

Über das Schwinden und Kriechen von Leichtbeton bei unterschiedlicher Korneigenfeuchtigkeit

Von F. S. Rostásy, K.-Th. Teichen und W. Alda, Stuttgart

1. Einleitung

Die Ursachen des Schwindens und Kriechens von Beton sind in der Struktur des Zementsteins oder genauer in dessen Porosität zu suchen. Diese hängt bei einem bestimmten Hydratationsgrad vom wirksamen Wasserzementwert ab. Da die natürlichen Zuschläge des Normalbetons als dicht im Sinne von nichtsaugend angenommen werden können, ergibt sich der wirksame Wasserzementwert unmittelbar aus dem Anmachwasser einschließlich der Eigenfeuchte der Zuschläge.

Nicht ganz so einfach liegen die Verhältnisse beim Leichtbeton. Die künstlichen Leichtzuschläge können wegen ihrer großen Porosität von $p_k = 40$ bis 75 % [1] beachtliche Mengen Wasser aufsaugen und im Inneren speichern. Daher hängt der wirksame Wasserzementwert vom Saugvermögen der Zuschläge ab, durch das ein Teil des Zugabewassers während des Mischens, Verarbeitens und Erstarrens in das Korn wandert. Die Menge des aufgesaugten Wassers hängt von der Art, der Außenhaut und vor allem von der Ausgangsfeuchte des Zuschlags ab. Letztere kann in weitem Bereich schwanken: von ofentrocken bis teilgesättigt, denn eine vollständige Füllung der Poren war auch nach 30tägiger Unterwasserlagerung noch nicht erreicht.

Will man einen Leichtbeton gleichbleibender Festigkeit bei veränderlicher Korneigenfeuchte herstellen, so ist der wirksame Wasserzementwert gleichzuhalten. Dabei wird aber, je nach Eigenfeuchte des Leichtzuschlages, die Gesamtwassermenge (DIN 1045, Abschnitt 2.1.3.4) schwanken. Es erhebt sich die Frage, wie sich dieser Umstand auf das Schwinden und Kriechen auswirken wird. Wird nur der zeitliche Verlauf oder auch die Größe beeinflusst?

Zur Klärung dieser Fragen gab der Verein Deutscher Zementwerke dem Otto-Graf-Institut Versuche in Auftrag.

Mit den drei Leichtzuschlagarten Berwillit, Norlit und Liapor – zwei Blähschiefer und ein Blähton – wurden Schwind- und Kriechversuche mit 2 Belastungsaltern $t_0 = 7$ und 28 d und 2 möglichst extrem auseinanderliegenden Korneigenfeuchten der Leichtzuschläge durchgeführt. Die Versuche sind nach rd. 1500 d Beobachtungsdauer abgeschlossen worden [2]. Aus einer anderen Forschungsarbeit lagen Ergebnisse für ein hohes Belastungsalter, $t_0 \approx 210$ d, vor. Sie konnten hier mit verwertet werden.

Dem Verein Deutscher Zementwerke sei für die finanzielle Förderung und den Herren Prof. Dr.-Ing. G. Wischers und Prof. Dr.-Ing. J. Bonzel für die Beratung verbindlichst gedankt.

2. Versuche

2.1. Versuchsprogramm

Mit den gewählten drei Leichtzuschlägen wurden bei den beiden Ausgangsfeuchten „trocken“ (t) und „naß“ (n) insgesamt 6 Betone entworfen. Sie enthielten alle die gleiche viskoelastische Masse: 350 kg PZ 375 und 175 l wirksames Wasser. Die „trockenen“ Zuschläge wurden mit einer Kernfeuchte verarbeitet, die sich nach 30 min Wasserlagerung einstellte [3]. Die nassen Zuschläge waren vor dem Betonieren 30 Tage unter Wasser vorgelagert worden.

Die Leichtzuschläge wiesen, bezogen auf den Stoffraum des Zuschlaggemisches, folgende Anteile in Stoffraum-Prozenten auf:

- 15 % Natursand 0/3 mm,
- 28 % Leichtsand 0/3 mm,
- 17 % Leichtzuschlag 3/7 bzw. 4/8 mm,
- 40 % Leichtzuschlag 7/20 mm.

Der Versuchsumfang wird in Tafel 1 dargestellt. Tafel 2 zeigt die Zusammensetzung der Betone.

Die Versuchskörper zur Messung des Gewichtsverlustes, des Schwindens und Kriechens sowie des E-Moduls waren Hohlzylinder (HZ) $d_o = 20$ cm; $d_i = 3,5$ cm und $h = 73$ cm für die Alter bei

Tafel 1 Versuchsprogramm (schematisch)

(W = Würfel 20 cm; HZ = Hohlzylinder ϕ 20/3,5, $h = 73$ cm; VZ = Vollzylinder ϕ 20, $h = 130$ cm; Z = Zylinder ϕ 10, $h = 40$ cm)

Betongart	Zuschlagart	Feuchtigkeitsgehalt der Zuschläge	Druckfestigkeits-Entwicklung	Anzahl und Form der Prüfkörper					Schwinden
				E-Modul und Zylinderdruckfestigkeit	Dauerstandversuch			Belastungsalter in d	
					7	28	≈ 210		
N_t N_n	Norlit (Blähschiefer)	trocken	W	6 HZ + 2 Z	2 HZ	2 HZ	2 VZ	2 HZ	
		naß	W	6 HZ + 2 Z	2 HZ	2 HZ	2 VZ	2 HZ	
B_t B_n	Berwilit (Blähschiefer)	trocken	W	6 HZ + 2 Z	2 HZ	2 HZ	2 VZ	2 HZ	
		naß	W	6 HZ + 2 Z	2 HZ	2 HZ	2 VZ	2 HZ	
L_t L_n	Liapor (Blähon)	trocken	W	6 HZ + 2 Z	2 HZ	2 HZ	2 VZ	2 HZ	
		naß	W	6 HZ + 2 Z	2 HZ	2 HZ	2 VZ	2 HZ	

Tafel 2 Zusammensetzung der Leichtbetone

Bezeichnung des Betons	Leichtzuschlag		Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches					Zusammensetzung des Betons (1 m ³)								
	Bezeichnung	Zustand ¹⁾	Anteile (Vol.-%) bis				Körnungsziffer	Zement	Wasser für			Natursand	Leichtzuschläge (trocken)			
			0,2 mm Maschenweite	1 mm Lochdurchmesser	3 mm Lochdurchmesser	7 mm Lochdurchmesser			15 mm Lochdurchmesser	Anmachen W _{zNo} l	Aufsaugen W _{ko} l		W _{ko} % ²⁾	0/3 kg	0,2/3 kg	3/7 kg
N _l	Norlit (Blähschiefer)	trocken	1	19	44	59	93	2,84	350	175	55	7	267	288	165	336
N _n		naß			45	62	94	2,79			179	23				
B _l	Berwilil (Blähschiefer)	trocken	3	23	44	60	88	2,82	350	175	48	6	270	300	165	285
B _n		naß			130	17	270				300	165				
L _l	Liapor (Blähton)	trocken	6	21	42	58	92	2,81	350	175	103	13	267	250	154	355
L _n		naß			234	31	267				250	154				

¹⁾ trocken = getrocknet + 30 min Wasserlagerung; naß = nach mindestens 30tägiger Wasserlagerung

²⁾ in % des Gewichts der Leichtzuschläge

Belastung von $t_0 = 7 \text{ d}$ und 28 d . Für das hohe Belastungsalter von 210 d wurden Vollzylinder (VZ) von $\phi 20 \text{ cm}$ und $h = 130 \text{ cm}$ gewählt.

Die Würfeldruckfestigkeit wurde an 20-cm -Würfeln (W) bestimmt.

2.2. Versuchseinrichtung

Bild 1 zeigt den Kriechprüfstand. Die Hohlzylinder HZ wurden durch eine im Zentralloch angeordnete Spannstange vorgespannt. Am unteren Ende der Spannstange war ein Paket von 10 Teller-

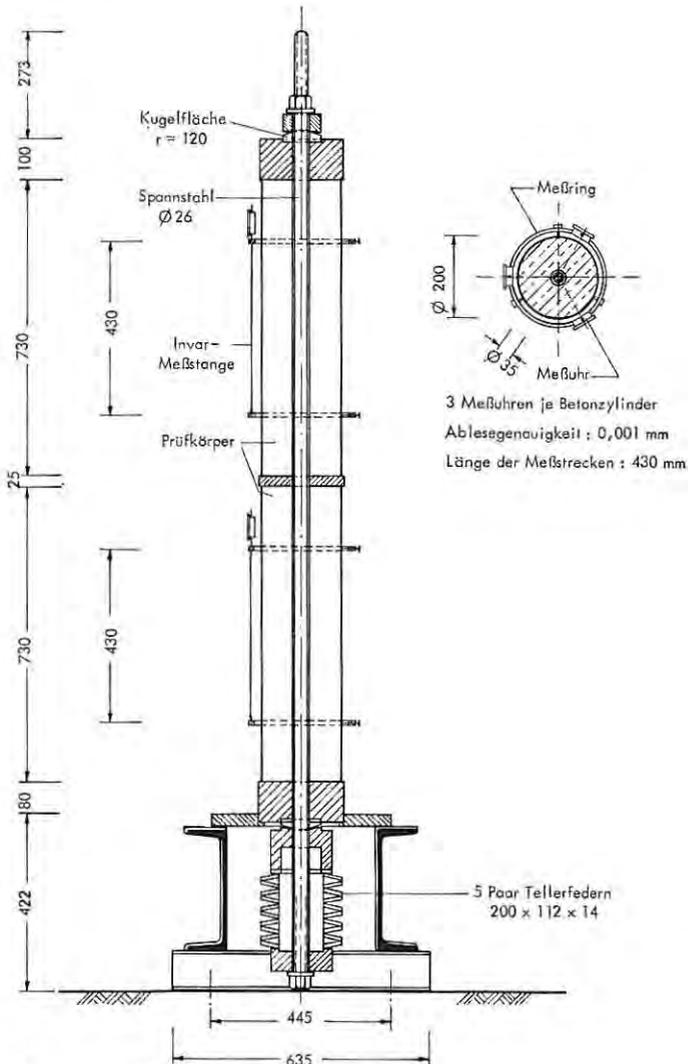


Bild 1 Vorrichtung für Dauerstandversuche

federn eingebaut, die durch ihren großen Federweg die im Betonkörper innerhalb eines Regelintervalles auftretenden Kriechdehnungen ohne nennenswerten Abfall an Vorspannkraft abfangen konnten. Die Prüfkraft wurde am oberen Ende mit einer hydraulischen Presse eingetragen und durch ein Feinmanometer gemessen. Die Vorspannkraft mußte von Zeit zu Zeit auf ihren Ausgangswert angehoben werden. Zu Beginn des Kriechversuches waren diese Korrekturen öfters nötig. Der Spannkraftabfall während eines Intervalles war i. M. nur rd. 1 ‰.

Die Anordnung der Meßbuhren mit 0,001 mm Teilung zeigt ebenfalls Bild 1. Sorgfältiger Einbau sowie Kugelgelenke an den Druckplatten sicherten die miltige Einleitung der Längsdruckkraft. Die Abweichung der Randdehnung bezogen auf die axiale Dehnung betrug i. M. über alle Kriechkörper rd. 6,5 ‰. Die Schwindkörper wurden auf einem ähnlichen Untersatz aufgebaut wie die Kriechkörper. Hinsichtlich der Austrocknung der Hohlzylinder wurde festgestellt, daß sie wie bei einem Vollzylinder verläuft [4].

2.3. Baustoffe

2.3.1. Bestandteile des Betons

Der verwendete Zement PZ 375 wies im Alter von rd. 28 d folgende Festigkeitswerte auf: $\beta_w = 598 \text{ kp/cm}^2$; $\beta_{BZ} = 95 \text{ kp/cm}^2$.

Tafel 3 enthält die wichtigsten Eigenschaften der Leichtzuschläge, wobei aber zur besseren Abstimmung der Gemische die Körner > 20 mm abgeseibt wurden.

Tafel 3 Eigenschaften der Leichtzuschläge

Leichtzuschlag	Korngruppe mm	Kornrohddichte (ofentrocken) $\rho_{rk} \text{ tr}$ kg/ dm ³	Wasseraufnahme in Gew.-% nach								Druckertrüm- merungsgrad Z	Kornpositivität i. M. p ¹⁾ %
			0,25 h	0,50 h	1 h	6 h	24 h	7 d	28 d			
Bläh- schiefer Norlit	0/ 3	1,56	7,0	8,6	9,9	—	13,9	14,9	—	0,336	49	
	3/ 7	1,37	7,0	7,7	7,5	8,7	10,7	15,1	20,2			
	7/15	1,23	6,2	7,3	7,9	9,1	11,2	15,7	21,3			
	15/25	1,14	5,5	6,6	7,0	8,7	10,9	15,8	21,0			
Bläh- schiefer Berwilit	0/ 3	1,55	5,6	5,9	6,3	—	8,5	8,7	9,5	0,503	54	
	3/ 7	1,34	6,1	6,3	6,6	7,6	8,7	11,6	15,3			
	7/15	1,03	5,0	5,8	6,0	7,3	8,9	12,4	16,1			
	15/25	1,01	5,1	5,8	6,0	7,3	9,1	12,9	17,1			
Bläh- ton Liapor	0/ 4	1,32	16,1	16,9	18,1	—	22,4	26,0	—	0,175	50	
	4/ 8	1,34	9,6	10,9	11,7	14,2	17,1	23,5	28,0			
	8/16	1,31	8,7	10,9	12,0	15,1	18,5	24,0	30,4			

¹⁾ gerechnet nach Lit.-Angaben

2.3.2. Herstellung der Betone und Prüfkörper

Tafel 2 zeigt die Zusammensetzung und Tafel 4 die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons. Die Herstellung der Betone erfolgte im Wochenabstand in einem 500-l-Zwangsmischer. Der Beton wurde in Lagen von 25 cm Höhe in die stehenden Stahlformen eingebracht und durch Innenrüttler verdichtet. Die Prüfkörper lagerten zunächst 7 Tage im Nebelraum bei 20 °C/95 % rel.

Tafel 4 Eigenschaften der Leichtbetone

Bezeichnung des Betons	Leichtzuschlag		Eigenschaften des Frischbetons					Eigenschaften des Festbetons					
	Bezeichnung	Zustand	Rohdichte	Luftgehalt	Temperatur	Verdichtungsmaß		Rohdichte			Würfel- druck- festigkeit		
						so-	30	Alter in d			Alter in d		
	fort	min	3	7	28	3	7	28					
		kg/dm ³	%	°C			kg/dm ³			kp/cm ²			
N _i	Norlit (Blähschiefer)	trocken	1,64	2,8	19	1,07	1,14	1,66	1,67	1,64	296	359	444
N _n		naß	1,76	4,3	18	1,11	1,16	1,78	1,79	1,72	262	361	436
B _i	Berwillit (Blähschiefer)	trocken	1,59	4,1	17	1,07	1,14	1,62	1,63	1,61	284	335	377
B _n		naß	1,68	3,4	19	1,07	1,13	1,70	1,70	1,66	240	303	357
L _i	Liapor (Blähton)	trocken	1,65	3,6	17	1,04	1,13	1,66	1,66	1,62	271	360	450
L _n		naß	1,79	2,5	17	1,07	1,14	1,82	1,81	1,74	249	341	431

Feuchte. Während dieser Zeit wurden die Stirnflächen plangeschliffen. Anschließend kamen sie in einen Klimaraum mit Normklima 20/65.

2.4. Versuchsergebnisse

2.4.1. Würfeldruckfestigkeit und stat. E-Modul

Die zeitliche Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit ist in Bild 2 aufgetragen. Der statische Druckelastizitätsmodul wurde nach DIN 1048 erstmals am Belastungstag bestimmt, wobei als Oberspannung einmal $\sigma_o = \sigma_k = 0,25 \beta_{w7}$ für das Belastungsalter 7 d bzw. $\sigma_o = \sigma_k = 0,25 \beta_{w28}$ für das Belastungsalter 28 d gewählt wurde. Der Einfluß der Oberspannung erwies sich als unbedeutend, weshalb sich in Tafel 5 gemittelte Werte für die gewählten Prüftermine angeben lassen.

2.4.2. Austrocknung und Schwinden

Der Feuchtigkeitsverlust wurde durch Wägung der Zylinder HZ für die Schwindmessung bestimmt, wobei die Nullmessung am 7. Tage unmittelbar nach Umsetzen in das Normklima 20/65 erfolgte.

Der Gewichtsverlust $\overline{\Delta G}$ (t) ergibt sich zu

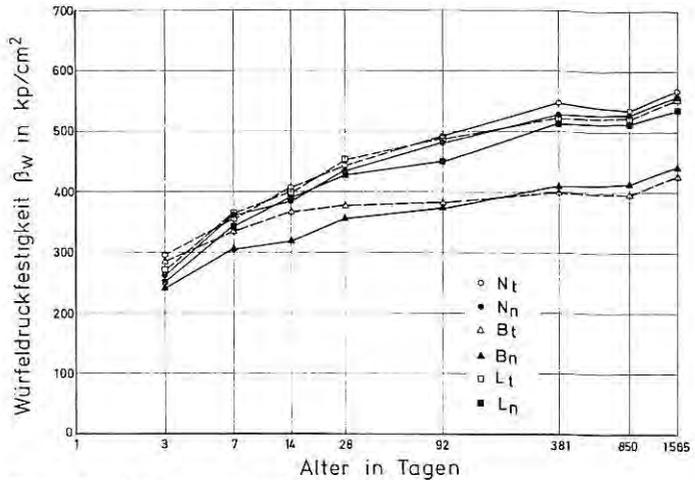


Bild 2 Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit

Tafel 5 Entwicklung des stat. E-Moduls

Beton	stat. E-Modul in Mp/cm ² im Alter von			
	7 d	28 d	380 d	1540 d
N _t	195	193	202	201
N _n	185	194	192	204
B _t	183	185	193	189
B _n	163	187	177	185
L _t	154	171	172	184
L _n	154	166	167	220

$$\overline{\Delta G}(t) = \frac{G(7) - G(t)}{G(7)} \cdot 100 \text{ in Gew.-%};$$

er ist in Bild 3 für die 6 Betone dargestellt. Aus $\overline{\Delta G}(t)$ kann man den Wasserverlust durch Trocknung errechnen:

$$\Delta W(t) = \rho_b(7) \cdot \overline{\Delta G}(t).$$

Obwohl nur wenige Meßtermine vorliegen, sind einige Schlüsse möglich. Hierzu sind einige Zahlen nötig, die in Tafel 6 zusammengestellt sind. Die Werte W_o , W_{zN_o} und W_{k_o} stammen aus Tafel 2.

Bei den wassersatten Zuschlägen ist die Kornporenwassermenge W_{k_o} bekannt. Für die trockenen Zuschläge gilt für W_{k_o} das nach 30 min aufgenommene Wasser, wie man mit der Stoffraumrechnung leicht kontrollieren kann. Tafel 5 enthält auch noch die Werte der Wasseraufnahme nach [1]:

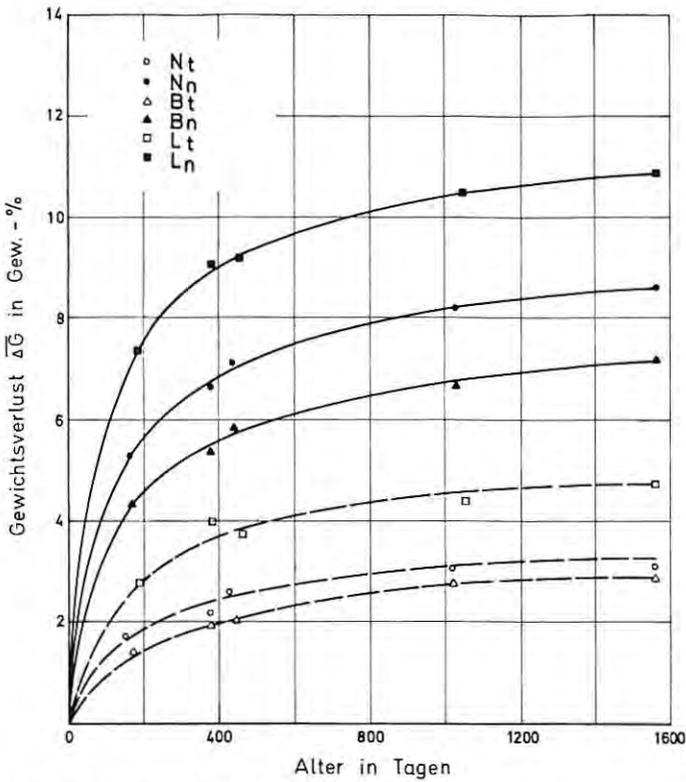


Bild 3 Feuchtigkeitsabgabe beim Austrocknen

Tafel 6 Wasserverluste durch Trocknung

Beton	Anfangswassermenge			Wasseraufnahme		Wasserverlust durch Trocknung		Restwasser-gehalt im Beton	
	An-machen		Auf-saugen	A_g	A_r	$T =$	$t =$	$T =$	$t =$
	W_{zNo}	W_{ko}	W_o			1580 d	∞	1560 d	∞
dm^3	dm^3	dm^3	Gew.-%	Vol.-%	ΔW_T	ΔW_∞	W_T	W_∞	
N_l	175	55	230	7,0	9,8	52	57	179	173
B_l	175	48	223	6,4	8,1	47	56	179	167
L_l	175	103	278	13,6	17,9	79	86	203	192
N_n	175	179	354	22,3	31,0	155	164	207	190
B_n	175	130	305	17,3	21,9	122	130	192	175
L_n	175	234	409	30,9	40,7	197	208	219	201

$$A_g = \frac{m_w}{m_{tr}} \quad \text{in Gew.-%}$$

$$A_r = \frac{m_w}{m_{tr}} \cdot \frac{\rho_{rk}}{\rho_w} \cdot 100 \quad \text{in Vol.-%}$$

Hierzu sind m_w die Masse des Wassers im Zuschlag und m_{tr} die des trockenen Zuschlages. Neben dem Wasserverlust am Ende der Versuche im Alter von 1561 d wurde der Endwasserverlust ΔW_∞ berechnet. Er ergab sich durch Extrapolation, wobei man sinngemäß die Ross'sche Methode zur Bestimmung des Endkriechmaßes angewandt hat (s. unter [5]). Entsprechend ergeben sich die Restwassergehalte im Alter von 1561 d und bei $t = \infty$. Diese Werte liegen über dem Gleichgewichtswassergehalt des Zementsteins $W_E = 129 \text{ dm}^3$ [6]. Das heißt: das Kornporenwasser wird nicht vollständig ausgetrieben.

Bild 4 zeigt die Schwinddehnungen. Die Betone mit nassen Zuschlägen schwinden anfänglich erwartungsgemäß langsamer, jedoch später mehr als die Betone mit trockenen Zuschlägen. Ein Stillstand des Schwindens der „n“-Betone ist auch nach rd. 1600 d noch nicht eingetreten. Diese Beobachtung deckt sich auch mit den Messungen von Heufers [7].

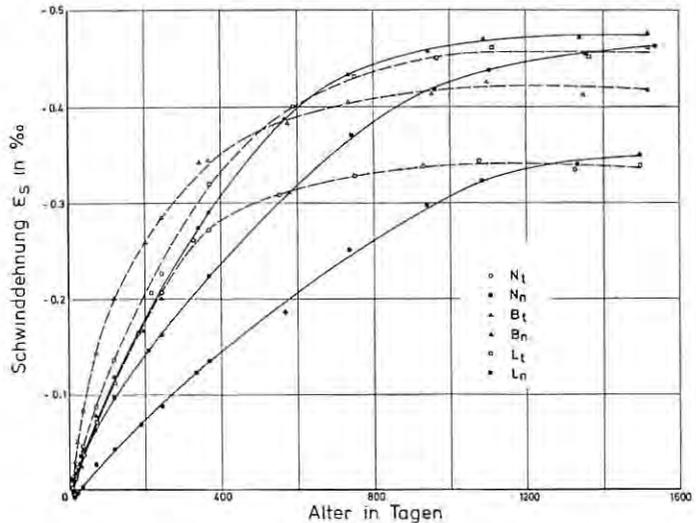


Bild 4 Zeitlicher Verlauf der Schwinddehnungen

2.4.3. Kriechen

Die Dauerspannung σ_k betrug für die beiden Belastungsalter $t_0 = 7 \text{ d}$ und 28 d rd. 25 % von $\beta_w(t_0)$, der Würfeldruckfestigkeit zum Zeitpunkt der Belastung. Aus der bereits angeführten anderen Arbeit standen Ergebnisse für das Belastungsalter von i. M. 210 d zur Verfügung. Hier war $\sigma_k \approx 0,22 \beta_w(210 \text{ d})$. Die Kriechversuche mit

den Belastungsaltern 7 d und 28 d endeten nach rd. 1490 d. Eine Erholkriechdauer von etwa 70 d schloß an. Die Kriechversuche mit $t_0 = 210$ d endeten nach rd. 170 d Dauerlast; dann folgte eine 70tägige Erholung.

Die Bilder 5 bis 8 zeigen die zeitliche Entwicklung der Kriechmaße $\alpha_k(t, t_0) = \epsilon_k(t, t_0) / \sigma_k(t_0)$ für alle Belastungsalter.

Nasse Zuschläge verursachen ein stärkeres Kriechen, obgleich der Unterschied zu den trockenen nicht groß ist. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Zuschlagarten sind im ersten Jahr be-

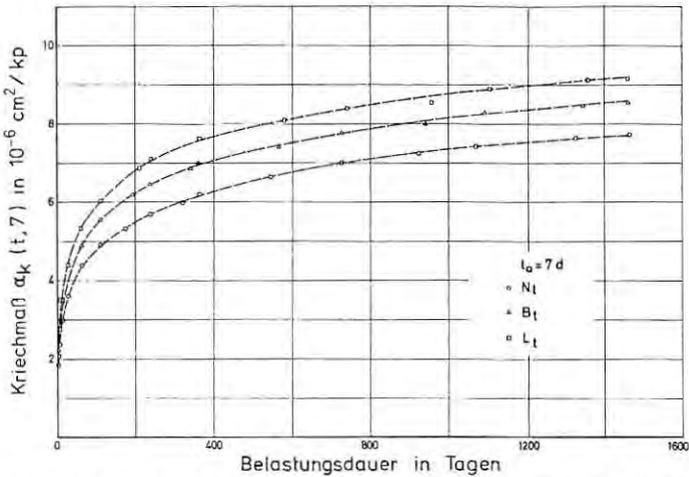


Bild 5 Entwicklung des Kriechmaßes bei Erstbelastung im Alter 7 d mit $\sigma_k = 0,25 \beta_{w7}$ und bei Verwendung trockener Zuschläge

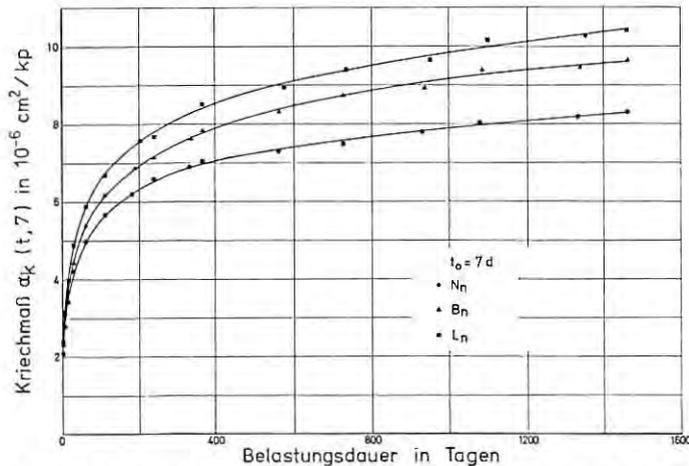


Bild 6 Entwicklung des Kriechmaßes bei Erstbelastung im Alter 7 d mit $\sigma_k = 0,25 \beta_{w7}$ und bei Verwendung nasser Zuschläge

reits vorgezeichnet. Hiernach sind die Kriechgeschwindigkeiten etwa gleich. Ein Stillstand des Kriechens ist auch nach rd. 4 Jahren noch nicht eingetreten.

Die α_k -Kurven ordnen sich in der Reihenfolge L, B und N. Dies ist auch die Reihenfolge der E-Moduln der Leichtbetone, die bei gleichem Stoffraum an Leichtzuschlag die Kornsteifigkeit widerspiegeln. Je kleiner letztere ist, um so mehr Last wird auf kriechfähigen Zementstein umgelagert.

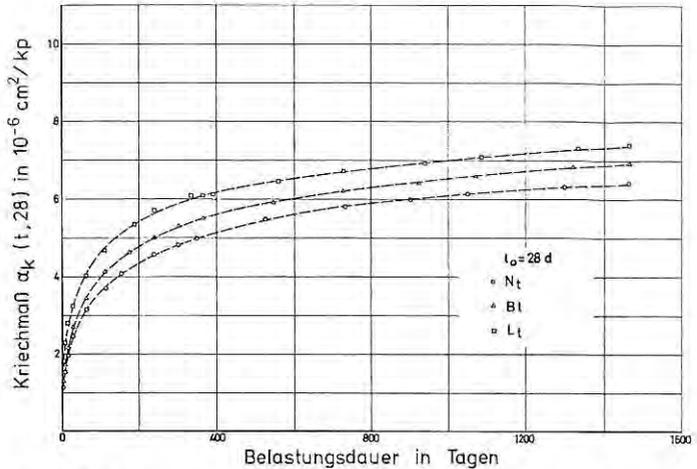


Bild 7 Entwicklung des Kriechmaßes bei Erstbelastung im Alter 28 d mit $\sigma_k = 0,25 \beta_{w28}$ und bei Verwendung trockener Zuschläge

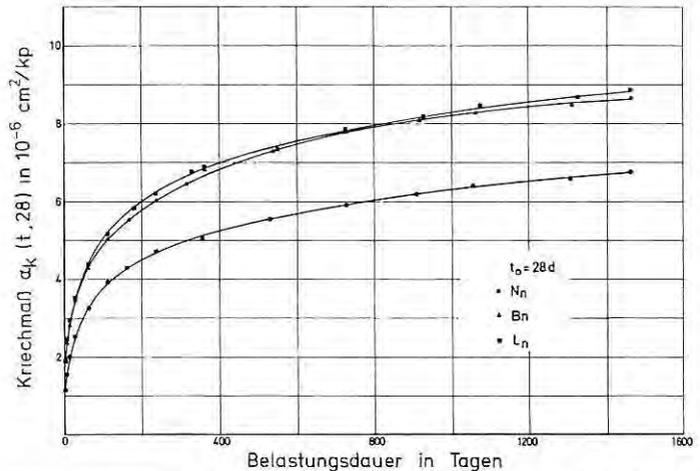


Bild 8 Entwicklung des Kriechmaßes bei Erstbelastung im Alter 28 d mit $\sigma_k = 0,25 \beta_{w28}$ und bei Verwendung nasser Zuschläge

Tafel 7 Endkriechzahlen nach Versuch und Vorschriften

Leichtbeton	Versuchswerte						Rechenwerte		
	Leichtbeton			Normalbeton [4]			Leichtbeton		Normalbeton
	Endkriechzahl für t_o			Endkriechzahl für t_o			Endkriechzahl nach [10]		nach DIN 1045
	7 d	28 d	≈ 210 d	7 d	28 d	$\varphi_{olb}^1)$	mittl. E_{1b} in Mp/cm^2	$\varphi_{olb}^2)$	φ_o
N_t	1,63	1,31	0,64				192		
N_n	1,75	1,40	0,66					2,0 k_1	
B_t	1,66	1,34	0,63	2,7	2,4	1,6 k_1	185	2,0 k_1	3,0 k_1
B_n	1,72	1,78	0,72						
L_t	1,46	1,24	0,54				164	1,7 k_1	
L_n	1,73	1,62	0,60						

¹⁾ $E_{1b} = 150 \text{ Mp/cm}^2$

²⁾ mit dem übernommenen mittleren E_{1b}

Beim hohen Belastungsalter nahm die Kriechfähigkeit stark ab, und die Unterschiede zwischen den Zuschlagarten blieben klein. Tafel 7 enthält die Endkriechzahlen φ (∞ , t_o) aller Betone, die durch Extrapolation gewonnen wurden. Sie sind bei jedem Belastungsalter bei nassen Zuschlägen größer als bei trockenen Zuschlägen.

2.4.4. Kriecherholung

Die Kriechversuchskörper mit den Belastungsaltern $t_o = 7$ d und 28 d wurden im Alter von 1491 d entlastet. Im Anschluß daran wurde die spontan auftretende Rückfederdehnung und die verzögert-elastische Dehnung über rd. 70 d gemessen. In den Bildern 9 und 10 ist der zeitliche Verlauf der anelastischen Dehnung $\varepsilon_{an}(t)$ bezogen auf die spontan-elastische $\varepsilon_{el}(1491 \text{ d})$ aufgetragen. Die Werte bewegen sich innerhalb eines breiten Bereiches. Ein Zusammenhang zwischen Kornfeuchte oder der Zuschlagart ist nicht ablesbar. Auf jeden Fall ist der Vorgang der verzögerten Rückfederung noch lange nicht abgeschlossen, und es sind Beobachtungen über längere Zeit nötig, ehe man beurteilen kann, ob der von Rüsich, Jungwirth und Hilsdorf [8] für Normalbeton vorgeschlagene Endwert $\varepsilon_{an \infty} / \varepsilon_{el 28} = 0,40$ auch für Leichtbeton gilt. Die Bilder enthalten auch die irreversiblen, viskosen Dehnungen ε_{vis} am Ende der Entlastungsperiode.

Die Kriechkörper mit $t_o \approx 210$ d, die nur rd. 170 d unter Last gestanden hatten, zeigen den in Bild 11 dargestellten Verlauf der $\varepsilon_{an}(t) / \varepsilon_{el}(380 \text{ d})$.

3. Vergleiche mit Normalbeton und Vorschriften

3.1. Größe und zeitlicher Verlauf des Schwindens

Bei den vorliegenden Lagerungsbedingungen und bei der vorhandenen Konsistenz K 3 ist für Normalbeton nach DIN 1045 [9] und für Leichtbeton nach den Richtlinien [10] ein Endschwindmaß von

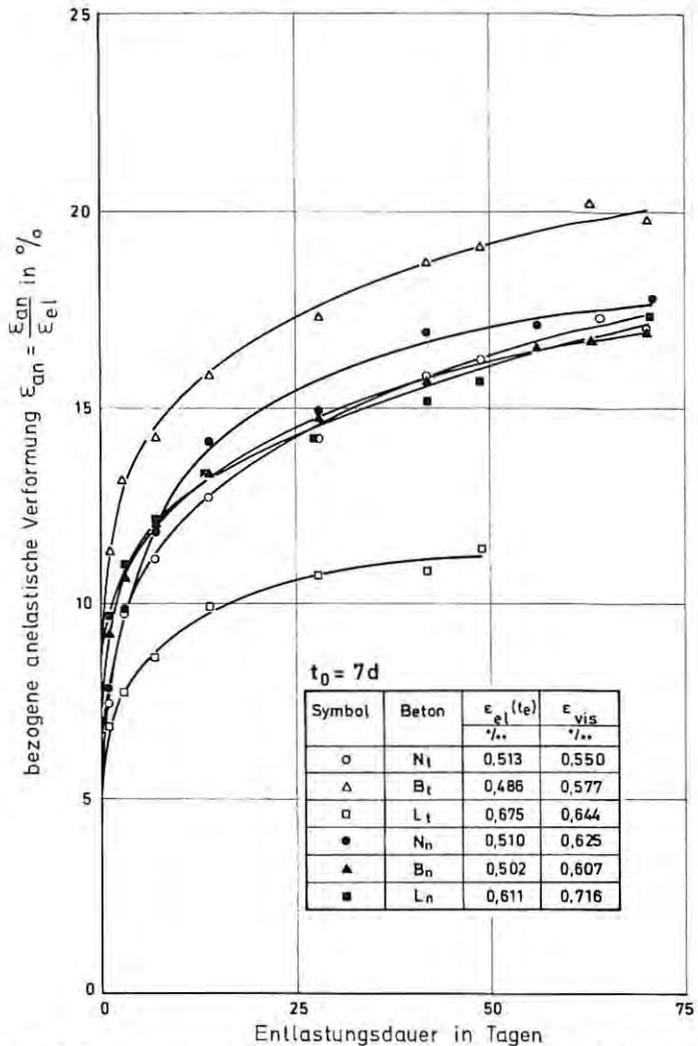


Bild 9 Zeitlicher Verlauf der Rückfederung nach Entlastung; $t_0 = 7 \text{ d}$

$60 \cdot 10^{-5}$ anzusetzen. Für trockene bis schwach kernfeuchte Zuschläge kann man diesem Wert zustimmen. Bei wassergesättigten Zuschlägen sind jedoch ggf. größere Endschwindmaße möglich.

Von großem Einfluß ist der Feuchtigkeitsgehalt der Leichtzuschläge auf den zeitlichen Ablauf des Schwindens. In Bild 12 ist die $k_2(t)$ -Kurve für Normalbeton für eine wirksame Körperdicke $d_w = 10 \text{ cm}$ aufgetragen und den gemessenen $k_2(t)$ -Kurven der Leichtbetone gegenübergestellt. Die Leichtbetone schwinden, besonders bei nassem Zuschlag, in den ersten 100 bis 200 Tagen langsamer als Normalbeton.

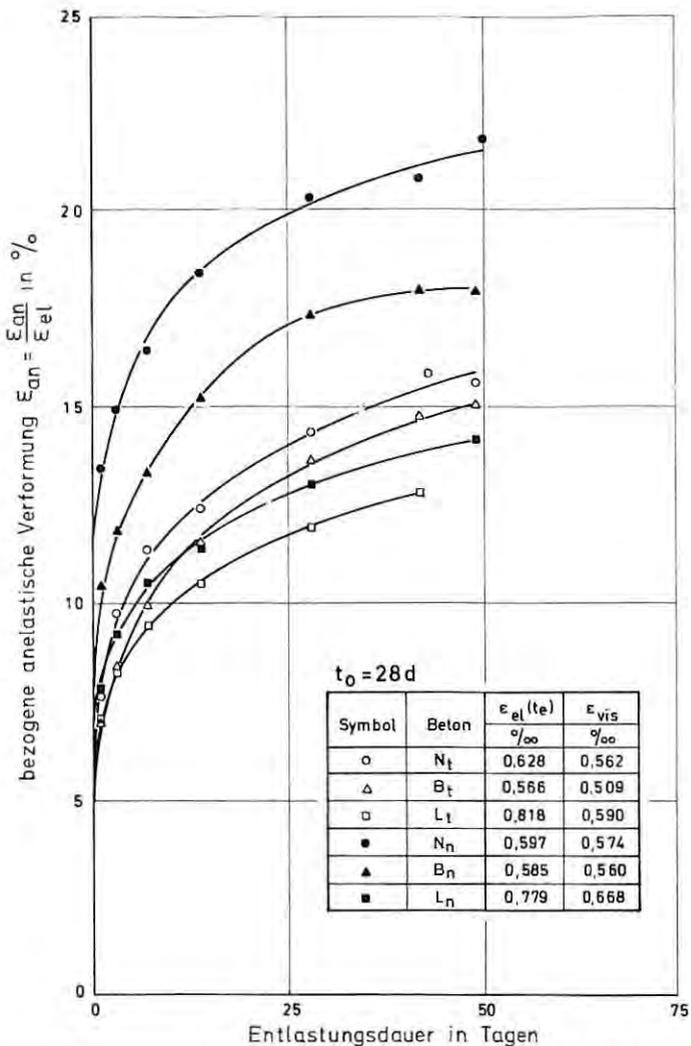


Bild 10 Zeitlicher Verlauf der Rückfederung nach Entlastung; $t_0 = 28 \text{ d}$

Aus einer Langzeituntersuchung an Normalbeton [4], bei der alle wesentlichen Parameter denen in diesem Bericht entsprechen, wie Probekörperform, Zementart und -gehalt, Wassergehalt W_{kN_0} , stammt die eingetragene Linie. Sie liegt etwas unter der DIN-Kurve, was auf ein geringeres Schwinden zu Beginn zurückzuführen ist.

Das gegenüber Normalbeton verzögerte Anlaufen des Schwindens von Leichtbeton kann Vor- und Nachteile haben. Zwangskräfte infolge Schwindens bauen sich langsamer auf und werden deshalb stärker durch Relaxation abgebaut. Ab rd. 200 d kehren sich die

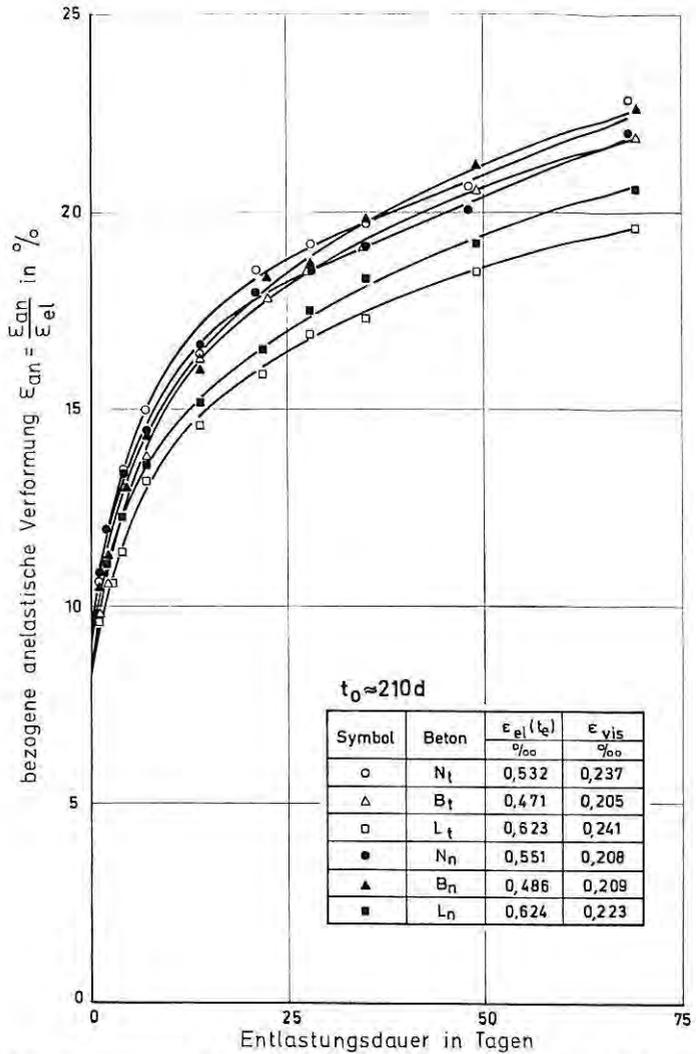


Bild 11 Zeitlicher Verlauf der Rückfederung nach Entlastung; $t_0 = 210 \text{ d}$

Verhältnisse um; in diesem Alter hat jedoch die Zugfestigkeit bereits ihr Maximum erreicht. Bei wassersatten Zuschlägen wird am Querschnittsrand ein steiles Feuchtigkeitsgefälle durch Trocknung auftreten. Die Folge davon sind hohe Schwindeigenspannungen, die besonders bei massigen Baugliedern die Reißgefahr erhöhen.

3.2. Größe und zeitlicher Verlauf des Kriechens

Tafel 7 enthält neben den aus den Versuchsergebnissen gewonnenen Endkriechzahlen der Leichtbetone die Werte für Normal-

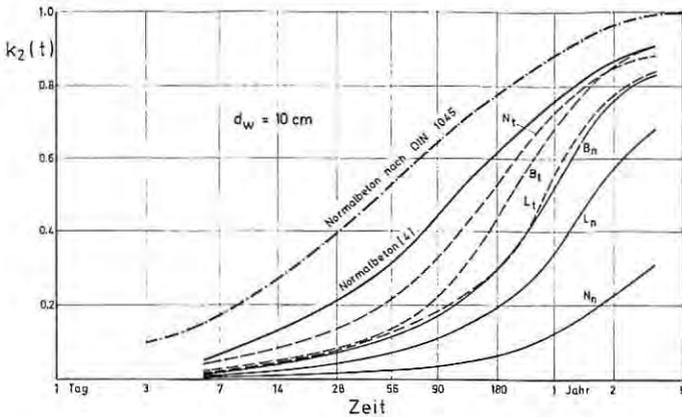


Bild 12 Gegenüberstellung der Zeitfunktionen des Schwindens von Normal- und Leichtbeton

beton nach DIN 1045 sowie die Rechenwerte der Endkriechzahlen nach den Richtlinien, die sich durch Abminderung der Normalbetonwerte ergeben:

$$\varphi_{0lb} = \varphi_0 \cdot 1,2 \frac{E_{lb}}{E_b}$$

Hierin sind φ_0 der Endwert der Grundkriechzahl und E_b der Rechenwert des E-Moduls von Normalbeton.

φ_{0lb} wurde auf zwei Arten bestimmt. Einmal wurde mit dem der vorliegenden Rohdichteklasse entsprechenden E-Modul $E_{lb} = 150 \text{ Mp/cm}^2$ gerechnet. Das andermal wurden die mittleren, gemessenen E-Moduln eingesetzt. Als E-Modul des Normalbetons wurde $E_b = 340 \text{ Mp/cm}^2$ verwendet (Bn 350).

Erwartungsgemäß liegen die Endkriechzahlen des Normalbetons über denen des Leichtbetons. Die Rechenwerte φ_{0lb} , die man mit der Endkriechzahl φ ($\infty, 28$) vergleichen muß, stellen eine brauchbare Schätzung dar, da der Beiwert k_1 ungefähr 0,75 beträgt.

Vergleicht man das Kriechverfahren von Leicht- und Normalbeton, so kann man dies unter verschiedenen Voraussetzungen tun. Die extrapolierten Endkriechzahlen der LB und NB nach Versuch in Tafel 7 gelten für Betone mit gleicher viskoelastischer Masse (Zement + wirksames Wasser) und gleichen Stoffraum-Zuschlägen, Leicht- und Kiessandzuschlägen. Dies bedeutet aber, daß der Normalbeton eine höhere Druckfestigkeit besaß als die Leichtbetone. Wohl sind die Kriechzahlen $\varphi = \varepsilon_k / \varepsilon_{e1}$ beim Normalbeton größer, aber bei den bezogenen Kriechdehnungen $\alpha_k = \varepsilon_k / \sigma_k$ kehren sich die Verhältnisse um: bei gleicher viskoelastischer Masse weist der Leichtbeton größere Kriechdehnungen als Normalbeton auf.

In Bild 13 ist die $k_2(t)$ -Kurve für Normalbetone nach DIN 1045 für eine wirksame Körperdicke $d_w = 10 \text{ cm}$ aufgetragen, die den zeitlichen Verlauf des Kriechens beschreibt. In das Bild sind auch die gemessenen Kriechverläufe der Leichtbetone als Band einge-

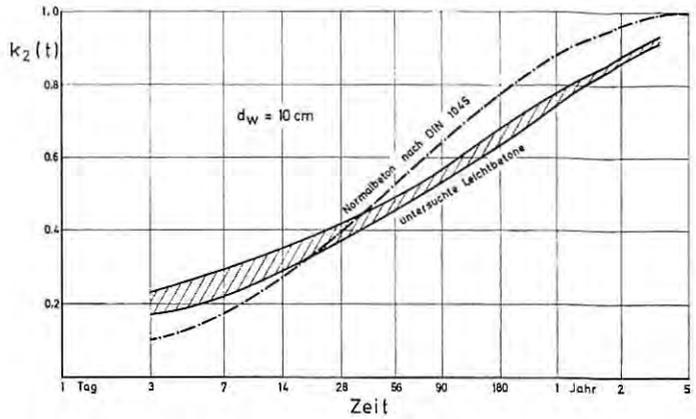


Bild 13 Gegenüberstellung der Zeitfunktionen des Kriechens der Leichtbetone mit dem $k_2(t)$ -Verlauf für Normalbeton nach DIN 1045

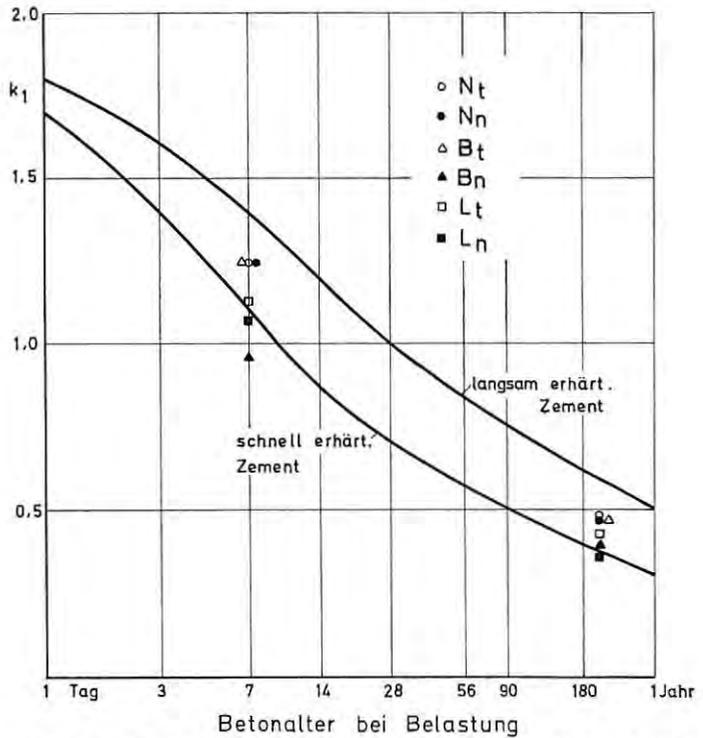


Bild 14 Einfluß des Belastungsalters auf das Kriechen ($T = 20^\circ \text{C} = \text{const}$)

zeichnet. Sie liegen eng zusammen. Die Korneigenfeuchte besitzt nur einen geringen Einfluß auf den zeitlichen Verlauf. Kriechen und Schwinden laufen bei Leichtbeton nach verschiedenen Zeitfunktionen ab.

Bild 14 zeigt den Einfluß des Erhärungsgrades bzw. des Alters bei Belastung auf das Kriechen. Die im Versuch ermittelten k_1 -Werte der Leichtbetone sind den für Normalbeton geltenden Kurven nach DIN 1045 gegenübergestellt. Wegen des im Versuch verwendeten PZ 375 gilt die untere Kurve, die den Zusammenhang zwischen Kriechfähigkeit und Belastungsalter auch für Leichtbeton gut beschreibt. Die Unterschiede in k_1 zwischen den Zuschlagarten und untersuchten Kornfeuchten sind gering.

4. Zusammenfassung

Mit den Leichtzuschlägen Liapor, Berwilit und Norlit wurden bei zwei extrem weit auseinanderliegenden Ausgangskorneigenfeuchten der Zuschläge – trocken und naß – sechs nach dem Stoffraum gleich zusammengesetzte Leichtbetone hergestellt. Unter „trockenen“ Zuschlägen sind hier trockene Zuschläge zu verstehen, die 30 min nach Merkblatt I [3] vorgeätzt worden waren. Die „nassen“ Zuschläge hingegen lagerten rd. 30 Tage vor dem Betonieren unter Wasser. Die wirksamen Wasserzementwerte, die kriechfähigen Massen und Konsistenzen waren gleich. Mit den Leichtbetonen wurden Kriech- und Schwinduntersuchungen durchgeführt; die zylindrischen Prüfkörper ϕ 20 cm lagerten dabei ab Alter 7 d im Normklima 20/65. Drei Werte des Belastungsalters wurden untersucht: 7 d, 28 d und \approx 210 d. Die Dauerspannungen betragen $\sigma_k = 0,25 \beta_w (t_0)$ für $t_0 = 7$ d und 28 d bzw. $\sigma_k \approx 0,22 \beta_w (210)$ für $t_0 \approx 210$ d. Die Versuche sollten klären, wie Schwinden und Kriechen in Größe und zeitlichem Ablauf von der Korneigenfeuchte beeinflusst werden.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Der Gewichtsverlust des Leichtbetons infolge Trocknung steigt mit der im Zuschlag gespeicherten Wassermenge. Er setzt sich jedoch nur teilweise in Schwinddehnungen um. Es ist zu vermuten, daß vor allem bei nassen Zuschlägen erst eine Entleerung der größeren Kornporen durch die größeren Kapillarporen des Zementsteins hindurch stattfindet, ehe die feineren Poren des Zementsteines entwässert werden.

Durch hohe Korneigenfeuchtigkeiten wird das Schwinden der Leichtbetone innerhalb der ersten zwei Jahre verzögert. Es kommt jedoch innerhalb der betrachteten vier Jahre bei weitem noch nicht zum Stillstand. Bei nassen Zuschlägen sind höhere Endschwindmaße zu erwarten als bei Verwendung weniger durchfeuchteter Zuschläge.

Die Endkriechzahlen der Leichtbetone mit nassen Zuschlägen sind für jedes der drei Belastungsalter größer als bei trockenen Zuschlägen. Im zeitlichen Ablauf des Kriechens sind aber keine nennenswerten Unterschiede feststellbar. Sowohl für das Schwinden als auch für das Kriechen ist ein zu Normalbeton unterschiedlicher

zeitlicher Ablauf zu beobachten. Bezogen auf die Endkriechzahl φ (∞ , 28) werden die für die beiden Alter bei Belastung 7 d und ≈ 210 d errechneten Kriechbeiwerte k_1 mit ausreichender Genauigkeit auch von der für Normalbeton gültigen Beziehung $k_1(t_0)$ beschrieben.

Im Hinblick auf das erhöhte Schwinden und Kriechen sowie auf das steile Feuchtigkeitsgefälle über den Querschnitt und die damit erhöhte Schwindrißgefahr ist eine hohe Korneigenfeuchtigkeit der Leichtzuschläge eher nachteilig.

SCHRIFTTUM

- [1] Weigler, H., und S. Karl: Stahlleichtbeton. Herstellung, Eigenschaften, Ausführung. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1972.
- [2] Rostásy, F. S., K. Th. Teichen und W. Alda: Über das Schwinden und Kriechen von Leichtbeton bei unterschiedlicher Korneigenfeuchtigkeit. Otto-Graf-Institut, Versuchsbericht, 1972.
- [3] Vorläufiges Merkblatt I für Stahlleichtbeton: Betonprüfung zur Überwachung der Leichtzuschläge (Fassung Juli 1968).
- [4] Teichen, K. Th., und F. S. Rostásy: Einfluß von Traß-Zusatz auf das Dauerstandverhalten von Normalbeton. beton 20 (1970) H. 5, S. 189/191.
- [5] Neville, A. M.: Creep of concrete: Plain, reinforced, and prestressed. North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1970.
- [6] Hilsdorf, H.: Austrocknung und Schwinden von Beton. Festschrift „Stahlbetonbau, Berichte aus Forschung und Praxis“ (Rüsch-Festschrift). Verlag von W. Ernst & Sohn, Berlin/München 1969.
- [7] Heufers, H.: Über langfristige Schwind- und Kriechuntersuchungen an Leichtbetonen höherer Festigkeit und vergleichbaren Normalbetonen. Festschrift „Stahlbetonbau, Berichte aus Forschung und Praxis“ (Rüsch-Festschrift). Verlag von W. Ernst & Sohn, Berlin/München 1969.
- [8] Rüsch, H., D. Jungwirth und H. Hilsdorf: Kritische Sichtung der Verfahren zur Berücksichtigung der Einflüsse von Kriechen und Schwinden des Betons auf das Verhalten der Tragwerke. Beton- und Stahlbetonbau 68 (1973) H. 3, 4 und 6.
- [9] DIN 1045. Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung. Ausgabe Januar 1972.
- [10] Richtlinien für Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge (Fassung Juni 1973). Herausgeg. vom Deutschen Ausschuß für Stahlbeton.