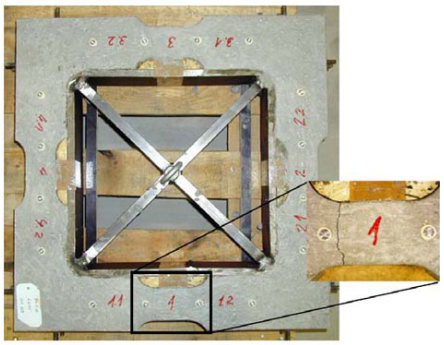


Trockenschwinden von Beton

EMPA, Abteilung Beton / Bauchemie

Dr. Andreas Leemann
Cathleen Hoffmann

cemsuisse-Projekt 200808 – Dezember 2009
Diese Forschungsarbeit wurde durch cemsuisse, Verband der Schweizerischen Cementindustrie mitfinanziert

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **3**

1. Einleitung **4**

2. Materialien und Methoden **5**

3. Resultate und Diskussion **8**

3.1 Frischbeton 8

3.2 Festigkeit und E-Modul 8

3.3 Schwinden und Massenverlust 9

3.4 Kriechen 12

3.5 Behindertes Schwinden 14

3.5.1 Schwindquadrate 14

3.5.2 Reissrahmen 15

4. Berechnung und Modellierung des Schwindens und Kriechens **16**

5. Schlussfolgerungen **17**

6. Umsetzung **18**

7. Referenzen **19**

Für das cemsuisse-Projekt 200808: Trockenschwinden von Beton

Dübendorf, Abteilung Beton / Bauchemie, 23.12.2009

Dr. Andreas Leemann

Zusammenfassung

Dauer: Dezember 2008 - Dezember 2009

Projektteam: A. Leemann (Projektleitung), C. Hoffmann / Empa

Im vorliegenden Projekt wurde das Trockenschwinden von Beton mit praxisüblichem Zementgehalt und w/z-Wert untersucht. Ziel des Projektes war einerseits abzuklären, ob sich Schwankungen im Zementgehalt oder im Wassergehalt stärker auf das Trockenschwinden auswirken und andererseits wie unterschiedliche Zementarten auf das Trockenschwinden auswirken.

Es wurden vier verschiedenen Zemente eingesetzt (CEM I 42.5 N / CEM II/A-LL 42.5 N / CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R / CEM III/B 42.5 L-LH HS). Von jedem Zement wurden fünf Betonmischungen mit einer Variation des Zementgehalts von 280-360 kg/m^3 und einer Variation des Wassergehalts von 128-192 l/m^3 hergestellt. Neben dem Schwinden wurden Festigkeiten, E-Modul und Kriechen bestimmt. Bei ausgewählten Mischungen wurde das Rissrisiko beim behinderten Schwinden erfasst.

Es konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Bei praxisüblichen Betonen (geringer Unterschied im Zementsteinvolumen) wirkt sich eine Veränderung des Wassergehaltes deutlich stärker auf das Endschwindmass aus als eine Veränderung des Zementgehaltes.
- Um einen schwindarmen Beton herzustellen, muss das Zementsteinvolumen in erster Line über eine Reduktion des Wassergehaltes und nicht des Zementgehaltes optimiert werden. Dabei gilt es aber auch zu berücksichtigen, dass Beton mit tiefem w/z-Wert wegen dem autogenen Schwinden in den ersten Tagen eine höhere Schwindverformung aufweisen kann.
- Beton hergestellt mit CEM II/B-M (V-LL) schwindet weniger stark als Beton hergestellt mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM III/B.
- Beginnt das Austrocknen nach zwei Tagen ist das Rissrisiko bei Beton aus CEM II/A-LL und CEM II/B-M (V-LL) kleiner bei Beton aus CEM I. Das höchste Rissrisiko unter diesen Bedingungen weist Beton aus CEM III/B auf.
- Das Rissrisiko ist nicht nur vom verwendeten Beton abhängig sondern wird durch die Art der Konstruktion und die Nachbehandlung massgeblich beeinflusst.

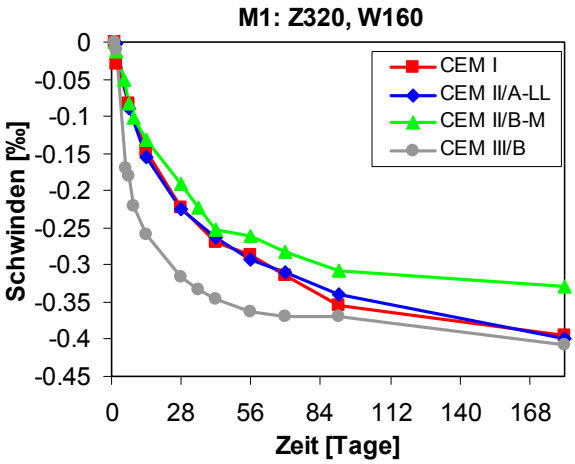


Abbildung: Schwinden von Beton hergestellt mit vier verschiedenen Zementen (Zementgehalt: 320 kg/m^3, Wassergehallt: 160 l/m^3).

1. Einleitung

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

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

Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass diese Unterteilung stark vereinfacht ist. Das Frühschwinden (< 1 Tag) beinhaltet neben kapillarem Wasserverlust durch Verdunstung auch chemisches Schwinden und innere Selbstaustrocknung. Zudem ist der Mechanismus fürs Schwinden beim Trockenschwinden und der inneren Selbstaustrocknung derselbe, nur die Ursache der abnehmenden Feuchte ist eine andere. Beachtet werden sollte, dass beim Trockenschwinden ein Feuchtigskeitgradient im Beton entsteht, während das autogene Schwinden zu einer homogenen Abnahme der Feuchtigkeit innerhalb des Betonquerschnitts führt.

In diesem Projekt wird das "Trockenschwinden" so definiert, dass es die Längenänderung eines Betonprüfkörpers in einem offenen System beschreibt. Das heisst, dass es einerseits das Schwinden durch einen Wasserverlust an die Umgebung als auch das autogene Schwinden umfasst.

Untersuchungen von konventionell vibriertem Beton (CVC) und selbstverdichtendem Beton (SCC) haben gezeigt [1], dass das Trockenschwinden in erster Linie eine Funktion des Zementleimvolumens und in zweiter Linie eine Funktion des Wassergehaltes ist. Da beim SCC aber nicht nur das Schwinden sondern auch das Kriechen erhöht ist, muss je nach Bauteil respektive Behinderungsgrad, Austrocknungsgrad und -geschwindigkeit nicht zwingend ein höheres Rissrisiko entstehen. Die Unterschiede im Zementleimvolumen zwischen CVC und SCC sind beträchtlich (70-100 l/m^3). Bei unterschiedlichen Mischungen von CVC sind die Unterschiede viel kleiner, weil sich der Zement- respektive Bindemittelgehalt in einem relativ engen Rahmen bewegt (ca. 280-360 kg/m^3, Volumen von 80 kg CEM I 42.5 N = 25 Liter). Die Unterschiede im Wassergehalt können hingegen beträchtlich sein (z. Bsp. 128-192 Liter, Differenz = 64 Liter). Die Folge davon ist, dass Änderungen des Zementleimvolumens wahrscheinlich in erster Linie durch Änderungen des Wassergehalts und nicht des Zementgehalts verursacht werden. Das Versuchsprogramm berücksichtigt diesen Umstand.

Im Projekt soll das Trockenschwinden von praxisüblichen Betonen untersucht werden (siehe SN EN 206-1: 2000, NA3), um den Einfluss der folgenden Parameter zu erfassen:

- Zementmenge
- Wassergehalt
- Zementtyp

Neben der Druckfestigkeit und dem Schwinden wird auch das E-Modul und das Kriechen bestimmt, um das relative Rissrisiko beim behinderten Schwinden abschätzen zu können. Für die zwei Betone pro Zementart wurden Schwindquadrate zur Bestimmung des Risszeitpunktes beim behinderten Schwinden hergestellt.

Bei der Auswertung der Ergebnisse werden auch die Erkenntnisse aus dem cemsuisse-Projekt "SCC - Schwinden und Auswirkungen des Schwindens" beigezogen [1].

2. Materialien und Methoden

Es wurden vier verschiedene Zemente eingesetzt:

- CEM I 42.5 N (Zementwerk A)
- CEM II/A-LL 42.5 N (Werk B)
- CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R (Zementwerk A)
- CEM III/B 42.5 L-LH HS (Zementwerk C)

Pro Zementtyp wurden fünf verschiedene Betonmischungen hergestellt (Tabelle 1 / Zementdaten im Anhang). Dabei wurden der Zementgehalt und der Wassergehalt systematisch variiert (Abbildung 1 und 2). Als Gesteinskörnung wurde Alluvialkies 0/32 verwendet. Als Fliessmittel wurde ein Polycarboxylat-Produkt eingesetzt.

Beton	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**
Gestein 0/32 mm	1890	1924	1959	2010	1839
Zementgehalt	320	360	280	320	320
Wassergehalt	160	160	160	128	192
Fliessmitteldosierung	gering	mittel	gering	hoch	-
Zementleimvolumen*	262	275	249	230	294
w/z-Wert	0.50	0.44	0.57	0.40	0.60

*ohne Berücksichtigung des Luftgehaltes und des Zusatzmittels

Tabelle 1: Betone hergestellt mit CEM I (Dichte ~3.1.3 kg/m^3). Bei den anderen Zementen variiert aufgrund der unterschiedlichen Zementdichten der Anteil an Gesteinskörnung und auch das Zementsteinvolumen leicht.

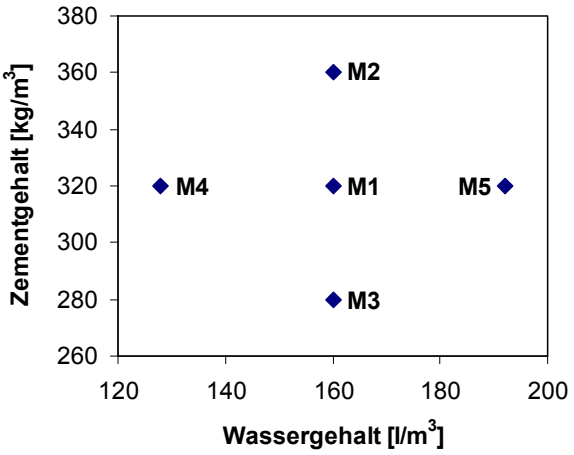


Abbildung 1: Zementgehalt als Funktion des Wassergehaltes.

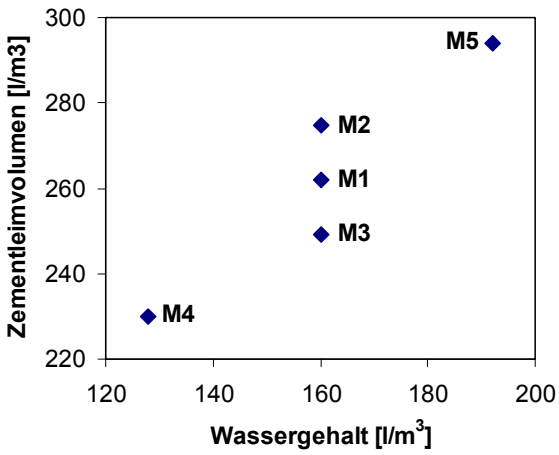


Abbildung 2: Zementleimvolumen als Funktion des Wassergehaltes.

Die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit sowie des E-Moduls erfolgte im Alter von 2, 7 und 28 Tagen nach SN EN 12390-3 respektive SIA 262/1. Die Bestimmung des Schwindens erfolgte nach SIA 262/1 ab einem Alter von 24 h bis 182 Tage. Diese Messungen wurden an allen Betonen durchgeführt. Da die Prüfkörper zur Bestimmung des Risszeitpunktes (Schwindquadrate, s. unten) erst nach 2 Tagen ausgeschalt werden konnten, wurden die Prismen für die Schwindmessungen zwar normgemäss nach 24 Stunden ausgeschalt (inklusive Nullmessung) aber nochmals für 24 h mit Plastik abgedeckt. Ab einem Alter

von zwei Tagen wurden die Prismen auch bei jeder Schwindmessung gewogen, um den Massenverlust der Prüfkörper über Verdunstung zu erfassen.

Das Kriechen nach SIA 262/1 wurde bis 91 Tage gemessen. Dabei wurde die Drucklast bereits nach 2 Tagen eingeleitet und jeweils nach 7 und 28 Tagen erhöht (Abbildung 3). Die Last entsprach jeweils einem Drittel der zum entsprechenden Zeitpunkt gemessenen Druckfestigkeit. Damit entsteht ein direkter Bezug zur Festigkeitsklasse des Betons. Zur Berechnung der Kriechzahl wurde jeweils die Kriechverformung mit der Summe der elastischen Verformung der vorangegangen Belastungsstufen dividiert. Bei jeder Zementart wurden bei den Schwindquadraten und dem Kriechen die Betone M1 (Z320, W160) und M4 (Z320, W128) gemessen.

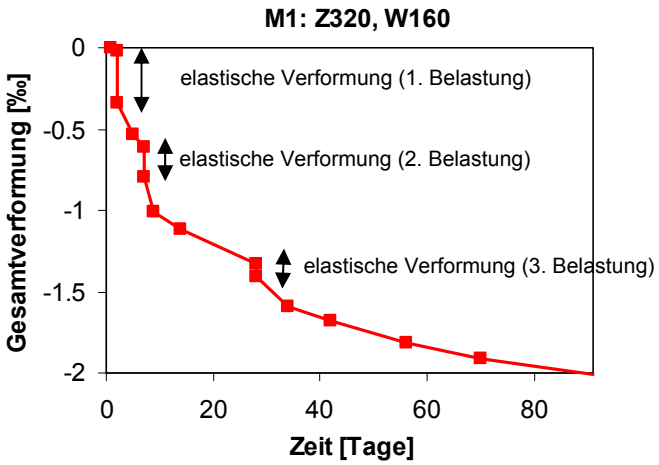


Abbildung 3: Die gemessenen Gesamtverformung zur der Bestimmung der Kriechverformung. Um die Kriechverformung zu berechnen, müssen die elastische Verformung bei den drei Belastungsstufen und die Schwindverformung (separat gemessen) von der Gesamtverformung subtrahiert werden.

Um den Risszeitpunkt beim behinderten Schwinden zu bestimmen, wurden quadratische Stahlprofile mit abgerundeten Ecken verwendet, die durch zwei diagonal eingeschweisste Flachstähle verstärkt wurden (Abbildung 4). Durch das Schwinden des Betons entstanden im Stahl Druckspannungen, die durch Zugspannungen im Beton ausgeglichen wurden. Um Risse in den Ecken des Betons zu vermeiden, wurden diese mit Stäben Ø 8 mm und 200 mm Länge bewehrt. Das Austrocknen des Betons war von allen Seiten her möglich ausser von der durch das Stahlprofil bedeckten Innenfläche. Die Prüfkörper wurden nach dem Betonieren während 48 Stunden bei 20°C und etwa 99% RF gelagert. Danach erfolgte eine Lagerung bei 20°C und 70% RF. Im Alter von 28 Tagen wurden die Lagerungsbedingungen auf 20°C und 35% r. F. geändert, um die Rissbildung zu beschleunigen. Die Prüfkörper wurden täglich visuell auf neu aufgetretene Risse untersucht, um so den Risszeitpunkt zu bestimmen. Der Risszeitpunkt wurde als Betonalter beim Auftreten des Risses definiert. Pro Prüfkörper entstand bei dieser Anordnung ein einzelner Riss an einer der Sollbruchstellen (Querschnittsverengung auf 60 mm, S. Abbildung 4). Von den Betonen M1 und M4 wurden jeweils zwei Prüfkörper hergestellt. Bei den Betonen mit CEM III/B traten die ersten Risse noch vor dem Ausschalen nach 48 h auf. Offenbar reichte der minimale Wasserverlust durch das Saugen der Schalung und das autogene Schwinden, um Schwindspannungen zu erzeugen, welche die Zugfestigkeit des Betons überschritten.

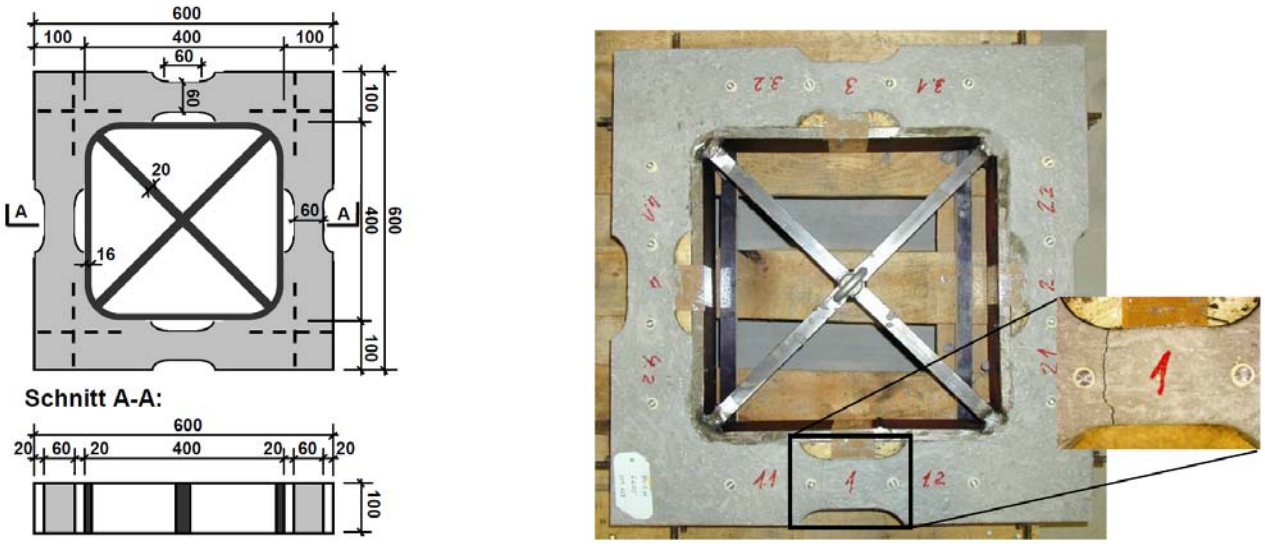


Abbildung 4: Schwindquadrat.

Die Schwindspannung, die sich beim behinderten Schwinden entwickelt, wurde beim Beton M4, hergestellt mit den Zementen CEM I, CEM II/B-M und CEMIII/B in einem sogenannten Reissrahmen gemessen (Abbildung 5). Der Betonquerschnitt beträgt 15 x 15 cm^2, die freie Länge 125 cm. An beiden Enden ist der Beton im Stahlrahmen verankert. Sobald der Beton schwindet, werden die Verformungen durch den Stahlrahmen behindert. Dadurch entstehen im Beton Zugspannungen, die sich im Gleichgewicht mit den Druckspannungen in den beiden Stahlrohren des Rahmens befinden. Die Verformung der Stahlrohre aufgrund der Druckspannungen wird mittels Dehnmessstreifen gemessen. Daraus kann die die Spannung im Beton in Funktion der Zeit berechnet werden. Der Prüfkörper wurde bis 24h nach Herstellung abgedeckt, danach ausgeschalt und bei 20°C und 70% RF gelagert. Der Prüfkörper wurde an zwei Stellen durch Rollen gestützt, um eine Durchbiegung zu verhindern. Der Behinderungsgrad im Reissrahmen ist vom E-Modul des Betons abhängig und liegt im Bereich von 76-80%.

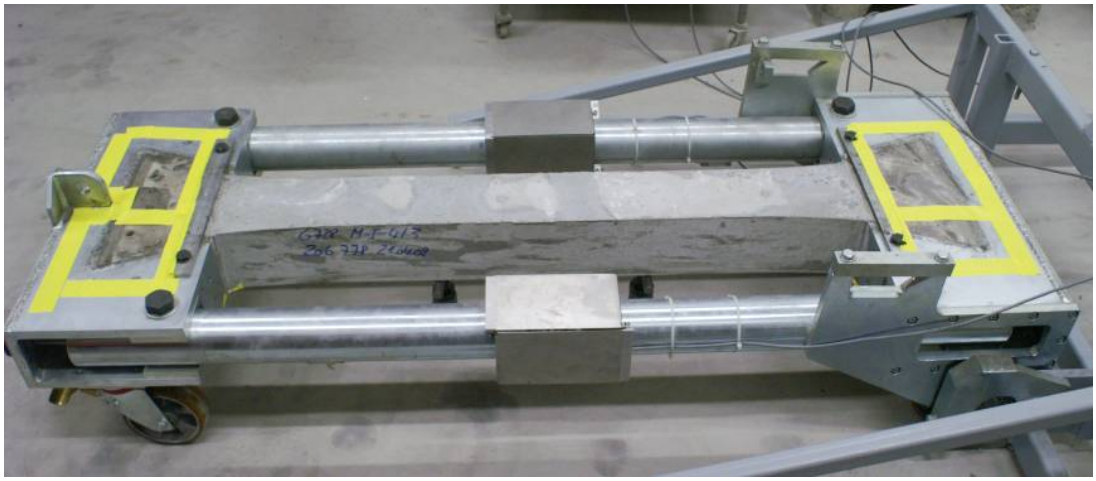


Abbildung 5: Reissrahmen.

3. Resultate und Diskussion

3.1 Frischbeton

Die Frischbetonwerte sind im Anhang (Tabelle A-2) aufgeführt.

3.2 Festigkeit und E-Modul

Die Druckfestigkeit (Prismenhälften) zeigt bei allen Betonen die übliche Abhängigkeit vom w/z-Wert (Abbildung 6). Beim Vergleich der Festigkeitsentwicklung zeigt Beton hergestellt mit CEM II/A-LL nach 7 Tagen die kleinste Zunahme und Beton hergestellt mit CEM III/B die grösste (Abbildung 7). Die üblichen Unterschiede im Verhältnis von Druckfestigkeit zu E-Modul als Folge der unterschiedlichen Zementsteinvolumina sind bei einem Vergleich der Betone hergestellt mit CEM I nicht ersichtlich (Abbildung 8). Erst wenn der Mittelwert der Betone hergestellt mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-M herangezogen wird, zeigen die Betone M5 (Z320, W192) ein tieferes E-Modul (Abbildung 9).

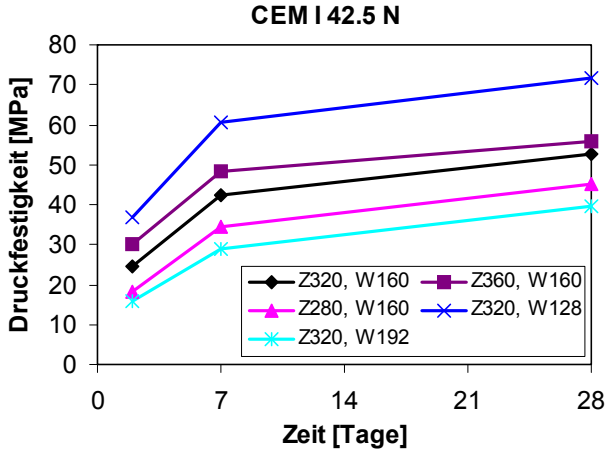


Abbildung 6: Druckfestigkeit als Funktion der Zeit für die mit CEM I hergestellten Betone (Abfolge der w/z-Werte: 0.40, 0.44, 0.50, 0.57, 0.60).

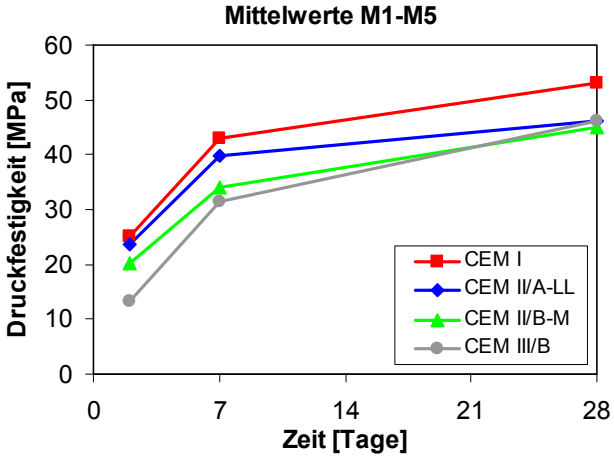


Abbildung 7: Druckfestigkeit als Funktion der Zeit für die mit den verschiedenen Zementen hergestellten Betone M1-M5.

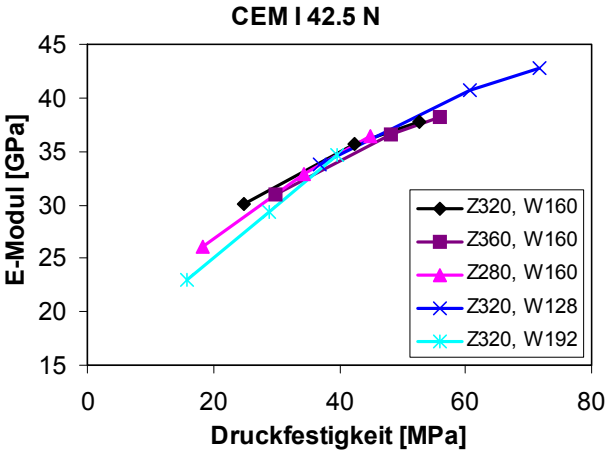


Abbildung 8: E-Modul als Funktion der Druckfestigkeit für die mit CEM I hergestellten Betone. Werte im Alter von 2, 7 und 28 Tagen.

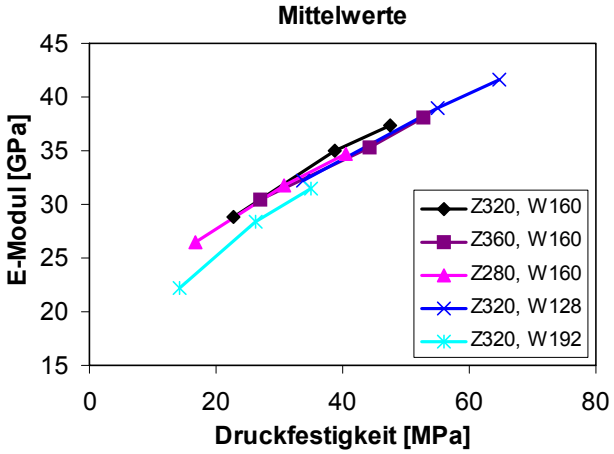


Abbildung 9: E-Modul als Funktion der Druckfestigkeit für die mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-M hergestellten Betone. Werte im Alter von 2, 7 und 28 Tagen.

Dass sich die Unterschiede im Zementsteinvolumen der verschiedenen Betone von immerhin 64 l/m^3 (M4: 230 l/m^3, M5: 294 l/m^3) kaum auswirken, hängt vermutlich mit dem Gefüge des Betons zusammen. Offenbar

sind bei den Betonen M1-M4 noch so viele direkte Kornkontakte zwischen Gesteinskörnern vorhanden, dass das Verhältnis Druckfestigkeit/E-Modul nicht beeinflusst wird.

Das Verhältnis zeigt aber gewisse Unterschiede, wenn die Mittelwerte der Betone hergestellt mit den verschiedenen Zementen verglichen werden (Abbildung 10). Die Betone hergestellt mit CEM III/B zeigen im Alter von 2 und 7 Tagen bezogen auf die Druckfestigkeit ein tieferes E-Modul. Ob diese Differenz auf Unterschiede im E-Modul des unhydratisierten Zementes oder der Hydratationsprodukte zurückzuführen sind, kann nicht beurteilt werden. Es gilt aber zu vermerken, dass das Zementsteinvolumen auch eine gewisse Variation aufweist, die auf die Dichte des Zementes zurückzuführen ist. Da die Zementdosierung als Masseanteil erfolgte, steigt das Zementsteinvolumen des Betons mit abnehmender spezifischer Dichte des Zementes.

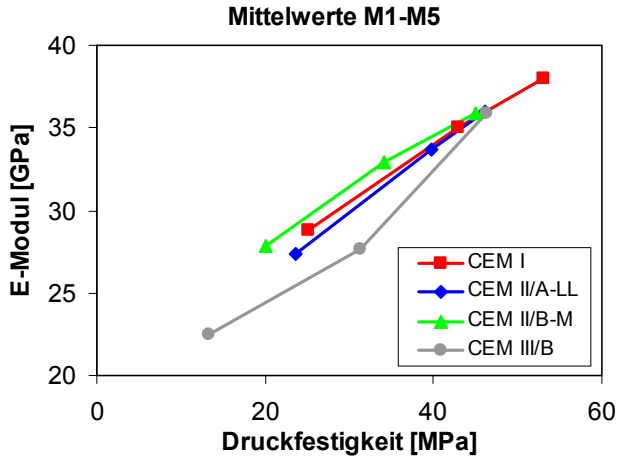


Abbildung 10: E-Modul als Funktion der Druckfestigkeit für die mit den verschiedenen Zementen hergestellten Betone M1-M5. Werte im Alter von 2, 7 und 28 Tagen.

3.3 Schwinden und Massenverlust

Die Unterschiede im Schwinden der Betone M1-M5 sind verhältnismässig klein (Abbildung 11). Trotzdem lässt sich erkennen, dass die Betone mit einem relativ hohen Zementsteinvolumen bis zu einem Alter von 182 Tagen etwas stärker schwinden als die Mischungen mit einem relativ kleinen Zementsteinvolumen. Des Weiteren zeigen sich gewisse Unterschiede im Verlauf des Schwindens. Betone mit relativ tiefem w/z-Wert schwinden in den ersten sieben Tagen verhältnismässig stark verglichen mit Mischungen mit relativ hohem w/z-Wert. Dafür ist ihr Schwinden nach 28 Tagen verhältnismässig klein.

Dies steht einerseits mit dem autogenen Schwinden während der ersten Tage und andererseits mit der hohen Dichte verbunden mit kleinem Wasserverlust (s. unten) im Zusammenhang.

Die Betone hergestellt mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM III/B weisen nach 182 Tagen ein vergleichbares Schwindmass auf, während die Mischungen hergestellt mit CEM II/B-M etwas weniger schwinden (Abbildung 12). Der Verlauf der mit CEM III/B hergestellten Betone unterscheidet sich allerdings deutlich von allen anderen Mischungen. Von zwei bis sieben Tagen schwindet der Beton stark und nach 28 Tagen verhältnismässig wenig.

Dieses Phänomen kann mit den spezifischen Eigenschaften des CEM III/B und dem damit einhergehenden Verlauf des Wasserverlustes erklärt werden. Die Hydratation verläuft sehr langsam, was mit einem durchlässigen Porensystem und damit mit einem grossen Wasserverlust in den ersten Tagen verbunden ist. Entsprechend verursacht dieser hohe Massenverlust auch ein hohes Schwindmass in diesem Zeitabschnitt. In einem höheren Alter hingegen ist genau das Gegenteil der Fall. Das dichte Porensystem lässt einen nur noch geringen Wasserverlust zu und das Schwindmass flacht entsprechend ab. Während die Differenzen des Schwindens zwischen den Betonen M1-M5 bei den Zementen CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-M relativ klein ist, weist die Mischung M4 beim CEM III/B ein deutlich kleineres Schwindmass auf (s. Abbildungen A-1 bis A-4).

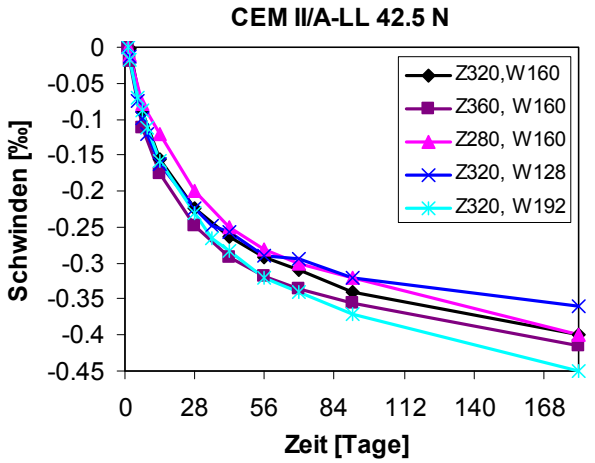


Abbildung 11: Schwinden als Funktion der Zeit der Betone M1-M5 hergestellt mit CEM II/A-LL.

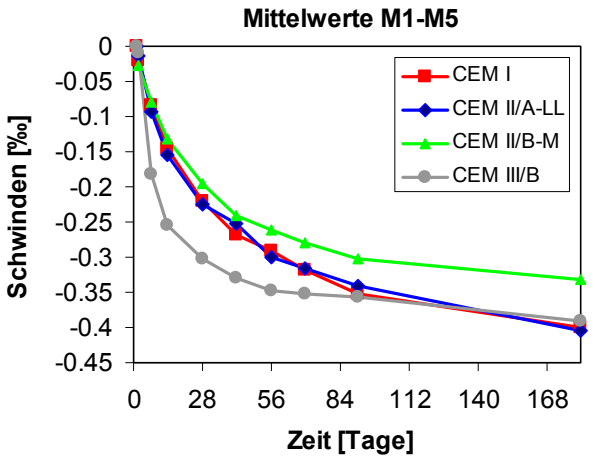


Abbildung 12: Schwinden als Funktion der Zeit für die mit CEM I, CEM II/A-LL, CEM II/B-M und CEM III/B hergestellten Betone M1-M5.

Der Massenverlust der Betone M1-M5 zeigt einen direkten Zusammenhang mit dem w/z-Wert (Abbildung 13); je tiefer der w/z-Wert, umso kleiner der Massenverlust. Dieser Zusammenhang ist bei allen Zementen vorhanden. Allerdings sind die Unterschiede nicht immer so regelmässig abgestuft wie bei den Betone mit CEM II/A-LL. Der zeitliche Verlauf des Massenverlusts ist vom verwendeten Zement abhängig (Abbildung 14). Die Betone mit CEM II/B-M und CEM III/B weisen bis zum Alter von sieben Tagen einen grösseren Massenverlust auf als die Betone mit CEM I und CEM II/A-LL, flachen danach aber deutlich mehr ab als letztere. Im Alter von 182 Tagen ist der Massenverlust bei den Betonen hergestellt mit CEM I am kleinsten und bei den Betonen hergestellt mit CEM II/B-M am grössten.

Die grosse Differenz beim Schwinden des Betons M4 beim CEM III/B geht auch mit einer deutlich grösseren Festigkeit dieser Mischung einher (s. Tabelle A-3 und Abbildung A-4). Warum sich diese Mischung deutlich anders verhält, ist nicht klar. Um einen Fehler in der Herstellung auszuschliessen, wurde sie nochmals hergestellt und es wurden die gleichen Schwindwerte bestimmt. Offenbar wurde durch den tiefen w/z-Wert die Hydratation verändert. Mit sinkendem w/z-Wert steigt der pH der Porenlösung und damit die Löslichkeit der Schlacke. Da die Löslichkeit von SiO_2 mit steigendem pH nicht linear ist sondern überproportional ansteigt, könnten die beobachteten Phänomene damit erklärt werden. Diese Hypothese könnte mit einer Bestimmung des Hydratationsgrad der Schlacke in den verschiedenen Mischungen überprüft werden. Zudem gilt es zu erwähnen, das wahrscheinlich ein Teil der autogenen Schwindverformungen dieser Mischung M4 nicht gemessen wurde, weil sie vor einem Alter von 24 h Stunden stattfanden und damit bei den Messungen nicht erfasst wurden. Da beim Vergleich der Mittelwerte die Betone aus CEM III/B vergleichsweise stark durch das atypische Verhalten der Mischung M4 beeinflusst werden, sind im Anhang zusätzlich alle Betone M1 graphisch dargestellt (Abbildungen A5-A8).

Weder bei den verschiedenen Betonen, die mit demselben Zement hergestellt wurden, noch bei den Betonen identischer Rezeptur aber unterschiedlichem Zementtyp, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem absoluten Masseverlust und den absoluten Werten der Schwindverformungen. So zeigen die Betone hergestellt mit CEM II/B-M den höchsten Massenverlust und die kleinsten Schwindverformungen. Der relative Verlauf des Massenverlustes und der Schwindverformungen stehen aber in einem engen Zusammenhang. Um dies zu erklären, müssen grundsätzlich drei Punkte beachtet werden:

- Schwindspannungen werden durch Kapillarkräfte erzeugt, die von der relativen Feuchte im Porensystem abhängig sind. Wieviel Wasser verdunsten kann, hängt von der zeitlichen Entwicklung der Permeabilität ab.
- Die Porengrössenverteilung in einem Beton ist über die Zeit variabel; mit zunehmender Hydratation nehmen die mittlere Porengrösse und die Permeabilität ab. Der Verlauf dieses Prozesses ist zementspezifisch.

- Innerhalb des Prüfkörpers entsteht durch das oberflächliche Verdunsten von Wasser ein hygrischer Gradient. Dieser hygrische Gradient ist von der zeitlichen Entwicklung der Porengrössenverteilung und Konnektivität der Poren abhängig.

Die gemessene Schwindverformung ist ein Resultat dieser Prozesse und damit ein Integrationswert der zeitlichen Entwicklung des Porensystems, des daraus folgenden Wasserverlustes und des hygrischen Gradienten und den wiederum daraus resultierenden Kapillarkräften. Je nach Zusammensetzung des Betons kann zusätzlich auch die innere Selbstaustrocknung eine messbare Auswirkung haben.

Da beim SCC einerseits das Zementsteinvolumen grösser ist als beim CVC und andererseits oft grosse Mengen an Zement mit einem Zusatzstoff substituiert werden, treten Differenzen im Schwinden zwischen unterschiedlichem Zementsteinvolumen und unterschiedlich zusammengesetzten Bindemitteln deutlich hervor. Die vorgängig diskutierten Resultate können durch Studien an SCC bestätigt werden. Das Schwinden nimmt mit zunehmendem Zementsteinvolumen zu [2-6]. Bei einer Substitution von Klinker mit Zusatzstoffen nimmt das Schwinden ab [7-9]. Die einzige Ausnahme ist die Substitution mit Mikrosilika [10].

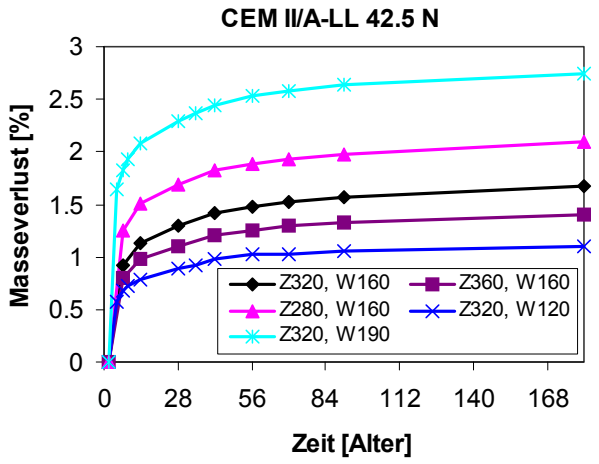


Abbildung 13: Massenverlust als Funktion der Zeit der Betone M1-M5 hergestellt mit CEM II/A-LL.

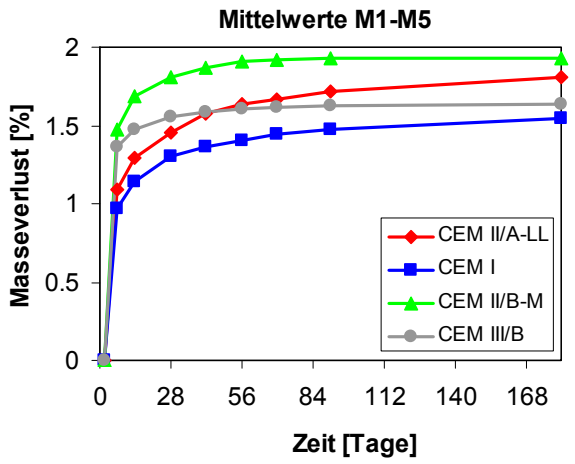


Abbildung 14: Massenverlust als Funktion der Zeit für die mit CEM I, CEM II/A-LL, CEM II/B-M und CEM III/B hergestellten Betone M1-M5.

Ein zentraler Punkt des Projektes ist es, den Einfluss einer Veränderung des Zementgehaltes respektive Wassergehaltes im Beton zu werten. Ausgehend vom Referenzbeton M1 (Z320, W160) wurde die relative Veränderung des Schwindmasses über die Zeit analysiert (Abbildung 15). Um die Streuung zu minimieren, wurden die Durchschnittwerte aller Betone hergestellt mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-M verwendet. Beton mit CEM III/B wurde nicht berücksichtigt, weil Beton M4 ein atypisches Verhalten zeigt. Bei einem Alter von 182 Tagen zeigt sich, dass der Einfluss einer Veränderung des Zementgehaltes von ± 40 kg/m^2 deutlich kleiner ist als der Einfluss einer Veränderung des Wassergehaltes von ± 32 kg/m^2. Beim zeitlichen Verlauf des Schwindens lässt sich auch ein deutlicher Einfluss des w/z-Wertes erkennen. Die beiden Betone mit einem tieferen w/z-Wert als der Referenzbeton schwinden am Anfang aufgrund der autogenen Verformung stärker (wobei wegen dem Messbeginn bei 24 h ein Teil der autogenen Verformungen nicht gemessen wird), die Betone mit einem höheren w/z-Wert entsprechend schwächer. Die Abfolge der Schwindverformung der verschiedenen Betone entspricht im Alter von 91 Tagen ihrem Zementsteinvolumen. Bei 182 Tagen unterscheidet sich nur das Schwinden der beiden Betone mit dem tiefsten (M4) und höchsten (M5) w/z-Wert wesentlich von demjenigen des Referenzbetons. In absoluten Zahlen gesehen sind die Unterschiede im Schwinden bei einem Alter von 182 Tagen zwischen den Betonen M1-M5 mit 0.05 ‰ klein. Die zementspezifischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Betonen sind mit 0.05 ‰ identisch. Als Vergleich liegt die Differenz zu SCC mit 0.10-0.15 ‰ deutlich höher [1,6].

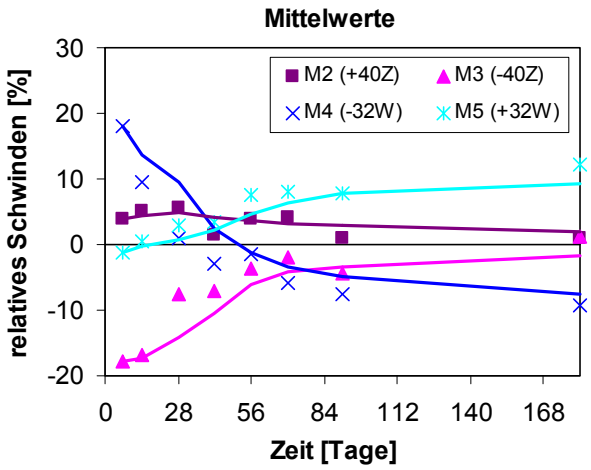


Abbildung 15: Relative Abweichungen des Schwindens der Betone M2-M5 vom Referenzbeton M1 für die Betone hergestellt mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-M.

3.4 Kriechen

Die Kriechverformungen unter der nach 2, 7 und 28 Tagen aufgebrachten Last (jeweils 33% der zum selben Zeitpunkt gemessenen Druckfestigkeit, s. Kapitel 2) sind bei den mit CEM II/B-M und CEM III/B hergestellten Betonen M1 deutlich kleiner als bei den anderen Betonen M1 (Abbildung 16). Bei den Betonen M4 ist nur noch das Kriechen der Mischung mit CEM III/B deutlich kleiner (Abbildung 17). Auffallend ist, dass das Kriechen der Betone M4 mit CEM II/B und CEM III/B höher ist als bei den Betonen M1 hergestellt mit denselben Zementen.

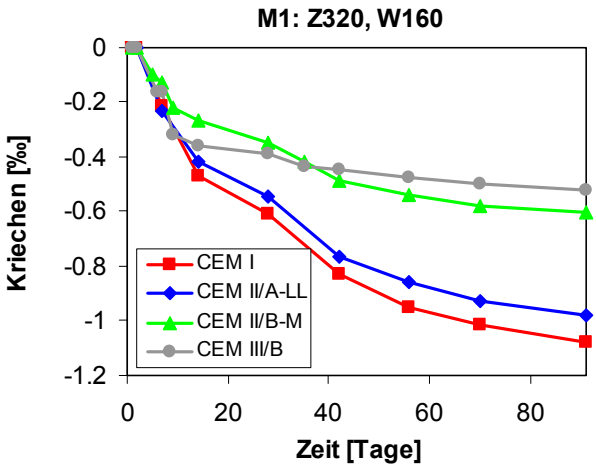


Abbildung 16: Kriechen der Betone M1 hergestellt mit verschiedenen Zementen.

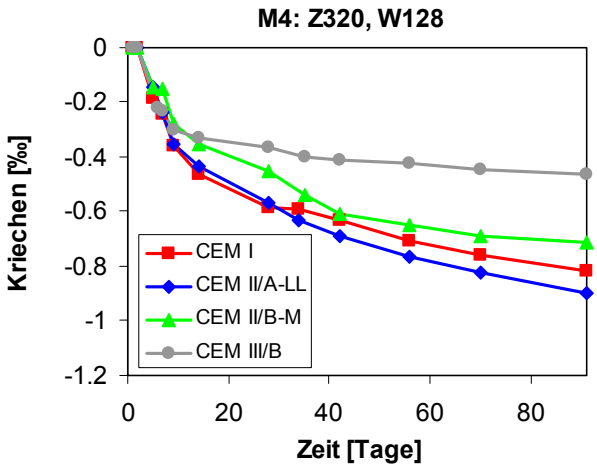


Abbildung 17: Kriechen der Betone M4 hergestellt mit verschiedenen Zementen.

Nach SIA 262 gilt es allerdings bei statischen Berechnungen nicht die Kriechverformung sondern die Kriechzahl φ zu berücksichtigen, das heisst die Kriechverformung ε_c dividiert durch die elastische Verformung ε_{el} beim Aufbringen der Last (Zeitpunkt t'):

$$\varphi(t,t') = \frac{\varepsilon_c(t,t')}{\varepsilon_{el}(t')} \qquad \text{(Gleichung 1)}$$

Bei den Betonen M1 und M4 ist die Kriechzahl für CEM I und CEM II/A-LL am höchsten und für CEM III/B am kleinsten. Dies entspricht von der Reihenfolge her auch den reinen Kriechverformungen. Weil aber die elastische Deformation beim Beton mit CEM III/B vergleichsweise hoch ist, nimmt die Differenz zu den anderen Betonen bei der Kriechzahl verglichen mit der Kriechverformung noch zu.

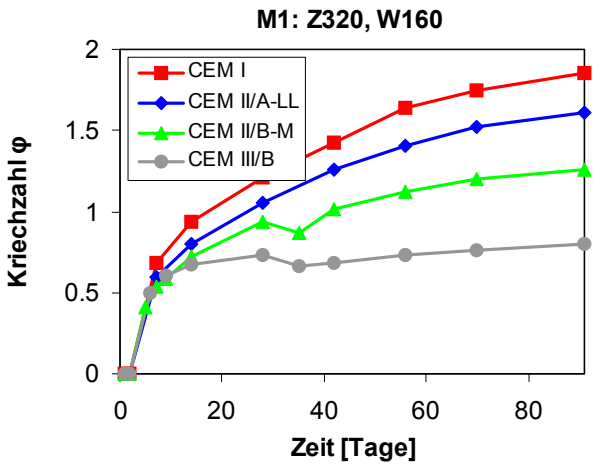


Abbildung 18: Kriechzahl des Betons M1 hergestellt mit verschiedenen Zementen.

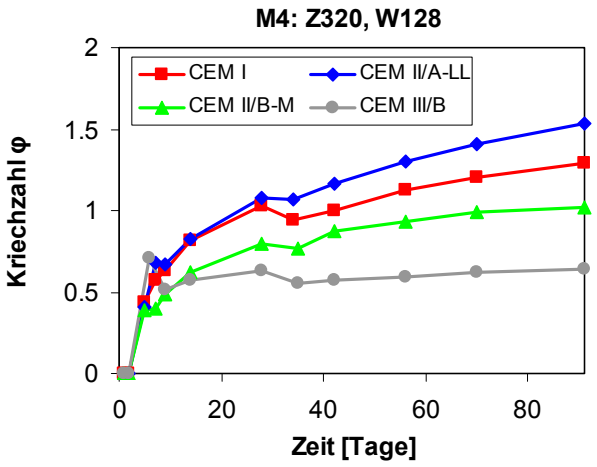


Abbildung 19: Kriechzahl des Betons M4 hergestellt mit verschiedenen Zementen.

Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass die Belastung zur Bestimmung des Kriechens in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der jeweiligen Mischungen zum Zeitpunkt der Belastung vorgenommen wurde (s. Kapitel 2). Um diesen Aspekt besser berücksichtigen zu können, kann das spezifische Kriechen J berechnet werden. Es zeigt das Kriechen als Funktion der aufgebrachten Last:

$$J(t,t') = \frac{\varepsilon_c(t,t')}{\sigma} \qquad \text{(Gleichung 2)}$$

Während bei den Mischungen M1 deutliche Unterschiede zwischen den mit verschiedenen Zementen hergestellten Betonen bestehen bleiben, sind die Unterschiede bei den Betonen M4 klein (Abbildungen 20 und 21).

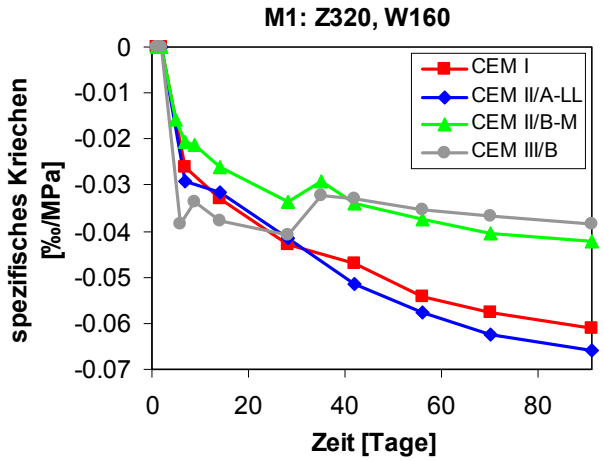


Abbildung 20: Spezifisches Kriechen des Betons M1 hergestellt mit verschiedenen Zementen.

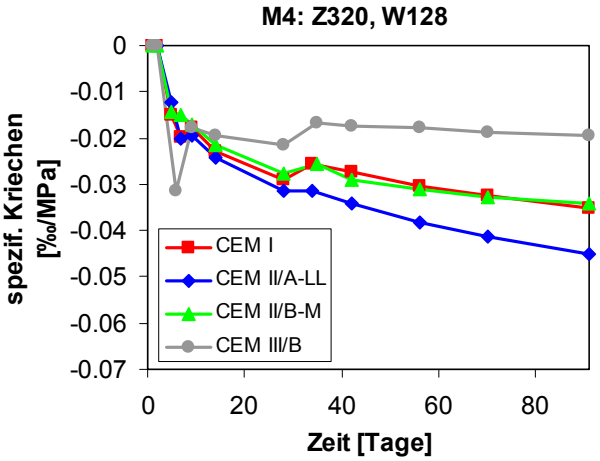


Abbildung 21: Spezifisches Kriechen des Betons M4 hergestellt mit verschiedenen Zementen.

Die zementspezifischen Unterschiede beim Kriechen können verschiedene Gründe haben. Einer hängt mit der Festigkeitsentwicklung zusammen. Nimmt die Festigkeit eines Betons nach Einleiten der Last noch relativ stark zu, ist das Kriechen kleiner als bei einem Beton mit geringem Festigkeitszuwachs. Der Verlauf der Kurven lässt sich allein damit allerdings nicht restlos erklären. Für den Mechanismus des Kriechens gibt es verschiedene Theorien [11]. Im Allgemeinen wird angenommen, dass für das Kriechen das C-S-H verantwortlich ist. Wenn die Zusammensetzung der untersuchten Zemente in Zusammenhang mit Kriechen gebracht wird, zeigt sich, dass Beton mit den beiden Zementen, die einen hohen Kalk- und Portlanditanteil haben, stärker Kriechen als die Zemente mit niedrigem Anteil der beiden Mineralien. Wird zum Beispiel bei SCC Klinker mit Kalksteinmehl ersetzt, nimmt das Kriechen mit steigendem Kalksteinmehlanteil zu [8]. Des Weiteren könnte das Ca-Si-Verhältnis im Haupthydratationsprodukt, dem C-S-H, das Kriechen beeinflussen. Bei der Verwendung von Flugasche oder Schlacke steigt der Si-Anteil, wodurch das Ca-Si-Verhältnis kleiner wird als in einem reinen Portlandzement-System. Der Zusammenhang mit der mineralogischen Zusammensetzung des Zementes liegt auf der Hand, auch wenn der Mechanismus nicht klar ist.

3.5 Behindertes Schwinden

3.5.1 Schwindquadrate

Die beiden Schwindquadrate hergestellt mit Beton aus CEM I reissen deutlich vor den mit CEM II/A-LL und CEM II/B-M hergestellten Quadraten (Abbildung 22). Zwischen den Betonen M1 (Z320, W160) und M4 (Z320, W120) sind keine systematischen Unterschiede vorhanden.

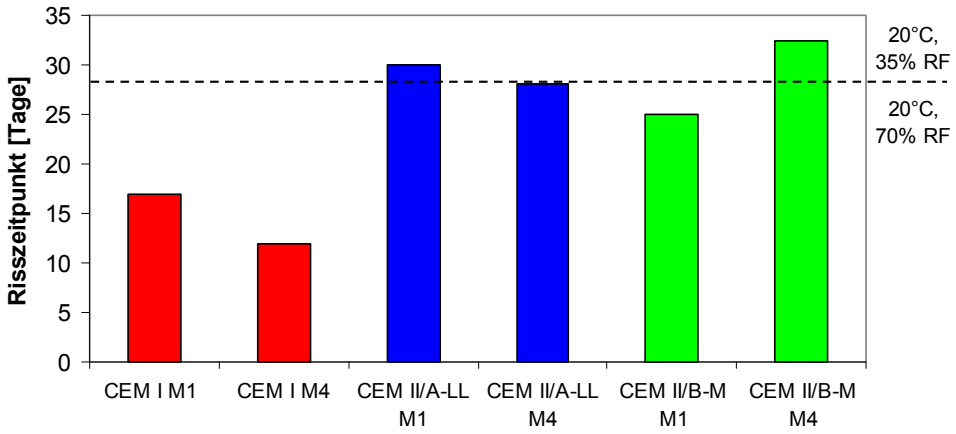


Abbildung 22: Risszeitpunkt der verschiedenen Schwindquadrate bezogen auf das Herstellungsdatum.

Die beim behinderten Schwinden entwickelten Schwindspannungen σ_s hängen von der Schwindverformung ε_{st}, dem Behinderungsgrad und dem durch das Kriechen mit entsprechender Relaxation reduzierten E-Modul E_{red} ab [6]:

$$\sigma_s = k \cdot E_{red} \cdot \varepsilon_{st} \qquad \text{(Gleichung 3)}$$

Durch die Abmessungen an den Sollbruchstellen (Querschnitt: 60 x 100 mm) trocknet der Beton bei einem Klima von 20°C und 70% RF relativ schnell aus. Deshalb hängt die Schwindspannung in erster Linie von der Schwindverformung und vom E-Modul ab. Die Relaxation durch Kriechen spielt praktisch keine Rolle, weil das Austrocknen zu schnell geht. Der Beton hergestellt mit CEM I schwindet gleich oder stärker als derjenige hergestellt mit CEM II/A-LL respektive CEM II/B-M und weist bezogen aufs Alter das höchste E-Modul auf. Dadurch kann der im Vergleich zu den anderen Betonen frühere Risszeitpunkt erklärt werden.

3.5.2 Reissrahmen

Die berechnete Spannung (s. Kapitel 2) der drei im Reissrahmen untersuchten Betone M4 (Z320, W120) zeigt unterschiedliche Verläufe (Abbildung 23). Die mit CEM I und CEM II/B-M hergestellten Betone weisen bis ins Alter von sieben Tagen einen praktisch identischen Verlauf auf. Danach flacht die Spannungszunahme beim Beton mit CEM I deutlich ab, während dieses Abflachen bei der Mischung mit CEM II/B-M weniger stark ist. Die Spannung des Betons mit CEM III/B steigt in den ersten Tagen am stärksten an, flacht dann aber so stark ab, dass der Wert nach 28 Tagen identisch mit demjenigen des Betons mit CEM II/B-M ist.

Die elastischen Spannungen im Reissrahmen können aus der Gleichung 2 (ohne Berücksichtigung des Kriechens) berechnet werden (Abbildung 24). Danach sollte nach 28 Tagen der Beton M4 mit CEM I die höchste und der Beton mit CEM III/B die tiefste Spannung erreichen. Die Differenz zwischen dieser berechneten elastischen Spannung und der tatsächlich gemessenen Spannung ergibt die Relaxation. Der Beton M4 mit CEM I zeigt die grösste Relaxation, während sie beim M4 mit CEM II/B-M und CEM III/B tiefer liegt.

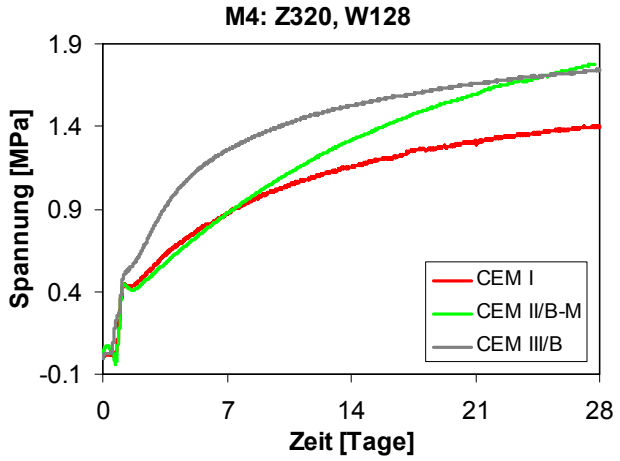


Abbildung 23: Spannungsverlauf des Betons im Reissrahmen während 28 Tagen.

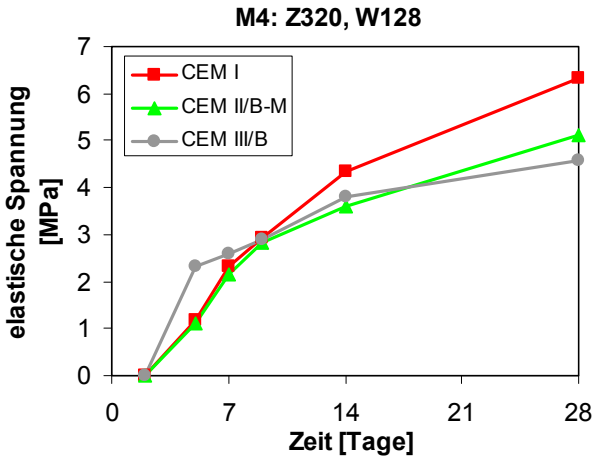


Abbildung 24: Aus Gleichung 2 berechnete elastische Spannung des Betons ohne Berücksichtigung des Kriechens.

Die hohe Relaxation beim Beton M4 mit CEM I stimmt mit dem experimentell bestimmten Kriechen, das ebenfalls hoch ist, überein. Beim Beton M4 mit CEM II/B-M ist die Relaxation nach 7 Tagen erstaunlich klein.

Die Verhältnisse bei den Prüfkörpern im Reissrahmen unterscheiden sich von denen beim Schwindquadrat. Der grösste Unterschied liegt im Querschnitt des Prüfkörpers; er ist beim Reissrahmen mit 2250 mm^2 im Vergleich zu 600 mm^2 fast viermal so gross. Entsprechend ist ein grösserer Einfluss des Kriechens zu erwarten. So lässt sich auch erklären, dass der Beton M4 mit CEM I, der im Schwindquadrat als erster reisst, im Reissrahmen die kleinste Spannung aufbaut.

Bei diesen Betrachtungen muss auch folgendes beachtet werden. Die Kriechverformungen im Reissrahmen, die zu einer Relaxation führen, treten aufgrund von Zugspannungen auf. Das reine Kriechen wurde in diesem Projekt experimentell unter einer Druckbelastung, wie das die SIA 262/1 vorsieht, bestimmt. Wie sich das Kriechen unter Zug mit dem Kriechen unter Druck vergleichen lässt, wird kontrovers diskutiert. Während Gutsch [12] vergleichbare Kriechkoeffizienten bei Normalbeton festgestellt hat, können bei hochfestem Beton Differenzen auftreten [13]. Atrushi [13] hat beim spezifischen Kriechen beobachtet, dass die anfänglichen Werte unter Zug tiefer sind als unter Druck, dann aber stärkerer ansteigen und einige Tage nach dem Beginn der Belastung zu einem Schnittpunkt führen. Andererseits hat Li [14] für Normalbeton unter Zug um das Vierfache höhere Werte für das spezifische Kriechen festgestellt als unter Druck. Immerhin scheint die Beziehung zwischen Spannung und Verformung auch beim Kriechen unter Zug bis zu einem Wert von 50% der Festigkeit linear und damit vergleichbar zum Kriechen unter Druck zu sein [15].

4. Berechnung und Modellierung des Schwindens und Kriechens

Es gibt verschiedene Modelle, mit denen das Kriechen und Schwinden von Beton berechnet werden kann. Die umfassendste Übersicht wurde von [16] erstellt. Dort wurden die Resultate, die mit den Modellen ACI 209 [17], CEB-FIP 1990 [18], EHE [19], B3 [20] und GL2000 [21] berechnet wurden, mit den experimentellen Daten verschiedener Studien verglichen. ACI 209R-92 und B3 zeigten die beste Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Das Problem mit den Modellen ist, dass das Zementsteinvolumen und die Zusammensetzung der Zemente nicht oder nur ungenügend berücksichtigt wird. Entsprechend können die berechneten Wert mit dem Beton A eine gute und mit dem Beton B eine schlechte Übereinstimmung zeigen. Auch prognostizieren die einen Modelle das Schwinden relativ gut, dafür das Kriechen nicht oder umgekehrt.

Die SIA 262 befindet sich zur Zeit (Dezember 2009) in Überarbeitung. Grundlage für die überarbeitete Version ist der Eurocode 2 (EN 1992-1-1: 2005). Das Schwindmass wird als Summe des Trockenschwindens (unter Berücksichtigung eines Beiwerts für die Dimension des Bauteils) und des autogenen Schwindens abgeschätzt. Das Schwindmass zeigt eine Abnahme mit steigender Festigkeit. Dieser Trend ist auch bei den in diesem Projekt hergestellten Betonen vorhanden (Abbildung 25): Die Grössenordnung des abnehmenden Schwindens mit ansteigender Festigkeit bewegt sich im selben Bereich, wenn die Mischungen mit CEM III/B nicht berücksichtigt werden. Dies zeigt wiederum, dass bei Betonmischungen mit ähnlichem Zementsteinvolumen der Einfluss des Wassergehaltes deutlich stärker ist als der des Zementgehaltes. Der Einfluss verschiedener Zemente auf das Schwinden wird in der SIA nicht direkt berücksichtigt.

Das Abschätzen des Schwindens und Kriechens anhand von Modellen liefert immer nur Richtwerte. Ist es von grosser Wichtigkeit, diese beiden Grössen genau zu kennen, sind experimentelle Untersuchungen unumgänglich.

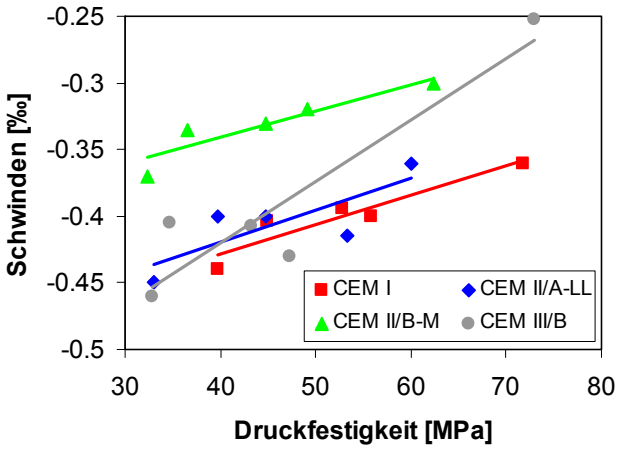


Abbildung 25: Das Schwinden im Alter von 182 Tagen für Beton mit einem Zementsteinvolumen von 230-300 l/m^3 als Funktion der Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen.

5. Schlussfolgerungen

Bezüglich Zementsteinvolumen, Wasser- und Zementgehalt lassen sich folgende Schlussfolgerungen für das Schwinden ziehen:

- Das Schwinden ist in erster Linie eine Funktion des Zementsteinvolumens.
- Eine Veränderung des Wassergehaltes des Betons wirkt sich deutlich stärker auf das Endschwindmass aus als eine Veränderung des Zementgehaltes.
- Bei CVC (Normalbeton) sind die Differenzen im Schwinden zwischen verschiedenen Mischungen relativ klein.
- Um einen schwindarmen Beton herzustellen, muss das Zementsteinvolumen in erster Line über eine Reduktion des Wassergehaltes und nicht des Zementgehaltes optimiert werden. Dabei gilt es aber auch zu berücksichtigen, dass Beton mit tiefem w/z-Wert wegen dem autogenen Schwinden in den ersten Wochen eine höhere Schwindverformung aufweist.

Bezüglich Zementart können die folgenden Aussagen für das Schwinden gemacht werden:

- Beton hergestellt mit CEM II/A-LL schwindet etwa gleich stark wie Beton hergestellt mit CEM I und zeigt auch denselben Schwindverlauf.
- Beton hergestellt mit CEM II/B-M (V-LL) schwindet weniger stark als Beton hergestellt mit CEM I und zeigt nach 91 Tagen ein stärkeres Abflachen der Schwindkurve.
- Beton hergestellt mit CEM III/B schwindet etwa gleich stark wie Beton hergestellt mit CEM I, zeigt aber einen deutlich anderen Schwindverlauf mit hohen Schwindverformungen in den ersten sieben Tagen und einem sehr starken Abflachen der Schwindkurve nach 28 Tagen.
- Bei Beton hergestellt aus CEM II/B-M (V-LL) und CEM III/B sollte sich die Dauer der Nachbehandlung anders aus als bei Beton hergestellt aus CEM I und CEM II/A-LL auswirken, da Beton mit diesen Zementtypen anfangs relativ schnell austrocknen.

Bezüglich Zementart können folgende Schlussfolgerungen für das Kriechen gemacht werden:

- Beton hergestellt mit CEM II/A-LL kriecht etwa gleich stark wie Beton hergestellt mit CEM I und zeigt ab einem Alter von 42 Tagen einen leicht flacheren Verlauf von Kriechverformung und Kriechzahl.
- Beton hergestellt mit CEM II/B-M (V-LL) kriecht deutlich weniger stark als Beton hergestellt mit CEM I und zeigt ab einem Alter von sieben Tagen einen deutlich flacheren Verlauf von Kriechverformung und Kriechzahl. Bei Beton hergestellt mit CEM III/B ist dieser Trend noch stärker ausgeprägt als beim CEM II/B-M (V-LL)
- Diese Unterschiede zeigen sich auch bei der Kriechzahl φ. Wird das spezifische Kriechen J der Betone verglichen, sind diese Differenzen bei den Mischungen mit hoher Druckfestigkeit nur noch klein.

6. Umsetzung

Die Höhe des Schwindmasses von Beton wird in der Praxis oft mit dem Rissrisiko gleichgesetzt. Dies ist eine unzulässige Vereinfachung. Ob ein Beton reisst oder nicht, ist von der zeitlichen Entwicklung der Schwindspannungen und der Zugfestigkeit abhängig. Wie in Kapitel 3.5 und in [1] dargelegt, spielen bei der Entwicklung der Schwindspannung neben dem Schwinden der Behinderungsgrad, das E-Modul und die durch Kriechverformungen verursachte Relaxation eine zentrale Rolle. Je nach Situation im Bauteil erhalten diese spezifischen Faktoren eine unterschiedlich starke Gewichtung und spielen damit auf eine unterschiedliche Weise zusammen. Die Art der Konstruktion beeinflusst das Rissrisiko in hohem Mass. Allgemein können für praxisüblichen Beton folgende Aussagen getroffen werden:

- Bei einem schnell trocknenden Bauteil (kleine Abmessungen, hohe spezifische Oberfläche) mit einem hohen Behinderungsgrad (z. Bsp. Vorbeton) ist das Schwindmass eines Betons die entscheidende Grösse für das Rissrisiko.
- Bei einem massigen, langsam trocknenden Bauteil spielt das Schwindmass eine viel kleinere Rolle, dafür kommt dem Kriechen eine zentrale Bedeutung zu.

Soll ein Beton mit relativ kleinem Schwindmass hergestellt werden, muss folgendes beachtet werden:

- Eine Reduktion des Zementgehaltes ist weniger wirksam, um das Schwinden zu minimieren, als eine Reduktion des Wassergehaltes.
- Bei einer Reduktion des Zementleimvolumens sind natürliche Grenzen gesetzt, die durch den Hohlraumgehalt der lose geschütteten Gesteinskörnung und die Konsistenz vorgegeben werden und nicht überschritten werden dürfen. Der Hohlraumgehalt variiert mit den Eigenschaften der Gesteinskörnung (Kornform und Kornrundung) und der verwendeten Sieblinie.

Neben einer Optimierung der Betonrezeptur ist für das Rissrisiko auch die Nachbehandlung von grosser Bedeutung:

- Die Vorgaben der Norm müssen eingehalten werden.
- Wenn das Bauteil langsam austrocknet, kann ein Teil der entstehenden Schwindspannungen durch Kriechen abgebaut werden. Nach dem Ausschalen ist bei Bauteilen mit hohem Rissrisiko deshalb unabhängig von der Einschaldauer ein Abdecken mit Folien/Matten zu empfehlen (langsames Austrocknen bei hoher relativer Feuchte, aber nicht nass halten).
- Bei massigen Bauteilen muss zur Minimierung des Rissriskos nicht nur das Schwinden sondern auch die Hydratationswärme mit entsprechenden Massnahmen (wie z. Bsp. einer geeigneten Zementwahl) berücksichtigt werden.

7. Referenzen

[1] Loser, R., Leemann, A., 'Selbstverdichtender Beton: 'Schwinden und Auswirkungen des Schwindens', cemsuisse Bericht, Bern, 2006.

[2] Pons, G., Proust, E., Assié, S., 'Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?', in: Wallevik, Ó., Nielsson, I. (eds). 3rd International RILEM Symposium on SCC, Reykjavik, 2003, 645-654.

[3] Leemann, A., Hoffmann, C., 'Properties of self-compacting and conventional concrete -differences and similarities', Mag. Conc. Res. 57 (2005) 315-319. [23] Khatib, J.M., 'Performance of self-compacting concrete containing fly ash', Const. Build. Mater. 22 (2008) 1963-1971.

[4] Rozière, E., Granger, S., Turcry, P., Loukili, A., 'Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete', Cem. Conc. Comp. 29 (2007) 626-636.

[5] Ghoddousi, P., Monir Abbasi, A., 'Influence of aggregate grading and cement paste volume on drying shrinkage of self-consolidating concrete', 3rd North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, 2008.

[6] Loser, R., Leemann, A., 'Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete', Mater. Struct. 42 (2009) 71-82.

[7] Van Bui, K., Montgomery, D., 'Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone', in: Skarendahl, Å, Petersson, Ö. (eds). Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on SCC, Stockholm, 1998, 227-238.

[8] Poppe, A.M., De Schutter, G., 'Creep and shrinkage of self-compacting concrete', in: Yu, Z., Shi, C., Khayat, K.H., Xie, Y. (eds). 1st International Symposium on Design, Performance and Use of SCC, RILEM Publications SARL, (France, 2005) 329-336.

[9] Hammer, T.A., 'The influence of some mix design parameters on drying shrinkage of SCC', 5th International RILEM Symposium on SCC, Ghent, 2007, 559-564.

[10] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Özbay, E., 'Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag and silica fume,' Const. Build. Mat. 23 (2009) 1847-1854.

[11] Tamtsia, B.T., Beeaudoin, J.J., 'Basic creep of hardened cement paste - a re-examination of the role of water', *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 1465-1475.

[12] Gutsch, A.W., 'Properties of early age concrete - experiments and modelling', Mater. Struct. 35 (2002) 76-79.

[13] Atrushi, D.S., 'Tensile and compressive creep of early age concrete: testing and modelling', Doctoral Thesis, Trondheim, 2003.

[14] Li, H., Wee, T.H., Wong, S.F., 'Early-age shrinkage of blended cement concrete', ACI Mat. J. 99 (2002) 3-10.

[15] Bissonnette, B., Pigeon, M., Vaysburd, A.M., 'Tensile creep of concrete: study of its sensitivity to basic parameters', ACI Mat. J. 104 (2007) 360-368.

[16] Fernández-Gomez, J., Agranati Landsberger, G., 'Evaluation of shrinkage prediction models for self-consolidating concrete', ACI Mat. J. 104 (2007) 464-473.

[17] ACI Committee 209, 'Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures (209R-92)', Farmington Hills, American Concrete Institute, 1990.

[18] CEB-FIP, 'Model code 1990 – design code' Thomas Telford, London, 1993.

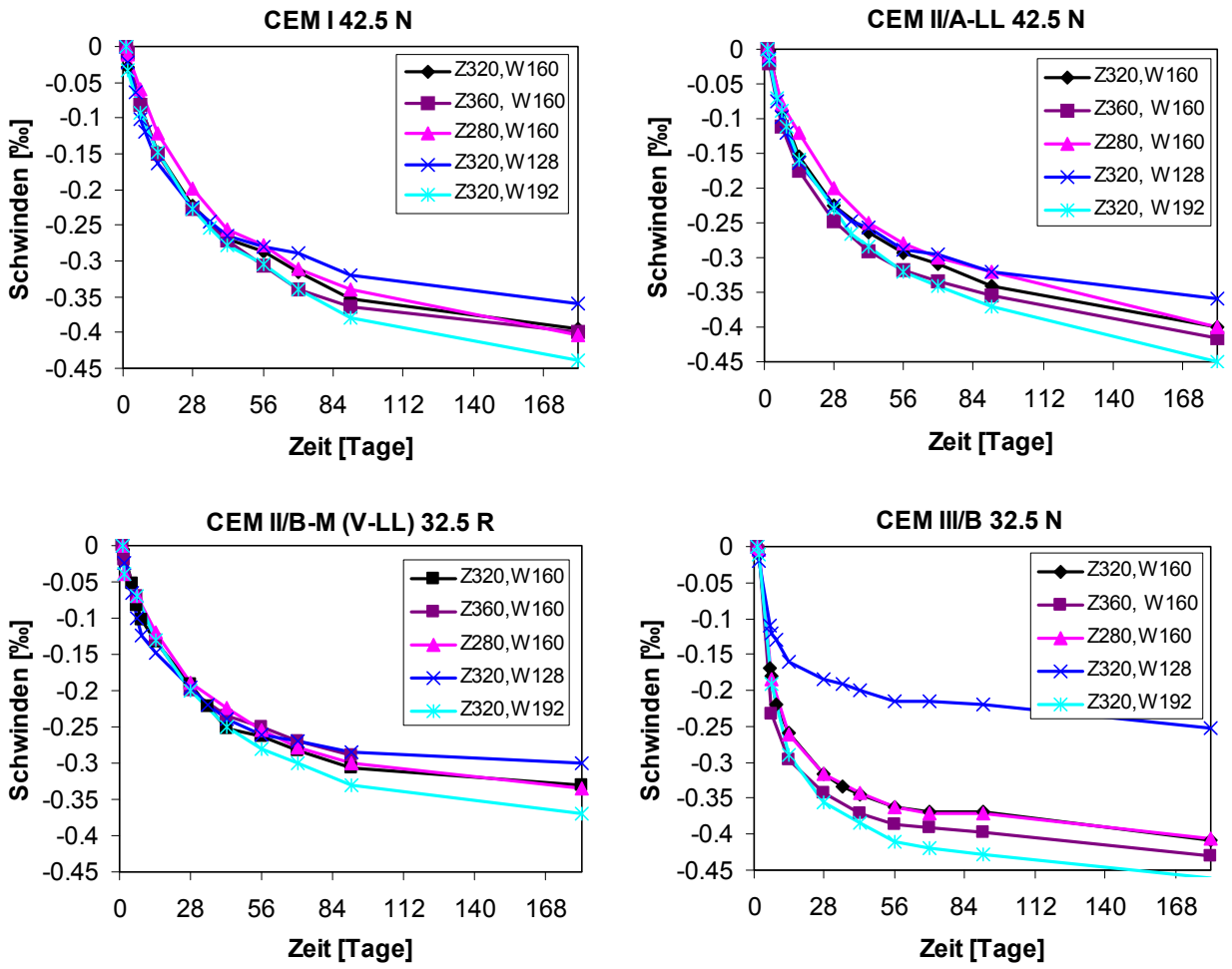
[19] EHE, 'Instrucción de hormigón estructural', Comisón Permanente del Hormigón, 5th Edición, Madrid, Ministerio de Fomento, 2002.

[20] Bazant, Z.P., Murphy, W.P., 'Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures - Model B3', Mater. Struct. 28 (1995) 357-365.

[21] Gardner, N.J., Lockman, M., 'Design provision for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete', ACI Mater. J. 98 (2001) 159-167.

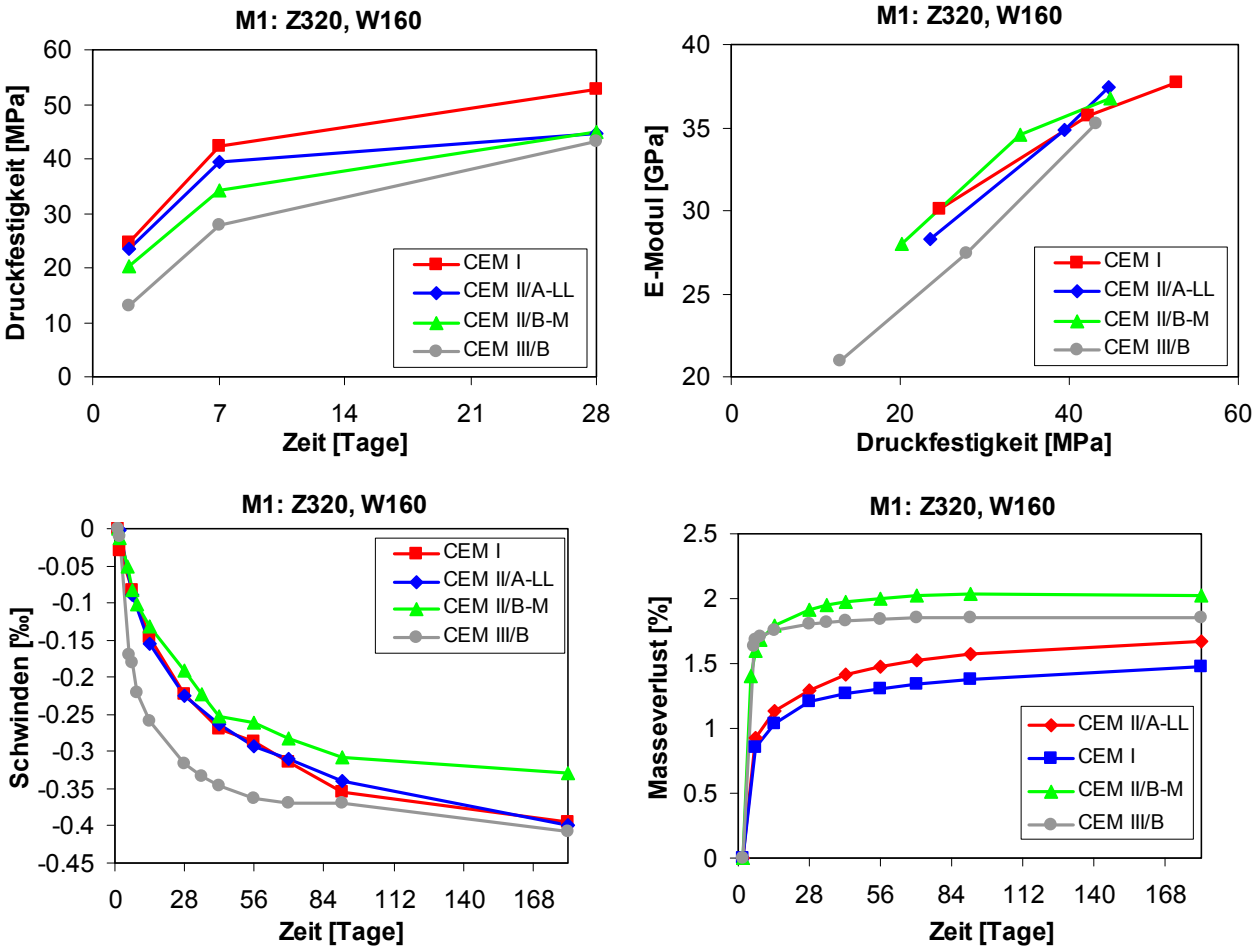
Anhang

Schwinden



Abbildungen A-1 bis A-4: Schwinden der Betone M1-M5 hergestellt mit unterschiedlichen Zementen. Beim CEM III/B wurden die Mischungen M1 und M4 wiederholt. Die Längenänderungen liessen sich gut reproduzieren.

Vergleich der Mischungen M1 (Z320, W160)



Abbildungen A-5 bis A-8: Vergleich der Betoneigenschaften der Mischungen M1 hergestellt mit den verschiedenen Zementen.

Zementart	CaO [%]	SiO_2 [%]	Al_2O_3 [%]	Fe_2O_3 [%]	MgO [%]	K_2O [%]	Na_2O [%]	SO_3 [%]	Blaine [cm^2/g]	Glüh-verlust [%]	Dichte [kg/m^3]
CEM I 42.5 N	62.36	20.78	4.98	3.21	2.14	0.87	0.29	2.67	3100	2.98	3.13
CEM II/A-LL 42.5 N	68.0	18.6	4.4	2.6	1.6	0.9	0.1	2.8	-	-	3.07
CEM II/B-M 32.5 R	52.52	23.12	7.31	3.56	2.14	1.19	0.39	2.55	4180	-	2.90
CEM III/B 32.5 N	49.0	30.59	9.65	1.22	5.14	0.61	0.26	1.38	4500	-	3.00

Tabelle A-1: Zusammensetzung der verwendeten Zemente.

Zementtyp	Beton	Rohdichte [kg/m^3]	Ausbreitmass [cm]	Verdichtungsmass	Luftgehalt [Vol-%]
CEM I 42.5 N	M1	2428	53	1.03	1.3
	M2	2433	53	1.04	1.4
	M3	2404	55	1.01	0.9
	M4	2461	39	1.09	1.5
	M5	2400	59	1.01	0.8
CEM II/A-LL 42.5 N	M1	2427	43	1.03	1.1
	M2	2431	59	1.01	1.3
	M3	2414	53	1.01	1.2
	M4	2467	58	1.04	1.1
	M5	2370	60	1.01	0.8
CEM II/B-M 32.5 R	M1	2423	57	1.02	1.2
	M2	2418	52	1.02	1.6
	M3	2428	53	1.01	0.9
	M4	2465	60	1.03	1.1
	M5	2389	67	-	0.6
CEM III/B 42.5 L-LH HS	M1	2395	42	1.08	1.5
	M2	2404	51	1.04	1.9
	M3	2410	50	1.06	1.4
	M4	2468	62	1.02	1.3
	M5	2399	60	1.01	0.9

Tabelle A-2: Frischbetoneigenschaften der verschiedenen Betone.

Festigkeiten

Zement	Beton	f_{c2d} [N/mm^2]	f_{c7d} [N/mm^2]	f_{c28d} [N/mm^2]	f_{bz2d} [N/mm^2]	f_{bz7d} [N/mm^2]	f_{bz28d} [N/mm^2]	E-Modul $_{2d}$ [kN/mm^2]	E-Modul $_{7d}$ [kN/mm^2]	E-Modul $_{28d}$ [kN/mm^2]
CEM I	M1	24.8	42.3	52.7	4.2	5.2	6.7	30.10	36.00	37.70
	M2	29.9	48.1	55.9	4.4	5.7	6.1	31.00	37.00	38.25
	M3	18.3	34.4	45.0	3.7	5.7	5.9	26.15	33.00	36.40
	M4	36.8	60.7	71.8	5.2	6.3	7.9	33.80	41.00	42.80
	M5	15.7	28.9	39.7	3.4	4.5	5.4	22.95	-	34.65
CEM II A-LL	M1	23.6	39.5	44.7	3.6	4.3	5.9	28.25	34.85	37.40
	M2	28.3	47.1	53.3	4.9	5.3	6.9	30.35	35.05	38.20
	M3	16.7	31.1	39.7	3.6	4.3	4.7	25.80	31.60	33.55
	M4	35.3	54.4	60.1	4.6	5.8	6.3	32.10	37.75	40.70
	M5	14.2	27.1	33.1	3.0	3.9	4.6	20.45	29.20	30.25
CEM II/B-M	M1	20.2	34.2	44.8	3.7	4.2	5.9	28.00	34.60	36.75
	M2	23.1	37.5	49.2	3.9	5.5	5.3	30.15	34.00	37.85
	M3	15.6	26.7	36.5	3.6	4.7	5.3	27.25	30.90	34.15
	M4	28.9	50.1	62.3	4.9	5.5	7.8	30.55	38.35	41.15
	M5	12.7	22.4	32.4	3.3	4.4	4.9	23.15	26.75	29.70
CEM III/B	MS 1	12.9	27.8	43.2	2.2	3.5	5.1	20.95	27.45	35.25
	MS 2	14.8	33.3	47.3	2.6	4.1	4.6	24.50	27.75	37.40
	MS 3	8.3	23.2	34.7	1.6	3.5	4.3	17.00	24.20	34.05
	MS 4	23.4	51.2	73.0	4.2	6.4	8.6	29.20	36.00	43.40
	MS 5	6.9	21.2	32.9	1.6	3.8	4.1	20.95	23.05	29.50

Tabelle A-3: Druckfestigkeit f_c, Biegezugfestigkeit f_{bz} und E-Modul.

Zusammenfassung der Messwerte

CEM I 42.5 N							
Schwinden [‰]							
Alter [Tage]	M1	M2	M3	Alter [Tage]	M4	Alter [Tage]	M5
1	0.00	0.00	0.00	1	0.00	1	0.00
2	-0.03	-0.01	-0.01	2	-0.02	2	-0.03
7	-0.08	-0.08	-0.06	5	-0.06	7	-0.09
14	-0.15	-0.15	-0.12	7	-0.10	14	-0.15
28	-0.22	-0.23	-0.20	9	-0.12	28	-0.23
42	-0.27	-0.27	-0.26	14	-0.16	35	-0.25
56	-0.29	-0.31	-0.28	28	-0.22	42	-0.28
70	-0.32	-0.34	-0.31	35	-0.25	56	-0.31
91	-0.35	-0.37	-0.34	42	-0.27	70	-0.34
182	-0.39	-0.40	-0.40	56	-0.28	91	-0.38
				70	-0.29	182	-0.44
				91	-0.32		
				182	-0.36		
Masseverlust [%]							
Alter [Tage]	M1	M2	M3	Alter [Tage]	M4	Alter [Tage]	M5
1				1		1	
2	0.00	0.00	0.00	2	0.00	2	0.00
7	0.86	0.65	1.11	5	0.63	7	1.49
14	1.03	0.79	1.34	7	0.72	14	1.72
28	1.20	0.93	1.54	9	0.77	28	1.93
42	1.27	0.99	1.62	14	0.81	35	1.98
56	1.31	1.02	1.66	28	0.92	42	2.01
70	1.34	1.06	1.71	35	0.94	56	2.06
91	1.38	1.09	1.75	42	0.95	70	2.10
182	1.47	1.18	1.85	56	0.98	91	2.15
				70	0.99	182	2.20
				91	1.01		
				182	1.05		
Gesamtverformung Kriechen [‰]							
Alter [Tage]	M1	M4					
1	0.00	0.00					
2	-0.02	-0.02					
2	-0.34	-0.45					
5	-0.53	-0.68					
7	-0.62	-0.77					
7	-0.80	-0.91					
9	-1.01	-1.05					
14	-1.12	-1.20					
28	-1.33	-1.38					
28	-1.41	-1.44					
34	-1.59	-1.47					
42	-1.68	-1.53					
56	-1.82	-1.62					
70	-1.91	-1.68					
91	-2.01	-1.77					

Tabelle A-4

CEM II/A-LL 42.5 N						
Schwinden [‰]						
Alter [Tage]	M1	M2	M3	Alter	M4	M5
1	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
2	0.00	-0.02	-0.01	2	-0.01	-0.02
7	-0.09	-0.11	-0.08	5	-0.08	-0.07
14	-0.16	-0.18	-0.12	7	-0.10	-0.09
28	-0.22	-0.25	-0.20	9	-0.12	-0.11
42	-0.26	-0.29	-0.25	14	-0.16	-0.16
56	-0.29	-0.32	-0.28	28	-0.22	-0.23
70	-0.31	-0.34	-0.30	35	-0.25	-0.27
91	-0.34	-0.36	-0.32	42	-0.26	-0.28
182	-0.40	-0.42	-0.40	56	-0.29	-0.32
				70	-0.30	-0.34
				91	-0.32	-0.37
				182	-0.36	-0.45
Masseverlust [%]						
Alter [Tage]	M1	M2	M3	Alter	M4	M5
1				1		
2	0.00	0.00	0.00	2	0.00	0.00
7	0.93	0.80	1.25	5	0.58	1.64
14	1.13	0.98	1.51	7	0.68	1.82
28	1.30	1.10	1.69	9	0.72	1.92
42	1.42	1.21	1.82	14	0.79	2.08
56	1.47	1.25	1.89	28	0.89	2.30
70	1.52	1.30	1.93	35	0.92	2.37
91	1.57	1.33	1.98	42	0.98	2.44
182	1.67	1.40	2.10	56	1.02	2.54
				70	1.02	2.57
				91	1.06	2.64
				182	1.09	2.75
Gesamtverformung Kriechen [‰]						
Alter [Tage]	M1	M4	M5			
1	0.00	0.00	0.00			
2	-0.03	-0.01	0.00			
2	-0.42	-0.36	-0.28			
5	-0.62	-0.57	-0.48			
7	-0.71	-0.69	-0.55			
7	-0.84	-0.87	-0.66			
9	-0.99	-1.00	-0.77			
14	-1.09	-1.13	-0.92			
28	-1.29	-1.32	-1.11			
28	-1.38	-1.38	-1.18			
34	-1.56	-1.47	-1.34			
42	-1.64	-1.53	-1.42			
56	-1.76	-1.64	-1.52			
70	-1.85	-1.71	-1.63			
91	-1.93	-1.81	-1.73			

Tabelle A-5

CEM II/B-M 32.5 R						
Schwinden [‰]						
Alter [Tage]	M1	M4	Alter [Tage]	M2	M3	M5
1	0.00	0.00	1	0.00	0.00	0.00
2	-0.01	-0.02	2	-0.02	-0.04	-0.04
5	-0.05	-0.07	7	-0.07	-0.07	-0.07
7	-0.08	-0.10	14	-0.13	-0.12	-0.13
9	-0.10	-0.12	28	-0.20	-0.19	-0.20
14	-0.13	-0.15	42	-0.24	-0.22	-0.25
28	-0.19	-0.20	56	-0.25	-0.25	-0.28
35	-0.22	-0.22	70	-0.27	-0.28	-0.30
42	-0.25	-0.24	91	-0.29	-0.30	-0.33
56	-0.26	-0.26	182	-0.32	-0.34	-0.37
70	-0.28	-0.27				
91	-0.31	-0.29				
182	-0.33	-0.30				
Masseverlust [%]						
Alter [Tage]	M1	M4	Alter [Tage]	M2	M3	M5
1			1			
2	0.00	0.00	2	0.00	0.00	0.00
5	1.40	0.99	7	1.06	1.57	2.02
7	1.60	1.12	14	1.21	1.82	2.35
9	1.68	1.17	28	1.31	1.96	2.54
14	1.79	1.24	42	1.36	2.03	2.64
28	1.92	1.32	56	1.39	2.09	2.69
35	1.95	1.34	70	1.40	2.11	2.71
42	1.97	1.35	91	1.39	2.12	2.73
56	2.00	1.37	182	1.40	2.12	2.73
70	2.02	1.37				
91	2.03	1.38				
182	2.03	1.38				
Gesamtverformung Kriechen [‰]						
Alter [Tage]	M1	M4				
1	0.00	0.00				
2	-0.02	-0.03				
2	-0.26	-0.40				
5	-0.39	-0.58				
7	-0.45	-0.62				
7	-0.58	-0.82				
9	-0.69	-0.97				
14	-0.77	-1.07				
28	-0.91	-1.22				
28	-1.02	-1.35				
35	-1.12	-1.46				
42	-1.22	-1.55				
56	-1.28	-1.61				
70	-1.34	-1.66				
91	-1.39	-1.70				

Tabelle A-6

CEM III/B 42.5 L-LH HS						
Schwinden [‰]						
Alter [Tage]	M2	M3	M5	Alter [Tage]	M1	M4
1	0.00	0.00	0.00	1	0.00	0.00
2	-0.01	0.00	-0.01	2	-0.01	-0.02
7	-0.23	-0.18	-0.19	6	-0.17	-0.11
14	-0.30	-0.26	-0.29	7	-0.18	-0.12
28	-0.34	-0.32	-0.36	9	-0.22	-0.13
42	-0.37	-0.34	-0.38	14	-0.26	-0.16
56	-0.39	-0.36	-0.41	28	-0.32	-0.19
70	-0.39	-0.37	-0.42	35	-0.33	-0.19
91	-0.40	-0.37	-0.43	42	-0.35	-0.20
182	-0.43	-0.41	-0.46	56	-0.36	-0.22
				70	-0.37	-0.22
				91	-0.37	-0.22
				182	-0.41	-0.25
Masseverlust [%]						
Alter [Tage]	M1	M4	Alter [Tage]	M2	M3	M5
1			1			
2	0.00	0.00	2	0	0	0
6	1.64	0.97	7	0.98	1.45	1.72
7	1.68	1.01	14	1.07	1.59	1.91
9	1.71	1.03	28	1.14	1.67	2.03
14	1.76	1.06	42	1.17	1.73	2.08
28	1.81	1.11	56	1.19	1.75	2.12
35	1.82	1.11	70	1.19	1.76	2.14
42	1.83	1.12	91	1.21	1.78	2.16
56	1.84	1.12	182	1.21	1.8	2.18
70	1.85	1.13				
91	1.85	1.13				
182	1.85	1.13				
Gesamtverformung Kriechen [‰]						
Alter [Tage]	M1*	M4*				
1	0.00	0.00				
2	-0.01	-0.02				
2	-0.23	-0.33				
6	-0.55	-0.64				
7	-0.56	-0.66				
7	-0.77	-0.93				
9	-0.87	-1.01				
14	-0.95	-1.07				
28	-1.03	-1.13				
28	-1.15	-1.27				
35	-1.22	-1.31				
42	-1.24	-1.33				
56	-1.29	-1.36				
70	-1.32	-1.38	*bei Graphiken im Bericht Werte der Kriechzahl			
91	-1.34	-1.40	bei 7 und 28 Tagen weggelassen			

Tabelle A-7