of 12 mg/l was measured in the samples of the RW type I using UV spectroscopy. This corresponds to only about 0.4% of the quantity of active agent originally dissolved in the mixing water of the concrete. Taking into account the dilution ratio of about 1:18 when the residual concrete is washed in the laboratory, this value implies that by the time the investigation was carried out approximately 93% of the active agent had been absorbed strongly in the hardened cement paste. From this it is clear that the basic active agents used here – calcium lignosulphonate and tetra potassium pyrophosphate – are combined virtually completely and irreversibly in the cement particles, are no longer available for further reactions, and therefore cannot build up in the recycled water [18].

Cement contains sulphate as a setting regulator which is matched to the quantity of tricalcium aluminate which goes directly into solution. By measuring the sulphate content in the solids (given as SO_3) and in the liquid phase (given as SO_4^{2-}) the aim was to establish what quantities of sulphate can actually pass into the “new” concrete via the recycled water. The sulphate levels of the recycled water samples lay far below the limit of 2 000 mg/l specified for solids-free washing water from gypsum- and or anhydrite-bound residual mortar. Levels of dissolved sulphate of up to 9.5 mg/l were found in the liquid, solids-free phase, and approximately 2% to 3% by mass in the solids, for the recycled water samples taken under practical conditions, which is in agreement with [15]. This means that by far the majority of the sulphate is contained in the solids. When compared with the samples from the ready-mixed concrete plants the liquid, solids-free phases of the RW types I and II exhibited initially higher contents of dissolved sulphate at the start of production in the laboratory because at first the cement hydration was less advanced. The percentages of sulphate in the solids were correspondingly low. As the recycled water production continued the percentages of dissolved sulphate decreased sharply as expected. Considered as a whole, only about 4 to 5% of the quantity of sulphate brought in by the sulphate setting regulator in the cement would be introduced into the concrete via the liquid phases and the recycled water solids.

The chloride contents of all the solids-free recycled water samples lay – in agreement with [12] – far below the limit for using the recycled water for producing prestressed concrete (Cl^- -content ≤ 600 mg/l). The samples stored for 72 hours had lower

Bezeichnung	Einheit	Meßwerte	Anforderungen Trinkwasserverordnung/ Restwasserrichtlinie
Term	Unit	Measured values	Requirements Drinking water regulations/ Recycled water guideline
Chlorid/Chloride	mg/l	6,2 - 55,4	250/≤600 ¹⁾
Sulfat/Sulphate	mg/l	n.n. - 9,5	240/≤2000 ²⁾
Phosphat/Phosphate	mg/l	n.n. - 1,0	6,7
Nitrat/Nitrate	mg/l	3,2 - 44,8	50
Chrom/Chromium	mg/l	< 0,001 - 0,049	0,05
Zink/Zinc	mg/l	0,013 - 0,069	5
Cadmium/Cadmium	mg/l	< 0,0001 - 0,001	0,005
Blei/Lead	mg/l	< 0,001	0,04
Arsen/Arsenic	mg/l	< 0,001-0,0013	0,01
Natrium/Sodium	mg/l	30 - 220	150
Kalium/Potassium	mg/l	110 - 750	12
pH-Wert/pH-value	-	12,7 - 13,4	≥6,5 ≤9,5
Leitfähigkeit/ Conductivity	mS/cm	7,3 - 14,9	2

feststoffgebundenem Restmörtel angegeben ist. So ergaben sich für die Restwasserproben aus der Praxis in Übereinstimmung mit [15] Gehalte an gelöstem Sulfat von bis zu 9,5 mg/l in der flüssigen, feststofffreien Phase und rd. 2 M.-% bis 3 M.-% im Feststoff. Dies bedeutet, daß der weitaus größte Teil des Sulfats im Feststoff enthalten ist. Die flüssigen, feststofffreien Phasen des RW-TYP I und II wiesen zu Beginn der Herstellung im Labor, aufgrund der erst wenig fortgeschrittenen Zementhydratation, gegenüber den Proben aus den Transportbetonwerken anfangs höhere Gehalte an gelöstem Sulfat auf. Dementsprechend niedrig lagen die Sulfatanteile im Feststoff. Im weiteren Verlauf der Restwasserherstellung nahmen die Anteile an gelöstem Sulfat erwartungsgemäß stark ab. Insgesamt betrachtet würde hier durch die flüssige Phase und den Restwasserfeststoff nur rd. 4 bis 5 % der Sulfatmenge in den Beton eingetragen, die über den sulfatischen Erstarrungsregler der Zemente eingebracht wird.

Der Chloridgehalt sämtlicher feststofffreier Restwasserproben lag – in Übereinstimmung mit [12] – weit unter dem Grenzwert für die Anwendung des Restwassers zur Herstellung von Spannbeton (Cl^- -Gehalt ≤ 600 mg/l). Die über 72 Stunden gelagerten Proben wiesen gegenüber den Referenzproben einen geringeren Chloridgehalt auf. Die gelösten Chloride werden während der Hydratation des Zements teilweise unter Bildung von „Friedelschem Salz“ fest an den Zementstein gebunden [16, 17].

Die Prüfung des Alkaligehalts lieferte im ungünstigsten Fall ein Na_2O -Äquivalent von rd. 0,9 g/l. Damit kann sich der Alkaligehalt, der durch den Zement in den Beton eingetragen wird, nur um rd. 3 bis 5 % erhöhen.

Bei den TOC-Messungen an den flüssigen, feststofffreien Phasen ergaben sich für die feststoffreichen Restwasserproben der Transportbetonwerke Gehalte an organischem Kohlenstoff von bis zu 28 mg/l. Bei den reproduzierten Restwässern wiesen die Proben des RW-TYP I höhere TOC-Gehalte gegenüber den Proben des RW-TYP II auf. Die „erhöhten“ TOC-Gehalte von bis zu 26 mg/l in den flüssigen Phasen der Proben von RW-TYP I sind wahrscheinlich auf die Anwendung des organischen Wirkstoffs Calciumligninsulfonat im Frischbeton zurückzuführen. Allerdings muß man bei der Bewertung des TOC-Gehaltes von RW-TYP I berücksichtigen, daß diese Anteile, wie bereits ausgeführt, nur rd. 0,4 % der ursprünglich im Zugabewasser des Betons gelösten Menge an Calciumligninsulfonat darstellen. Entsprechende TOC-Gehalte können ebenso im Werksbetrieb auftreten.

Tafel 4 verdeutlicht, daß die Gehalte an Phosphat, Sulfat, Chlorid und Nitrat sowie die Schwermetallgehalte der feststofffreien

Tafel 4: Gegenüberstellung der Analysedaten der Restwässer (feststofffrei) aus Transportbetonwerken mit den Anforderungen der „Restwasserrichtlinie“ [5] und der Trinkwasserverordnung [19]
Table 4: Comparison of analysis data of the recycled waters (solids-free) from ready-mixed concrete plants with the requirements of the „Recycled water guideline“ [5] and of the Drinking water regulations [19]

¹⁾ Höchstwerte für Cl^- -Gehalt bei unbewehrtem Beton ≤ 4500 mg/l; bei Stahlbeton ≤ 2000 mg/l; bei Spannbeton ≤ 600 mg/l
Upper limits of Cl^- -content for plain concrete ≤ 4500 mg/l; reinforced concrete ≤ 2000 mg/l; prestressed concrete ≤ 600 mg/l

²⁾ gilt als Obergrenze für die Einleitung von feststofffreiem Waschwasser gips- oder anhydritgebundener Restmörtel in das Restwasserbecken
upper limit for discharge of solids-free recycled water from gypsum plaster or anhydrite plaster into the recycled water storage basin
n.n. nicht nachweisbar / not detectable

chloride contents than the reference samples. Some of the dissolved chloride was combined strongly in the hardened cement paste during the hydration of the cement with the formation of „Friedels salt“ [16, 17].

In the least favourable case the test of the alkali content gave an Na_2O equivalent of about 0.9 g/l. This means that the alkali content which is introduced into the concrete through the cement can only be increased by around 3 to 5 %.

Levels of organic carbon of up to 28 mg/l were found for the solids-rich recycled water samples from the ready-mixed concrete plants during the TOC measurements on the liquid, solids-free phases. In the reproduced recycled water the samples of RW type I showed higher TOC levels than the samples of RW type II. The „increased“ TOC levels of up to 26 mg/l in the liquid phases of the samples of RW type I can probably be attributed to the use of the organic active agent, calcium lignosulphonate, in the fresh concrete. However, when assessing the TOC content of RW I it must be borne in mind that these percentages, as already stated, only represent about 0.4 % of a quantity of calcium lignosulphonate originally dissolved in the mixing water for the concrete. Corresponding TOC levels can equally well occur during plant operation.

Table 4 illustrates the fact that the contents of phosphate, sulphate, chloride and nitrate and the heavy metal contents of the solids-free phases were even below the limits or guide values of the Ordinance for Drinking Water [19] which is used without reservation as mixing water in the production of concrete.

6 Model for calculating the trend in the concentration of active admixture agent in the recycled water during repeated washing of fresh concretes containing admixtures

When the residual concrete is washed it is possible not only for cement, fine sand, addition and water, but also for residues of the admixture used in the fresh concrete, to pass into the recycled water. Fig. 6 shows the calculated trend of the concentration of active admixture agent in the recycled water relative to the quantity added to the mixing water under the unfavourable assumption that at all times only fresh concretes which contain admixtures (see Section 4.2) are washed into a recycled water reservoir and that there is no chemical combination with the cement. In order to make the conditions even sharper it was assumed that the mixing water for each new concrete consisted entirely of recycled water. The admixture dosage and the ratio of mixing water (recycled water) to wash water (fresh water) for the concrete in question, e.g. 1:20, were kept

Phasen sogar unter den Grenz- bzw. Richtwerten der Verordnung für Trinkwasser [19] lagen, das vorbehaltlos als Zugabewasser bei der Betonherstellung eingesetzt wird.

6 Modellrechnung zur Entwicklung der Zusatzmittelwirkstoff-Konzentration im Restwasser beim wiederholten Auswaschen zusatzmittelhaltiger Frischbetone

Beim Auswaschen von Restbeton können neben Zement, Feinsand, Zusatzstoff und Wasser auch Rückstände des im Frischbeton eingesetzten Zusatzmittels in das Restwasser gelangen. Bild 6 zeigt die rechnerische Entwicklung der Zusatzmittelwirkstoff-Konzentration im Restwasser bezogen auf die Dosierung im Zugabewasser unter der ungünstigen Annahme, daß ständig nur zusatzmittelhaltige Frischbetone (siehe Abschnitt 4.2) in ein Restwasserbecken ausgewaschen werden und keine chemische Bindung am Zement erfolgt. Um die Randbedingungen weiter zu verschärfen, wurde angenommen, daß das Zugabewasser jedes neuen Betons zu 100 % aus Restwasser besteht. Die Zusatzmitteldosis und das Verhältnis von Zugabewassermenge (ZW, Restwasser) zu Spülwassermenge (SW, Frischwasser) für den jeweiligen Beton sollen über die Auswaschzyklen als konstant gelten, z.B. 1:20. Dieses Verhältnis führt zur üblichen Rohdichte des Restwassers von $\rho_{RW} \approx 1,06 \text{ kg/dm}^3$. Zur Veranschaulichung wird neben dem praxisüblichen Zugabewasser/Spülwasser-Verhältnis von rd. 1:20 außerdem das Verhältnis von 1:8, welches unter den getroffenen Annahmen zu einer Restwasserdichte von rd. $1,15 \text{ kg/dm}^3$ führt, betrachtet.

Die Kurvenverläufe verdeutlichen, daß eine Erhöhung des Zusatzmittelrests im Restwasser nur bis zu dem Punkt erfolgen kann, bei dem ein Gleichgewicht zwischen den eingetragenen und entnommenen Zusatzmittelresten erreicht ist. Diesem von der Spülwassermenge abhängigen Grenzwert nähert sich die rechnerische Zusatzmittelkonzentration im Restwasser sehr schnell asymptotisch an. Für beide Verdünnungsverhältnisse liegt der Grenzwert weit unter der Dosierungskonzentration. Bedenkt man, daß die Zusatzmittel im Verlauf der Hydratation zum überwiegenden Teil fest am Zementstein sorbiert werden (siehe 5.4 und [18]) und daß die Eigenfeuchte des Zuschlags sowie der Eintrag von Niederschlagswasser weitere positive Verdünnungseffekte darstellen, wird deutlich, daß eine Wirksamkeit dieser Zusatzmittelreste praktisch ausgeschlossen werden kann.

7 Zusammenfassung

7.1 In einem Forschungsvorhaben wurden insgesamt 14 Restwässer aus elf verschiedenen Transportbetonwerken bezüglich ihrer physikalischen, chemischen und chemisch-mineralogischen Beschaffenheit analysiert. Weiterhin wurden sechs Restwässer im Labor praxisnah hergestellt. Hierbei wurde in den auszuwaschenden Frischbetonen für den Restwasser-TYP I der verflüssigend wirkende Stoff Calciumligninsulfonat eingesetzt. Für die Herstellung von Restwasser-TYP II wurden Frischbetone, die mit Tetrakaliumpyrophosphat verzögert waren, ausgewaschen. Die Versuche zeigten, daß Restwasser definierter Zusammensetzung und definierter Alters termingerecht und praxisnah labortechnisch reproduziert werden kann.

7.2 Sämtliche Restwasserproben entsprachen den Anforderungen der DAfStb-Richtlinie „Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel“ [5]. Bezüglich der Gehalte an Phosphat, Sulfat, Chlorid und Nitrat sowie der Schwermetallgehalte erfüllten die wäßrigen, feststofffreien Phasen aller Restwässer auch die Anforderungen der Trinkwasserverordnung [19].

7.3 Die Untersuchungen ergaben, daß sich physikalische, chemische und mineralogische Parameter des Restwassers mit zunehmendem Probenalter entsprechend dem Hydratationsfortschritt des Zementes verändern. So nahmen im allgemeinen mit zunehmendem Probenalter die Feststoffdichten ab und die Gehalte an chemisch gebundenem Wasser zu.

7.4 Die Suspensionsdichten der in den Transportbetonwerken entnommenen Restwasserproben lagen mit einer eindeutigen Ausnahme im Dichtebereich $\rho_{RW} \leq 1,07 \text{ kg/dm}^3$. Bei Verwendung

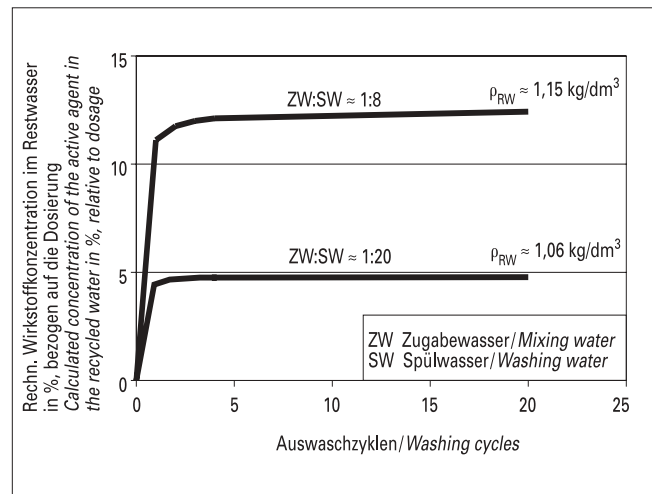


Bild 6: Modellrechnung zur Entwicklung der Zusatzmittelwirkstoff-Konzentration im Restwasser unter Vernachlässigung der Sorption der Zusatzmittel am Zementstein

Fig. 6: Model for calculating the trend in concentration of the active admixture agent in the recycled water without sorption of the admixtures on cement stone

constant over the washing cycles. This ratio leads to the normal density of the recycled water of $\rho_{RW} \approx 1,06 \text{ kg/dm}^3$. As an illustration, in addition to the normal mixing water/washing water ratio of about 1:20 used in practice, the ratio of 1:8, which under the given assumptions leads to a recycled water density of about $1,15 \text{ kg/dm}^3$, was also examined. The shapes of the curves show that raising the admixture residue in the recycled water can only take place up to a point at which an equilibrium is reached between the incoming and outgoing admixture residues. The theoretical admixture concentration in the recycled water approaches this limit, which depends on the quantity of washing water, very rapidly and asymptotically. For the two dilution ratios the limits lie far below the addition concentration. When it is considered that during the hydration a great deal of the admixture is absorbed strongly in the hardened cement paste (see 5.4 and [18]) and that the natural moisture of the aggregate and the input of precipitation water represent further positive dilution effects, it is clear that in practice any effect of these admixture residues can be ruled out.

7 Summary

7.1 The physical, chemical, and chemical-mineralogical properties of a total of 14 samples of recycled water from eleven different ready-mixed concrete works were analyzed in the research project. Six realistic samples of residual water were also produced in the laboratory. The plasticizing compound calcium lignosulphonate was used in the unset concretes which were washed out for Type I recycled water. Type II recycled water was produced by washing unset concretes which had been retarded with tetra potassium pyrophosphate. In the laboratory investigations it was shown that recycled water of defined composition and defined age can be reproduced realistically and at the required time in a laboratory.

7.2 All recycled water samples met the requirements of the guidelines issued by the German Committee for Reinforced Concrete for the "Production of Concrete using Recycled Water, Recycled Concrete and Recycled Mortar" [5]. The levels of phosphate, sulphate, chloride and nitrate, and also the heavy metal levels, in the aqueous, solids-free phase of all recycled water samples also met the requirements of the Drinking Water Regulations [19].

7.3 The investigations showed that the physical, chemical, and chemico-mineralogical parameters of the recycled water change with increasing sample age, corresponding to the progress of the hydration of the cement. Among other things the solids density falls with increasing sample age and the levels of chemically combined water increase.

solcher Restwässer als alleiniges Zugabewasser würden im Regelfall weniger als 1 M.-% Feststoff bezogen auf den Gesamtzuschlag in den Beton eingetragen, was der diesbezüglichen Anforderung in der Richtlinie [5] entspricht. Das Restwasser mit einer Suspensionsdichte von $\rho_{RW} = 1,14 \text{ kg/dm}^3$ darf gemäß [5] dagegen nur kurzfristig im Rahmen des Ausnahmefalls als alleiniges Zugabewasser dienen. Die ermittelten Feststoffdichten bestätigten die für Berechnungen in der Richtlinie angenommene mittlere Dichte des Feststoffs von rd. $2,1 \text{ kg/dm}^3$.

7.5 Die in den Restwässern ermittelten Gehalte an gelöstem Sulfat bewiesen, daß die über das Restwasser eingebrachten Sulfatmengen im Vergleich zum erstarrungsregelnden Sulfatgehalt der Zemente als vernachlässigbar gering zu bewerten sind. Der Chloridgehalt sämtlicher feststofffreier Restwasserproben lag stets weit unter dem zulässigen Grenzwert für die Anwendung des Restwassers zur Herstellung von Spannbeton, der einen Cl-Gehalt $\leq 600 \text{ mg/l}$ vorsieht. Die Prüfung des Alkaligehalts ergab im ungünstigsten Fall ein Na_2O -Äquivalent von rd. $0,9 \text{ g/l}$. Es werden also nur unbedeutende Mengen an gelösten Alkalien über die Restwässer eingetragen.

7.6 Aufgrund der hohen Agglomerationsneigung der Feststoffpartikel und der schwierigen Probenentnahme bei einer Suspension konnten keine verlässlichen Kornverteilungen bestimmt werden, weil die Bestimmungen nur eine geringe Reproduzierbarkeit aufwiesen. Es bedarf weiterer Untersuchungen mittels Lasergranulometer und spezieller Naßsiebungsverfahren, um die Korngrößenverteilungen zuverlässig ermitteln zu können.

7.7 Trotz relativ hoher Einsatzmengen an Calciumligninsulfonat bzw. Tetrakaliumpyrophosphat im Frischbeton konnten, wenn überhaupt, nur äußerst geringe Mengen gelöster Wirkstoffe im Restwasser nachgewiesen werden. Das bestätigt die Tatsache, daß die hier eingesetzten Basiswirkstoffe Calciumligninsulfonat zur Verflüssigung und Tetrakaliumpyrophosphat zur Verzögerung nahezu vollständig und irreversibel an die Zementpartikel gebunden werden und für weitere Reaktionen nicht mehr zur Verfügung stehen. Dies bestätigten auch die durchgeführten Messungen des TOC-Gehalts. Inwieweit dies auch für Fließmittel und Luftporenbildner gilt, soll noch untersucht werden.

7.8 Durch eine Modellrechnung konnte gezeigt werden, daß sich die Wirkstoffkonzentration von Zusatzmitteln im Restwasser unter Produktionsbedingungen sehr schnell asymptotisch ihrem Grenzwert nähert. Selbst ohne Anrechnung der Sorption am Zement liegt dieser Grenzwert so weit unter der Dosierungskonzentration, daß eine praxisrelevante Wirksamkeit dieser Zusatzmittelreste ausgeschlossen werden kann. Die vorgenommene Modellrechnung beweist außerdem, daß eine nennenswerte Aufkonzentration eines Zusatzmittels im Restwasserbecken nicht möglich ist.

7.4 With one clear exception the densities of the suspensions of the recycled water samples taken in the ready-mixed concrete plants laid in the density range $\rho_{RW} \leq 1.07 \text{ kg/dm}^3$. When using such recycled waters as sole mixing water, in the normal case less than 1 % by mass of the solids relative to the aggregate would be supplied in the concrete. This met the corresponding requirement of [5]. On the other hand the recycled water with a suspension density of 1.14 kg/dm^3 may only be used as sole mixing water for a short time in the range of the exceptional case [5]. The measured solids densities confirmed the average density of the solids of about 2.1 kg/dm^3 assumed for the calculations in the above-mentioned guideline.

7.5 The levels of dissolved sulphate measured in the recycled water samples showed that the quantities of sulphate introduced via the recycled water can be assessed as negligibly low compared with the sulphate content of the cement for regulating the setting. The chloride levels of all the solids-free recycled water samples were in all cases far below the permissible limit for the use of recycled water for producing prestressed concrete which prescribes for the Cl-content $\leq 600 \text{ mg/l}$. In the most unfavourable case the alkali content test gave an Na_2O -equivalent of about 0.9 g/l , showing that only insignificant quantities of dissolved alkalis can be introduced via the recycled water.

7.6 Because of the great tendency of the solid particles to agglomerate, the difficulty of dividing a sample when suspensions are involved, and the partial hydration of the particles, it was not possible to determine any reliable particle size distributions, because the reproducibility of the tests was very low. Further investigations using a laser granulometer and special wet-sieving methods are needed to be able to determine the particle size distributions reliably.

7.7 In spite of the relatively large quantities of calcium lignosulphonate or tetra potassium pyrophosphate used in the unset concrete only extremely small quantities, if any, of dissolved active agents could be detected in the recycled water. This confirmed the fact that the basic active agents used here, calcium lignosulphonate for plasticizing and tetra potassium pyrophosphate for retarding, are combined almost completely and irreversibly with the cement particles and are no longer available for further reactions. This was also confirmed by the measurements of the TOC content. The extent to which this also applies to superplasticizers and air-entraining agents still has to be investigated.

7.8 By using a model calculation it was shown that the concentration of active agents from admixtures in the recycled water under production conditions approached very rapidly and asymptotically to its limiting value. Even without allowing for sorption on the cement this limiting value lies so far below the concentration at which the agents are added in practice that any relevant effect of these residual admixtures can be ruled out. Examination of the limiting values definitely rules out any build-up of active admixture agents in the recycled water storage basin.

Literatur

- [1] Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG (i.d.F. v. 27. 9. 1994) § 4 Abs. 1 und 2
- [2] Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall – i.d.F. v. 12. 3. 1991, Teil 1 Abs. 4.3 (GMBL. S. 139, ber. S. 469)
- [3] Rahmen-Abwasser VwV (Anhang Nr. 26) i.d.F. v. 31. 7. 1996 (GMBL. 1996 S. 729)
- [4] 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
- [5] Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, August 1995
- [6] Richtlinie für hochfesten Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, August 1995
- [7] Schuhmacher, W. (Hrsg.); Techn. Akademie Esslingen Weiterbildungszentrum (Veranst.): Fortschritte beim Transportbeton (Lehrgang: 11/93 Nr. 17552/80.161). Vortrag 8
- [8] Breitenbücher, R.: Recycling von Frisch- und Festbeton. In: Beton (1994), Nr. 9, S. 510-514
- [9] Friesenborg, B.; Genenger, R.; Orłowski, F.: Restbetonrecycling – Recycling of waste concrete. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik (1984), H. 12, S. 830-836
- [10] Norm DIN 1045 07.88. Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung
- [11] Dahlhoff, U.; Budnik, J.; Scholl, E.: Frischbetonrecycling im Transportbetonwerk. In: Beton 45 (1995), Nr. 11, S. 792-796
- [12] Schuhmacher, W. (Hrsg.); Techn. Akademie Esslingen Weiterbildungszentrum (Veranst.): Fortschritte beim Transportbeton (Lehrgang: 11/93 Nr. 17552/80.161). Vortrag 7
- [13] 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
- [14] Norm DIN 52170-3 02.80. Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton
- [15] Harr, K.; Tax, M.: Einfluß von Betonrestwasser auf die zement- und betontechnologischen Eigenschaften. Weimar: Hochschule für Architektur und Bauwesen, Universität, 1994. In: 12. Internationale Baustofftagung ibausil-, 22.-24. 9. 1994 in Weimar Tagungsbericht Band 2, S. 429-437
- [16] Richartz, W.: Die Bindung von Chlorid bei der Zement erhärtung. In: Zement-Kalk-Gips 22 (1969), Nr. 10, S. 447-456
- [17] Binder, G.: Über den Chlorideinbau und dessen Nachweis in tausalzbeaufschlagten Betonen. In: Zement-Kalk-Gips 46 (1993), Nr. 12, S. 784-791
- [18] Spanka, Gerhard; Thielen, G.: Untersuchungen zum Nachweis von verflüssigenden Zusatzmitteln und zu deren Sorptions- und Elutionsverhalten. In: Beton (1995), H. 5, S. 320-327
- [19] Trinkwasserverordnung – TrinkwV – i.d.F. v. 12. 12. 1990 (BGBl. I, S. 2613)

