

Kriechen von frühbelastetem Beton mit hoher Anfangsfestigkeit^{*)}

Von Gerd Wischers und Jürgen Dahms, Düsseldorf

Übersicht

Als Kriechen bezeichnet man die unter andauernder Spannung verzögert auftretenden Formänderungen. Bislang wurde angenommen, daß Betone mit gleichem Erhärtungsgrad (ermittelt an der Druckfestigkeit) unter sonst gleichen Bedingungen das gleiche Kriechmaß aufweisen. Da dies zumindest bei sehr jungen Betonen mit hoher Anfangsfestigkeit fraglich erschien, wurden 5 Betone ähnlicher Endfestigkeit, jedoch mit sehr unterschiedlicher Anfangsfestigkeit bei gleichem Erhärtungsgrad auf Kriechen untersucht. Die für eine Dauerbelastung von 11 N/mm² erforderliche Druckfestigkeit von 36 N/mm² wurde bei dem am schnellsten erhärtenden Beton nach 12 und bei dem am langsamsten erhärtenden Beton nach 120 Stunden erreicht. Die 6 Jahre währenden Kriechuntersuchungen ergaben, daß sehr schnell erhärtende Betone ein vergleichsweise größeres Anfangskriechen aufweisen, daß sie jedoch in höherem Alter weniger kriechen, so daß nach 6 Jahren für alle untersuchten Betone Endkriechmaße gleicher Größenordnung gefunden wurden. Die gemessenen Endkriechmaße stimmten recht gut mit den nach den Spannbeton-Richtlinien berechneten Endkriechmaßen überein.

1. Allgemeines

Äußere Kräfte oder Zwänge führen in einem Körper zu Spannungen und rufen Formänderungen hervor. Diese Formänderungen können zeitlich mit den Spannungen synchron (sofort) auftreten, oder sie können bei länger einwirkenden Spannungen erst im Verlauf der Zeit, also verzögert auftreten. Außerdem können diese Formänderungen reversibel oder irreversibel sein. Reversible Formänderungen gehen zurück, wenn die Spannungen abnehmen; man bezeichnet solche Formänderungen als federnd oder elastisch. Demgegenüber gehen irreversible Formänderungen nicht mehr zurück, sie sind also bleibend. Ein durch Spannungen verursachtes, bleibendes Verformen bezeichnet man als Fließen (siehe auch die Definition des Kriechens am Ende des nächsten Absatzes).

^{*)} Nach einem Vortrag von J. Dahms auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung des Vereins Deutscher Zementwerke am 20. Oktober 1976 in Düsseldorf

Phänomenologisch sind hinsichtlich des zeitlichen Auftretens und der Art der Formänderungen 4 Erscheinungsformen möglich, nämlich die sofortige und die verzögerte elastische Formänderung sowie die sofortige und die verzögerte bleibende Formänderung. Wird Beton belastet, so treten alle 4 Erscheinungsformen der Formänderungen auf, allerdings sind sie sehr unterschiedlich groß. So ist die sofort auftretende, bleibende Formänderung sehr klein (deutlich unter 5 % der gesamten Formänderung); sie wird daher bei der Auswertung von Kriechversuchen meist nicht besonders berücksichtigt, wenngleich sie meßtechnisch bei der Bestimmung der Gesamtverformung miteinfaßt wird. Damit kann man bei den durch Spannungen verursachten Formänderungen des Betons unterscheiden zwischen den sofort auftretenden, nur elastischen Formänderungen und den verzögert auftretenden Formänderungen, die teils elastischer und teils bleibender Natur sind. Als Kriechen bezeichnet man die verzögert auftretenden, also zeitabhängigen Formänderungen unter andauernden Spannungen. Das Kriechen setzt sich aus den verzögert elastischen und den verzögert bleibenden Formänderungen (Fließen) zusammen.

Der Einfluß des Kriechens auf die Schnittgrößen braucht nur berücksichtigt zu werden, wenn diese dadurch wesentlich in die ungünstige Richtung verändert werden, was bei schlaff bewehrten Stahlbetonkonstruktionen im allgemeinen nicht der Fall ist. Dagegen sind der Einfluß des Kriechens bei der Abschätzung der zu erwartenden Verformungen, wie z. B. Durchbiegungen, und bei Spannbetonbauteilen die Minderung der Vorspannung durch Kriechen stets zu berücksichtigen.

Größe und zeitliches Auftreten der Kriechverformungen hängen von zahlreichen Einflußgrößen ab, insbesondere von der Betonzusammensetzung, vom Erhärungsgrad des Betons bei Belastungsbeginn und von den Umweltbedingungen während der Belastung. Hierzu sind in der Vergangenheit zahlreiche Versuche durchgeführt und zusammenfassende Auswertungen vorgenommen worden, siehe Auswahl deutschen Schrifttums [1 bis 9], die dann ihren Niederschlag in Normen und Richtlinien gefunden haben. Für die Bundesrepublik Deutschland sind das insbesondere die Stahlbeton-Norm DIN 1045 (Ausgabe 1972) [10] sowie die Spannbeton-Richtlinien (Ausgabe 1973) [11], die einen vorübergehenden Ersatz der Spannbeton-Norm DIN 4227 (Ausgabe Okt. 1953) darstellen. Auch der als Vorläufer einer harmonisierten europäischen Norm anzusehende CEB Model Code [12] enthält hierzu Angaben, die in ihren Grundzügen denen der Spannbeton-Richtlinien entsprechen.

Während in den Normen und Richtlinien für die Berechnung des Schwindens allgemein das Schwindmaß — d. i. die auf die Meßlänge bezogene absolute Schwindverkürzung — angegeben ist, wird für die rechnerische Erfassung des Kriechens allgemein die Kriechzahl φ_t — d. i. die auf die sofortige elastische Verformung bezogene Kriechverformung — verwendet. Da dieser Berechnungsansatz weltweite Gepflogenheit geworden ist, wird man ihn aus pragmatischen Gründen beibehalten müssen, obwohl die Angabe eines Kriechmaßes — analog zum Schwindmaß — vermutlich Vorteile hätte, weil der E-Modul von Betonen gleicher Festigkeit beträchtliche Unterschiede aufweisen kann und weil dadurch die so-

fortige elastische Verformung eine großen Schwankungen ausgesetzte Bezugsgröße darstellt. Aus diesem Grunde sind für die rechnerische Erfassung des Kriechens nach DIN 1045 und den Spannbeton-Richtlinien stets die dort angegebenen Rechenwerte für den Elastizitätsmodul des Betons einzusetzen, und zwar auch dann, wenn der wahre E-Modul des vorgesehenen Betons durch Versuche bestimmt worden ist.

Die Zahl der Einflußgrößen auf das Kriechen ist groß, und diese Einflußgrößen sind zudem teilweise voneinander abhängig. Eine vollständige mathematische Erfassung ist daher kaum möglich und wegen des dafür erforderlichen Aufwands auch nicht gerechtfertigt. Für baupraktische Belange reicht es im allgemeinen aus, wenn die Größenordnung des Kriechens durch vereinfachte Ansätze hinreichend genau erfaßt wird. Welche Einflußgrößen dabei in der Berechnung zu berücksichtigen sind, ist daher auch eine Ermessensfrage. Im Gegensatz zu der Regelung in DIN 1045 ist in den Spannbeton-Richtlinien die Kriechzahl in zwei zu addierende Funktionen aufgespalten, mit denen die verzögert elastische und die verzögert bleibende Formänderung getrennt ermittelt werden. Vom physikalischen Vorgang und ebenso vom zeitlichen Ablauf her ist dies gerechtfertigt. Andererseits wird insbesondere bei stärkerem Kriechen der praktisch konstante Anteil der verzögert elastischen Formänderung relativ klein (unter 10 %), so daß gewisse Zweifel angebracht sind, ob die durch diese Aufspaltung aufwendigere Berechnung aus baupraktischer Sicht erforderlich ist. Auch wird durch diese Berechnungsweise eine Genauigkeit vorgetäuscht, die aufgrund der vielen Annahmen nicht gegeben ist. Wenn die nach den Spannbeton-Richtlinien berechneten Kriechwerte besser mit Versuchsergebnissen übereinstimmen als entsprechende Berechnungen nach DIN 1045 — was sich auch bei unseren nachfolgend beschriebenen Versuchen zeigte —, so liegt dies weniger an den zutreffender berücksichtigten physikalischen Vorgängen des Kriechens in den Spannbeton-Richtlinien als vielmehr an deren besser an die Versuchsergebnisse angepaßten Parametern. Nachdem diese Betrachtungs- und Berechnungsweise auch Eingang in die CEB-Rahmennorm gefunden hat, dürfte es aus Gründen der Normen-Konformität angebracht sein, hierbei zu bleiben.

2. Ziel der Untersuchungen

Das Kriechen des Betons wird unter anderem stark von den Verformungseigenschaften des Zementsteins bestimmt, die — abgesehen von den Umweltbedingungen — von dessen Zusammensetzung, von Art und Menge der bis zum Belastungsbeginn gebildeten Hydratationsprodukte sowie vom weiteren Erhärtungsfortschritt nach der Belastung und dabei gebildeten Hydratationsprodukten abhängen. Als Beurteilungskriterium für den Erhärtungsgrad des Betons dient meist die auf die 28 Tage-Druckfestigkeit bezogene Festigkeit bei Belastungsbeginn. Die Spannbeton-Richtlinien legen fest, daß eine Teilvorspannung von 30 % frühestens aufgebracht werden darf, wenn der Beton mindestens 40 %, und daß die endgültige Vorspannung erst dann aufgebracht werden darf, wenn der Beton mindestens 80 % der Serienfestigkeit der gewählten Betonfestigkeitsklasse aufweist.

Wenn der Erhärtungsgrad als Kriterium für die rheologischen Eigenschaften des Zementsteins herangezogen wird, so wird dabei eine enge Relation zwischen Kurzzeit-Druckfestigkeit und Langzeit-Verformung unterstellt. Die bisherigen Versuchsergebnisse rechtfertigen diese Annahme auch für die Fälle, in denen der Beton bis zum Belastungsbeginn bereits einige Tage erhärtete.

Demgegenüber ist durch Versuche bislang nicht geklärt, ob dies auch dann zutrifft, wenn der Beton durch eine besondere Zusammensetzung oder durch eine besondere Behandlung, wie z. B. eine Warmbehandlung, schon nach weniger als einem Tag einen für eine endgültige Vorspannung ausreichenden Erhärtungsgrad aufweist, wie dies bei im Spannbett hergestellten Spannbetonfertigteilen üblich ist, um die Schalung zu einem möglichst frühen Zeitpunkt freisetzen zu können. Verschiedene Beobachtungen in der Praxis und Untersuchungen über Aufbau und Gefüge des Zementsteins führten zu der Vermutung, daß solche Betone zwar die entsprechende Kurzzeit-Druckfestigkeit besaßen, jedoch infolge anderer und weniger auskristallisierter Hydratationsprodukte verformungsfreudiger unter Langzeitbelastungen waren. Ziel der Untersuchungen war es daher, das Kriechen von frühbelasteten Betonen mit hoher Anfangsfestigkeit im Vergleich zu solchen Betonen festzustellen, die bei ähnlicher Betonzusammensetzung die für eine endgültige Vorspannung erforderliche Festigkeit erst später erreichten und daher auch erst später belastet wurden.

Der für solche Untersuchungen hohe Aufwand machte eine Beschränkung auf wenige Parameter erforderlich; bei diesen ersten Untersuchungen wurde daher auf eine Warmbehandlung verzichtet und die hohe Anfangsfestigkeit ausschließlich durch eine zweckmäßige Zusammensetzung angestrebt (frühhochfester Zement, steife Konsistenz, niedriger Wasserzementwert). Die Versuche wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf durchgeführt. Die Mittel für dieses Forschungsvorhaben wurden zum Teil vom Bundesminister für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) zur Verfügung gestellt, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei.

3. Umfang und Durchführung der Versuche

Die eigentlichen Kriechversuche wurden im April 1976 nach rd. 6 Jahren Dauerbelastung abgebrochen, weil das Endkriechen praktisch erreicht war; hierüber wird im folgenden berichtet. Nach Entlastung wurde mit dem Messen des Rückkriechens begonnen; ferner sollen nach Abklingen des Rückkriechens in Kurzzeitversuchen der E-Modul, die Bruchstauchung und die Festigkeit des belasteten und des parallel gelagerten, unbelasteten Betons bestimmt werden. Hierüber wird zu gegebener Zeit berichtet.

Für die Untersuchungen wurden Betone mit ähnlicher, hoher 28 Tage-Druckfestigkeit (B 450 nach DIN 4227, Ausgabe 1953) gewählt, die eine normale bzw. sehr hohe Anfangsfestigkeit hatten. Die hohe Anfangsfestigkeit wurde vor allem durch einen frühhochfesten Zement (PZ 550) bewirkt, ferner durch eine steife Konsistenz (K1) sowie in einer weiteren Reihe durch einen von 0,48 auf 0,40

verminderten Wasserzementwert. Insgesamt wurden 5 Betone (A bis E) hergestellt, deren für eine endgültige Vorspannung erforderliche Druckfestigkeit von 36 N/mm^2 (360 kp/cm^2 , entsprechend 80 % von B 450) in dem weiten Zeitraum von 12 bis 120 Stunden erhalten wurde.

Die einheitliche Dauerbelastung von 11 N/mm^2 (110 kp/cm^2) wurde bei jedem der 5 Betone bei drei verschiedenen Erhöhungsgraden aufgebracht, und zwar bei Erreichen einer Druckfestigkeit von 36 N/mm^2 (360 kp/cm^2), bei Erreichen von rd. 80 % der wahren 28 Tage-Festigkeit und im Alter von 28 Tagen. Das Schwinden der verschiedenen Betone wurde an parallel gelagerten, unbelasteten Prüfkörpern gleicher Zusammensetzung ermittelt. Ferner wurden zum Zeitpunkt der jeweiligen Dauerbelastung an parallel hergestellt und gelagerten Prüfkörpern E-Modul, Bruchstauchung und Druckfestigkeit bestimmt.

3.1 Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung

3.1.1 Zement

Verwendet wurden ein Portlandzement 350 F und ein Portlandzement 550, deren kennzeichnende Werte in Tafel 1 enthalten sind. Während sich die Druckfestigkeiten nach 1 Jahr nur noch um rd. 5 % unterschieden, war die Festigkeit des PZ 550 nach 1 Tag mehr als dreimal so groß wie die des PZ 350 F. Die hohe Anfangsfestigkeit des PZ 550 ist vor allem durch seinen hohen Gehalt an Tricalciumsilicat (C_3S) sowie durch seine hohe Mahlfineinheit (große spez. Oberfläche) bedingt.

Tafel 1 Eigenschaften der Zemente

Eigenschaft			Zement	
			PZ 350 F	PZ 550
Klinkerphasen nach Bogue	C_3S	Gew.-%	55,0	62,7
	C_2S		20,3	8,0
	C_3A		10,3	9,6
	C_4AF		8,0	8,5
Mahlfeinheit (Spez. Oberfläche)	cm^2/g		2990	5380
Wasseranspruch für Normsteife	Gew.-%		26,0	31,5
Erstarrungsbeginn	Std; Min		2; 55	2; 00
Erstarrungsende			4; 35	3; 25
Druckfestigkeit*) nach 1 Tag	N/mm ²		9,1	30,7
Druckfestigkeit nach 2 Tagen			15,5	40,8
Druckfestigkeit nach 28 Tagen			53,0	59,1
Druckfestigkeit nach 360 Tagen			60,5	64,2

*) Die Druckfestigkeit wurde auf SI-Einheiten umgerechnet und dabei $10 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$ gesetzt.

3.1.2 Zuschlag

Für sämtliche Betone wurde das gleiche Zuschlaggemisch aus Rheinkies sand mit 16 mm Größtkorn verwendet. Die Sieblinie der

Kornzusammensetzung lag in der Mitte des nach DIN 1045 günstigen Bereichs A/B 16.

3.1.3 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Die für die Versuche zweckmäßige Zusammensetzung wurde nach eingehenden Vorversuchen mittels Erhärtungsprüfungen festgelegt. Die Zusammensetzung der 5 Betone und deren Frischbetoneigenschaften sind in Tafel 2 zusammengestellt. Bei gleichem Wasserzementwert $W/Z = 0,48$ wurde mit beiden Zementen je ein zementleimärmer und demzufolge steifer Beton (A und C) sowie je ein zementleimreicher und damit weicher Beton (B und D) hergestellt. In der Zusammensetzung unterschieden sich die Betone A und C nur hinsichtlich des verwendeten Zements; gleiches gilt für die Betone B und D. Der wesentlich feiner gemahlene PZ 550 lieferte erwartungsgemäß bei gleichem Wasserzementwert einen steiferen und „zäheren“ Zementleim als der PZ 350 F, was in der Konsistenz des Frischbetons deutlich zum Ausdruck kam. Mit dem relativ hohen Wassergehalt von 197 l/m^3 wies Beton B aus PZ 350 F eine weiche Konsistenz K3 auf, während bei gleicher Zusammensetzung mit PZ 550 (Beton D) lediglich eine plastische Konsistenz K2 gemessen wurde. (Bei der Berechnung des zu erwartenden Kriechens gemäß DIN 1045 und den Spannbeton-Richtlinien wurde allerdings auch Beton D der Konsistenz K3 zugeordnet, weil in diesen Vorschriften durch die Berücksichtigung der Konsistenz der für das Kriechen maßgebende Zementleimgehalt erfaßt werden soll.)

Tafel 2 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Beton	Zement	Anteil je m^3 verdichteter Beton			Wasserzementwert	Konsistenz		Frischbetonrohddichte	Luftporengehalt
		Zement	Zuschlag	Wasser		Verdichtungsmaß	Ausbreitmaß		
		kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	—	—	cm	kg/dm^3	Vol.-%
A	PZ 350 F	325	1905	153	0,48	1,30	—	2,41	1,7
B		410	1733	197		1,06	43	2,40	0,9
C	PZ 550	325	1905	155		1,39	—	2,40	1,5
D		410	1738	197		1,25	32	2,37	1,5
E		400	1831	160	0,40	1,53	—	2,41	1,4

Bei Beton E wurden alle die Anfangsfestigkeit steigernden beton-technologischen Maßnahmen getroffen, d. h. Verwendung eines frühhochfesten PZ 550, zementleimärmer Beton der Konsistenz K1 und zusätzlich ein möglichst niedriger Wasserzementwert $W/Z = 0,40$. Diese Zusammensetzung lieferte allerdings einen außerordentlich steifen Beton (Verdichtungsmaß $v = 1,53$), für dessen vollständige Verdichtung ein hoher Verdichtungsaufwand erforderlich war.

Die Frischbetonrohddichte aller Betone lag in der Größenordnung von $2,40 \text{ kg/dm}^3$ mit Ausnahme von Beton D, dessen Verdichtung

vermutlich nicht vollständig war. (Bei der parallel durchgeführten Bestimmung des Luftporengehalts wurde allerdings keine höhere Porosität festgestellt.)

3.2 Herstellung, Lagerung und Prüfung der Probekörper

Für die Hauptversuche wurden von jedem Beton 9 Zylinder mit 15 cm Durchmesser und 60 cm Höhe für die Langzeitversuche (Kriechen und Schwinden) hergestellt, ferner 12 Zylinder mit 15 cm Durchmesser und 30 cm Höhe für Kurzzeitversuche zu verschiedenen Terminen (E-Modul, Bruchstauchung und Druckfestigkeit) sowie 18 Würfel mit 20 cm Kantenlänge für Druckfestigkeitsprüfungen. Die dafür und für die Frischbetonuntersuchungen erforderliche Betonmenge wurde in mehreren Chargen in einem 250 l-Zwangsmischer, System Eirich, gemischt, anschließend in die Formen gefüllt und auf dem Rütteltisch möglichst vollständig verdichtet.



Bild 1 Kriechstände (Bauart MPA München) in einem klimatisierten Raum; die Gesamtverformung der Betonzylinder wird mit Dehnungsmeßstreifen von 15 cm Länge gemessen

Alle Prüfkörper lagerten bis 2 Stunden vor Beginn der Dauerbelastung bzw. Kurzzeitprüfung in Wasser von rd. 20 °C mit Ausnahme von 3 Würfeln, die nach DIN 1048 gelagert und im Alter von 28 Tagen auf Druckfestigkeit geprüft wurden.

Die Prüfung auf Druckfestigkeit, E-Modul und Bruchstauchung erfolgte in Anlehnung an DIN 1048 Blatt 1 und Blatt 3. Die Zylinder für die Kriechuntersuchungen wurden in Kriechstände (Bauart MPA München) eingebaut und derart belastet und nachreguliert, daß sie einer konstanten Dauer-Druckspannung von 11 N/mm² (110 kp/cm²) ausgesetzt waren, siehe Bild 1. Die Kriechversuche wurden in einem klimatisierten Raum bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt, in dem auch die unbelasteten Zylinder für die Schwinduntersuchungen lagerten.

Sämtliche Verformungen (Kurzzeit- und Langzeitversuche) wurden mittels Dehnungsmeßstreifen von 15 cm Länge gemessen. Parallel wurden die Langzeitverformungen (Kriechen und Schwinden) mit Setzdehnungsmessern bestimmt, weil Bedenken bestanden, daß der Kleber, mit dem die Dehnungsmeßstreifen auf den Beton geklebt wurden, bei der langen Dauerbelastung durch eigenes Kriechen die Meßergebnisse verfälschen könnte. Die zahlreichen Dehnungsmeßstreifen konnten durch eine manuelle Umschaltvorrichtung nacheinander kurzfristig abgefragt werden. Das Spannungssignal der einzelnen Dehnungsmeßstreifen wurde mit einer Trägerfrequenzbrücke verstärkt und mittels Drucker registriert, siehe Bild 2.

Mit jedem Beton wurde bei 3 verschiedenen Erhärtungsgraden (Belastungsterminen) mit den Langzeitversuchen (Kriechen und Schwinden) begonnen. Als Belastungstermin I wurde mit der Dauerbelastung begonnen, wenn der jeweilige Beton eine Druck-

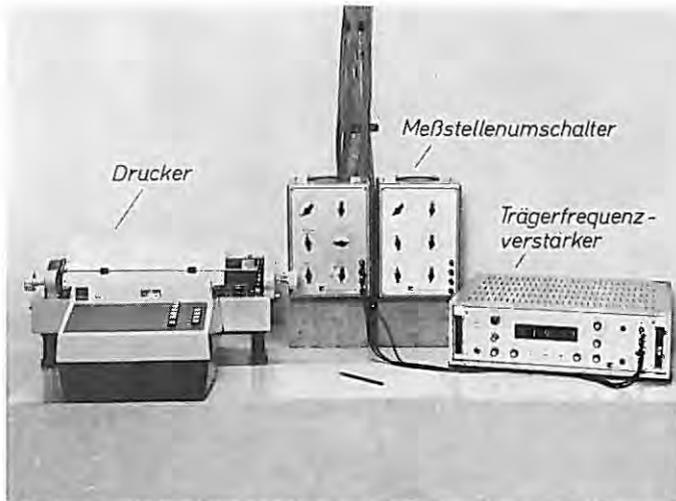


Bild 2 Meß- und Registriereinrichtung für die Langzeitverformungen (Kriechen und Schwinden) mit Dehnungsmeßstreifen

festigkeit von 36 N/mm^2 (360 kp/cm^2 , entsprechend 80% von B 450) erreicht hatte; maßgebend hierfür war die an wassergelagerten Würfeln mit 20 cm Kantenlänge ermittelte Festigkeit. Als Belastungstermin II wurde für die schnell erhärtenden Betone C und D die 3 Tage-Druckfestigkeit gewählt, was in etwa 80% der wahren 28 Tage-Festigkeit entsprach. Für die übrigen Betone wurde als Belastungstermin II ebenfalls ein Erhärtungsgrad entsprechend 80% der wahren 28 Tage-Festigkeit gewählt. Für alle Betone wurde außerdem als Belastungstermin III der Erhärtungsgrad nach 28 Tagen Wasserlagerung gewählt.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Erhärtungsverlauf und Druckfestigkeit

Der Erhärtungsverlauf der 5 Betone geht aus Bild 3 hervor; dort ist die Druckfestigkeit wassergelagerter Würfel über der Zeit bis zum Alter von 1 Jahr aufgetragen. Nach 1 Jahr war die Druckfestigkeit aller 4 Betone A bis D mit gleichem Wasserzementwert von $0,48$ praktisch gleich und betrug 65 bis 70 N/mm^2 (650 bis 700 kp/cm^2). Erwartungsgemäß wies der mit einem niedrigeren Wasserzementwert von $0,40$ hergestellte Beton eine um rd. 10 N/mm^2 (100 kp/cm^2) größere 1 Jahr-Festigkeit auf.

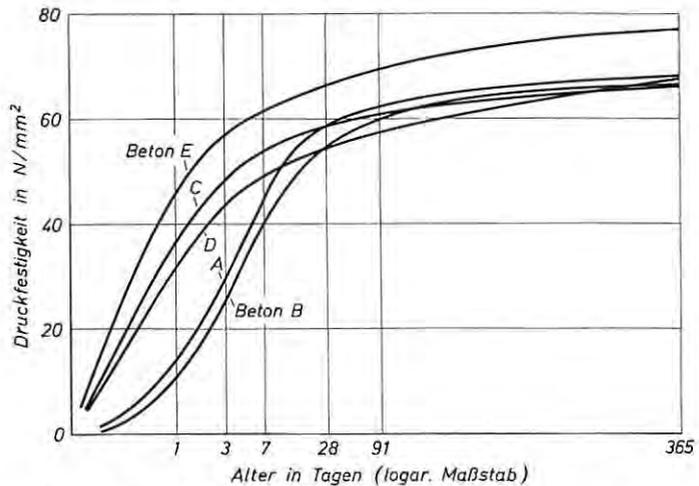


Bild 3 Erhärtungsverlauf der Betone A bis E; die 20 cm -Probewürfel lagerten bis 2 Stunden vor der Druckfestigkeitsprüfung unter Wasser von 20°C

Bei gleicher oder ähnlicher Endfestigkeit war der Erhärtungsverlauf und damit die Anfangsfestigkeit der 5 Betone sehr unterschiedlich. So lag die Druckfestigkeit nach 1 Tag zwischen etwa 10 N/mm^2 (100 kp/cm^2) für Beton B und nahezu 50 N/mm^2 (500 kp/cm^2) für Beton E. Der unterschiedliche Erhärtungsverlauf geht auch aus der Erhärtungsdauer der 5 Betone bis zum Belastungstermin I hervor (siehe Tafel 3), bei dem alle Betone eine Druckfestigkeit von

Tafel 3 Alter und Druckfestigkeit bei Beginn der Dauerbelastung (die 20 cm-Würfel lagerten bis zur Prüfung unter Wasser von 20 °C)

Beton	Eigenschaft	Belastungstermin		
		I	II	III
A	Alter Druckfestigkeit $\beta_w^*)$	109 Std. 36,0 N/mm ²	8 Tage 47,2 N/mm ²	28 Tage 58,9 N/mm ²
B	Alter Druckfestigkeit β_w	120 Std. 36,6 N/mm ²	10 Tage 44,6 N/mm ²	28 Tage 53,8 N/mm ²
C	Alter Druckfestigkeit β_w	22 Std. 36,2 N/mm ²	3 Tage 48,3 N/mm ²	28 Tage 57,4 N/mm ²
D	Alter Druckfestigkeit β_w	36 Std. 36,2 N/mm ²	3 Tage 41,3 N/mm ²	28 Tage 51,9 N/mm ²
E	Alter Druckfestigkeit β_w	12 Std. 36,7 N/mm ²	38 Std. 54,2 N/mm ²	28 Tage 64,2 N/mm ²

*) Die Druckfestigkeit wurde auf SI-Einheiten umgerechnet und dabei 10 kp/cm² = 1 N/mm² gesetzt.

36 N/mm² (360 kp/cm²) aufweisen mußten. Beton E benötigte hierzu nur 12 Stunden, Beton B hingegen 120 Stunden, also das Zehnfache der Zeit. Die erforderliche Erhärtungsdauer für den Belastungstermin II lag demgegenüber schon etwas näher beieinander; so benötigte der am schnellsten erhärtende Beton E hierzu 38 Stunden (rd. 1 1/2 Tage) und Beton B rd. 10 Tage, was einem Zeitverhältnis von etwa 1:6 entsprach. Nach 28 Tagen Erhärtungsdauer (Belastungstermin III) hatte sich die Druckfestigkeit aller Betone stark angenähert.

Den Ergebnissen in Bild 3 und Tafel 3 lagen Prüfungen an 20 cm-Würfeln zugrunde, die bis zwei Stunden vor der Prüfung in Wasser von 20 °C lagerten. Die Würfel wurden also praktisch im wassersatten Zustand geprüft, was im Vergleich zu Würfeln, die vor der Prüfung ganz oder teilweise austrocknen können, zu einer etwas niedrigeren Festigkeit führt [13]. Zur Einordnung in Betonfestigkeitsklassen muß die Festigkeit an Würfeln bestimmt werden, die 28 Tage nach DIN 1048 lagern, d. h. 7 Tage feucht und dann 21 Tage an Luft. Diese Prüfungen wurden zusätzlich an allen 5 Betonen durchgeführt. In Tafel 4 ist das Ergebnis den Festigkeiten gegenübergestellt, die im wassersatten Zustand geprüft wurden. Wie zu

Tafel 4 28 Tage-Betondruckfestigkeit nach unterschiedlicher Lagerung

Beton	28 Tage-Druckfestigkeit*) in N/mm ² nach	
	Wasserlagerung	Lagerung nach DIN 1048
A	58,9	60,6
B	53,8	55,8
C	57,4	67,7
D	51,9	61,1
E	64,2	72,5

*) Die Druckfestigkeit wurde auf SI-Einheiten umgerechnet und dabei 10 kp/cm² = 1 N/mm² gesetzt.

erwarten lag die Festigkeit der nach DIN 1048 gelagerten Würfel in allen Fällen über der der wassergelagerten Würfel. Die Abminderung der Druckfestigkeit durch die Wassersättigung war bei Betonen aus dem feingemahlten PZ 550 größer als bei den aus PZ 350 F hergestellten Betonen. Dies könnte seine Ursache darin haben, daß feingemahlene Zemente bei gleichem Wasserzementwert eine etwas höhere Zementstein-Dichtigkeit infolge feinerer Porosität liefern, was bei Druckprüfungen im wassersatten Zustand zu einem höheren Porenwasserüberdruck führt.

4.2 Elastizitätsmodul und Bruchstauchung

Die an den 5 Betonen zu den 3 Belastungsterminen ermittelten Elastizitätsmoduln und Bruchstauchungen sind in Tafel 5 zusammengestellt. Entsprechend der Dauerbelastung bei den Kriechversuchen wurde bei allen E-Modul-Prüfungen stets eine obere Druckspannung von 11 N/mm^2 (110 kp/cm^2) gewählt. Für einen Vergleich mit anderen Meßwerten oder den Angaben in Normen und Richtlinien ist ferner zu beachten, daß der E-Modul stets an praktisch wassergesättigten Zylindern ermittelt wurde, während DIN 1048 vorschreibt, daß die Prüfkörper vor der Prüfung mindestens 14 Tage in einem Raum mit einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% lagern müssen. Wassergesättigte Betonprüfkörper weisen eine niedrigere Festigkeit auf (siehe Abschnitt 4.1), sie weisen jedoch einen höheren E-Modul auf.

Die E-Moduln lagen zwischen $25\,800 \text{ N/mm}^2$ ($258\,000 \text{ kp/cm}^2$) und $39\,800 \text{ N/mm}^2$ ($398\,000 \text{ kp/cm}^2$). Erwartungsgemäß nahm der E-Modul mit zunehmender Festigkeit zu, d. h. die bei der Druckspannung von 11 N/mm^2 (110 kp/cm^2) gemessene, sofortige elastische Verformung war bei festeren Betonen kleiner. Zementsteinreiche Betone (B im Vergleich zu A und D im Vergleich zu C) weisen auch bei annähernd gleicher Festigkeit stets einen niedrigeren

Tafel 5 Elastizitätsmodul und Bruchstauchung

Beton	Eigenschaft	Belastungstermin		
		I	II	III
		$\beta_w = 36 \text{ N/mm}^2$	$\beta_w = 80\% \beta_{w28}$	$\beta_w = \beta_{w28}$
A	E-Modul ^{*)}	29200 N/mm ²	30400 N/mm ²	35700 N/mm ²
	Bruchstauchung	2200 $\mu\text{m/m}$	2150 $\mu\text{m/m}$	2350 $\mu\text{m/m}$
B	E-Modul	25800 N/mm ²	30800 N/mm ²	33500 N/mm ²
	Bruchstauchung	2200 $\mu\text{m/m}$	2150 $\mu\text{m/m}$	2350 $\mu\text{m/m}$
C	E-Modul	30300 N/mm ²	33200 N/mm ²	38200 N/mm ²
	Bruchstauchung	2300 $\mu\text{m/m}$	2550 $\mu\text{m/m}$	2450 $\mu\text{m/m}$
D	E-Modul	29200 N/mm ²	30000 N/mm ²	31300 N/mm ²
	Bruchstauchung	2100 $\mu\text{m/m}$	2200 $\mu\text{m/m}$	2400 $\mu\text{m/m}$
E	E-Modul	28200 N/mm ²	35500 N/mm ²	39800 N/mm ²
	Bruchstauchung	2300 $\mu\text{m/m}$	2300 $\mu\text{m/m}$	2400 $\mu\text{m/m}$

^{*)} Der E-Modul wurde auf SI-Einheiten umgerechnet und dabei $10 \text{ kp/cm}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$ gesetzt.

Tafel 6 Gesamtverformung $\varepsilon_{ges} \cdot 10^6$, Elastische Verformung $\varepsilon_{el} \cdot 10^6$, Schwinden $\varepsilon_S \cdot 10^6$ und Kriechen $\varepsilon_K \cdot 10^6$ bei einer Dauer-Druckbelastung von $11,0 \text{ N/mm}^2$ (110 kp/cm^2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Beton	Belastungsdauer		Belastungstermin I bei $\beta_w = 36 \text{ N/mm}^2$				Belastungstermin II bei $\beta_w = 80 \text{ ‰ } \beta_{w28}$				Belastungstermin III bei $\beta_w = \beta_{w28}$			
			ε_{ges}	ε_{el}	ε_S	ε_K	ε_{ges}	ε_{el}	ε_S	ε_K	ε_{ges}	ε_{el}	ε_S	ε_K
A	1 3 7 28 91 182	Tage	508	377	0	131	450	362	0	88	356	309	0	47
			589		29	183	526		15	149	409		0	100
			654		62	215	601		48	191	473		40	124
			914		174	363	832		172	298	663		159	195
			1161		295	489	1078		298	359	866		292	265
			1311		350	584	1222		357	503	996		351	336
	1 2 3 4 5 6	Jahre	1396		385	634	1321		394	565	1097		384	404
			1461		409	675	1389		421	606	1183		413	461
			1502		421	704	1425		435	628	1209		424	476
			1516		421	718	1444		443	639	1227		430	488
			1523		421	725	1473		450	661	1243		436	498
			1546		432	737	1478		455	661	1275		440	526
B	1 3 7 28 91 182	Tage	565	428	22	115	472	358	24	90	399	329	6	64
			721		64	229	587		61	168	462		27	106
			849		114	307	644		81	205	546		77	140
			1126		259	439	956		240	358	815		228	258
			1472		415	629	1295		381	556	1090		382	379
			1688		486	774	1513		447	708	1276		469	478
	1 2 3 4 5 6	Jahre	1816		520	868	1644		484	802	1416		498	589
			1917		548	941	1747		514	875	1505		538	638
			1983		568	987	1807		529	920	1546		557	660
			2002		563	1011	1827		527	942	1568		561	678
			2017		587	1020	1873		542	973	1576		582	665
			2048		575	1045	1882		545	979	1585		575	681

Tafel 6 (Fortsetzung)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Beton	Belastungsdauer		Belastungstermin I bei $\beta_w = 36 \text{ N/mm}^2$				Belastungstermin II bei $\beta_w = 80 \% \beta_{w28}$				Belastungstermin III bei $\beta_w = \beta_{w28}$			
			ϵ_{ges}	ϵ_{el}	ϵ_S	ϵ_K	ϵ_{ges}	ϵ_{el}	ϵ_S	ϵ_K	ϵ_{ges}	ϵ_{el}	ϵ_S	ϵ_K
C ^{*)}	Tage	1	573	366	25	182	469	332	44	93	293	288	0	5
		3	671		42	263	517		81	104	362		28	46
		7	779		86	327	659		134	193	480		93	99
		28	999		193	440	889		236	321	700		211	201
		91	1212		248	598	1102		361	409	931		331	312
		182	1318		312	640	1220		426	462	1051		392	371
	Jahre	1	1392	357	669	1309	471	506	1143	432	423			
		2	1449	380	703	1366	496	538	1205	456	461			
		3	1480	389	725	1397	506	559	1239	469	482			
		4	1491	401	724	1408	505	571	1259	474	497			
		5	1495	412	717	1418	527	559	1264	464	512			
		6	1506	424	716	1429	508	589	1275	479	508			
D	Tage	1	637	377	39	221	547	367	57	123	428	356	2	70
		3	807		92	338	658		96	195	511		40	115
		7	916		132	407	798		161	270	625		93	179
		28	1224		264	583	1107		322	418	881		234	291
		91	1509		397	735	1379		463	549	1145		378	411
		182	1697		484	836	1569		558	644	1300		456	488
	Jahre	1	1791	529	885	1689	605	717	1420	506	558			
		2	1888	571	940	1778	644	767	1516	547	613			
		3	1947	590	980	1825	662	796	1564	567	641			
		4	1969	595	997	1849	666	816	1591	576	659			
		5	1994	596	1021	1867	688	812	1619	578	685			
		6	2005	601	1027	1892	677	848	1633	593	684			
E	Tage	1	683	391	51	241	476	310	41	125	288	277	1	10
		3	806		91	324	559		82	167	355		10	68
		7	904		134	379	662		106	246	420		46	97
		28	1097		228	478	831		189	332	588		141	170
		91	1265		313	561	981		269	402	734		215	242
		182	1364		361	612	1067		325	432	817		255	285
	Jahre	1	1445	401	653	1125	360	455	861	303	281			
		2	1502	423	688	1173	385	478	917	323	312			
		3	1532	437	704	1200	400	490	939	332	330			
		4	1551	437	723	1209	403	496	954	336	341			
		5	1565	441	733	1213	403	500	973	340	356			
		6	1567	441	735	1222	414	498	974	344	353			

*) Bei Beton C sind für den Belastungstermin III die Meßwerte der Gesamtverformung um $100 \mu\text{m/m}$ vermindert worden, da verschiedene Auswertungen auf eine systematische Abweichung in dieser Größenordnung hindeuteten, deren Ursachen nachträglich nicht mehr vollständig geklärt werden konnten.

E-Modul auf als sonst gleich zusammengesetzte, zementsteinarme Betone, weil der E-Modul des Zementsteins kleiner ist als der des Zuschlags. Unabhängig von Zusammensetzung, Erhärtungsgrad und Festigkeit wurde bei allen Betonen und Belastungsterminen annähernd die gleiche Bruchstauchung festgestellt. Sie wurde bei zentrischer Belastung mit einer gleichmäßigen Belastungsgeschwindigkeit von $0,5 \text{ N/mm}^2$ je Sekunde ermittelt und lag zwischen 2150 und $2550 \mu\text{m/m}$.

4.3 Kriechen und Schwinden

Mit den Messungen der Langzeitverformungen wurde unmittelbar vor (Nullmessung) und dann kurz nach dem Beginn der Dauerbelastung begonnen. Die weiteren Messungen wurden zunächst in relativ kurzen, dann in größer werdenden Abständen und schließlich nur noch halbjährig bis zu 6 Jahren nach Belastungsbeginn fortgeführt. Gemessen wurden die Gesamtverformungen an den Prüfkörpern unter Dauerlast und die Schwindverkürzungen an unbelasteten Prüfkörpern gleicher Abmessung, die unter den gleichen Klimabedingungen lagerten.

Zieht man von den Gesamtverformungen die an parallel hergestellten Prüfkörpern bei jedem Belastungstermin gemessenen, sofort auftretenden, elastischen Verformungen und die Schwindverkürzungen ab, so erhält man die Kriechverformungen. Diese Berechnung ist für alle 5 Betone und alle 3 Belastungstermine für einen Zeitraum nach Belastungsbeginn von 1 Tag bis zu 6 Jahren durchgeführt worden; die gemessenen und die berechneten Werte sind in Tafel 6 zusammengestellt. Bei den Ergebnissen in Tafel 6 sind nur die mit Dehnungsmeßstreifen gemessenen Verformungen berücksichtigt worden, die sich in der Tendenz und Größenordnung nicht von den mit Setzdehnungsmessern bestimmten Werten unterschieden.

Bei der Auswertung in Tafel 6 wurde – wie allgemein bei Auswertungen von Kriechuntersuchungen üblich – für die gesamte Zeit der Dauerbelastung von der Gesamtverformung die gleiche elastische Verformung ϵ_{el} abgezogen, wie sie parallel zu Beginn der Belastung an wassergesättigten Probekörpern bestimmt worden war. Dies ist insofern nicht zutreffend, weil der E-Modul durch die auch nach Belastungsbeginn noch zunehmende Erhärtung und durch die Austrocknung sich erheblich verändert.

Eine Aufteilung des Kriechens in die verzögert elastische Verformung und die verzögert bleibende Verformung (Fließen) ist aus solchen Messungen nicht möglich. Nur aus der verzögerten Verformung des Rückkriechens nach Entlastung kann auf die verzögert elastische Verformung geschlossen werden, wobei wiederum unterstellt wird, daß die verzögert elastische Verformung unter Belastung praktisch der des Rückkriechens entspricht, was jedoch nicht zwingend sein muß. (Derzeit wird an allen belasteten Körpern das Rückkriechen gemessen; hierüber wird später berichtet.)

Wie zu erwarten, war das Kriechen um so größer, je geringer der Erhärtungsgrad (Belastungstermin I) und je zementsteinreicher der Beton war. Die zementsteinreichen Betone B und D wiesen auch das größte Schwinden auf.

5. Auswertung der Kriechversuche

Tafel 6 enthält alle gemessenen Kriechverformungen unter der Dauerlast von 11 N/mm² (110 kp/cm²). Die Meßwerte ermöglichen für alle 5 Betone die Darstellung der Kriechkurven von 1 Tag bis 6 Jahren Dauerlast, die zu den 3 verschiedenen Belastungsterminen aufgebracht worden war. Neben solchen Gesamtdarstellungen wurde bei der nachfolgenden Erörterung zwischen dem Anfangskriechen (bis zu einer Belastungsdauer von 28 Tagen) und dem Endkriechen (bis zu 6 Jahren Belastung) unterschieden.

Aus Tafel 6 sind wegen der besseren Übersichtlichkeit in Tafel 7 das Anfangskriechen und das Endkriechen für alle 5 Betone und für alle 3 Belastungstermine in absoluten und in prozentualen Werten einander gegenübergestellt. Bei der prozentualen Wiedergabe sind jeweils das Anfangs- und das Endkriechen beim Belastungstermin III (Beginn der Dauerlast im Erhärtungsalter von 28 Tagen) gleich 100 % gesetzt worden. Die entsprechenden Angaben bei den Belastungsterminen I und II geben daher an, um wieviel Prozent das Anfangs- und das Endkriechen bei einer früheren Belastung größer waren.

Tafel 7 Kriechverformungen $\varepsilon_K \cdot 10^6$ bei einer Druckbelastung von 11,0 N/mm² (110 kp/cm²) nach Dauerbelastung von 28 Tagen und 6 Jahren; Kriechverformung bei Belastungstermin III gleich 100 % gesetzt

Beton	Belastungstermin I bei $\beta_w = 36 \text{ N/mm}^2$				Belastungstermin II bei $\beta_w = 80 \% \beta_{w28}$				Belastungstermin III bei $\beta_w = \beta_{w28}$			
	Belastungsdauer											
	28 Tage		6 Jahre		28 Tage		6 Jahre		28 Tage		6 Jahre	
	ε_K	%	ε_K	%	ε_K	%	ε_K	%	ε_K	%	ε_K	%
A	363	186	737	140	298	153	661	126	195	100	526	100
B	439	170	1045	153	358	139	979	144	258	100	681	100
C	440	219	716	141	321	160	589	116	201	100	508	100
D	583	200	1027	150	418	144	848	124	291	100	684	100
E	478	281	735	208	332	195	498	141	170	100	353	100
Mittel		211		158		189		130		100		100

5.1 Kriechen bei frühestmöglicher Belastung

Erwartungsgemäß waren sowohl das Anfangskriechen als auch das Endkriechen beim Belastungstermin I (Belastung bei Erreichen einer Druckfestigkeit von 36 N/mm²) erheblich größer als bei einer späten Belastung nach 28 Tagen. Dabei war das Anfangskriechen im ersten Monat prozentual erheblich größer (im Mittel 211 %) als das Endkriechen (im Mittel 158 %). Das bedeutet, daß frühbelastete Betone nur in der ersten Zeit der Dauerbelastung wesentlich stärker kriechen, in höherem Alter jedoch nicht. Bezogen auf das Anfangskriechen bei später Belastung war das Anfangskriechen bei frühestmöglicher Belastung prozentual um so höher, je schneller

der jeweilige Beton die für eine Dauerbelastung erforderliche Druckfestigkeit von 36 N/mm^2 erreichte. Bei dem relativ langsam erhärtenden Beton B betrug der Zuwachs 170% , hingegen bei dem sehr schnell erhärtenden Beton E 281% .

Die absoluten Anfangskriechverformungen bei Belastungstermin I ordneten sich hingegen in einer anderen Reihenfolge. Grundsätzlich galt auch hierfür, daß das Anfangskriechen um so größer war, je schneller der Beton erhärtete. Aber zu diesem Einfluß kam der ebenfalls stark ausgeprägte Einfluß des Zementleimanteils hinzu (je zementleimreicher der Beton war, um so größer war das Kriechen). Die größte absolute Anfangskriechverformung wies daher der frühbelastete Beton D (zementleimreicher Beton aus schnell erhärtendem Zement PZ 550) mit $583 \mu\text{m/m}$ bei 28tägiger Dauerlast von 11 N/mm^2 auf.

Aus Bild 4 geht der Einfluß des Zementleimgehalts (Konsistenz) auf das Kriechen anschaulich hervor. Aufgetragen sind über der Zeit die Kriechverformungen der Betone A und B, die zum frühestmöglichen Termin (Belastungstermin I bei Erreichen einer Druckfestigkeit von 36 N/mm^2) mit 11 N/mm^2 belastet worden waren. Beide Betone unterschieden sich nur durch den Zementleimgehalt (Leime aus gleichem Zement und mit gleichem Wasserzementwert). Der steife Beton A wies einen Leimgehalt von 26 Vol.-% , der weiche Beton B demgegenüber einen solchen von 33 Vol.-% auf. Ausgehend von dem praktisch gleichen Kriechmaß nach 1 Tag wurden die Kriechverformungen des zementleimreicheren Betons B mit der Zeit zunehmend größer als die des zementleimarmen, steifen Betons A.

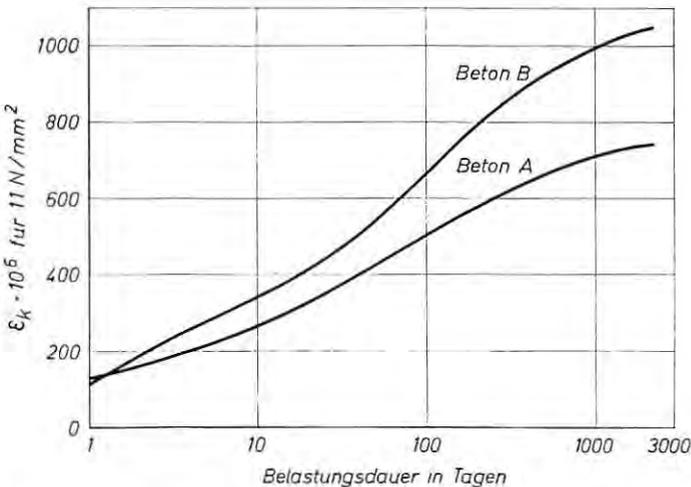


Bild 4 Einfluß des Zementleimgehalts auf das Kriechen von Beton bei Dauerbelastung von 11 N/mm^2 nach Erreichen einer Druckfestigkeit von $B_w = 36 \text{ N/mm}^2$; Beton A: Konsistenz K 1, Leimanteil 26 Vol.-% ; Beton B: Konsistenz K 3, Leimanteil 33 Vol.-%

Der Einfluß der Zementleimmenge (Konsistenz) war bei den absoluten Endkriechverformungen der möglichst früh belasteten Betone (Termin I) besonders stark ausgeprägt. So war die absolute Endkriechverformung der Betone A und C, die gleiche Zementleimmenge aufwiesen, bei frühestmöglicher Belastung mit rd. $730 \mu\text{m/m}$ bei 11 N/mm^2 Dauerbelastung praktisch gleich groß. Die beiden zementleimreicheren Betone B und D wiesen demgegenüber eine um das 1,4fache größere, absolute Endkriechverformung von rd. $1035 \mu\text{m/m}$ auf. Bei gleichem Wasserzementwert (Betone A bis D) war der Einfluß des Zementleimanteils auf das Endkriechen praktisch unabhängig vom Belastungstermin bei allen Belastungsterminen etwa gleich groß.

In Bild 5 sind die Kriechkurven der beiden Betone A und C aufgetragen, die zum Belastungstermin I (bei Erreichen einer Druckfestigkeit von 36 N/mm^2) mit 11 N/mm^2 belastet worden waren. Beide Betone unterschieden sich nur durch den Zement, und zwar war für Beton A der normal erhärtende PZ 350 F und für Beton C der sehr schnell erhärtende PZ 550 verwendet worden. Die für eine Belastung ausreichende Festigkeit erlangte Beton A nach 109 Stunden, Beton C hingegen schon nach 22 Stunden. Das Anfangskriechen des schneller erhärtenden Betons C war zunächst deutlich größer, dann etwa gleich groß (parallele Kurven) und ab 3 Monaten kleiner, so daß das Endkriechen der Betone A und C nach 6 Jahren von gleicher Größenordnung war. Zu gleichen Ergebnissen führte auch ein Vergleich der Betone B und D, wenn sie möglichst früh, d. h. zum Belastungstermin I, belastet wurden.

Beton E, dessen Wasserzementwert gegenüber Beton C vermindert war, wies bei frühestmöglicher Belastung (nur 12 Stunden) eine absolut gleiche, prozentual jedoch wesentlich höhere End-

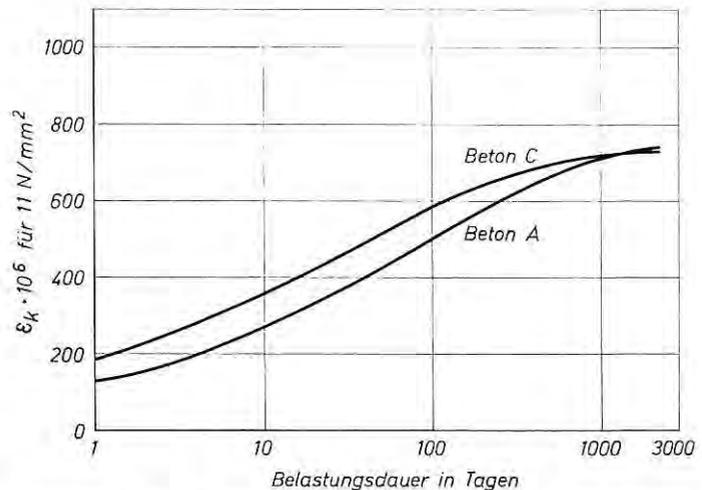


Bild 5 Einfluß der Erhärtungsgeschwindigkeit des Zements auf das Kriechen von Beton bei Dauerbelastung von 11 N/mm^2 nach Erreichen einer Druckfestigkeit von $\beta_w = 36 \text{ N/mm}^2$; Beton A: PZ 350 F; Beton C: PZ 550

Kriechverformung als Beton C auf. Die prozentual sehr hohe Kriechverformung von besonders frühhochfesten Betonen bei sehr früher Belastung ist also darauf zurückzuführen, daß diese Betone (sehr steife Konsistenz, sehr niedriger Wasserzementwert, schnell erhärtender, feingemahlener Zement) bei später Belastung eine sehr niedrige Kriechverformung aufweisen.

5.2 Kriechen bei späterer Belastung

Beim Belastungstermin II (80 % der wahren 28 Tage-Druckfestigkeit) war erwartungsgemäß der absolute und der prozentuale Anstieg der Kriechverformungen (bezogen auf die sich bei später Belastung einstellenden Verformungen) deutlich kleiner als bei frühestmöglicher Belastung. Auch hierbei war das Anfangskriechen mit im Mittel 189 % größer als das Endkriechen mit im Mittel 130 %. Bei der prozentualen Reihenfolge war das Anfangskriechen des am langsamsten erhärtenden Betons B mit 139 % wiederum am kleinsten und das des besonders schnell erhärtenden Betons E mit 195 % am größten. Das Endkriechen der bei 80 % der 28 Tage-Festigkeit belasteten Betone war mit 130 ± 14 % (bezogen auf die Belastung nach 28 Tagen) bei allen 5 Betonen prozentual von gleicher Größenordnung.

Die absoluten Endkriechverformungen von Beton, der bei 80 % der 28 Tage-Festigkeit belastet wurde, hing wiederum stark von der Betonzusammensetzung ab. Besonders ausgeprägt war wiederum der Einfluß der Konsistenz (Zementleimgehalt). Unter sonst gleichen Bedingungen waren die Endkriechverformungen der zementleimreichen Betone B und D nahezu $1\frac{1}{2}$ mal so groß wie die der zementleimarmen, steifen Betone A und C. Eine auf das Kriechen günstig wirkende Ermäßigung des Wasserzementwerts (Beton E) führte dazu, daß das Endkriechen dieses Betons bei einem Belastungstermin entsprechend 80 % der 28 Tage-Festigkeit absolut am kleinsten war.

Bei dem späten Belastungstermin III nach 28 Tagen stellten sich erwartungsgemäß die niedrigsten Kriechverformungen ein; dies gilt für das Anfangs- und das Endkriechen. Die zuvor bereits behandelten Einflüsse des Zementleimgehalts (Konsistenz) und des Wasserzementwerts treten bei den absoluten Verformungen klar hervor. Beton E wies aufgrund des niedrigen Wasserzementwerts die niedrigste absolute Kriechverformung auf. Unter sonst gleichen Bedingungen war ein Einfluß der Erhärtungsgeschwindigkeit des Zements (langsam erhärtender PZ 350 und schnell erhärtender PZ 550 mit annähernd gleicher Endfestigkeit) nicht feststellbar, denn bei später Belastung waren die Anfangs- und die Endkriechverformungen der sonst gleichen Betone A und C sowie B und D von jeweils gleicher Größenordnung.

6. Schwinduntersuchungen

Schwinduntersuchungen waren nicht das eigentliche Ziel dieses Vorhabens, sie waren jedoch bei den Untersuchungen des Kriechens notwendig. Gemessen wurde das Schwinden nur auf der Oberfläche, was je nach Prüfkörpergestalt und -abmessung zu

größeren Werten führt als ein axiales Messen. Die Meßwerte sind in Tafel 6 enthalten.

Die auf der Oberfläche gemessenen Schwindwerte waren insgesamt relativ groß; vielleicht hat hierzu auch eine Carbonatisierung der oberflächennahen Schicht beigetragen, da der CO_2 -Gehalt von Klimaräumen, die wie im vorliegenden Fall im Keller liegen, deutlich höher als normal ist.

Erwartungsgemäß war das Schwinden der zementleimreichen, weichen Betone B und D größer als das der sonst gleichen, steifen Betone A und C; allerdings war der Einfluß der Konsistenz nicht so groß, wie dies in den Vorschriften und Richtlinien unterstellt ist. Bei sonst gleichen Betonen war das Schwinden nur geringfügig größer, wenn statt des normal gemahlten PZ 350 F der sehr fein gemahlene PZ 550 verwendet wurde, was erneut bestätigt, daß der Einfluß der Mahlfineinheit auf das Schwinden gewöhnlich überschätzt wird. Etwas überraschend war die Feststellung, daß unabhängig von der Dauer der anfänglichen Wasserlagerung für den jeweiligen Beton Schwindmaße gleicher Größenordnung gefunden wurden. Dabei ist allerdings zu beachten, daß mit den Schwindmessungen immer erst dann begonnen wurde, wenn der Beton bereits eine relativ hohe Druckfestigkeit von 36 N/mm^2 aufwies (Belastungstermin I); das war jedoch bei Beton C und bei Beton E schon nach weniger als einem Tag der Fall.

7. Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Kriechverformungen

Derzeit gibt es in den deutschen Vorschriften zwei Berechnungsverfahren für die Ermittlung von Kriechverformungen, nämlich jenes in DIN 1045 (Ausgabe Januar 1972), Abschnitt 16.4, und jenes in den Spannbeton-Richtlinien (Fassung Juni 1973), Abschnitt 8. In beiden Vorschriften wird die durch das Kriechen verursachte, zeitabhängige Verformungszunahme unter andauernden Spannungen mit der Gleichung

$$\varepsilon_{K, t} = \frac{\sigma}{E_b} \cdot \varphi_t$$

beschrieben. Die Unterschiede in den beiden Vorschriften bestehen nur in der Ermittlung der Kriechzahl φ_t , bei der die verschiedenen Einflüsse auf das Kriechen unterschiedliche Berücksichtigung finden, so u. a. die Konsistenz des Betons, die Reaktionsgeschwindigkeit des Zements, Dicke und Lage des Bauteils sowie Alter zum Zeitpunkt der Belastung und Belastungsdauer. Nach [5] stellen die Festlegungen in der etwas älteren DIN 1045 eine vergrößerte Wiedergabe dieser Parameter dar. Für die Festlegungen in den Spannbeton-Richtlinien wurden die Parameter durch Regressionen an umfangreiche Versuchsergebnisse angepaßt; dabei erfolgte eine weitergehende Aufteilung als in DIN 1045, was Vorteile bei der Anpassung hat, jedoch auch eine etwas aufwendigere Berechnung zur Folge hat (siehe dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 1 dieser Veröffentlichung).

Für den Vergleich zwischen den gemessenen und den berechneten Kriechverformungen wurde nur das Endkriechen nach 6jähriger

Dauer-Druckbelastung von 11 N/mm^2 (110 kp/cm^2) herangezogen. Hierzu wurden für alle 5 Betone A bis E und für alle drei Belastungstermine die nach 6 Jahren zu erwartenden Kriechverformungen sowohl nach DIN 1045 als auch nach den Spannbeton-Richtlinien berechnet. Da die Kriechversuche bei einer konstanten relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % durchgeführt wurden, die Tafeln in den Vorschriften jedoch nur Angaben für 40 und 70 % enthalten, wurde für die Ermittlung von φ_0 geradlinig interpoliert. Entsprechend den Vorschriften wurden bei der Berechnung die in den Vorschriften den verschiedenen Betonfestigkeitsklassen zugeordneten Elastizitätsmoduln eingesetzt (und nicht die gemessenen E-Moduln); dabei wurden die Betone A bis D der Betonfestigkeitsklasse Bn 450 und Beton E der Betonfestigkeitsklasse Bn 550 zugeordnet. Eine zusätzliche Berechnung mit den gemessenen E-Moduln führte zu größeren Abweichungen (siehe hierzu auch die diesbezüglichen Ausführungen in Abschnitt 1 dieser Veröffentlichung).

Die gemessenen und die berechneten Verformungen sind in Tafel 8 gegenübergestellt. Die bei den drei Belastungsterminen gemessenen Kriechverformungen sind jeweils 100 % gesetzt worden (Prozentangaben in Klammern hinter den absoluten Werten). Im Mittel über alle 5 Betone stimmten die nach den Spannbeton-Richtlinien berechneten Kriechverformungen besser mit den gemessenen Verformungen überein als die nach DIN 1045 berechneten Verformungen. In Dreiviertel aller Fälle lieferte die Berechnung größere Verformungen als die Messung, und zwar in einigen Fällen mehr als 50 % zu große Verformungen. Demgegenüber lieferte nur eine Berechnung nach DIN 1045 einen um 11 % zu kleinen Wert, in allen anderen Fällen lieferte die Berechnung praktisch gleiche oder zu große Verformungen.

Für den späten Belastungstermin III (Belastung nach 28 Tagen) ergab sich eine befriedigende Übereinstimmung der gemessenen Verformungen sowohl mit den nach DIN 1045 als auch mit den nach den Spannbeton-Richtlinien berechneten Verformungen. Das mag daran liegen, daß für diesen Belastungsfall weltweit die mit Abstand größten Versuchserfahrungen vorliegen, so daß damit in beiden Vorschriften eine befriedigende Anpassung der Parameter an die Versuchsergebnisse möglich war.

Für eine frühestmögliche Belastung (Belastungstermin I) lieferten die Spannbeton-Richtlinien ebenfalls eine befriedigende Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Kriechverformungen. Demgegenüber errechneten sich nach DIN 1045 um rd. 50 % zu große Verformungen. Ähnliche Verhältnisse ergaben sich bei einer Belastung bei 80 % der 28 Tage-Betonfestigkeit (Belastungstermin II). Durch ihre bessere Anpassung der Parameter erfassen die Spannbeton-Richtlinien die Vorgänge bei einer sehr frühen Belastung deutlich zutreffender als die DIN 1045.

Betrachtet man die 5 Betone jeweils für sich (Mittel über alle 3 Belastungstermine), so ist festzustellen, daß die Berechnung nach den Spannbeton-Richtlinien für die Betone A und B praktisch die gleichen Verformungen lieferte wie die Messung, während bei den Betonen C bis E meist um 10 bis 20 % zu große Verformungen errechnet wurden. Für die Betone A und B wurde normal erhärtender PZ 350 F verwendet, für den sehr viele Versuchsergebnisse vorlie-

Tafel 8 Kriechverformungen $\varepsilon_K \cdot 10^6$ bei einer 6jährigen Dauer-Druckbelastung von 11,0 N/mm² (110 kp/cm²); Werte gemessen (100 %) und nach den Vorschriften berechnet

Beton	Belastungstermin I bei $\beta_w = 36$ N/mm ²			Belastungstermin II bei $\beta_w = 80 \% \beta_{w28}$			Belastungstermin III bei $\beta_w = \beta_{w28}$		
	gemessen	berechnet nach DIN 1045	berechnet nach Spannbeton- Richtlinien	gemessen	berechnet nach DIN 1045	berechnet nach Spannbeton- Richtlinien	gemessen	berechnet nach DIN 1045	berechnet nach Spannbeton- Richtlinien
A	737 (100)	999 (136)	703 (95)	661 (100)	883 (134)	661 (100)	526 (100)	644 (122)	515 (98)
B	1045 (100)	1467 (140)	1076 (103)	979 (100)	1264 (129)	964 (98)	681 (100)	965 (142)	779 (114)
C	716 (100)	1096 (153)	806 (113)	589 (100)	902 (153)	709 (120)	508 (100)	451 (89)	467 (92)
D	1027 (100)	1563 (152)	1205 (117)	848 (100)	1351 (159)	1101 (130)	684 (100)	676 (99)	698 (102)
E	735 (100)	1132 (154)	821 (112)	493 (100)	979 (197)	710 (143)	353 (100)	428 (121)	444 (126)
Mittel	(100)	(147)	(108)	(100)	(154)	(118)	(100)	(115)	(106)

gen, was bei dem sehr schnell erhärtenden PZ 550 nicht in dem Maße der Fall ist. Zwar reichen die wenigen Versuchswerte der Tafel 8 zu einer abschließenden Beurteilung nicht aus, jedoch hat es den Anschein, daß in den Spannbeton-Richtlinien der Beiwert k_z , mit dem die Erhärtungsgeschwindigkeit des Zements berücksichtigt wird, nicht ganz zutreffend angepaßt worden ist.

Wie die Versuche gezeigt haben, ist das Anfangskriechen von frühbelasteten Betonen mit hoher Anfangsfestigkeit größer als das von normal erhärtendem Beton, das Endkriechen hingegen nicht. Bezogen auf das Endkriechen liefern Berechnungen nach den Spannbeton-Richtlinien für sehr früh belastete Betone mit hoher Anfangsfestigkeit zwar etwas überhöhte Kriechverformungen; das größere Anfangskriechen dürfte damit jedoch zutreffend erfaßt sein.

Die Möglichkeiten, die von zahlreichen Einflußgrößen abhängenden Kriechverformungen rechnerisch zutreffend zu erfassen, werden vielfach überschätzt, wozu vermutlich die verwirrende Berechnung mit den vielen, nicht vollends überschaubaren Parametern verleitet. Andererseits ist der Einfluß des Kriechens auf das Tragverhalten und die Wirtschaftlichkeit von Spannbetonbauten nicht übermäßig groß, so daß auch eine weniger genaue Erfassung der Kriechverformungen für die Praxis ausreichend ist. Unter diesen Gesichtspunkten kann man die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den nach den Spannbeton-Richtlinien berechneten Kriechverformungen als recht gut beurteilen, so daß sich anhand dieser Versuchsergebnisse keine Notwendigkeit ergibt, die Festlegungen über das Kriechen in den Spannbeton-Richtlinien erneut zu modifizieren.

8. Langzeit-Verformungsmessungen

Für Langzeit-Verformungsmessungen an Beton wurden bislang überwiegend mechanische Geräte, wie z. B. Setzdehnungsmesser, verwendet. Hierbei wird die Längenänderung einer durch Meßmarken fixierten Strecke mit der Meßuhr des Setzdehnungsmessers gemessen, der dazu für jede Messung manuell neu angesetzt wird. Besonders bei vertikaler Anordnung der Meßstellen, wie in Bild 6, ist es schwierig, stets einen annähernd gleichen Anpreßdruck aufzubringen, was häufig zu größeren Streuungen führt, vergleiche auch [14].

In jüngerer Zeit geht man bei Messungen von Kurzzeit-Verformungen immer mehr dazu über, die Formänderungen elektronisch, z. B. mit induktiven Gebern oder mit Dehnungsmeßstreifen, aufzunehmen, vergleiche auch [15]. Dehnungsmeßstreifen werden auf die Betonoberfläche aufgeklebt; die eigentliche Messung erfolgt über die Widerstandsänderung eines in den Streifen eingebetteten, feinen Drahts infolge seiner Dehnung oder Stauchung (Änderung von Querschnitt und Länge des Meßdrahts). Gegen die Verwendung von Dehnungsmeßstreifen für Langzeit-Verformungsmessungen bestanden bislang erhebliche Bedenken hinsichtlich der Langzeit-Maßhaltigkeit der Meßmittel. Befürchtet wurden sowohl ein Kriechen des gespannten Drahts in der Trägerfolie aus Kunststoff

Bild 6
Messen der Kriech-
verformungen
mit Setzdehnungs-
messern (Meßlänge
40 cm) Bauart
München



als auch ein Kriechen des gesamten Streifens durch ein Nachgeben des Klebers.

Da die Dehnungsmeßstreifentechnik hinsichtlich des Arbeitsaufwands beim Messen und Registrieren erhebliche Vorteile bietet, sollte durch parallele Langzeitmessungen mit Setzdehnungsmessern und Dehnungsmeßstreifen geklärt werden, ob die zuvor erwähnten Befürchtungen gerechtfertigt sind oder ob die heutige Technik zuverlässige Langzeit-Verformungsmessungen auch mit Dehnungsmeßstreifen gestattet.

In Bild 7 sind für drei Betone mit kleinem, mittlerem und großem Kriechen die mit Setzdehnungsmessern und mit Dehnungsmeßstreifen gemessenen Gesamtverformungen unter einer Dauerlast von 11 N/mm^2 (110 kp/cm^2) über der Zeit aufgetragen; die Dauerlast wurde im Alter von 28 Tagen (Belastungstermin III) aufgebracht.

Bei den Betonen B und E lieferten die Dehnungsmeßstreifen ab einer längeren Belastungsdauer systematisch etwas kleinere Werte als die Setzdehnungsmesser. Das deutet auf ein geringfügiges Kriechen der Dehnungsmeßstreifen bzw. des Klebers hin. Die Abweichung ist aber selbst für eine Belastungsdauer von 6 Jahren sehr klein (unter 5%), so daß sie im Vergleich zu den übrigen Einflüssen auf die Genauigkeit des Meßergebnisses und bei Würdigung der Vorteile der Dehnungsmeßstreifentechnik gegenüber anderen Verfahren ohne weiteres hingenommen werden kann.

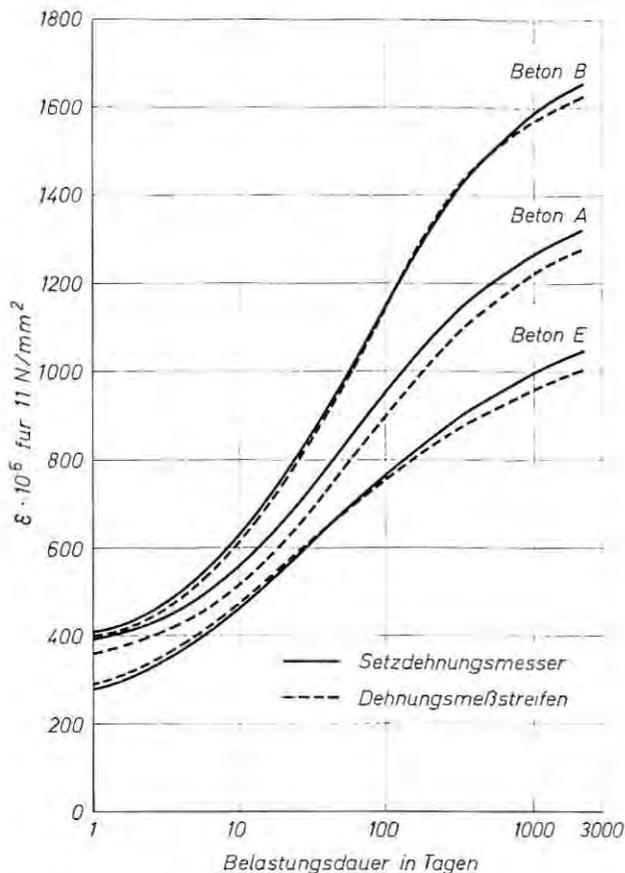


Bild 7 Vergleich von Meßergebnissen ϵ_{ges} , gemessen elektronisch über Dehnungsmeßstreifen und mechanisch mit Setzdehnmessern (Mittelwerte aus jeweils 4 Einzelwerten)

Bei Beton A wurde von Anbeginn an eine vergleichsweise zu geringe Gesamtverformung gemessen; diese Abweichung war von gleicher Größenordnung wie die infolge Kriechens. Bei anderen Meßreihen wurden ähnliche systematische Abweichungen gleicher Größenordnung – stets gleiche oder geringere Gesamtverformungen – festgestellt. Diese systematischen Abweichungen werden anscheinend durch die Vorbereitungen für das Kleben der Streifen verursacht. Hierzu wird nach Entnahme des Prüfkörpers aus der Wasserlagerung die Betonoberfläche im Bereich der Klebestelle mit einem Warmluftstrahl vorsichtig getrocknet. Dann wird der Streifen aufgeklebt; anschließend nimmt der Beton im Bereich der Klebestelle wieder Feuchtigkeit aus dem Betoninnern auf. Trocknen und Durchfeuchten sind mit Schwind- und Quellvorgängen so-

wie mit Temperaturänderungen verbunden, die dann zu Abweichungen bei der Nullmessung führen können.

Insgesamt wurden bei diesen Langzeituntersuchungen über 6 Jahre mit Dehnungsmeßstreifen im Vergleich zu Setzdehnungsmessern gleiche oder kleinere Verformungen gemessen. Die Abweichungen sind so gering, daß sie das Gesamtergebnis nicht übermäßig beeinflussen. Im Hinblick auf die Vorteile der Dehnungsmeßstreifentechnik scheint es den Verfassern durchaus vertretbar, solche Langzeituntersuchungen an Beton mit Dehnungsmeßstreifen durchzuführen.

9. Zusammenfassung

Von 5 Betonen etwa gleicher Endfestigkeit mit normaler und besonders hoher Anfangsfestigkeit wurden die Kriechverformungen unter 6jähriger Dauerbelastung von 11 N/mm^2 ermittelt. Die schnelle Erhärtung und die hohe Anfangsfestigkeit wurden durch beton-technologische Maßnahmen erreicht (sehr schnell erhärtender Zement, sehr steife Konsistenz, verminderter Wasserzementwert). Die Dauerbelastung wurde zum frühestmöglichen Zeitpunkt (Erreichen einer Druckfestigkeit von 36 N/mm^2), ferner an parallel hergestellten Probekörpern bei 80 % der wahren 28 Tage-Druckfestigkeit und im Alter von 28 Tagen aufgebracht. Die Versuche gestatten folgende Feststellungen:

9.1 Früh belastete Betone mit hoher Anfangsfestigkeit kriechen anfänglich stärker als Betone, die eine gleiche Festigkeit zum Belastungsbeginn erst später erreichen, also langsamer erhärten.

9.2 Früh belastete Betone mit hoher Anfangsfestigkeit kriechen mit zunehmender Belastungsdauer gleich schnell und bei langer Belastungsdauer dann sogar weniger schnell als langsam erhärtende Betone, mit deren Dauerbelastung erst später begonnen werden konnte.

9.3 Betone gleicher Endfestigkeit und mit gleichem Zementleimanteil liefern daher etwa gleich große Endkriechverformungen, wenn die Belastung bei jeweils gleichem Erhärtungsgrad aufgebracht wird. Die absoluten Endkriechverformungen sind dabei um so größer, je niedriger der Erhärtungsgrad (Festigkeit) und je höher der Zementleimanteil ist.

9.4 Die gemessenen Kriechverformungen stimmten mit den nach den Spannbeton-Richtlinien berechneten Verformungen insgesamt gut überein. Demgegenüber ergaben Berechnungen nach DIN 1045 für frühbelastete Betone etwa um 50 % zu große Kriechverformungen.

9.5 Parallelmessungen der 6 Jahre dauernden Kriechverformungen mit Setzdehnungsmessern und mit Dehnungsmeßstreifen lieferten nahe beieinander liegende Ergebnisse. Meist waren die mit Dehnungsmeßstreifen gemessenen Verformungen etwas kleiner, jedoch waren die Abweichungen so gering, daß die Dehnungsmeßstreifentechnik auch für Langzeituntersuchungen an Beton geeignet erscheint.

SCHRIFTTUM

- [1] Wagner, O.: Das Kriechen unbewehrten Betons. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 131, Berlin 1958.
- [2] Rüsçh, H., K. Kordina und H. K. Hilsdorf: Der Einfluß des mineralogischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen von Beton. — Hummel, A., K. Wesche und W. Brand: Der Einfluß der Zementart, des Wasser-Zement-Verhältnisses und des Belastungsalters auf das Kriechen von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 146, Berlin 1962.
- [3] Rüsçh, H., R. Sell, Ch. Rasch, E. Grasser, A. Hummel, K. Wesche und H. Flatten: Festigkeit und Verformung von unbewehrtem Beton unter konstanter Dauerlast. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 198, Berlin 1968.
- [4] Trost, H.: Spannungs-Dehnungs-Gesetz eines viskoelastischen Festkörpers wie Beton und Folgerungen für Stabtragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton. beton 16 (1966) H. 6, S. 233/248.
- [5] Rüsçh, H., D. Jungwirth und H. Hilsdorf: Kritische Sichtung der Verfahren zur Berücksichtigung der Einflüsse von Kriechen und Schwinden auf das Verhalten der Tragwerke. Beton- und Stahlbetonbau 68 (1973) H. 3, S. 49/60, H. 4, S. 76/86, und H. 6, S. 152/158.
- [6] Rüsçh, H., und D. Jungwirth: Stahlbeton — Spannbeton. Band 2: Berücksichtigung der Einflüsse von Kriechen und Schwinden auf das Verhalten der Tragwerke. Werner-Verlag, Düsseldorf 1976.
- [7] Wesche, K., W. vom Berg und I. Schrage: Kriechen von Beton — Einfluß des Belastungsalters. beton 27 (1977) H. 1, S. 27/30; ebenso Betontechnische Berichte 1977, Beton-Verlag, Düsseldorf 1978, S. 17/27.
- [8] Wittmann, F., und M. Setzer: Vergleich einiger Kriechfunktionen mit Versuchsergebnissen. Cement and Concrete Research 1 (1971) No. 6, S. 679/690.
- [9] Pfefferle, R.: Zur Theorie des Betonkriechens. Dissertation TU Karlsruhe, 1971.
- [10] DIN 1045. Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung. Ausgabe Januar 1972.
- [11] Richtlinien für Bemessung und Ausführung von Spannbetonbauteilen. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Berlin 1973.
- [12] Système international de réglementation technique unifiée des structures. Vol. II — Code de référence (model code) pour les structures en béton. Entwurf Oktober 1975. Nebst Document complémentaire. CEB Bulletin d'information No. 111 und 114.
- [13] Dahms, J.: Einfluß der Eigenfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit des Betons. beton 18 (1968) H. 9, S. 361/365; ebenso Betontechnische Berichte 1968, Beton-Verlag, Düsseldorf 1969, S. 113/126.
- [14] Zelger, C.: Versuch zur Weiterentwicklung eines Setzdehnungsmessers. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 253, Berlin 1975.
- [15] DIN 1048. Prüfverfahren für Beton. Blatt 3: Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls. Ausgabe Januar 1975.