Einfluss von Restwasser auf die Frischbeton-eigenschaften

EMPA Dübendorf
Abteilung Beton / Bauchemie

Dr Andreas Leemann
Roman Loser

cemsuisse-Projekt 201301 – November 2014
Diese Forschungsarbeit wurde durch cemsuisse, Verband der Schweizerischen Cementindustrie mitfinanziert

cemsuisse Forschungsförderung

Die cemsuisse Forschungsförderung unterstützt Forschungsprojekte im Bereich der Betonanwendung, welche von kompetenten Forschergruppen an cemsuisse herangetragen werden. Mit der proaktiven Forschungsförderung definiert cemsuisse zudem Forschungsprojekte von Interesse und trägt diese an kompetente Forschergruppen heran oder schreibt sie öffentlich aus. Die Projektnehmer werden jeweils von einer Begleitgruppe aus cemsuisse – Vertretern fachlich unterstützt.

Dr. Heiner Widmer, Leiter Umwelt, Technik, Wissenschaft, cemsuisse

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 69 35
www.empa.ch/abt308

Materials Science & Technology

Beton/Bauchemie **Schlussbericht**

cemsuisse Projekt 201301

Einfluss von Restwasser auf die Frischbetoneigenschaften

Verfasser: Roman Loser, Andreas Leemann

Für das cemsuisse Projekt 201301: Einfluss von Restwasser auf die Frischbetoneigenschaften.

Dübendorf, Beton/Bauchemie, 17.11.2014

Roman Loser

Dr. Andreas Leemann

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **3**
Zusammenfassung **4**
1 Einleitung **5**
2 Projektziele **5**
3 Untersuchungsprogramm **6**
3.1 Materialien 6
3.2 Methoden 6
3.2.1 Restwasserherstellung 6
3.2.2 Dichtebestimmung des Restwassers 7
3.2.3 Restwasseranalysen 8
3.2.4 Versuche am Zementleim 9
3.2.5 Frischbetoneigenschaften 9
3.2.6 Temperaturverlauf beim Abbinden (Beton) 10
3.2.7 Druckfestigkeit Beton 10
3.3 Untersuchungsmatrix 10
3.4 Betonmischungen 11
3.5 Bezeichnung Betone 12
4 Resultate **13**
4.1 Restwasserzusammensetzung 13
4.1.1 Restwasserdichte 13
4.1.2 Flüssigphase 14
4.1.3 Festphase 14
4.2 Versuche am Zementleim mit den Laborrestwässern 19
4.2.1 Kalorimetrie 19
4.2.2 Rheologie 20
4.2.3 Erstarrungsbeginn 21
4.2.4 Zusammenfassung Versuche Zementleim 22
4.3 Versuche am Beton 22
4.3.1 Verarbeitbarkeit 22
4.3.2 Luftporengehalt 25
4.3.3 Temperaturverlauf beim Abbinden 26
4.3.4 Festigkeit 29
4.3.5 Zusammenfassung Versuche am Beton 33
5 Diskussion und Beurteilung **34**
6 Schlussfolgerungen für die Praxis und Ausblick **36**
7 Literatur **38**
8 Anhang **39**

Zusammenfassung

Mit im Labor hergestelltem Restwasser unterschiedlicher Dichte wurden grundlegende Versuche an Zementleim und Mörtel in Bezug auf Abbindeverhalten und Verarbeitbarkeit durchgeführt. Darauf basierend wurden Betonversuche mit drei verschiedenen Betonsorten (Sorten A, C und F gemäss SN EN 206-1) und Laborrestwasser unterschiedlicher Dichte durchgeführt. Beurteilt wurden Verarbeitbarkeit in Funktion der Zeit, Temperaturerhöhung beim Abbinden im isolierten Würfel und Druckfestigkeitsverlauf. Zusätzlich wurde mit Restwasser aus zwei Betonwerken die Übertragbarkeit der erlangten Erkenntnisse auf die Praxis überprüft. Die verwendeten Restwässer wurden jeweils bezüglich Dichte und Zusammensetzung der Flüssig- und Festphase charakterisiert.

Bis zu einer Restwasserdichte von ca. 1.04 g/cm^3 wurde kein Einfluss des Restwassers auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften festgestellt. Anschliessend zeigte sich mit zunehmender Restwasserdichte eine verstärkte Abnahme der Verarbeitbarkeit und eine Zunahme der 1-Tages-Festigkeit, wobei die 28-Tage-Festigkeit unbeeinflusst blieb. Dies kann hauptsächlich auf den erhöhten Wasseranspruch der zusätzlichen Feinanteile und auf den Fillereffekt (Hydratationskeime) zurückgeführt werden. Trotz teilweise hoher Restwasserdichte bis 1.08 g/cm^3 konnten diese Effekte bei den Wässern aus den Betonwerken nur in stark abgeschwächter Form beobachtet werden. Dies bedeutet, dass bei diesen Wässern praktisch keine Unterschiede zwischen Restwasser und Leitungswasser in Bezug auf die Betoneigenschaften aufgetreten sind. Der Grund dürfte im Wesentlichen darin liegen, dass diese Restwässer aus den Betonwerken jünger waren. Mit zunehmendem Alter des Restwassers nimmt der Hydratationsgrad der darin vorkommenden Zementpartikel zu und die dadurch vergrösserte Oberfläche erhöht den Wasseranspruch der Betonmischungen.

Die gelösten Ionen im Restwasser haben keinen Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Der Einfluss beschränkt sich im Wesentlichen auf die Feinanteile.

Ein negativer Einfluss des Restwassers auf den Gehalt künstlich eingeführter Luftporen konnte innerhalb der nur geringen Anzahl hergestellter Luftporenbetone nicht nachgewiesen werden.

Wird in der Praxis die maximale Restwasserdichte auf ca. 1.04 g/cm^3 beschränkt, ist generell nicht mit einer Beeinträchtigung der Verarbeitbarkeit des Betons zu rechnen. Wird die Dichte grösser als 1.04 g/cm^3 kann die Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit verschiedener Faktoren (Alter des Restwassers, Temperatur, etc.) zunehmendes beeinträchtigt werden. Zudem wird die regelmässige und vor allem repräsentative Probenahme und Dichtebestimmung von Restwasser immer wichtiger. Eine allfällige Verschlechterung der Verarbeitbarkeit aufgrund hoher Restwasserdichte darf nicht über eine erhöhte Zugabewassermenge kompensiert werden, da ansonsten die 28-Tage-Festigkeit abnehmen kann.

1 Einleitung

Für die Betonproduktion in Schweizer Betonwerken wird überwiegend Restwasser verwendet, das hauptsächlich aus dem Recycling von Frischbeton und dem Waschen von Einrichtungen des Betonwerks stammt. Restwasser weist Schwebstoffe und gelöste Stoffe auf [1]. Beurteilung und Anforderungen an Restwasser werden in der SN EN 1008 [2] geregelt. Der Gehalt schädlicher Stoffe wird durch diese Norm begrenzt und der Gehalt an Schwebstoffen wird über die Angabe einer maximalen zusätzlichen Feststoffmenge in % der gesamten Gesteinskörnung angegeben. Je nach Wassergehalt in der Betonmischung ändert sich so die maximal zulässige Dichte des Restwassers. Über den Einfluss von Restwasser auf die Festbetoneigenschaften gibt es nur sehr wenige Untersuchungen. In [3] wird gezeigt, dass Restwasser die Frischbetoneigenschaften verändern kann: je nach Zusammensetzung und Alter des Restwassers kann die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verbessert oder verschlechtert werden. Die meisten internationalen Untersuchungen arbeiten zudem mit Konzepten der Berücksichtigung des Restwassers in der Betonrezeptur, welche nicht der gängigen Praxis in der Schweiz entsprechen [z.B. 4 – 6]. Aus diesem Grund ist eine Übertragbarkeit dieser Resultate auf Schweizer Verhältnisse schwierig.

Wenn in einem Betonwerk Probleme hinsichtlich der geforderten Verarbeitbarkeit von Beton auftreten, die sich meistens als Schwierigkeit beim Einbringen in die Schalung äussern, sind die Ursachen oft nicht klar und werden häufig beim Zementhersteller gesucht. Neben anderen Gründen können solche Schwierigkeiten aber auch eine Folge des verwendeten Restwassers sein. Um präzisere Empfehlungen über den Umgang mit Restwasser geben zu können, muss das Wissen in diesem Bereich durch zusätzliche Untersuchungen breiter abgestützt werden.

2 Projektziele

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, innerhalb einer stark vereinfachten Prüfmatrix die relevanten Parameter zu finden, welche beim Einsatz von Restwasser einen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit (Ausbreitmass) und das Abbindeverhalten des Zementes respektive die Festigkeitsentwicklung des Betons haben. Daraus sollen Empfehlungen für die Praxis über den Umgang mit Restwasser abgeleitet werden.

Voraussetzung für die Experimente soll zudem sein, dass die Resultate reproduzierbar sind und entsprechend jederzeit wieder nachgestellt werden können. Nur so können die systematisch variierten Parameter miteinander verglichen werden. Da sich Restwasser im Laufe der Zeit verändert, ist es nicht möglich, mit einer Charge Restwasser aus einem Betonwerk Beton an verschiedenen Tagen herzustellen. Entnahmen kleinerer Proben aus den Betonwerken zu unterschiedlichen Zeitpunkten sind ebenfalls nicht zielführend, da sich die Zusammensetzung und vor allem die Dichte der Restwässer im Betonwerk laufend ändern. Aus diesem Grund muss als erstes ein Verfahren entwickelt werden, mit welchem Restwasser im Labor mit reproduzierbaren Eigenschaften hergestellt werden kann.

3 Untersuchungsprogramm

3.1 Materialien

Sämtliche Versuche (Restwasserproduktion, Versuche am Zementleim, Betonversuche) wurden mit der gleichen Charge Zement durchgeführt. Es handelt sich hierbei um einen CEM II/A-LL 42.5 N (Fluvio 4 der Holcim Siggenthal). Als Fliessmittel wurde ViscoCrete 3088 (Sommerprodukt der Sika) und als Luftporenbildner Fro-V5A (Sika) verwendet.

Bei der Gesteinskörnung handelt es sich um gut gerundeten Alluvialkies mit Grösstkorn 32 mm.

Im Rahmen dieses Projektes wurde auch Restwasser aus zwei verschiedenen Betonwerken verwendet:

Betonwerk:	Betonwerk Hard, Volketswil	Betonwerk Glattbrugg
Entnahmedatum, -zeit:	14.08.2014, ca. 07.00 Uhr	14.08.2014, ca. 06.00 Uhr
Entnahmeort:	Entnahme mit einem Kübel von oben aus dem offenen Restwasserbehälter, Rührwerk in Betrieb	Entnahme aus dem Schlauch, welcher über eine Pumpe mit dem Restwasserbehälter verbunden ist, Rührwerk in Betrieb

Von jedem Restwasser wurden ca. 50 Liter in Kanister abgefüllt, an die Empa transportiert und dort noch am gleichen Tag für die Restwasseranalysen sowie die Betonversuche verwendet. Im Bericht sind diese beiden Restwässer, sowie die damit durchgeführten Versuche mit BW1 und BW2 bezeichnet, wobei diese Bezeichnung keine Rückschlüsse auf das Betonwerk zulässt.

3.2 Methoden

3.2.1 Restwasserherstellung

Um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten, wurde das Restwasser für die meisten Untersuchungen künstlich im Labor herstellt. Dazu wurde jeweils ein Beton mit folgender Zusammensetzung verwendet:

- 300 kg/m^3 CEM II/A-LL 42.5 N
- w/z = 0.50
- Gesteinskörnung mit Grösstkorn 32 mm, Sandanteil 32 %
- Keine Zusatzmittel

Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit wurde der Sand zusätzlich in die Fraktionen 0 – 1 mm und 1 – 4 mm aufgeteilt.

15 min nach der Herstellung wurden ca. 10 kg Beton auf einem Sieb mit 0.25 mm Sieböffnung mit einer genau definierten Menge Waschwasser (Leitungswasser aus dem Trinkwassernetz der Stadt Dübendorf) ausgewaschen und das entstehende Restwasser in einem Becken gesammelt (Abb. 1). Je höher die

Restwasserdichte sein sollte, umso weniger Waschwasser wurde verwendet. Die notwendige Menge Waschwasser für eine bestimmte Dichte wurde jeweils in entsprechenden Vorversuchen bestimmt.

Abb. 1: Auswaschen des Betons mit einer definierten Menge Waschwasser (links) und Lagern des Restwassers im Becken mit Rührwerk bis zur Verwendung für die Versuche (rechts).

Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis genügend Restwasser für die folgende Betonproduktion (in der Regel drei Betonmischungen) vorhanden war. Für ca. 50 Liter Restwasser waren jeweils ca. 3 Waschvorgänge notwendig.

Wie in [1, 3] gezeigt wird, ist der Einfluss des Restwassers auf die Betoneigenschaften tendenziell grösser, je älter das Restwasser ist. Um den Worst-case darzustellen (Verwendung von Restwasser am Montagmorgen) wurde das Restwasser nach der Herstellung 72 Stunden unter ständigem Rühren zugedeckt im Labor gelagert, bevor es für die verschiedenen Versuche verwendet wurde (Abb. 1, gilt auch für die Versuche am Zementleim).

Für die Versuche bei 30 °C wurde das Restwasser bei Laborklima (ca. 20 °C) hergestellt und anschliessend auch bei dieser Temperatur gelagert. Nach 48 Stunden wurde das Wasser in den Klimaraum bei 30 °C gestellt, so dass es für die Betonage im Alter von 72 Stunden eine Temperatur von ca. 30 °C aufwies.

3.2.2 Dichtebestimmung des Restwassers

Die Dichtebestimmung erfolgte jeweils unmittelbar nach der Herstellung an der ersten und der letzten Charge, sowie am Schluss am Gesamtgemisch. Zusätzlich wurde die Dichte kurz vor der Verwendung für die Versuche im Alter von 72 Stunden erneut bestimmt.

Ein Gefäss von genau bekanntem Inhalt (1.00 Liter) wurde bis zur Oberkante mit einer möglichst homogenen Menge Restwasser gefüllt. Anschliessend wurde die Oberfläche mit einer Glasplatte abgedeckt,

so dass das Gefäss einen definierten Füllstand aufwies (Abb. 2). Durch Wägung dieses genau bekannten Volumens Restwasser konnte jeweils dessen Dichte bestimmt werden.

Abb. 2: Bestimmung der Restwasserdichte über Wägung eines genau bekannten Volumens.

3.2.3 Restwasseranalysen

Es wurde sowohl die Zusammensetzung der im Labor hergestellten Restwässer mit den Dichten 1.07 und 1.15 g/cm^3 als auch diejenige der Restwässer aus dem Betonwerk bestimmt. Die Analysen der im Labor produzierten Restwässer wurden an der gleichen Charge vorgenommen, mit welcher auch die Versuche am Zementleim durchgeführt wurden. Da die Dichte der verschiedenen Laborrestwasserchargen wenig schwankte (vgl. Kap. 4.1.1), wurde die Zusammensetzung der übrigen Chargen nicht analysiert.

Für die Restwasseranalyse wurde im Alter von 72 Stunden eine homogene Menge Restwasser (ca. 1.0 Liter) in ein Gefäss abgefüllt, welches anschliessend ca. 1 Stunde stehen gelassen wurde. Dadurch konnte sich der grösste Teil der Feststoffe absetzen.

Mit einer Spritze und aufgesetztem Filter wurde vom oberen Teil des Gefässes die Flüssigphase inklusive gelöste Ionen abgesogen. Unmittelbar anschliessend wurden an dieser Flüssigphase der pH-Wert mittels pH-Meter (Knick pH-Meter 766) bestimmt, sowie die verschiedenen Verdünnungen für die Messungen im Ionenchromatograph (IC) hergestellt (Ionenchromatograph Dionex ICS-3000). Die Zusammensetzung der Flüssigphase mittels IC wurde noch am gleichen Tag gemessen. Es wurden folgende Ionen bestimmt: NO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, Na^{2+}, K^+, Ca^{2+}.

Der untere Teil mit der abgesetzten Festphase wurde mit einem Papierfilter vom Rest der Flüssigphase getrennt. Der festen Phase wurde anschliessend mittels Isopropanol und Diethylether das freie Wasser entzogen (Abstoppen der Hydratation). Der so behandelte Rückstand wurde mittels Röntgendiffraktion (XRD; X‘Pert Pro mit Co-Röhre und X‘Celerator-Detektor) und Thermogravimetrie (TGA; Mettler-Toledo TGA/SDTA 851, Temperaturintervall 30 °C – 980 °C, 20 K/min, N_2-Atmosphäre) charakterisiert.

3.2.4 Versuche am Zementleim

Die Zementpasten wurden mit einem w/z von 0.55 unter Verwendung eines Braun Multiquick 5550 M CA angemischt. Es wurde 300 g Zement eingesetzt. Die entsprechende Wassermenge wurde vorgelegt und dann der Zement hinzugefügt. Je Probe wurden zwei Pasten angemischt und für die kalorimetrischen und rheologischen Messungen verwendet. Die Wassermenge in ml ohne Feststoffe blieb jeweils für alle Versuche konstant, ebenso der Zementgehalt. Der Festanteil im Restwasser wurde nicht vom Zementgehalt abgezogen.

Die Messungen zur Kalorimetrie erfolgten mit einem isothermen Wärmeflusskalorimeter TAM Air (Fa. TA Instruments) bei 20 °C über einen Zeitraum von 72 h. Unmittelbar nach dem Mischen wurden ca. 8-9 g Paste in eine Ampulle gefüllt und diese in eine Messzelle des Kalorimeters gestellt.

Für die rheologischen Messungen wurde ein Rotationsrheometer MCR 300 (Fa. Paar Physica) verwendet. Es wurde eine zylindrische Messgeometrie gemäss ISO 3219 mit einem Messgefäss und einem rotierenden Messkörper verwendet (Durchmesser Messspalt 1.13 mm, Verhältnis äusserer/innerer Radius 1.08; profilierter Messkörper mit Rillentiefe 100 µm), welche mit Hilfe eines Thermostates auf 20 °C temperiert wurde. Direkt nach dem Mischen wurden ca. 20 ml der Paste ins Messgefäss gefüllt und die Messung gestartet Dabei war das Messgefäss mit einer Abdeckung versehen, die das Verdunsten des Zugabewassers verhinderte. Nach 5 bzw. nach 30 min wurde jeweils eine Fliesskurve gemessen. Die Scherraten wurden wie folgt variiert:

- Scherraten 1, 5, 10, 20, …, 100 s^{-1} während 60 s (5 s pro Messpunkt)
- Scherrate 100 s^{-1} während 60 s
- Scherraten 100, 90, …, 10, 5, 1 s^{-1} während 60 s (5 s pro Messpunkt)

Zwischen den Messungen nach 5 min und nach 30 min verblieb die Paste im Messgefäss.

Scheinbare Fliessgrenze und plastische Viskosität wurden im Scherratenbereich 100 … 10 s^{-1} (Kurve mit absteigender Scherrate) nach der Bingham-Gleichung berechnet.

Das Erstarrungsverhalten wurde nach EN 196-3 bestimmt.

3.2.5 Frischbetoneigenschaften

Bei den Betonen wurde das Ausbreitmass nach SN EN 12350-5 zu bestimmten Zeitpunkten nach der Herstellung bestimmt. Nach dem Mischvorgang wurde der Beton aus dem Mischer in einen Auffangkübel entleert und anschliessend mit der Schaufel nochmals gut durchgemischt. Die erste Messung des Ausbreitmasses erfolgte ca. 5 min nach Ende der Wasserzugabe. Weiter Messungen erfolgten nach 15, 30, 60 und 90 Minuten. Zwischen den Messungen wurde der Beton jeweils mit einem Plastik abgedeckt, um den Wasserverlust zu reduzieren. Vor jeder Messung wurde der Beton mit der Schaufel gut durchgemischt.

Bei den Versuchen mit erhöhter Temperatur (30 °C) wurde das Ausbreitmass zwar im Laborklima (ca. 20 °C) bestimmt, zwischen den Versuchen wurde der Auffangkübel aber jeweils wieder in die Wärmekammer gebracht.

Zusätzlich wurden bei allen Betonen der Luftporengehalt und die Rohdichte nach SN EN 12350-6 und -7 ca. 5 min nach der Herstellung bestimmt. Bei den Betonen mit Luftporenbildner wurde der Gehalt nach 90 min erneut gemessen.

3.2.6 Temperaturverlauf beim Abbinden (Beton)

Von jedem Beton wurde wenige Minuten nach der Herstellung ein Würfel mit 15 cm Kantenlänge in einer Styroporschalung inklusive Deckel (4 cm Styropordicke) erstellt, in dessen Zentrum ein Thermoelement platziert wurde. Dieser Würfel wurde anschliessend in einem Klimaraum bei 20 °C gelagert. Ausgehend von der Frischbetontemperatur wurde während ca. 72 Stunden der Temperaturverlauf im Würfel gemessen.

Für die Versuche bei 30 °C wurde der isolierte Würfel nach der Herstellung bei 30 °C weitergelagert.

3.2.7 Druckfestigkeit Beton

Die Druckfestigkeit des Betons wurde nach SN EN 12390-3 an jeweils zwei Würfeln mit 150 mm Kantenlänge im Alter von 24 Stunden, 4 Tagen und 28 Tagen bestimmt.

Für die Versuche bei 30 °C wurden die Würfel nach der Herstellung für 24 Stunden weiter bei 30 °C gelagert. Nach dem Ausschalen im Alter von 24 Stunden wurden die verbleibenden Probekörper im Normklima bei 20 °C und 95 % r.F. weitergelagert.

3.3 Untersuchungsmatrix

Neben üblichem Leitungswasser wurden Laborrestwässer mit den Dichten 1.03, 1.07 und 1.15 g/cm^3 verwendet. Zusätzlich wurde ein Restwasser mit der Dichte 1.07 g/cm^3 verwendet, bei welchem die Feststoffe abfiltriert wurden (Einfluss der gelösten Ionen, Bezeichnung RW1.07f). Mit diesen Wässern wurden die in Tab. 1 definierten Untersuchungen am Restwasser selber sowie am Zementleim durchgeführt und die beschriebenen Betonsorten hergestellt. Das Restwasser mit Dichte 1.03 g/cm^3 wurde erst in einer zweiten Phase des Projektes in die Prüfmatrix aufgenommen. Aus diesem Grund wurden an diesem Wasser keine Restwasseranalysen und Zementleimversuche durchgeführt.

Mit dem Restwasser der Dichte 1.15 g/cm^3 wurden keine Betone hergestellt. Aufgrund der Resultate am Zementleim sowie dem Restwasser mit Dichte 1.07 g/cm^3 konnte geschlossen werden, dass mit diesem Restwasser ohne wesentliche Anpassungen an der Betonrezeptur kein verarbeitbarer Beton hergestellt werden kann. Bei Anpassungen in der Betonrezeptur wäre die Vergleichbarkeit zu den übrigen Resultaten aber nicht mehr gegeben gewesen.

Die Versuche wurden grundsätzlich im Laborklima bei ca. 20 °C durchgeführt. Um den Einfluss erhöhter Temperaturen im Sommer zu simulieren, wurden ausgewählte Betonversuche bei 30 °C durchgeführt.

Um die Übertragbarkeit der mit den Laborrestwässer erzielten Resultate auf die Praxis zu überprüfen, wurden aus zwei Betonwerken Restwässer entnommen, analysiert und damit Betone der Sorte A hergestellt. Da diese Versuche ca. ein Jahr nach den ersten Laborversuchen durchgeführt wurden, wurde gleichzeitig erneut eine Referenzmischung der Sorte A mit Leitungswasser hergestellt, um einen direkten Vergleich ohne Einfluss der Zeit (z.B. Alterung Zement, etc.) zu ermöglichen.

Die Versuchsmatrix wurde in Absprache mit der Projektbegleitgruppe laufend den Resultaten entsprechend angepasst.

Bezeichnung	LW	RW1.03	RW1.07	RW1.15	RW1.07f	LW_30°C	RW1.03_30°C	BW
Wasser	Leitungs-wasser	Rest-wasser	Rest-wasser	Rest-wasser	RW filtriert	Leitungs-wasser	Rest-wasser	RW aus Betonwerk
Dichte [g/cm^3]	1.00	1.03	1.07	1.15	1.00	1.00	1.03	variabel
Temperatur [°C]	20	20	20	20	20	30	30	20
Zementleim:								
Kalorimetrie	x	-	x	x	x	-	-	-
Erstarrungsbeginn	x	-	x	x	x	-	-	-
Rheologie	x	-	x	x	x	-	-	-
Restwasser:								
IC	-	-	x	x	-	-	-	x
TGA / XRD / TOC	-	-	x	x	-	-	-	x
Beton:								
Sorte A	x (2x)	x	x	-	x	x	x	x
Sorte C	x	x	x	-	x	x	x	-
Sorte F	x	x	x	-	x	-	-	-

Tab. 1: Versuchsmatrix (RW = Restwasser). Beton Sorte A mit Leitungswasser 2x hergestellt

3.4 Betonmischungen

Für die Betonversuche wurden drei Betonsorten gemäss Tabelle NA.2 der SN EN 206-1 ausgewählt. Die Sorten A und C werden im Hochbau verwendet, während die Sorte F im Tiefbau Anwendung findet.

Die Zusammensetzung der Betone orientiert sich bezüglich Zementgehalt und w/z-Wert an den Grenzen gemäss Tabelle NA.3 der SN EN 206-1. Der Sand wurde zur Gewährleistung einer bessern Reproduzierbarkeit zusätzlich aufgeteilt (Fraktionen 0 – 1 mm und 1 – 4 mm). In der Tab. 2 ist die Zusammensetzung für die Betonmischungen mit Leitungswasser zusammengefasst.

Beton	Sorte A	Sorte C	Sorte F
Zementart	CEM II/A-LL 42.5 N	CEM II/A-LL 42.5 N	CEM II/A-LL 42.5 N
Zementgehalt [kg/m^3]	280	300	320
w/z	0.65	0.50	0.45
Gesteinsk. 0/32 mm [kg/m^3]	1890	1950	1890
Sandanteil [Masse-%]	40	36	34
Wasser [kg/m^3]	182	149	142
Fliessmittel [kg/m^3]	-	1.5	2.2
Luftporenbildner [kg/m^3]	-	-	0.6

Tab. 2: Zusammensetzung der Betonmischungen mit Leitungswasser.

Bei der Verwendung von Restwasser wurde der reine Wassergehalt im Beton konstant gehalten, so dass sich der w/z-Wert im Vergleich zu den Mischungen mit Leitungswasser nicht änderte. Es wurde immer 100 % Restwasser verwendet (kein Mischen mit Leitungswasser). Der zusätzliche Feststoffanteil aus dem Restwasser, berechnet nach Tabelle A.1 der EN 1008, wurde kompensiert, indem entsprechend weniger Gesteinskörnung aller Fraktionen beigegeben wurde. Dadurch ergab sich ein generell erhöhter Feinanteil in den Betonmischungen hergestellt mit nicht-filtriertem Restwasser. Die Siebkurve der Gesteinskörnung sowie der Gehalt an Zement und Zusatzmittel wurden nicht geändert. Der Gehalt an Wasser und Gesteinskörnung ist für die verschiedenen Betonmischungen in der Tabelle im Anhang zu finden.

Bei den Betonversuchen mit erhöhter Temperatur wurden sämtliche Komponenten bei etwas mehr als 30 °C vorgelagert (Gesteinskörnung bereits abgewogen). Für die Betonherstellung wurden die Komponenten aus dem Klimaraum entnommen und sofort verarbeitet, so dass der Temperaturabfall möglichst gering gehalten werden konnte. Entsprechend betrug die Frischbetontemperatur zu Beginn der Versuche zwischen 31 – 33 °C, am Ende der Versuche (90 min nach Herstellung) 29 – 31 °C.

3.5 Bezeichnung Betone

Die Betone werden in den folgenden Tabellen und Abbildungen wie folgt bezeichnet:

"Betonsorte_Wasserart"

Die verwendeten Betonsorten können der Tab. 2 entnommen werden, die verwendete Wasserart der Tab. 1.

4 Resultate

4.1 Restwasserzusammensetzung

4.1.1 Restwasserdichte

Mit den in Kap. 3.2.1 und 3.2.2 beschriebenen Methoden für die Restwasserherstellung und die Dichtebestimmung konnte eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Restwasserdichten erreicht werden.

Restwasser der Dichte **1.03 g/cm^3** musste in insgesamt 2 Chargen im Abstand von 4 Wochen hergestellt werden. Für die beiden Chargen wurden unmittelbar nach der Herstellung effektive Dichten von 1.028 g/cm^3 und 1.030 g/cm^3 bestimmt.

Restwasser der Dichte **1.07 g/cm^3** musste in insgesamt 3 Chargen im Abstand von 3 Wochen hergestellt werden. Für die drei Chargen wurden effektive Dichten zwischen 1.078 g/cm^3 und 1.079 g/cm^3 bestimmt. Generell war die Dichte etwas höher als angestrebt, jedoch wiesen die drei Chargen nur eine sehr kleine Streuung auf.

Restwasser der Dichte **1.15 g/cm^3** wurde nur in einer Charge für die kleinmassstäblichen Versuche hergestellt. Für diese Charge wurde eine effektive Dichte von 1.146 g/cm^3 bestimmt.

Die effektive Dichte des **abfiltrierten Restwassers** der Dichte 1.07 g/cm^3 betrug mit der in Kap. 3.2.2 beschriebenen Messmethode 1.003 g/cm^3. Für die Rezepturen wurde dieses Wasser deshalb wie Leitungwasser behandelt (Dichte 1.00 g/cm^3).

Vor der Verwendung des Restwassers im Alter von 72 Stunden wurde die Dichte erneut bestimmt. Diese Dichte war generell höher als die Dichte unmittelbar nach der Herstellung:

Angestrebte Restwasserdichte:	**effektive mittlere Restwasserdichte**	
	nach Herstellung:	**nach 72 Stunden**
1.03 g/cm^3	1.029 g/cm^3	1.031 g/cm^3
1.07 g/cm^3	1.078 g/cm^3	1.084 g/cm^3
1.15 g/cm^3	1.146 g/cm^3	1.177 g/cm^3

Mögliche Gründe für die erhöhte Dichte des Restwassers nach 72 Stunden können die zunehmende Hydratation des Zementes sowie Karbonatisierungseffekte sein. Für die Berechnung der Betonrezepturen wurde jeweils die effektiv bestimmte Dichte zum Zeitpunkt der Betonherstellung (Alter 72 Stunden) verwendet.

An den Restwässern aus den Betonwerken wurde die Dichte ebenfalls nach der in Kap. 3.2.2 beschriebenen Methode unmittelbar nach der Anlieferung an die Empa bestimmt. Es ergaben sich folgende Dichten:

BW1: 1.082 g/cm^3

BW2: 1.045 g/cm^3

Die Dichte von BW1 liegt im Bereich der Dichte des Laborrestwassers mit der Bezeichnung 1.07, dasjenige von BW2 etwas höher als das Laborrestwasser 1.03.

4.1.2 Flüssigphase

In der Tab. 3 sind die Resultate der Analysen an der Flüssigphase der verschiedenen Restwässer zusammengefasst.

Bezeichnung	angestrebte RW-Dichte [g/cm^3]	effektive RW-Dichte [g/cm^3]	pH [-]	NO_3 [mg/l]	SO_4 [mg/l]	Cl [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]
RW1.07	1.07	1.086	12.5	0.4	n.n.	12.4	35.4	268.6	515.7
RW1.15	1.15	1.177	12.6	0.4	n.n.	15.8	69.4	537.9	423.0
BW1	-	1.082	12.4	4.3	n.n.	9.2	93.0	564.6	914.7
BW2	-	1.045	12.6	7.8	n.n.	23.0	72.2	223.9	938.1

Tab. 3: Resultate der Analysen an der Flüssigphase verschiedener Restwässer (n.n. = unterhalb Nachweisgrenze).

Alle vier analysierten Restwässer weisen einen ähnlichen pH-Wert auf. Es bestehen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Laborrestwässern unterschiedlicher Dichte. Gleiches gilt für die Restwässer aus den Betonwerken, welche einen vergleichbaren pH-Wert aufweisen wie die Laborrestwässer.

Bei gleicher Dichte weisen die Laborrestwässer einen tendenziell geringeren Gehalt an Alkalien (Na + K) und Ca auf. Der Gehalt an NO_3 und SO_4 ist bei allen Restwässern generell klein. Der Gehalt an Cl liegt bei allen vier Restwässern in einem ähnlichen Bereich und ist generell klein (vgl. auch Bemerkung im Kapitel Festphase).

Bezüglich Ladungsbilanz gilt es zu vermerken, dass die molare Konzentration der Kationen höher ist als die der Anionen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Anionen Karbonat nicht bestimmt wurde und eventuell noch anionische Organica vorhanden sind.

4.1.3 Festphase

Abb. 3 zeigt die Resultate der XRD Messungen an den Laborrestwässern sowie an den beiden Restwässern aus den Betonwerken. Bei den im Labor hergestellten Proben treten die für einen hydratisierten Zement typischen Mineralphasen auf. Es sind noch deutliche Gehalte an unhydratisierten Zementklinkerphasen, vor allem Alit/Belit und Ferrat, vorhanden. Daneben können Quarz, Dolomit und Calcit identifiziert werden, welche aus der Gesteinskörnung und/oder dem Zement (Calcit) stammen können. Calcit kann zusätzlich auch durch Carbonatisierung des Calciumhydroxids entstanden sein. Von den Aluminat-Phasen kann nur Ettringit eindeutig nachgewiesen werden; AFm-Phasen können nicht identifiziert werden. Die Restwässer aus den Betonwerken enthalten deutlich weniger unhydratisierte Klinkerphasen als die im Labor hergestellten. Es sind auch signifikante Mengen an AFm-Phasen, vor allem Mono- und Hemicarbonat, sowie

im Fall des BW2 auch Friedel's Salz, vorhanden. BW1 enthält vermutlich ebenfalls diese Phase, wenngleich in deutlich geringeren Mengen. Offenbar reichert sich das im Beton enthaltene Chlorid in den Restwässeren an und wird als Friedel's Salz ausgefällt.

Um abzuschätzen, ob die in der Festphase enthaltenen Chloride (Friedel's Salz) für den Beton problematisch werden können, wurde mittels Säureaufschluss und potentiometrischer Titration der Gesamtchloridgehalt in der Festphase bestimmt. Bei RW1 wurde ein Chloridgehalt von 0.035 Masse-% gemessen, bei RW2 ein solcher von 0.042 Masse-%. Aus diesen Resultaten kann unter zusätzlicher Berücksichtigung der in der Flüssigphase enthaltenen Chloride (vgl. Tab. 3) der Gesamtchloridgehalt berechnet werden, welcher über das Restwasser in den Beton eigeführt wird. Bei der verwendeten Sorte A, welche in Bezug auf das Verhältnis Menge Restwasser zu Zementgehalt einen Extremfall darstellt, ergeben sich für die beiden Restwässer BW1 und BW2 identische Chloridgehalte von 0.004 Masse-%/Zement. Der Grund liegt im höheren Chloridgehalt von BW2 bei gleichzeitig geringerer Dichte. Der tiefste Grenzwert für den höchstzulässigen Chloridgehalt im Frischbeton gemäss Tabelle NA.1 der SN EN 206-1/NE:2013 für Spannstahlbewehrung von 0.1 Masse-%/Zement wird in diesem Fall um den Faktor 25 unterschritten. Obwohl im XRD der Festphasen Friedel's Salz gefunden wurde, sind die im vorliegenden Restwasser enthaltenen Mengen an Chloriden für den Beton absolut unbedenklich.

Die Abb. 4 bis 7 zeigen die Resultate der TGA-Messungen für die Laborrestwässer sowie die Restwässer aus den Betonwerken. Anhand der TGA-Daten wurden die Gehalte an Portlandit, chemisch gebundenem Wasser und Carbonat quantifiziert, siehe Tab. 4. Die Resultate sind typisch für hydratisierte Zemente. Die Restwässer aus den Betonwerken enthalten deutlich mehr AFm-Phasen als die im Labor hergestellten Wässer. In der Probe BW2 ist das Vorhandensein von Friedel's Salz auch im TGA erkennbar. Die Gehalte an Portlandit und an chemisch gebundenem Wasser sind für alle vier Restwässer vergleichbar. Bei den im Labor hergestellten Restwässern zeigt das Wasser mit der höheren Dichte generell höhere Gehalte an Portlandit, chemisch gebundenem Wasser und Carbonat im Vergleich zum Restwasser mit geringerer Dichte. Unterschiede zwischen den vier Restwässern gibt es bei den Gehalten an Karbonatphasen, was vermutlich mit der Art der zur Betonherstellung verwendeten Materialien (Zemente, Gesteinskörnungen) sowie gegebenenfalls unterschiedlich starker Karbonatisierung zusammenhängt.

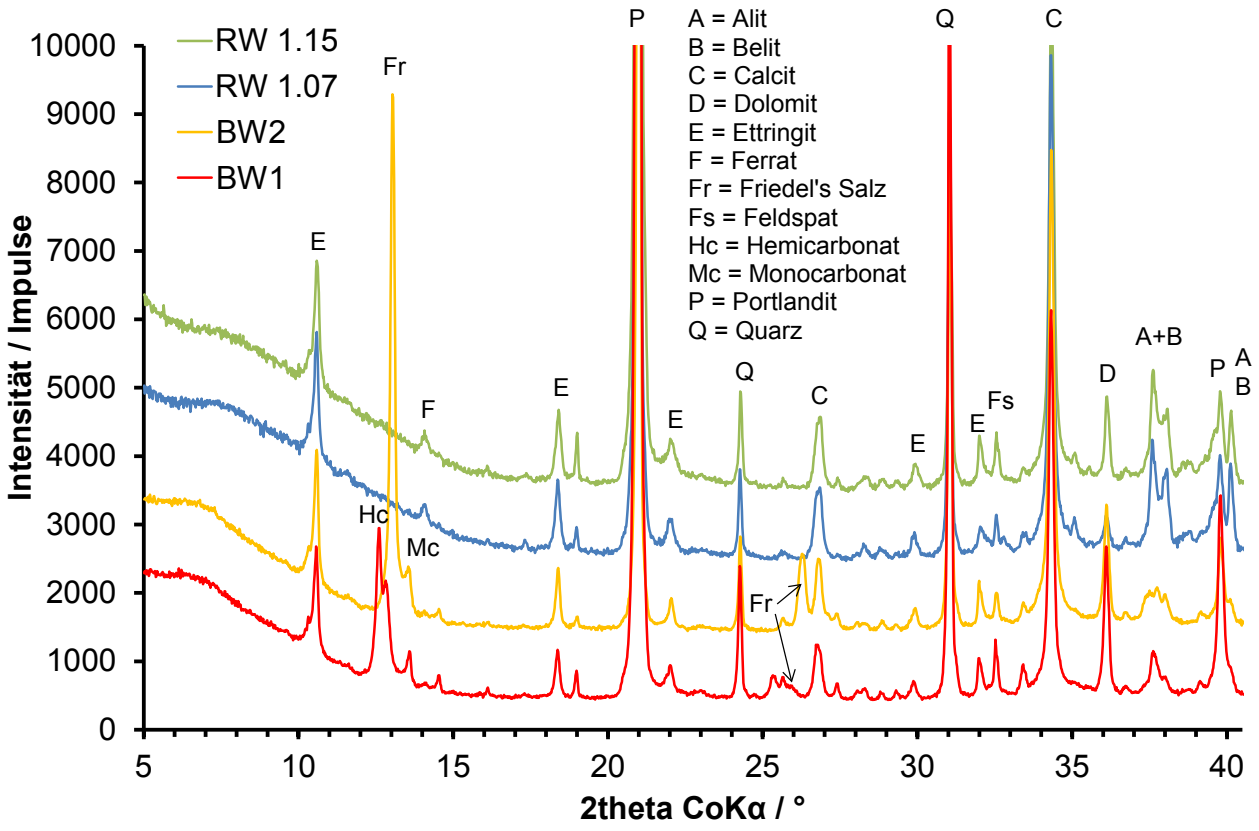

Abb. 3: XRD des Feststoffs im Laborrestwasser RW 1.07 und RW 1.15, sowie in den Restwässern der Betonwerke (BW1 und BW2).

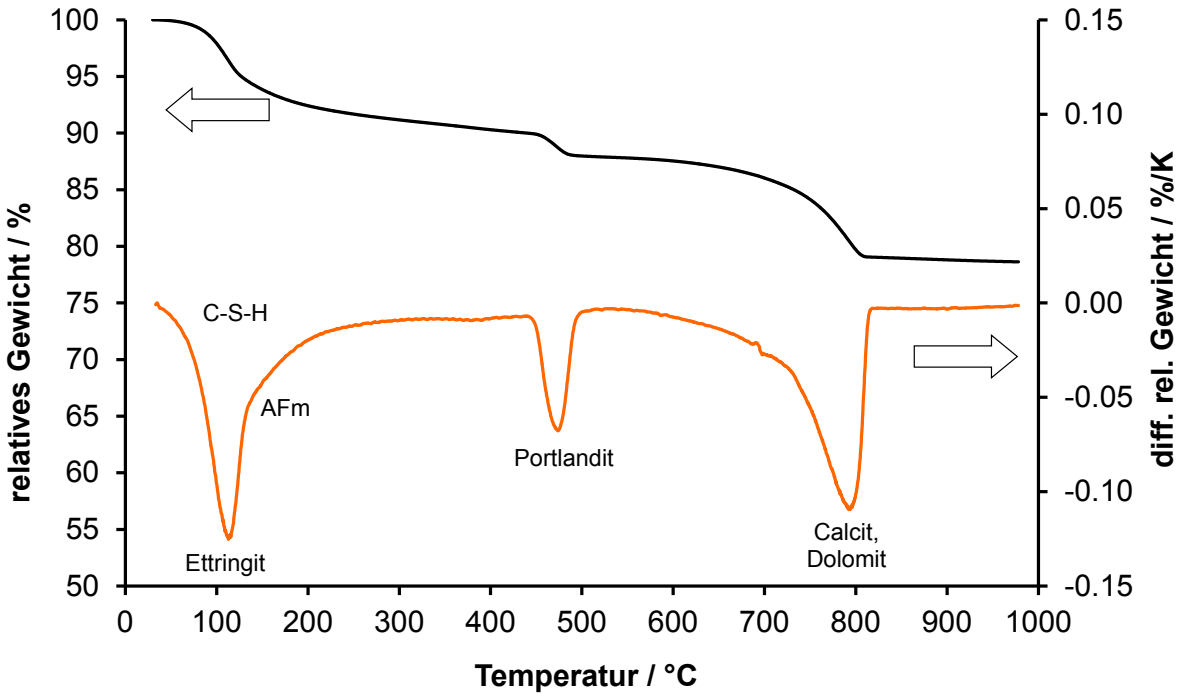

Abb. 4: TGA des Feststoffs in Restwasser **RW 1.07.**

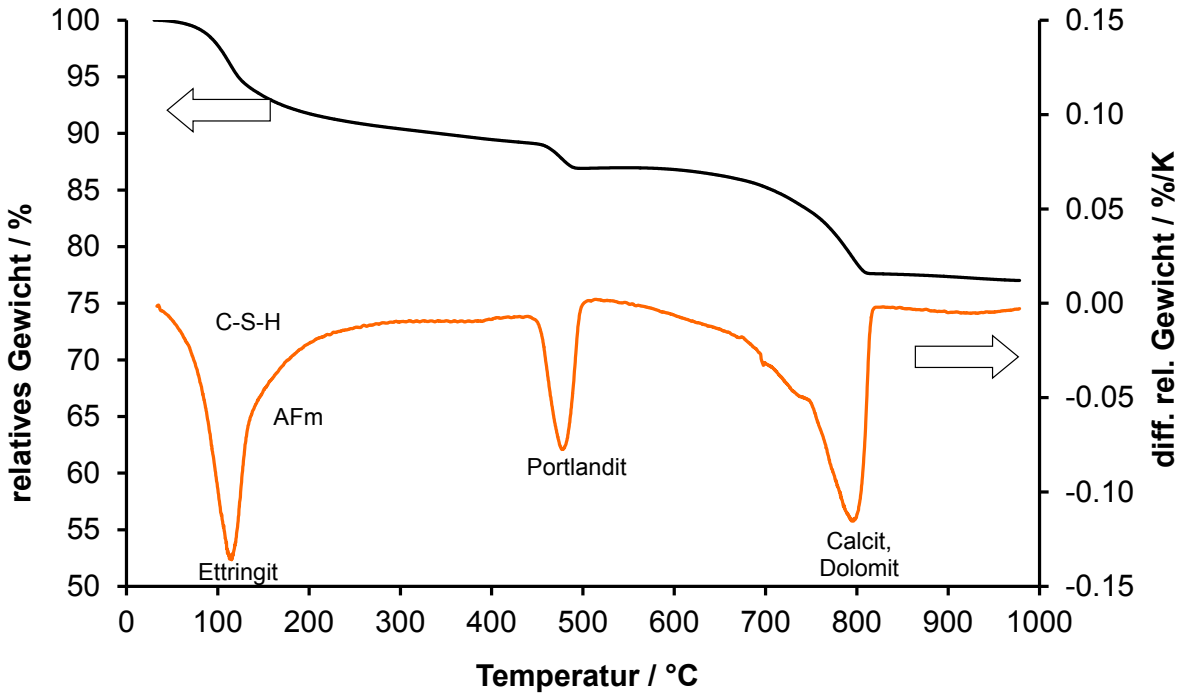

Abb. 5: TGA des Feststoffs in Restwasser **RW 1.15.**

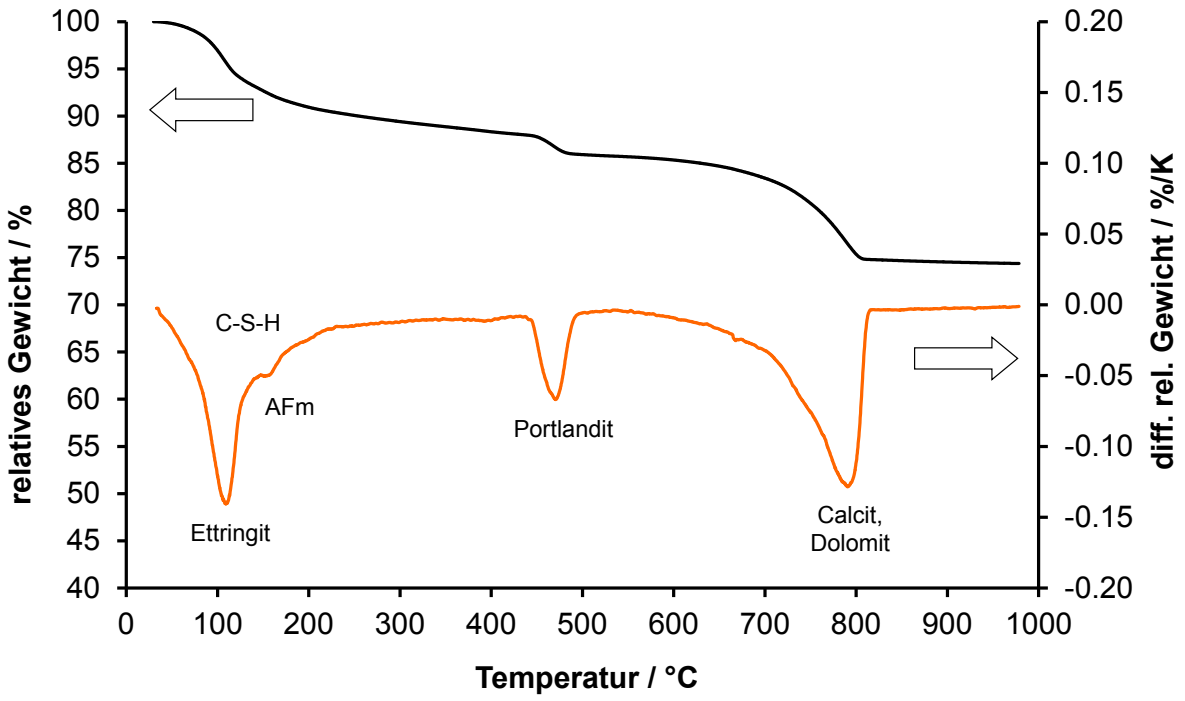

Abb. 6: TGA des Feststoffs in Restwasser **BW1**. AFm: Monophasen (z.B. Monosulfat, Hemi- und Monocarbonat, Friedel's Salz).

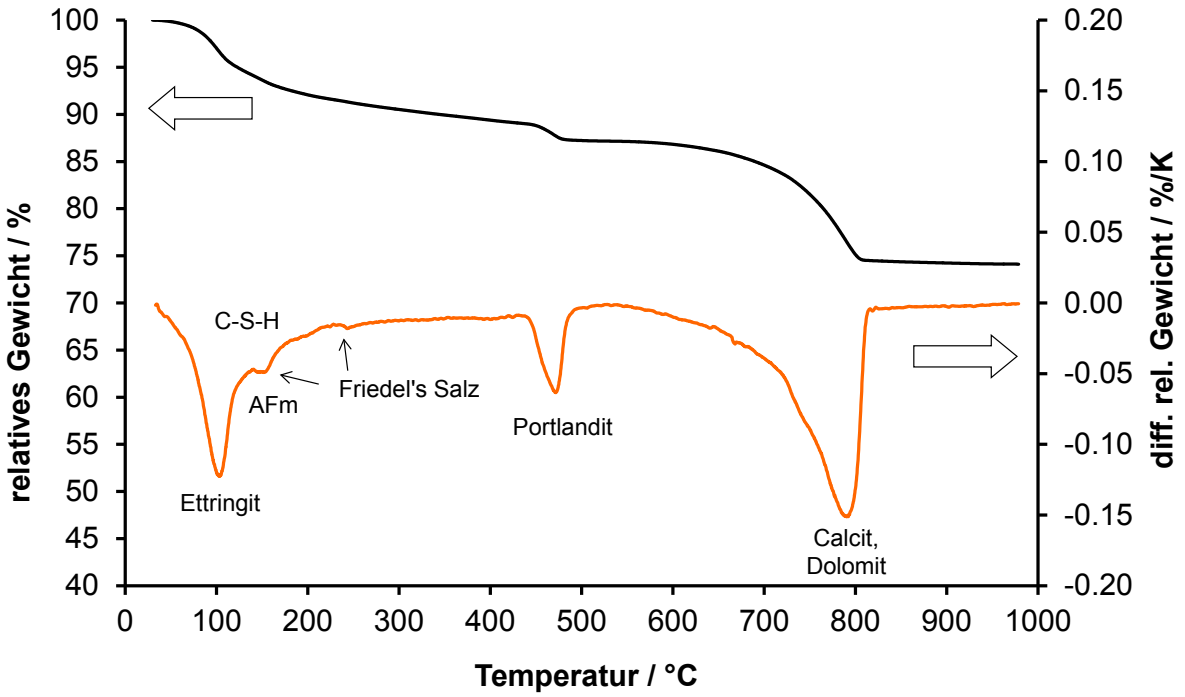

Abb. 7: TGA des Feststoffs in Restwasser **BW2**. AFm: Monophasen (z.B. Monosulfat, Hemi- und Monocarbonat, Friedel's Salz).

	RW 1.07	RW 1.15	BW1	BW2
Portlandit 440-500 °C / M.-%	8.3	9.2	8.5	7.3
Chem. geb. Wasser 30-550 °C / M.-%	12.2	13.0	14.3	12.3
Chem. geb. Wasser 30-550 °C (ohne Portlandit) / M.-%	10.2	10.8	12.9	11.1
Carbonat 700-820 °C / M.-%	7.0	7.6	8.6	10.1
Carbonat 700-820 °C als Calcit / M.-%	15.9	17.3	10.1	23.0

Tab. 4: Resultate der TGA am Feststoff der zwei Laborrestwässer sowie der Restwässer aus den Betonwerken.

4.2 Versuche am Zementleim mit den Laborrestwässern

4.2.1 Kalorimetrie

Abb. 8 zeigt den Wärmefluss während der ersten 48 h. Das filtrierte Restwasser verändert die Hydratationskinetik des Zementes praktisch nicht, während die ungefilterten Restwässer die Hydratation beschleunigen. Dieser Effekt wird mit zunehmender Dichte des Restwassers verstärkt.

Die kumulative Hydratationswärme wurde durch Integration der Wärmeflusskurve zwischen 0.5 und 72 h bestimmt (Tab. 5, Abb. 9). Das gefilterte Restwasser beeinflusst die Hydratationswärme praktisch nicht. Die Hydratationswärme nimmt mit zunehmender Dichte des ungefilterten Restwassers zu.

Die Beschleunigung der Hydratation und die erhöhte Hydratationswärme lassen sich im Wesentlichen auf drei Effekte zurückführen:

- Keimbildende Wirkung der im Restwasser enthaltenen Feinststoffe
- Hydratation der im Restwasser enthaltenen unhydratisierten Klinkerbestandteile
- Beschleunigung durch die gelösten Alkalien (nur geringer Effekt, siehe Resultate des gefilterten Restwassers)

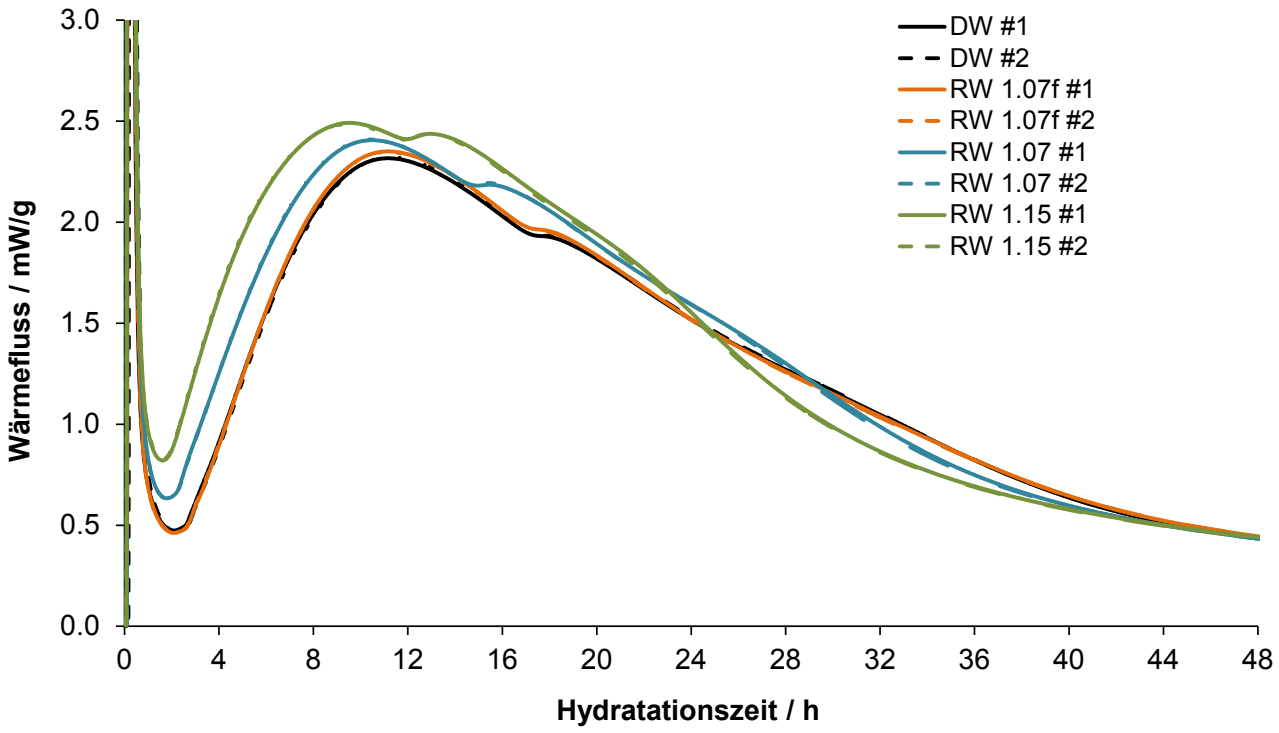

Abb. 8: Hydrationswärmefluss.

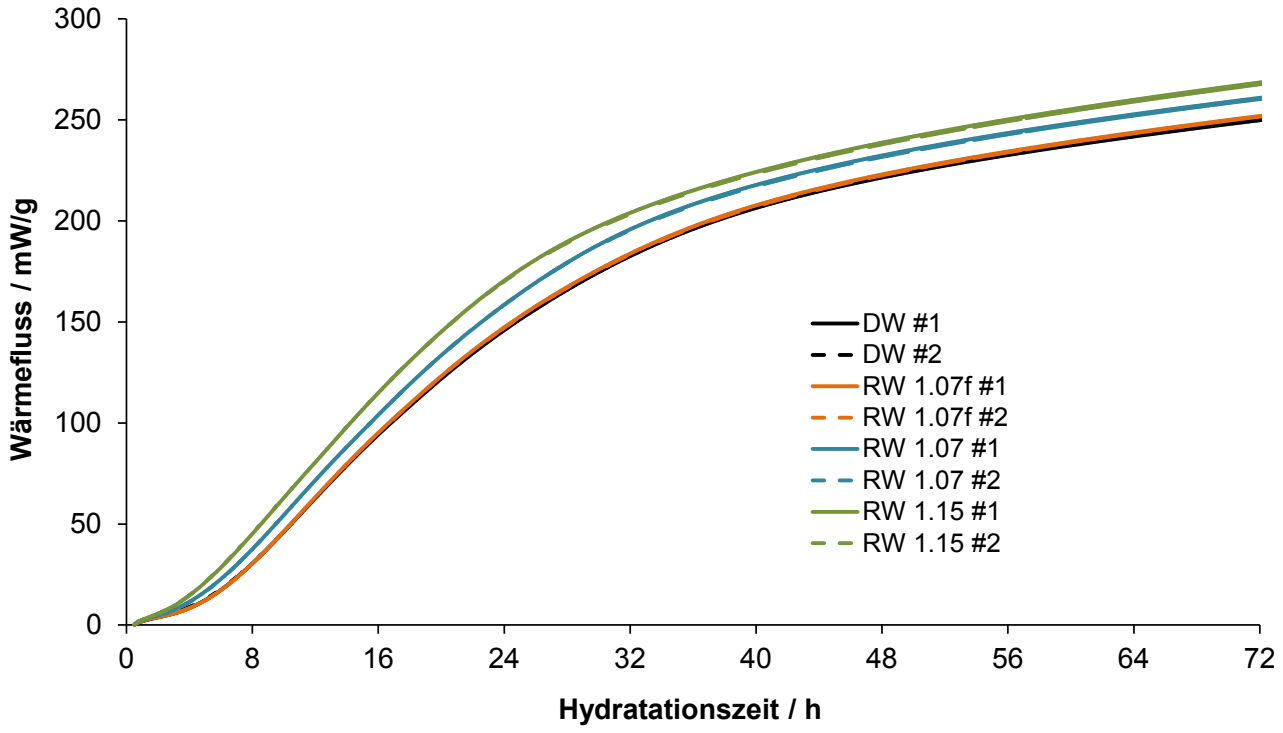

Abb. 9: Kumulative Hydratationswärme.

Hydratationswärme / J/g		24 h			72 h		
Zement	Zugabewasser	#1	#2	**MW**	#1	#2	**MW**
CEM II/A-LL 42.5 N	DW	145.9	146.5	**146.2**	249.8	250.9	**250.4**
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.07f	147.3	147.1	**147.2**	251.9	251.7	**251.8**
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.07	158.5	158.5	**158.5**	260.9	260.3	**260.6**
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.15	170.4	170.1	**170.3**	268.5	267.6	**267.1**

Tab. 5: Kumulative Hydratationswärme nach 24 und 72 h

4.2.2 Rheologie

Scheinbare Fliessgrenze und plastische Viskosität zeigen denselben Trend (siehe Tab. 6 und Abb. 10). Zwischen den mit deionisiertem Wasser und mit filtriertem Restwasser hergestellten Proben ist nahezu kein Unterschied der Fliesseigenschaften feststellbar; die Werte für das filtrierte Restwasser sind tendenziell geringfügig geringer als diejenigen für das deionisierte Wasser. Mit steigender Dichte des Restwassers wird eine stark zunehmende Erhöhung von scheinbarer Fliessgrenze und plastischer Viskosität beobachtet. Dies hängt mit dem zunehmenden Anteil an Feinstpartikeln zusammen.

Scheinbare Fliessgrenze / Pa		5 min			30 min		
Zement	Zugabewasser	#1	#2	**MW**	#1	#2	**MW**
CEM II/A-LL 42.5 N	DW	6.7	6.3	**6.5**	8.7	8.5	**8.6**
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.07f	6.2	6.3	**6.2**	8.3	8.4	**8.4**
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.07	13	15	**14**	16	17	**16**
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.15	24	25	**24**	26	28	**27**
Plastische Viskosität / Pa·s		5 min			30 min		
Zement	Zugabewasser	#1	#2	**MW**	#1	#2	**MW**
CEM II/A-LL 42.5 N	DW	0.056	0.052	**0.054**	0.084	0.084	**0.084**
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.07f	0.053	0.054	**0.053**	0.083	0.084	**0.083**
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.07	0.14	0.15	**0.14**	0.20	0.22	**0.21**
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.15	0.38	0.40	**0.39**	0.40	0.45	**0.43**

Tab. 6: Rheologische Eigenschaften.

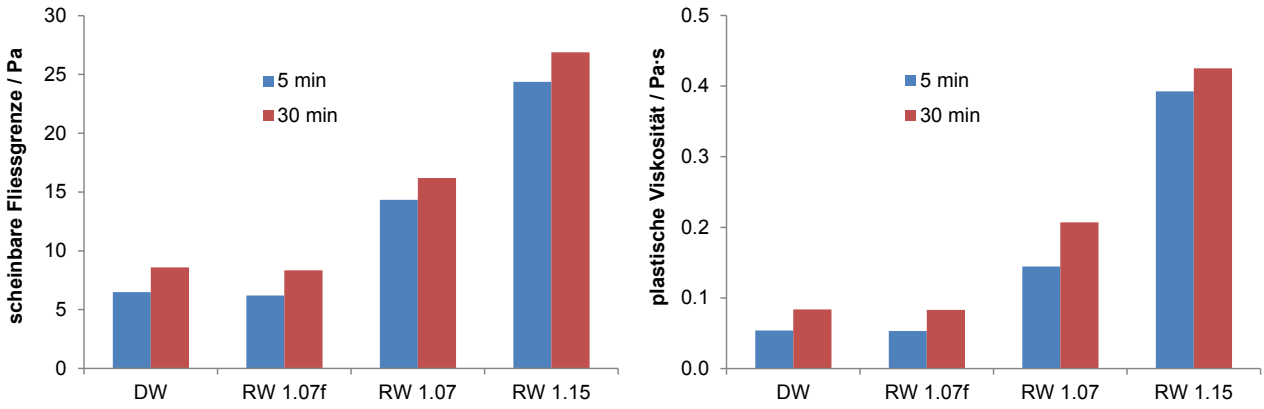

Abb. 10: Rheologische Eigenschaften der Zementleime, links: scheinbare Fliessgrenze, rechts: plastische Viskosität

4.2.3 Erstarrungsbeginn

Die ungefilterten Proben Restwasser beschleunigen das Erstarren, während das filtrierte Restwasser keinen Einfluss hat (Tab. 7). Dies korreliert mit den Ergebnissen der Wärmeflusskalorimetrie.

Zement	Zugabewasser	Zugabewasser für Normsteife / %	Erstarrungsbeginn / min
CEM II/A-LL 42.5 N	DW	26.5	170
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.07f	26.75	170
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.07	33.5	155
CEM II/A-LL 42.5 N	RW 1.15	44.5	150

Tab. 7: Wasseranspruch für Normsteife und Erstarrungsbeginn.

4.2.4 Zusammenfassung Versuche Zementleim

Die Versuche am Zementleim haben gezeigt, dass mit zunehmender Restwasserdichte eine zunehmende Beschleunigung der Hydratation sowie eine starke Abnahme von scheinbarer Fliessgrenze und plastischer Viskosität eintreten. Die Beschleunigung der Hydratation führt zu einem früheren Erstarrungsbeginn und einer gesamthaft erhöhten Hydratationswärmeentwicklung. Die gelösten Ionen im Wasser haben keinen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und die Hydratation. Aus diesem Grund dürften die beschleunigenden Effekte auf die keimbildende Wirkung der zunehmenden Feinanteile bei Restwasser mit erhöhter Dichte zurückzuführen sein. Die Veränderung der Verarbeitbarkeit im Laufe der Zeit ist für alle untersuchten Restwässer absolut gesehen etwa gleich gross.

4.3 Versuche am Beton

Sämtliche Resultate sind in tabellarischer Form im Anhang zusammengefasst.

4.3.1 Verarbeitbarkeit

Von den drei verwendeten Betonmischungen haben die Sorten A und F, hergestellt mit Leitungswasser, unmittelbar nach der Herstellung eine vergleichbare Verarbeitbarkeit (Abb. 11, links). Die Sorte C weist ein kleineres Ausbreitmass auf. Der Verlauf des Ausbreitmasses in Funktion der Zeit ab Betonherstellung ist aber für alle drei Betonmischungen in etwa vergleichbar (Abb. 11, rechts).

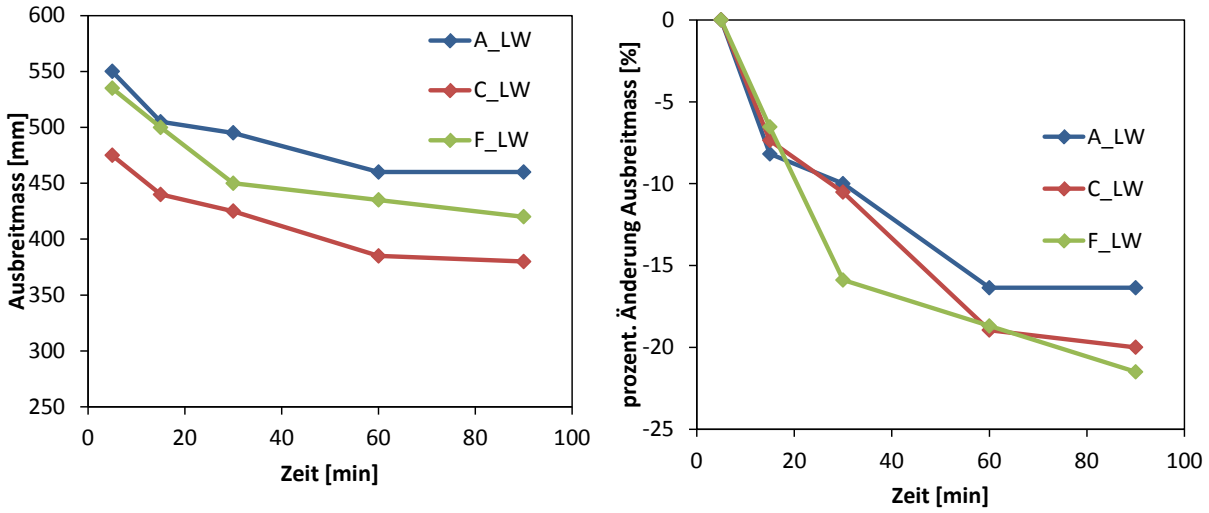

Abb. 11: Ausbreitmass in Funktion der Zeit ab Betonherstellung für die drei Betonsorten mit Leitungswasser. Links: zeitlicher Verlauf der Absolutwerte, rechts: prozentuale Änderung des Ausbreitmasses.

Im Folgenden werden in den Diagrammen die verschiedenen Variationen der jeweils gleichen Betonsorte einander gegenübergestellt.

Bei der **Sorte A** führen das Leitungswasser, das Laborrestwasser mit Dichte 1.03 und das filtrierte Restwasser der Dichte 1.07 zu einem identischen Ausbreitmass und auch einem identischen zeitlichen Verlauf (Abb. 12). Mit dem Restwassser der Dichte 1.07 ist das Ausbreitmass ca. 10 cm kleiner, wobei der zeitliche Verlauf aber vergleichbar ist mit dem Leitungswasser. Bei 30 °C nimmt das Ausbreitmass mit Leitungswasser um ca. 5 cm ab, wobei eine vergleichbare Abnahme auch beim Restwasser mit Dichte 1.03 vorhanden ist. Die zeitliche Abnahme des Ausbreitmasses ist bei 30 °C generell ausgeprägter, wobei kein signifikanter Unterschied zwischen dem Leitungswasser und dem Restwasser der Dichte 1.03 festgestellt werden kann.

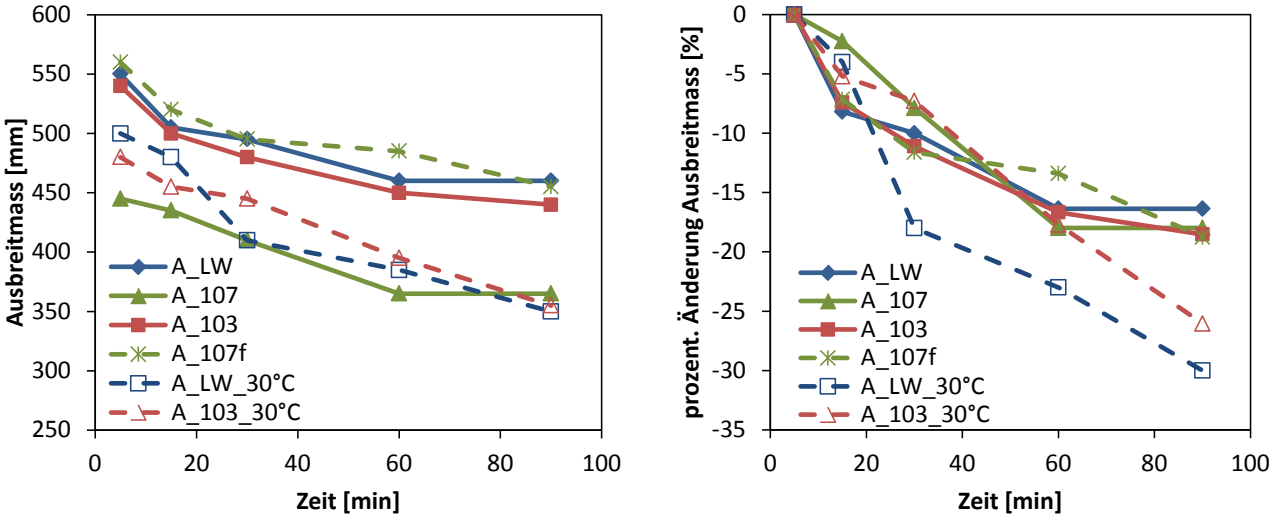

Abb. 12: Zeitlicher Verlauf des Ausbreitmasses für die **Betonsorten A**, hergestellt mit unterschiedlichem Zugabewasser (links) und prozentuale Änderung des Ausbreitmasses in Funktion der Zeit (rechts).

Bei der **Sorte C** führen das Leitungswasser und das Laborrestwasser mit Dichte 1.03 ebenfalls zu einem identischen Ausbreitmass und auch einem vergleichbaren zeitlichen Verlauf (Abb. 13). Mit dem filtrierten Restwasser wird unmittelbar nach der Herstellung eine Abnahme des Ausbreitmasses festgestellt. Aufgrund des atypischen zeitlichen Verlaufs und der weiteren Messwerte nach 30, 60 und 90 min kann aber davon ausgegangen werden, dass es sich bei diesem Wert um einen Ausreisser handelt und dass sich die Verarbeitbarkeit ähnlich verhalten dürfte wie beim Leitungswasser und beim Restwasser mit der Dichte 1.03. Mit dem Restwassser der Dichte 1.07 ist die Abnahme des Ausbreitmass im Vergleich zum Leitungswasser mit 14 cm sogar noch grösser als bei der Sorte A. Der zeitliche Verlauf konnte nur noch bis 30 min bestimmt werden, da anschliessend der Beton für die Bestimmung des Ausbreitmasses zu steif war. Bei 30 °C ist ebenfalls eine Abnahme des Ausbreitmasses im Vergleich zu 20 °C festzustellen, wobei die Abnahme beim Restwasser der Dichte 1.03 ausgeprägter ist als beim Leitungswasser. Die zeitliche Abnahme des Ausbreitmasses ist bei 30 °C ausgeprägter als bei 20 °C, wobei kein Unterschied zwischen dem Leitungswasser und dem Restwasser der Dichte 1.03 festgestellt werden kann.

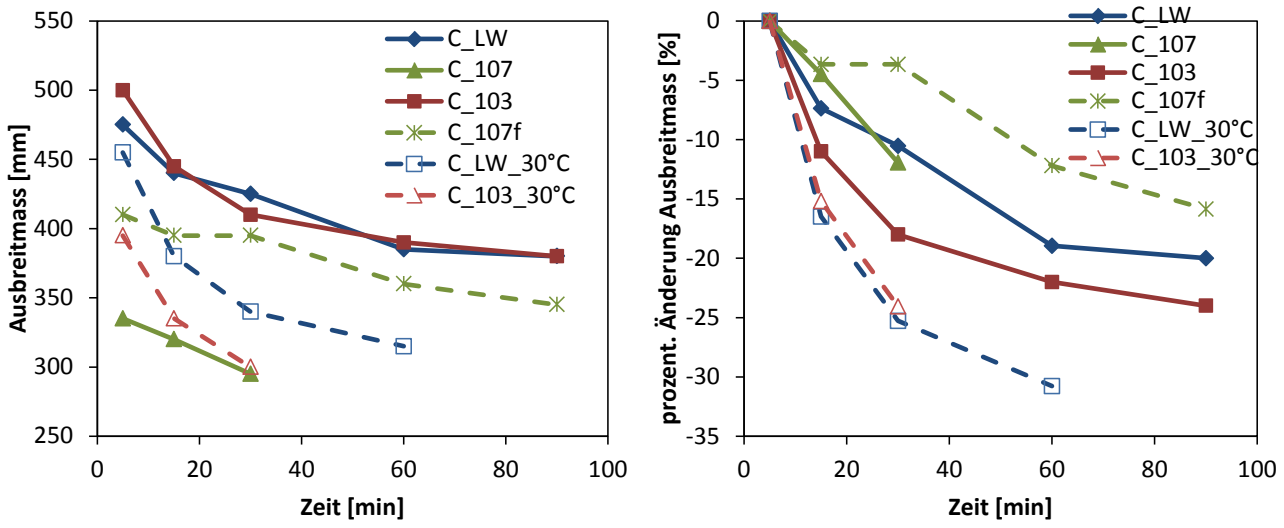

Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des Ausbreitmasses für die **Betonsorten C**, hergestellt mit unterschiedlichem Zugabewasser (links) und prozentuale Änderung des Ausbreitmasses in Funktion der Zeit (rechts).

Bei der **Sorte F** führen das Leitungswasser, das Laborrestwasser mit Dichte 1.03 und das filtrierte Restwasser der Dichte 1.07 wie bei der Sorte A zu einem identischen Ausbreitmass und auch einem vergleichbaren zeitlichen Verlauf (Abb. 14). Mit dem Restwasser der Dichte 1.07 ist das Ausbreitmass ca. 13 cm kleiner, wobei der zeitliche Verlauf aber vergleichbar ist mit den übrigen verwendeten Wässern.

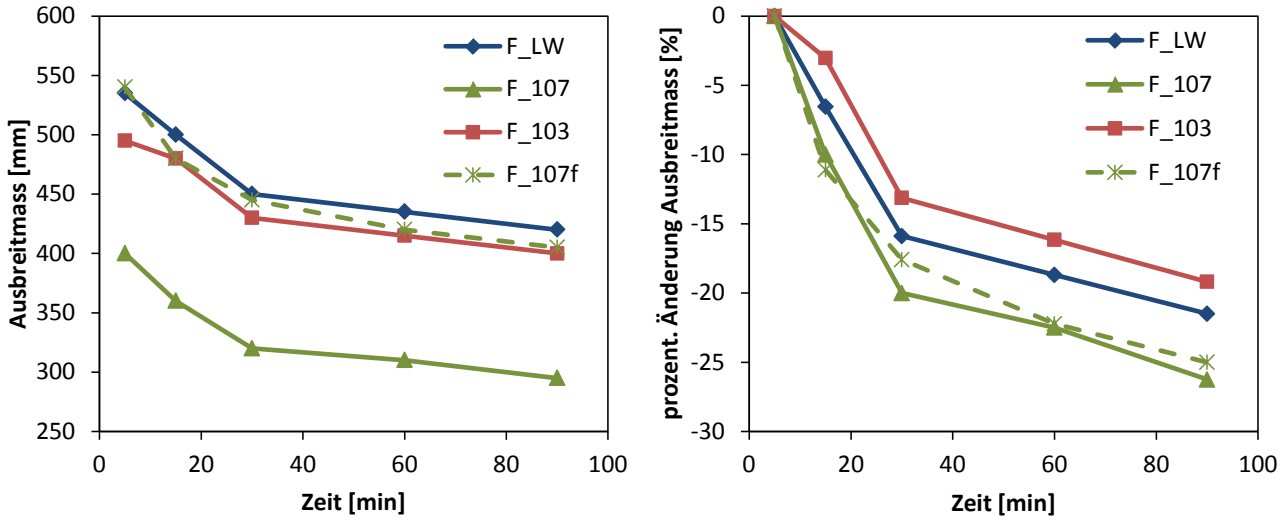

Abb. 14: Zeitlicher Verlauf des Ausbreitmasses für die **Betonsorten F**, hergestellt mit unterschiedlichem Zugabewasser (links) und prozentuale Änderung des Ausbreitmasses in Funktion der Zeit (rechts).

Die Resultate betreffend Verarbeitbarkeit mit dem **Restwasser aus den Betonwerken** sowie dem gleichzeitig hergestellten Beton mit Leitungswasser (A_LW2) sind in Abb. 15 dargestellt. Zur direkten Vergleichbarkeit sind in den Diagrammen zusätzlich die früher hergestellten Betone mit Laborrestwasser ähnlicher Dichte (A_103 und A_107) sowie Leitungswasser (A_LW) aufgetragen.

Die zweite Betonmischung mit Leitungswasser (A_LW2) weist generell ein etwas kleineres Ausbreitmass auf als die erste Betonmischung (A_LW). Das Ausbreitmass der Betone mit den Restwässern aus den Betonwerken ist vergleichbar mit demjenigen aus Leitungswasser. Es sind keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit der Restwasserdichte feststellbar. Die Betone mit Restwasser aus dem Betonwerk BW2 und mit Laborrestwasser der Dichte 1.03 (Restwässer mit ähnlicher Dichte) weisen ein vergleichbares Ausbreitmass auf. Beim Restwasser aus dem Betonwerk BW1 wurde jedoch ein deutlich höheres Ausbreitmass bestimmt als beim Laborrestwasser mit vergleichbarer Dichte (Dichte 1.07).

Der zeitliche Verlauf des Ausbreitmasses ist bei allen dargestellten Betonmischungen vergleichbar (Abb. 15, rechts).

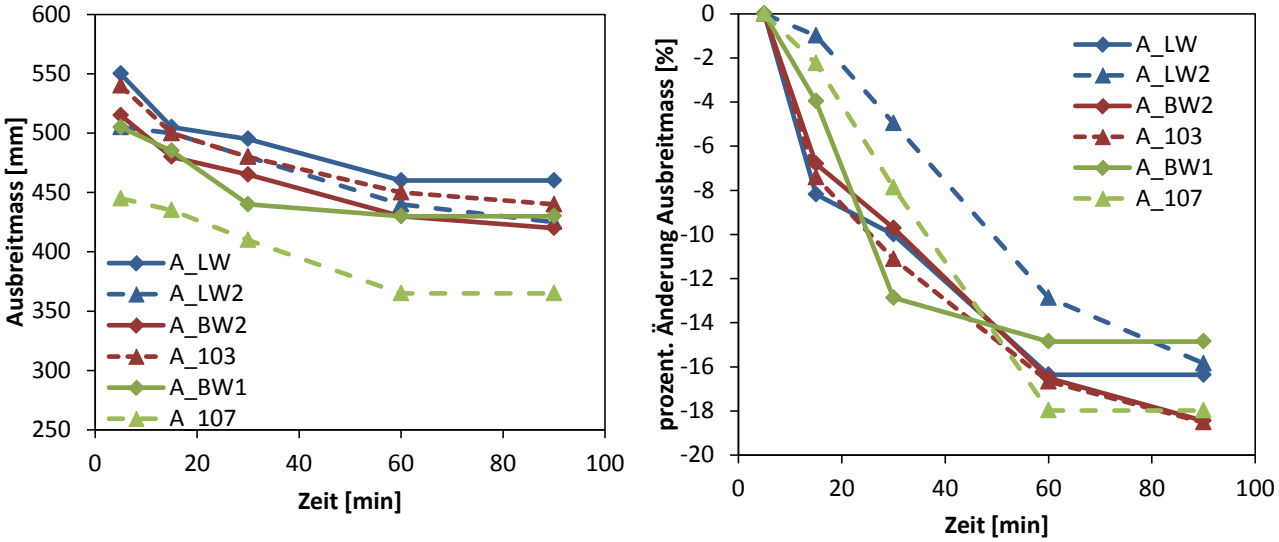

Abb. 15: Zeitlicher Verlauf des Ausbreitmasses für die Betonsorte A, hergestellt mit unterschiedlichem Restwasser aus Betonwerken, Laborrestwasser und Leitungswasser.

4.3.2 Luftporengehalt

Der Luftporengehalt im Frischbeton ist bei der Sorte A unmittelbar nach der Herstellung im Bereich von 1.0 Vol.-%, unabhängig von der Temperatur und vom verwendeten Zugabewasser.

Bei der Sorte C liegt der Luftporengehalt bei drei Betonmischungen bei knapp 2.0 Vol-% und bei drei weiteren Mischungen im Bereich von 3.0 Vol-%. Allerdings kann kein direkter Zusammenhang zwischen der Art des Zugabewassers und dem Luftporengehalt festgestellt werden. Zudem handelt es sich hierbei um einen Beton ohne künstlich eingeführte Luftporen.

Bei der Sorte F (mit luftporenbildendem Zusatzmittel) liegen alle vier gemessenen Luftporengehalte im Bereich der Prüfstreuung, weshalb im Falle der vorliegenden Betonmischungen kein eindeutiger Einfluss des verwendeten Restwassers auf den Luftporengehalt erkennbar ist.

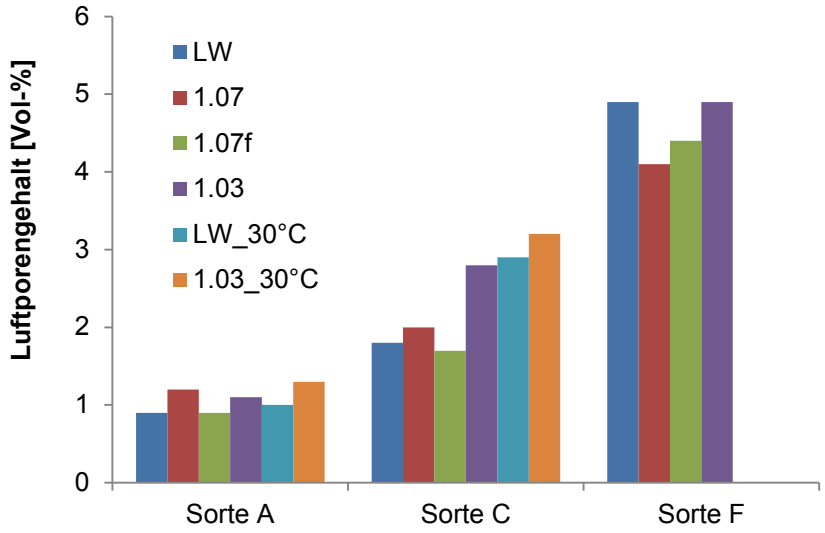

Abb. 16: Luftporengehalt im Frischbeton unmittelbar nach Betonherstellung in Abhängigkeit der Betonsorte und dem verwendeten Restwasser resp. der Temperatur.

4.3.3 Temperaturverlauf beim Abbinden

Der Temperaturverlauf beim Abbinden ist in den folgenden Abbildungen als Temperaturerhöhung im isolierten Würfel dargestellt, wobei der Nullpunkt der Frischbetontemperatur entspricht. Im Vergleich der drei Betonsorten mit Leitungswasser ist erkennbar, dass bei der Sorte A die Temperaturerhöhung tendenziell früher beginnt, die maximale Temperaturerhöhung aber ungefähr derjenigen der Sorte C entspricht (Abb. 17). Bei der Sorte F beginnt die Temperaturerhöhung am Spätesten. Allerdings weist dieser Beton die steilste Temperaturerhöhung auf und erreicht zudem die höchste maximale Temperaturerhöhung. Bei diesen drei Betonmischungen wurde die Temperaturmessung nach etwas mehr als 24 Stunden abgebrochen.

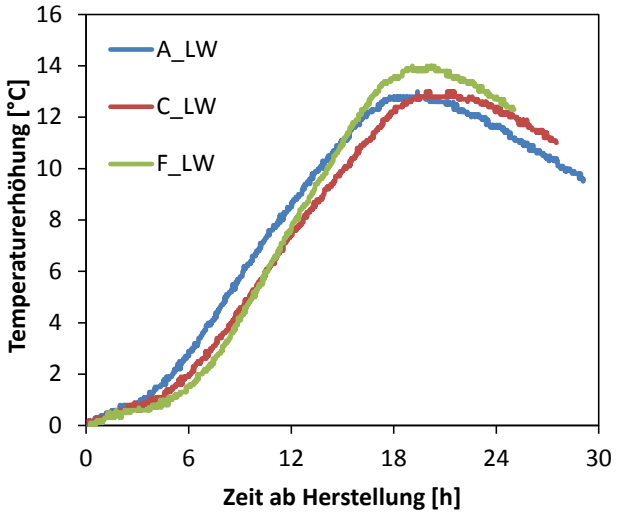

Abb. 17: Temperaturerhöhung im isolierten Würfel, ausgehend von der Frischbetontemperatur. Betonsorten A, C und F mit Leitungswasser.

Bei der **Betonsorte A** (Abb. 18, links) führen das Leitungswasser, das Restwasser mit Dichte 1.03 sowie das filtrierte Restwasser zu einem vergleichbaren Verlauf der Temperaturerhöhung, wobei die Maximaltemperatur beim filtrierten Restwasser etwas höher ausfällt. Das Restwasser der Dichte 1.07 führt zu einem früheren Temperaturanstieg und zu einer höheren Maximaltemperatur. Gleiches gilt für die Betone bei 30 °C, wobei diese beiden Effekte noch deutlich verstärkt werden. Hingegen bestehen bei 30 °C ebenfalls keine wesentlichen Unterschiede zwischen Leitungswasser und Restwasser der Dichte 1.03.

Bei der **Betonsorte C** (Abb. 18, rechts) bestehen praktisch identische Zusammenhänge zwischen Temperaturerhöhung und Zugabewasserart resp. Temperatur wie bei der Sorte A. Einzig beim filtrierten Restwasser ist bei der Sorte C eine steilere Temperaturzunahme im Vergleich mit dem Leitungswasser zu erkennen, während dies bei der Sorte A nicht der Fall ist.

Auch bei der **Betonsorte F** (Abb. 19) bestehen im wesentlichen identische Zusammenhänge zwischen Temperaturerhöhung und Zugabewasserart wie bei der Sorte A. Einzig beim Restwasser mit Dichte 1.07 scheint die Beschleunigung (früherer Temperaturanstieg) etwas ausgeprägter zu sein.

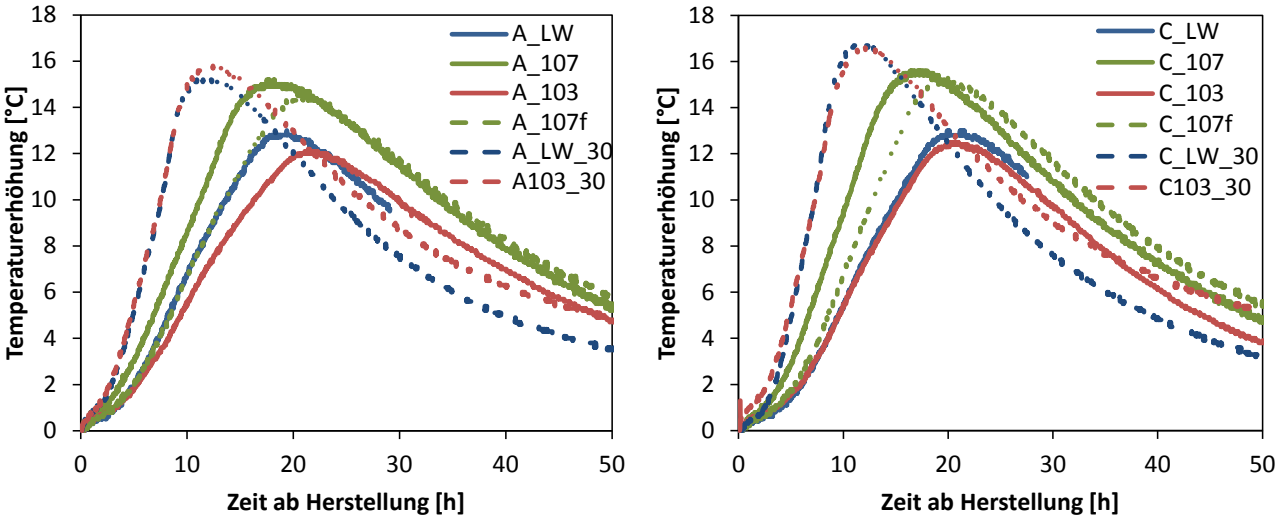

Abb. 18: Temperaturerhöhung im isolierten Würfel, ausgehend von der Frischbetontemperatur. Betonsorten A (links) und C (rechts) hergestellt mit unterschiedlichem Zugabewasser und bei unterschiedlichen Temperaturen.

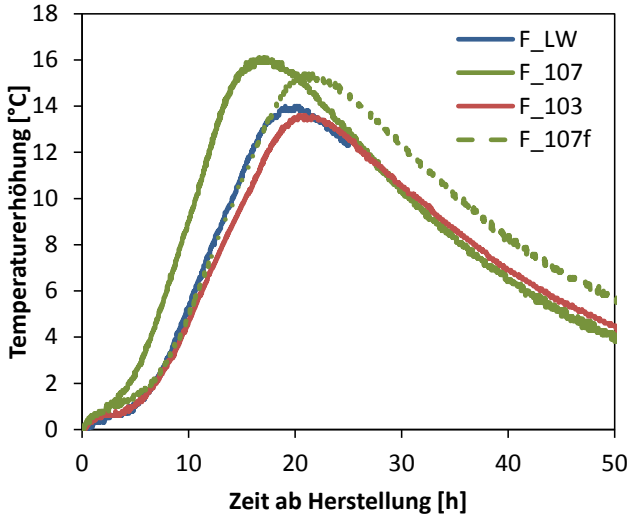

Abb. 19: Temperaturerhöhung im isolierten Würfel, ausgehend von der Frischbetontemperatur. Betonsorte F hergestellt mit unterschiedlichem Zugabewasser.

Die beiden **Betonmischungen mit Restwasser** aus den Betonwerken zeigen einen praktisch identischen Verlauf der Temperaturerhöhung (Abb. 20). Im Vergleich zur gleichzeitig mit Leitungswasser hergestellten Betonmischung hat sich bei diesen beiden Mischungen ein früherer Temperaturanstieg und eine grössere maximale Temperaturerhöhung ergeben. Auffällig ist, dass die Temperaturentwicklung dieser drei Betonmischungen generell deutlich kleiner ist als bei den früher hergestellten Betonmischungen (gilt für Laborrestwasser und Leitungswasser).

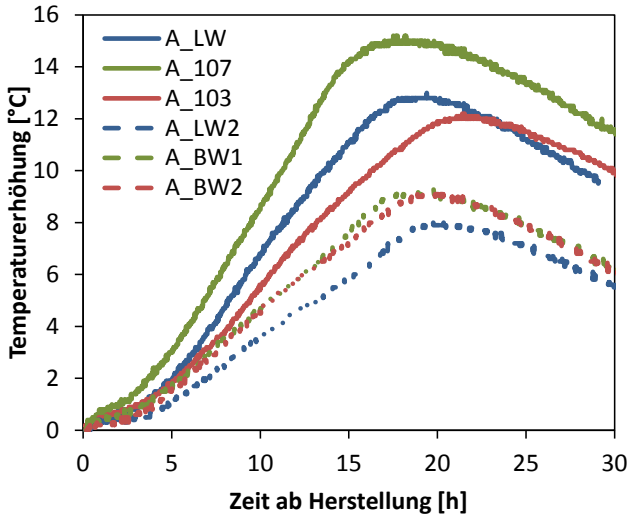

Abb. 20: Temperaturerhöhung im isolierten Würfel, ausgehend von der Frischbetontemperatur. Betonsorte A, hergestellt mit unterschiedlichem Restwasser aus Betonwerken (BW), Laborrestwasser und Leitungswasser (LW).

4.3.4 Festigkeit

Die Festigkeit der mit Leitungswasser hergestellten Betone liegt bei der Sorte A im Alter von 28 Tagen nur ca. 1 MPa über der charakteristischen Mindestfestigkeit der entsprechenden Druckfestigkeitsklasse (Abb. 21). Bei den Sorten C und F sind es 5 resp. 7 MPa, was ungefähr üblichen Werten für das Vorhaltemass in der Praxis entspricht. Die Sorte F weist nach einem Tag eine etwas höhere Festigkeit auf als die Sorte C, im Alter von 4 und 28 Tagen ist es aber genau umgekehrt.

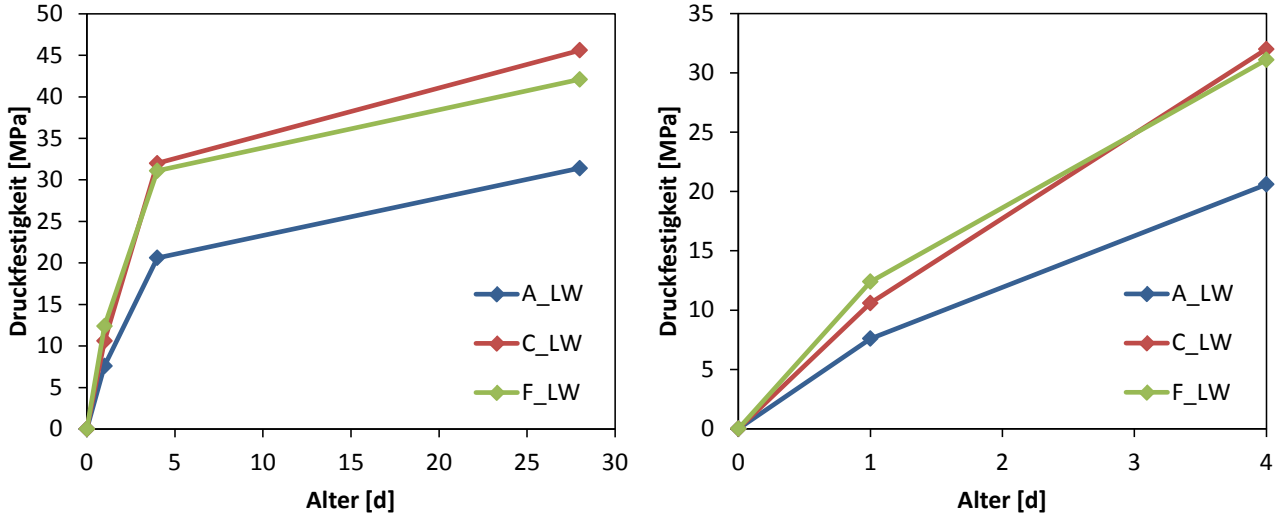

Abb. 21: Würfeldruckfestigkeit in Funktion der Zeit ab Betonherstellung für die drei Betonsorten mit Leitungswasser. Links: bis zum Alter von 28 Tagen, rechts: Detaildarstellung bis Alter 4 Tage.

Bei der **Sorte A** ist die Festigkeit nach einem Tag mit Restwasser der Dichte 1.07 etwas höher als mit Leitungswasser, während dies beim filtrierten Restwasser und Restwasser der Dichte 1.03 genau umgekehrt ist (Abb. 22, rechts). Bei 30 °C ist die 1-Tages-Festigkeit deutlich erhöht, wobei kein Unterschied zwischen Leitungswasser und Restwasser besteht.

Nach vier Tagen liegen die Festigkeiten der untersuchten Betone nahe beieinander, wobei die Differenzen zum Beton mit Leitungswasser bei maximal 10 % liegen. Einzig der Beton mit Restwasser der Dichte 1.03 weist verglichen mit dem Leitungswasser eine um 13 % geringere Festigkeit auf.

Im Alter von 28 Tagen sind die Unterschiede zum Beton mit Leitungswasser noch kleiner und betragen für alle untersuchten Betone noch maximal 9 % (Abb. 22, links).

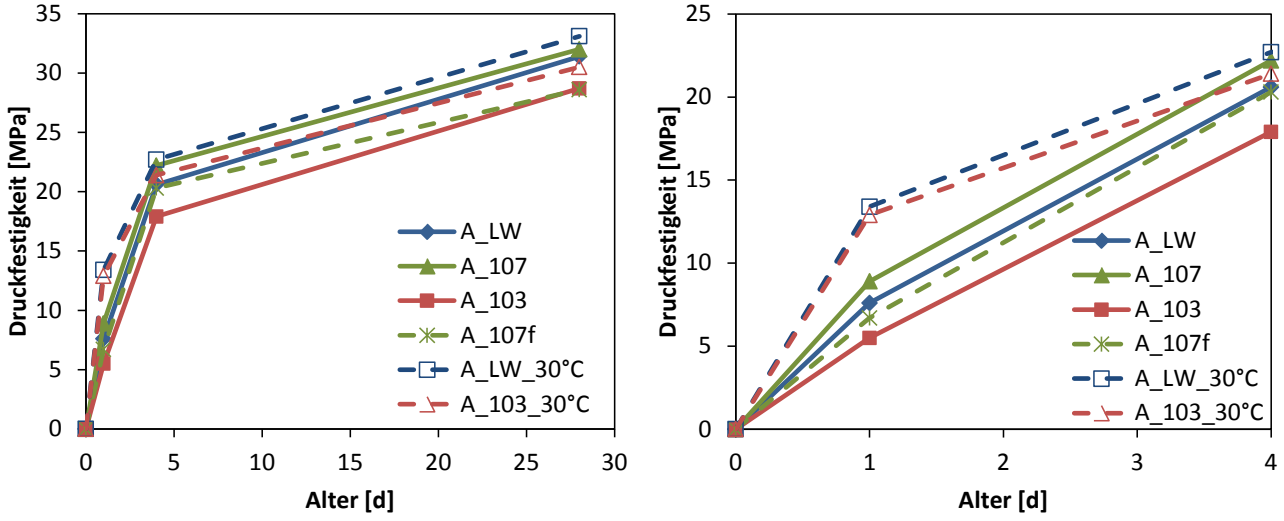

Abb. 22: Würfeldruckfestigkeit in Funktion der Zeit ab Betonherstellung für die **Betonsorte A**, hergestellt mit unterschiedlichem Anmachwasser und bei verschiedenen Temperaturen. Links: bis zum Alter von 28 Tagen, rechts: Detaildarstellung bis Alter 4 Tage.

Bei der **Sorte C** ist die Festigkeit nach einem Tag mit Restwasser der Dichte 1.07 sowie mit dem filtrierten Restwasser etwas höher als mit Leitungswasser und Restwasser der Dichte 1.03, welche beide eine vergleichbare Festigkeit aufweisen (Abb. 23, rechts). Bei 30 °C ist die 1-Tages-Festigkeit deutlich erhöht, wobei nur ein geringer Unterschied zwischen Leitungswasser und Restwasser besteht.

Nach vier Tagen liegen die Festigkeiten der untersuchten Betone nahe beieinander, wobei die Differenzen zum Beton mit Leitungswasser bei weniger als 10 % liegen.

Im Alter von 28 Tagen sind die Unterschiede zum Beton mit Leitungswasser noch kleiner und betragen für die untersuchten Betone noch maximal 6 % (Abb. 23, links). Einzig der Beton mit Restwasser der Dichte 1.03 bei 30 °C weist trotz hoher 1-Tages-Festigkeit eine um 13 % geringere Festigkeit auf als der Beton mit Leitungswasser bei 20 °C. Der Unterschied zum Beton mit Leitungswasser, welcher ebenfalls bei 30 °C hergestellt wurde ist jedoch etwas kleiner, da diese beiden Betone bei 30 °C zwischen 4 und 28 eine weniger stark ausgeprägte Festigkeitszunahme aufweisen als die Betone bei 20 °C.

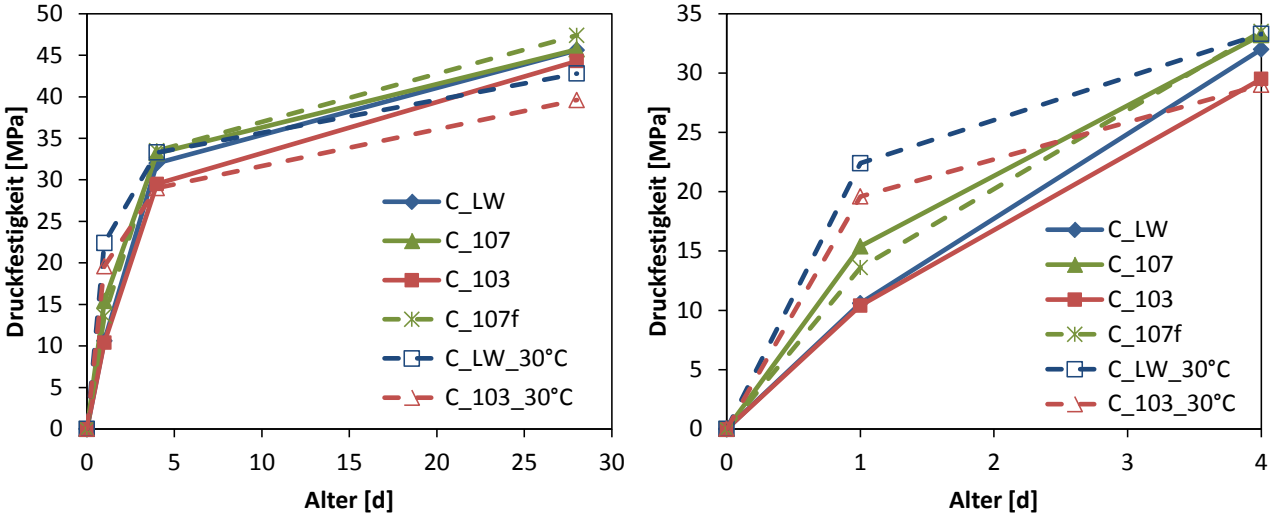

Abb. 23: Würfeldruckfestigkeit in Funktion der Zeit ab Betonherstellung für die **Betonsorte C**, hergestellt mit unterschiedlichem Anmachwasser und bei verschiedenen Temperaturen. Links: bis zum Alter von 28 Tagen, rechts: Detaildarstellung bis Alter 4 Tage.

Bei der **Sorte F** ist die Festigkeit nach einem Tag mit Restwasser der Dichte 1.07 deutlich höher als bei den übrigen Betonen, welche eine ähnliche Festigkeit aufweisen (Abb. 24, rechts). Gleiches gilt für die Festigkeit im Alter von 4 Tagen, wobei die relativen Unterschiede kleiner geworden sind.

Im Alter von 28 Tagen weisen alle untersuchten Betone eine ähnliche Festigkeit auf (Abb. 24, links). Die Unterschiede zum Referenzbeton mit Leitungswasser betragen maximal 9 %.

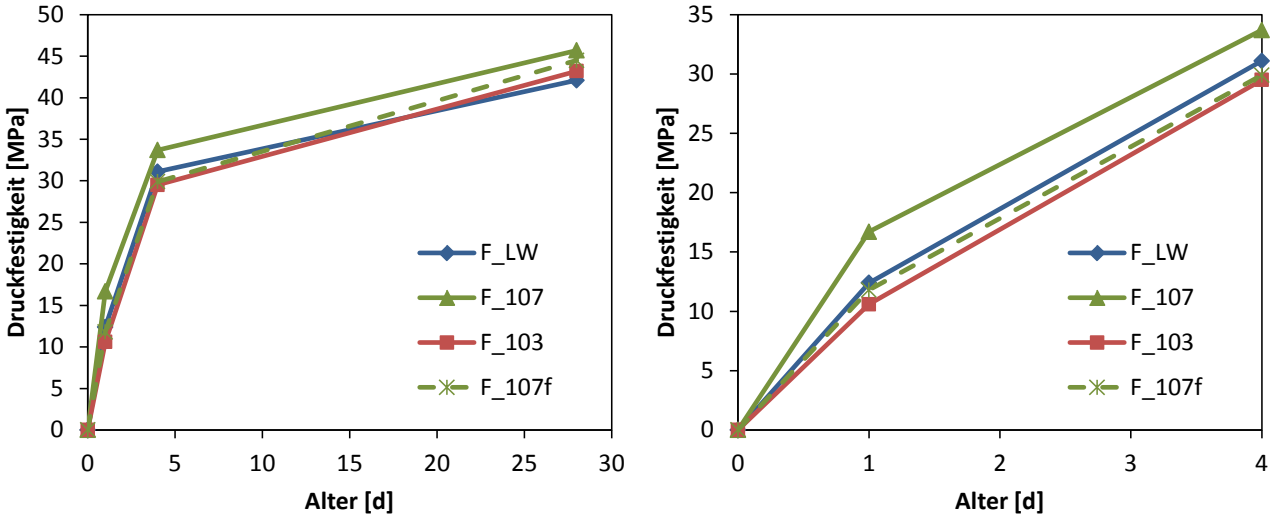

Abb. 24: Würfeldruckfestigkeit in Funktion der Zeit ab Betonherstellung für die **Betonsorte F**, hergestellt mit unterschiedlichem Anmachwasser. Links: bis zum Alter von 28 Tagen, rechts: Detaildarstellung bis Alter 4 Tage.

Die Resultate betreffend Festigkeit mit dem **Restwasser aus den Betonwerken** sowie dem gleichzeitig hergestellten Beton mit Leitungswasser (A_LW2) sind in Abb. 25 dargestellt. Zur direkten Vergleichbarkeit sind in den Diagrammen zusätzlich die früher hergestellten Betone mit Laborrestwasser ähnlicher Dichte (A_103 und A_107) sowie Leitungswasser (A_LW) aufgetragen.

Die zweite Betonmischung mit Leitungswasser (A_LW2) weist zu jedem Zeitpunkt eine deutlich tiefere Festigkeit auf als die erste Betonmischung (A_LW). Die beiden Betone A_BW1 und A_BW2, hergestellt mit den Restwässern aus den Betonwerken, weisen nach einem Tag eine ca. 25 % höhere Festigkeit auf als der gleichzeitig mit Leitungswasser hergestellte Beton (A_LW2). Mit zunehmendem Alter wird der Unterschied in der Festigkeit jedoch kleiner, so dass im Alter von 28 Tagen alle drei Betone eine identische Festigkeit aufweisen. Die beiden Betone, hergestellt aus den zwei verschiedenen Restwässern aus den Betonwerken, weisen bezüglich Festigkeit zu allen Zeitpunkten praktisch keine Unterschiede auf.

Die Betone mit Restwasser aus dem Betonwerk BW2 und mit Laborrestwasser der Dichte 1.03 (Restwässer mit ähnlicher Dichte) weisen eine vergleichbare Festigkeit zu allen überprüften Zeitpunkten auf. Beim Restwasser aus dem Betonwerk BW1 wurde jedoch zu allen Zeitpunkten eine deutlich tiefere Festigkeit bestimmt als beim Laborrestwasser mit vergleichbarer Dichte (Dichte 1.07).

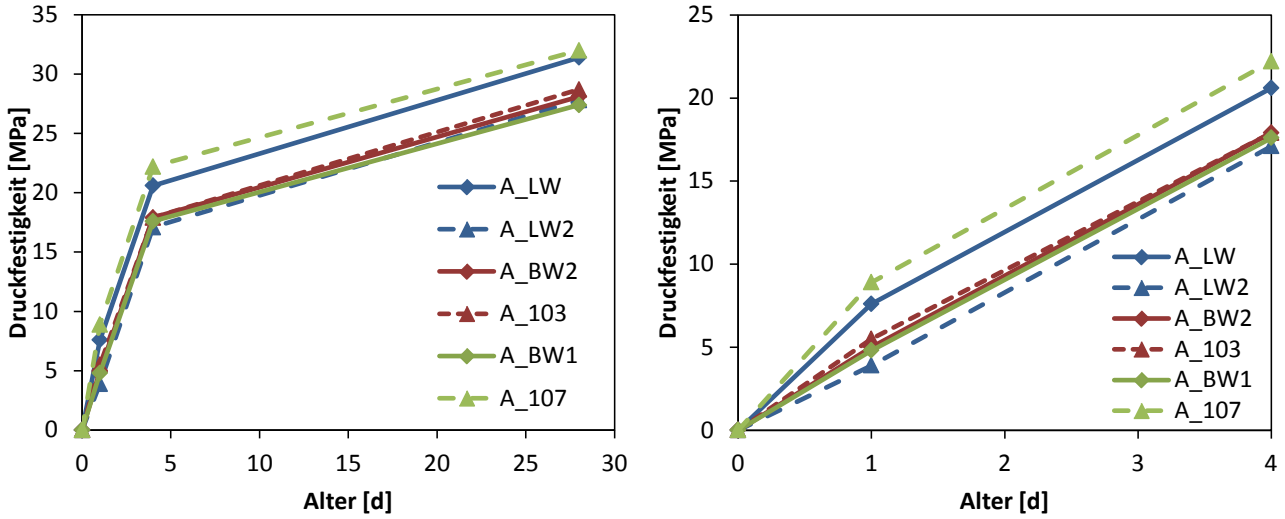

Abb. 25: Würfeldruckfestigkeit in Funktion der Zeit ab Betonherstellung für die **Betonsorte A**, hergestellt mit Restwasser aus Betonwerken (BW), Laborrestwasser und Leitungswasser (LW). Links: bis zum Alter von 28 Tagen, rechts: Detaildarstellung bis Alter 4 Tage.

4.3.5 Zusammenfassung Versuche am Beton

Die untenstehenden Feststellungen beziehen sich auf die untersuchten Betone.

Das Laborrestwasser der Dichte 1.03 sowie das filtrierte Laborrestwasser der Dichte 1.07 haben im Vergleich mit Leitungswasser bei allen drei hergestellten Betonsorten keinen wesentlichen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit (Ausbreitmass), die Temperaturerhöhung beim Abbinden und auf die Festigkeitsentwicklung.

Das Laborrestwasser der Dichte 1.07 führt verglichen mit dem Leitungswasser bei allen drei Betonsorten zu einer ausgeprägten Abnahme der Verarbeitbarkeit. Hingegen werden im isolierten Würfel ein früherer Temperaturanstieg und eine höhere Maximaltemperatur beobachtet. Dies führt zu einer generell höheren 1-Tages-Festigkeit (stärker ausgeprägt bei den Sorten C und F), während die Festigkeit nach 28 Tagen bei allen drei Betonmischungen wieder ähnlich gross ist wie beim entsprechenden Beton mit Leitungswasser.

Bei 30 °C nimmt die Verarbeitbarkeit im Vergleich zu den entsprechenden Betonen bei 20 °C ab. Während bei der Sorte A der Unterschied zwischen Leitungswasser und Restwasser der Dichte 1.03 gering ist, ist das Ausbreitmass bei der Sorte C im Falle des Restwassers jedoch deutlich kleiner. Der Temperaturanstieg im isolierten Würfel beginnt bei 30 °C deutlich früher, was auch zu einer erhöhten 1-Tages-Festigkeit führt. Im Alter von 28 Tagen sind die Unterschiede zu den bei 20 °C hergestellten Betonen bezüglich Festigkeit jedoch nur noch klein. In Bezug auf Festigkeitsentwicklung und Temperaturerhöhung im Würfel bestehen keine relevanten Unterschiede zwischen Leitungswasser und Laborrestwasser der Dichte 1.03.

Der relative Zeitliche Verlauf der Verarbeitbarkeit (Ausbreitmass) ist für alle Betonsorten unabhängig von der Art des verwendeten Anmachwassers. Einzig bei 30 °C wurde ein deutlich stärkerer Abfall der Verarbeitbarkeit mit der Zeit beobachtet, wobei aber keine Unterschiede zwischen den Betonen mit Leitungswasser oder Restwasser der Dichte 1.03 festgestellt werden konnte.

Bei den geprüften Betonen konnte kein systematischer negativer Einfluss von Laborrestwasser auf den Luftporengehalt bei Beton mit künstlich eingeführten Luftporen festgestellt werden.

Die beiden Restwässer aus den Betonwerken führen zur gleichen Verarbeitbarkeit (Absolutwerte und zeitlicher relativer Verlauf) wie der gleichzeitig mit Leitungswasser hergestellte Beton. Die Temperaturerhöhung im isolierten Würfel beginnt bei den Restwässern aus den Betonwerken etwas früher und es wird eine höhere maximale Temperaturerhöhung erreicht. Dies wiederspiegelt sich auch in einer höheren 1-Tages-Festigkeit, wobei die Festigkeit im Alter von 28 Tagen wieder vergleichbar mit dem Leitungswasser ist. Zwischen den beiden Restwässern aus den Betonwerken bestehen keine Unterschiede in Bezug auf Verarbeitbarkeit, Temperaturerhöhung im Würfel und Festigkeitsentwicklung.

Diese drei Betone (die beiden Betone mit Restwasser aus den Betonwerken und der gleichzeitig hergestellte Beton mit Leitungswasser) weisen ein ähnliches Ausbreitmass auf wie der früher hergestellte Beton mit Leitungswasser. Hingegen sind die Temperaturerhöhung im Würfel und die Festigkeit zu allen gemessenen Zeitpunkten wesentlich kleiner. Diese Unterschiede bestehen insbesondere auch zwischen den beiden Betonen mit Leitungswasser (A_LW und A_LW2), welche mit identischer Rezeptur aber zu unterschiedlichen Zeitpunkten hergestellt wurden.

5 Diskussion und Beurteilung

Die Diskussion bezieht sich auf die vorliegenden Untersuchungen mit stark begrenzter Anzahl Versuche.

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die gelösten Ionen im Restwasser keinen Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften haben, dies unabhängig von der hergestellten Betonsorte. Gleiche Resultate wurden auch in anderen Untersuchungen erzielt [3, 4]. Sowohl in der Flüssig- als auch in der Festphase kommen für die Betonherstellung kritische Elemente (z.B. Chlorid) in den analysierten Restwässern nur in geringen Konzentrationen vor, welche für die Praxis keine Relevanz haben. Dies gilt insbesondere auch für die beiden Restwässer aus den Betonwerken.

Hingegen führen die Feinanteile der Festphase ab einer gewissen Menge zu einer Abnahme der Verarbeitbarkeit und einer Zunahme der Frühfestigkeit. Auf die Spätfestigkeit im Alter von 28 Tagen haben diese Feinanteile unabhängig von der Menge und der Betonsorte keinen Einfluss. Nimmt man die in SN EN 1008, Kap. 4.4 definierte Grenze für die Festigkeit von maximal 10 % Unterschied zum Referenzbeton aus destilliertem Wasser als Kriterium, wurde diese Grenze bei allen Versuchen im Alter von 28 Tagen nie überschritten.

In den Versuchen hat sich unabhängig von der verwendeten Betonsorte bis zu einer Restwasserdichte von ca. 1.04 g/cm^3 keine Veränderung der Frisch- und Festbetoneigenschaften ergeben. Gleiche Schlussfolgerungen wurden auch durch Sandroloni [5] bei Versuchen mit Restwasser bis zu einer maximalen Dichte von ca. 1.03 g/cm^3 gezogen. Bei Restwässern mit geringfügig erhöhter Dichte dürften sich der positive Schmiereffekt durch die zusätzlichen Feinanteile und der gleichzeitig erhöhte Wasseranspruch durch die grössere Partikeloberfläche ausgleichen. Bei der Laborrestwasserdichte von 1.07 g/cm^3 waren die Abnahme der Verarbeitbarkeit und die Zunahme der Frühfestigkeit aber schon sehr deutlich erkennbar und zusätzlich setzte der Erstarrungsbeginn früher ein. Aus den Zementleimversuchen kann geschlossen werden, dass insbesondere die Abnahme der Verarbeitbarkeit mit zunehmender Restwasserdichte immer ausgeprägter wird. Würde der Festanteil im Restwasser bei der Bemessung der Zugabewassermenge nicht berücksichtigt, wäre bereits bei kleineren Restwasserdichten (≤ 1.03 g/cm^3) mit einer verstärkten Abnahme der Verarbeitbarkeit zu rechnen [6], da zusätzlich zum erhöhten Feinanteil auch der Wasseranteil (und somit der w/z-Wert) reduziert würden. Allerdings ist dieses Vorgehen nach Norm SN EN 1008 nicht vorgesehen!

Der Grund für die Abnahme der Verarbeitbarkeit bei hohen Restwasserdichten ist der grosse Wasseranspruch der zusätzlichen Feinanteile. Die Feinanteile bilden aber auch Hydratationskeime, was zu einer beschleunigten Hydratation und somit zu einer höheren Frühfestigkeit führt (Fillereffekt). Der erhöhte pH-Wert des Restwassers hat dabei keinen erkennbaren Einfluss. Der Grund dürfte darin liegen, dass der pH-Wert von Leitungswasser schon wenige Minuten nach dem Kontakt mit den Zementpartikeln ebenfalls sehr hoch ist [7].

Bei höheren Temperaturen scheint der Einfluss der Restwasserdichte etwas grösser zu werden, so dass schon bei geringerer Restwasserdichte mit einem Abfall der Verarbeitbarkeit gerechnet werden muss. Dies insbesondere bei Betonen mit einem geringeren Wassergehalt. Der Grund dürfte in der beschleunigten Reaktion bei höheren Temperaturen liegen.

Bei den geprüften Betonen konnte kein systematischer negativer Einfluss von Laborrestwasser auf den Luftporengehalt bei Beton mit künstlich eingeführten Luftporen festgestellt werden. Vergleichbare Resultate wurden auch bei entsprechenden Untersuchungen durch Rickert erzielt [3]. Da die Prüfmatrix im vorliegenden Fall bezüglich Luftporenbeton stark eingeschränkt war, ist es trotzdem fraglich, inwiefern dieses Resultat auf die Praxis angewendet werden kann. Immerhin kann gefolgert werden, dass Restwasser nicht zwangsläufig immer einen negativen Einfluss auf den Gehalt künstlich eingeführter Luftporen hat.

Die beiden im Abstand von knapp einem Jahr hergestellten Betone mit Leitungswasser weisen trotz identischer Rezeptur grössere Unterschiede in der Temperaturerhöhung im isolierten Würfel sowie in der Festigkeitsentwicklung auf. Bei der Verarbeitbarkeit sind die Unterschiede relativ klein. Der Grund dürfte darin liegen, dass für alle Versuche der gleiche Zement verwendet wurde. Bei der zweiten Betonmischung war der Zement schon ca. 1 Jahr alt. Trotz Lagerung in einem Klimaraum mit geringer Luftfeuchtigkeit (20 °C, 35 % r.F.) dürfte innerhalb dieses Jahres eine gewisse Hydratation des Zementes stattgefunden haben, welche sich weniger auf die Verarbeitbarkeit aber deutlich auf die Hydratation im jungen Alter (und somit auf die Temperatur- und Festigkeitsentwicklung) auswirkt. Ein direkter Vergleich mit den ersten Daten (Laborrestwasser) ist deshalb fragwürdig. Aus diesem Grund darf ein Vergleich der Betone mit Restwasser aus den Betonwerken nur mit dem gleichzeitig hergestellten Referenzbeton mit Leitungswasser gezogen werden.

Die beiden Restwässer aus den Betonwerken führen trotz erheblichem Unterschied in der Dichte (1.045 und 1.082 g/cm^3) zu praktisch identischen Frisch- und Festbetonwerten wie beim gleichzeitig hergestellten Beton mit Leitungswasser. Dies im Gegensatz zum Laborrestwasser der Dichte 1.07 g/cm^3, mit welchem der Beton eine ausgeprägte Abnahme der Verarbeitbarkeit im Vergleich zum Leitungswasser gezeigt hat. Für dieses unterschiedliche Verhalten kommen mehrere Faktoren in Frage:

Alter des Restwassers: Rickert und Grube haben in [3] festgestellt, dass bei der Verwendung von Laborrestwasser drei Stunden nach dessen Herstellung die Verarbeitbarkeit der damit produzierten Betone tendenziell erhöht wird. Wird das gleiche Laborrestwasser aber erst 72 Stunden nach der Herstellung verwendet, nimmt die Verarbeitbarkeit der hergestellten Betone ab. Rickert schreibt diesen Effekt der grösseren Oberfläche und somit dem grösseren Wasseranspruch durch die fortschreitende Hydratation der sich im Restwasser befindenden Zementpartikel im Falle älteren Restwassers zu. Im vorliegenden Fall wurde das Laborrestwasser im Alter von 72 Stunden verwendet. Das Restwasser aus den Betonwerken wurde zwar an einem Donnerstagmorgen sehr früh entnommen. Trotzdem dürfte dieses Restwasser insgesamt wesentlich jünger gewesen sein als das Laborrestwasser mit einer entsprechend geringeren Auswirkung auf den Frischbeton.

Homogenität der Probenhame: Trotz höherem Alter weist das Laborrestwasser einen höheren Anteil an unhydratisiertem Klinker auf als die Restwässer aus den Betonwerken. Der wahrscheinlichste Grund dafür dürfte eine gewisse Fraktionierung der Festanteile im Falle der Betonwerke sein, welche zu einem geringeren Klinkergehalt in der Restwasserprobe führt. Klinker hat die grösste Dichte und ist darum am schwierigsten homogen in Schwebe zu halten. Bei den Laborversuchen wurde festgestellt, dass selbst bei kleinen Restwasserbehältern und sehr guter Durchmischung die Art und Weise der Probenahme einen Einfluss auf die gemessene Restwasserdichte hat.

Ein weiterer Einflussfaktor könnte das Alter des verwendeten Zementes sein (vgl. vorangehender Abschnitt). Durch die leichte Vorhydratation des Zementes wird einerseits die Oberfläche der Zementpartikel grösser, was den relativen Unterschied im Wasseranspruch zwischen Leitungswasser und Restwasser mit Feinstpartikeln reduziert. Zudem dürfte der Fillereffekt ebenfalls abgeschwächt werden. Daraus kann vermutet werden, dass die Reaktionsgeschwindigkeit des verwendeten Zementes die Unterschiede auf die Betoneigenschaften zwischen Leitungswasser und Restwasser zusätzlich beeinflusst. Entsprechende spezifische Untersuchungen wurden jedoch innerhalb dieses Projektes nicht durchgeführt.

Ein zusätzlicher Effekt kann die Kornabstufung des Festanteils im Restwasser haben. Bei Unterschieden in der Kornabstufung verändert sich der Wasseranspruch und somit der Effekt auf die Verarbeitbarkeit. Die Kornabstufung des Festanteils in den verschiedenen Restwässern wurde innerhalb dieses Projektes nicht analysiert.

6 Schlussfolgerungen für die Praxis und Ausblick

Unabhängig von Alter und Betonmischung ist kein Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften zu erwarten, wenn die Menge der Feinanteile im Restwasser eine gewisse Grösse nicht überschreiten. In den durchgeführten Untersuchungen hat sich diese Grenze im Bereich einer Restwasserdichte von ca. 1.04 g/cm^3 gezeigt. Bei höheren Temperaturen im Sommer muss allerdings schon bei geringeren Dichten mit einer Einbusse der Verarbeitbarkeit gerechnet werden, dies insbesondere bei tieferem w/z-Wert. Eine laufende Kontrolle der Restwasserdichte nach Norm SN EN 1008 an möglichst homogenen Proben und entsprechende Berücksichtigung in der Betonrezeptur ist deshalb unabdingbar. In den Laborversuchen hat sich gezeigt, dass eine homogene Probenahme bei zunehmender Restwasserdichte selbst aus kleinen Behältern immer schwieriger wird. Dabei spielen nicht nur das möglichst homogene Aufmischen des Restwassers eine Rolle sondern auch die Art und Weise, wie die Probe aus dem Restwasserbehälter entnommen wird. In der Praxis ist deshalb spezielles Augenmerk darauf zu legen, wo und wie die Proben entnommen werden, um auch bei hoher Restwasserdichte eine repräsentatives Resultat zu erhalten. Wie sich in den Untersuchungen gezeigt hat, wirkt sich nämlich gerade bei höheren Restwasserdichten eine Fehlmessung in der Dichtebestimmung stärker auf die Betoneigenschaften auf als bei geringerer Restwasserdichte. Falls zusätzlich eine gewisse Fraktionierung der Feststoffe im Restwasserbehälter stattfinden kann, dürften in der laufenden Tagesproduktion zusätzlich Schwankungen in der Verarbeitbarkeit auftreten. Da in diesem Fall die entnommene Restwasserprobe nicht immer repräsentativ für das in den Mischer gelangende Restwasser ist, stimmt die Korrektur für die Zugabewassermenge plötzlich nicht mehr.

Eine hohe Restwasserdichte führt allerdings nicht in jedem Fall zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit. Wird das anfallende Restwasser sofort wieder verbraucht (junges Restwasser), ist der zu erwartende negative Einfluss auf die Verarbeitbarkeit kleiner und es kann mit höheren Restwasserdichten Beton produziert werden. Bei älterem Restwasser (z.B. Verwendung am Montagmorgen nach Lagerung im Restwasserbecken über das Wochenende) ist der Einfluss auf die Verarbeitbarkeit grösser und die Einhaltung einer maximalen Restwasserdichte von 1.04 g/cm^3 ist in jedem Fall zu empfehlen.

Eine allfällige Verschlechterung der Verarbeitbarkeit aufgrund einer hohen Restwasserdichte darf nicht über eine erhöhte Zugabewassermenge kompensiert werden. Es ist zwar kein negativer Einfluss auf die Frühfestigkeit zu erwarten, da diese aufgrund des Filler-Effektes der Feinanteile des Restwassers entsprechend erhöht wird. Die 28-Tage-Festigkeit würde jedoch reduziert werden, da diese auch bei hohen Restwasserdichten praktisch identisch bleibt, wie bei Betonen mit Leitungswasser. In solchen Fällen ist der Gehalt an Zusatzmitteln zu erhöhen oder das Restwasser ist mit Leitungswasser zu mischen („Verdünnung").

Eine im Betonwerk eingestellte Verarbeitbarkeit ändert sich bis zur Verwendung auf der Baustelle nicht anders als bei Betonen, welche mit Leitungswasser hergestellt werden. Es ist somit nicht mit einer rascheren Abnahme der Verarbeitbarkeit zu rechnen. Dies gilt auch bei erhöhten Temperaturen.

Die Frage, ob weitere Wirkstoffe von Zusatzmitteln (Fliessmittel, Beschleuniger, etc.), welche sich im Restwasser befinden, einen Einfluss auf die Betoneigenschaften haben, wurde nicht näher untersucht. Rickert und Gruber [3] haben hingegen gezeigt, dass Wirkstoffe von Fliessmittel und Beschleuniger im Restwasser bereits nach 3 Stunden praktisch nicht mehr nachweisbar waren und somit vollständig an die suspendierten Partikel gebunden waren. Ein Einfluss solcher Wirkstoffe auf die Betoneigenschaften ist deshalb sehr unwahrscheinlich.

Im Rahmen des Projektes sind verschiedene Fragen aufgetaucht, welche nicht abschliessend untersucht und beurteilt werden konnten:

- Repräsentativität der Probenahme im Betonwerk abklären um Fraktionierungsprozesse auszuschliessen (gilt insbesondere auch für die laufende Eigenüberwachung der Betonwerke)
- Einfluss des Restwasseralters auf die Frischbetoneigenschaften mit Laborrestwasser verifizieren
- Einfluss der Partikelgrössenverteilung im Restwasser auf die Frischbetoneigenschaften
- Einfluss Zementgehalt im Restwasser auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften
- Auswirkungen von Restwasser auf die Dauerhaftigkeit / das Schwindverhalten

7 Literatur

[1] J. Rickert, H. Grube: Analyse von Restwasserinhaltsstoffen. VDZ, Düsseldorf, 2000.

[2] SN EN 1008: Zugabewasser für Beton - Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschliesslich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton. 2002.

[3] J. Rickert, H. Grube: Einfluss von Restwasser aus dem Frischbetonrecycling auf die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton. VDZ, Düsseldorf, 2003.

[4] J.A. Férriz-Papi: Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants. Materiales de construccion, 64 (313), 2014, 1-9.

[5] Franco Sandrolini, Elisa Franzoni: Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. Cement and Concrete Research, 31 (2001) 485-489.

[6] B. Chatveera, P. Lertwattanaruk, N. Makul: Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete. Cement & Concrete Composites, 28 (2006) 441-450.

[7] B. Lothenbach, F. Winnefeld: Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement. Cement and Concrete Research, 36 (2006) 209-226.

8 Anhang

Zusammenfassung der Versuchsresultate. LW = Leitungswasser, RW = Restwasser

Beton-mischung	Verwendetes Zugabewasser	Menge Zu-gabewasser	Gesteins-körnung	Herstell-datum	Ausbreitmass [mm]					LP-Gehalt [Vol-%]		Frischbeton-temperatur [°C]		Frischbeton-rohdichte	Druckfestigkeit [MPa]			
-	-	[kg/m^3]	[kg/m^3]	-	5 min	15 min	30 min	60 min	90 min	5 min	90 min	5 min	90 min	[kg/m^3]	0d	1d	4d	28d
A_LW	LW	182.0	1‘886	07.11.2013	550	505	495	460	460	0.9	-	20.5	20.3	2398	0	7.6	20.6	31.4
C_LW	LW	149.2	1‘952	07.11.2013	475	440	425	385	380	1.8	-	20	19.6	2408	0	10.6	32	45.6
F_LW	LW	142.1	1‘884	07.11.2013	535	500	450	435	420	4.9	4	20.4	20.1	2331	0	12.4	31.1	42.1
A_107	RW Dichte 1.07	211.6	1‘848	21.11.2013	445	435	410	365	365	1.2	-	19.8	19.4	2373	0	8.9	22.2	32
C_107	RW Dichte 1.07	173.6	1‘922	21.11.2013	335	320	295	-	-	2	-	19.8	19.5	2411	0	15.4	33.2	45.7
F_107	RW Dichte 1.07	165.4	1‘855	21.11.2013	400	360	320	310	295	4.1	2.7	19.8	19.2	2360	0	16.7	33.7	45.7
A_103	RW Dichte 1.03	193.8	1‘871	27.02.2014	540	500	480	450	440	1.1	-	19.5	19.8	2387	0	5.5	17.9	28.7
C_103	RW Dichte 1.03	158.1	1‘940	27.02.2014	500	445	410	390	380	2.8	-	20	20	2379	0	10.4	29.5	44.3
F_103	RW Dichte 1.03	151.6	1‘872	27.02.2014	495	480	430	415	400	4.9	3.8	20.3	19.9	2320	0	10.6	29.5	43.2
A_107f	RW 1.07, filtriert	182.0	1‘886	28.11.2013	560	520	495	485	455	0.9	-	18.6	18.5	2388	0	6.7	20.3	28.6
C_107f	RW 1.07, filtriert	149.4	1‘952	28.11.2013	410	395	395	360	345	1.7	-	18.8	18.7	2431	0	13.6	33.5	47.4
F_107f	RW 1.07, filtriert	142.3	1‘884	05.12.2013	540	480	445	420	405	4.4	3.7	19	18.5	2361	0	11.8	29.9	44.5
A100_30	LW, 30°C	182.0	1‘886	20.03.2014	500	480	410	385	350	1	-	32.6	30	2378	0	13.4	22.7	33.1
C100_30	LW, 30°C	149.4	1‘952	20.03.2014	455	380	340	315	-	2.9	-	32.5	30.4	2383	0	22.4	33.3	42.8
A103_30	RW 1.03, 30°C	192.4	1‘873	20.03.2014	480	455	445	395	355	1.3	-	31.4	28.6	2372	0	12.9	21.4	30.5
C103_30	RW 1.03, 30°C	157.9	1‘942	20.03.2014	395	335	300	-	-	3.2	-	31.3	30.2	2367	0	19.6	29	39.6
A_LW2	LW	182.0	1‘886	14.08.2014	505	500	480	440	425	0.9	-	23.7	23.7	2387	0	3.9	17.1	27.8
A_BW1	RW Betonwerk 1	212.9	1‘847	14.08.2014	505	485	440	430	430	1.1	-	22.9	23.1	2377	0	4.8	17.6	27.4
A_BW2	RW Betonwerk 2	198.3	1‘866	14.08.2014	515	480	465	430	420	1.1	-	23.2	23.2	2375	0	5.0	17.9	28.1

Bemerkung: Menge Zugabewasser in kg/m^3 inkl. Feststoffe im Restwasser.