

Kriechen von Beton – Einfluß des Belastungsalters *)

Von Karlhans Wesche, Wolfgang vom Berg
und Ingo Schrage, Aachen

Nachdem in den fünfziger Jahren in Zusammenarbeit zwischen Aachen und München das Kriechen verschiedener Betone bis zu einem Belastungsalter von 90 d (Tage) untersucht worden war [1], ergab sich 1973 die Möglichkeit, Kriech- und Rückverformungsmessungen an Probekörpern durchzuführen, die rd. 6 bis 9 a (Jahre) unbelastet unter weitgehend konstanten klimatischen Verhältnissen erhärtet waren. Mit den folgenden Versuchen sollte die Vermutung aus den früheren Kriechversuchen, daß Dauerbelastungen im Belastungsalter von mehr als 28 d das bezogene Kriechmaß der Betone kaum mehr verändern, auf ihre Gültigkeit auch außerhalb des Erfahrungszeitraumes von 90 d überprüft werden. Damals waren bei einem Belastungsalter von 90 d etwa gleiche Kriechverformungen auftreten wie bei den gleichen Betonen bei Belastung im Alter von 28 d.

Zusätzlich ergab sich die Möglichkeit, die inzwischen in die Baubestimmungen [2, 3, 4] eingegangenen Berechnungsansätze für Verformungen aus Dauerlasten durch weitere Meßwerte zu belegen.

Dieser Beitrag, der auf Versuchsergebnissen aus einer Forschungsarbeit des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) beruht [5], soll exemplarisch einige der gewonnenen Erkenntnisse beschreiben.

1. Einteilung der Formänderungen bei Festkörpern

Eine Terminologie der Formänderungskenngrößen von Baustoffen ist nicht einfach, da auf diesem Gebiet eine Begriffsverwirrung herrscht und selbst in den einzelnen Werkstoffbereichen uneinheitliche Begriffe verwendet werden.

In der Gliederung (Tafel 1), die im Prinzip bereits im Jahre 1958 von Kordina [6] aufgestellt wurde, wird versucht, die Gesamtverformung ϵ_t nach Ursachen und Wirkungsmechanismen aufzuspalten. Der Beton ist ein besonders komplizierter Baustoff, da bei ihm alle aufgeführten Formänderungen auftreten, während man bei

*) Nach einem Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung am 20. Oktober 1976 in Düsseldorf

Tafel 1 Einteilung der Formänderungen

	spannungsabhängig		spannungsunabhängig
	sofort auftretend	zeitabhängig	
umkehrbar, reversibel	elastisch ϵ_{el}	verzögert elastisch ϵ_{vel}	Wärmedehnung ϵ_T Feuchtedehnung ϵ_S
nicht umkehrbar, irreversibel	Setzen ϵ_{bl} (bleibend)	Fließen ϵ_f viskos, plastisch (verzögert bleibend)	chemische Dehnung

anderen Stoffen nur einige von ihnen zu berücksichtigen braucht. Formänderungen entstehen durch Spannungen. Sie können aber auch unabhängig von Spannungen auftreten [7]. Es ist zu beachten, daß bei Behinderung der spannungsunabhängigen Formänderungen (Wärme-, Feuchte- und chemische Dehnung) wiederum Spannungen und damit spannungsabhängige Formänderungen auftreten. Diese spannungsabhängigen Formänderungen können umkehrbar sein, d. h. sie gehen nach Entlastung, also bei der Spannung Null, wieder vollkommen zurück – wir nennen sie elastisch –, oder sie können nicht mehr zurückgehen – diese nennen wir bleibend. Die letzte Einteilung, die uns hier besonders interessiert, ist die nach dem Zeiteinfluß: die Verformungen können sofort oder erst im Laufe einer mehr oder weniger langen Belastung auftreten.

Elastische Verformungen entstehen durch Verzerrungen in der Gitterstruktur der Stoffe, und es kann je nach Struktur des Stoffes bis zu mehreren Monaten und Jahren dauern, bis die Verzerrungen im Gitter abgeschlossen sind und der Stoff seinen endgültigen Verformungszustand erreicht hat. Man spricht dann von verzögert elastischer Verformung ϵ_{vel} . Sie tritt also neben der sofortigen elastischen Verformung ϵ_{el} auf.

Die zeitabhängigen bleibenden Verformungen nennt man Fließen ϵ_f , wobei man plastische und viskose Fließvorgänge unterscheiden kann. Ersteres kommt meist bei kristallinen Stoffen, also bei geordneter Gitterstruktur, das viskose Fließen dagegen bei ungeordneter Gitterstruktur vor. Die sofort auftretende bleibende Verformung ϵ_{bl} , die beim Beton durch Überdrücken von Gefügeunregelmäßigkeiten, z. B. Mikrorissen, entsteht und auch Setzen genannt wird, ist nur gering und kann bei der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden.

2. Zeitabhängige Verformungen bei viskoelastischen Festkörpern

Rein elastische Stoffe sind ebenso selten wie rein viskose Festkörper, die nur bleibende Verformungen aufweisen. Die meisten Stoffe sind Übergangsformen zwischen diesen beiden Extremen, so auch der Beton mit einem sog. viskoelastischen Verhalten.

Belastet man einen Beton für kürzeste Zeit, also für wenige Sekunden, so scheidet der Zeiteinfluß aus, und er muß sich unter Vernachlässigung des Setzens rein elastisch verhalten. Jede darüber hinausgehende Belastungszeit führt zu zusätzlichen zeitab-

hängigen Verformungen, und zwar zu verzögert elastischen und zu viskosen.

Die verzögerten Verformungen treten natürlich erst recht auf, wenn die Belastung noch länger dauert als beim üblichen Festigkeitsversuch, d. h. wenn man entsprechend dem oberen Teil von Bild 1 die Belastung auf einem bestimmten Niveau σ_0 konstanthält. Es tritt dann die sofortige Dehnung $\varepsilon_0 = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{bl}$ auf, zu der dann im Laufe der Zeit die verzögerte Dehnung $\varepsilon(t)$ hinzukommt, die meist erst nach vielen Jahren einem asymptotischen Endwert ε_∞ zustrebt. Bei Entlastung gehen zunächst die sofort auftretende elastische Dehnung ε_{el} und dann im Laufe der Zeit, meist innerhalb weniger Monate, die verzögert elastische Dehnung ε_{vel} zurück, und es bleiben die irreversiblen Dehnungen ε_f und ε_{bl} übrig. Dieser Vorgang wird auch mit Rückkriechen bezeichnet.

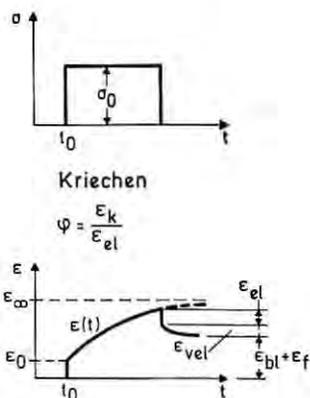


Bild 1 Kriechverlauf bei Beton

Die Gesamtverformung unter Last ε_t läßt sich also in den zeitunabhängigen spontan-elastischen Anteil ε_{el} sowie in den zeitabhängigen Kriechanteil ε_k aufspalten. Das Kriechen erhält man dann aus den irreversiblen Dehnungsanteilen ε_f und ε_{bl} zuzüglich der verzögert elastischen Dehnung ε_{vel} bzw. aus der gesamten spannungsabhängigen Dehnung ε_t minus der sofort auftretenden Dehnung ε_{el} :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{el} + \varepsilon_k$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon_t - \varepsilon_{el}$$

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{vel} + \varepsilon_f (+ \varepsilon_{bl})$$

Diese Definition wird inzwischen von den deutschen Spannbeton-Richtlinien [2] und den internationalen CEB-FIP-Empfehlungen [3] als Grundlage der Ansätze für Verformungsrechnungen benutzt.

Zur Vorausberechnung des Kriechens bezieht man die Kriechdehnung auf die elastische Dehnung und rechnet mit dieser Kriechzahl $\varphi_t = \varepsilon_k / \varepsilon_{el}$.

3. Einflußgrößen auf die zeitabhängigen Verformungen

Kriechversuche werden i. a. bei Beanspruchungen von rd. einem Drittel der statischen Kurzzeitfestigkeit durchgeführt, was etwa der

höchsten Gebrauchsspannung im Bauteil entspricht. Die Kriechzahlen für Beton liegen dann je nach Lage und Querschnitt des Bauteils, Belastungsalter und Belastungsdauer etwa zwischen 1 und 6, d. h. die Kriechverformungen können im Gebrauchslastbereich bis zu sechsmal so groß sein wie die elastischen Kurzzeitverformungen.

Der endliche Grenzwert der Kriechverformungen eines Betons wird ebenso wie die Kriechgeschwindigkeit durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, vor allem durch die Eigenschaften der Betonkomponenten, durch das Mischungsverhältnis, die Proben- bzw. Bauteilgeometrie, die klimatischen Gegebenheiten u. a. mehr, nicht zuletzt jedoch durch das Belastungsalter, d. h. die Zeitspanne, die zwischen Betonherstellung und Aufbringen der kriecheerzeugenden Spannung zur Festigkeitsbildung verfügbar ist. Mit zunehmender Festigkeit muß ja die Verformungsfähigkeit und damit das Kriechen abnehmen.

Bei den Aachener Versuchen im hohen Belastungsalter brauchten zur Berechnung des Kriechens aus dem Gesamtverformungen die spannungsunabhängigen Verformungen ϵ_T (infolge Temperatur) und ϵ_S (infolge Schwindens) nicht berücksichtigt zu werden. Die Versuche fanden bei konstantem Klima, also ohne Temperatureinfluß statt; wegen des hohen Betonalters konnte der Schwindanteil gleich Null gesetzt werden. Die Berechtigung für diese Annahme leitet sich aus eigenen Beobachtungen während der Nullversuche [8, 9] ab, wo der Schwindzuwachs im Betonalter von 1 a bereits auf 0,01 bis 0,1 mm/m pro Jahr zurückgegangen war, sowie aus den Ergebnissen, die von Rüsck, Hummel und Mitarbeitern [10] mitgeteilt werden und nach denen im Betonalter von 4 a der rechnerische Endwert des Schwindens bereits zu 95 bis 100 % erreicht war (vgl. auch [11]).

4. Umfang der Aachener Versuche und Versuchsdurchführung

Die Versuche erstreckten sich auf Zementarten und Betonzusammensetzungen, wie sie im konstruktiven Ingenieurbau vorwiegend verwendet werden. Untersucht wurden Betone mit Portlandzementen verschiedener Festigkeitsklassen und mit Hüttzementen verschiedenen Hüttensandgehaltes, vermahlen aus demselben Klinker und derselben Schlacke, sowie Betone mit einem Weißzement und einem C₂A-freien Zement. Die Konsistenz der Betone lag im Bereich K2 und K3 bei einem Wasser-Zement-Wert von rd. 0,5. Mit allen Betonarten waren früher bereits Kriechversuche im Belastungsalter von 1 bis 28 d durchgeführt worden [8, 9]. Für die Messungen im hohen Betonalter standen 30 Betonzylinder $d = 200$ mm, $h = 800$ mm Höhe zur Verfügung. An ihnen wurden ab Herbst 1973 zunächst für 2 a die Verformungen unter Dauerlast gemessen, sodann für 1 a die Rückverformungen nach Entlastung. Änderungen gegenüber den Prüfeinrichtungen und Meßverfahren, die bei den früheren Kriechversuchen [1] verwendet wurden, ergaben sich lediglich bei der Messung der Rückverformung und des E-Moduls, bei denen Dehnungsmeßstreifen zusätzlich bzw. als Ersatz für Meßuhren verwendet wurden.

5. Versuchsergebnisse

Die Meßwerte der Kriechversuche, die stellvertretend für alle Betonarten für einen Beton mit einem PZ 275, der heute einem PZ 350 F entsprechen würde, mitgeteilt werden, sind in Bild 2 dargestellt.

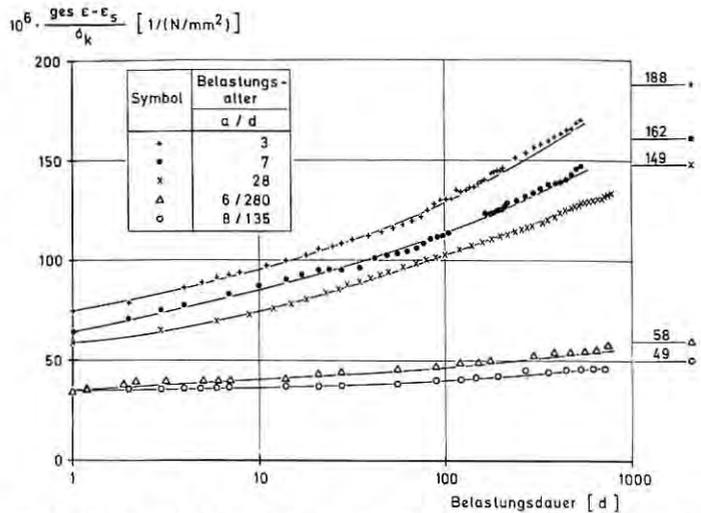


Bild 2 Verlauf der Gesamtverformungen für verschiedene Belastungsalter (Beton mit PZ 350 F)

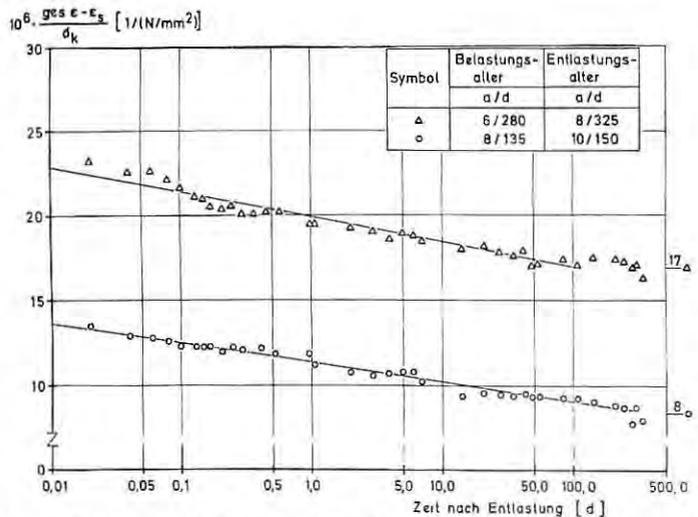


Bild 3 Verlauf von Rückverformungen für hohe Belastungsalter (Beton mit PZ 350 F)

Aufgetragen sind die bezogenen spannungsabhängigen Gesamtverformungen über der Belastungsdauer. Die Zahlenangaben am rechten Bildrand sind die nach Abschnitt 6 ermittelten Endwerte der bezogenen spannungsabhängigen Gesamtverformung.

Sowohl im Ordinatenabschnitt als auch in der Steigung ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Kurven für Belastungsalter bis 28 d und für hohe Belastungsalter. Man sieht, daß sich auch im hohen Alter ein Altersunterschied zwischen rd. 6,5 (6/280) und rd. 8,5 a (8/135) noch deutlich auswirkt.

Die Ergebnisse der Rückverformungsmessungen für die Versuche mit hohem Belastungsalter sind in Bild 3 dargestellt.

Leider fehlen hier Vergleichswerte aus Versuchen mit Belastungsaltern bis zu 28 d.

Die Orientierungsgeraden sind nach Augenschein durch die Meßpunkte gelegt. Zur rechten Einschätzung der Streuung sei darauf hingewiesen, daß die größte Abweichung der Meßpunkte von diesen Geraden nur 0,01% entspricht. Die Zahlenangaben am rechten Bildrand sind wiederum die Endwerte. Vergleiche zwischen „alten“ und „jungen“ Betonen müssen hier entfallen, da für die Nullversuche keine Rückverformungen gemessen wurden.

6. Versuchsauswertung

6.1 Einfluß des Belastungsalters

Da die Meßwerte natürlich Versuchstreuungen beinhalten und nur einen endlichen Zeitraum umfassen, mußte es das nächste Ziel sein, die Kurven der Zeit-Dehnungs-Wertepaare mathematisch zu beschreiben und den Meßwerten Ausgleichskurven anzupassen, mit denen man dann durch Extrapolation die Endwerte der zeitabhängigen Verformungsanteile schätzen kann. Die Versuche wurden nach den Ansätzen von Pfefferle [12], Ross und Shank (diskutiert in [13]) ausgewertet. Die hier dargestellte Auswertung geschah nach dem Verfahren von Ross, da hiermit – ganz im Sinne der verschiedenen Richtlinien – für eine unendliche Be- und Entlastungsdauer endliche Verformungswerte abgeschätzt werden.

Die Auswertung der Kriechversuche bei verschiedenen Belastungsaltern ist wiederum für den Beton mit PZ 350 F in Bild 4 dargestellt. Die Abszisse zeigt die Belastungsdauer, die Ordinate zeigt den Quotienten aus Belastungsdauer und bezogener zeitabhängiger Verformung. Die Anpassung von Ross-Geraden an die Meßpunkte erfolgte mit linearer Regression. Dargestellt sind die Geraden mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß. Der Kehrwert des Anstiegs ist definitionsgemäß der rechnerische Endwert der bezogenen Kriechverformungen, der in Bild 4 in der 3. Spalte der Legende angegeben ist.

Hier – wie auch bei allen anderen Versuchsreihen – wird deutlich, daß die früher geäußerte Vermutung [1] als widerlegt gelten muß: das Belastungsalter hat auch bei einer Erhärtungsdauer von 6 bis 9 a noch einen deutlichen Einfluß auf das bezogene Kriechmaß. Allerdings ist der Tendenz dieser Werte bereits rein qualitativ zu entnehmen, daß ein endlicher Zeitpunkt für das Belastungsalter bei mehr als 9 a existieren muß, bei dem das Kriechen bei etwa

$$10^{-6} \cdot \frac{1}{\epsilon_k / \delta_k} \left[\frac{d}{1/(N/mm^2)} \right]$$

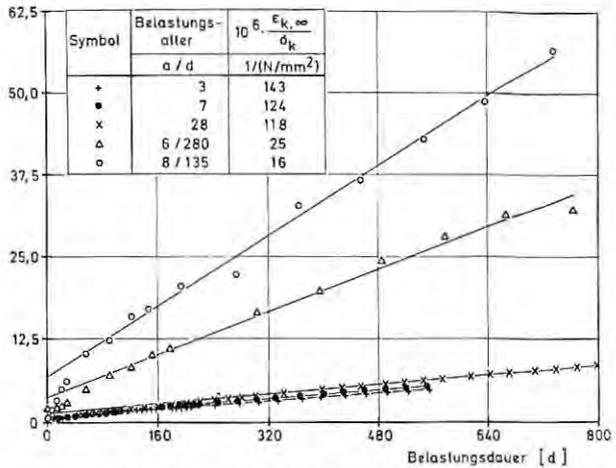


Bild 4 Auswertung von Kriechversuchen für verschiedene Belastungsalter nach Ross (Beton mit PZ 350 F)

gleichbleibenden Festigkeiten und E-Moduln vernachlässigbar klein ist.

Im vorliegenden Beispiel ist der zu erwartende Endwert der bezogenen Kriechverformungen bereits bei einem Belastungsalter von 6,5 a mit $25 \cdot 10^{-6}/(N/mm^2)$ kleiner als die bezogene spontan-elastische Verformung von $(58-25) \cdot 10^{-6} = 33 \cdot 10^{-6}/(N/mm^2)$.

Bei Belastung im Alter von mehr als 8 a beträgt der zu erwartende Endwert nur noch rd. 14 % verglichen mit dem Wert, der sich bei einer Belastung im Alter von 28 d einstellt. Inwieweit diesem Zeitpunkt wegen der begrenzten Nutzungsdauer unserer Bauwerke noch eine für die Baupraxis relevante Bedeutung zukommt, soll hier nicht weiter erörtert werden.

Zieht man von den rechnerischen Endwerten der bezogenen spannungsabhängigen Gesamtverformungen in Bild 2 (rechter Rand) die Endwerte der bezogenen Kriechverformungen in Bild 4 ab, so erhält man die bezogenen spontan-elastischen Dehnungen, also die reziproken Werte des Elastizitätsmoduls. Demnach betragen die E-Moduln für die verschiedenen Alter:

3 d	22200	N/mm ²
7 d	26300	N/mm ²
28 d	32300	N/mm ²
6 a/280 d	30300	N/mm ²
8 a/135 d	30300	N/mm ²

6.2 Endwert der verzögert-elastischen Verformung

Zieht man von den Endkriechwerten für hohe Belastungsalter (Bild 4) die Endwerte des Fließens (Bild 3) ab, so sieht man, daß die verzögert-elastische Verformung als Differenz mit jeweils

$8 \cdot 10^{-6}/(\text{N}/\text{mm}^2)$ kleiner als das Fließen bzw. gleich dem Fließen ist. Nach den Spannbeton-Richtlinien [2] ist der Anteil der verzögert-elastischen Verformungen an der Kriechzahl φ_1 als Zuschlag zur Grundfließzahl φ_f von 0,4 mal einem Faktor k_v anzusetzen, wobei k_v nach rd. 2000 d den Wert 1 annimmt. Damit ergibt sich ein Endwert für den Zuschlag der verzögert-elastischen Verformung von 0,4.

Bei den mit dem Ansatz von Ross angeglichenen Rückverformungskurven ergab sich dagegen für alle Versuche — unbeeinflusst von der Zementfestigkeitsklasse — ein mittlerer Wert von rd. 0,18, d. h. daß die Größe der verzögert-elastischen Verformungen bei im hohen Alter belasteten Betonen zu hoch eingeschätzt wird.

6.3 Zeitlicher Verlauf der verzögert-elastischen Verformung

Der Faktor k_v , der den Ablauf der verzögert-elastischen Verformung anzeigt, ergibt sich gemäß der Ordinate in Bild 5 aus den φ -Werten für die Rückverformungen zum Zeitpunkt t nach Entlastung bezogen auf die entsprechenden Endwerte.

$$k_v = \frac{\varphi_{v,t}}{\varphi_{v,\infty}} [-]$$

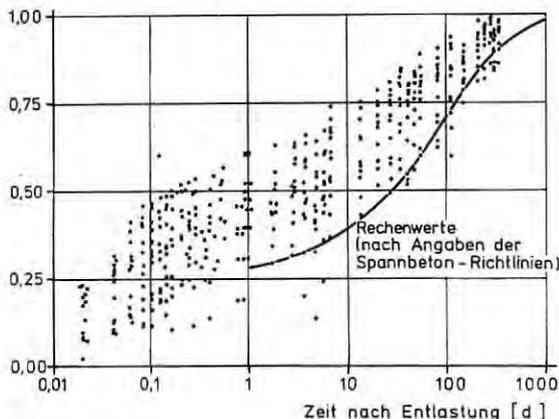


Bild 5 Zeitliche Entwicklung der verzögert-elastischen Verformung

In Bild 5 sind die Werte für alle untersuchten Betone aufgetragen und gleichzeitig die Kurve aus den Spannbeton-Richtlinien [2], die am unteren Rand des Punktebandes liegt.

Der Abbau der verzögert-elastischen Dehnung lief also im allgemeinen schneller ab als nach den Richtlinien. Nach 0,5 h kann schon ein Viertel, nach 2,5 h schon die Hälfte der verzögert-elastischen Dehnung abgebaut sein. Bis zum derzeitigen Stand der Auswertung ist es noch nicht gelungen, das Punkteband in schmalere Bänder oder in Kurven aufzuteilen, mit denen eine genauere Aussage über k_v für bestimmte Zementfestigkeitsklassen möglich wäre.

6.4 Endkriechwert

Die aus den Meßwerten nach Ross ermittelten Endkriechwerte wurden den nach Angaben der Richtlinien berechneten Werten in

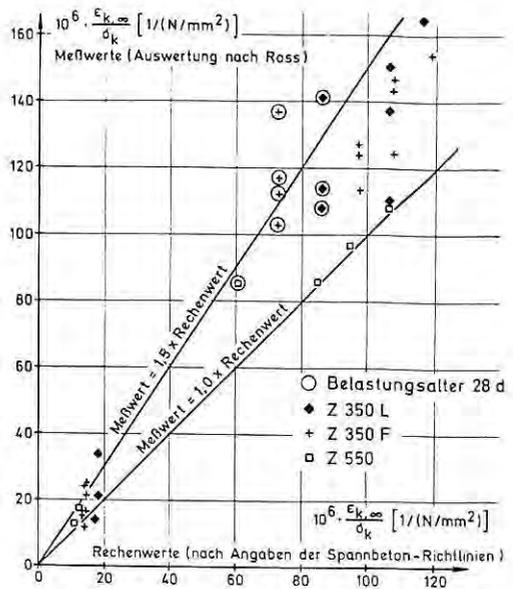


Bild 6 Vergleich der Endwerte der Kriechverformung

Bild 6 gegenübergestellt, und zwar zunächst in ihrem absoluten Betrag.

In Abszissenrichtung sind die Werte der Richtlinien dargestellt, in Ordinatendrichtung die gemessenen Werte. Als Orientierungshilfe sind die Linie der Wertegleichheit sowie die mit dem Faktor 1,5 eingezeichnet. Die dem Ursprung am nächsten liegende Wertemenge stammt aus den Versuchen im hohen Alter.

Insgesamt wird deutlich, daß die Endwerte unabhängig vom Belastungsalter nach dem Richtlinienansatz fast ausschließlich kleiner ausfallen als die nach Ross berechneten Endwerte. Besonders deutliche Abweichungen zeigen die 28 d-Werte, die in der oberen Bildhälfte durch Kreise hervorgehoben sind. Der gleiche Trend ergibt sich auch dann, wenn statt der bezogenen Kriechverformungen die Kriechzahlen aufgetragen werden.

Werden die Meß- und Rechenwerte von Bild 6 auf ihren jeweiligen 28 d-Wert bezogen, so entsteht als Bild 7 eine Darstellung des Einflußfaktors Belastungsalter, wie sie aus DIN 1045 [4] bzw. aus den CEB-FIP-Richtlinien [3] bekannt ist.

Die Abszisse zeigt in logarithmischer Teilung das Belastungsalter in d, die Ordinate gibt linear das Verhältnis der bezogenen Endwerte der Kriechzahlen an. Die Darstellung gilt für die hier vorliegenden Betone der Konsistenz K3 (es werden nur die Betone ohne Zusatzmittel betrachtet [8]). Die Angaben der Richtlinien sind, abhängig von der Festigkeitsentwicklung der Zemente, als Kurvenzüge dargestellt. Die Punkte repräsentieren die Meßwerte.

Anhand dieses Bildes können die Aussagen in Abschnitt 6.1 in ihren praktischen Auswirkungen gesehen werden:

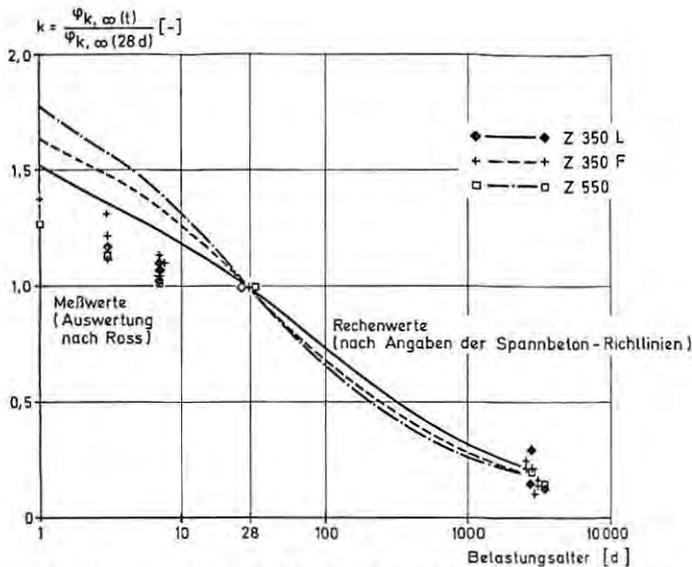


Bild 7 Belwert k für den Einfluß des Belastungsalters auf die Kriechverformung

Es wird deutlich, daß der Einfluß des Belastungsalters von den Richtlinien in etwa zutreffend abgeschätzt wird. Allerdings treten Abweichungen in sehr jungem Alter auf, während im hohen Alter keine systematischen Abweichungen, wohl aber merkliche Streuungen um den Richtlinienwert zu beobachten sind. Die Unterschreitung der Richtlinienwerte im Belastungsalter unterhalb 28 d ist, ebenso wie die starke Streuung im hohen Alter, darauf zurückzuführen, daß hier, im Gegensatz zu Bild 6, bezogene Werte dargestellt sind. Bezogen wird jeweils auf den 28 d-Wert, bei dem sich stets eine besonders deutliche Diskrepanz zwischen Meßergebnis und Rechenwert nach den Spannbetonrichtlinien zeigte.

7. Zusammenfassung

Bei den Aachener Kriech- und Rückverformungsmessungen bei einem Belastungsalter von 6,5 und 8,5 a sind folgende wichtige Erkenntnisse erzielt worden:

7.1 Der Beton kriecht auch noch bei hohen Belastungsaltern, allerdings scheint bei der hier vorhandenen wirksamen Dicke von 150 mm nach mehr als 10 a Belastungsalter ein Zeitpunkt aufzutreten, bei dem das Kriechen gegen Null geht.

7.2 Für hohe Belastungsalter konnten die Rechenwerte der Spannbeton-Richtlinien bei größeren Streuungen bestätigt werden.

7.3 Für hohe Belastungsalter war die spontan-elastische Verformung größer als das Fließen und dieses größer oder gleich der verzögert-elastischen Verformung.

7.4 Außer dem Fließen nimmt offenbar auch die verzögert-elastische Verformung mit zunehmendem Belastungsalter ab. Ihr Anteil

an der Grundkriechzahl war nur 0,18 gegenüber dem Rechenwert von 0,40.

7.5 Der Abbau der verzögert-elastischen Verformung bei Entlastung verlief bei den meisten Betonen schneller als nach den Angaben der Richtlinien.

7.6 Die gemessenen Kriechverformungen waren bei den meisten der hier untersuchten Betone größer als die nach den Spannbeton-Richtlinien errechneten Werte.

SCHRIFTTUM

- [1] Hummel, A., K. Wesche und W. Brand: Der Einfluß der Zementart, des Wasser-Zement-Verhältnisses und des Belastungsalters auf das Kriechen von Beton. H. 146 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin 1962.
- [2] Bemessung und Ausführung von Spannbetonbauteilen unter Berücksichtigung von DIN 1045. Richtlinien des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Ausgabe Januar 1972. Beton-Kalender 1973, S. 1279/1319.
- [3] CEB/FIP: Internationale Richtlinien zur Berechnung und Ausführung von Betonbauwerken. Prag 1970.
- [4] DIN 1045. Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung. Ausgabe Januar 1972.
- [5] Wesche, K., W. vom Berg und I. Schrage: Kriechverformungen von unbewehrtem Beton in hohem Alter. – Verzögert elastische Verformungen (Rückkriechen) von unbewehrtem Beton. Forschungsberichte F 55 bzw. F 89 des Instituts für Bauforschung, RWTH Aachen. (Veröffentlichung geplant 1977 in der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin.)
- [6] Kordina, K.: Influence of time upon strength and deformation of concrete. Final Report on RILEM Symposium 1958, München. RILEM Bulletin No. 9, 1960.
- [7] Rüschi, 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) S. 49/60, S. 76/86 und S. 152/158.
- [8] Wesche, K., und H. Flatten: Einfluß verschiedener Zementarten auf das Kriechen von Beton. Forschungsbericht F 10 des Instituts für Bauforschung, RWTH Aachen, 1970.
- [9] Wesche, K., und H. Flatten: Einfluß von Zusatzmitteln auf das Kriechen von Beton. Forschungsbericht F 10 a des Instituts für Bauforschung, RWTH Aachen, 1970.
- [10] Rüschi, H., A. Hummel und andere: Festigkeit und Verformung von unbewehrtem Beton unter konstanter Dauerlast. H. 198 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin 1968.
- [11] Stöckl, S., und P. Probst: Kriechen und Rückkriechen von Betonproben nach langer Lasteinwirkung. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Massivbau, TU München, 1976.
- [12] Pfefferle, R.: Zur Theorie des Betonkriechens. Dissertation TU Karlsruhe, 1971.
- [13] Wittmann, F., und M. Setzer: Vergleich einiger Kriechfunktionen mit Versuchsergebnissen. Cement und Concrete Research 1 (1971) S. 679/690.