

Kriechverhalten von Betonen aus bauaufsichtlich zugelassenen Zementen mit Zumahlungen von inerten bzw. latent-hydraulischen Stoffen

T 2646

T 2646

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN

BEIM INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND MATERIALPRÜFUNG

DER UNIVERSITÄT HANNOVER

Nienburger Straße 3, 30167 Hannover

☎ Geschäftszimmer: (0511)762-3104, Telefax (05 11)762-4001, Vermittlung Universität: (0511)762-1, Telex: 09-23868 unihn
Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Suhr, ☎ (0511)762-3330

Schlußbericht

zum Forschungsvorhaben

Kriechverhalten von Betonen aus bauaufsichtlich zugelassenen Zementen mit Zumahlungen von inerten bzw. latent-hydraulischen Stoffen

Auftraggeber:

Deutsches Institut für
Bautechnik
Reichpietschufer 74-76
D-10785 Berlin

Aktenzeichen:

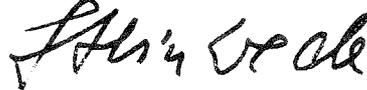
IV 1-5-517/87

Sachbearbeiter:



RR Suhr

Für die ausführende Anstalt:



RD Dr.-Ing. Steinwede

Leiter des Forschungsvorhabens:



Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Wierig

Der Bericht umfaßt 26 Seiten und einen Anhang von 15 Seiten

Inhaltsübersicht

		Seite
1	Einleitung	3
2	Versuchsprogramm	4
3	Versuchsbetone	5
3.1	Betonausgangsstoffe	5
3.1.1	Zemente	5
3.1.2	Zuschläge	5
3.2	Zusammensetzung und Herstellung	6
3.3	Frisch- und Festbetoneigenschaften	6
4	Versuchsdurchführung	8
5	Versuchsergebnisse und Auswertung	10
6	Berechnung der Schwind- und Kriechmaße	11
6.1	Allgemeines	11
6.2	Schwinden nach DIN 4227	12
6.3	Schwinden nach Eurocode 2	13
6.4	Kriechen nach DIN 4227	14
6.5	Kriechen nach Eurocode 2	15
6.6	Endkriechmaße nach Ross	17
7	Diskussion der Ergebnisse	18
8	Zusammenfassung und Folgerungen	24
9	Literatur	26

Anhang

1 Einleitung

Ältere Untersuchungen haben gezeigt, daß das Kriechverhalten der Betone neben mehreren anderen Parametern auch von dem jeweils verwendeten Zement abhängt /1/, /2/, /3/. Es zeigte sich, daß vor allem die Mahlfeinheit und die chemisch-mineralogische Zusammensetzung des Zementes von Einfluß sind. Diese beiden Zementeigenschaften beeinflussen aber auch die Anfangserhärtung der Betone sehr stark. Daher wird bei der Berechnung der Kriechverformungen nach DIN 4227 Teil 1 das „wirksame Betonalter“ in Abhängigkeit von der Anfangserhärtung der Zemente berücksichtigt. Diese Berechnung geht davon aus, daß langsam erhärtende Zemente unter sonst gleichen Verhältnissen ein stärkeres Kriechen der Betone bewirken als Zemente mit vergleichsweise schneller Anfangserhärtung.

Die erwähnten älteren Untersuchungen wurden mit damals genormten Zementarten (Portlandzement, Hochofenzement und Traßzement) durchgeführt. In den letzten Jahrzehnten hat sich auch die Technologie der Zementherstellung weiterentwickelt. Diese Entwicklung ist einmal dadurch gekennzeichnet, daß sich das Festigkeitsniveau der Normzemente im Laufe der Jahre stark angehoben hat. In jüngerer Zeit kam hinzu, daß mehrere neue Zementarten eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erhielten. Diese neuen Zementarten enthalten neben den klassischen Hauptbestandteilen (Klinker, Hüttensand) latent-hydraulische (Steinkohlenflugasche) oder inerte (Kalkstein) Zumahlstoffe.

Im Zulassungsverfahren der neuen Zementarten wurde das Kriech- und Schwindverhalten zunächst nicht geprüft. Mit den Untersuchungen, über die nachstehend berichtet wird, sollte geklärt werden, ob sich das Verhalten der neu zugelassenen Zemente signifikant von dem der genormten Zemente unterscheidet.

Außerdem sollte durch einen Vergleich der im Versuch ermittelten Schwind- und Kriechverformungen mit den nach den Regelungen der DIN 4227 bzw. des Eurocode 2 berechneten Verformungen geprüft werden, ob das Verhalten der neuen Zementarten ausreichend erfaßt wird.

Die Untersuchungen wurden im Auftrag des Deutschen Institutes für Bautechnik, Berlin, durchgeführt. Der Arbeitsplan wurde in dem zuständigen Sachverständigenausschuß "Betontechnologie" und mit einem Betreuungsausschuß abgestimmt. Dem Betreuungsausschuß gehörten die Herren Dr. Efes, Dr. Kern, Prof. Dr. Manns und Prof. Dr. Hilsdorf an.

2 Versuchsprogramm

Für die vergleichenden Kriech- und Schwindversuche an Betonen aus bauaufsichtlich zugelassenen Zementen mit Zumahlungen aus Steinkohlenflugaschen und aus Portland- und Hochofenzementen der Festigkeitsklassen 35 F und 35 L nach DIN 1164 wurden acht Zemente ausgewählt. Es wurden vier zugelassene Zemente sowie vier Normzemente - jeweils verschiedener Herkunft - in die Untersuchung einbezogen. Zusätzlich wurde noch ein in einem Zulassungsverfahren laufender Portlandkalksteinzement in das Vorhaben mit aufgenommen.

Die Betone wurden mit gleichem Mischungsverhältnis unter Verwendung eines Zuschlagmaterials mit einheitlicher Kornzusammensetzung hergestellt. An den Betonen wurden die üblichen Frisch- und Festbetonuntersuchungen durchgeführt. Die Probekörper für die Festbetonuntersuchungen wurden entsprechend DIN 1048 nachbehandelt und gelagert. Neben den Würfeldruckfestigkeiten nach 2, 7 und 28 Tagen wurden zu Beginn der Kriechversuche - diese begannen in einem Betonalter von 7 Tagen - auch die Zylinderdruckfestigkeit und der statische Elastizitätsmodul eines jeden Betons bestimmt.

Die Bestimmung der Kriech- und Schwindverformungen erfolgte an Betonzylindern im Klima 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte. Die Kriechspannung betrug 1/3 der bis zum Zeitpunkt der Belastung erreichten Zylinderdruckfestigkeit. Die Verformungen wurden über einen Zeitraum von 3 Jahren beobachtet.

Die nachfolgende Tafel 1 bietet einen Überblick über die durchgeführten Untersuchungen und die im folgenden verwendete Bezeichnung der Zemente und Betone.

Tafel 1: Übersicht über das Versuchsprogramm

Zement		Beton		Untersuchungen am Beton
Art und Festigkeitsklasse	Bez.		Bez.	
PZ 35 F	Z 1	B 1		Frischbeton: Konsistenz, Rohdichte, Luftgehalt.
PZ 35 F	Z 2	B 2		
HOZ 35 L	Z 3	B 3		
HOZ 35 L	Z 4	B 4		Festbeton: Würfeldruckfestigkeit nach 2, 7, 28 d; Zylinderdruckfestigkeit nach 7 d; Elastizitätsmodul nach 7 d; Kriech- und Schwindverformungen über einen Zeitraum von 3 Jahren.
FAZ 35 F	Z 5	B 5		
FAZ 35 F	Z 6	B 6		
FAHZ 35 F	Z 7	B 7		
FAHZ 35 F	Z 8	B 8		
PKZ 35 F	Z 9	B 9		

3 Versuchsbetone

3.1 Betonausgangsstoffe

3.1.1 Zemente

An den von verschiedenen Herstellern zur Verfügung gestellten Zementen wurden Prüfungen nach DIN 1164, Ausgabe Dez. 1986, durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in Tafel A 1 des Anhanges zusammengestellt.

Die Anteile der Hauptbestandteile der untersuchten Zemente wurden nicht einzeln ermittelt. Nach Auskunft der Hersteller und der uns vorliegenden Überwachungsergebnisse ergaben sich diese in etwa wie in der nachfolgenden Tafel 2 zusammengefaßt.

Tafel 2: Hauptbestandteile der Zemente

Zement Bez.	Zementart und Festig- keitsklasse	Anteil der Hauptbestandteile [M.-%]			
		PZ- Klinker	Hütten- sand	Flug- asche	Kalk- stein
Z 1 / Z 2	PZ 35 F	~ 100	-	-	-
Z 3 / Z 4	HOZ 35 L	~ 50	~ 50	-	-
Z 5 / Z 6	FAZ 35 F	~ 80	-	~ 20	-
Z 7 / Z 8	FAHZ 35 F	~ 70	~ 15	~ 15	-
Z 9	PKZ 35 F	~ 80	-	-	~ 20

3.1.2 Zuschläge

Als Betonzuschlag wurde Rheinmaterial mit einem Größtkorn von 32 mm aus der Grube Elbsee (Nähe Düsseldorf) verwendet. Der Zuschlagstoff war in den vier Lieferkörnungen 0/2, 2/8, 8/16 und 16/32 vorrätig. Aus den Korngruppen wurde ein Zuschlaggemisch zusammengesetzt, dessen Sieblinie zwischen den Regelsieblinien A 32 und B 32 nach DIN 1045 lag. Eine Siebanalyse des Zuschlaggemisches ergab die in Bild A 1 des Anhanges dargestellte Sieblinie.

3.2 Zusammensetzung und Herstellung

Die Betone wurden aus den Ausgangsstoffen nach Abschnitt 3.1.1 und 3.1.2 zusammengesetzt. Die Massenanteile waren für alle Betone die gleichen. Sie sind aus Tafel 3 zu entnehmen. Diese Betonzusammensetzung wurde vom Betreuungsausschuß festgelegt, weil sie neben anderen auch für die Untersuchungen im Zulassungsverfahren für Zemente angewendet wird.

Tafel 3: Zusammensetzung der Betone B 1 - B 9

Zementgehalt z	[kg/m ³]	300
Wassergehalt w	[kg/m ³]	180
w/z-Wert	[-]	0,60
Zuschlaggehalt g	[kg/m ³]	1860
Mischungsverhältnis	[-]	1 : 6,2 : 0,6

Das Mischen der Ausgangsstoffe erfolgte in einem 150 l-Eirich-Zwangsmischer der Prüfanstalt. Nach Wasserzugabe wurde der Beton etwa zwei Minuten gemischt. Zur Herstellung der Probekörper war eine relativ große Betonmenge erforderlich. Deshalb wurden zwei Mischungen zu je 110 l Beton gefertigt, auf einen ebenen, festen Boden geschüttet und mit Harke und Schaufel von Hand zusammengemischt. Der Frischbeton wurde in Stahlformen, die mit entsprechenden Aufsetzrahmen versehen waren, eingefüllt. Die Verdichtung erfolgte für eine Dauer von 30 s auf einem Rütteltisch. Die mit dem Frischbeton gefüllten Formen wurden mit feuchten Tüchern abgedeckt. Nach 24 h wurden die Proben entschalt und bis zu einem Alter von sieben Tagen unter Wasser gelagert. Anschließend wurden sie bis zur Prüfung in einem klimatisierten Raum bei einer Temperatur von 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert.

3.3 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Nach dem Homogenisieren der zwei Frischbetonmischungen eines jeden Betons wurden die Frischbetonprüfungen nach DIN 1048 durchgeführt. In Tafel A 2 des Anhangs sind die Ergebnisse sowie die aus den Frischbetonrohddichten und dem Mischungsverhältnis berechneten Ist-Zusammensetzungen der Betone zusammengestellt.

Die Festbetonprüfungen erfolgten nach DIN 1048, Ausgabe Dezember 1978. Die Rohdichte und die Druckfestigkeiten der Betone wurden an Würfeln mit einer Kantenlänge von 20 cm nach 2, 7 und 28 Tagen bestimmt. Außerdem wurde die Zylinderdruckfestigkeit im Alter von 7 Tagen an Probekörpern mit den Abmessungen $d = 15$ cm, $h = 30$ cm, ermittelt, nachdem vorher die Druckflächen eben geschliffen wurden.

Der statische Elastizitätsmodul wurde an jeweils drei Zylindern ($d = 15$ cm, $h = 30$ cm) im Alter von 7 Tagen bestimmt. Die obere Prüfspannung betrug etwa ein Drittel der zuvor an einem gesondert geprüften Zylinder (s. o.) festgestellten Festigkeit. Die Verformungen wurden mit Meßuhren mit einer Meßgenauigkeit von 0,01 mm gemessen. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tafel A 3 des Anhanges zusammengestellt.

4 Versuchsdurchführung

Die Kriechversuche wurden an jeweils drei Zylindern $d = 15$ cm, $h = 50$ cm, durchgeführt. An drei weiteren gleichen Probekörpern wurde die Schwindverformung festgestellt.

Im Alter von 7 Tagen wurden die Zylinder der Wasserlagerung entnommen. Die Wasserlagerung war vorher kurz unterbrochen worden, um die Endflächen der für die Untersuchung des Kriechens vorgesehenen Probekörper mit einer naß arbeitenden Schleifmaschine eben zu schleifen. Um nach der Feuchtelagerung möglichst schnell mit den ersten Messungen beginnen zu können, wurden die für das Aufkleben der Meßmarken vorgesehenen Stellen auf den Mantelflächen mit Warmluft getrocknet. Jeder Zylinder wurde mit vier vertikalen Meßstrecken, die gleichmäßig über den Umfang verteilt wurden, versehen. Nach ausreichender Erhärtung des Klebstoffes wurden die Probekörper (Kriechproben) in die Belastungseinrichtung eingebaut. Die erforderlichen Belastungseinrichtungen waren vom Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover entwickelt und angefertigt worden. Sie ist in /4/ ausführlich beschrieben und in Bild A 2 des Anhanges dargestellt.

Bei der verwendeten Versuchseinrichtung wird die erforderliche konstante Belastung mit einer ölhydraulischen Druckzelle aufgebracht. Die Druckkonstanthaltung erfolgte über Druckkissen mit einer Stickstoffgasfüllung. Vor dem Einbau der Probekörper wurde die Belastungseinrichtung jeweils mit einer im Institut hergestellten Druckmeßdose geprüft und kalibriert. Das Aufbringen der Dauerstandlast einschließlich der Feinregulierung erfolgte innerhalb von 30 bis 40 s. Die Belastungen wurden so gewählt, daß die Druckspannungen in den Prüfkörpern jeweils $1/3$ der im Alter von 7 Tagen ermittelten Zylinderdruckfestigkeiten (vergl. Tafel A 3) betragen. Die aufgebrachten Kriechspannungen sind aus der Tafel A 6 des Anhanges ersichtlich. Während der Dauer der Kriechversuche wurde die Höhe der Belastung wöchentlich einmal kontrolliert und gegebenenfalls nachreguliert.

Die zur Messung der Schwindverformungen vorgesehenen, unbelasteten Probekörper waren gleich den belasteten hergestellt und behandelt worden. Die Anordnung der Meßstrecken entsprach der an den belasteten Zylindern. Während der Versuchsdauer standen diese Schwindzylinder in demselben klimatisierten Raum wie die Kriechproben.

Der Klimaraum wurde konstant bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gehalten. Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden von einem schreibenden Thermohygrographen aufgezeichnet. Das Raumklima wurde täglich kontrolliert.

Die Länge der Meßstrecken betrug grundsätzlich 300 mm. Die Meßstrecken verliefen jeweils in Richtung der Probenachse und endeten in einem Abstand von 10 cm von den Zylinderendflächen. Für die Dehnungsmessungen wurde der Setzdehnungsmesser Nr. 555 (Bauart Pfender, Firma Fritz Staeger, Berlin) verwendet. Bei jedem Meßtermin wurden alle vier Meßstrecken je Zylinder dreimal gemessen und die Dehnung pro Strecke aus dem Mittel der drei Ablesungen errechnet. Dabei wurde immer der Einfluß einer Wärmedehnung der Meßstrecke und des Gerätes durch subtraktive Berücksichtigung laufender Vergleichsmessungen auf unbelasteten Kontrollstrecken (Invarstab) kompensiert. Die Genauigkeit der Meßgeräteanzeige wird vom Hersteller mit rd. $\pm 0,5 \mu\text{m}$ angegeben. Bezogen auf eine Länge der Meßstrecke von 300 mm entspricht dies einer Ablesegenauigkeit von $1,7 \cdot 10^{-6}$.

Der Meßvorgang an sich dauerte pro Beton mit drei Zylindern (es wurden dreimal je 4 Meßstrecken gemessen) etwa 15 Minuten. Dieser zeitliche Meßaufwand mußte bei den Kriechversuchen auch für die ersten Verformungsmessungen unmittelbar nach Belastung in Anspruch genommen werden. Bei diesem Prüftermin ist die Verformungsgeschwindigkeit noch relativ groß. Die festgestellten "elastischen" Verformungen sind daher schon mit einem geringen Kriechanteil behaftet.

Die Beobachtungsdauer des Vorhabens betrug drei Jahre. In dieser Zeit wurden an 14 Terminen die Verformungen bestimmt, wobei die Meßtermine zu Beginn des Beobachtungszeitraumes enger lagen. Die Verformungsmessungen fanden sofort nach Belastung der Probekörper und im weiteren nach 1, 3, 7, 14, 21, 28, 90, 180, 360, 480, 600, 720, 900 und 1080 Tagen statt.

5 Versuchsergebnisse und Auswertung

Die Versuchsergebnisse sind in den Tafeln A 4 bis A 7 des Anhanges zusammengestellt und in den Bildern A 3 bis A 12 grafisch aufgetragen.

Tafel A 4 enthält die gemessenen Gesamtverformungen. Die in dieser Tafel enthaltenen elastischen Verformungen, die unmittelbar nach Belastungsbeginn gemessen wurden, sind dort nur der Vollständigkeit halber mitgeteilt.

In Tafel A 5 sind die Schwindverformungen ε_s zusammengestellt. Die Bilder A 3, A 5, A 7, A 9 und A 11 des Anhanges zeigen die Schwindverformungen der einzelnen Betone in Abhängigkeit von der Zeit. Betone aus der gleichen Zementart wurden jeweils gemeinsam in einem Diagramm dargestellt.

Die in Tafel A 6 des Anhanges zusammengestellten Kriechverformungen ε_k wurden nach der Gleichung

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{ges} - \varepsilon_{el} - \varepsilon_s$$

mit

ε_{ges} gemessene Gesamtverformung unter Last

ε_{el} elastische Verformung, berechnet aus statischem E-Modul und aufgebrachtter Spannung, s. Tafel A 6

ε_s gemessene Schwindverformung

berechnet.

Tafel A 7 des Anhanges enthält die aus den Kriechverformungen und den Kriechspannungen errechneten bezogenen Kriechmaße ε_k/σ wieder. Die Bilder 4, 6, 8, 10 und 12 des Anhanges zeigen die bezogenen Kriechmaße der einzelnen Betone in Abhängigkeit von der Zeit. Betone aus der gleichen Zementart wurden jeweils gemeinsam in einem Diagramm dargestellt.

6 Berechnung der Schwind- und Kriechmaße

6.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten werden als Grundlage für einen Vergleich mit den gemessenen Schwind- und Kriechverformungen die entsprechenden Werte nach DIN 4227 Teil 1 und Eurocode 2 berechnet. Dazu sind in der nachfolgenden Tafel 4 die zu den weiteren Berechnungen erforderlichen Eingangswerte nach DIN 1045 bzw. DIN 4227 und Eurocode 2 zusammengestellt. Die Einstufung der Betone in Festigkeitsklassen und Konsistenzbereiche wurde entsprechend den Festlegungen der DIN 1045 und des Eurocodes 2 (EC 2) vorgenommen.

Tafel 4: Übersicht über die Eingangswerte

Beton Bez.	Zementart und Festig- keitsklasse	Festigkeitsklasse				Elastizitätsmodul			Konsistenz		
		DIN 1045		Eurocode 2		1045	Eurocode 2		-	1045	EC 2
		β_W	B	f_{cm}	C	E_b	E_{cm}	$E_c(28)$	A	K	F
-	-	[N/mm ²]	-	[N/mm ²]	-	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[cm]	-	-
B 1	PZ 35 F	39,6	25	38,3	30	30000	32000	33600	48	KR	F3
B 2	PZ 35 F	42,5	35	41,2	35	34000	33500	35175	55	KF	F4
B 3	HOZ 35 L	32,3	25	31,3	25	30000	30500	32025	49	KF	F4
B 4	HOZ 35 L	34,7	25	33,6	25	30000	30500	32025	55	KF	F4
B 5	FAZ 35 F	40,3	35	39,0	30	34000	32000	33600	55	KF	F4
B 6	FAZ 35 F	32,9	25	31,9	25	30000	30500	32025	54	KF	F4
B 7	FAHZ 35 F	38,1	25	36,9	30	30000	32000	33600	49	KF	F4
B 8	FAHZ 35 F	37,1	25	35,9	30	30000	32000	33600	56	KF	F4
B 9	PKZ 35 F	34,8	25	33,7	25	30000	30500	32025	53	KF	F4

Für die Vergleichsrechnung nach DIN 4227 wurden die Grundkriechzahl und das Grundswindmaß des Betons B 1 bei der Berechnung um 25 % erhöht, um die weichere Konsistenz des verwendeten Frischbetons gegenüber der in dem Regelwerk vorgegebenen Konsistenz KP zu berücksichtigen. Die Frischbetonkonsistenz der Betone B 2 - B 9 lag im Konsistenzbereich KF nach DIN 1045. Dieser Konsistenzbereich darf für Betone ohne Fließmittel nicht angewendet werden. An dieser Stelle sei daran erinnert (vergl. S. 6), daß sich die für die Versuche gewählte Betonzusammensetzung aus den Zulassungsverfahren für Zemente herleitet. Für die Vergleichsrechnung wurden daher die Grundkriechzahlen und -swindmaße der Betone B 2 - B 9 linear extrapolierend um weitere 25 % - insgesamt also um 50 % - gegenüber KP erhöht.

Für die Vergleichsrechnung nach Eurocode 2 sind die Kriech- und Schwindmaße von Betonen der Konsistenz S4 um 20 % zu erhöhen. Dies wurde auf die Betone B 2 - B 9 angewendet.

6.2 Schwinden nach DIN 4227

Die Schwindverformung wird nach DIN 4227 Teil 1 nach folgender Gleichung berechnet:

$$\varepsilon_{s,t} = \varepsilon_{s0} \cdot (k_{s,t} - k_{s,t0}).$$

Die Schwindverformung soll für ein wirksames Betonalter von 1095 Tagen bestimmt werden. Das Grundswindmaß ε_{s0} ergibt sich für 65 % rel. Luftfeuchte aus o. g. Norm (Tabelle 8) zu:

$$\varepsilon_{s0} = (-32 - 5/20 \cdot 14) \cdot 10^{-5} = -0,355 \cdot 10^{-3}.$$

Der Beiwert k_s ist von der wirksamen Körperdicke d_{ef} abhängig.

$$d_{ef} = k_{ef} \cdot 2 \cdot A / U$$

mit: $k_{ef} = 1,0 + 15/20 \cdot 0,5 = 1,375$ ergibt sich

$$d_{ef} = 1,375 \cdot 2 \cdot \pi r^2 / 2\pi r = 10,4 \sim 10 \text{ cm}$$

Da der Beton unter Normaltemperatur erhärtete, ist das wirksame Betonalter gleich dem wahren Betonalter. Das Grundswindmaß wird wie oben erwähnt für die Konsistenz KR um 25 % und für die Konsistenz KF um 50 % erhöht. Der Beiwert $k_{s,t0}$ für ein wirksames Betonalter t_0 von 7 Tagen wird zu 0 gesetzt, da die Luftlagerung des Betons - und somit das Schwinden des Betons - erst zu diesem Zeitpunkt einsetzte. Mit dem Beiwert $k_{s,1088}$ nach Bild 3 von DIN 4227 Teil 1 ergeben sich die Schwindmaße wie folgt:

$$\varepsilon_{s,1095,KR} = 1,25 \cdot -35,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,99 = -0,439 \cdot 10^{-3} [-]$$

$$\varepsilon_{s,1095,KF} = 1,50 \cdot -35,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,99 = -0,527 \cdot 10^{-3} [-]$$

Das rechnerische Endschwindmaß beträgt:

$$\varepsilon_{s,\infty,KR} = 1,25 \cdot -35,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,05 = -0,466 \cdot 10^{-3} [-]$$

$$\varepsilon_{s,\infty,KF} = 1,50 \cdot -35,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1,05 = -0,559 \cdot 10^{-3} [-]$$

6.3 Schwinden nach Eurocode 2

Die sich in einer Zeitspanne ($t - t_s$) ergebende Schwindverformung wird nach Eurocode 2 mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t-t_s).$$

Hierin sind:

- ε_{cs0} Grundswindmaß
- $\beta_s(t-t_s)$ Beiwert zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs des Schwindens
- t Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt
- t_s Betonalter zu Beginn des Schwindens.

Die Berechnung des Grundswindmaßes und der weiteren Beiwerte erfolgte entsprechend DIN V 18932 Teil 1 (EC 2), Anhang 1, Seite 157-158, Gleichung A 1.12 - A 1.16. Die Grundswindmaße der Betone B 2 - B 9 wurden um 20 % erhöht. Die berechneten Beiwerte, Zwischengrößen und die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tafel 5 zusammengestellt. Die Werte für die relative Luftfeuchte (RH = 65 %) und die wirksame Bauteildicke ($h_0 = 75$ mm) waren für alle Betone einheitlich.

Tafel 5: Zusammenstellung der Beiwerte und Schwindmaße nach Eurocode 2

Beton	Zement	β_{sc}	t_s	t	β_{sRH}	β_{RH}	$\varepsilon_s(f_{cm})$	ε_{cs0}	$\beta_s(t-t_s)$	$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$
-	-	[-]	[d]	[d]	[-]	[-]	[10 ⁻³]	[10 ⁻³]	[-]	[10 ⁻³]
B 1	PZ 35 F	5	7	1095	0,73	-1,12	0,419	-0,471	0,9202	-0,433
B 2	PZ 35 F	5	7	1095	0,73	-1,12	0,404	-0,545	0,9202	-0,502
B 3	HOZ 35 L	4	7	1095	0,73	-1,12	0,395	-0,533	0,9202	-0,490
B 4	HOZ 35 L	4	7	1095	0,73	-1,12	0,386	-0,520	0,9202	-0,479
B 5	FAZ 35 F	5	7	1095	0,73	-1,12	0,415	-0,560	0,9202	-0,515
B 6	FAZ 35 F	5	7	1095	0,73	-1,12	0,451	-0,608	0,9202	-0,559
B 7	FAHZ 35 F	5	7	1095	0,73	-1,12	0,426	-0,574	0,9202	-0,528
B 8	FAHZ 35 F	5	7	1095	0,73	-1,12	0,431	-0,581	0,9202	-0,534
B 9	PKZ 35 F	5	7	1095	0,73	-1,12	0,442	-0,596	0,9202	-0,548

Der Beiwert $\beta_s(t-t_s)$ ergibt sich bei der Berechnung des Endschwindmaßes zu 1,0. Die errechneten Werte sind in der zusammenfassenden Tafel 9 enthalten.

6.4 Kriechen nach DIN 4227

Die Berechnung der Kriechdehnung erfolgt mit folgender Gleichung:

$$\varepsilon_k = \sigma_0 / E_b \cdot \phi_t$$

Hierin sind σ_0 die Kriechspannungen, E_b die in DIN 1045 Tabelle 11 bzw. DIN 4227 Teil 1 Tabelle 6 in Abhängigkeit von der Festigkeitsklasse angegebenen Elastizitätsmoduli (Zusammenstellung s. Tafel 4, Abschn. 6.1) und ϕ_t die nach Abschnitt 8.3 der DIN 4227 Teil 1 zu berechnenden Kriechzahlen:

$$\phi_t = \phi_{f0} \cdot (k_{f,t} - k_{f,t0}) + 0,4 \cdot k_v(t-t_0)$$

Die Grundfließzahl ϕ_{f0} ergibt sich nach Tabelle 8, Spalte 3 der Norm unter Berücksichtigung einer Luftfeuchte von 65 %.

$$\phi_{f0} = 2,0 + 5/20 \cdot 0,7 = 2,18$$

Die wirksame Körperdicke d_{ef} beträgt 10 cm (s. Abschn. 6.2).

Unter Verwendung dieser Werte (ϕ_{f0} wurde aufgrund der weicheren Konsistenz der Betone erhöht) und mit Hilfe von Bild 1 (Beiwert k_f) und Bild 2 (Beiwert k_v) nach DIN 4227 Teil 1 wurden die Kriechzahlen ϕ_{1095} unter Berücksichtigung der Eingangswerte aus Tafel 4 berechnet. In Tafel 6 sind die ermittelten Beiwerte und Kriechzahlen zusammengestellt.

Das bezogene Kriechmaß ε_k' ergibt sich aus der Kriechzahl und dem Elastizitätsmodul:

$$\varepsilon_k'_{1095} = \varepsilon_{k,1095} / \sigma_0 = \phi_{1095} / E_b.$$

Die berechneten Werte sind ebenfalls in Tafel 6 enthalten.

Das bezogene Endkriechmaß $\varepsilon_k'_{\infty}$ wurde nach DIN 4227 Teil 1 mit den Beiwerten $k_v = 1,0$ und $k_{f\infty} = 1,70$ bei sonst gleichen Eingangswerten berechnet. Die sich ergebenden Werte sind in der zusammenfassenden Tafel 10 enthalten.

Tafel 6: Zusammenstellung der Beiwerte, Kriechzahlen und bezogenen Kriechmaße nach DIN 4227 Teil 1

Beton	Zement	ϕ_{f0}	$k_{f,1095}$	$k_{f,7}$	$k_{v,1088}$	ϕ_{1095}	$\epsilon_{k,1095}$
-	-	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[mm/N ² ·10 ⁻³]
B 1	PZ 35 F	1,25·2,18	1,62	0,51	0,99	3,42	0,114
B 2	PZ 35 F	1,50·2,18	1,62	0,51	0,99	4,01	0,118
B 3	HOZ 35 L	1,50·2,18	1,54	0,38	0,99	4,18	0,139
B 4	HOZ 35 L	1,50·2,18	1,54	0,38	0,99	4,18	0,139
B 5	FAZ 35 F	1,50·2,18	1,62	0,51	0,99	4,01	0,118
B 6	FAZ 35 F	1,50·2,18	1,62	0,51	0,99	4,01	0,134
B 7	FAHZ 35 F	1,50·2,18	1,62	0,51	0,99	4,01	0,134
B 8	FAHZ 35 F	1,50·2,18	1,62	0,51	0,99	4,01	0,134
B 9	PKZ 35 F	1,50·2,18	1,62	0,51	0,99	4,01	0,134

6.5 Kriechen nach Eurocode 2

Die sich in einer Zeitspanne ($t - t_0$) ergebende Kriechverformung wird nach Eurocode 2 mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$\epsilon(t, t_0) = \sigma_0 \cdot J(t, t_0) = \sigma_0 \cdot \left(\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_c(28)} \right)$$

Hierin sind:

- σ_0 Kriechspannung
- t_0 Zeitpunkt der ersten Lastaufbringung
- t betrachteter Zeitpunkt
- $J(t, t_0)$ Kriechfunktion zum Zeitpunkt t
- $E_c(t_0)$ zugehöriger Elastizitätsmodul (Tangentenmodul) zum Zeitpunkt t_0
- $E_c(28)$ zugehöriger Elastizitätsmodul (Tangentenmodul) nach 28 Tagen
- $\phi(t, t_0)$ Kriechzahl, bezogen auf die mit $E_c(28)$ ermittelte elastische Verformung nach 28 Tagen.

Die Kriechzahl $\phi(t, t_0)$ ergibt sich aus:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t-t_0)$$

mit:

- ϕ_0 Grundkriechzahl
- $\beta_c(t-t_0)$ Beiwert zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs des Kriechens

Die Berechnung der Grundkriechzahl und der weiteren Beiwerte erfolgte entsprechend DIN V 18932 Teil 1, Anhang 1, Seite 156-157, Gleichung A 1.2 - A 1.10, unter Berücksichtigung der Eingangswerte aus Tafel 4. Die Grundkriechzahlen der Betone B 2 - B 9 wurden der weichen Konsistenz entsprechend um 20 % erhöht. Die berechneten Beiwerte, Zwischengrößen und die Ergebnisse sind in der Tafel 7 zusammengestellt. Folgende Werte waren für alle Betone einheitlich: $RH = 65 \%$, $h_0 = 75 \text{ mm}$, $\phi_{RH} = 1,83$ und $\beta_H = 364$.

Das bezogene Kriechmaß ϵ_k' entspricht der Kriechfunktion $J(t, t_0)$ und ergibt sich aus der Kriechzahl und den o.g. Elastizitätsmoduli wie folgt:

$$\epsilon_k'_{1095} = \epsilon_{k,1095}/\sigma_0 = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_c(28)}$$

Der Elastizitätsmodul $E_c(t_0)$ (Tangentenmodul) wurde aus den in Tafel A 3 des Anhanges angegebenen Sekantenmoduli der 7 Tage alten Betone durch Multiplikation mit dem Faktor 1,05 (s. EC 2, A 1.1.2, Absatz 4) ermittelt. Der Elastizitätsmodul $E_c(28)$ wurde Tafel 4 entnommen. Dieser Wert entspricht dem 1,05fachen des Sekantenmoduls E_{cm} der jeweiligen Festigkeitsklassen der Betone.

Die berechneten Werte sind ebenfalls in Tafel 7 enthalten.

Tafel 7: Zusammenstellung der Beiwerte, Kriechzahlen und bezogenen Kriechmaße nach Eurocode 2

Beton	Zement	$\beta(f_{cm})$	α	t_0	$t-t_0$	$\beta(t_0)$	ϕ_0	$\beta_c(t-t_0)$	$\phi(t, t_0)$	$\epsilon_k'_{1095}$
-	-	[-]	[-]	[d]	[d]	[-]	[-]	[-]	[-]	[$\text{mm}^2/\text{N} \cdot 10^{-3}$]
B 1	PZ 35 F	2,715	0	7	1088	0,635	3,152	0,917	2,891	0,123
B 2	PZ 35 F	2,617	0	7	1088	0,635	3,647	0,917	3,345	0,129
B 3	HOZ 35 L	3,003	-1	4	1091	0,703	4,635	0,917	4,252	0,183
B 4	HOZ 35 L	2,898	-1	4	1091	0,703	4,474	0,917	4,104	0,171
B 5	FAZ 35 F	2,690	0	7	1088	0,635	3,749	0,917	3,438	0,143
B 6	FAZ 35 F	2,974	0	7	1088	0,635	4,145	0,917	3,802	0,157
B 7	FAHZ 35 F	2,766	0	7	1088	0,635	3,854	0,917	3,535	0,145
B 8	FAHZ 35 F	2,804	0	7	1088	0,635	3,907	0,917	3,583	0,147
B 9	PKZ 35 F	2,894	0	7	1088	0,635	4,033	0,917	3,699	0,151

Bei der Berechnung des Endkriechmaßes $\varepsilon_k'_{\infty}$ ergibt sich der Beiwert $\beta_C(t-t_0)$ zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs des Kriechens zu 1,0. Die errechneten Werte sind in der zusammenfassenden Tafel 10 enthalten.

6.6 Endkriechmaße nach Ross

Für die während einer Dauer von 3 Jahren untersuchten Betone wurde aus den Meßergebnissen das bezogene Endkriechmaß $\varepsilon_k'_{\infty}$ nach dem Verfahren von Ross /5/ bestimmt. Dazu wurde dem oberen, ziemlich flach verlaufenden Ast der Kriechkurve eine Hyperbel der Form:

$$\varepsilon_k' = \frac{t}{a+b \cdot t}$$

angepaßt. Das bezogene Endkriechmaß $\varepsilon_k'_{\infty}$ erhält man durch eine Grenzwertbetrachtung mit $t \rightarrow \infty$; es ergibt sich:

$$\varepsilon_k' = \frac{\frac{t}{t}}{\frac{a}{t} + \frac{b \cdot t}{t}} = \frac{1}{0+b} = \frac{1}{b}$$

Nach Umformung der Hyperbelgleichung in

$$\frac{t}{\varepsilon_k'} = a+b \cdot t$$

kann mit den Versuchsergebnisse durch einfache lineare Ausgleichsrechnung der Koeffizient b bestimmt werden. $1/b$ ergibt dann das bezogene Endkriechmaß $\varepsilon_k'_{\infty}$.

Die aus den Meßergebnissen ermittelten bezogenen Endkriechmaße sind in der zusammenfassenden Tafel 10 enthalten.

7 Diskussion der Ergebnisse

In Bild 1 bzw. 2 wurden die gemittelten (Ausnahme PKZ 35 F) Schwind- bzw. Kriechkurven der Betone aufgetragen; es wurden jeweils die Betone der gleichen Zementart zusammengefaßt.

In beiden Diagrammen zeigen die Betone aus hüttensandhaltigen Zementen (HOZ, FAHZ) Schwind- bzw. Kriechmaße, die geringfügig oberhalb des Mittelwertes liegen. Die Betone aus Portlandzement erreichen in etwa diesen Mittelwert, während die Betone aus Flugaschezementen und dem Portlandkalksteinzement etwas geringere Werte aufweisen.

Aus den Diagrammen wird kein signifikant unterschiedliches Verformungsverhalten der unter Verwendung verschiedener Zementarten hergestellten Betone ersichtlich. Die Schwindmaße und die bezogenen Kriechmaße aller untersuchten Betone unterschieden sich nach drei Jahren nur relativ geringfügig. Berücksichtigt man die bei Kriechversuchen erfahrungsgemäß auftretenden großen Streuungen (im Eurocode 2 werden mittlere Variationskoeffizienten von 20 % für das Kriechen und 35 % für das Schwinden angegeben), dann liegen alle Ergebnisse vergleichsweise eng beieinander. Dies wird auch dadurch bestätigt, das sämtliche Kriechmaße innerhalb des Streubereiches der in der MPA im Rahmen von Zulassungsversuchen von Sonderzementen angefallenen bezogenen Kriechmaße von Portlandzementen PZ 35 F liegen. Eine interne statistische Auswertung solcher Versuche ergab unter Berücksichtigung der 2 Zemente dieses Vorhabens bei einer Belastungsdauer von einem Jahr und einer Aussagewahrscheinlichkeit von 75 % für die Quantilenwerte die in der Tafel 8 angegebenen Streubreiten.

Tafel 8: Kriechmaße von Portlandzementen in Zulassungsversuchen

$\epsilon_k \cdot 360 \quad [\text{mm}^2/\text{N} \cdot 10^{-3}]$		
Mittelwert	5 %-Quantile	95 %-Quantile
0,116	0,067	0,165

Obwohl die Kriechverformungen der Betone aus den Zementen 35 L geringfügig größer waren - verursacht durch die auffallend hohen Werte des Betons B 3 - als die der Betone aus den Zementen 35 F, erscheint es unter Berücksichtigung der auftretenden Streuungen nicht gerechtfertigt, bezüglich des Kriechens nach L-Zementen und F-Zementen zu unterscheiden oder ein spezielles Kriechverhalten der hier untersuchten Zementarten herausfiltern zu wollen. Diese Auffassung bezieht sich allerdings nur auf z. Z.

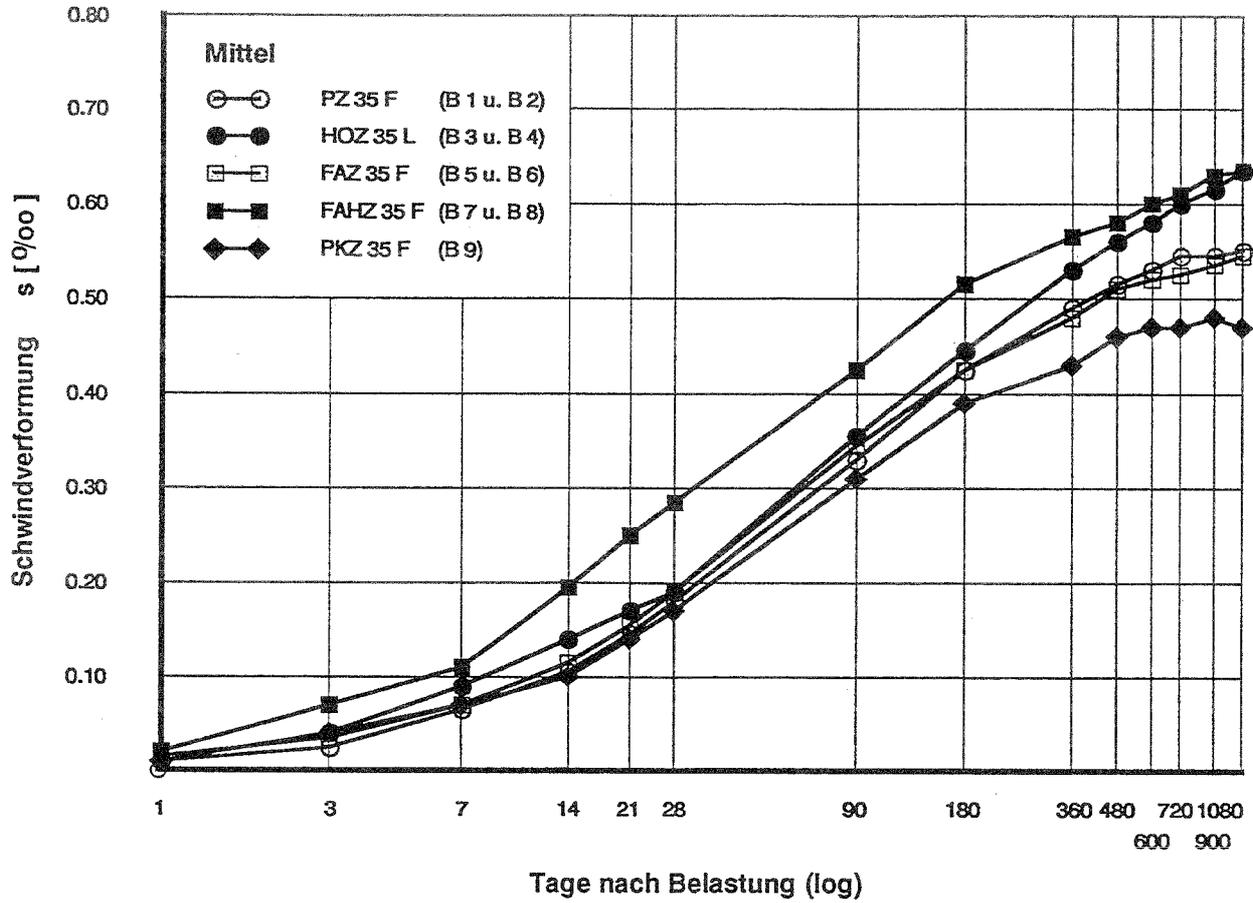


Bild 1: Mittlere Schwindverformung der Betone in Abhängigkeit von der Zeit und der Zementart

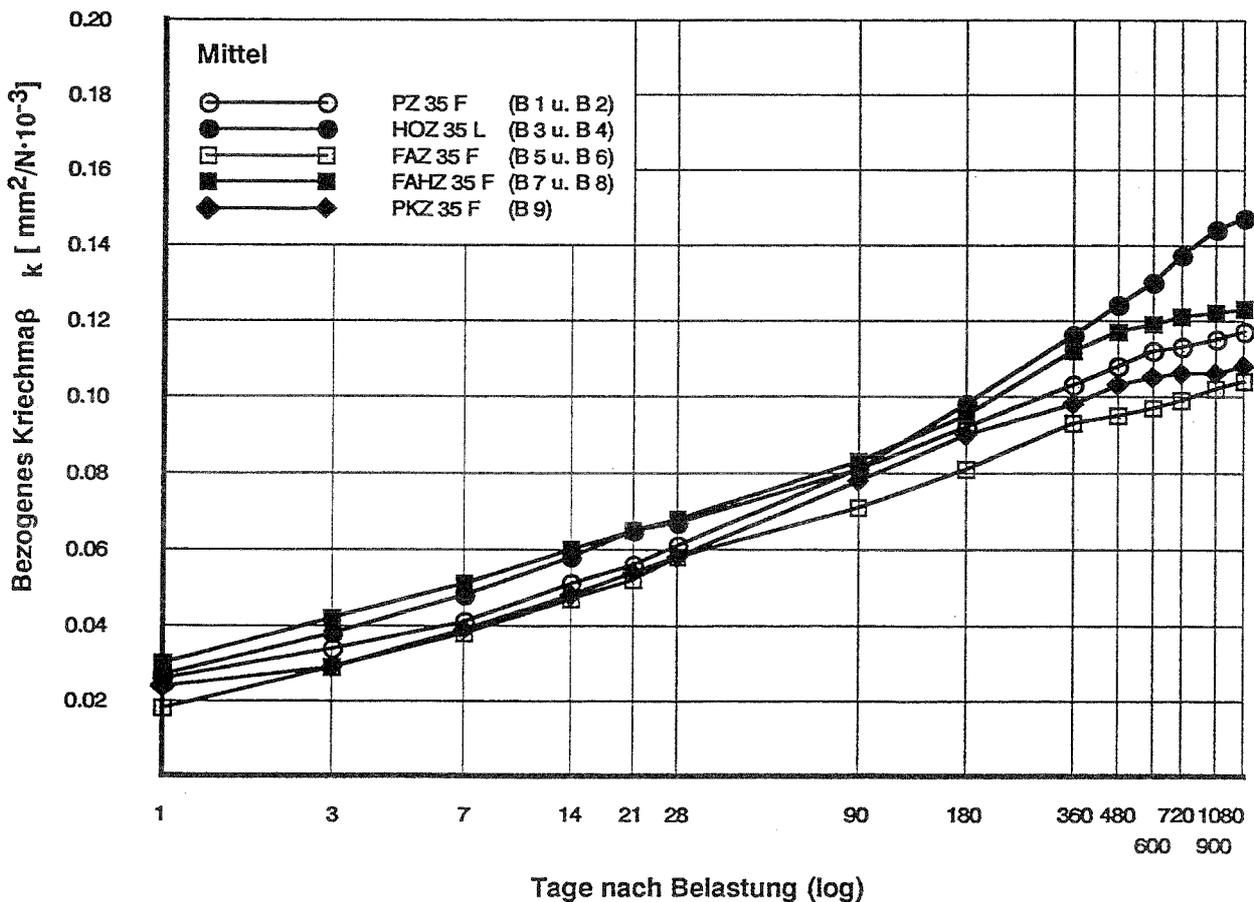


Bild 2: Mittlere bezogene Kriechmaße der Betone in Abhängigkeit von der Zeit und der Zementart

marktübliche deutsche Zemente. Möglicherweise liegen im europäischen Bereich andere Verhältnisse vor. Vorstehende Feststellung wird auch dadurch begründet, daß andere Parameter, wie z.B. die Expositionsbedingungen (Wind) und der Wassergehalt der Betone, das Kriechen offensichtlich wesentlich stärker beeinflussen als die Unterschiede in der Anfangserhärtung der Zemente.

In Tafel 9 sind die nach 3 Jahren gemessenen und die nach DIN 4227 Teil 1 und nach Eurocode 2 für diese Dauer berechneten Schwindmaße (calc.) und in Tafel 10 die entsprechenden bezogenen Kriechmaße gegenübergestellt. Ferner enthalten die Tafeln die nach den o. g. Vorschriften berechneten Endschwind- und kriechmaße sowie die mit dem Verfahren nach Ross aus den Meßwerten extrapolierten bezogenen Endkriechmaße.

Im Mittel über alle Betone lagen die nach 3 Jahren gemessenen, mittleren Schwindverformungen ca. 10 % über den nach DIN 4227 bzw. Eurocode 2 berechneten Werten. Diese Feststellung stimmt mit Ergebnissen von Wierig /6/ überein, der auch erheblich größere Schwindverformungen im Versuch als nach DIN 4227 Teil 1 festgestellt hatte. Bei den Einzelwerten waren die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten teilweise erheblich. Sie lag bei den nach DIN 4227 berechneten Werten zwischen -26 und +12 % und bei den nach Eurocode 2 berechneten zwischen -27 und +17 %. Nach beiden Berechnungsmethoden wurden in 6 von 9 Fällen zu geringe Schwindmaße ermittelt.

Tafel 9: Zusammenstellung der gemessenen und der nach DIN 4227 Teil 1 und Eurocode 2 berechneten Schwindmaße

Beton	Zement	Schwindmaße ϵ_s [10^{-3}]				
		nach 3 Jahren			End-	
		gemessen	calc. DIN	calc. EC 2	calc. DIN	calc. EC 2
B 1	PZ 35 F	0,59	0,439	0,433	0,446	0,471
B 2	PZ 35 F	0,51	0,527	0,502	0,559	0,545
B 3	HOZ 35 L	0,67		0,490		0,533
B 4	HOZ 35 L	0,60		0,479		0,520
B 5	FAZ 35 F	0,59		0,515		0,560
B 6	FAZ 35 F	0,50		0,559		0,608
B 7	FAHZ 35 F	0,60		0,528		0,574
B 8	FAHZ 35 F	0,67		0,534		0,581
B 9	PKZ 35 F	0,47		0,548		0,596
im Mittel		0,578		0,517		0,510

In Anbetracht eines im EC 2 genannten mittleren Variationskoeffizienten von 35 % für eine Schwindvorhersage mit den dort angegebenen Gleichungen sind die Rechenergebnisse insgesamt jedoch befriedigend.

Die nach den verschiedenen Vorschriften für die Versuchsdauer berechneten Schwindmaße stimmen gut miteinander überein. Die Rechenwerte weichen zwischen -9 und +6 % voneinander ab. Die Eurocode-Werte liegen im Mittel über alle Betone um ca. 1 % niedriger als die nach DIN 4227 berechneten Werte.

Wiederum im Mittel über alle Betone lagen die nach DIN berechneten bezogenen Kriechmaßen ca. 7 % über den im Versuch festgestellten Werten; nach Eurocode ergaben sich im Mittel um 24 % zu hohe Kriechmaße. Ein Vergleich der Einzelwerte ergibt nach DIN Abweichungen zwischen -23 und +33 %. Die Abweichung beträgt im Mittel 17 %. Nach Eurocode lagen die Einzelwerte zwischen 0 und +54 % über den Meßwerten. Hier ergeben sich Abweichungen von durchschnittlich 27 %. In 6 von 9 Fällen lieferte das DIN-Verfahren die besseren Ergebnisse. Die Übereinstimmung zwischen Rechen- und Meßwerten ist hier bei den mit Portlandzement hergestellten Betonen B 1 und B 2 am besten.

Auch wenn im Eurocode 2 ein mittlerer Variationskoeffizient von 20 % für eine Kriechvorhersage angegeben wird, so ist die Übereinstimmung zwischen Meß- und Rechenwerten nach EC 2

Tafel 10: Zusammenstellung der gemessenen und der nach DIN 4227 Teil 1 und Eurocode 2 berechneten bezogenen Kriechmaße

Beton	Zement	bezogene Kriechmaße ϵ_k [10 ⁻³]					
		nach 3 Jahren			End-		
		gemessen	calc. DIN	calc. EC 2	calc. DIN	calc. EC 2	calc. ROSS
B 1	PZ 35 F	0,113	0,114	0,123	0,121	0,131	0,114
B 2	PZ 35 F	0,120	0,118	0,129	0,126	0,138	0,121
B 3	HOZ 35 L	0,180	0,139	0,183	0,157	0,195	0,180
B 4	HOZ 35 L	0,114	0,139	0,171	0,157	0,183	0,113
B 5	FAZ 35 F	0,093	0,118	0,143	0,126	0,153	0,093
B 6	FAZ 35 F	0,114	0,134	0,157	0,143	0,168	0,114
B 7	FAHZ 35 F	0,145	0,134	0,145	0,143	0,155	0,147
B 8	FAHZ 35 F	0,101	0,134	0,147	0,143	0,157	0,102
B 9	PKZ 35 F	0,108	0,134	0,151	0,143	0,162	0,109
im Mittel		0,121	0,129	0,150	0,140	0,160	0,121

unbefriedigend. Eine Ursache hierfür kann die Erhöhung der Grundkriechzahl wegen der weichen Konsistenz der Frischbetone sein, eine andere, daß der Elastizitätsmodul $E_C(28)$ lediglich entsprechend der Einstufung des Festbetons in Festigkeitsklassen gewählt wurde.

Die nach den verschiedenen Vorschriften berechneten bezogenen Kriechmaße ergeben nach Eurocode 2 um durchschnittlich 16 % höhere Werte als nach DIN 4227 Teil 1. Die Unterschiede liegen im Einzelnen zwischen 8 und 32 %.

Die nach dem Verfahren von Ross extrapolierten bezogenen Endkriechmaße liegen nur um durchschnittlich 1 % über den gemessenen 3-Jahreswerten, während die nach DIN bzw. Eurocode berechneten Endkriechmaße durchschnittlich 8 bzw. 7 % gegenüber den 3-Jahreswerten ansteigen.

In Tafel 11 wurden die Gesamtverformungen ($\epsilon_{ges} = \epsilon_{el} + \epsilon_s + \epsilon_k$) der Betone nach 3 Jahren ermittelt. Die Gesamtverformung ϵ_{ges} der Betone im Versuch wurde Tafel A 4 des Anhangs entnommen. Die Ermittlung der rechnerischen Gesamtverformung erfolgte wie nachstehend beschrieben. Die elastische Verformung ϵ_{el} wurde aus den in Tafel A 6 des Anhangs angegebenen Kriechspannungen σ_k und den Elastizitätsmoduli E_b bzw. E_{cm} aus Tafel 4 berechnet.

Tafel 11: Gesamtverformungen ϵ_{ges} aus Messung und Berechnung

Beton	Zement	Verformungen ϵ [10^{-3}] nach 3 Jahren						
		gemessen	DIN 4227 Teil 1			Eurocode 2		
		ϵ_{ges}	ϵ_{el}	ϵ_k	ϵ_{ges}	ϵ_{el}	ϵ_k	ϵ_{ges}
B 1	PZ 35 F	1,72	0,247	0,844	1,529	0,231	0,911	1,575
B 2	PZ 35 F	1,45	0,176	0,708	1,411	0,179	0,774	1,455
B 3	HOZ 35 L	1,80	0,163	0,681	1,371	0,161	0,896	1,547
B 4	HOZ 35 L	1,44	0,177	0,737	1,440	0,174	0,907	1,559
B 5	FAZ 35 F	1,62	0,224	0,897	1,647	0,238	1,090	1,842
B 6	FAZ 35 F	1,38	0,190	0,764	1,481	0,187	0,897	1,643
B 7	FAHZ 35 F	1,57	0,173	0,697	1,397	0,163	0,754	1,445
B 8	FAHZ 35 F	1,67	0,233	0,938	1,698	0,219	1,031	1,785
B 9	PKZ 35 F	1,27	0,183	0,737	1,447	0,180	0,833	1,561
im Mittel		1,547	-	-	1,491	-	-	1,601

Das Schwindmaß ε_s wurde Tafel 9 entnommen. Die Kriechverformung ε_k ergibt sich durch Multiplikation von $\varepsilon_k'_{1095}$ aus Tafel 10 mit der o.g. Kriechspannung σ_k .

Der Tafel 11 ist zu entnehmen, daß sich für die in der Anwendungspraxis wichtige Gesamtverformung eine gute Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Werten ergibt. Im Mittel über alle Betone liegen die Gesamtverformungen bei Berechnung nach DIN 4227 nur noch um ca. 3 % zu niedrig und bei Berechnung nach EC 2 um ca. 3 % zu hoch. Die Abweichung zwischen Rechen- und Meßwerten im Einzelnen beträgt nach DIN 4227 durchschnittlich 8 % und nach EC 2 11 %. Gewissermaßen findet bei Berechnung der Gesamtverformung ein Ausgleich der rechnerisch zu hohen Kriech- und zu niedrigen Schwindmaße statt.

8 Zusammenfassung und Folgerungen

Es wurde das Schwinden und Kriechen von Betonen sonst gleicher Zusammensetzung aus 9 verschiedenen Zementen untersucht. Bei diesen Zementen handelte es sich um zwei Portlandzemente PZ 35 F, zwei Hochofenzemente HOZ 35 L, zwei Flugaschezemente FAZ 35 F, zwei Flugaschehüttenzemente FAHZ 35 F und einen Portlandkalksteinzement PKZ 35 F. Die Schwind- und Kriechversuche wurden über einen Zeitraum von 3 Jahren durchgeführt. Die gemessenen Schwind- und Kriechverformungen wurden mit den entsprechenden Rechenwerten nach DIN 4227 Teil 1 und Eurocode 2 Teil 1 verglichen. Außerdem wurden die Endkriechmaße nach verschiedenen Rechenverfahren (Ross, DIN 4227, Eurocode 2) ermittelt und miteinander verglichen.

Die Schwindmaße und die bezogenen Kriechmaße aller untersuchten Betone unterschieden sich unter Berücksichtigung der bei Kriechversuchen erfahrungsgemäß auftretenden großen Streuungen nach drei Jahren nur relativ geringfügig. Es erscheint daher gerechtfertigt, bezüglich des Kriechens bei marktüblichen deutschen Zementen der Klasse Z 35 nicht zwischen L- und F-Zementen oder den Zementarten zu unterscheiden. Insbesondere verhalten sich die neu zugelassenen Zemente gegenüber den genormten nicht signifikant unterschiedlich.

Die Übereinstimmung von gemessenen und gerechneten Schwindverformungen war sowohl bei der Berechnung nach DIN 4227 Teil 1 als auch nach Eurocode 2 alles in allem befriedigend. Allerdings resultierten aus den Rechenverfahren größtenteils zu geringe Schwindmaße.

Die Unterschiede zwischen den gemessenen Kriechverformungen und den nach DIN 4227 Teil 1 berechneten Werten lagen innerhalb der bei Kriechvorhersagen zu erwartenden Abweichungen. Die Übereinstimmung zwischen den Meßwerten und den nach EC 2 berechneten Werten war weniger gut. Beide Rechenverfahren - besonders das nach EC 2 - ergaben überwiegend zu hohe bezogene Kriechmaße.

Bei der für die Anwendungspraxis wichtigen Gesamtverformung (elastische Verformung, Kriechen und Schwinden) besteht eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und den im Versuch ermittelten Werten.

Bemerkenswert ist, daß in die Berechnungsformeln für die Schwind- und Kriechvorhersage auf der einen Seite Werte eingehen, die auf sehr groben Annahmen beruhen und auf der anderen Seite Zusatzglieder eine Genauigkeit vortäuschen, die bei den auftretenden Streuungen nicht gerechtfertigt ist. Eine Vereinfachung der Berechnungsformeln ist daher wünschenswert.

9 Literatur

- /1/ Wagner, O. Kriechen unbewehrten Betons.
DAfStb Heft 131,
Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1958
- /2/ Hummel, A. Versuche über das Kriechen unbewehrten
Wesche, K.H. Betons.
Brand, W. DAFStb Heft 146,
Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1962
- /3/ Neville, A.M. Creep of Concrete; Plain reinforced and
prestressed.
North Holland Publishing Company 1970,
Amsterdam
- /4/ Cordes, R. Untersuchungen zur analytischen Darstellung
der Kriechverformung von Baustoffen
- insbesondere Beton.
Heft 25 der Mitteilungen aus dem Institut
für Baustoffkunde und Materialprüfwesen der
Techn. Universität Hannover; 1974
- /5/ Ross, A.D. Concrete Creep Data.
The Street Eng. 1937, August 1946, Mai 1947
- /6/ Wierig, H.-J. Über das Kriechverhalten von frühzeitig
belasteten, warmbehandelten Betonen.
Betonwerk- und Fertigteile-Technik, Heft 6,
1985

zitierte Normen:

DIN 4227 Teil 1
Spannbeton.
Ausgabe Juli 1988

DIN V 18932 Teil 1
Eurocode 2; Planung von Stahlbeton- und
Spannbetontragwerken; Teil 1: Grundlagen und
Anwendungsregeln für den Hochbau.
Ausgabe Oktober 1991

DIN 1045
Beton und Stahlbeton.
Ausgabe Juli 1988

DIN 1048
Prüfverfahren für Beton.
Ausgabe Dezember 1978

DIN 1164
Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und
Traßzement.
Ausgabe Dezember 1986

Anhang
des Schlußberichtes
zum Forschungsvorhaben

**Kriechverhalten von Betonen
aus bauaufsichtlich zugelassenen Zementen
mit Zumahlungen von
inerten bzw. latent-hydraulischen Stoffen**

Der Anhang umfaßt 7 Tafeln und 12 Bilder

Tafel A 1: Ergebnisse der Zementprüfungen nach DIN 1164, Ausgabe 12/86

Art der Prüfung	PZ 35 F		HOZ 35 L		FAZ 35 F		FAHZ 35 F		PKZ 35 F
	Z 1	Z 2	Z 3	Z 4	Z 5	Z 6	Z 7	Z 8	Z 9
Wasserzusatz zur Normsteife [M.-%]	25,9	24,2	28,1	30,8	28,1	27,5	29,7	28,8	23,8
Erstarren [h:min]									
Beginn	2:40	2:37	3:25	4:33	3:10	3:05	4:10	4:39	2:49
Ende	3:15	2:51	4:05	4:59	3:50	3:45	4:40	5:06	3:17
Raumbeständigkeit	bestanden								
Druckfestigkeit nach 2 d [N/mm ²]	25,5	17,8	-	-	23,4	19,0	15,3	23,2	18,4
7 d	-	30,9	26,5	29,4	-	-	-	-	31,9
28 d	50,2	51,0	46,0	48,6	48,8	45,8	47,9	50,9	47,2
spez. Oberfläche nach Blaine [cm ² /g]	2750	2740	2900	4410	3780	2880	3490	3910	4220

Tafel A 2: Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Art der Prüfung	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	B 7	B 8	B 9
Zementgehalt z [kg/m ³]	302	302	301	301	300	299	301	302	300
Wassergehalt w [kg/m ³]	181	181	180	181	180	180	181	181	180
Zuschlaggehalt g [kg/m ³]	1869	1877	1864	1868	1864	1855	1867	1874	1868
Ausbreitmaß [cm]	48	55	49	55	55	54	49	56	53
Frischbetonrohddichte [kg/m ³]	2352	2360	2345	2350	2344	2334	2349	2357	2348
Luftgehalt [Vol.-%]	0,8	-	0,9	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	-

Tafel A 3: Festbetoneigenschaften

Art der Prüfung	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	B 7	B 8	B 9
Rohdichte [kg/m ³]									
Würfel									
nach 2 d	2400	2390	2400	2390	2380	2380	2400	2380	2380
7 d	2410	2400	2390	2390	2390	2400	2410	2390	2350
28 d	2370	2350	2370	2360	2350	2360	2370	2370	2320
Zylinder									
nach 7 d	2410	-	2380	2370	2390	2400	2390	2420	-
7 d (E-Modul)	2410	-	2390	2380	2380	2390	2380	2390	-
Druckfestigkeit [N/mm ²]									
Würfel									
nach 2 d	20,4	16,1	8,7	9,6	17,0	14,7	9,9	19,3	12,0
7 d	31,6	24,2	17,1	22,1	27,4	23,0	23,0	25,1	22,6
28 d	39,6	42,5	32,3	34,7	40,3	32,9	38,1	37,1	34,8
Zylinder									
nach 7 d	21,7	-	12,7	16,0	22,7	16,8	15,5	20,9	-
7 d (E-Modul)	22,1	16,3	13,4	16,4	23,8	17,0	17,5	22,7	16,2
E-Modul nach 7 d [N/mm ²]	25700	28100	19000	22200	23200	24600	23900	23400	26500

Tafel A 4: Gemessene Gesamtverformungen ϵ_{ges} [10^{-3}]

Zement	Beton	Tage nach Belastung														
		0*)	1	3	7	14	21	28	90	180	360	480	600	720	900	1080
PZ 35 F	B 1	0,34	0,49	0,56	0,67	0,78	0,85	0,91	1,19	1,36	1,52	1,59	1,65	1,67	1,70	1,72
	B 2	0,31	0,38	0,44	0,51	0,62	0,69	0,76	1,04	1,22	1,33	1,38	1,41	1,43	1,43	1,45
HOZ 35 L	B 3	0,32	0,42	0,51	0,62	0,74	0,81	0,87	1,13	1,31	1,52	1,61	1,67	1,70	1,76	1,80
	B 4	0,27	0,35	0,43	0,52	0,59	0,66	0,68	0,87	1,05	1,18	1,23	1,28	1,35	1,40	1,44
FAZ 35 F	B 5	0,29	0,44	0,55	0,64	0,77	0,88	0,94	1,19	1,33	1,47	1,50	1,53	1,57	1,59	1,62
	B 6	0,30	0,38	0,45	0,55	0,63	0,70	0,75	0,99	1,14	1,27	1,32	1,34	1,34	1,37	1,38
FAHZ 35 F	B 7	0,31	0,43	0,53	0,63	0,76	0,84	0,88	1,12	1,27	1,44	1,49	1,52	1,55	1,56	1,57
	B 8	0,36	0,47	0,62	0,71	0,85	0,94	1,00	1,23	1,39	1,53	1,56	1,60	1,62	1,64	1,67
PKZ 35 F	B 9	0,27	0,35	0,41	0,49	0,57	0,64	0,69	0,95	1,09	1,18	1,23	1,25	1,26	1,27	1,27

*) unmittelbar nach Belastung gemessen

Tafel A 5: Gemessene Schwindverformungen ε_s [10^{-3}]

Zement	Beton	Tage nach Belastung der Kriechproben													
		1	3	7	14	21	28	90	180	360	480	600	720	900	1080
PZ 35 F	B 1	0,02	0,04	0,08	0,13	0,15	0,19	0,34	0,43	0,52	0,55	0,57	0,58	0,58	0,59
	B 2	0,00	0,01	0,05	0,09	0,14	0,17	0,32	0,42	0,46	0,48	0,49	0,51	0,51	0,51
HOZ 35 L	B 3	0,02	0,05	0,12	0,17	0,21	0,24	0,41	0,49	0,58	0,61	0,64	0,65	0,66	0,67
	B 4	0,00	0,03	0,06	0,11	0,13	0,16	0,30	0,40	0,48	0,51	0,52	0,55	0,57	0,60
FAZ 35 F	B 5	0,02	0,05	0,08	0,13	0,18	0,22	0,37	0,46	0,51	0,54	0,55	0,56	0,57	0,59
	B 6	0,01	0,02	0,06	0,10	0,13	0,16	0,32	0,39	0,45	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50
FAHZ 35 F	B 7	0,01	0,05	0,09	0,17	0,22	0,25	0,39	0,49	0,54	0,55	0,57	0,59	0,59	0,60
	B 8	0,03	0,09	0,13	0,22	0,28	0,32	0,46	0,54	0,59	0,61	0,63	0,63	0,65	0,67
PKZ 35 F	B 9	0,01	0,04	0,07	0,10	0,14	0,17	0,31	0,39	0,43	0,46	0,47	0,47	0,48	0,47

Tafel A 6: Berechnete Kriechverformungen ϵ_k [10^{-3}] 1)

Zement	Beton	2) σ_k	3) ϵ_{el}	Tage nach Belastung													
				1	3	7	14	21	28	90	180	360	480	600	720	900	1080
PZ 35 F	B 1	7,4	0,29	0,18	0,24	0,30	0,37	0,40	0,44	0,56	0,64	0,72	0,75	0,79	0,80	0,83	0,84
	B 2	6,0	0,21	0,16	0,22	0,25	0,31	0,34	0,38	0,51	0,59	0,65	0,68	0,70	0,70	0,71	0,72
HOZ 35 L	B 3	4,9	0,24	0,16	0,23	0,27	0,33	0,37	0,39	0,49	0,59	0,71	0,76	0,79	0,82	0,86	0,88
	B 4	5,3	0,24	0,11	0,16	0,22	0,25	0,29	0,28	0,33	0,40	0,47	0,49	0,52	0,56	0,59	0,61
FAZ 35 F	B 5	7,6	0,33	0,10	0,17	0,23	0,31	0,37	0,39	0,49	0,55	0,63	0,64	0,66	0,68	0,70	0,71
	B 6	5,7	0,23	0,15	0,20	0,26	0,30	0,34	0,36	0,44	0,51	0,59	0,61	0,61	0,62	0,64	0,65
FAHZ 35 F	B 7	5,2	0,22	0,21	0,27	0,32	0,38	0,40	0,42	0,51	0,57	0,68	0,72	0,74	0,75	0,75	0,75
	B 8	7,0	0,30	0,14	0,23	0,28	0,33	0,36	0,38	0,48	0,56	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70	0,70
PKZ 35 F	B 9	5,5	0,21	0,13	0,16	0,21	0,26	0,30	0,32	0,43	0,49	0,54	0,57	0,58	0,58	0,58	0,60

1) $\epsilon_k = \epsilon_{ges} - \epsilon_{el} - \epsilon_s$

2) σ_k Kriechspannung in N/mm²

3) ϵ_{el} wurde aus dem statischen Elastizitätsmodul (s. Tafel A 3) und der aufgetragenen Kriechspannung berechnet

Tafel A 7: Bezogenes Kriechmaß ϵ_k/σ [$10^{-3} \cdot \text{mm}^2/\text{N}$]

Zement	Beton	Tage nach Belastung													
		1	3	7	14	21	28	90	180	360	480	600	720	900	1080
PZ 35 F	B 1	0,025	0,032	0,040	0,049	0,055	0,059	0,076	0,086	0,097	0,101	0,107	0,109	0,112	0,113
	B 2	0,027	0,036	0,042	0,052	0,057	0,063	0,085	0,098	0,109	0,114	0,117	0,117	0,118	0,120
HOZ 35 L	B 3	0,032	0,046	0,054	0,068	0,075	0,080	0,099	0,119	0,144	0,156	0,161	0,167	0,176	0,180
	B 4	0,021	0,030	0,041	0,047	0,055	0,053	0,062	0,076	0,088	0,092	0,098	0,106	0,112	0,114
FAZ 35 F	B 5	0,013	0,022	0,031	0,041	0,048	0,051	0,065	0,072	0,083	0,084	0,087	0,089	0,092	0,093
	B 6	0,025	0,035	0,045	0,053	0,059	0,064	0,077	0,090	0,103	0,106	0,107	0,109	0,112	0,114
FAHZ 35 F	B 7	0,040	0,051	0,061	0,073	0,078	0,080	0,098	0,109	0,131	0,139	0,142	0,143	0,143	0,145
	B 8	0,020	0,032	0,040	0,047	0,051	0,055	0,068	0,080	0,092	0,094	0,096	0,098	0,100	0,101
PKZ 35 F	B 9	0,024	0,029	0,039	0,048	0,054	0,058	0,078	0,090	0,098	0,103	0,105	0,106	0,106	0,108

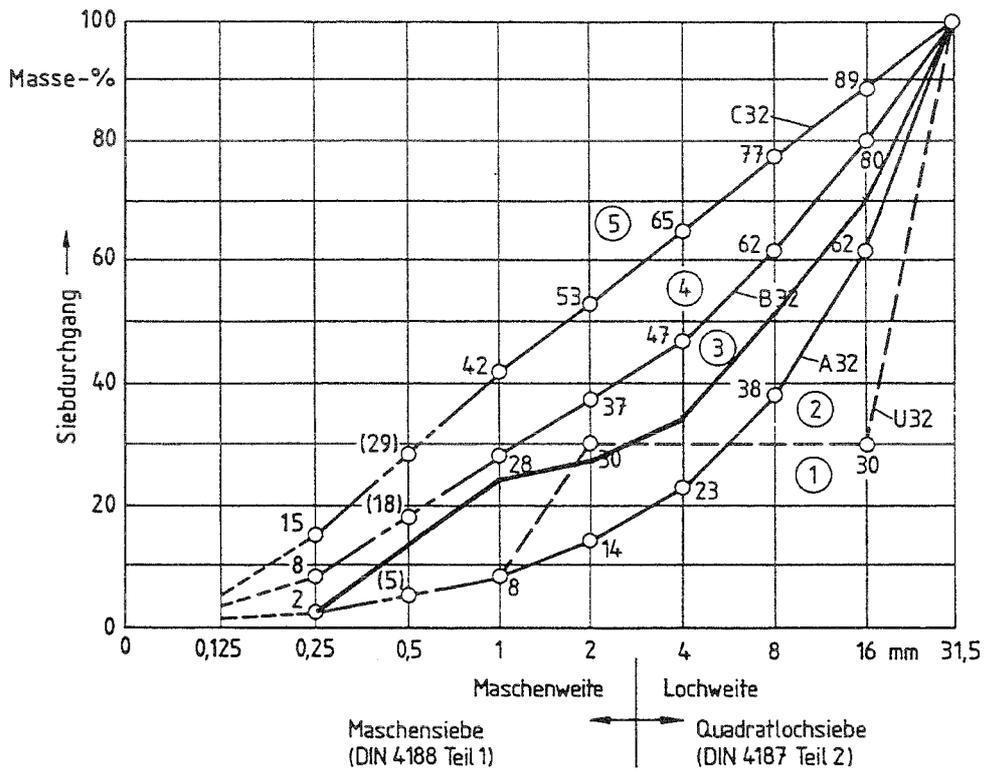


Bild A 1: Sieblinie des verwendeten Zuschlaggemisches

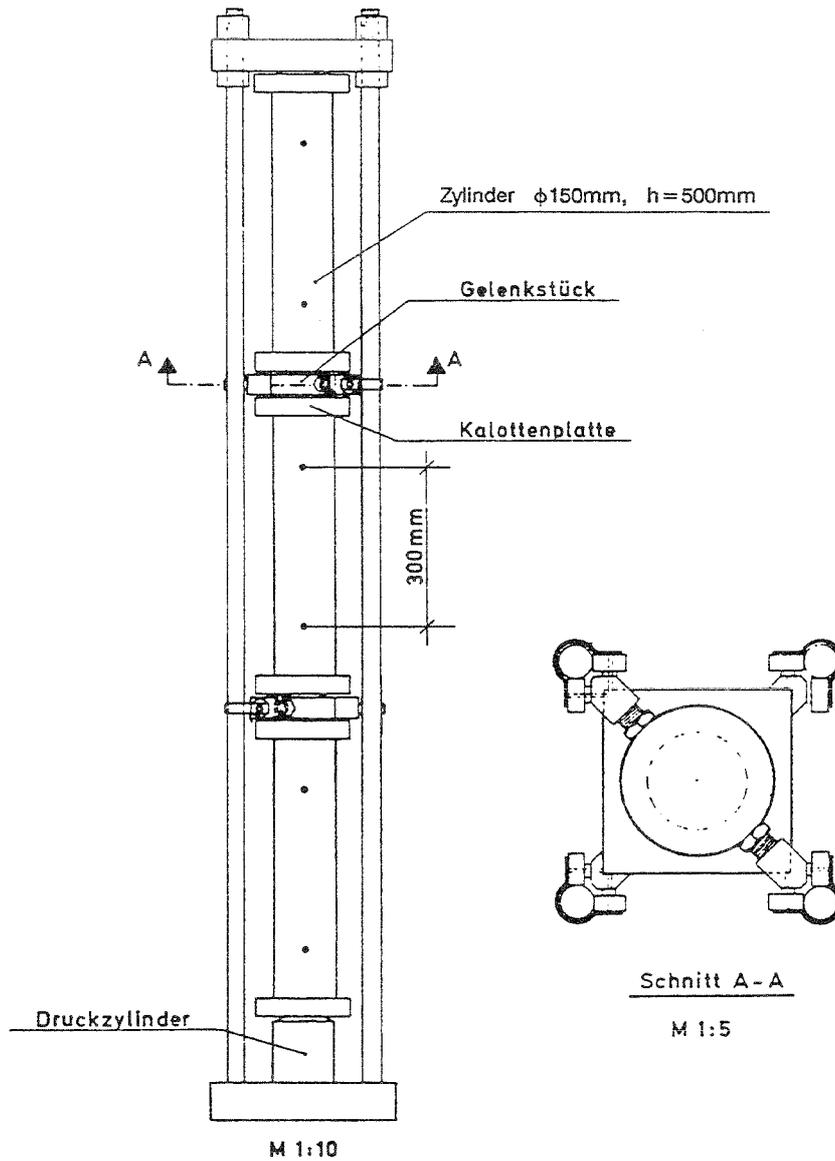


Bild A 2: Belastungseinrichtung für Zylinder $d = 15\text{ cm}$,
 $h = 50\text{ cm}$ (s. auch /4/)

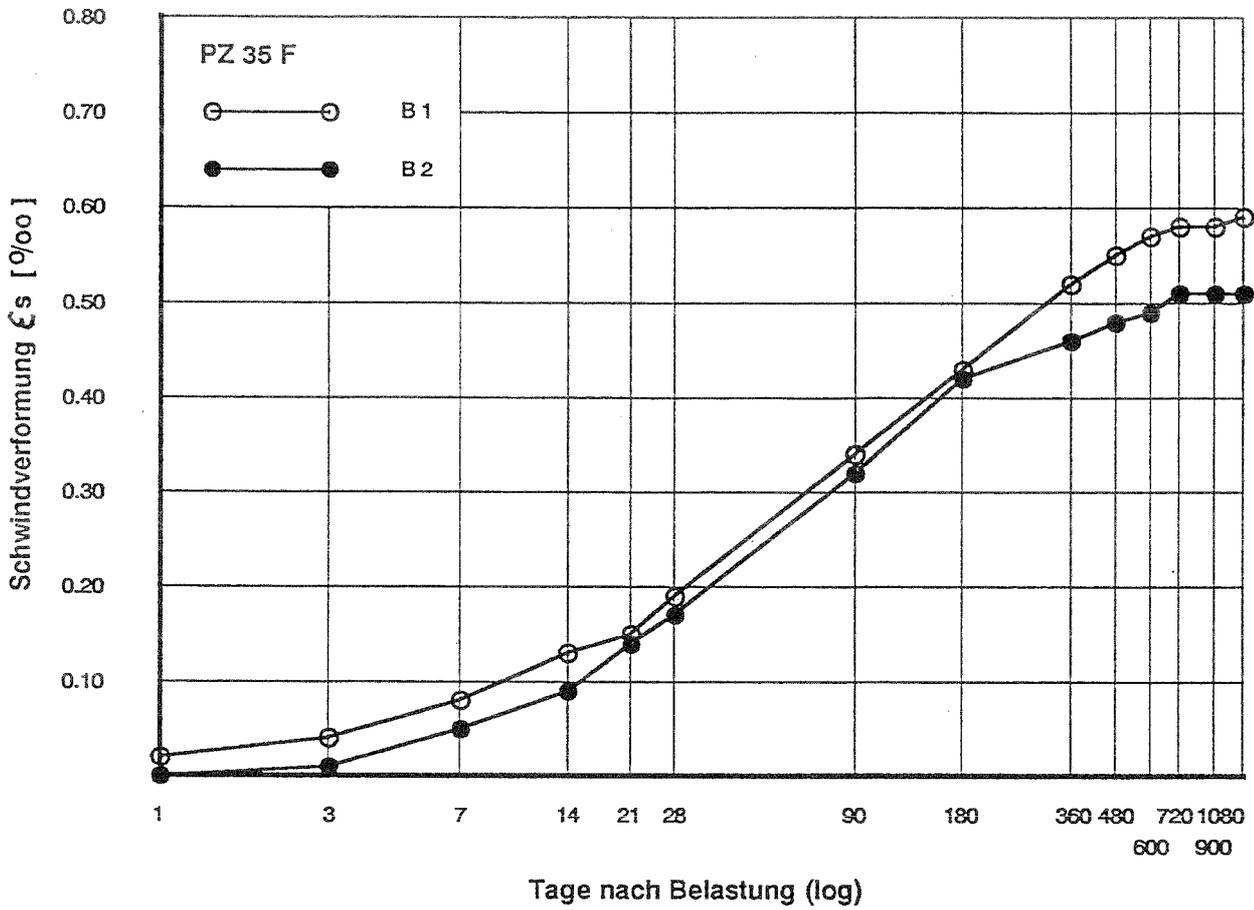


Bild A 3: Schwindverformungen der Betone B 1 und B 2 aus Portlandzement (PZ 35 F) in Abhängigkeit von der Zeit

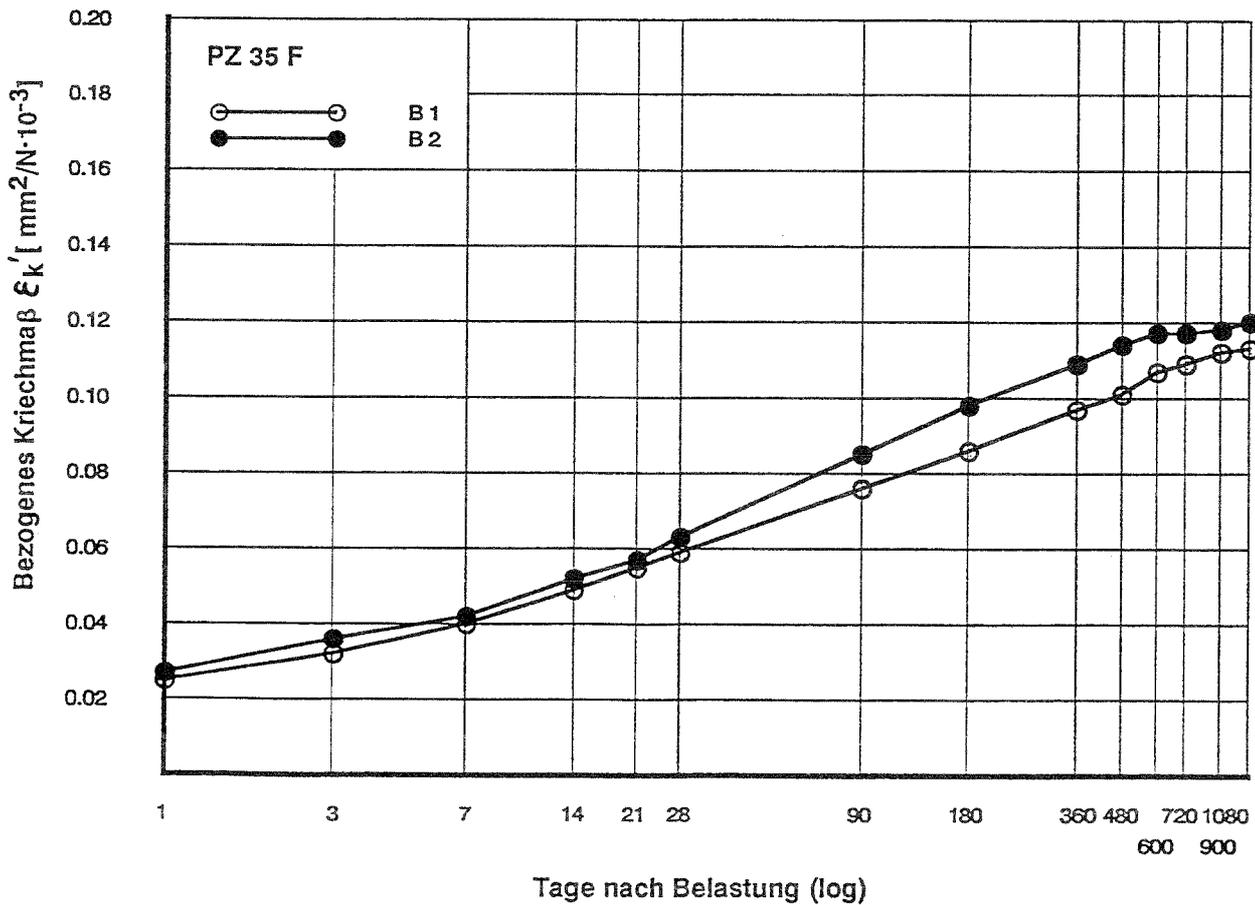


Bild A 4: Bezogene Kriechmaße der Betone B 1 und B 2 aus Portlandzement (PZ 35 F) in Abhängigkeit von der Zeit

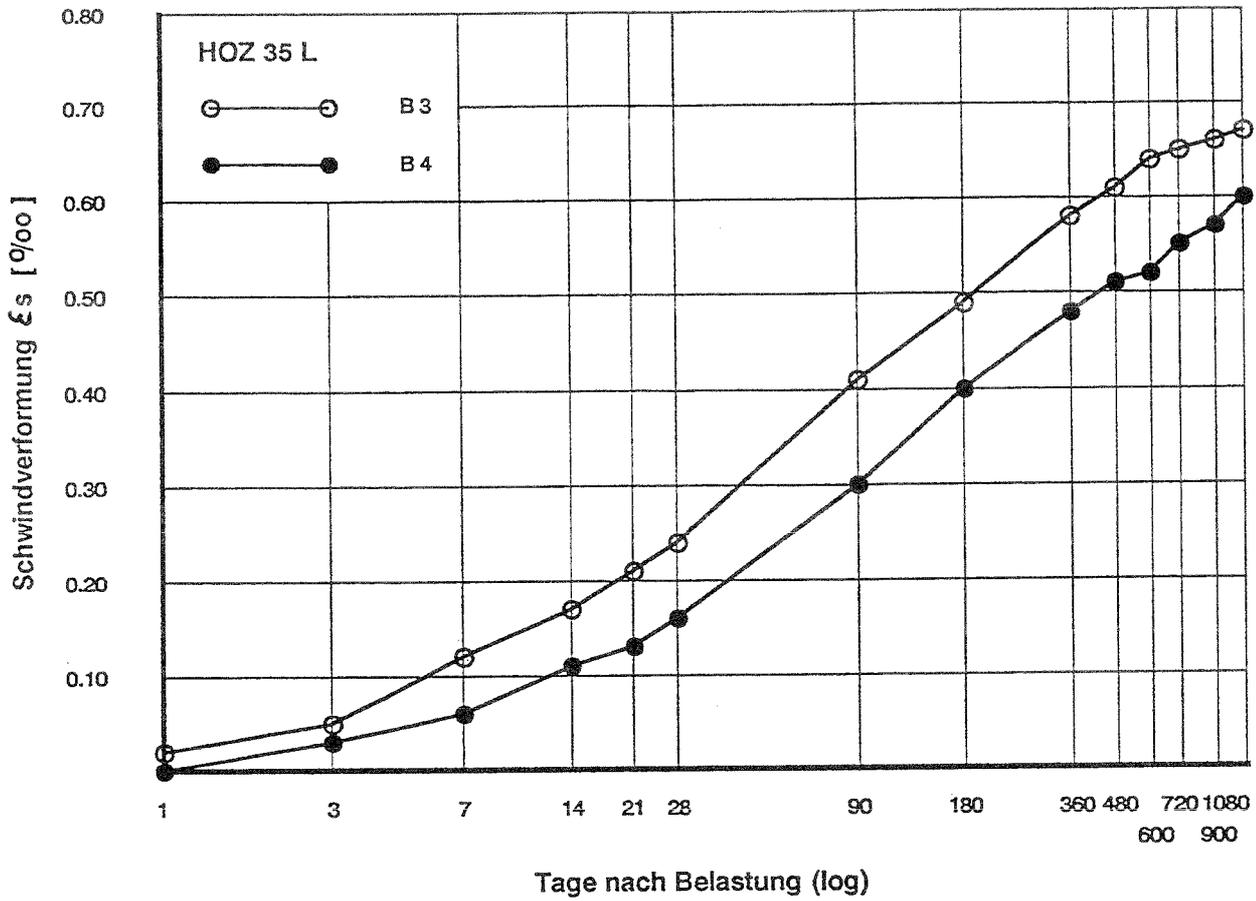


Bild A 5: Schwindverformungen der Betone B 3 und B 4 aus Hochofenzement (HOZ 35 L) in Abhängigkeit von der Zeit

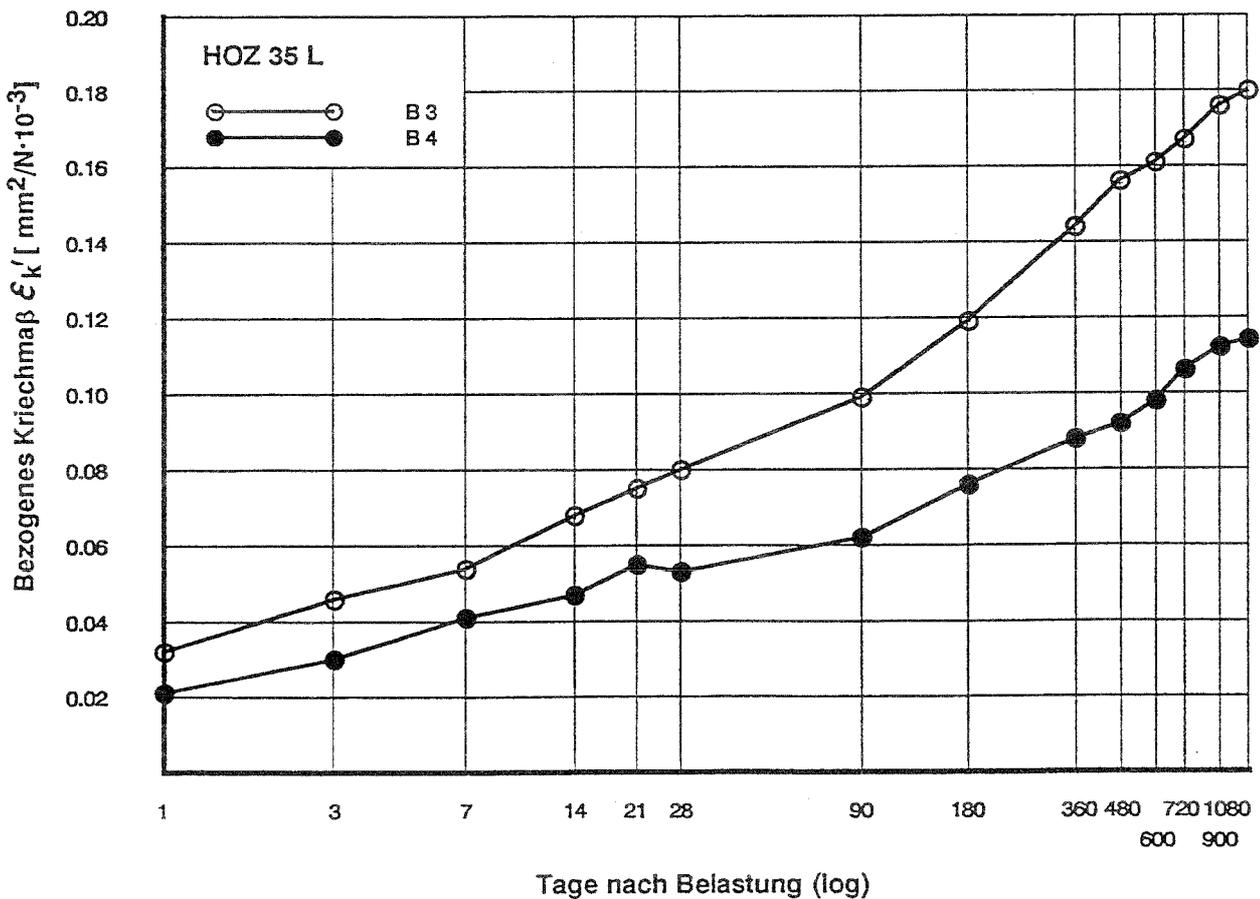


Bild A 6: Bezogene Kriechmaße der Betone B 3 und B 4 aus Hochofenzement (HOZ 35 L) in Abhängigkeit von der Zeit

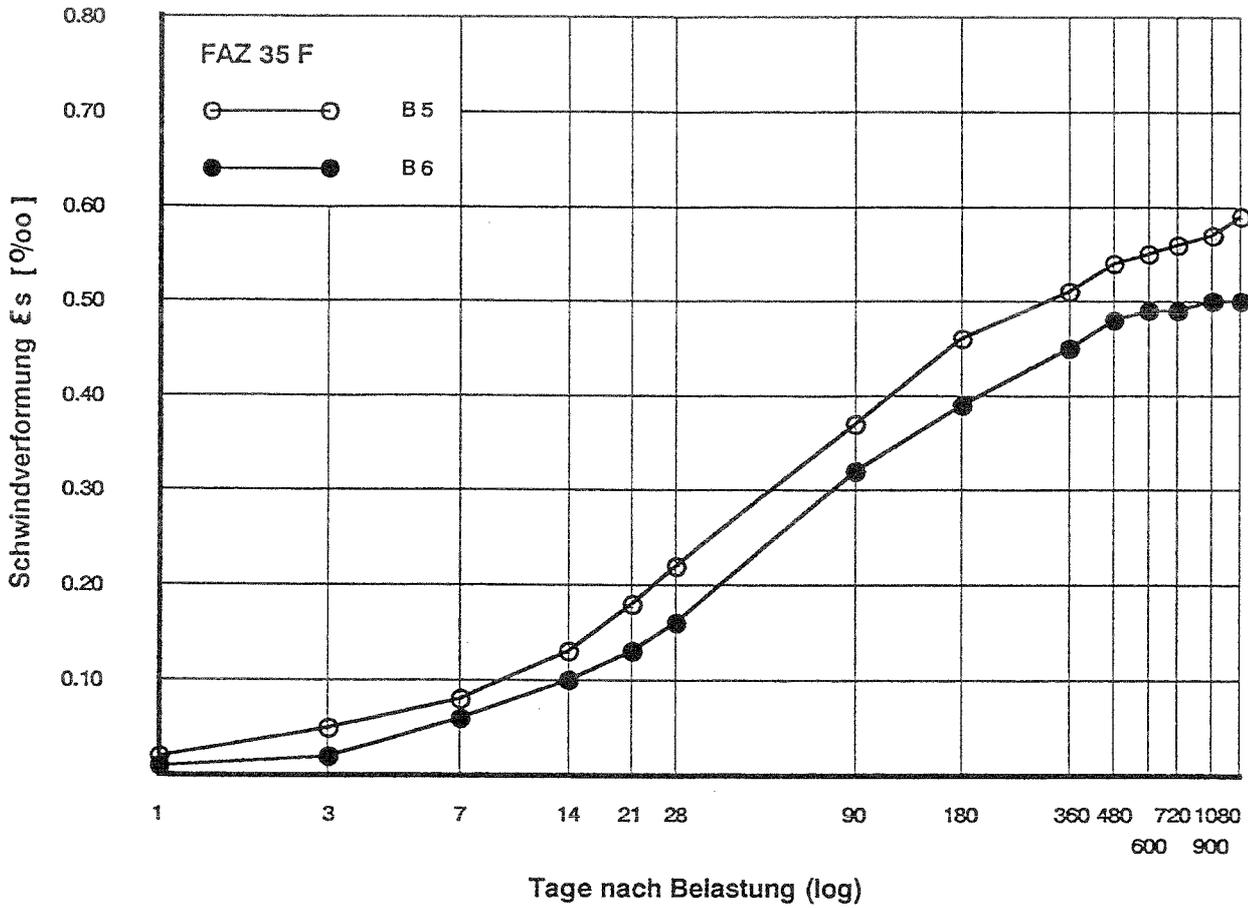


Bild A 7: Schwindverformungen der Betone B 5 und B 6 aus Flugaschezement (FAZ 35 F) in Abhängigkeit von der Zeit

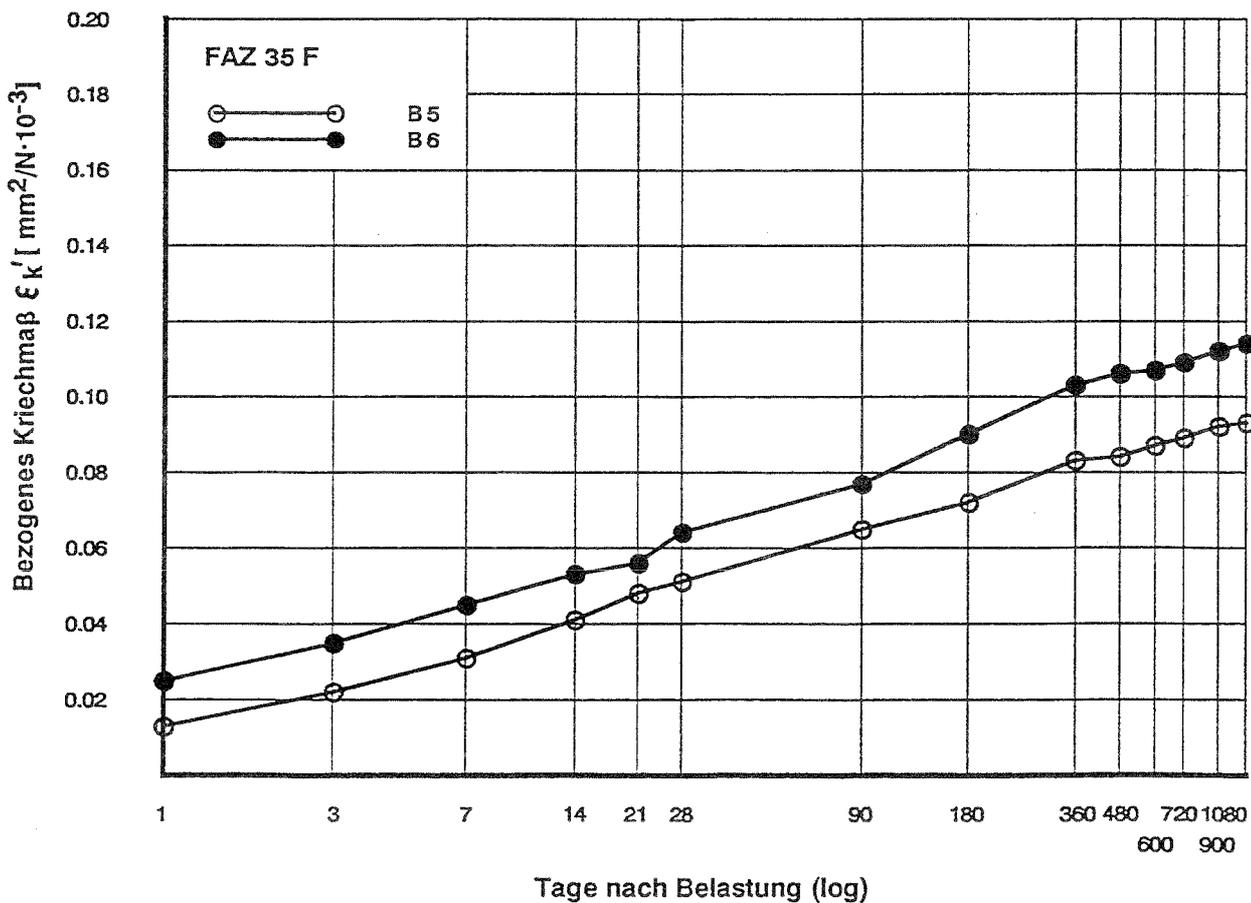


Bild A 8: Bezogene Kriechmaße der Betone B 5 und B 6 aus Flugaschezement (FAZ 35 F) in Abhängigkeit von der Zeit

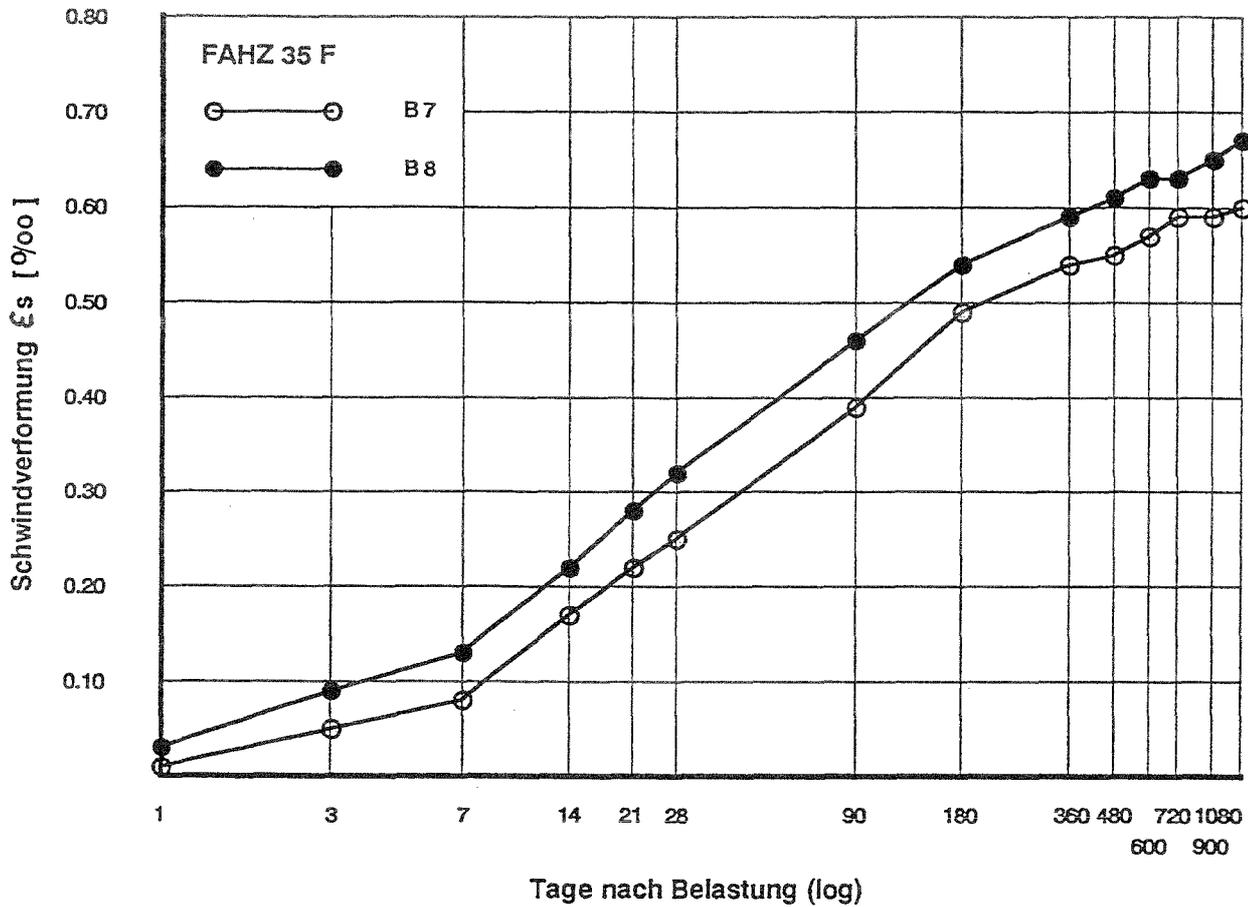


Bild A 9: Schwindverformungen der Betone B 7 und B 8 aus Flugaschehüttzement (FAHZ 35 F) in Abhängigkeit von der Zeit

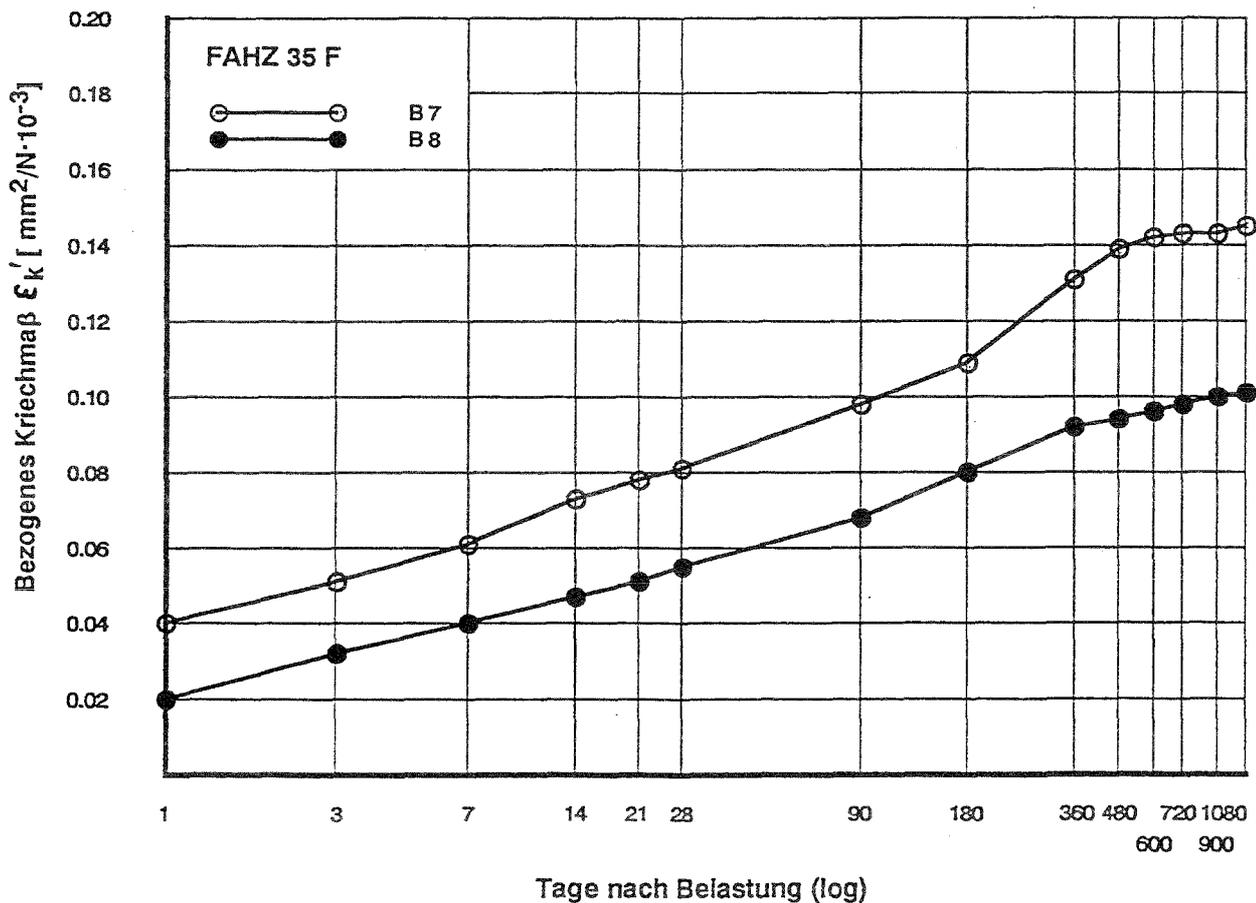


Bild A 10: Bezogene Kriechmaße der Betone B 7 und B 8 aus Flugaschehüttzement (FAHZ 35 F) in Abhängigkeit von der Zeit

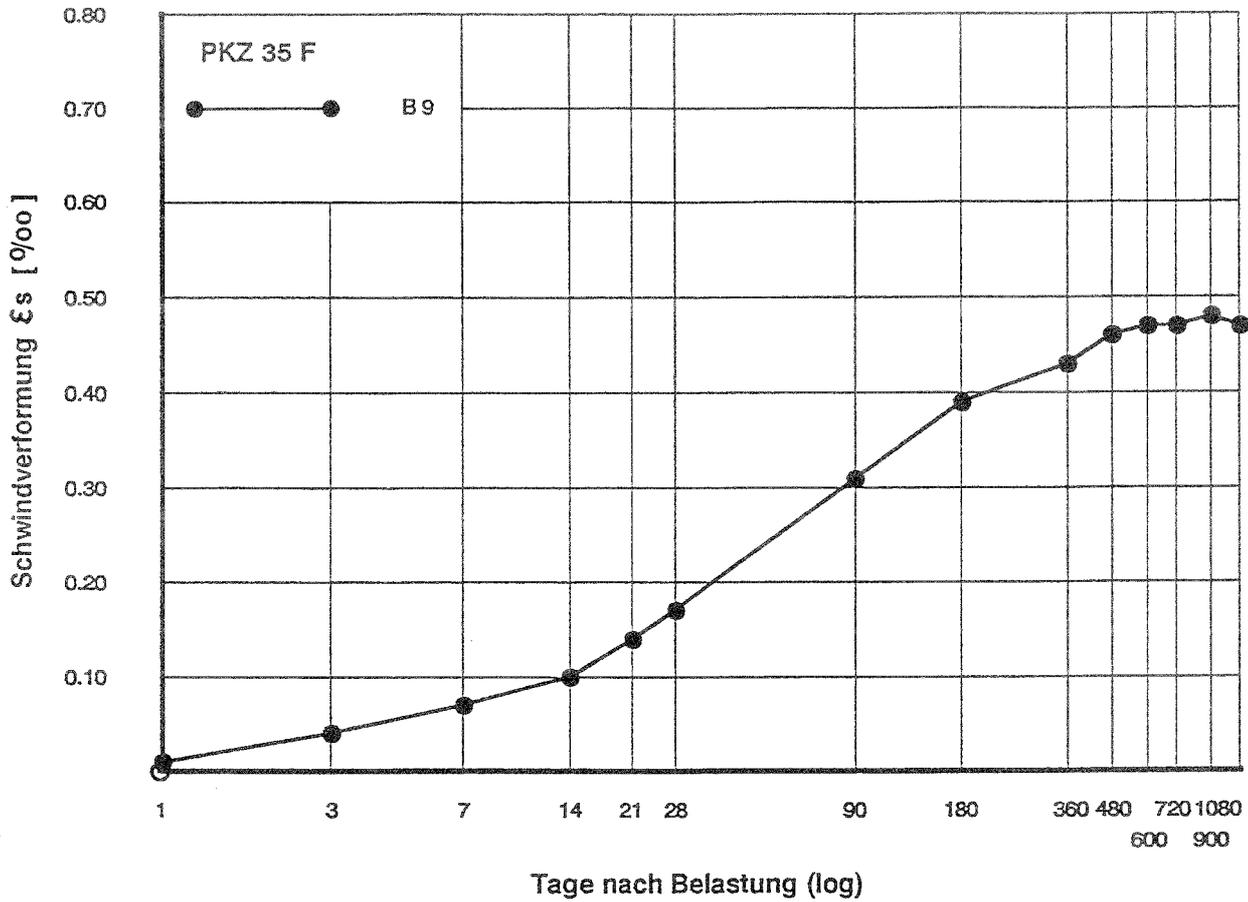


Bild A 11: Schwindverformungen des Betons B 9 aus Portlandkalksteinzement (PKZ 35 F) in Abhängigkeit von der Zeit

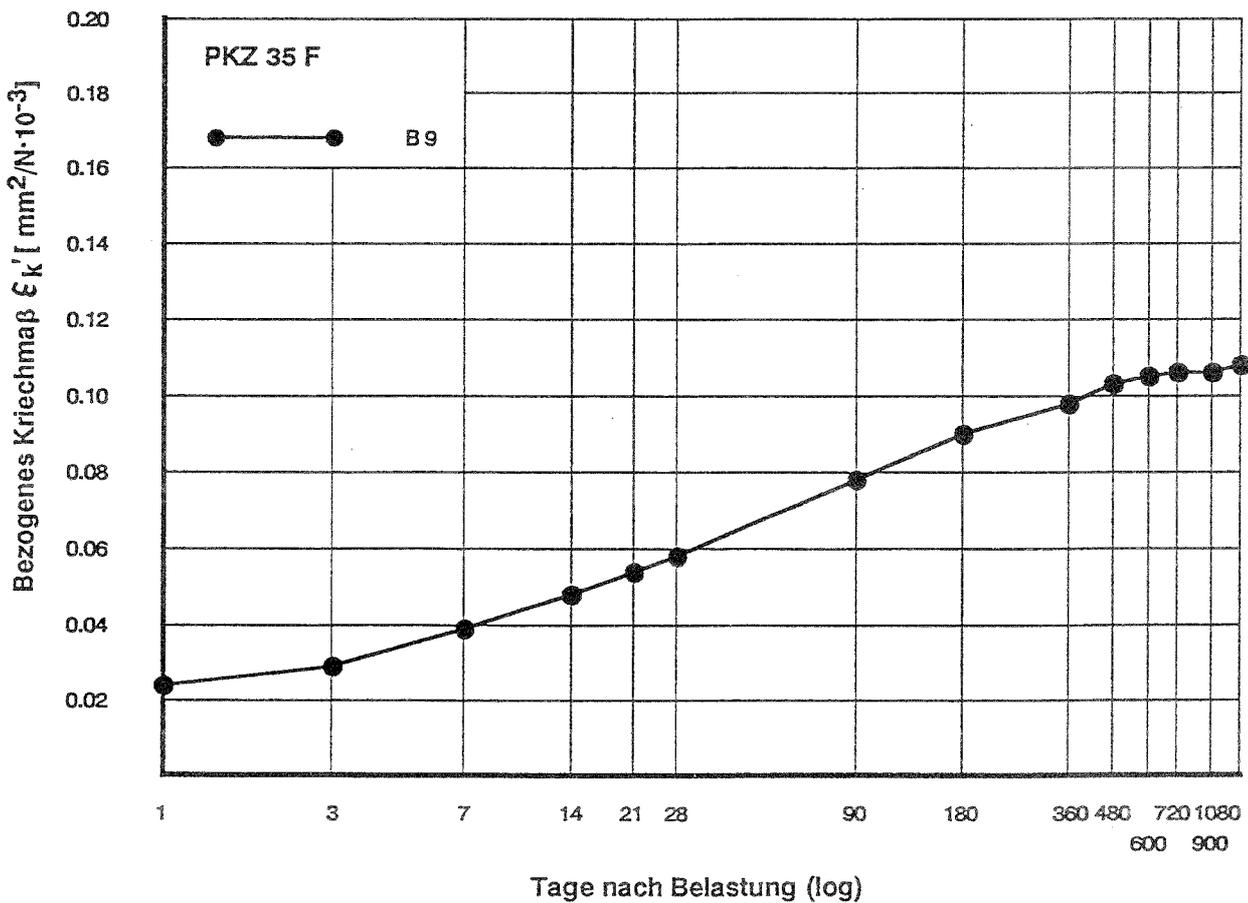


Bild A 12: Bezogene Kriechmaße des Betons B 9 aus Portlandkalksteinzement (PKZ 35 F) in Abhängigkeit von der Zeit

T 2646

Research project

**Creep behaviour of concretes
containing cements with official licence
and additionally ground inert
and latently hydraulic materials**

Abstract

The subjects of this research were shrinkage and creep in concretes made with 9 different cements. The concrete mix was not varied. Two portland cements (PZ 35 F), two blast furnace cements (HOZ 35 L), two fly ash cements (FAZ 35 F), two fly ash foundry cements (FAHZ 35 F) and one portland limestone cement (PKZ 35 F) were used. The shrinkage and creep tests were carried out over a period of three years.

Deformation due to shrinkage and creep were measured and compared with the table values according to DIN 4227 part 1 and Eurocode 2 Part 1.

The shrinkage rate and the related creep rate of all concretes tested showed relatively small variations after 3 years, if the strong deviations experienced in the case of creep tests are taken into consideration. It would therefore appear to be a just measure if, in the case of German class Z 35 cements, no differences are made between L and F cements or between the various types of cement. Especially the new types of licenced cement do not behave significantly differently from the normal ones.

Calculation of deformations according to the above mentioned regulations tended to give too little rates of shrinkage and too large rates of creep. On the whole, the conformity of measured and calculated values was, in view of the total deformation, satisfactory.

The formulae for shrinkage and creep prediction suggest an accuracy which is not justified, in view of the occurring deviation. It is therefore desirable that the calculation formulae should be simplified.

T 2686

**Comportement au fluage des bétons
en ciments contrôllés et admis
avec broyage de matériaux inèrtes
et de matériaux latents-hydrauliques**

Résumé

Le retrait et le fluage des bétons produits a partir de 9 ciments différents ont été étudiés. La composition des bétons n'a pas été variée. Deux ciments portlands PZ 35 F, deux ciments de haut fourneau HOZ 35 F, deux ciments au cendres volantes FAZ 35 F, deux ciments de haut fourneau au cendres volantes FAHZ 35 F et un ciment portland calcaire PKZ 35 F ont été employés. Les essais de retrait et de fluage ont été réalisés durant un intervalle de temps de 3 ans.

Les déformations de retrait et de fluage mesurées ont été comparées avec les valeurs correspondantes selon DIN 4227 partie 1 et Eurocode 2 partie 1.

Les mesures de retrait et les mesures déduites de fluage de tous les bétons étudiés se différencient peu considérablement après trois ans, si on tient compte des grands écarts, qui apparaissent expérimentalement durant les essais de fluage. Il apparait par conséquent équitable en ce qui concèrne les ciments allemands commerciaux et usuels de la classe Z 35 de ne pas différencier entre L- et F-ciments ou entre les sortes de ciments. En particulier concèrnant les ciments nouvellement admis, ils se comportent d'une manière insignifiante différemment vis à vis des ciments normés.

Le calcul des déformations selon les prescriptions citées ci-dessus a donné en grande partie des mesures de retrait trop faibles et des mesures déduites de fluage trop élevées. La conformité des mesures avec les valeurs calculées était concèrnant la déformation totale en somme satisfaisante.

Les formules employées pour le calcul des fluages prévus simulent une exactitude, qui est à cause des écarts de resultats apparus non justifiée. Une simplification des formules employées est pour cette raison à espérer.