

Frühschwinden von Beton

EMPA, Abteilung Beton / Bauchemie

Dr. Pietro Lura
Dr. Andreas Leemann

cemsuisse-Projekt 200901 - Dezember 2010
Diese Forschungsarbeit wurde durch cemsuisse, Verband
der Schweizerischen Cementindustrie mitfinanziert

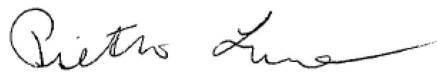
Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1. Einleitung	6
2. Materialien	9
2.1 Beton.....	9
2.2 Zement und Zusatzstoffe	9
2.3 Gesteinskörnung.....	9
2.4 Zusatzmittel	9
2.5 Frischbetontemperatur.....	9
2.6 Nachbehandlung.....	9
3. Methoden	10
3.1 Betonherstellung.....	10
3.2 Frischbetoneigenschaften und Bluten	10
3.3 Frühschwindrisse.....	10
3.4 Verdunstungsrate, Setzen und Porendruck.....	12
4. Resultate und Diskussion.....	14
4.1 Einfluss von w/z-Wert und Zementleimvolumen	15
4.2 Einfluss Fließmitteldosierung bei w/z-Wert 0.40	16
4.3 Einfluss der Zementfeinheit	17
4.4 Einfluss der Zementart.....	19
4.5 Einfluss Zementleimvolumen bei gleichem w/z-Wert	20
4.6 Einfluss w/z-Wert bei gleichem Zementleimvolumen	22
4.7 Einfluss der Transportzeit.....	23
4.8 Einfluss der Feinheit der Zusatzstoffen	24
4.9 Einfluss von Zusatzmitteln und tiefen Temperaturen	26
4.10 Einfluss der Nachbehandlung.....	27
4.11 Recyclingbeton	28
4.12 SCC	30
4.13 Abhängigkeit des Rissrisikos von w/z-Wert und Zementleimvolumen	31
5. Schlussfolgerungen	33
6. Umsetzung in die Praxis	35
7. Ausblick.....	36
8. Referenzen	37

Anhang A: chemische Zusammensetzung der Zemente und Zusatzstoffe.....38
Anhang B: Literaturrecherche über Fröhschwinden (bis 12.2009)39

Für das cemsuisse-Projekt 200901 „Fröhschwinden“

Dübendorf, Abteilung Beton / Bauchemie, 23. Dezember 2010



Dr. Pietro Lura



Dr. Andreas Leemann

Vorwort der Begleitgruppe

Kerstin Wassmann, Holcim (Schweiz) AG

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

Zusammenfassung

Betonschäden durch Fröhschwindrisse sind ein regelmässig auftretendes Phänomen, das vor allem bei grossflächigen Decken und Platten auftritt. Es ist bekannt, dass die Risse in den ersten Stunden nach dem Einbau durch das Verdunsten des Wassers von der Oberfläche des Frischbetons verursacht werden. Aus diesem Grund wird auch die entsprechende Nachbehandlung der Betonoberfläche empfohlen. Trotzdem treten immer wieder Fröhschwindrisse in den ersten Stunden nach dem Einbau auf. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass es nicht bekannt ist, bei welchen Betonen das Rissrisiko besonders hoch ist und wann mit besonderer Vorsicht gearbeitet werden muss. Das Ziel des vorliegenden Projektes war deshalb eine Identifikation

- der massgebenden Mechanismen für die Rissbildung
- der Betonrezepturen mit hohem Rissrisiko, und
- der Zementarten mit einem hohen Rissrisiko.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde in einem Raum mit regulierter Temperatur und Feuchte ein Versuchsstand mit einem Windkanal aufgebaut. Beim Frischbeton wurden sogleich nach der Herstellung der Prüfkörper, der Massenverlust durch Verdunstung, das Setzen und der kapillare Unterdruck online gemessen. Zusätzlich wurde auch das Bluten der Betone bestimmt. Die entstehenden Risse respektive ihre Länge und Breite wurden mit Bildanalyse erfasst.

Solange der Frischbeton plastisch ist, verursacht das Verdunsten von Wasser nur ein Setzen der Betonoberfläche. Sobald der Frischbeton nicht mehr verarbeitbar ist, entsteht ein kapillarer Unterdruck. Ist dieser kapillare Unterdruck gross genug, reisst der Prüfkörper.

Das Rissrisiko infolge Fröhschwindens ist dann hoch, wenn das Wasser von der Betonoberfläche schnell verdunsten kann. Entsprechend ist bei hohen Temperaturen, tiefer relativer Feuchte und hohen Windgeschwindigkeiten besondere Vorsicht geboten.

Das Rissrisiko zeigt eine Abhängigkeit vom w/z-Wert. Betone mit einem w/z-Wert über 0.55 bluten in der Regel relativ stark, wodurch an der Betonoberfläche während der ersten Stunden ein Wasserfilm besteht, der die Entstehung von kapillaren Spannungen verhindert und damit das Rissrisiko senkt. Betone mit einem w/z-Wert unter 0.45 hingegen bluten relativ wenig, so dass kapillare Spannungen schnell entstehen können. Weil aber die Packung der Feinpartikel dichter ist als bei einem höheren w/z-Wert, bestehen viele Partikel zu Partikel Kontakte, wodurch die entstehende Kapillarspannung und damit das Rissrisiko relativ klein sind. Dies bedeutet, dass das Rissrisiko für Betone mit einem w/z-Wert 0.45-0.55 am höchsten ist. Da die Kapillarspannungen bei kleinen Partikeln grösser sind als bei grossen, nimmt das Rissrisiko mit zunehmender Feinheit der Zemente zu. Da aber der Grossteil der in der Schweiz produzierten Zemente in einem ähnlichen Bereich liegt, sind die Unterschiede zwischen Zementen ähnlicher Feinheit aber unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung relativ klein. Einzig den CEM I 32.5 gilt es als Zementart mit geringem Rissrisiko zu erwähnen. Beim Einsatz feinkörniger Zusatzstoffe, wie Mikrosilika oder feinkörniger Flugasche, steigt das Rissrisiko markant an. Bei einer saugenden Gesteinskörnung wie Leichtbeton und Recyclingbeton kann die Menge des Blutwassers reduziert werden, wodurch das Rissrisiko erhöht wird.

Beim Einbau des Betons gilt es zwei massgebende Faktoren zu berücksichtigen. Weil das Bluten des Frischbetons ab Betonherstellung abnimmt und damit das Rissrisiko zunimmt, sind möglichst kurze Transportzeiten anzustreben. Die Nachbehandlung von Beton mit hohem Rissrisiko ist zwingend unmittelbar nach dem Einbau zu beginnen. Dies kann durch Abdecken des Betons mit einer Folie oder unter einer sachgemässen Verwendung eines Curing-Mittels erfolgen.

Um in der Zukunft die Abhängigkeit des Betonherstellers von der Qualität des Einbaus respektive der Nachbehandlung zu reduzieren, empfiehlt sich eine Abklärung der Tauglichkeit von Zusatzmitteln und -stoffen für das sogenannte „Internal Curing“.

1. Einleitung

Beim Schwinden von Beton können aufgrund der zeitlichen Entwicklung des Prozesses und den ablaufenden Mechanismen verschiedene Typen unterschieden werden:

- Trocknungsschwinden:
 - kapillarer Wasserverlust durch Verdunstung im plastischen Zustand (Frühschwinden)
 - kapillarer Wasserverlust durch Verdunstung im erhärteten Zustand (Trockenschwinden)
- Autogenes Schwinden (geschlossenes System):
 - chemisches Schwinden durch Auflösen der Klinkerphasen und dem gleichzeitigen Binden von Wasser in Hydratphasen
 - innere Selbst austrocknung
- Karbonatisierungsschwinden

Das Schwinden von Beton kann zu Rissen mit entsprechenden Schäden führen. Der Einfluss des Trockenschwindens wurde im cemsuisse-Projekt "Trockenschwinden von Beton" [Leemann & Hoffmann 2009] untersucht. In der Praxis können jedoch Risse am Bauwerk nicht nur auftreten, wenn der Beton erhärtet ist, sondern auch schon, wenn er noch nicht abgebunden hat (= dormante Phase oder "grüner" Beton). Risse die in dieser frühen Phase auftreten, werden allgemein als Frühschwindrisse bezeichnet. Das Thema Frühschwinden von Beton ist für Jahrzehnte studiert worden. Die Resultate einer Literaturrecherche sind im Anhang B zu finden.

Durch Frühschwinden können innerhalb weniger Stunden nach Einbau des Betons Risse in Bauteilen entstehen. Diese Risse treten noch während der dormanten Periode vor allem bei Decken auf, da von deren Oberfläche Wasser verdunsten kann (Abbildung 1). Die Mindestbewehrung ist in diesem Fall nicht fähig, die Rissbreite zu begrenzen, weil keine gute Haftung zwischen der Bewehrung und dem Beton besteht.



Abbildung 1: Decke (Untersicht, links, und Aufsicht, rechts) mit durchgehenden Frühschwindrissen.

Das Auftreten dieser Frühschwindrisse ist in erster Linie von der Umwelteinflüsse (Temperatur, Wind, Feuchtigkeit), der Nachbehandlung und der Betonrezeptur abhängig. Bei der Betonrezeptur spielen die Verarbeitbarkeit und die Dauer der dormanten Periode eine entscheidende Rolle.

Aus früheren Studien über Verdunstungsraten, Absetzen, plastisches Schwinden von Mörtel sowie Expertisen bei Neubauten mit Frühschwindrissen können wir eine Hypothese über die Entstehung der Frühschwindrisse ableiten. Das auf dieser Hypothese basierende Untersuchungsprogramm hat zum Ziel die massgebenden Faktoren inklusive den Einfluss der Beton- und Zementart zu identifizieren und Lösungsvorschläge hinsichtlich Betonrezepturen zu erarbeiten, mit denen das Risiko für die Entstehung der Frühschwindrisse verringert werden kann.

Solange der Beton verarbeitbar ist, werden Schwindspannungen durch plastische Deformation abgebaut. Wenn der Beton eine gewisse Steifigkeit erreicht, sich aber noch in der dormanten Periode befindet, können diese Spannungen nicht mehr oder nur viel langsamer abgebaut werden.

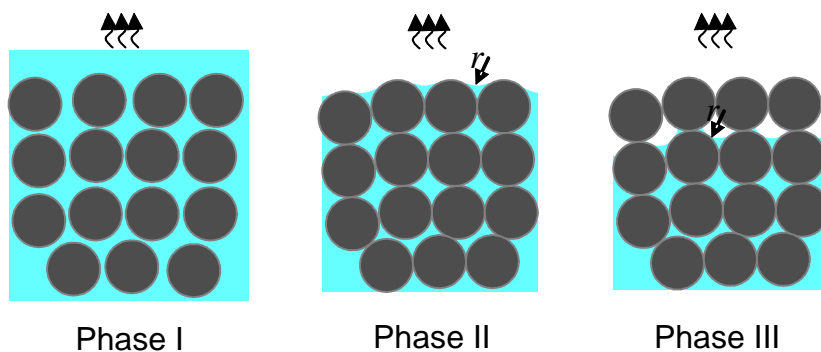


Abbildung 2: Verschiedene Phasen beim Trocknen einer Suspension [Lura et al. 2007].

In einem gesättigten porösen Partikelsystem werden beim Trocknen drei verschiedene Phasen beobachtet (Abbildung 2):

- die Anfangsphase, bei der die Verdunstung von einer Schicht Blutwasser an der Oberfläche stattfindet (Phase I);
- die zweite Phase („constant rate period“), bei der der Wasserspiegel die obersten Partikel erreicht und sich Menisken bilden (Phase II)
- die dritte Phase („the falling rate period“), bei der die Menisken ins Innere des Partikelsystems fallen (Phase III).

Die Verdunstungsrate wird progressiv kleiner von Phase I zu Phase II zu Phase III. Der Übergang zwischen Phase II and III wird „kritischer Punkt“ genannt. In Gelen und auch in zementösen Materialien, findet die Rissbildung etwa beim kritischen Punkt statt, weil die Kapillarspannungen im Porenwasser bei diesem Zeitpunkt höchst sind.

Der Mörtel und Beton verformen sich in der ersten Stunde nach der Herstellung plastisch. Am Beispiel eines Mörtels wird dies im Folgenden gezeigt: der Massenverlust durch Verdunstung von Wasser und die vertikale Längenänderung, die durch das Absetzen der Mörteloberfläche verursacht wird, verlaufen im plastischen Zustand linear (Abbildung 3, links). Das Absetzen des Mörtels endet nach 1.5 h abrupt und zur selben Zeit zeigt die Mörtelprobe die ersten Risse durch Fröhschwinden noch lange vor dem Einsetzen der Beschleunigungsperiode (Beginn nach 4h). Die Erklärung für dieses Verhalten ist, dass die kapillaren Kräfte ein progressives Absetzen des Mörtels verursachen bis dieser zu steif wird, sich plastisch zu deformieren. Zu diesem Zeitpunkt (dem kritischen Punkt, siehe oben) fallen die Menisken unter die Oberflächenporen des Mörtels und haben lokale Spannungen zur Folge, die Risse verursachen können (Abbildung 3, rechts).

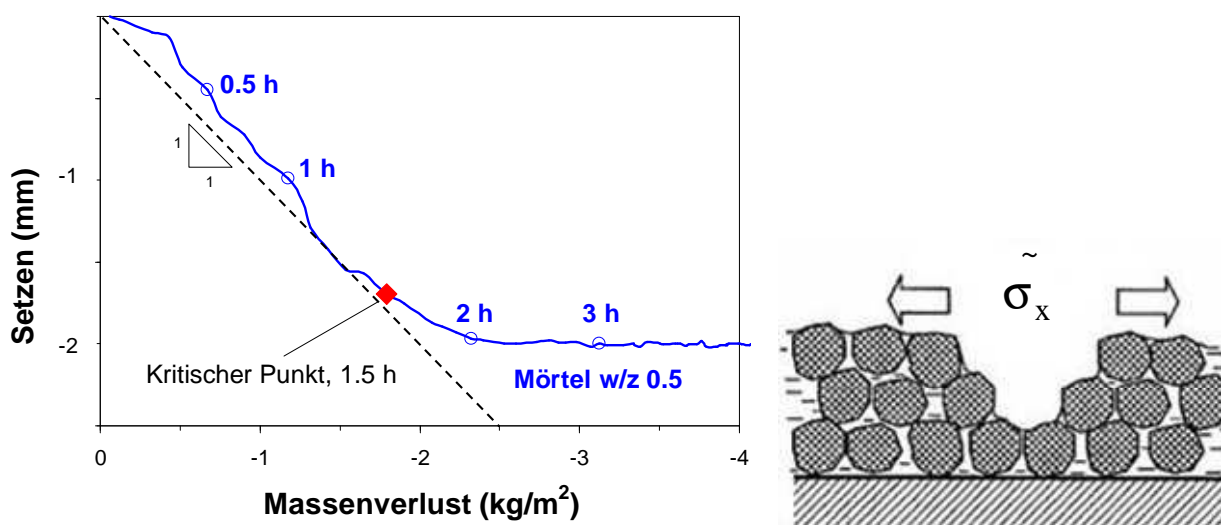
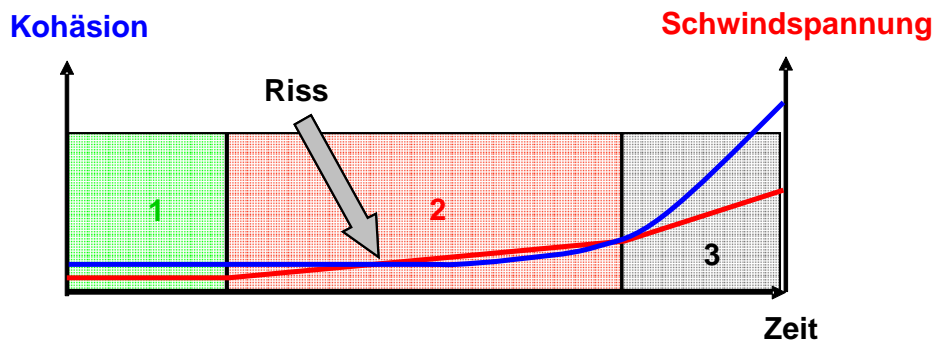


Abbildung 3: Links: Absetzen von Mörtel durch Verdunstung als Funktion des Massenverlustes. [Lura et al. 2007]. Rechts: Schematische Darstellung der Entstehung von Rissen durch Fröhschwinden [Hansen 2009].

Überschreitet die Schwindspannung beim kritischen Punkt die Kohäsion des "grünen" Betons, entstehen Fröhschwindrisse (Abbildung 4). Das Rissrisiko ist also abhängig von der Menge Wasser, die in der

dormanten Periode, in der der Beton keine plastischen Eigenschaften mehr aufweist, verdunstet. Je mehr Wasser in dieser Periode verdunsten kann, umso grösser sind die entstehenden Schwindspannungen. Mit anderen Worten: wenn der kritische Punkt kurz vor oder beim Abbinden auftritt, treten keine Risse durch Fröhschwinden auf.



Phase 1 = Offenzeit des Betons

Phase 2 = dormante Periode

Phase 3 = beschleunigte Periode

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Entstehung eines Fröhschwindrisses.

Diese Hypothese muss überprüft werden. Daraus leiten sich die Ziele des vorliegenden Projektes ab. Es müssen

- die massgebenden Mechanismen für die Rissbildung
- die Betonrezepturen mit hohem Rissrisiko, und
- die Zementarten mit einem hohen Rissrisiko

identifiziert werden. Im Detail werden die folgenden Punkte untersucht:

- Zusammenspiel und relative Länge der Phasen 1-3 (s. Abbildung 4)
- Einfluss des Zementtyps
- Einfluss von Zusatzstoffen
- Feinheit des Bindemittels resp. dessen Einfluss auf die Entwicklung kapillarer Spannungen
- Einfluss von Wassergehalt resp. w/z-Wert und Einfluss des Blutens
- Einfluss der Verarbeitbarkeit
- Einfluss von Fließmitteln, die die Länge der Phasen 1-3 sowie die Oberflächenspannung der Porenlösung beeinflussen

Zusätzlich werden die Auswirkungen verschiedener Zusatzmittel (z. Bsp. Luftporenmittel, Schwindreduzierer) spezieller Betone (SCC, Recyclingbeton) mit weiteren 10 Betonen abgeklärt.

Es werden dieselben Zemente wie im Projekt "Trockenschwinden von Beton" eingesetzt. Zusätzlich werden auch Betone mit Zusatzstoffen hergestellt, um die Feinheit des Bindemittels gezielt variieren zu können.

In den Experimenten werden die folgenden Parameter bestimmt:

- Setzen
- Wasserverlust durch Verdunstung
- Kapillardruck im Porenwasser
- Bildung der Fröhschwindrisse nach ASTM C1579-06
- Bluten nach EN 480-4

2. Materialien

2.1 Beton

Die Zusammensetzung der Betone M1-M25 und die Frischbetoneigenschaften (siehe 3.2) werden bei den Resultaten gezeigt. Die w/z-Werte wurden zwischen 0.40 und 0.60 variiert, wobei die meisten Betone einen w/z-Wert von 0.50 aufweisen. Die Frischbetontemperatur war für alle Betone 20 ± 1.5 °C, mit Ausnahme von M22 (5°C). Alle Betone wurden bei 30 °C geprüft. Der Beton M1 wurde zusätzlich auch bei 20°C geprüft. Die Betone M10, M11, M12 und M18 wurden einmal repetiert, um die Streuung der Resultate zu überprüfen.

2.2 Zement und Zusatzstoffe

Es wurden die folgenden Zementarten/Bindemittel eingesetzt:

- CEM I 42.5 N (M1-5, M8, M9)
- CEM III/B 42.5 N HS (M7)
- CEM I 32.5 N (M10, M18)
- CEM I 52.5 R (M11)
- CEM II/A-LL 42.5 N (M12, M20, M21, M22-M25)
- CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R (M13, M26)
- CEM I 32.5 + 25 Vol.% Flugasche (M17)
- CEM I 32.5 + 10 Vol.% Mikrosilika (Elkem Silica Fume 968) (M19)

Die chemische Zusammensetzung der Zemente und der Zusatzmittel kann der Tab. A1 im Anhang A entnommen werden.

2.3 Gesteinskörnung

In allen Betonen wurde Alluvialsand und -kies (0-1 mm: 31 Masse-%, 1-4 mm: 19 Masse-%, 4-8 mm: 20 Masse-%, 8-16 mm: 30 Masse-%) verwendet. Im Recyclingbeton (M24) wurde Mischabbruchgranulat mit einem Anteil von 50 Volumen-% verwendet.

2.4 Zusatzmittel

Es wurden die folgenden Zusatzmittel verwendet:

- Fließmittel: Viscocrete 3082 (Sika), in verschiedenen Dosierungen
- Luftporenbildner: Fro-V10, 0.3% Masse-% Zement in Beton M20
- Schwindreduzierer: Sika Control 40 (Sika), 2 Masse-% Zement in Beton M21

2.5 Frischbetontemperatur

Die Komponenten wurden bei 5°C vorgelagert, Betonherstellung bei 20°C. Die Temperatur in den Prüfkörpern wurde mittels Sonde aufgezeichnet (M22). So wird der Einfluss eines Verzögerers indirekt abgeschätzt.

2.6 Nachbehandlung

Der Einfluss der Nachbehandlung und des Einbaupunktes nach der Betonherstellung wurden folgendermassen untersucht:

Nachbehandlung 1: Verwendung eines Curing-Mittels, Mastercure 216 (BASF). 5 min nach Installation der Prüfkörper in Windkanal appliziert, Oberfläche „mattfeucht“ (M23).

Nachbehandlung 2: Abdecken der Prüfkörper im Windkanal mit Plastikfolie (M24).

Einfluss der Transportzeit: Prüfkörper (CEM I 32.5) werden erst 60 min nach Betonherstellung hergestellt (M18).

3. Methoden

3.1 Betonherstellung

Es wurden pro Mischung 60 Liter Beton produziert. Gesteinskörnung und Zement wurden für 30 s vorgemischt. Danach wurden etwa 85% des Wassers zugegeben. Der Rest des Wassers wurde zusammen mit den Zusatzmitteln zugegeben. Danach wurde für 60 s gemischt (Abbildung 5).



Abbildung 5: Für die Betonherstellung verwendeter Eirich-Mischer (maximales Fassungsvermögen: 80 Liter).

3.2 Frischbetoneigenschaften und Bluten

Das Ausbreitmass wurde sofort nach der Betonherstellung nach EN 12350-5 gemessen. Die Frischbetontemperatur war 20 ± 1.5 °C. Die Rohdichte wurde nach EN 12350-6 bestimmt und der Luftgehalt nach EN 12350-7. Zusätzlich wurde das Bluten nach EN 480-4 für 5 h bei 30 ± 1 °C (Prüftemperatur) gemessen. Das geblutete Wasser wird jeweils als relativer Anteil des Gesamtwassergehalts der Betonmischung dargestellt.

3.3 Frühschwindrisse

Die Frühschwindrisse wurden nach ASTM C1579-06 [ASTM C 1579] an zwei Proben pro Beton bestimmt. Zwei Schalungen ($355 \times 560 \times 100$ mm³) mit Stahleinlagen zur Initiierung der Frühschwindrisse (Abbildung 6) wurden mit Beton gefüllt und auf einem Vibriertisch verdichtet. Die Prüfkörper wurden in einer Klimakammer mit einer Temperatur von 30 ± 1 °C und einer relativen Feuchte (r.F.) von 45 ± 5 % in einem Windkanal platziert (Windgeschwindigkeit 7 ± 0.5 m/s) (Abbildung 7). Bei einem Beton (M6) wurde bei einer Temperatur von 20 ± 1 °C gemessen. Temperatur, r.F. und Windgeschwindigkeit wurden an der Betonoberfläche mit gekoppelten Temperatur/r.F.-Sensoren und mit einem Anemometer überwacht. Diese Messungen zeigen, dass die verschiedenen Parameter, die für die Verdunstungsrate des Frischbetons massgeblich sind, während eines Versuchs konstant bleiben und damit zu vergleichbaren Resultaten führen. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel von Temperatur- und relative Feuchtigkeitsmessungen während eines typischen Versuchs (links) und eine gemessene Verteilung der Windgeschwindigkeit über die Betonoberfläche (rechts). Der Risszeitpunkt wurde durch eine visuelle Überprüfung alle 30 min festgehalten.

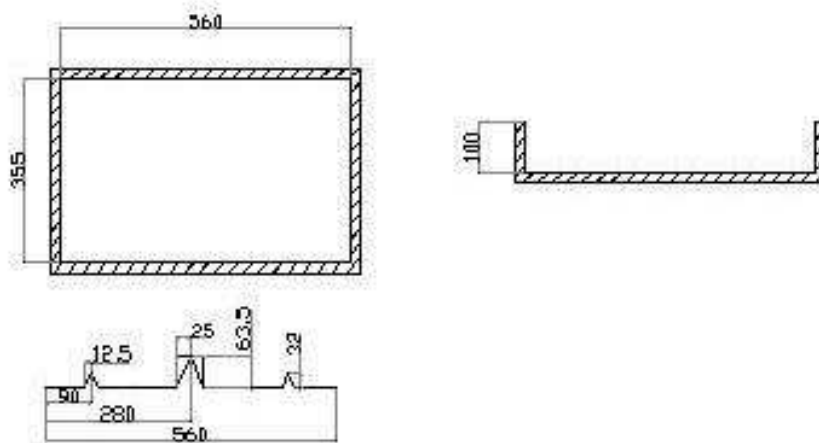


Abbildung 6: Schalungen für die Prüfkörper zur Untersuchung des Rissrisikos beim Fröhschwinden nach ASTM C1579-06 [Lura et al. 2007].

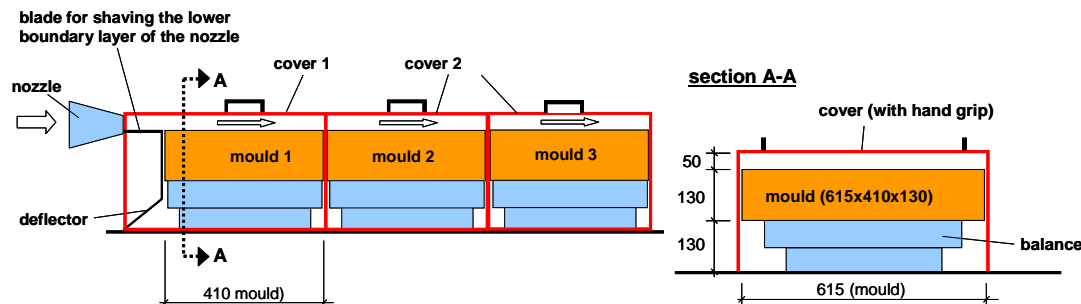


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Rissrisikos beim Fröhschwinden [Lura et al. 2011].

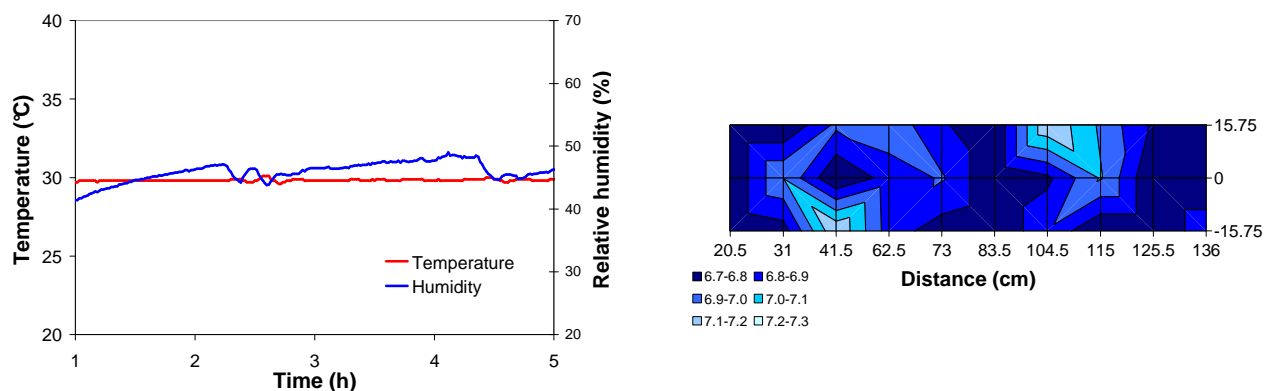


Abbildung 8. Temperatur- und relative Feuchtigkeitsmessungen im Windkanal während eines typischen Versuchs (links) und gemessener Verlauf der Windgeschwindigkeit über die Betonoberfläche (rechts).

Die Verteilung der Rissbreiten wurde anhand von Bildanalyse der Betonoberfläche am Ende des Versuchs rund 6 h nach der Betonherstellung bestimmt. Farbbilder der Risse wurden mit einer Konica Minolta 7D (Auflösung 3000x2000 Pixel) aufgenommen. Für typische Oberflächensegmente von ungefähr 360 Millimeter-Breite, wurden 15 bis 20 überlappende Bilder aufgenommen. Einerseits ist eine Überlappung notwendig, um einen genügenden allgemeinen Bereich für die automatische Positionierung mittels der Maximierung der Kreuzkorrelationsfunktion zu erzielen. Andererseits konnte so der Einfluss von optischen Fehlern (Verzeichnung) der verwendeten Makro-Optik minimiert werden. Das resultierende zusammengesetzte Bild enthielt ungefähr 20'000x2000 Pixel mit einer Auflösung von ~0.02 mm.

Wegen des stark unterschiedlichen Aussehens der Oberflächenstruktur von verschiedenen Betonen, kann eine robuste automatische Identifizierung der Risse nicht durch einfaches Thresholding der Graustufenbilder durchgeführt werden [Qi et al. 2003]. Stattdessen können die Farbeninformationen der Bilder, die einen trimodalen Eigenschaftsraum geben, betrachtet werden. Mean shift clustering [Comaniciu et al. 2002] ist eine leistungsfähige Technik für automatisierte Segmentierung von multimodalen Daten. Der Cluster mit der niedrigsten Helligkeit wird dann als Riss klassifiziert. Da der Riss entlang der Abszisse orientiert ist, wird die Rissbreiteverteilung aus der Rissbreite in der Richtung senkrecht zur Stahleinlage berechnet.

Zusätzlich wurden auch manuelle Messungen der Rissbreiten durchgeführt (13 Messungen per Prüfkörper, jede 2 cm).

3.4 Verdunstungsrate, Setzen und Porendruck

Verdunstungsrate, Setzen und Porendruck wurden an denselben Prüfkörpern bestimmt wie die Frühschwindrisse.

Eine der beiden Schalungen wurde auf eine Waage mit automatischer Datenaufzeichnung gestellt. Die Verdunstungsrate wurde mit einer Division des Massenverlustes durch die Oberfläche des Prüfkörpers berechnet. Das Setzen wurde mit kontaktlosen Lasern [Kayir & Weiss 2002, Lura et al. 2007] in Zeitabständen von 30 s bestimmt (Abbildung 9). Messbeginn war etwa 15 min nach Betonherstellung. Die kontaktlosen Laser strahlen mit einer kleinen Abweichung von der Vertikalen nach unten. Die vertikale Distanz von der Laserquelle zur Betonoberfläche wird durch die Länge der horizontalen Versetzung des reflektierten Strahls berechnet. Auf einem Prüfkörper befanden sich zwei Messstellen, auf einem Prüfkörper eine weitere Messstelle. Die Messstellen befanden sich mehrere Zentimeter vom Rand und den Rippen der Stahleinlagen entfernt, damit diese die Messung nicht beeinflussen konnten. In den Abbildungen wird jeweils der Durchschnittswert der mit den drei Lasern ermittelten Werte gezeigt.

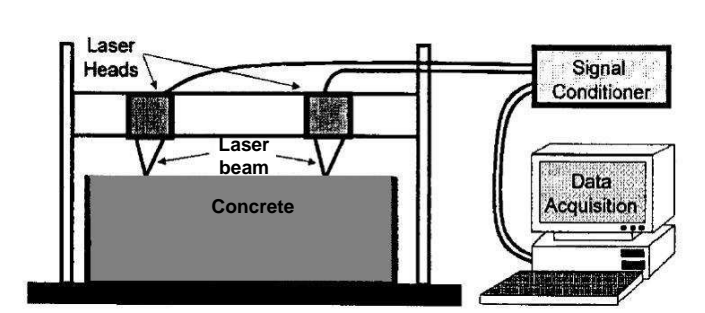


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Messeinrichtung zur Bestimmung des Setzens mit den kontaktlosen Lasern.

Die Messungen des Porendruckes wurden mit Tensiometern durchgeführt [Radocea 1994, Slowik et al. 2008]. Sie bestehen aus einem Drucksensor, der über einen Gummischlauch mit einem Metallröhrchen verbunden ist (Abbildung 10, links). Sensor und Metallröhrchen wurden behutsam mit entgastem Wasser gefüllt, um das Entstehen von Luftblasen zu verhindern. Die Metallröhrchen wurden über Bohrungen in der Schalung in den Beton eingeführt (Abbildung 10, rechts). Nach ihrer Installation übermittelte das Wasser im Metallröhrchen den Porendruck zum Drucksensor. Weil das Porenwasser wegen den Menisken an der Oberfläche unter Zug steht (siehe die Einleitung), messen die Drucksensoren negative Werte, das heisst einen Unterdruck.

Bei einem der beiden Prüfkörper wurden jeweils fünf dieser Sensoren angebracht. Solange das Wasser zwischen Sensor und Porensystem des Betons ein Kontinuum bildet, kann der Sensor den Kapillardruck messen. Bildet das Wasser im Porensystem des Betons bedingt durch den Wasserverlust (Verdunstung und Binden in Hydratphasen) kein Kontinuum mehr oder entsteht sich am Eingang des Röhrchens eine Luftblase, kann der Kapillardruck nicht mehr gemessen werden. Dieses Phänomen tritt innert Sekunden ein. Je nach Beton weist der mit den fünf Sensoren gemessene Unterdruck relativ grosse Streuungen auf. Auch der Zeitpunkt, bei dem keine Kapillarspannung mehr gemessen wird, tritt bei den fünf Sensoren oft nicht zeitgleich ein.

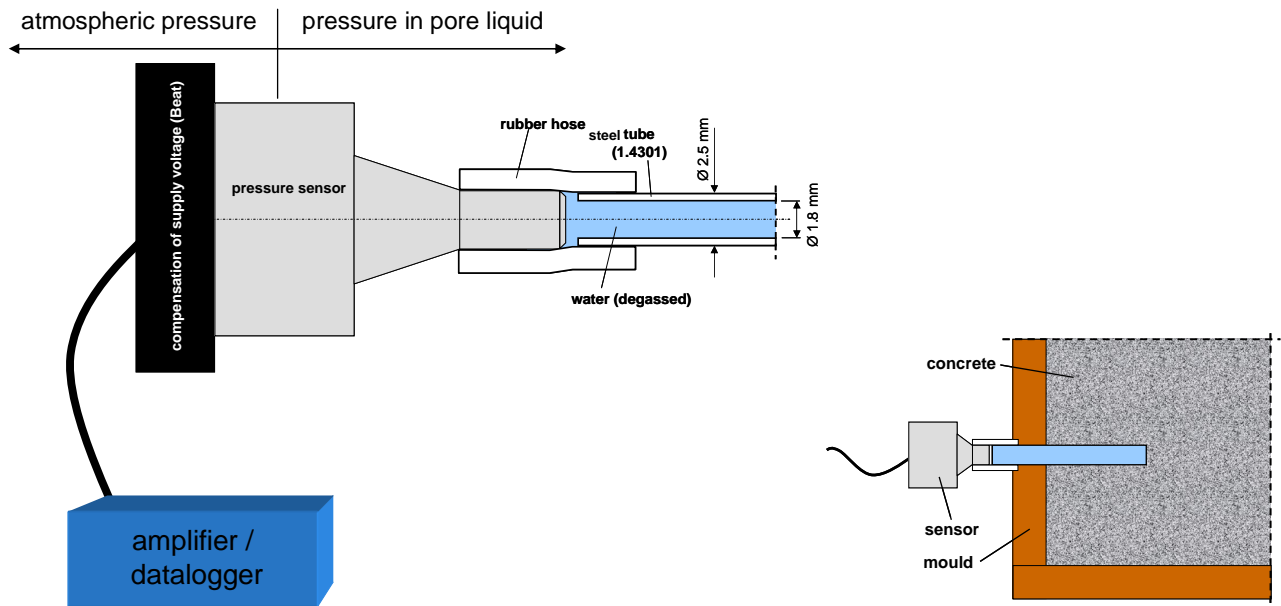


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Messeinrichtung zur Bestimmung des Porendrucks mit den Tensiometern.

4. Resultate und Diskussion

Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wird im Folgenden jeweils zuerst eine Tabelle mit den Betonzusammensetzungen, den Variablen in der Betonrezeptur und der Anzahl der gebildeten Frühschwindrisse gezeigt. Anschliessend geben die Abbildungen Aufschluss über den zeitlichen Verlauf der Messgrössen Bluten, Masseverlust, Setzen und Kapillardruck.

Zementleimvolumen ist in diesem Bericht als Volumen des Zementes, der Zusatzstoffe, des Wassers und der Zusatzmittel definiert. Das Volumen der Luft und des Mehlkorns der Gesteinkörnung wird nicht zum Zementleimvolumen gezählt.

4.1 Einfluss von w/z-Wert und Zementleimvolumen

Die Betone M1-M6 (siehe Tabelle 1), mit CEM I 42.5 N hergestellt, zeigen den Einfluss von unterschiedlichen w/z-Werten und Zementleimvolumina. Der Beton mit w/z-Wert 0.50 wurde sowohl bei der Standardtemperatur von 30°C (M1) wie auch bei 20°C (M6) gemessen. Diese fünf Betone entsprechen den im Projekt „Trockenschwinden“ eingesetzten Betonen. Wegen der Reduktion des Grösstkorns von 32 auf 16 mm wurde entsprechend die Zementmenge von 320 auf 352 kg/m³ erhöht. In Tabelle 1 wird gezeigt, welche Betone Fröhschwindrisse entwickelt haben. Neben der Rissaufnahme, der Veränderung der Masse, dem Setzen und dem Druck im Porensystem wurde auch das Bluten bestimmt (Abbildung 11). Bei den Betonen M1 und M5 wurde das Bluten neben der Standardtemperatur auch bei einer Temperatur von 20°C gemessen.

M1 und M2 haben ein hohes Zementleimvolumen und tiefe w/z-Werte, das heisst geringes Bluten; dies führt zu Fröhschwindrissen (Abbildung 12). Der Beton mit w/z-Wert 0.50 zeigt weniger Bluten und höhere Verdunstungsraten bei 30 °C (M1) als bei 20 °C (M6). Als Konsequenz bilden sich bei 30 °C grössere Risse (Abbildung 12). M3 und M5 haben hohes Bluten, das heisst kleine Spannungen und keine Risse. M4 blutet wenig, zeigt aber wenig Setzen und kleine Spannungen (Zementleimvolumen 91% von M1) und keine Risse. Offenbar ist nicht nur auf dem Niveau der Gesteinskörnung ein korngestütztes Gefüge vorhanden, sondern auch auf dem Niveau der Feinpartikel. Entsprechend sind die Kapillarspannungen und das Setzen klein, weshalb keine Risse auftreten. Zudem können die Menisken wegen der geringen Menge an Blutungswasser relativ schnell unter die Betonoberfläche fallen, wodurch die Spannungen an der Oberfläche wahrscheinlich klein sind. Dies führt für M4 auch zu einer reduzierten Verdunstungsrate nach ein paar Stunden (siehe Abb. 11, oben rechts).

Tabelle 1: Übersicht der Betone M1-M6 (CEM I 42.5 N und unterschiedliche w/z-Werte). Der Beton M1 wurde zusätzlich auch bei 20°C gemessen (M6).

Beton	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1855	1825	1900	1930	1765	1855
CEM I 42.5 N [kg/m ³]	352	396	302	352	352	352
Wassergehalt [kg/m ³]	176	176	176	141	211	176
Fliessmitteldosierung [%]	0.2	0.4	0.1	2.4	-	0.2
Zementleimvolumen [l/m³]	289	302	274	262	324	289
w/z-Wert	0.50	0.44	0.57	0.40	0.60	0.50
Ausbreitmass (cm)	40	47	38	40	59	40
Luftporengehalt [Vol-%]	3.9	3.8	3.6	3.4	1.1	3.9
Bluten nach 6 h [%]	2.00	1.25	3.58	0.15	6.26	3.15
Fröhschwindrisse	Ja, 2/2	Ja, 1/2	Nein, 0/2	Nein, 0/2	Nein, 0/2	Ja, 2/2

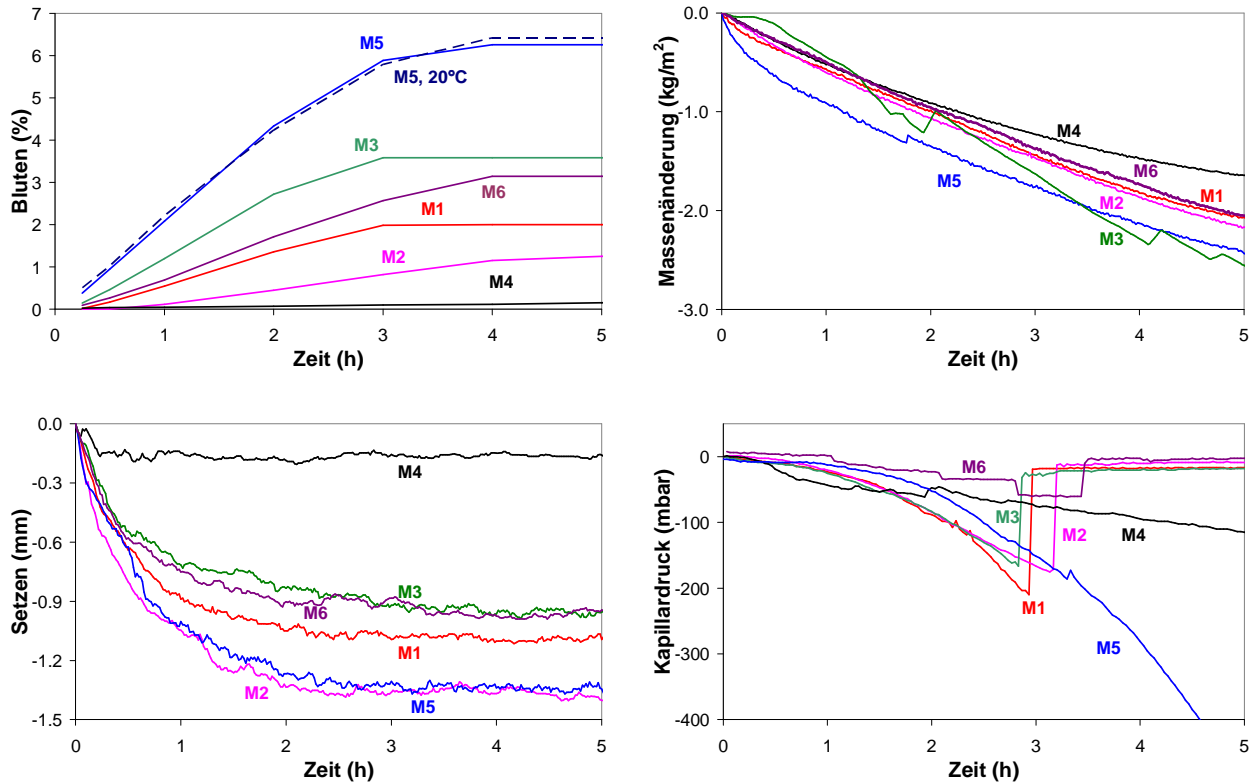


Abbildung 11: Einfluss von w/z-Wert und Zementleimvolumen (M1-M6) auf Bluten (oben links, 1 Messung), Verdunstungsrate (oben rechts, 1 Messung), Setzen (unten links, Mittelwert von 3 Messungen) und Kapillardruck (unten rechts, 3 Messungen pro Beton, einzelne Messungen werden gezeigt).

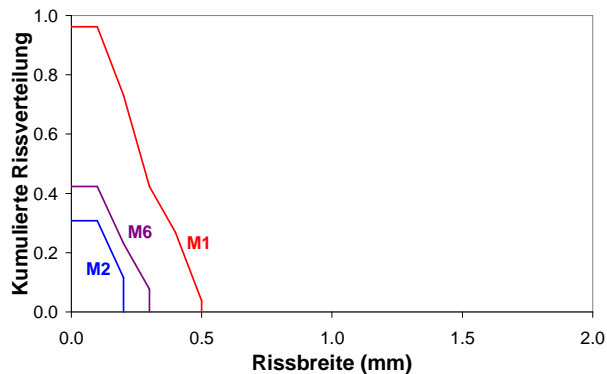


Abbildung 12: Kumulierte Rissverteilung der Betone M1, M2 und M6 (Mittelwert von 2 Messungen).

4.2 Einfluss Fließmitteldosierung bei w/z-Wert 0.40

Der Beton M4 zeigt wenig Setzen und Spannungen und keine Frühschwindrisse. Ist das der Einfluss des tiefen w/z-Wertes oder des hohen FM-Gehalts (2.4%)? Um dies abzuklären, wurden zwei Betone (M8 und M9) mit einem w/z-Wert von 0.40, einem Zementgehalt von 400 kg/m³ und sehr unterschiedlichen FM-Dosierungen (1.2 und 0.3%) hergestellt. Die Resultate (Tabelle 2 und Abbildung 13) zeigen, dass alle drei Betone mit w/z-Wert 0.40 wenig Bluten, keine Kapillarspannungen und keine Risse aufweisen. Eine mögliche Erklärung ist, dass in diesen Betonen ein korngestütztes Gefüge auf dem Niveau der Feinpartikel vorhanden ist (siehe 4.1).

Tabelle 2. Übersicht der Betone M8 und M9, Einfluss FM-Dosierung bei w/z-Wert 0.40, und Vergleich mit M4.

Beton	M4	M8	M9
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1931	1850	1859
CEM I 42.5 N [kg/m ³]	352	400	400
Wassergehalt [kg/m ³]	141	160	160
Fließmitteldosierung [%]	2.4	1.2	0.3
Zementleimvolumen [l/m ³]	262	292	289
w/z-Wert	0.40	0.40	0.40
Ausbreitmass (cm)	40	46	39
Luftporengehalt [Vol-%]	3.4	3.9	3.5
Bluten nach 6 h [%]	0.15	0.38	0.34
Frühschwindrisse	Nein, 0/2	Nein, 0/2	Nein, 0/2

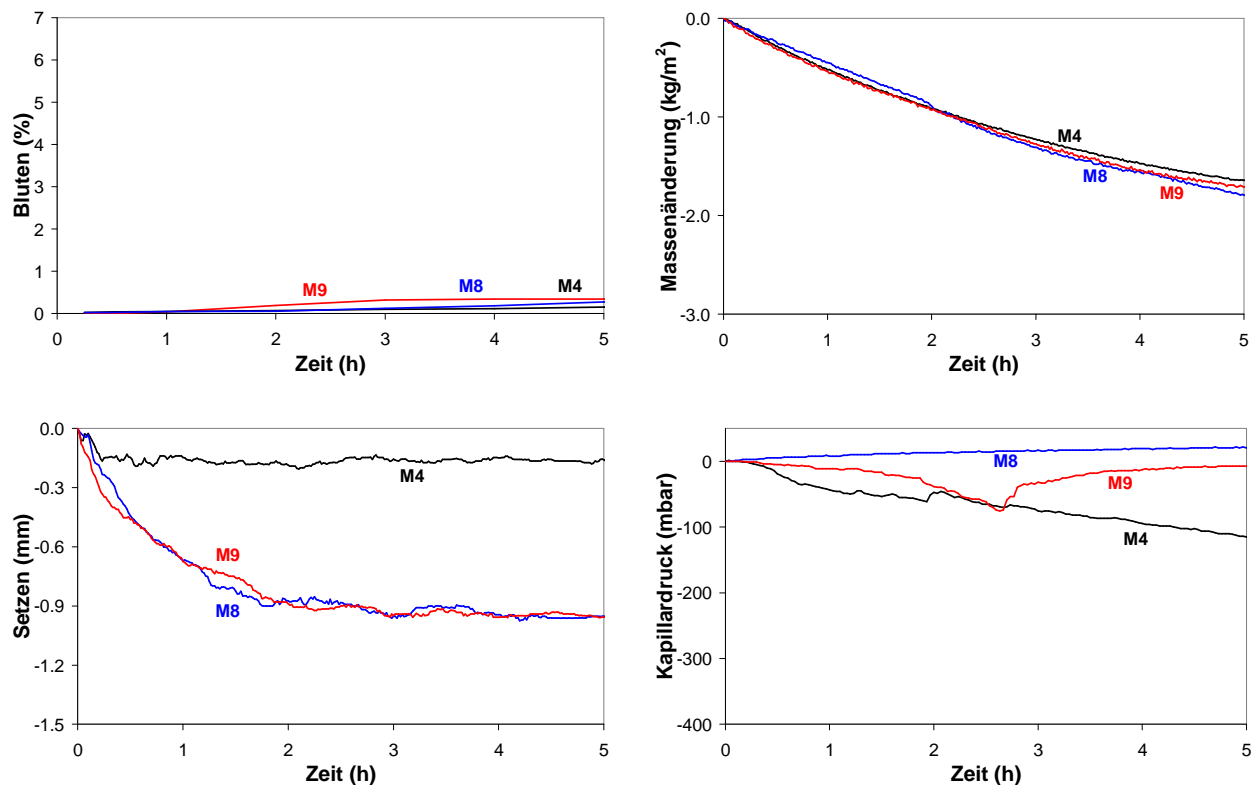


Abbildung 13: Einfluss der Fließmitteldosierung bei w/z-Wert 0.40 (M4, M8 und M9) auf Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

4.3 Einfluss der Zementfeinheit

Die Betone M10 und M11 wurden mit Portlandzement mit dem gleichem Klinker aber mit unterschiedlicher Feinheit hergestellt (CEM I 32.5 N und CEM I 52.5 R). Die Resultate wurden mit denen von M1 (CEM I 42.5 N) verglichen. Die Blaine Feinheiten der drei Portlandzemente waren: 2530 cm²/g für CEM I 32.5 N, 3150 cm²/g für CEM I 42.5 N und 4510 cm²/g für CEM I 52.5 R.

Das Bluten wird in der Abbildung 14 (oben links) gezeigt. Die Messungen wurden für M10 und M11 repetiert. Die Menge an geblutetem Wasser verhält sich umgekehrt proportional zur Zementfeinheit. Der Beton M10 mit CEM I 32.5 N blutet etwa doppelt so stark wie der Beton M1 mit CEM I 42.5 N und etwa achtmal mehr als der Beton M11 mit CEM I 52.5 R. Dies ist eine Folge des geringeren Setzens der feinen Partikel, der höheren spezifischen Oberfläche, die mehr Wasser bindet, und der grösseren Menge an gebildeten Hydratphasen. Der Massenverlust durch Verdunstung wird in der Abbildung 14 (oben rechts) gezeigt. Er

verhält sich während den ersten beiden Stunden bei allen Betonen vergleichbar. Danach nimmt der Massenverlust beim Beton M11 mit CEM I 52.5 R deutlich ab.

In der Abbildung 14 (unten links) wird das Setzen der Betone gezeigt. Der Beton M1 mit CEM I 42.5 N setzt sich am stärksten; der Beton M10 mit CEM I 32.5 N am wenigsten. Der kapillare Unterdruck (Abbildung 14, unten rechts) verhält sich proportional zur Zementfeinheit. Dies kann damit erklärt werden, dass die Kapillarkräfte im Frischbeton sich umgekehrt proportional zum Radius der Menisken verhalten, die sich zwischen Zementpartikeln befinden [Lura et al. 2007].

Keine der vier Prüfkörper von M10 zeigt Risse. Im Fall des Betons M1 mit CEM I 42.5 N rissen die beiden Prüfkörper nach 2.5 Stunden. Beim Beton M11 mit CEM I 52.5 N zeigen drei von vier Prüfkörpern Risse. Die Prüfkörper mit CEM I 42.5 weisen zudem breitere und längere Risse auf als die Prüfkörper mit CEM I 52.5 R (Abbildung 15).

Tabelle 3. Übersicht der Betone M10 und M11, Einfluss der Zementfeinheit, und Vergleich mit M1.

Beton	M1	M10	M11
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1858	1858	1858
Zementart	CEM I 42.5 N	CEM I 32.5 N	CEM I 52.5 R
Blaine [cm ² /g]	3150	2530	4510
Zementgehalt [kg/m ³]	352	352	352
Wassergehalt [kg/m ³]	176	176	176
Fließmitteldosierung [%]	0.2	0.2	0.2
Zementleimvolumen [l/m ³]	289	289	289
w/z-Wert	0.50	0.50	0.50
Ausbreitmass (cm)	40	40/42	40/37
Luftporengehalt [Vol-%]	3.9	4.0/3.7	3.4/3.2
Bluten nach 6 h [%]	2.00	3.79	0.56
Frühschwindrisse	Ja, 2/2	Nein, 0/4	Ja, 3/4

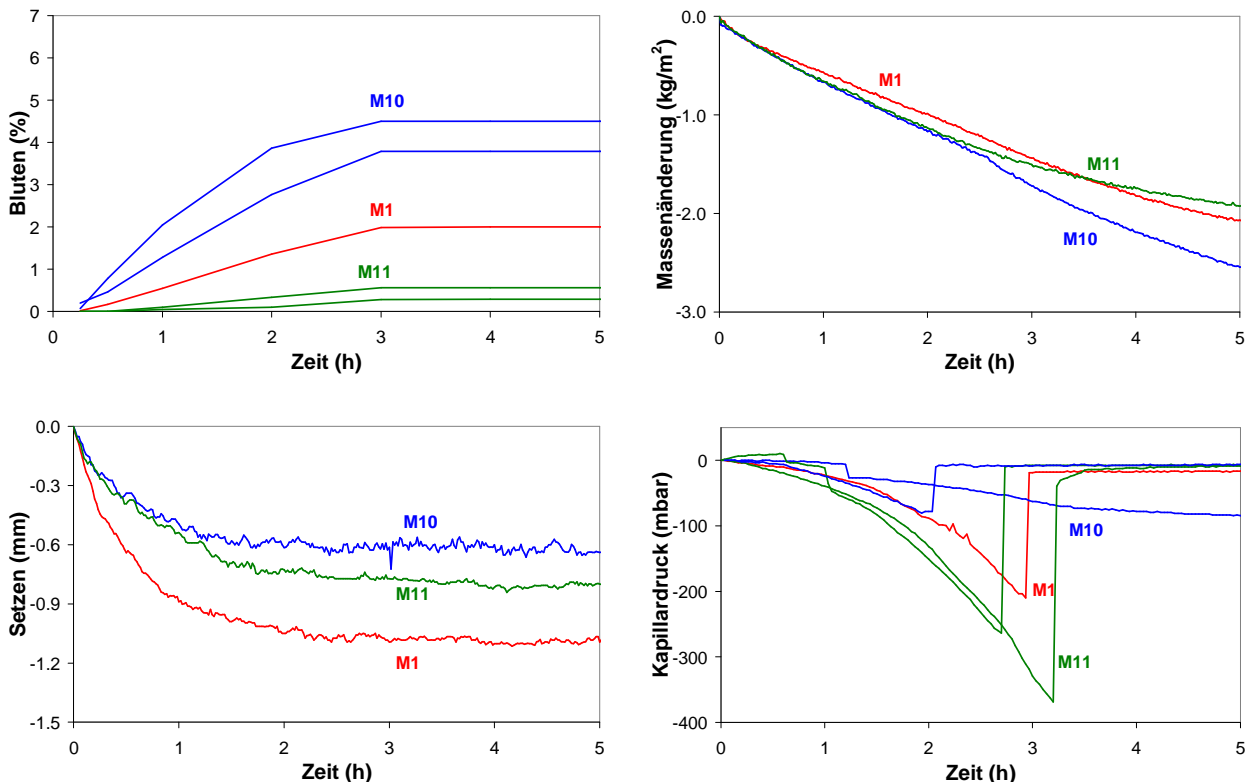


Abbildung 14: Einfluss der Zementfeinheit (M1, M10 und M11) auf Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

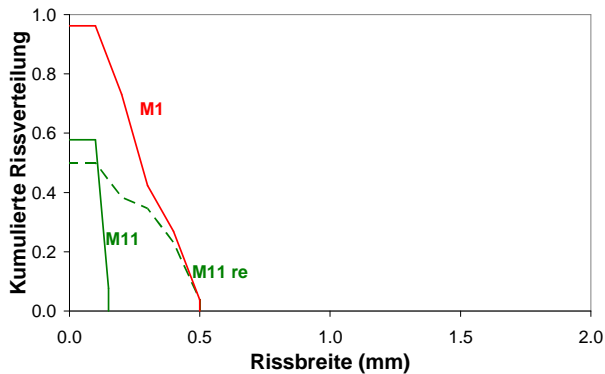


Abbildung 15: Kumulierte Rissverteilung der Betone M1 und M11 (mit Repetition). Bei M11 sind die Prüfkörper nicht auf der ganzen Breite gerissen, was eine kumulierte Rissverteilung mit Maximalwert < 1 entspricht.

Dass der Beton mit CEM I 32.5 N keine Risse zeige, kann durch das starke Bluten erklärt werden, dass den Aufbau von kapillaren Spannungen verzögert und deren Ausmass einschränkt. Dies führt wiederum zu einem reduzierten Setzen und dem Ausbleiben der Risse. Andererseits zeigen die beiden Betone mit feinerem Zement geringeres Bluten, höhere Kapillarspannungen, höheres Setzen und damit die Bildung von Rissen.

Der Grund für das geringere Setzen und die schmalere Risse des Betons mit CEM I 52.5 R im Vergleich zum Beton aus CEM I 42.5 N ist nicht klar. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass sich beim Beton aus CEM I 52.5 R relativ früh Hydratationsprodukte bilden, der Beton damit schnell eine gewisse Zugfestigkeit entwickelt und sich deshalb trotz hoher Kapillarspannungen nur relative schmale Risse entwickeln (Abbildung 15).

4.4 Einfluss der Zementart

Die Betone M7, M12 und M13 wurden mit verschiedenen Zementarten hergestellt (CEM III/B 42.5 N HS, CEM II/A-LL 42.5 N und CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R). Die Resultate wurden mit denen des Betons mit CEM I 42.5 N verglichen.

Die Betone M1 und M13 zeigen mehr Bluten und eine höhere Verdunstungsrate als M12 und M7 (Abbildung 16). Die Betone M1, M12 und M13 weisen ein vergleichbares Setzen und vergleichbare Kapillarspannungen auf. M7 zeigt ein kleineres Setzen und keinen Kapillarunterdruck. Alle Prüfkörper von allen Betonen sind gerissen (Tabelle 4). M1, M7, M12 und M13 weisen eine ähnliche kumulierte Rissverteilung auf (Abbildung 17), wobei die kleinsten Risse bei M1 and die grösste bei M12 auftreten. Die vier Zemente CEM I 42.5 N, CEM III/B 42.5 N HS, CEM II/A-LL 42.5 N und CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R zeigen deshalb keine grossen Unterschiede im Fröhschwindverhalten.

Tabelle 4. Übersicht der Betone M7, M12 und M13, Einfluss der Zementart, und Vergleich mit M1.

Beton	M1	M7	M12	M13
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1855	1845	1853	1834
Zementart	CEM I 42.5 N	CEM III/B 42.5 N HS	CEM II/A-LL 42.5 N	CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R
Blaine [cm ² /g]	3150	4230	3530	4140
Zementgehalt [kg/m ³]	352	352	352	352
Wassergehalt [kg/m ³]	176	176	176	176
Fliessmitteldosierung [%]	0.2	0.2	0.2	0.2
Zementleimvolumen [l/m ³]	289	294	291	298
w/z-Wert	0.50	0.50	0.50	0.50
Ausbreitmass (cm)	40	44	39/42	45
Luftporengehalt [Vol-%]	3.9	3.7	4.1/4.2	3.5
Bluten nach 6 h [%]	2.00	1.37	1.32	2.28
Fröhschwindrisse	Ja, 2/2	Ja, 2/2	Ja, 4/4	Ja, 2/2

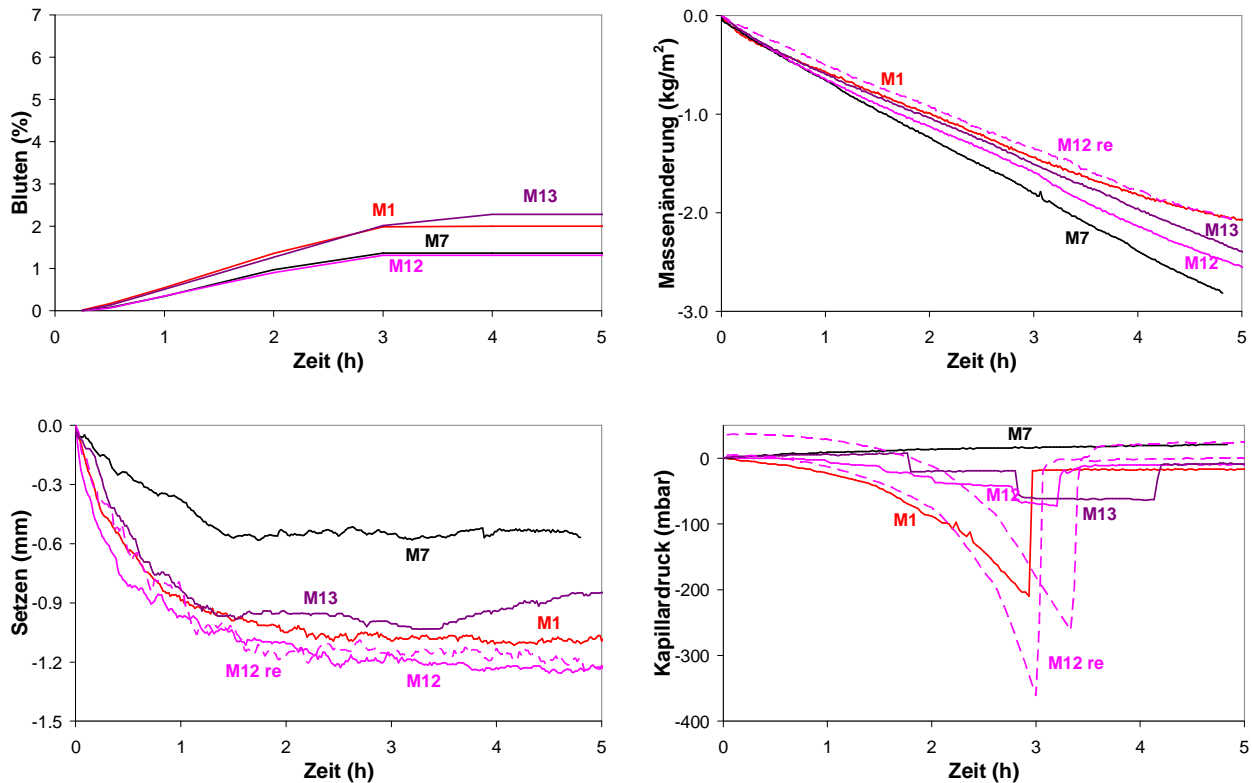


Abbildung 16: Einfluss der Zementart (M1, M7, M12 und M13) auf Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

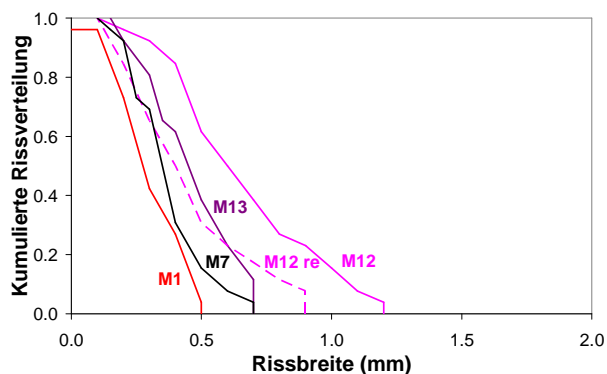


Abbildung 17: Kumulierte Rissverteilung der Betone M1, M7, M12 (mit Repetition) und M13.

4.5 Einfluss Zementleimvolumen bei gleichem w/z-Wert

Beim Zement CEM I 42.5 N wurde der Einfluss des Zementleimvolumens ($\pm 9\%$) untersucht. Die Betone M14 und M15 wurden mit w/z-Wert 0.50 und verschiedenen Zementleimvolumina hergestellt (263 und 316 l/m^3). Die Resultate werden mit denen von M1 (289 l/m^3) verglichen.

Der Beton M14 mit dem reduzierten Zementleimvolumen weist wie der Beton M4 ein korngestütztes Gefüge auf, weshalb sie sich trotz geringem Bluten wenig setzt (Abbildung 18) und deshalb keine Risse entwickelt (Tabelle 5). Der Beton mit einem erhöhten Zementleimvolumen (M15) weist zwar ein höheres Bluten auf, reisst aber trotz kleiner Kapillarspannungen (Abbildungen 18 und 19). Die Ursache für dieses Verhalten ist nicht klar, auch weil sich der Beton M15 ähnlich wie M1 setzt und dadurch ähnliche Kapillarspannungen zu erwarten wären.

Tabelle 5: Übersicht M14 und M15, Einfluss Zementleimvolumen bei w/z-Wert 0.50, und Vergleich mit M1.

Beton	M1	M14	M15
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1855	1928	1787
CEM I 42.5 N [kg/m ³]	352	320	385
Wassergehalt [kg/m ³]	176	160	193
Fließmitteldosierung [%]	0.2	0.2	0.0
Zementleimvolumen [l/m³]	289	263	316
w/z-Wert	0.50	0.50	0.50
Ausbreitmass (cm)	40	38	46
Luftporengehalt [Vol-%]	3.9	3.3	3.6
Bluten nach 6 h [%]	2.00	1.49	2.98
Frühschwindrisse	Ja, 2/2	Nein, 0/2	Ja, 2/2

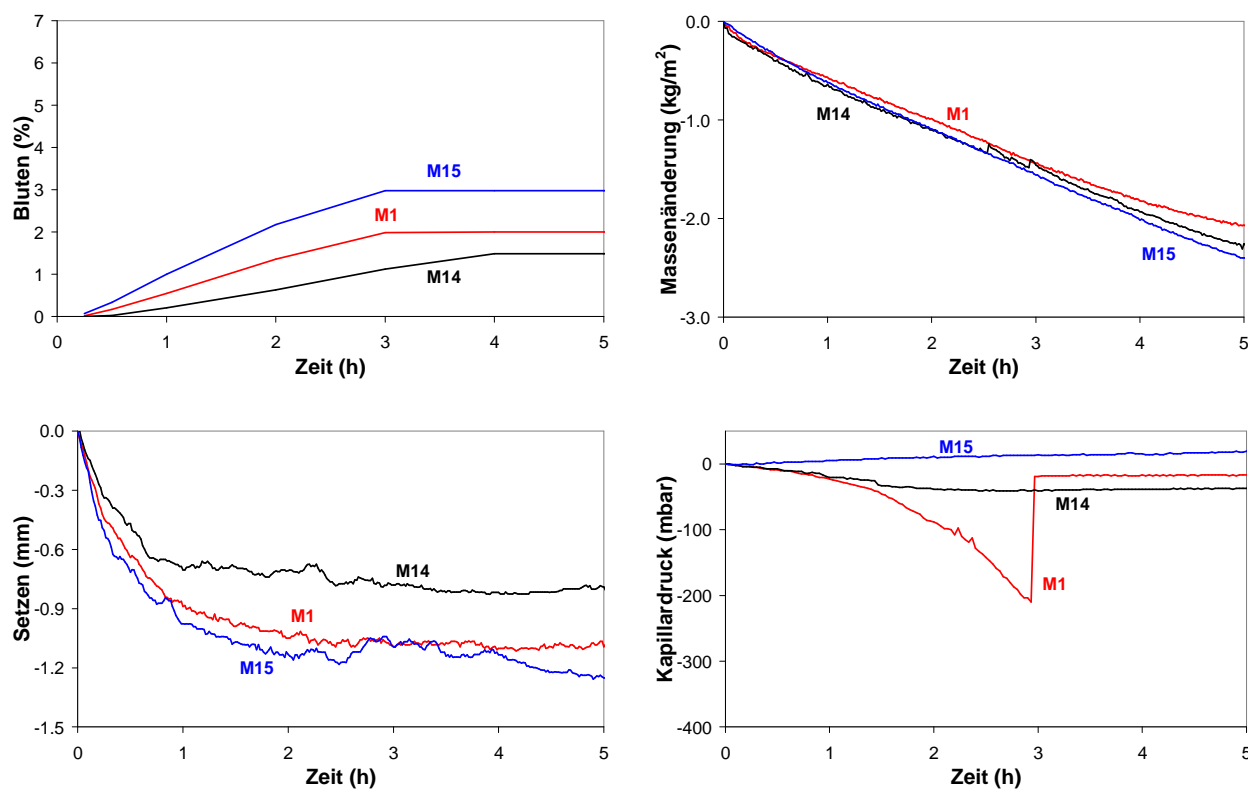


Abbildung 18: Einfluss des Zementleimvolumens bei gleichem w/z-Wert (M1, M14 und M15) auf Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

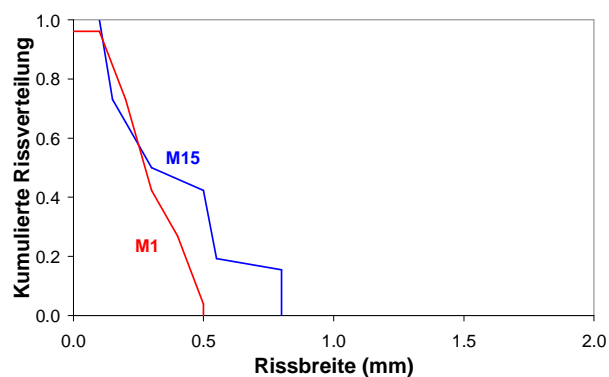


Abbildung 19: Kumulierte Rissverteilung der Betone M1 und M15.

4.6 Einfluss w/z-Wert bei gleichem Zementleimvolumen

Der Einfluss des w/z-Wertes bei gleichem Zementleimvolumen (etwa 290 l/m³) wurde mit CEM I 42.5 N getestet. Die Betone M8 und M16 wurden mit w/z-Wert 0.40 und 0.60 hergestellt. Die Resultate werden mit denen von M1 (w/z-Wert 0.50) verglichen.

Weil der Beton mit hohem w/z-Wert viel blutet, setzen die kapillaren Spannungen später ein (Abbildung 20). Sie werden aber trotzdem so hoch, dass ein Riss in einem von den zwei Prüfkörpern auftritt (Tabelle 6). Die Rissbreite ist allerdings sehr klein (Abbildung 21). Wie schon vorher beim Beton M4 beobachtet führt der tiefe w/z-Wert zu geringem Bluten (Abbildung 20). Aber weil auf Niveau der Feinpartikel einerseits ein korngestütztes Gefüge vorhanden ist und andererseits die Wassermenisken früh unter die Oberfläche fallen (siehe auch die geringe Verdunstungsrate von M8 in der Abbildung 20), treten keine Risse auf. Auch die Mischung M9 (Tabelle 2 und Abb. 13) ist sehr nah an M8 und bestätigt diese Resultate.

Tabelle 6: Übersicht der Betone M8 und M16, Einfluss w/z-Wert bei gleichem Zementleimvolumen, und Vergleich mit M1.

Beton	M1	M8	M16
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1858	1850	1857
CEM I 42.5 N [kg/m ³]	352	400	315
Wassergehalt [kg/m ³]	176	160	189
Fließmitteldosierung [%]	0.2	1.2	0.0
Zementleimvolumen [l/m ³]	289	292	290
w/z-Wert	0.50	0.40	0.60
Ausbreitmass (cm)	40	46	44
Luftporengehalt [Vol-%]	3.9	3.9	2.2
Bluten nach 6 h [%]	2.00	0.38	4.69
Frühschwindrisse	Ja, 2/2	Nein, 0/2	Ja, 1/2

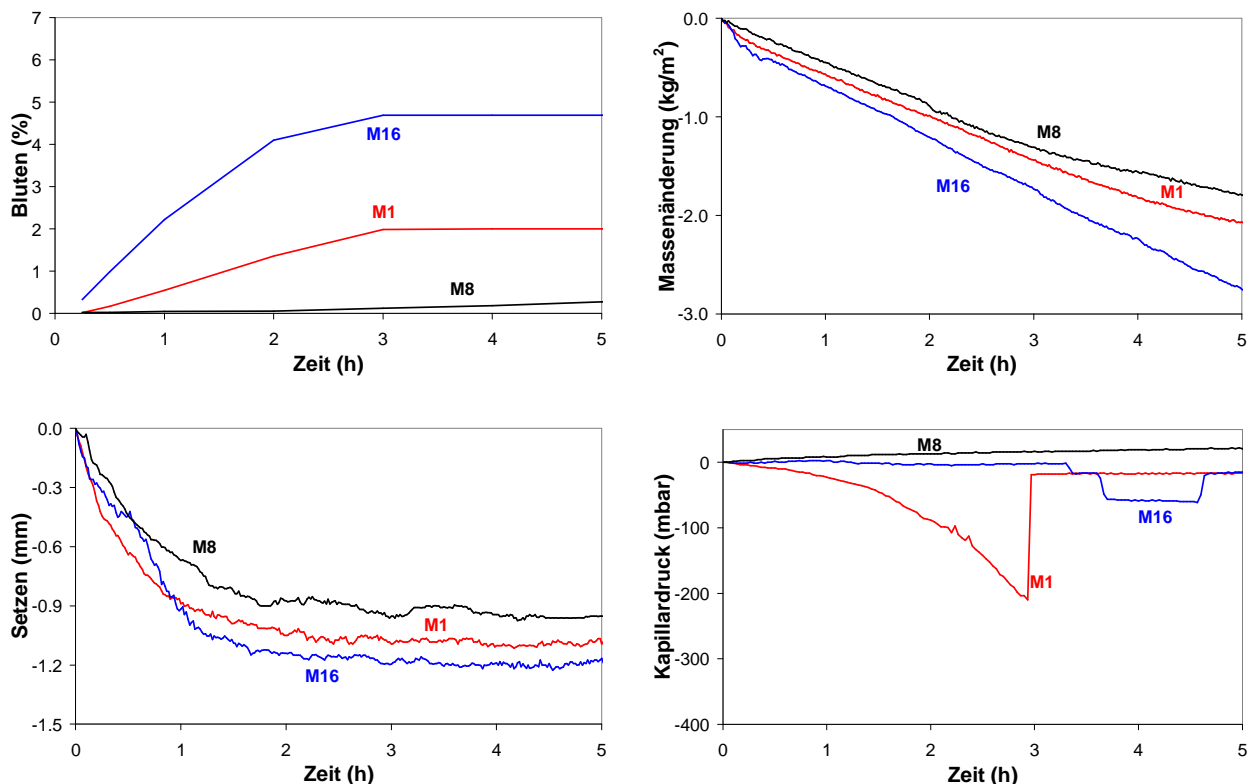


Abbildung 20: Einfluss des w/z-Wertes bei konstantem Zementleimvolumen (M1, M8 und M16) auf Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

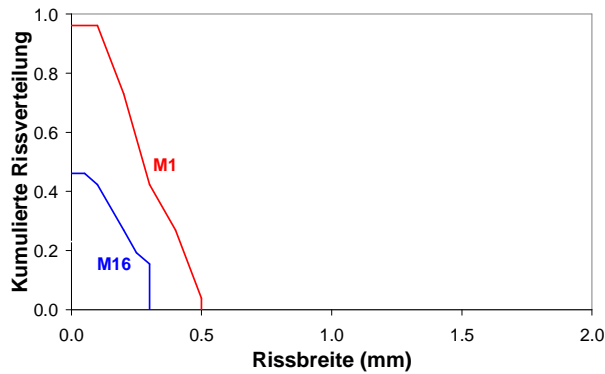


Abbildung 21: Kumulierte Rissverteilung der Betone M1 und M16.

4.7 Einfluss der Transportzeit

Um den Einfluss der Transportzeit auf die Frühschwindrisse abzuklären, wurden die Prüfkörper für M18 erst 60 min nach Betonherstellung hergestellt. Um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen, wurde die Mischung wiederholt. Als Referenz wurde der einzige Beton mit w/z-Wert 0.50 ohne Frühschwindrisse, M10 mit CEM I 32.5 N, gewählt.

Das Verzögern des Einbaus führt dazu, dass der Beton weniger stark blutet (Abbildung 22). Aus diesem Grund können sich grössere Kapillarspannungen aufbauen und der Beton setzt sich bei ähnlicher Verdunstungsrate deutlich mehr (Abbildung 22), was zu einer Rissbildung führt (Tabelle 7 und Abbildung 23).

Tabelle 7: Vergleich der Betone M10 und M18, Einfluss der Transportzeit.

Beton	M10	M18
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1858	1858
Zementart	CEM I 32.5 N	CEM I 32.5 N
Zementgehalt [kg/m ³]	352	352
Wassergehalt [kg/m ³]	176	176
Fliessmitteldosierung [%]	0.2	0.2
Zementleimvolumen [l/m ³]	289	289
w/z-Wert	0.50	0.50
Ausbreitmass (cm)	40/42	44 / 39 nach 60 min
Luftporengehalt [Vol-%]	4.0/3.7	3.6
Bluten nach 6 h [%]	3.79	2.32
Testbeginn [min]	0	60
Frühschwindrisse	Nein, 0/4	Ja, 4/4

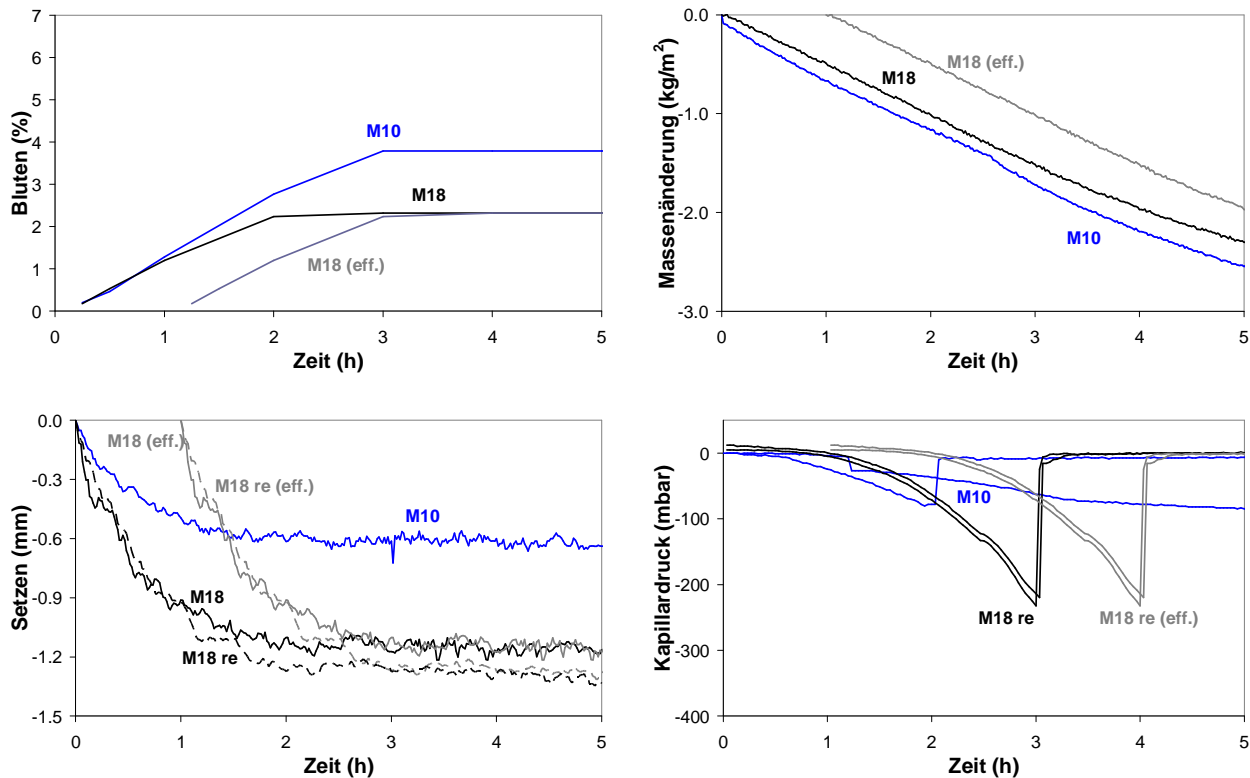


Abbildung 22: Vergleich der Betone mit unterschiedlichem Einbauzeitpunkt (M10 und M18) bezüglich Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts). Bei Beton M18 zeigen die schwarzen Linien die Messwerten ab Messbeginn im Windkanal (1 h nach Betonherstellung), während die grauen Linien die Messwerte ab Herstellungszeitpunkt zeigen.

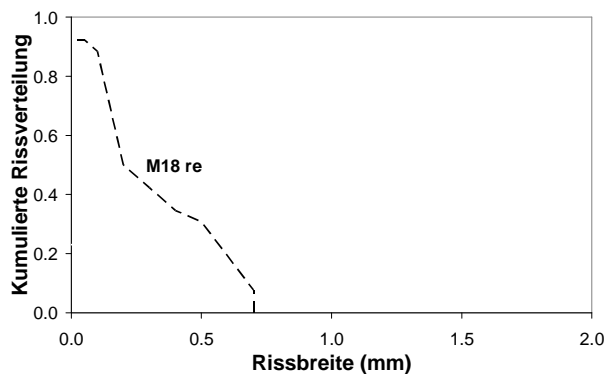


Abbildung 23: Kumulierte Rissverteilung des Betons M18 (Repetition).

4.8 Einfluss der Feinheit der Zusatzstoffen

Um den Einfluss der Feinheit der Zusatzstoffen zu prüfen, wurden die zwei Betone M17 (CEM I 32.5 N + 25 Vol.% Flugasche) und M19 (CEM I 32.5 N + 10 Vol.% Mikrosilika) hergestellt. Die Flugasche wies einen höheren mittleren Korndurchmesser auf als der Zement; das Mikrosilika einen deutlich kleineren. Der Wassergehalt in den Betonen wurde konstant gehalten, weshalb der w/z-Wert mit dem Gehalt an Zusatzstoffen ansteigt (Tabelle 8).

Beton M19 blutet weniger und die Verdunstungsrate wird nach 3 Stunden kleiner als bei den anderen Betonen (Abbildung 24). Dies ist eine Konsequenz der hohen Kapillarkräften zwischen den kleinen Mikrosilika-Partikeln [Lura et al. 2007]. Entsprechend sind das Setzen und der Kapillarunterdruck des Betons M19 höher (Abbildung 24), was zu Frühschwindrissen führt (Abbildung 25). Beim Beton M17 mit Flugasche ist das Bluten grösser und der Kapillarunterdruck kleiner (Abbildung 24). Entsprechend treten keine Risse auf.

Tabelle 8: Übersicht der Betone M17 und M19, Einfluss der Feinheit der Zusatzstoffe und Vergleich mit M10.

Beton	M10	M17 (25 Vol.% FA)	M19 (10 Vol.% MS)
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1858	1858	1858
Zementart	CEM I 32.5 N	CEM I 32.5 N	CEM I 32.5 N
Zementgehalt [kg/m ³]	352	264	317
Zusatzstoffe [kg/m³]	keine	65 FA	26 MS
Wassergehalt [kg/m ³]	176	176	176
Fließmitteldosierung [%]	0.2	-	0.2
Zementleimvolumen [l/m ³]	289	289	289
w/z-Wert	0.50	0.53	0.51
Ausbreitmass (cm)	40/44	39	39
Luftporengehalt [Vol-%]	4.0/3.7	2.8	3.8
Bluten nach 6 h [%]	3.79	4.34	0.14
Frühschwindrisse	Nein, 0/4	Nein, 0/2	Ja, 2/2

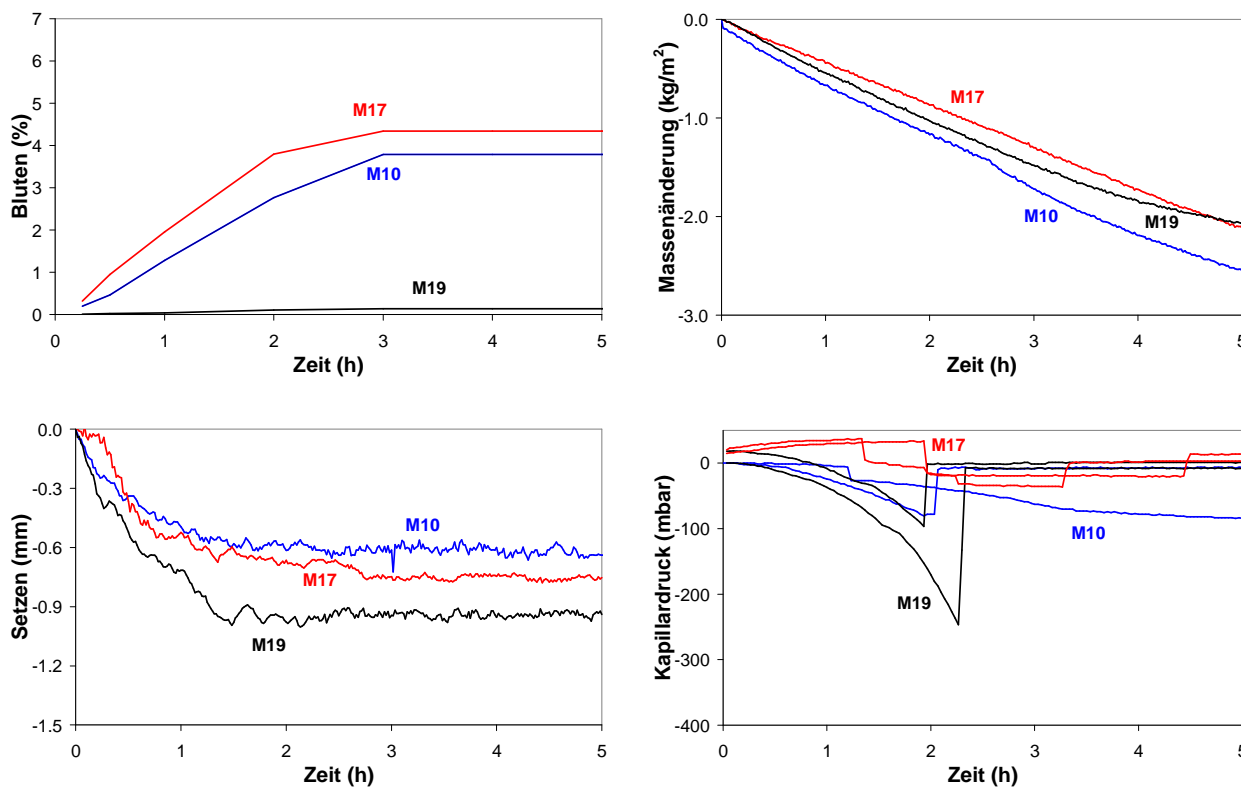


Abbildung 24: Vergleich der Betone mit Zusatzstoffen unterschiedlicher Feinheit (M17 und M19, plus Referenz M10) bezüglich Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

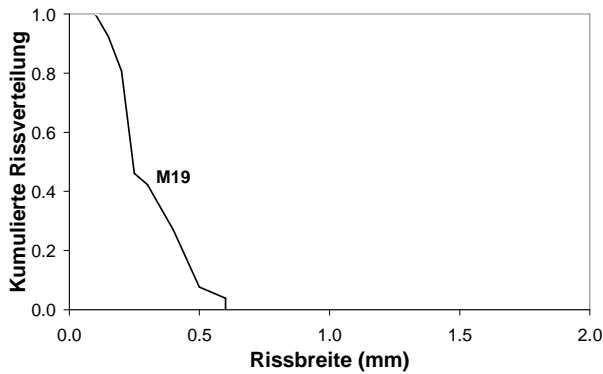


Abbildung 25: Kumulierte Rissverteilung des Betons 19.

4.9 Einfluss von Zusatzmitteln und tiefen Temperaturen

Um den Einfluss verschiedener Zusatzmitteln zu prüfen, wurden für zwei Betone einerseits Luftporenmittel (M20) und andererseits Schwindreduzierer (M21) geprüft. Um den Einfluss von tiefen Temperaturen zu simulieren, wurden die Komponenten bei einem Beton (M22) bei 5°C vorgelagert. Der Verlauf der Betontemperatur wurde aufgezeichnet. Vergleich mit M12, CEM II/A-LL 42.5 N und w/z-Wert 0.50.

Beide Zusatzmittel waren nicht in der Lage die Rissbildung zu verhindern. Im Fall des Luftporenmittels scheint das Bluten etwas reduziert zu sein, was den Aufbau kapillarer Spannungen begünstigt (Abbildung 26). Der Einsatz eines Schwindreduzierers verringert die Oberflächenspannung des Wassers, weshalb die kapillaren Kräfte eigentlich verringert werden müssten; dies ist aber nicht der Fall (s. Abbildung 26). Der Beton M21 mit Schwindreduzierer weist sogar die grösste Rissbreite auf (Abbildung 27). Das verwendete Produkt führte beim Trockenschwinden zu einer deutlichen Schwindreduktion. Weshalb es die Rissbildung beim plastischen Schwinden nicht verhindern konnte, ist nicht klar. Es gibt aber verschiedene Schwindreduzierer, die in der Lage sind, das Rissrisiko beim plastischen Schwinden zu reduzieren [Lura et al. 2007].

Beton blutet bei tiefen Temperaturen mehr. Obwohl die Komponenten nur bei 5°C vorgelagert wurden, der Beton aber bei 30°C geprüft wurde, ist das Bluten noch leicht erhöht (Abbildung 26). Dadurch können sich die kapillaren Spannungen erst zu einem späteren Zeitpunkt aufbauen (Abbildung 26), etwa eine Stunde später als bei den anderen Betonen. Die Spannungen nach vier Stunden werden aber so gross, dass es zu Rissen in beiden Prüfkörpern kommt (Abbildung 27).

Tabelle 9: Übersicht der Betone M20, M21 und M22, Einfluss von Zusatzmitteln, Vergleich mit M12.

Beton	M12	M20 LPB	M21 SRA	M22 5°C
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1853	1853	1853	1853
CEM II/A-LL 42.5 N [kg/m ³]	352	352	352	352
Wassergehalt [kg/m ³]	176	176	176	176
Fliessmitteldosierung [%]	0.2	0.2	0.2	0.2
Zusatzmitteldosierung [%]	-	0.3% LPB	2% SRA	-
Zementleimvolumen [l/m ³]	291	291	291	291
w/z-Wert	0.50	0.50	0.50	0.50
Ausbreitmass (cm)	39	42	43/42	45/43
Luftporengehalt [Vol-%]	4.1	5.1	3.8	3.9
Bluten nach 6 h [%]	1.32	0.77	1.38	2.32
Frischbetontemperatur [°C]	20	20	20	5
Frühschwindrisse	Ja, 2/2	Ja, 2/2	Ja, 2/2	Ja, 2/2

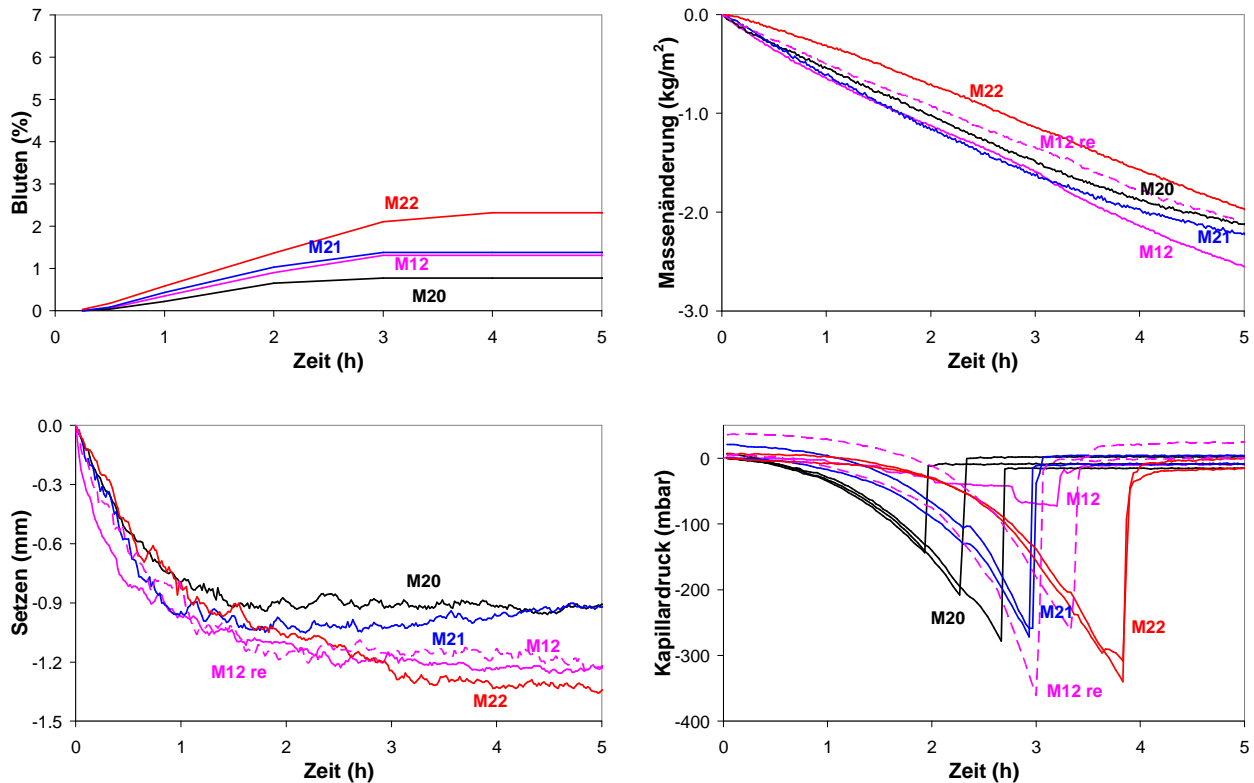


Abbildung 26: Vergleich der Betone mit Zusatzmitteln (M20 und M21) respektive mit bei tiefen Temperaturen vorgelagerten Komponenten (M22), plus Referenz M12, bezüglich Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

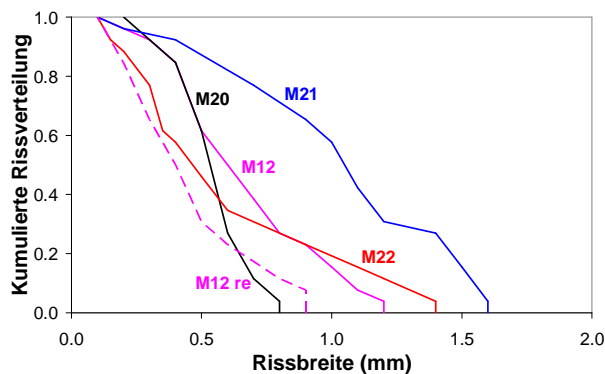


Abbildung 27: Kumulierte Rissverteilung der Betone M12 (mit Repetition), M20, M21 und M22.

4.10 Einfluss der Nachbehandlung

Um den Einfluss der Nachbehandlung zu prüfen, wurden die zwei Betone M23 und M24 hergestellt. M23, Nachbehandlung 1: Verwendung eines Curing-Mittels, Mastercure 216, 5 min nach Installation der Prüfkörper in Windkanal appliziert, Oberfläche „mattfeucht“. Nachbehandlung 2, M24: Abdecken der Prüfkörper im Windkanal mit Plastikfolie. Vergleich mit M12, CEM II/A-LL 42.5 N und w/z-Wert 0.50. Da es sich um dieselbe Betonzusammensetzung handelt, wiesen alle drei Betone praktisch dasselbe Bluten auf (Abbildung 28).

Beide nachbehandelten Betone weisen keine Risse auf. Im Fall von der Plastikfolie (M24) wird das Verdunsten von Blutungswasser an der Betonoberfläche verhindert. Folglich können sich auch keine Kapillarspannungen aufbauen. Das Setzen ist sehr klein (Abbildung 28) und die Rissbildung bleibt aus (Tabelle 10). Beim Beton M24 baut sich nach vier Stunden ein kleiner Kapillarunterdruck auf, was auf das Einbinden von Wasser in Hydratphasen zurückzuführen ist. Mit dem Curing-Mittel (M23) ist das Setzen

ähnlich wie bei der Referenzmischung und es entsteht ein Kapillarunterdruck (Abbildung 28). Er ist jedoch kleiner als bei der Referenzmischung und ist offenbar nicht hoch genug für eine Rissbildung.

Tabelle 10: Übersicht der Betone M23 und M24, Einfluss der Nachbehandlung. Vergleich mit M12.

Beton	M12	M23	M24
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1853	1853	1853
CEM II/A-LL 42.5 N [kg/m ³]	352	352	352
Wassergehalt [kg/m ³]	176	176	176
Fließmitteldosierung [%]	0.2	0.2	0.2
Curing-Mitteldosierung [%]	-	Ab 5 min	-
Zementleimvolumen [l/m ³]	291	291	291
w/z-Wert	0.50	0.50	0.50
Ausbreitmass (cm)	39	39	44
Luftporengehalt [Vol-%]	4.1	4.1	3.8
Bluten nach 6 h [%]	1.32	1.01	1.32
Nachbehandlung	keine	Mastercure	Plastikfolie
Frühschwindrisse	Ja, 2/2	Nein, 0/2	Nein, 0/2

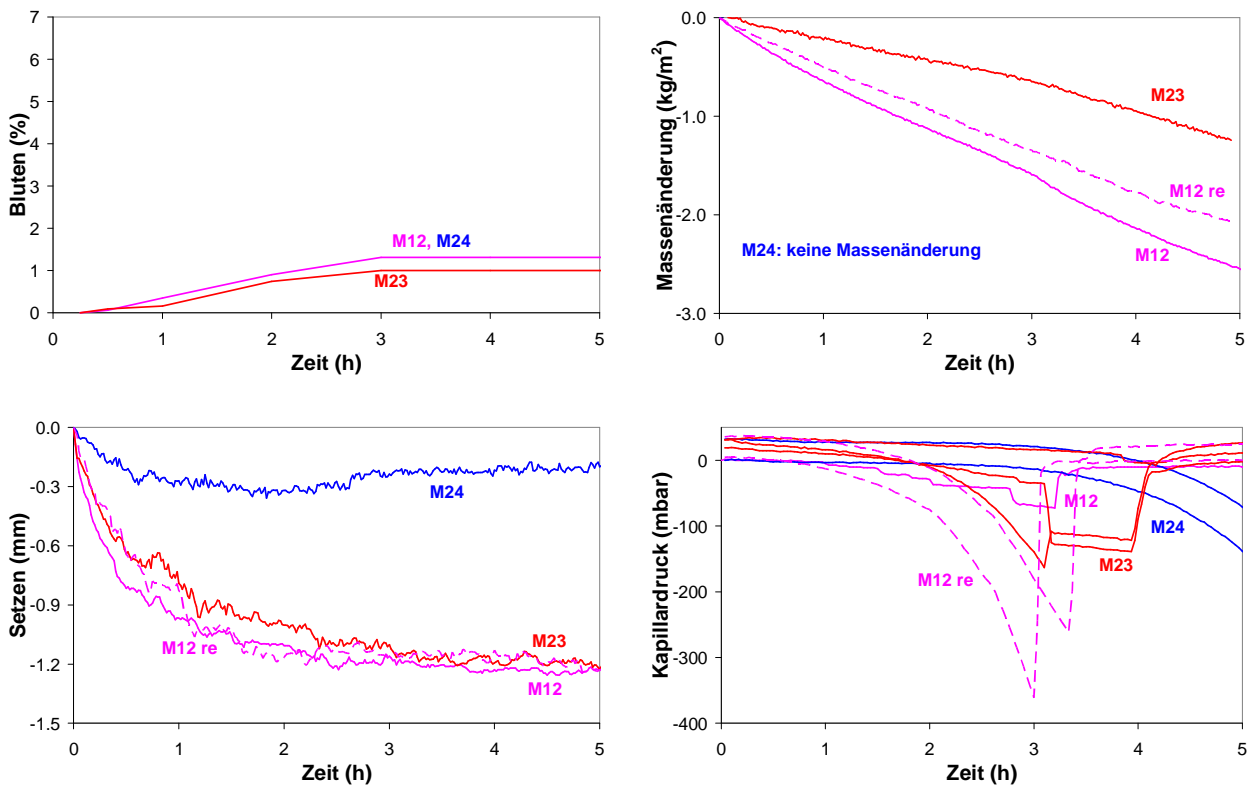


Abbildung 28: Vergleich der Betone mit Nachbehandlung (M23 und M24, plus Referenz M12) bezüglich Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

4.11 Recyclingbeton

Der Beton M25 wurde als Recyclingbeton hergestellt. Mischabbruchgranulat mit einem Anteil von 50 Volumen-% wurde verwendet. Vergleich mit M12, CEM II/A-LL 42.5 N und w/z-Wert 0.50.

Das Saugen der porösen Recyclinggesteinskörnung verringert trotz dem vergleichsweise hohen Wassergehalt das Bluten (Abbildung 29). Entsprechend werden die Kapillarspannungen erhöht (Abbildung

29). Der Beton reisst früher und die entstehenden Risse sind breiter als beim entsprechenden Referenzbeton (Abbildung 30).

Tabelle 11: Übersicht der Betone M25 aus Recyclingbeton. Vergleich mit M12.

Beton	M12	M25
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1853	1561 (0-25 mm)
Gesteinskörnung	primär	RC-M 50%
CEM II/A-LL [kg/m ³]	352	352
Wassergehalt [kg/m ³]	176	208
Fließmitteldosierung [%]	0.2	0.2
Zementleimvolumen [l/m ³]	291	291
w/z-Wert	0.50	0.59
Ausbreitmass (cm)	39	48
Luftporengehalt [Vol-%]	4.1	3.8
Bluten nach 6 h [%]	1.32	0.46
Frühschwindrisse	Ja, 2/2	Ja, 2/2

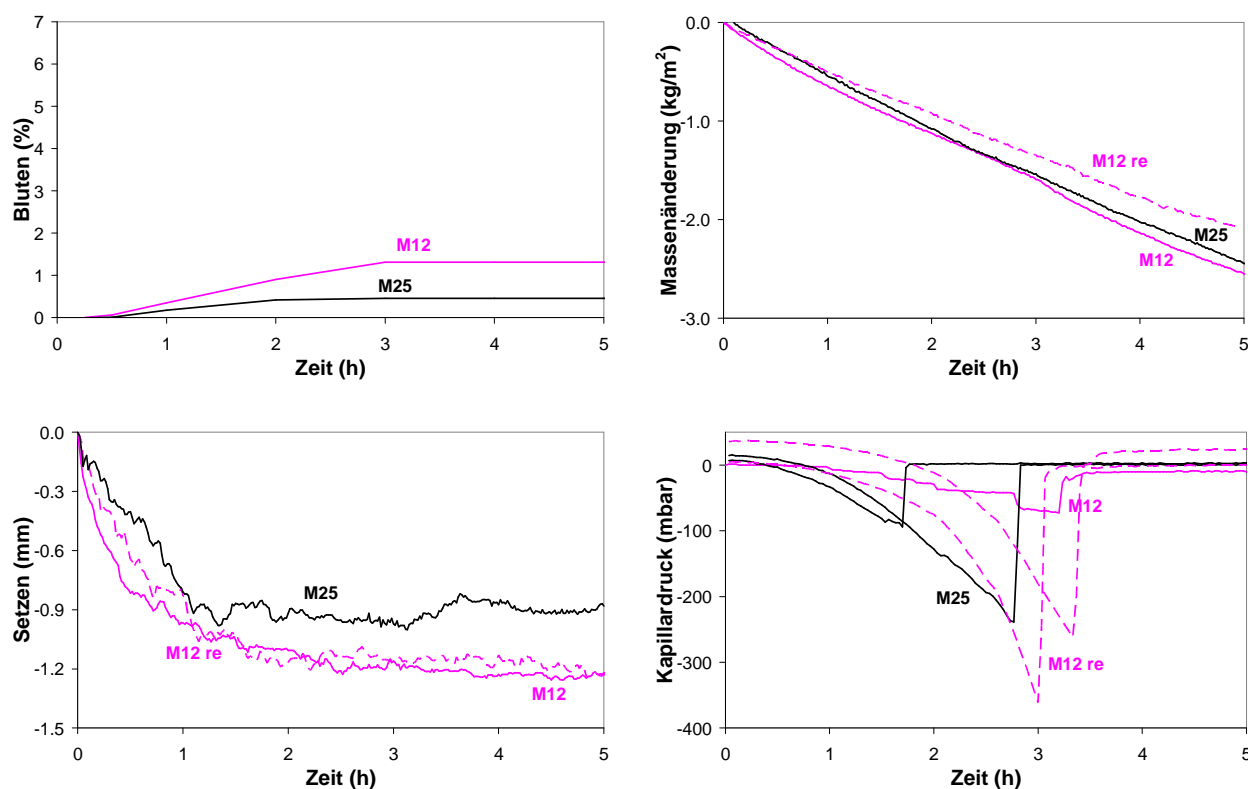


Abbildung 29: Beton mit Recyclinggesteinskörnung (M25) verglichen mit einem Referenzbeton aus Alluvialkies (M12); Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

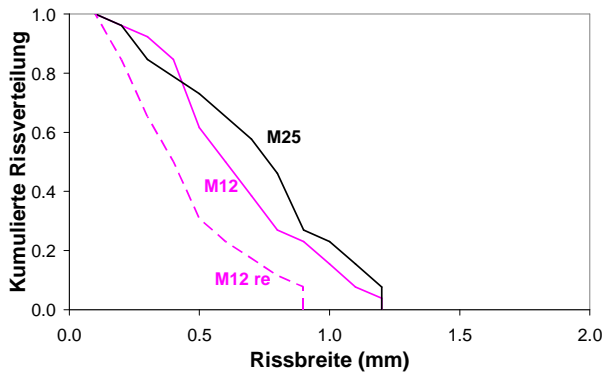


Abbildung 30: Kumulierte Rissverteilung der Betone M12 (mit Repetition) und M25.

4.12 SCC

Beim Beton M26 handelt es sich um einen SCC. Vergleich mit M13, CEM II/B-M und w/z-Wert 0.50.

Das Bluten des SCC ist deutlich kleiner als beim Vergleichsbeton und das Setzen ist deutlich grösser (Abbildung 31). Trotzdem sind die beiden entstehenden Risse schmaler (Abbildung 32), was vermutlich auf den langsamen Aufbau der Kapillarspannungen zurückzuführen ist (Abbildung 31). Dies kann mit der hohen Anzahl Partikel pro Volumeneinheit, das heisst einem annähernd korngestützten Gefüge, erklärt werden.

Tabelle 12: Übersicht der Werte des SCC M26. Vergleich mit M13.

Beton	M13	M26
Gestein 0/16 mm [kg/m ³]	1834	1700
CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R [kg/m ³]	352	450
Wassergehalt [kg/m ³]	176	194
Fliessmitteldosierung [%]	0.2	0.6
Zementleimvolumen [l/m ³]	298	358
w/z-Wert	0.50	0.43
Ausbreitmass / slump flow (cm)	45	74
Luftporengehalt [Vol-%]	3.5	1.6
Bluten nach 6 h [%]	2.28	0.66
Frühschwindrisse	Ja, 2/2	Ja, 2/2

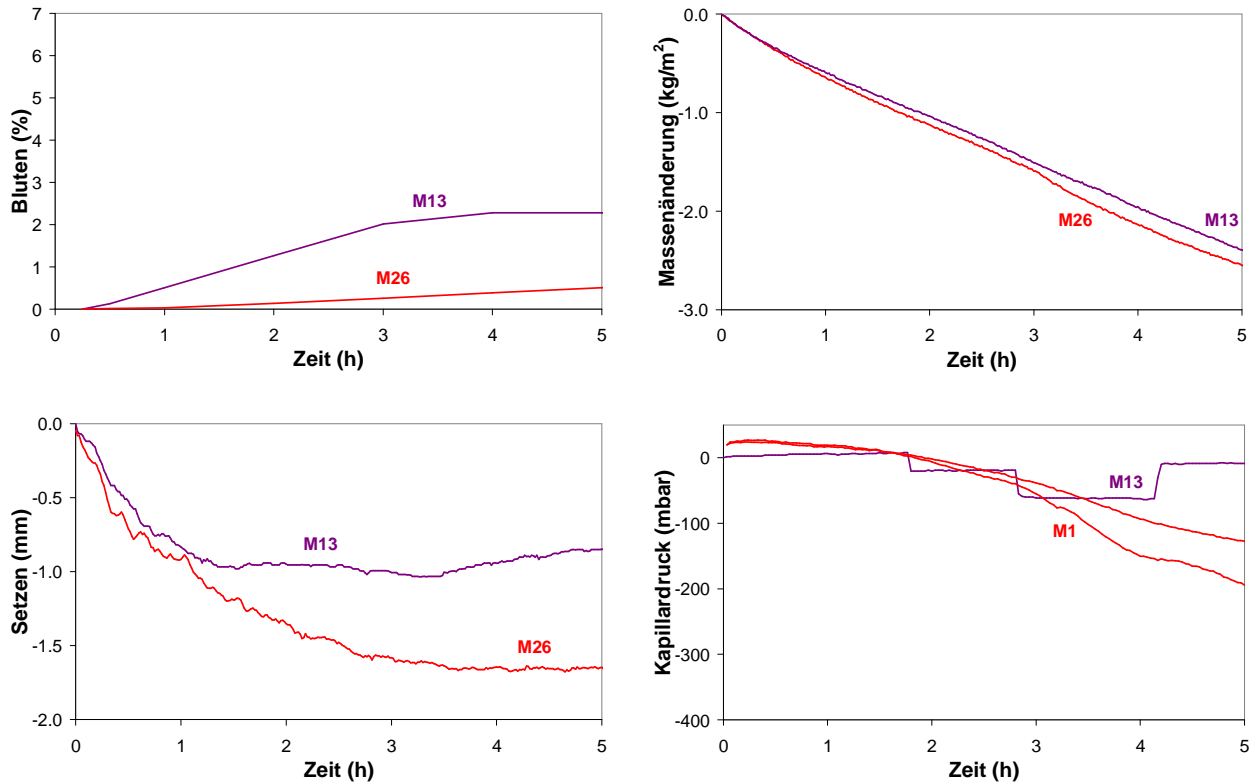


Abbildung 31: SCC verglichen mit einem Referenzbeton; Bluten (oben, links), Verdunstungsrate (oben, rechts), Setzen (unten, links) und Kapillardruck (unten, rechts).

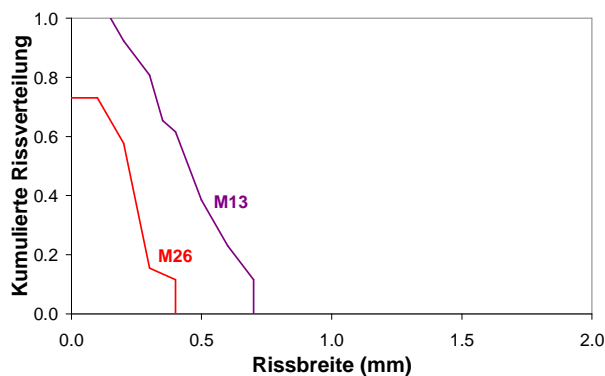


Abbildung 32: Kumulierte Rissverteilung der Betone M13 und M26.

4.13 Abhängigkeit des Rissrisikos von w/z-Wert und Zementleimvolumen

In der Abbildung 33 werden w/z-Werte und Zementleimvolumen der Betone mit CEM I 42.5 N dargestellt. Die gerissene Betone werden mit einem roten Kreuz bezeichnet. Bei den vorhandenen Daten zeigt sich ein Trend, dass das Rissrisiko bei „mittlerem“ w/z-Wert und bei hohen Zementleimvolumina höher zu sein scheint.

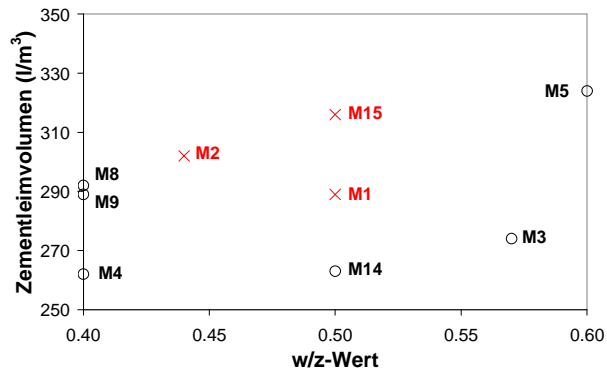


Abbildung 33: Darstellung der Betone mit CEM I 42.5 N in einem w/z-Wert - Zementleimvolumen-Diagramm. Die gerissenen Betone sind rot markiert.

5. Schlussfolgerungen

Mit den durchgeführten Versuchen konnten die massgebenden Mechanismen für die Entstehung von Fröhschwindrissen identifiziert und die Hypothese über die Entstehungsmechanismen bestätigt werden:

- Nach dem Einbau des Frischbetons beginnt er zu bluten und er setzt sich. Solange sich Blutungswasser an der Betonoberfläche befindet, können sich keine Spannungen aufbauen, auch wenn der Frischbeton seine Verarbeitbarkeit verloren hat, respektive nicht mehr plastisch verformbar ist. Sobald aber das Niveau des Blutungswassers auf die Höhe der obersten Betonpartikel fällt, baut sich ein kapillarer Unterdruck auf. Wird dieser kapillare Unterdruck so gross, dass die Kohäsion im Frischbeton („Grünstandfestigkeit“) überschritten wird, entstehen Fröhschwindrisse.

Das Rissrisiko wird durch die Umgebungsbedingungen, die Nachbehandlung und die Betonzusammensetzung beeinflusst.

Umgebungsbedingungen

Je höher die Verdunstungsrate an der Betonoberfläche ist, umso höher ist das Rissrisiko. Entsprechend ist bei hohen Temperaturen, tiefer relativer Luftfeuchtigkeit und hohen Windgeschwindigkeit die Gefahr der Bildung von Fröhschwindrissen hoch. Dabei genügt es unter Umständen bereits, wenn durch einen der drei Parameter günstige Bedingungen für das Verdunsten von Wasser geschaffen werden.

Nachbehandlung

Die Nachbehandlung des Betons ist für das Risiko der Bildung von Fröhschwindrissen von entscheidender Bedeutung:

- Je länger die Zeitdauer zwischen Betonherstellung und Betoneinbau ist, umso grösser wird das Rissrisiko, weil das Bluten des Betons abnimmt. Es gilt also, lange Transportzeiten zu vermeiden.
- Wenn die Betonoberfläche feucht gehalten wird, können keine Kapillarspannungen und damit keine Fröhschwindrisse entstehen. Dies kann über das Abdecken der Betonoberfläche mit einer Folie, das Aufsprühen eines Curing-Mittels oder das sachgemässe Aufsprühen von Wasser erreicht werden. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, dass diese Massnahmen unmittelbar nach dem Einbau begonnen werden.

Betonzusammensetzung

Es hat sich gezeigt, dass alle im Beton vorhandenen Komponenten und auch ihr Mengenverhältnisse einen Einfluss auf das Rissrisiko infolge Fröhschwindens haben. Die diskutierten Parameter werden entsprechend ihrer Bedeutung für das Rissrisiko aufgeführt. Der wichtigste Parameter wird zuerst diskutiert.

- **w/z-Wert:** Das höchste Rissrisiko ist bei einem w/z-Wert zwischen 0.45 und 0.55 vorhanden. Liegt der w/z-Wert höher, blutet der Beton relativ stark, sodass sich über lange Zeit ein Wasserfilm auf der Betonoberfläche befindet, was den Aufbau von kapillaren Spannungen verhindert respektive verzögert. Entsprechend ist das Rissrisiko klein. Ist der w/z-Wert tief, blutet der Beton zwar wenig, aber weil im Feinpartikelbereich ein annähernd oder vollständig korngestütztes Gefüge vorhanden ist, bauen sich nur geringe Kapillarspannungen auf. Zudem können die Wassermenisken relativ schnell unter die Betonoberfläche fallen, wodurch dem Entstehen von Kapillarspannungen entgegengewirkt wird.
- Die Feinheit des Zementes beeinflusst den Prozess der Rissbildung auf zwei Arten. Erstens nimmt das Bluten mit zunehmender Feinheit der Zemente ab. Entsprechend steigt das Rissrisiko. Zweitens steigen die Kapillarspannungen mit zunehmender Feinheit der Zemente an, was das Rissrisiko ebenfalls erhöht. Ein Beton hergestellt mit CEM I 52.5 R oder einem feinkörnigen Zusatzstoff (z.B. Mikrosilika) weist deshalb ein hohes Rissrisiko auf.
- Durch Gesteinskörnung, die im Frischbeton Wasser aufnehmen kann, wird das Rissrisiko erhöht, weil das Bluten reduziert und die Entstehung der Kapillarspannungen begünstigt wird.

- Ist das Zementleimvolumen klein, bildet die Gesteinskörnung ein korngestütztes Gefüge, wodurch sich nur kleine Kapillarspannungen aufbauen können. Bei hohem Zementleimvolumen kann das Rissrisiko über den w/z-Wert abgeschätzt werden.
- Bei unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung aber vergleichbarer Feinheit ist der Einfluss der Zementart klein. Entsprechend unterscheidet sich das Rissrisiko bei den untersuchten CEM I 42.5 N, CEM II/A-LL, CEM II/B-M (V-LL) und CEM III/B nicht massgeblich.
- Sowohl beim Einsatz eines Luftporenmittels wie auch eines Schwindreduzierers konnte keine Änderung des Rissrisikos infolge Fröhschwinden festgestellt werden. Beim Schwindreduzierer beschränkt sich diese Aussage nur auf das verwendete Produkt.

6. Umsetzung in die Praxis

Das Risiko der Entstehung von Fröhschwindrissen besteht nur bei Bauteilen, bei denen ein wesentlicher Teil der Betonoberfläche der Verdunstung ausgesetzt ist. Dies ist im Allgemeinen bei Bodenplatten und Decken der Fall. In einem solchen Fall ist ein Beton mit einem kleinen Rissrisiko zu wählen. Dies trifft zum Beispiel auf einen Beton der Expositionsclassen XC1, XC2 und XC3 (C 25/30, NPK A und NPK B) zu. Wird bei diesen Bauteilen vom Ingenieur ein Beton für die Expositionsclassen XC4 (C 30/37, NPK C) oder höher gefordert, ist von einem hohen Rissrisiko durch Fröhschwinden auszugehen. Das Risiko für Trockenschwindrisse ist bei diesem Betontypen allerdings kleiner als bei einem Beton nach NPK A oder B. Ein erhöhtes Rissrisiko für das Auftreten von Fröhschwindrissen tritt auch bei Beton mit einer stark saugenden Gesteinskörnung auf (z.B. Recyclingbeton). Entsprechend sorgfältig ist in solchen Fällen die Nachbehandlung durchzuführen.

7. Ausblick

Bei bestimmten Parametern bestehen noch Unsicherheiten, die mit zukünftigen Untersuchungen abgeklärt werden müssen. Dies betrifft vor allem die Mechanismen, die bei tiefem w/z-Wert nur zu kleinen Kapillarspannungen führen sowie die Wirkung von beschleunigenden und verzögernden Zusatzmitteln.

Der Betonhersteller hat keine Kontrolle über die Qualität des Einbaus seines Produktes. Deshalb muss versucht werden, das Rissrisiko mit betontechnologischen Mitteln zu reduzieren. Dazu sollten verschiedene Aspekte abgeklärt werden:

- Da es sich gezeigt hat, dass nur kleine Kapillarspannungen zu erwarten sind, wenn die Gesteinskörnung ein korngestütztes Gefüge bildet, könnte unter Umständen eine Optimierung der Korngrößenverteilung auf dieses Kriterium hin das Rissrisiko reduzieren.
- Durch den eingesetzten Schwindreduzierer konnte das Rissrisiko nicht verringert werden. Weitere Abklärungen sollten es erlauben, Produkte zu identifizieren, die das Rissrisiko beim Fröhschwinden reduzieren.
- Filmbildende Substanzen wie Parafinöle, die bereits bei der Betonherstellung zugegeben werden, sollten die Verdunstungsrate an der Betonoberfläche und damit das Rissrisiko reduzieren.
- Komponenten mit hoher Porosität, die in wassergesättigter Form bei der Betonherstellung verwendet werden, können unter Umständen das Rissrisiko senken. Dazu könnten zum Beispiel eine gewisse Menge an Leichtgesteinskörnung oder SAP (super-absorbent polymer) verwendet werden.

8. Referenzen

- ASTM C 1579. Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert). ASTM International, West Conshohocken, Pa., 2006, 7 pp.
- D. Comaniciu, P. Meer. Mean Shift: A Robust Approach Towards Feature Space Analysis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 24(5) (2002) 603-619.
- EN 480-4. Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods - Part 4: Determination of bleeding of concrete, 2005.
- EN 12350-5. Testing fresh concrete – Part 5: Flow table test, 2009.
- EN 12350-6. Testing fresh concrete – Part 6: Density, 2009.
- EN 12350-7. Testing fresh concrete – Part 7: Air content - Pressure methods, 2009.
- P. F. Hansen. The Science of Construction Materials. Springer-Verlag New York, LLC, 308 p.
- H. Kayir, W.J. Weiss. A fundamental look at settlement in fresh systems: role of mixing time and high-range water reducers. First North American Conference on Self-Consolidating Concrete, Chicago, Ill., Nov. 2002, pp. 27-32.
- A. Leemann, C. Hoffmann. Trockenschwinden von Beton. cemsuisse-Projekt 200808, 2010.
- P. Lura, B.J. Pease, G. Mazzotta, F. Rajabipour, W.J. Weiss. Influence of shrinkage reducing-admixtures on the development of plastic shrinkage cracks. ACI Materials Journal 104 (2) (2007) 187-194.
- P. Lura, C. Di Bella, P. Fontana, W. Trindler, B. Münch and A. Leemann. An advanced experimental setup to study plastic shrinkage cracking of concrete. First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, 8-10 February 2011, Dubai, UAE.
- C. Qi, J. Weiss, J. Olek. Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function. Materials and Structures 36 (260) (2003) 386-395.
- A. Radocea. A model of plastic shrinkage. Magazine of Concrete Research 46 (167) (1994) 125-132.
- V. Slowik, M. Schmidt, R. Fritzsche. Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. Cement and Concrete Composites 30 (7) (2008) 557-565.
- F.H. Wittmann. On the action of capillary pressure on fresh concrete. Cement and Concrete Research 6 (1) (1976) 49-56.

Anhang A: chemische Zusammensetzung der Zemente und Zusatzstoffe

Tabelle A1

Typ	CaO [%]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MgO [%]	SO ₃ [%]	Blaine [cm ² /g]	Dichte [kg/m ³]
CEM I 42.5 N	63.1	19.0	3.5	3.2	2.3	3.0	3'150	3'130
CEM III/B 42.5 N HS	50.4	30.4	9.5	1.2	5.6	0.8	4'230	3'000
CEM I 32.5 N	65.4	18.9	3.6	3.2	2.4	2.8	2'530	3'130
CEM I 52.5 R	62.6	18.7	3.7	3.2	2.4	3.2	4'510	3'130
CEM II/A-LL 42.5 N	62.0	17.1	3.5	2.7	2.9	2.6	3'530	3'070
CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R	54.7	22.8	5.7	3.3	2.3	2.6	4'140	2'900
Flugasche	1.9	56.0	25.0	8.7	3.1	0.0	-	2'290
Elkem Silica Fume 968	0.4	92.8	0.9	0.1	0.7	0.5	-	2'600

Anhang B: Literaturrecherche über Fröhschwinden (bis 12.2009)

1. Lerch W. Plastic shrinkage. *ACI J.* 28 (8) (1957) 797-802.
2. Powers TC. The properties of fresh concrete. John Wiley & Sons, New York, 1968, 664 pp.
3. Ravina D, Shalon R. Plastic shrinkage cracking. *ACI Materi. J.* (1968) 282-292.
4. Jaegermann CH, Glücklich J. Effect of plastic shrinkage on subsequent shrinkage and swelling of hardened concrete. *Cerilh Tech PUBL* 189, 1(1-3), 1968, 126 pp.
5. Jaegermann CH, Glücklich J. Effect of high evaporation during and shortly after casting on the creep behaviour of hardened concrete. *Mater. Struct.* 2(1) (1969) 59-71.
6. Wischers G, Manns W. Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton. *Beton* 4 (1973) 167-171, 5 (1973) 222-228.
7. Wittmann FH. Zur Ursache der so genannten Schrumpfrisse. *Zement und Beton* 85/86 (1975) 10-6.
8. Wittmann FH. On the action of capillary pressure in fresh concrete. *Cem. Concr. Res.* 6(1) (1976) 49-56.
9. Chatterji S. Probable mechanisms of crack formation at early ages of concrete: a literature sur-vey. *Cem. Concr. Res.* 12 (1982) 371-376.
10. Wyers RE, Conway JC, Cady PD. Photoelastic analysis of rigid inclusions in fresh concrete. *Cem. Concr. Res* 12 (1982) 475-484.
11. Simpkins PG; Johnson DW, Fleming DA. Drying behavior of colloidal silica gels. *J. Am. Cer. Soc.* 72(10) (1986) 1816-1821.
12. Shaeles CA, Hover KC. Influence of mix proportions and construction operations on plastic shrinkage cracking in thin slabs. *ACI Materi. J.* 85 (1988) 495-504.
13. Cohen MD, Olek J, Dolch WL. Mechanisms of plastic shrinkage cracking in Portland cement and Portland cement-silica fume paste and mortar. *Cem. Concr. Res.* 20(1) (1990) 103-119.
14. Mangat PS, Azari MM. Plastic shrinkage of steel fibre reinforced concrete. *Mater. Struct.* 23(3) (1990) 186-195.
15. Padron I, Zollo RF. Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of portland ce-ment and mortar. *ACI Materi. J.* 87 (4) (1990) 327-332.
16. Brinker CJ, Scherer GW. *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing.* New York: Academic Press, 1990.
17. Nanni A, Ludwig DA, McGills MT. Plastic shrinkage cracking of restrained fiberreinforced concrete. *Transp. Res. Rec.* 1382 (1991) 69-72.
18. Senbetta E, Bury MA. Control of plastic shrinkage cracking in cold weather. *Concrete International* 1991.
19. Cabrera JG, Cusens AR, Brookes -Wang Y. Effect of superplasticizers on the plastic shrinkage of concrete. *Mag. Concr. Res.* 44(160) (1992) 149-61.
20. Scherer GW. Crack-tip stress in gels. *Journal of Non-Crystalline Solids* 144 (1992) 210-216.
21. Radocea A. A study on the mechanisms of plastic shrinkage of cement-based materials. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1992.
22. Banthia N., Azzabi M., Pigeon M. Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites. *Mater. Struct.* 26(7) (1993) 405-413.
23. Soroushian P, Mirza F, Alhozaimy A. Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber-reinforced concrete slabs. *Transportation Research Record* 1382 (1993) 69-72.
24. Johansen R, Dahl PA, Skjolvold O. Control of plastic shrinkage in concrete at early ages. 18th Conf. on Our World in Concrete & Structures: 25-27 Aug. 1993, Singapore, 149-154.
25. Berke NS, Dalliare MP. The effect of low addition rate of polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking and mechanical properties of concrete. *Fiber reinforced concrete: development and innovations, ACI SP-142-2* (1994)19-41.
26. Sanjuán MA, Moragues A. A testing method for measuring plastic shrinkage in polypropylene fibre reinforced mortars. *Materials Letters* 21(3-4) (1994) 239-246.
27. Sanjuán MA, Moragues A. Model for predicting plastic shrinkage of polypropylene reinforced mortars. *J. Mat. Sci.* 29 (1994) 2821-2825.
28. Radocea A. A model of plastic shrinkage. *Mag. Concr. Res.* 46(167) (1994) 125-132.
29. Balaguru P. Contribution of fibers to crack reduction of cement composites during the initial and final setting period, *ACI Materi. J.* 91 (3) (1994) 280-288.
30. Berke NS, Dallaire MP. The effect of low addition rated of polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking and mechanical properties of concrete, in: J.I. Daniel, S.P. Shah (Eds.), *Fiber Reinforced Concrete: Developments and Innovations, ACI SP-142*, 1994, 19-42.
31. Bloom R, Bentur A. Free and restrained shrinkage of normal and high-strength concretes. *ACI Materi. J.* 92(2) (1995) 211-217.
32. Soroushian P, Mirza F, Alhozaimy A. Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber-reinforced concrete. *ACI Materi. J.* 92 (1995) 553-560.
33. Kronloff A, Leivo M, Sipari P. Experimental study on the basic phenomena on shrinkage and cracking of fresh mortar, *Cem. Concr. Res.* 25 (8) (1995) 1747-1754.
34. Yokoyama K, Hiraishi S, Kasai Y, Kishitani K. Experimental study of shrinkage and cracking of flowing concrete at early ages. *JCA Proc. Cem. Concr.* 50 (1996) 588-593.
35. Banthia N, Yan C, Mindess S. Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced concrete: A novel test technique. *Cem. Concr. Res.* 26(1) (1996) 9-14.

36. Samman TA, Mirza WH, Wafa FF. Plastic shrinkage cracking of normal and high-strength con-crete: a comparative study. *ACI Materi. J.* 93(1) (1996) 36-40.
37. Sanjuán MA, Moragues A. Polypropylene-fibre-reinforced mortar mixes: Optimization to con-trol plastic shrinkage. *Composites Science and Technology* 57(6) (1997) 655-660.
38. Behzad A, Al-Madami I, Al-Khaji W, Al-Bastaki N. Plastic shrinkage and strength characteris-tic of concrete using rubber tyre fibre waste. 5th int conf: deterioration & repair of R.C. in the Arabian Gulf conf. Proc, vol1, 1997.
39. Aitcin PC, Neville AM, Acker P. Integrated view of shrinkage deformation. *Concr. Int.* 19(9) (1997) 35-41.
40. Soroushian P, Ravanbakhsh S. Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fi-bers. *ACI Materi. J.* 95 (4) (1998) 429-435.
41. Raghavan D, Huynh H, Ferraris CF. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite. *Journal of Materials Science* 33(7) (1998) 1745-1752.
42. Uno PJ. Plastic shrinkage cracking and evaporation formulae. *ACI Materi. J.* 95(4) (1998) 365-375.
43. Bjøntegaard Ø, Hammer TA, Sellevold EJ. Cracking in high performance concrete before set-ting. *Int. Sym. on High Performance and Reactive Powder Concrete*, Sherbrooke, Canada, V. 1, Aug. 1998, 332-348.
44. Almussalam AA, Maslehuddin M, Abdul-Waris M, Dakhil FH, Al-Amoudi OSB. Plastic shrinkage cracking of blended cement concretes in hot environments. *Mag. Concr. Res.* 51 (1999) 241-246.
45. Almusallam AA, Abdul-Waris M, Maslehuddin M, Al-Gahtani S. Placing and shrinkage at ex-treme temperatures. *Concr. Int.* 21 (1) (1999) 75-79.
46. Tolêdo Filho RD, Sanjuán MA. Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. *Cem. Concr. Res.* 29(10) (1999) 1597-1604.
47. Woignier T, Beurroies I. Plastic densification in silica aerogels. *The European physical journal AP* 6, 267271 (1999).
48. Gram H-E, Pentti P. Properties of SCC: Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance. 1st Int. RILEM Symp. on Self-compacting Concrete, Stockholm, 1999, 211-225.
49. Naaman AE, Xia Z, Hikasa JI, Saito T. Control of plastic shrinkage cracking of concrete with PVA fibers. *Infrastructure regeneration and rehabilitation improving the quality of life through better construction : a vision for the next millennium*, Sheffield, 28 June - 2 July 1999, 429-441.
50. Banthia N, Yan C. Shrinkage cracking in polyolefin fiber-reinforced concrete. *ACI Mat. J.* (2000) 432-437.
51. Mora J, Gettu R, Olazábal C, Martín MA, Aguado A. Effect of the incorporation of fibers on the plastic shrinkage of concrete, in: P. Rossi, G. Chanvillard (Eds.), *Fibre-Reinforced Concretes*, Proc. Int. Symp. BEFIB'2000 (Lyon, France), RILEM S.A.R.L., Cachan, 2000, 705-714.
52. Mora J, Martín MA, Gettu R, Aguado A. Study of plastic shrinkage cracking in concrete and the influence of fibers and a shrinkage reducing admixture, in: V.M. Malhotra (Ed.), *Proc. 5th CANMET/ACI Int. Conf on Durability of Concrete* (Barcelona, Spain), Supp. Papers, 2000, 469-483.
53. Bentz D, Hansen K, Madsen H, Vallée F, Griesel E. Drying/hydration in cement pastes during curing. *Mater. Struct.* 34(9) (2001) 557-565.
54. Bentz DP, Geiker, MR, Hansen KK. Shrinkage-reducing admixtures and early age desiccation in cement pastes and mortars. *Cem. Concr. Res.* 31(7) (2001) 1075-1085.
55. Hammer TA. Effect of silica fume on the plastic shrinkage and porewater pressure of high-strength concretes. *Mat. Struct.* 34 (2001) 273-278.
56. Wang KJ, Shah SP, Phuaksuk P. Plastic shrinkage cracking in concrete materials -Influence of fly ash and fibers. *ACI Mat. J.* 98 (2001) 458-464.
57. Almusallam AA. Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. *Cem. Concr. Comp.* 23 (4-5) (2001) 353-361.
58. Al-Fadhala M, Hover KC. Rapid evaporation from freshly cast concrete and the Gulf environ-ment. *Constr. Build. Mat.* 15(1) (2001) 1-7.
59. Ramakrishnan V. Concrete plastic shrinkage reduction potential of synergy fibers. *Symp. of the 80th Annual Transportation Research Board Meeting*, Washington, D.C., Jan.7-11, 2001, CD-ROM.
60. Hammer TA. The relationship between settlement and plastic shrinkage of high strength con-crete. *Early Age Cracking in Cementitious Systems EAC'01: Haifa, Israel*, Bentur and Kovler eds., 2001, 89-102.
61. Flatt J R, Houst Y F. A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cem. Concr. Resea.* 31(2001) 1169-1176.
62. Bayasi Z, McIntyre M. Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete. *ACI Materi. J.* 99(4) (2002) 337-344.
63. Branch J, Hannant DJ, Mulheron M. Factors affecting the plastic shrinkage cracking of high-strength concrete. *Mag. Concr. Res.* 54 (5) (2002) 347-354.
64. Najm H, Balaguru P. Effect of large-diameter polymeric fibers on shrinkage cracking of cement composites. *ACI Materi. J.* 99(4) (2002) 345-351.
65. Ma Y, Tan M, Wu K. Effect of different geometric polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking of cement mortars. *Mater. Struct.* 35(3) (2002) 165-169.
66. Hammer TA. Is there a relationship between pore water pressure and autogenous shrinkage be-fore and during setting? In: Persson and Fagerlund (eds), *3rd Int. Res. Sem. on Self-Dessication and Its Importance in Concrete Technology*, 14-15 June 2002, Lund, Sweden, 27-38.

67. Kayir H, Weiss WJ. A fundamental look at settlement in fresh systems: role of mixing time and high-range water reducers. First North American Conf. on Self-Consolidating Concrete, Chi-cago, Ill., Nov. 2002, 27-32.
68. Holt E, Schodet O. Self-compacting concrete: early age shrinkage. VTT Technical report RTE40-IR-21/2002, Finland, 2002, 26 pp.
69. Dias WPS. Influence of mix and environment on plastic shrinkage cracking. Mag. Concr. Res. 55 (4) (2003) 385-394.
70. Mora I, Aguado A, Gettu R. The influence of shrinkage reducing admixtures on plastic shrink-age. Materiales de Construccion 53(271-272) (2003) 71-80.
71. Qi C, Weiss WJ, Olek J. Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using semi-automated image analysis. Concr. Sci. Eng. 36(260) (2003) 386-395.
72. Qi C. Quantitative assessment of plastic shrinkage cracking and its impact on the corrosion of steel reinforcement. PhD thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2003.
73. Qi C, Weiss WJ, Olek J. Image analysis of plastic shrinkage cracking in high strength concrete containing hybrid fiber reinforcement. Role of Concrete in Sustainable Development, Proc. Int. Symp. Dedicated to Surendra Shah. Dhir, Newlands, Paine, eds., Sept. 2003, 209-218.
74. Turcry P, Loukili A. A study of plastic shrinkage of self-compacting concrete. Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, Wallevik and Nielsson eds., RILEM Publications SARL, 2003, 576 – 585.
75. Ma Y, Zhu B, Tan M, Wu K. Effect of Y type polypropylene fiber on plastic shrinkage cracking of cement mortar. Mater. Struct. 37(2) (2004) 92-95.
76. Kaufmann J, Winnefeld F, Hesselbarth D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. Cement & Concrete Composites 26 (2004) 541–549.
77. Baghabra Al-Amoudi OS, Maslehuddin M, Abiola TO. Effect of type and dosage of silica fume on plastic shrinkage in concrete exposed to hot weather Constr. Build. Mat. 18(10) (2004) 737-743.
78. Flatt R J. Towards a prediction of superplasticized concrete rheology. Mat. and Struc. Vol. 37, June 2004, pp 289-300.
79. Agostinacchio M, Cuomo G. Plastic shrinkage reduction in concrete pavements due to the addition of both steel and polymer-modified fibres. Concrete 38(6) (2004) 44-46.
80. Qi C, Weiss WJ, Olek J. Statistical significance of the restrained slab test for quantifying plastic cracking in fiber reinforced concrete. J. ASTM Int. 2(7) (2005) 18 pp.
81. Naaman AE, Wongtanakitcharoen T, Hauser G. Influence of different fibers on plastic shrink-age cracking of concrete. ACI Materi. J. 102(1) (2005) 49-58.
82. Qi C, Weiss WJ, Olek J. Assessing the settlement of fresh concrete using a non-contact laser profiling approach. Int. Conf. on Construction Materials: ConMat'05, 2005, Vancouver, Canada.
83. Hover KC. Evaporation of water from concrete surfaces. ACI Materi. J. 103(5) (2006) 384-389.
84. Morris PH, Dux PF. Crack depths in desiccating plastic concrete. ACI Materi. J. 103(2) (2006) 90-96.
85. Banthia N, Gupta R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. Cem. Concr. Res. 36(7) (2006) 1263-1267.
86. Turcry P, Loukili A. Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete. ACI Mat. J. 103(4) (2006) 272-279.
87. Baghabra Al-Amoudi OS, Abiola TO, Maslehuddin M. Effect of superplasticizer on plastic shrinkage of plain and silica fume cement concretes. Constr. Build. Mat. 20(9) (2006) 642-647.
88. Kwak H-G, Ha S-J. Plastic shrinkage cracking in concrete slabs. Part I: a numerical model. Mag. Concr. Res. 58 (8) (2006) 505-516.
89. Leeman A, Winnefeld F. Influence of workability and admixtures on the segregation of concrete during compaction 2nd intern symposium on advances in concrete 11-13 Sept. 2006.
90. Tian Q, Liu J, Miao C, Sun W. Measurement of the pore water pressure of early age cement-based materials: significance, techniques and engineering outlooks. Inter. Conf. on Microstructure related Durability of cementitious Composites. 13-15 October 2008, China.
91. Hammer TA, Fosså KT. Influence of entrained air voids on pore water pressure and volume change of concrete before and during setting. Mater. Struct. 39(9) (2006) 801-808.
92. Hammer TA. The use of pore water pressure to follow the evolution from fresh to hardened concrete. In: Proceedings of the 2nd Int. Symp. on Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec City, Canada; September 11–13, 2006.
93. Jensen OM. Monitoring water loss from fresh concrete. Int. RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning (ConcreteLife'06), 14-16 March 2006, Ein-Bokek, Israel, 197-202.
94. Lura P, Mazzotta G, Rajabipour F, Weiss WJ. Evaporation, settlement, temperature evolution, and development of plastic shrinkage cracks in mortars with shrinkage-reducing admixtures. Int. RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning (ConcreteLife'06), 14-16 March 2006, Ein-Bokek, Israel, 203-213.
95. ASTM C 1579. Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert). ASTM International, West Conshohocken, Pa., 2006, 7 pp.
96. Sivakumar A, Santhanam M. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. Cem. Concr. Comp. 29(7) (2007) 575-581.
97. Lura P, Pease B, Mazzotta GB, Rajabipour F, Weiss J. Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks. ACI Materi. J. 104 (2) (2007) 187-194.
98. Wongtanakitcharoen T, Naaman AE. Unrestrained early age shrinkage of concrete with poly-propylene, PVA, and carbon fibers. Mater. Struct. 40(3) (2007) 289-300.
99. Schmidt, D., Slowik, V., Schmidt, M., Fritzsche, R.: Auf Kapillardruckmessung basierende Nachbehandlung von Betonflächen im plastischen Materialzustand. Beton- und Stahlbetonbau, 102(11) (2007) 789-796.

100. Bentz D, Haecker C, Peltz M. X-Ray absorption studies of drying og cementitious tile adhe-sive mortars. *Cem and Concr. Composites* (2007).
101. Hammer, T.A., Deformations, strain capacity and cracking of concrete in plastic and early hardening phases, PhD, Department of Structural Engineering, Norwegian University of Sci-ence and Technology, 2007, 160 pp.
102. Slowik, V., Schmidt, M., Fritsch, R.: Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value. *Cement and Concrete Composites*, 30 (7) (2008), 557-565.
103. Liu, J., Tian, Q., Miao, C. and Tang, M.: Preliminary results about mechanism investigation of plastic shrinkage cracking of cement based materials. In: Sun, W, van Breugel, K., Miao, C. (eds), 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitions Com-posites, 13-15 October 2008, Nanjing, China, pp. 1491-1500.
104. Slowik, V., Hübner, T., Villmann, B., Schmidt, M.: Capillary Pressure and Cracking in Early Age Concrete. In: Schlangen, E. and De Schutter, G. (eds), International RILEM Sympo-sium on Concrete Modelling - CONMOD'08, 26-28 May 2008, Delft, The Netherlands, pp. 673-680.
105. Lin S.T, Huang R, Weng T-L. Effect of viscosity modifying agent on the plastic shrinkage cracking of cement mortar. 3th intern. Conf- ACF/VCA 2008.
106. Mora-Ruacho, J., Gettu, R., Aguado, A.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*, 39 (3) (2009), pp. 141-146.
107. Henkensiefken R, Briatka P, Bentz D, Nantung T, Weiss J. Plastic shrinkage cracking in internally cured mixtures made with pre-wetted lightweight aggregate. *Concrete International* 2009.
108. Lin S-T, Huang R. Effect of viscosity modifying agent on plastic shrinkage cracking of cementitious composites. *Mater. Struct.* 2010, in press DOI 10.1617/s11527-009-9518-7
109. Slowik V, Neumann A, Dorow J. Early age cracking and its influence on the durability of concrete structures. Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and concrete struc-tures. 2009 Taylor & Francis Group, London.
110. Megias- Alguacil D, Gauckler L J. Capillary forces between two solid spheres linked by a concave liquid bridge: regions of existence and forces mapping. *AIChE*. DOI 10.1002/aic.11726. March 23, 2009.