

Relaxation und Rissempfindlichkeit von ultra-hochfestem Beton infolge behinderter autogener Verformung

1	Zusammenfassung.....	1
2	Einleitung.....	2
3	Rezepturen, Frischbetonaufbereitung und Probekörperherstellung.....	2
4	Untersuchungen	4
4.1	Allgemeines	4
4.2	Mechanischen Eigenschaften	4
4.3	Freie autogene Verformung	6
4.4	Messungen der Spannungen im Reissrahmen.....	9
5	Theoretische Spannungen infolge behinderter autogener Verformung.....	10
6	Gefahr der Rissbildung und Relaxation.....	11

1 Zusammenfassung

Ultra hochfeste Betone mit 28-Tage-Druckfestigkeiten von bis zu 200 N/mm² zeichnen sich durch hohe Zement- und Silikastaubgehalte, niedrige w/z-Werte und den Einsatz von Hochleistungsverflüssigern aus. Jedoch führen gerade diese betontechnologischen Maßnahmen zu erhöhtem chemischen und autogenen Schinden.

Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss betontechnologischer Maßnahmen (Zementart: CEM I; CEM III B; w/z-Wert; Silikastaubgehalt) auf die Formänderungen infolge chemischer Reaktionen und physikalischer Vorgänge (Selbstaustrocknung) während der Hydratation zu untersuchen, und bei deren Behinderung (starrer Reissrahmen; isotherme Bedingungen 20 °C) die Entstehung von Zwangspannungen zu bestimmen. Abschließend wurde auch die Gefahr der Rissbildung infolge der Zwangspannungen und das Relaxationsverhalten von ultra-hochfestem Beton von Beginn der Hydratation an beurteilt bzw. beschrieben.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Gefahr der Rissbildung bei den Betonen mit Portlandzement im jungen Alter (12 bis 15 Stunden) sehr hoch (Beanspruchungsgrad = Zwangspannung/Spaltzugfestigkeit > 70 %) war. Infolge der weiteren Erhärtung im Reissrahmen (Behinderungsgrad > 80 %) betrug der Beanspruchungsgrad unabhängig von der Zementart nach 14 bzw. 28 Tagen ca. 40 %, so dass z. B. bei Überlagerung mit Kerbspannungen (Vorsprünge, Ecken) eine Rissbildung auch im hohen Alter nicht ausgeschlossen werden kann.

Tendenziell stieg bei den Betonen mit geringerem Silikastaubgehalt die Relaxationsfähigkeit im jungen Alter (bis 3 Tage) an. Im höheren Alter (nach 14 d) lag die Relaxation bei den Betonen mit Hochofenzement unabhängig vom Silikastaubgehalt auf gleichem Niveau von rd. 70 %. Der Beton mit Portlandzement und geringerem Silikastaubgehalt (18 gegenüber 30 M.-% v. Z.) zeigte auch nach 14 d eine höhere Relaxation (87,0 gegenüber 78,9 %). Eine Verringerung des w/z-Wertes führte nur bei dem Beton mit Hochofenzement zu niedrigeren Relaxationsraten während der gesamten Messzeit.

2 Einleitung

Hochleistungsbeton zeichnet sich vor allem durch die auf das Eigengewicht bezogene hohe aufnehmbare Druckspannung aus, wird jedoch zunehmend aufgrund der niedrigen Porosität und somit hohen Gefügedichte auch in Bereichen mit aggressiver Umgebung wirtschaftlich erfolgreich eingesetzt (z. B. Unterbaukonstruktion des Kühlturmes CATTENOM /1/ aus „Reactive Powder Concrete“).

Bekannterweise können gerade im jungen Alter des Hochleistungsbetons infolge behinderter Formänderungen Zwangsspannungen auftreten, welche im schlimmsten Fall zu Trennrissen und somit zur Durchlässigkeit und Verminderung der Dauerhaftigkeit eines Bauteils führt.

Betontechnologische Ursachen für Formänderungen im jungen Alter lassen sich ihrer Entstehung nach einteilen in:

- Hydratationswärme,
- chemisches Quellen,
- chemisches Schwinden durch Volumenkontraktion bei der Hydratation,
- autogenes Schwinden infolge Selbstaustrocknung.

Die zwei letzten Punkte treten vor allem bei hochfesten Beton in Erscheinung, während der erste Punkt bei massigen Bauteile zu berücksichtigen ist und hier nicht untersucht wurde.

3 Rezepturen, Frischbetonaufbereitung und Probekörperherstellung

REZEPTUREN:

Die Untersuchungen wurden an zwei ultra-hochfesten Betonen, die sich durch die Zementart (CEM I 42,5 R/HS bzw. CEM III B 42,5 NW/HS) unterschieden, durchgeführt. An beiden Betonen wurde der Einfluss des w/z-Wertes und des Silikastaubgehaltes auf die zeitl. Entwicklung der autogenen Verformung, die infolge Behinderung verursachten Zwangsspannungen und auf die mechanischen Eigenschaften (Spaltzug- und Druckfestigkeit sowie stat. E-Modul) bestimmt.

Bei Variation des w/z-Wertes und des Silikastaubgehaltes (vgl. Tabelle 1) wurde das Volumen des Bindemittelleimes (Zement, Silikastaub und Wasser) konstant gehalten.

Tabelle 1: Versuchsmatrix mit den zu variierenden Parametern

Parameter	Einheit	Beton I	Beton II
Zementart	[-]	CEM III B 42,5 NW/HS	CEM I 42,5 R/HS
Bindemittelleimvolumen	[l/m ³]	612	495
Silikastaub	[M.-% v. Z.]	0 – 12 ⁽¹⁾ – 14 – 18	18 – 22 – 26 – 30 ⁽²⁾
w/z-Wert	[-]	0,20 – 0,22 – 0,24 ⁽¹⁾	0,27 ⁽²⁾ – 0,30 – 0,33

⁽¹⁾ Ausgangsrezeptur Beton I

⁽²⁾ Ausgangsrezeptur Beton II

FRISCHBETONAUFBEREITUNG:

Um einen fließfähigen, porenfreien Frischbeton herzustellen, mussten aufgrund des niedrigen w/z-Wertes und der feinststoffreichen Mischung (große zu benetzende Oberfläche) besondere Anforderungen an die Mischtechnik gestellt werden. Der eingesetzte Intensiv-Mischer (R02 Vac. Fa. EIRICH) gewährleistet aufgrund der hohen Mischintensitäten, der Schrägstellung des Mischbehälters und der angeschlossenen Vakuumpumpe folgende Anforderungen:

- kurze Mischzeiten,
- homogenes Untermischen kleinster Mengen von Zusatzstoffen und -mitteln,
- homogenisieren von Rohstoffen mit stark unterschiedl. Rohdichten,
- entlüften des Frischbetons während des Mischens.

Folgende Mischreihenfolge hatte sich in Vorversuchen bewährt und wurde auch bei der Aufbereitung aller für diese Untersuchungen hergestellten Betone angewendet.

PROBEKÖRPERHERSTELLUNG:

Für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften war es erforderlich Probekörper unterschiedlicher Geometrie herzustellen (vgl. Tabelle 2). Die Probekörper wurden unmittelbar im Anschluss an das Mischen hergestellt.

Tabelle 2: Probekörpergeometrie in Abhängigkeit der Prüfung

Prüfung	Probekörper-Geometrie
Druckfestigkeit	Prismen (B/H/L = 40/40/160 mm) Zylinder (\varnothing /H = 50/50 mm)
Spaltzugfestigkeit	Zylinder (\varnothing /H = 50/100 mm)
stat. E-Modul	Zylinder (\varnothing /H = 50/200 mm)
freies autogenes Schwinden	Zylinder (\varnothing /H = 34/165 mm)
zentr. Zwangspannung	Reissrahmen Balkengeometrie (B/H/L = 50/35/420 mm)

Die Prismen (B/H/L = 40/40/160 mm) wurden nur zur Prüfung der Druckfestigkeiten im jungen Alter (bis 1 Tag) benötigt. Bei den Zylindern wurden die Stirnflächen vor der jeweiligen Prüfung planparallel geschliffen.

4 Untersuchungen

4.1 Allgemeines

Alle Untersuchungen wurden unter isothermen Bedingungen bei 20 °C und bei konservierter Lagerung (kein Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung) durchgeführt.

Die Belastungsgeschwindigkeit betrug gemäß DIN 1048 T.5 /2/ bei der Prüfung der Druckfestigkeit und des stat. E-Moduls $0,5 \pm 0,2 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ und bei der Spaltzugfestigkeitsprüfung $0,05 \pm 0,02 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$.

Die Bestimmung des stat. E-Moduls erfolgte durch dreimalige Be- und Entlastung (Unterspannung = $0,5 \text{ N}/\text{mm}^2$; Oberspannung = $1/3$ der Druckfestigkeit zum Zeitpunkt der Prüfung). Die Unter- bzw. Oberspannung wurde vor und nach der dritten Belastung für 30 s gehalten, lediglich bei der Prüfung im jungen Alter (bis 1 d) wurde um plastische Verformungen zu vermeiden ohne Haltezeit geprüft.

4.2 Mechanische Eigenschaften

Wie schon von Normal- und Hochleistungsbeton bekannt /3, 4/, entwickelte sich der stat. E-Modul schneller als die Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit (siehe Abbildung 1).

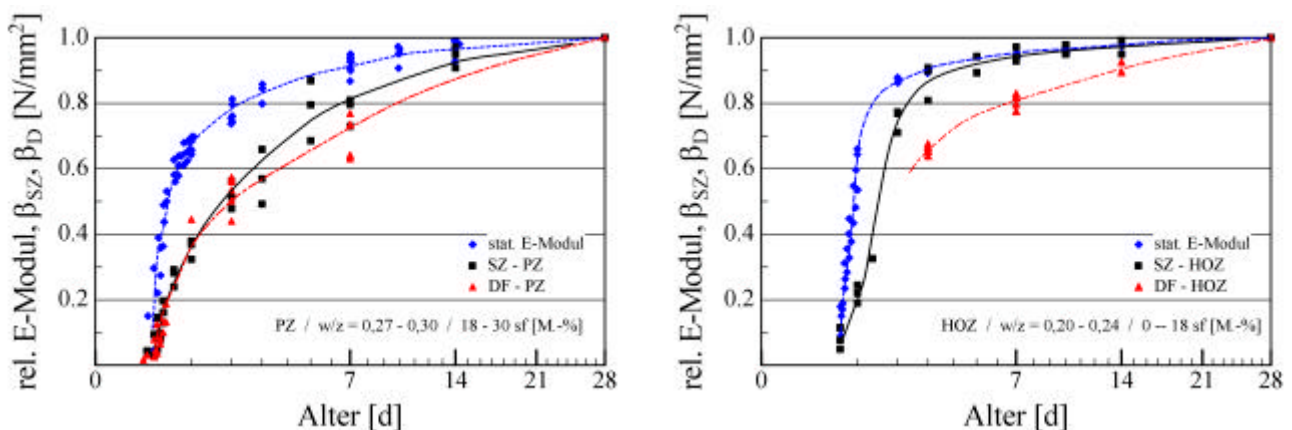


Abbildung 1: Entwicklung der mechanischen Eigenschaften (links: Betone mit Portlandzement; rechts: Betone mit Hochofenzement)

DRUCKFESTIGKEIT:

Die 28-Tage-Druckfestigkeiten der Betone mit Portlandzement lagen um ca. 15 % über denen mit Hochofenzement (rd. 175 gegenüber 150 N/mm^2). Eine Verringerung des Silikastaubgehaltes führte nur bei Unterschreitung einer von der Zementart abhängigen Grenzdosierung zu Einbußen in der Druckfestigkeit. Während diese bei dem Portlandzement mit rd. 22 M.-% bez. a. Z. quantifiziert werden konnte, war beim Hochofenzement aufgrund der Versuchsmatrix (18, 14, 12 und 0 M.-% sf bez. a. Z.) nur die Aussage möglich, dass diese unter 12 M.-% liegen muss.

Bei den Betonen mit Portlandzement lagen die 28-Tage-Druckfestigkeiten der Mischungen ($w/z \pm 0,03$) auf gleichen Niveau von rd. 175 N/mm^2 .

Der Hochofenzement zeigte sich bezüglich der Variation des w/z-Wertes in einem engen Bereich ($\pm 0,02$) sensibler, so lagen die 28-Tage-Druck-festigkeiten der Mischung mit dem geringsten w/z-Wert (0,20 gegenüber 0,24) rd. 10 % höher (165 gegenüber rd. 150 N/mm²).

SPALTZUGFESTIGKEIT:

Die 28-Tage-Spaltzugfestigkeiten aller untersuchten Betone lagen auf dem hohen Niveau von 14 N/mm². Die Entwicklung der Spaltzugfestigkeit bei den Betonen mit Hochofenzement schritt jedoch schneller voran, so lagen die Spaltzugfestigkeiten nach 3 Tagen mit rd. 12 N/mm² gegenüber rd. 8 N/mm² wesentlich höher als die der Rezepturen mit Portlandzement (s. Abbildung 2).

Ein Einfluss aus der Variation des Silikastaubgehaltes und des w/z-Wertes war bei beiden Zementen nicht erkennbar, tendenziell war die Spaltzugfestigkeitsentwicklung bei höheren w/z-Werten etwas langsamer.

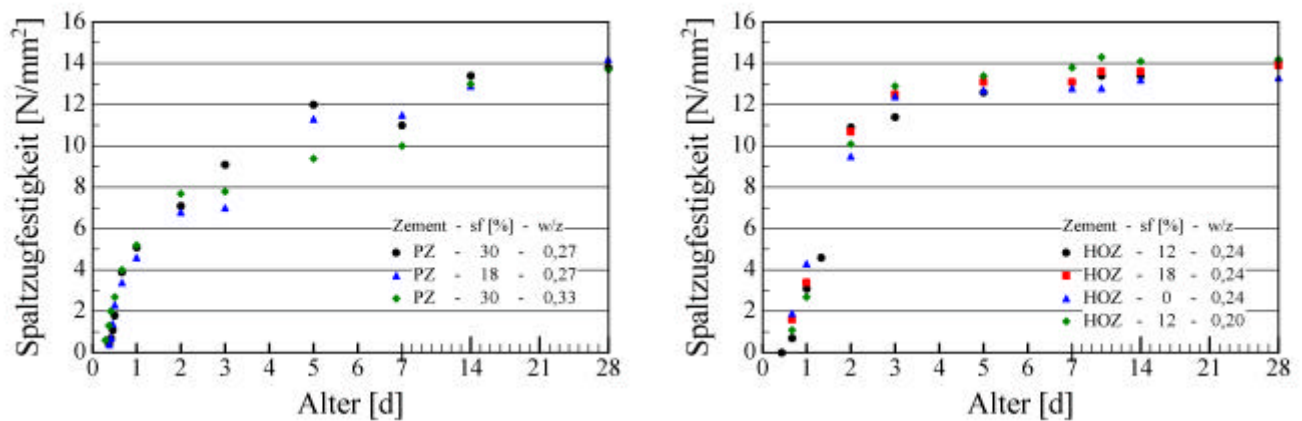


Abbildung 2: Einfluss des Silikastaubgehaltes (sf) und w/z-Wertes auf die Spaltzugfestigkeit der Betone mit Portlandzement (links) und Hochofenzement (rechts)

STATISCHER E-MODUL:

Wie schon bei der Spaltzugfestigkeit lagen nach 28 Tagen die stat. E-Module aller Betone (Ausnahme Rezeptur Hochofenzement ohne Silikastaub) unabhängig von der Zementart auf gleichem Niveau bei rd. 45 000 N/mm². Auch entwickelte sich der stat. E-Modul der Betone mit Hochofenzement ähnlich wie die Spaltzugfestigkeit etwas schneller. Die Ursachen für den geringen E-Modul der Mischung ohne Silikastaub liegt wahrscheinlich in einer ungünstigeren Porengrößenverteilung und schlechter ausgebildeten Kontaktzone des erhärteten Betons.

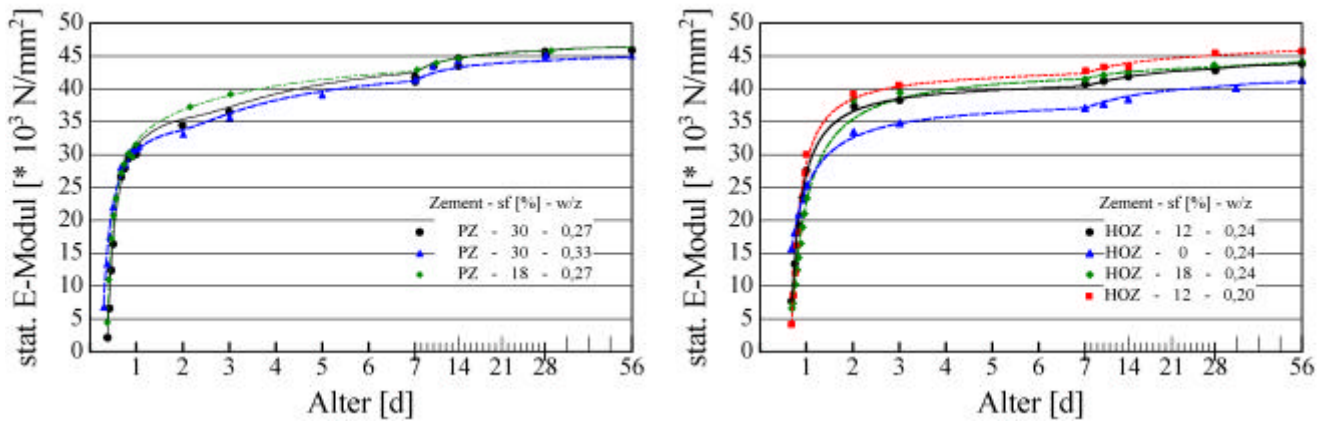


Abbildung 3: Einfluss des w/z-Wertes und des Silikastaubgehaltes (sf) auf den stat. E-Modul der Betone (links: Portlandzement; rechts: Hochofenzement)

Für die Berechnung der theoretischen Spannungen wurden mit Hilfe einer Fitfunktion für alle 5 Minuten ein Wert berechnet. Die Übereinstimmung der Funktion und den gemessenen stat. E-Modulen war zu jedem Zeitpunkt sehr gut (vgl. Abbildung 3).

4.3 Freie autogene Verformung

Die Probekörper wurden während der Messung vor Feuchtigkeitsabgabe geschützt. Der Beginn der Messung erfolgte immer rd. 30 min nach Wasserzugabe.

Da gerade im Übergangsbereich vom viskosen zum visko-elastischen Verhalten von Beton eine strenge Trennung von chemischem und autogenen Schwinden nicht möglich ist, wird im Folgenden nur noch von der autogenen Verformung gesprochen.

Die freie autogene Verformung wurde an liegenden Zylindern bei isothermer Lagerung (20 °C) linear, kontinuierlich (alle 5 min ein Messwert) gemessen. Mit Hilfe eines Referenzprobekörpers wurde die Temperatur über die gesamte Messdauer im Kern des Probekörpers erfasst.

Die Frischbetontemperatur lag aufgrund des intensiven Mischens und den ersten chemischen Reaktionen im Schnitt bei 28 bis 30 °C. Während der anschließenden Ruheperiode kühlten die Probekörper infolge der geringen Probekörperabmessung relativ schnell auf die Umgebungstemperatur (20 °C) ab.

Mit Einsetzen der Hydratation (Beschleunigungsperiode) nach ca. 6 Stunden beim Portlandzement bzw. 9 Stunden beim Hochofenzement wurde ein Anstieg der Temperatur gemessen (max. 1,7 K bei isothermer Lagerung 20 °C; vgl. Abbildung 4).

Die zeitl. Verschiebung der einzelnen Perioden gegenüber den Angaben aus der Literatur /5, 6/ ist offensichtlich auf die spezifische Zusammensetzung des ultra-hochfesten Betons (niedriger w/z-Wert, hoher Silikastaubgehalt und Einsatz von hochwirksamen FM) zurückzuführen.

Da Beton im jungen Alter (bis 12 Stunden) keinen konstanten Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzt und der maximale Temperaturanstieg infolge Hydratation nur 1,7 K (isotherme Lagerung, kleiner Probekörperquerschnitt) betrug wurde auf eine Berechnung der Temperaturverformung verzichtet. Im Extremfall führte die Berücksichtigung der Temperaturverformung (konst. $\alpha_T = 1 \cdot 10^{-5}$) zu einer vernachlässigbaren Abweichung der autogenen Verformung von 1,5 % (vgl. Abbildung 4 rechts). In der Anfangsphase wurde eine starke Verkürzung des Betons gemessen, die nach rd. 4 Stunden zum Stillstand kam.

Offensichtlich sind neben den chemischen und physikalischen Vorgängen auch temperaturbedingte Formänderungen (Abkühlen auf 20 °C) für die Verkürzung verantwortlich (vgl. Abbildung 4).

Um die Bedeutung dieser frühen Verkürzung beurteilen zu können wurde an einer Mischung gleichzeitig das Erstarrungsverhalten mit dem Vicat-Gerät bestimmt. Der Beginn und das Ende des Erstarrens erfolgte erst rd. 2 Stunden nach dem Abklingen der frühen Verkürzung (vgl. Abbildung 4). Auffällig war, dass die Zeitspanne zwischen Erstarrungsbeginn und -ende nur 10 min betrug und exakt mit dem Temperaturanstieg infolge Hydratation zusammenfiel.

Dieser Zeitpunkt entspricht dem Beginn der Beschleunigungsperiode, in der anfangs weiterer Ettringit und nach dem Verbrauch des zugesetzten Sulfats Monosulfat und Calciumaluminathydrat gebildet wird /5/. Außerdem entstehen größere Mengen von Calciumsilicathydrat, welche zum Aufbau des Gefüges führen und mit einer weiteren Volumenverminderung verbunden sind. Gleichzeitig entsteht auch der Portlandit, welcher seinerseits mit dem Silikastaub reagiert (puzzolanische Reaktion) und feste CSH-Phasen bildet. Diese puzzolanische Reaktion hat ebenfalls eine Volumenverminderung zur Folge.

Aufgrund der erst im Anschluss an das Abklingen der frühen Verkürzung (ersten 4 Stunden) erfolgten Erstarrung wird bei der Auswertung der autogenen Verformung diese nicht berücksichtigt. Als Bezugslänge für die Auswertung wurde deswegen die Länge des Probekörpers zum Zeitpunkt des Temperaturanstiegs (t_0) gewählt (siehe Abbildung 4).

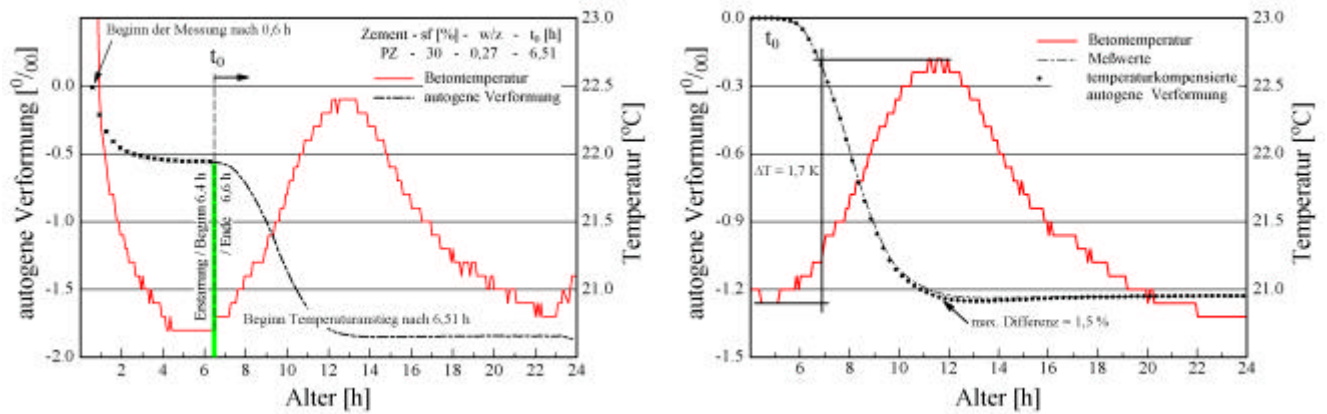


Abbildung 4: (links) Zusammenhang zwischen autogener Verformung, Temperaturentwicklung und Erstarrung (Vicat-Nadel) (rechts) geringe Abweichung infolge temperaturbedingter Verformung

Hinsichtlich der autogenen Verformung konnte bei den Betonen mit Hochofenzement kein signifikanter Einfluss aus der Variation des Silikastaubgehaltes beobachtet werden, welches wahrscheinlich auf die Verfügbarkeit bzw. Menge des Portlandzementes als Reaktionspartner für den Silikastaub zurückzuführen ist. Der Beton ohne Silikastaub (Hochofenzement) zeigte eine geringere autogene Verformung (vgl. Abbildung 5), dies bestätigt die Angaben aus der Literatur /7/ wonach die Reaktion von Silikastaub und Portlandzement zu einer Volumenverringering führt.

Der Beton mit Portlandzement und niedrigem Silikastaubgehalt (18 gegenüber 30 M.-% bez. a. Z.) zeigte in der Anfangsphase (bis 1 Tag) eine größere autogene Verformung. Offensichtlich lag es an dem bei gleichem Bindemittelleimvolumen (Wasser, Zement, Silikastaub) höherem Zementleimgehalt (gleicher w/z-Wert) der Mischung mit weniger Silikastaub, da nach Reschke /7/ der Schrumpffaktor des Portlandzementes (berechnet in Abhängigkeit der Klinkerphasen $F_{CS} = 0,1908$) größer als der des Silikastaubes ($F_{FS} = 0,1021$ für die puzzolanische Reaktion) ist.

Die Zementart wirkte sich wesentlich auf die autogene Verformung aus, so zeigten die Betone mit Portlandzement, trotz geringerer Zementgehalte eine lineare, rd. doppelt so hohe Verkürzung (-1,3 ‰ gegenüber -0,6 ‰) innerhalb des ersten Tages (siehe Abbildung 5). Dies lässt auf einen deutlich geringeren Schrumpffaktor des Hochofenzementes schließen.

Die Betone mit Hochofenzement zeigten alle nach einer anfänglichen Verkürzung (bis 20 h) ein geringes Quellen. Nach dieser Phase (Dauer rd. 10 h), deren Ursache nicht eindeutig geklärt wurde aber mit der Bildung von Monosulfat zusammenhängen könnte, setzte sich die Verkürzung fort. Bei beiden Zementen waren die autogenen Verformungen nach 56 Tagen noch nicht abgeklungen. Die autogene Verformung der Betone mit Portlandzement lag auch nach 56 Tagen mit -1,7 ‰ gegenüber -1,3 ‰ deutlich höher als die der Betone mit Hochofenzement (vgl. Abbildung 5).

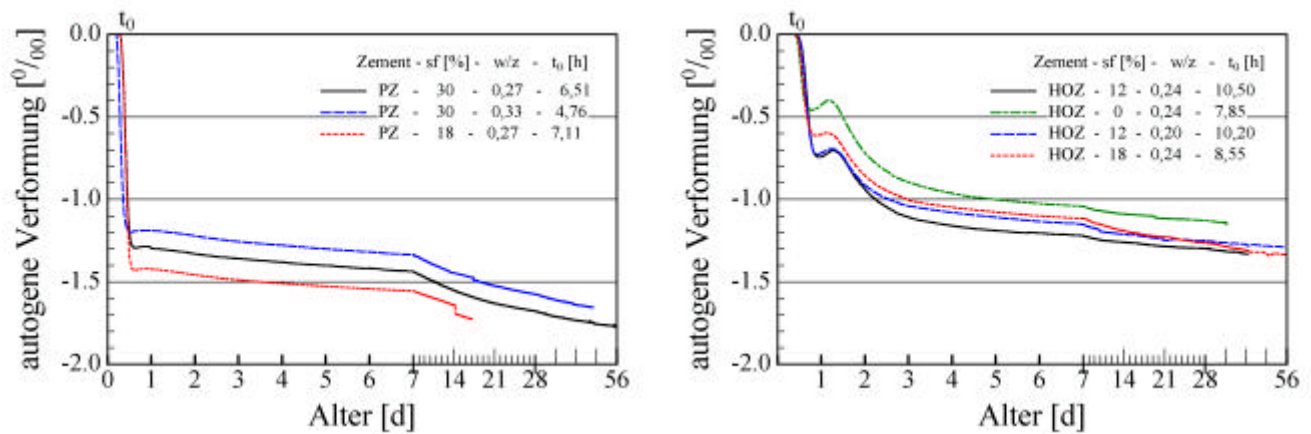


Abbildung 5: Autogene Verformung der Betone mit Portlandzement (links) und Hochofenzement (rechts) in Abhängigkeit des w/z-Wertes und Silikastaubgehaltes

4.4 Messungen der Spannungen im Reissrahmen

Mit Hilfe eines starren Reissrahmens wurden die infolge behinderter autogener Verformung (konservierte Lagerung) entstehenden Spannungen kontinuierlich (alle 5 min ein Messwert) gemessen. Die starke Verkürzung führte im jungen Alter des Betons, zu dem da der Elastizitätsmodul noch klein war und das Relaxationsvermögen noch groß, nur zu geringen Zugspannungen. Bei keiner Messung wurde ein Spannungsverlust infolge Schlupf festgestellt.

BEHINDERUNGSGRAD:

Der Behinderungsgrad des eingesetzten Reissrahmens nahm von anfänglich 100 % mit dem Ansteigen des stat. E-Moduls des Betons (45 000 N/mm² nach 28 Tagen) auf rd. 80 % ab.

Ein Behinderungsgrad von 80 % entspricht in etwa dem in der Praxis auftretenden Behinderungsgrad bei dem Betonieren einer Wand auf ein Fundament.

Der qualitative Verlauf der Spannungsentwicklung ähnelte dem Verlauf der autogenen Verformung. Die große anfängliche Verkürzung der Betone mit Portlandzement, führte trotz des noch geringen E-Moduls zu einem Ansteigen der Zwangspannungen (zentrischer Zug) auf 1,3 N/mm² nach 12 Stunden. Bei den Betonen mit Hochofenzement stiegen die Zugspannungen innerhalb von 20 Stunden nur auf ca. 0,9 N/mm² an, fielen jedoch infolge der anschließenden geringen Quellverformung (Dauer ca. 10 h) bei gleichzeitig steigendem E-Modul des Betons um 66 % auf ca. 0,3 N/mm² ab (vgl. Abbildung 6). Im Zuge der weiteren Hydratation (nach 1,5 Tagen) stiegen die Zwangspannungen bei den Betonen mit Hochofenzement deutlich schneller an. Dies ist auf die hohen autogenen Verformungsanteile bei hohem E-Modul (ca. 35 000 N/mm² nach 1,5 d) der Betone mit Hochofenzement zurückzuführen.

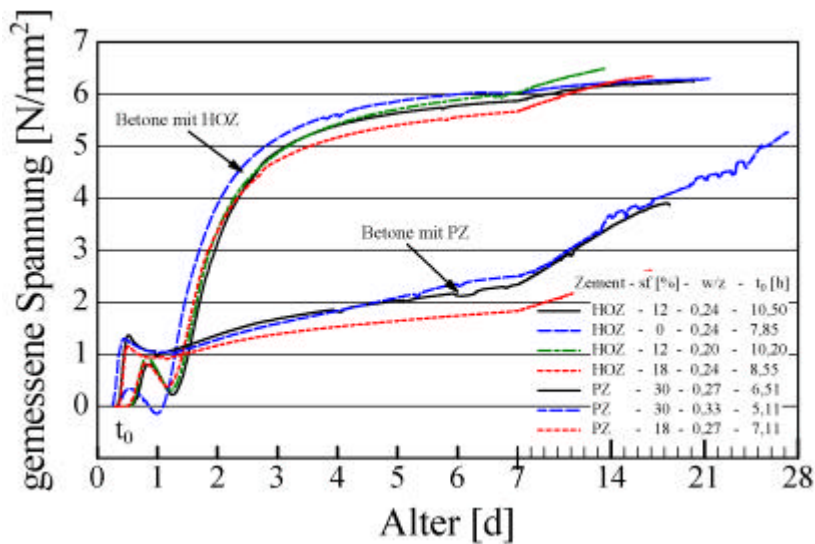
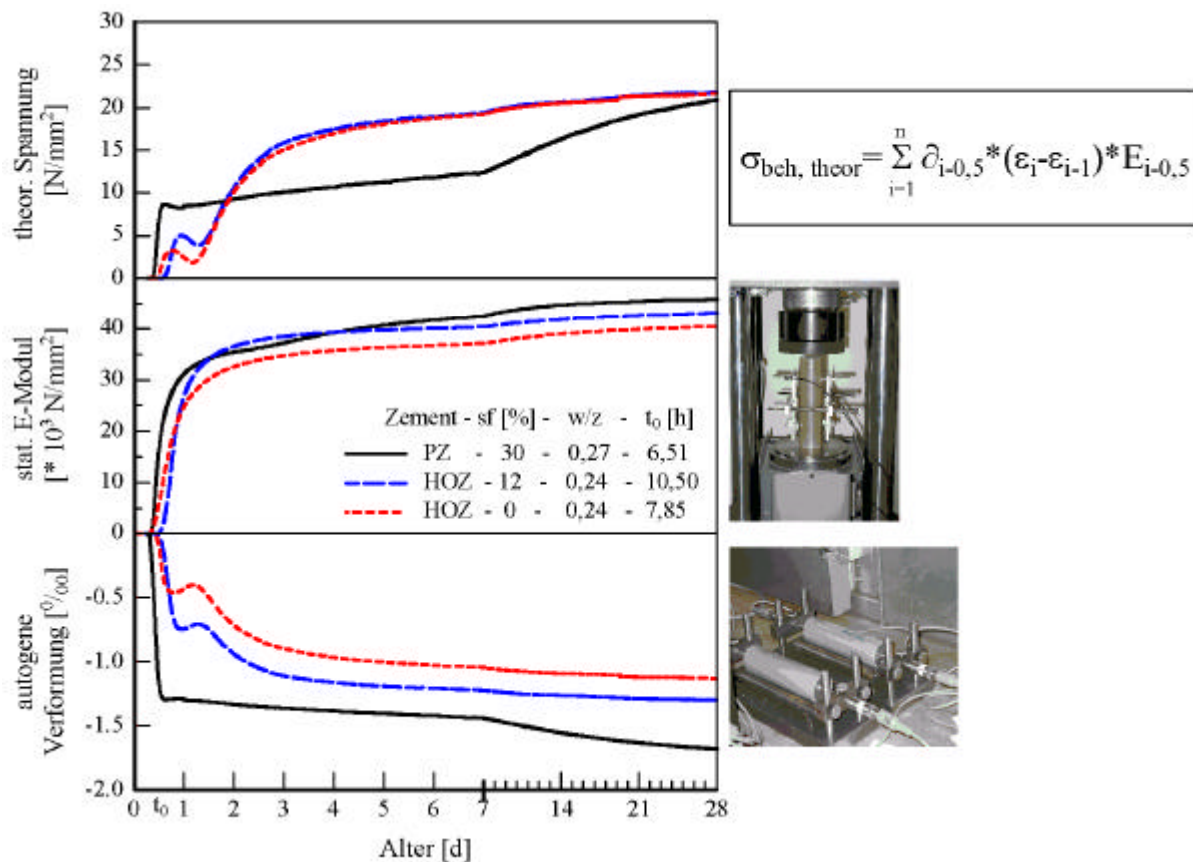


Abbildung 6: Zwangspannungen (zentr. Zug) infolge behinderter autogener Verformung

5 Theoretische Spannungen infolge behinderter autogener Verformung

Im Folgenden wurde n die theoretischen Spannungen (ohne Relaxation) aus dem Verlauf der freien, autogenen Verformung, des stat. E-Moduls und dem Behinderungsgrad des Reissrahmens (δ) berechnet.



$$\sigma_{\text{beh, theor}} = \sum_{i=1}^n \delta_{i-0,5} * (\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) * E_{i-0,5}$$

Abbildung 7: Theoretische Spannungen der Betone

6 Gefahr der Rissbildung und Relaxation

GEFAHR DER RISSBILDUNG:

Werden die bei hochfestem Beton im jungen Alter auftretenden großen Schwindverformungen durch das Betonieren auf bereits ausgehärtete Bauteile oder durch steife Schalungen bei feingliedrigen Bauteilen stark behindert (Behinderungsgrad $\geq 80\%$), so ist aufgrund der gegenüber dem E-Modul langsameren Festigkeitsentwicklung (vgl. Abbildung 1) die Gefahr der Rissbildung hoch.

Bjontegaard /8/ verglich die Bruchspannungen von unter Zwang erhärteten Betonen ($w/z = 0,4$) (Belastungssteigerung über Wegsteuerung des beweglichen Querhauptes des Reissrahmens) mit den im zentr. Zugversuch (nicht vorbelastete Probe) ermittelten Werten und fand heraus, dass erstere um rd. 20 % geringer ausfielen.

Weiterhin zeigten Untersuchungen /9/, dass mit längerer Belastungsdauer die aufnehmbare Zugspannung gegenüber dem Kurzzeitversuch zur Bestimmung der Zug- bzw. Spaltzugfestigkeit abnahm. Bei Normalbeton betrug die bei einer 7-tägigen Dauerbeanspruchung (zentr. Zug) ermittelte Bruchspannung nur rd. 70 % der Kurzzeitzugfestigkeit.

Diese Größenordnung für die Dauerstandfestigkeit von 70 % der Kurzzeitfestigkeit wurde auch durch Untersuchungen an hochfestem Beton /10/ bestätigt, bei höherer Dauerbeanspruchung kam es ausgehend von Fehlstellen (Lufteinschlüssen), scharfkantigen Zuschlagkörnern zu lokalem Mikrorisswachstum, welches aufgrund der geringen Nacherhärtung von hochfestem Beton nicht gebremst wurde, und schließlich zum Versagen führte.

Zur Beurteilung der Rissgefahr wurde der zeitliche Verlauf des Beanspruchungsgrades ($\sigma_{\text{gem.}} / \sigma_{\text{SZ}}$) aller untersuchten ultra-hochfesten Betone in Abbildung 8 dargestellt.

Diese Auswertung ergab, dass bei den Betonen mit Portlandzement die Gefahr der Rissbildung in den ersten 12 bis 15 Stunden sehr hoch (Beanspruchungsgrad $> 70\%$) war, während die Betone mit Hochofenzement weniger gefährdet (bis 35 %) waren. Dieser Zeitraum deckt sich in etwa bei einer Fertigteilproduktion mit der Verweilzeit des Betons in der Schalung, jedoch können aufgrund der Eliminierung der Temperaturentwicklung (isotherme Lagerung bei 20 °C) diese Erkenntnisse nicht direkt in die Praxis übertragen werden. Offensichtlich war die Dauer der hohen Beanspruchung kurz genug um nicht zum Versagen der Betone mit Portlandzement zu führen.

Im jungen Alter (bis 2 Tage) stiegen die Beanspruchungsgrade mit niedrigerem w/z -Wert und höherem Silikastaubgehalt tendenziell an. Bereits nach 3 Tagen war der Einfluss nur noch gering.

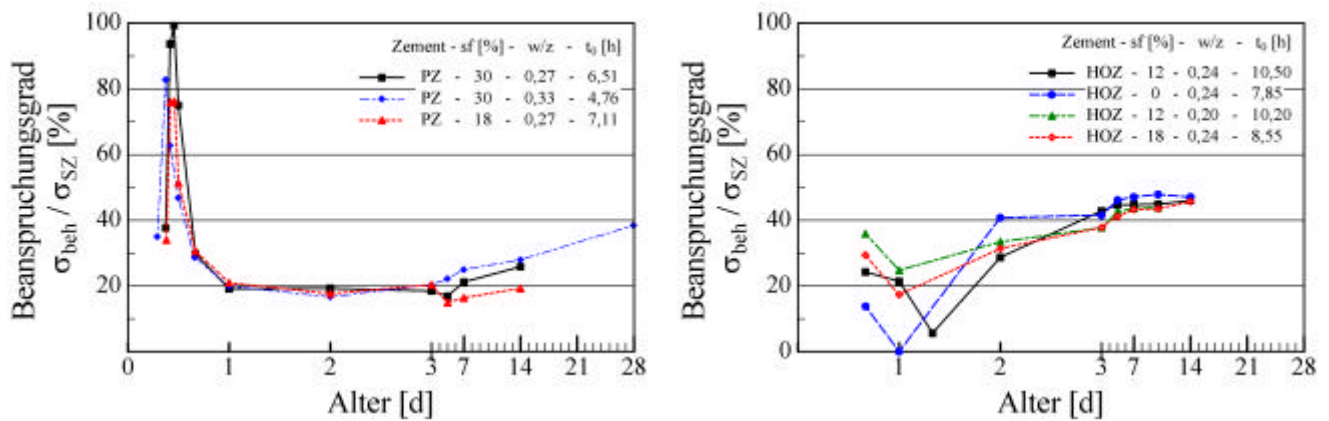


Abbildung 8: Zeitl. Verlauf des Beanspruchungsgrades infolge behinderter autogener Verformung der Betone mit Portlandzement (links) und Hochofenzement (rechts)

Bei Erhärtung unter Behinderung der Verformung im Reissrahmen, entspricht in der Praxis z.B. einer Betonage auf ein ausgehärtetes Fundament, stieg der Beanspruchungsgrad bei beiden Zementen im höheren Alter auf über 40 % an.

Bei Überlagerung mit Kerbspannungen, z.B. durch Vorsprünge und Ecken, kann der Beanspruchungsgrad auf 60 bis 70 % ansteigen, so dass es auch im späten Alter infolge der Dauerbeanspruchung (vgl. Abbildung 8) zur Rissbildung kommen kann.

RELAXATION:

Aufgrund des während der Hydratation sich zeitlich ändernden Verhältnisses des Beanspruchungsgrades ($\sigma_{gem.} / \sigma_{SZ}$) und stat. E-Moduls ist es nicht möglich quantitative Aussagen zum zeitlichen Verlauf der Relaxation zu machen.

Über den Vergleich der zeitl. Verläufe der berechneten theoretischen Spannungen mit den in dem Reissrahmen gemessenen Spannungen kann die Relaxation qualitativ beschrieben werden.

Während die Differenz zwischen theoretischen und gemessenen Zwangspannungen, als Maß für den Spannungsverlust durch Relaxation und Kriechen, bei den Betonen mit Portlandzement sehr schnell anstieg und nach ca. einem halben Tag konstant blieb, war dies bei Betonen mit Hochofenzement erst nach rd. 3 Tagen der Fall (vgl. Abbildung 9). Dieses unterschiedliche Verhalten ist auch auf die im jungen Alter sehr hohen Beanspruchungsgrade der Betone mit Portlandzement zurückzuführen, so dass ein direkter Vergleich nicht möglich ist.

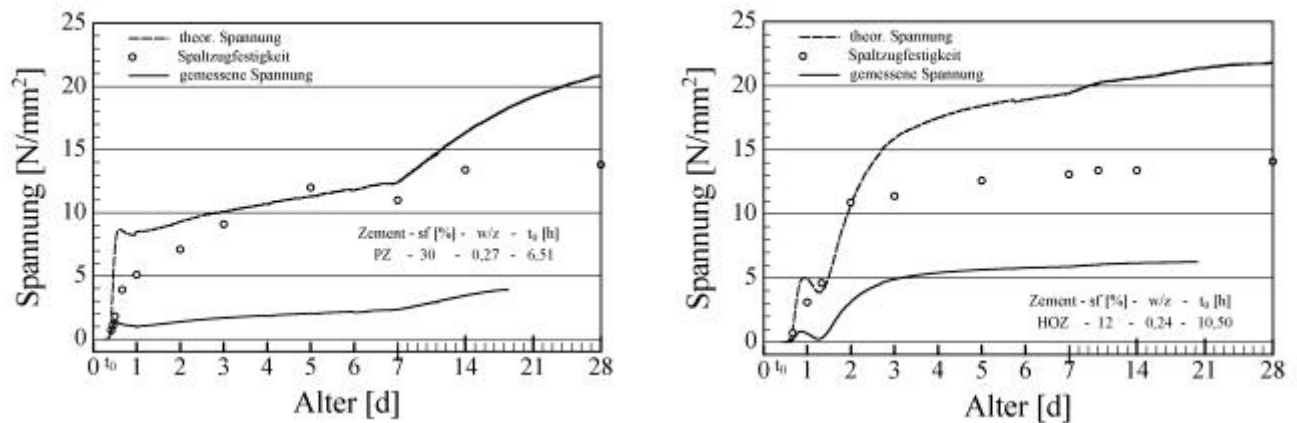


Abbildung 9: Zeitl. Entwicklung der Zwangspannungen, der Spaltzugfestigkeit und der theoretischen Zwangspannungen (berechnet)

Die Ergebnisse lassen eine genaue Angabe der unter diesen bestimmten Randbedingungen (zeitl. Behinderungsgrad, Lagerung bei 20 °C) bis zu einem konkreten Zeitpunkt relaxierten Zwangspannungen zu. Zum Beispiel wurden bis zum 1-ten bzw. 14-ten Tag bei dem Referenzbeton mit Portlandzement 88,5 bzw. 78,9 % der Zwangspannungen durch Relaxation und Kriechen abgebaut. Tendenziell stieg bei beiden Betonen mit geringerem Silikastaubgehalt die Relaxationsfähigkeit im jungen Alter (bis 3 Tage) an.

Im höheren Alter (nach 14 d) lag die Relaxation bei den Betonen mit Hochofenzement unabhängig vom Silikastaubgehalt auf gleichem Niveau von rd. 70 %. Der Beton mit Portlandzement und geringerem Silikastaubgehalt (18 gegenüber 30 M.-% v. Z.) zeigte auch nach 14 d eine höhere Relaxation (87,0 gegenüber 78,9 %).

Eine Verringerung des w/z-Wertes führte nur bei dem Beton mit Hochofenzement zu niedrigeren Relaxationsraten während der gesamten Messzeit (bis 14 bzw. 28 Tage).

- 1 Birelli G.; Dugat J.; Bekaert A.: The Use of RPC in Cross Flow Cooling Towers. International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Vol. 3, pp. 59-73 Sherbrooke, Kanada, 1998
- 2 DIN 1048-5: Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Ausgabe:1991-06
- 3 Laube M.: Werkstoffmodell zur Berechnung von Temperaturspannungen in massigen Betonbauteilen im jungen Alter. Doktorarbeit, TU-Braunschweig 1990.
- 4 König G.; Grimm R.: Hochleistungsbeton. Betonkalender 2000. Bd. 2. Verlag Ernst Sohn, Berlin 2000.
- 5 Locher F. W.: Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 2000, ISBN 3-7640-0400-2.
- 6 Stark J.; Möser B.; Eckart A.: Neue Ansätze zur Zementhydratation. ZKG international No. 01/2001 (Teil 1) und No. 02/2001 (Teil 2).
- 7 Reschke, T.: Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton. Dissertation publiziert in der Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 62/2000.
- 8 Bjontegaard, O.: Thermal Dilation and Autogenous Deformation as Driving Forces to Self-Induced Stresses in High Performance Concrete. Doctor ingenioravhandling 1999
- 9 Al-Kubaisy, M. A.; Young, A. G.: Failure of concrete under sustained tension. Magazine of Concrete Research Vol. 27 No. 92, September 1975, S. 171/178.
- 10 Rinder, T.; Reinhardt, H.-W.: Hochfester Beton unter Dauerzuglast. Beton- und Stahlbetonbau 96, Heft 4, 2001.