

# Einige Beziehungen zwischen den Eigenschaften von „grünen“ und „jungem“ Beton und denen des Festbetons\*)

Von Hans-Joachim Wierig, Beckum

## Übersicht

*Unter Grün-Druckfestigkeit des Betons wird die Festigkeit verstanden, die ein nach besonderen Regeln zusammengesetzter Beton unmittelbar nach dem Einbringen, Verdichten und anschließenden Entformen aufweist. Zunächst wird über die wesentlichen Einflußgrößen auf die Grün-Druckfestigkeit des Betons berichtet. Die Möglichkeiten der Herstellung von Betonen mit hoher Grün-Druckfestigkeit werden dargelegt. Danach wird auf Zusammenhänge zwischen der Grün-Druckfestigkeit und den späteren Festbetoneigenschaften eingegangen. Der Wechselwirkung zwischen Verdichtung und Wassergehalt des Frischbetons kommt dabei besondere Bedeutung zu. Die Ursachen für häufig zu beobachtende Mängel an Betonwaren, die damit im Zusammenhang stehen, werden beschrieben und Hinweise für die Herstellung gegeben.*

*Im zweiten Teil wird auf die Eigenschaften von „jungem“ Beton eingegangen. Als junger Beton wird dabei die Übergangsphase zwischen dem verarbeitbaren Frischbeton und dem Festbeton verstanden. In dieser Phase treten gelegentlich Risse im Beton auf. Daher interessiert vor allem das Verformungsverhalten des jungen Betons. In Druckversuchen wurde die Entwicklung der Spannungs-Stauchungs-Linien, des Elastizitätsmoduls und der Bruchstauchung, im Biegeversuch die der Bruchdehnung untersucht. Bruchdehnung und Bruchstauchung durchlaufen einige Stunden nach der Herstellung des Betons ein Minimum, in dem der Beton durch aufgezwungene mechanische Verformungen, Temperaturverkürzungen oder frühes Schwinden zur Ribbildung neigt. Abschließend wird die Relaxation des jungen Betons unter Druck- und Biegebeanspruchung an Beispielen beschrieben.*

## 1. Einführung

Der Beton unterscheidet sich von anderen künstlich hergestellten Baustoffen unter anderem dadurch, daß er seine technisch wesentlichen Eigenschaften nicht schon unmittelbar nach Beendigung des eigentlichen Herstellungsvorgangs besitzt, sondern daß er

\*) Erweiterte Fassung eines Vortrags auf der technisch-wissenschaftlichen Zementtagung des Vereins Deutscher Zementwerke in Wiesbaden am 25. September 1969.

sie erst im Laufe der Zeit allmählich erlangt. In Bild 1 ist als Beispiel für diesen Sachverhalt die Festigkeitsentwicklung zweier Betone in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Beton I ist seiner Zusammensetzung nach ein typischer Beton, wie er für die Herstellung von Betonwaren in Maschinen mit hoher Verdichtungswirkung benutzt wird. Bei Beton II handelt es sich um einen typischen Beton, wie er auf Baustellen für hochwertige Bauteile zum Einsatz kommt. In beiden Fällen steigt die Festigkeit der Betone zu Beginn der Erhärtung in den ersten Tagen relativ schnell an, um dann anschließend nur noch langsam zuzunehmen. In ähnlicher zeitlicher Abhängigkeit wie die Festigkeit entwickeln sich andere Betoneigenschaften.

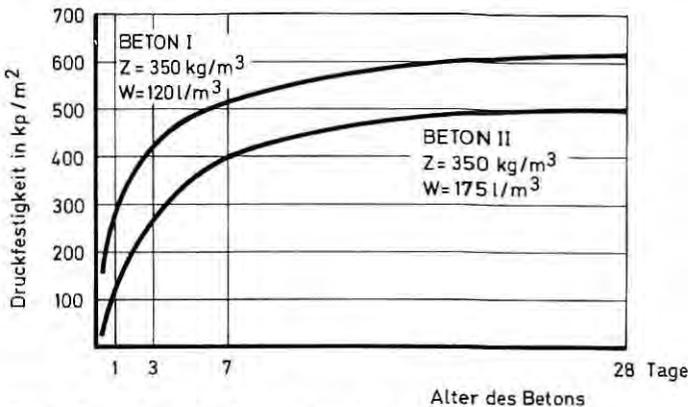


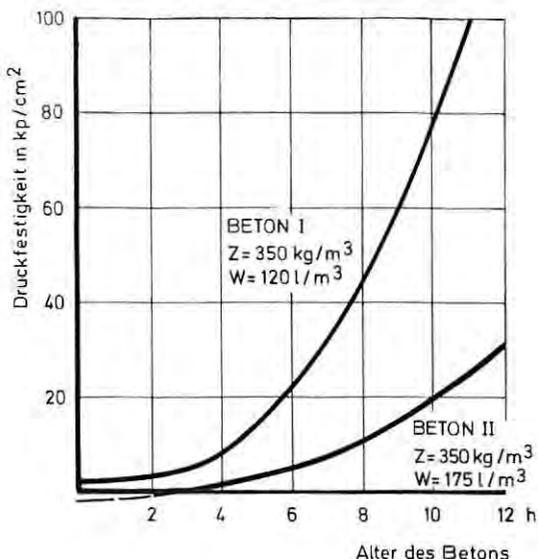
Bild 1 Entwicklung der Druckfestigkeit von zwei Betonen in den ersten 28 Tagen

Verfolgt man die Festigkeitsentwicklung weiter zurück bis in die allererste Zeit nach der Herstellung (Bild 2), dann ist festzustellen, daß die Erhärtungskurven zu Beginn der Erhärtung gegenüber Bild 1 im entgegengesetzten Sinn gekrümmt sind. Die Festigkeit entwickelt sich in den ersten Stunden sehr langsam und steigt dann schnell an.

Nach einem früheren Vorschlag [1] wird ein Beton in seiner ersten Erhärtungsphase von der Herstellung bis zum Erreichen des Maximums der Erhärtungsgeschwindigkeit als „junger“ Beton bezeichnet. Dieses Maximum fällt zeitlich mit dem Wendepunkt der Erhärtungskurve zusammen, der etwas außerhalb des rechten Randes des Bildes 2 liegen würde. In dieser Phase befindet sich der Beton in einem typischen Übergangsstadium, in dem er sich teilweise ganz anders als nach längerer Erhärtung verhält.

Ein wichtiger Sonderfall des „jungen“ Betons, der durch eine *Zeitspanne* definiert ist, ist der „grüne“ Beton. Als „grün“ wird der Zustand des Betons unmittelbar nach dem Herstellen, d. h. im allgemeinen nach dem Verdichten, bezeichnet. Zeitlich ist der „grüne“ Beton also durch einen *Zeitpunkt* festgelegt, in dem die Hydratation des Zementes praktisch noch nicht begonnen hat. Der

Bild 2  
Entwicklung der  
Druckfestigkeit  
von zwei Betonen  
in den  
ersten 12 Stunden



Zusammenhalt eines Beton-Formkörpers bzw. dessen Widerstand gegen Verformung wird weitgehend durch den Wasserfilm zwischen den Zement- und Zuschlagkörnern bedingt.

Zwischen „jungem“ Beton und „grünem“ Beton besteht also technologisch ein Zusammenhang. In der Praxis haben die Eigenschaften und das Verhalten des „grünen“ Betons vor allem für die Herstellung frisch zu entformender Betonsteinerzeugnisse Bedeutung, während das Verhalten des „jungem“ Betons überwiegend für den auf der Baustelle in der Schalung hergestellten Ort-beton interessant ist.

## 2. „Grüner“ Beton

### 2.1 Einflüsse auf die Grün-Druckfestigkeit

Die praktische Problematik wird z. B. aus Bild 3 erkennbar. Die langen, dünnwandigen Betonrohre werden unmittelbar nach der Verdichtung entformt und dürfen sich durch ihr Eigengewicht nicht verformen. Der Beton muß daher zu diesem Zeitpunkt eine gewisse, wenn auch nur geringe, Festigkeit besitzen. Die Voraussetzungen für eine ausreichende Grün-Druckfestigkeit wurden im Zement- und Beton-Laboratorium Beckum vor einigen Jahren systematisch untersucht. Über Einzelheiten der Untersuchungen und der Versuchsanordnung wurde in [1] berichtet. Hieraus werden nachstehend die wichtigsten Einflüsse auf die Grün-Druckfestigkeit in den Bildern 4, 5 und 6 zusammengefaßt.

In Bild 4 werden die Einflüsse des Wassergehaltes und der Verdichtungsenergie auf die Grün-Druckfestigkeit gezeigt (Verdichtungsenergie ausgedrückt durch die Rüttelzeit auf einem Rütteltisch). Betrachtet man z. B. einmal die Kurve „Rüttelzeit 30 sec“, so fällt das deutliche Maximum der Grün-Druckfestigkeit bei einem



Bild 3 Herstellung von 2 m langen, dünnwandigen Betonrohren

Wassergehalt von 120 l pro Kubikmeter Beton auf. Die Grün-Druckfestigkeit fällt ab, wenn der Wassergehalt höher wird; sie fällt ebenfalls ab, wenn er geringer wird, weil dann der im Beton verbleibende Porenraum zu groß wird und die gesamten Oberflächen der Zement- und Zuschlagkörner durch den Wasserfilm nicht mehr ausreichend verbunden werden. Mit zunehmender Verdichtungsenergie, also z. B. bei Rüttelzeiten von 60, 120 oder 180 Sekunden, verschiebt sich das Festigkeitsmaximum nach links, und die Grün-Druckfestigkeit steigt gleichzeitig an. Dabei liegen die Festigkeitsmaxima für die verschiedenen angewendeten Verdichtungsenergien auf einer Hüllkurve. Bild 4 gilt für Betone mit einem Zementgehalt von rd.  $350 \text{ kg/m}^3$ . Das schematisierte Bild 5 zeigt zusätzlich den Einfluß des Zementgehaltes. Jedem der Zementgehalte von 300, 350 und  $400 \text{ kg/m}^3$  entspricht eine der vorgenannten von links oben nach rechts unten verlaufenden „Hüll-

Bild 4  
Einfluß von Wassergehalt und aufgewendeter Verdichtungsenergie (Rüttelzeit) auf die Druckfestigkeit von grünem Beton

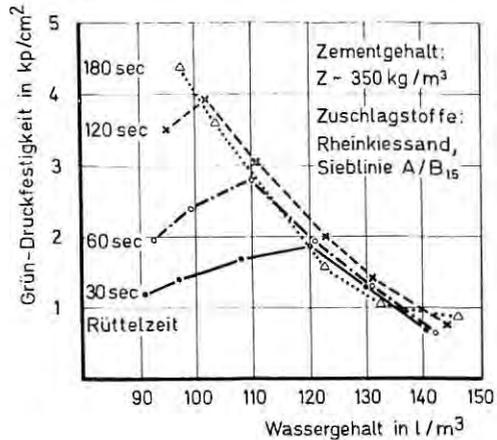
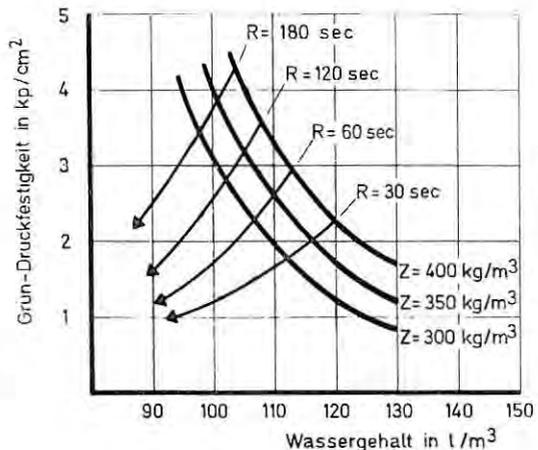


Bild 5  
Einfluß von Zementgehalt, Wassergehalt und aufgewendeter Verdichtungsenergie (Rüttelzeit) auf die Druckfestigkeit von grünem Beton



kurven". Mit steigendem Zementgehalt verschiebt sich die Hüllkurve nach oben, d. h. die Grün-Druckfestigkeit wächst.

Bild 6 zeigt vereinfacht den Einfluß der Schlankheit des Prüfkörpers. Mit zunehmender Schlankheit des Prüfkörpers fällt die Grün-Druckfestigkeit („Grün-Standfestigkeit“) ab, wobei das Maß des Abfallens von Beton zu Beton verschieden ist und sowohl vom Wassergehalt als auch von der Rüttelzeit abhängt [2].

## 2.2 Festbetoneigenschaften von Betonen hoher Grün-Druckfestigkeit

In zusätzlichen Versuchen wurden für Betone unterschiedlicher Grün-Druckfestigkeit ihre wichtigsten Festbetoneigenschaften untersucht.

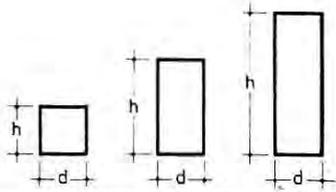
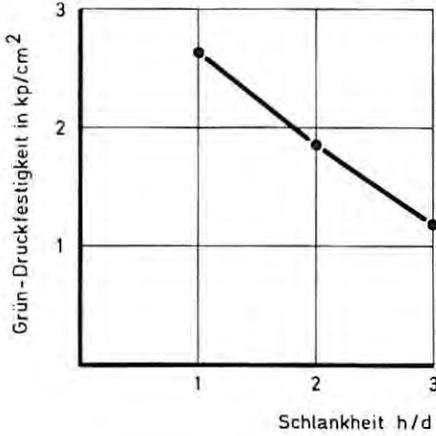


Bild 6  
Einfluß der  
Schlankeit des  
Prüfkörpers  
auf die Druck-  
festigkeit von  
grünem Beton



In Bild 7 ist über dem Wassergehalt die Grün-Druckfestigkeit und mit einem zweiten, hundertfach verkleinerten Ordinatenmaßstab die 1-Tage- und die 28-Tage-Druckfestigkeit der Betone aufgetragen. Während bei der 1-Tage-Festigkeit noch ein mehr oder weniger

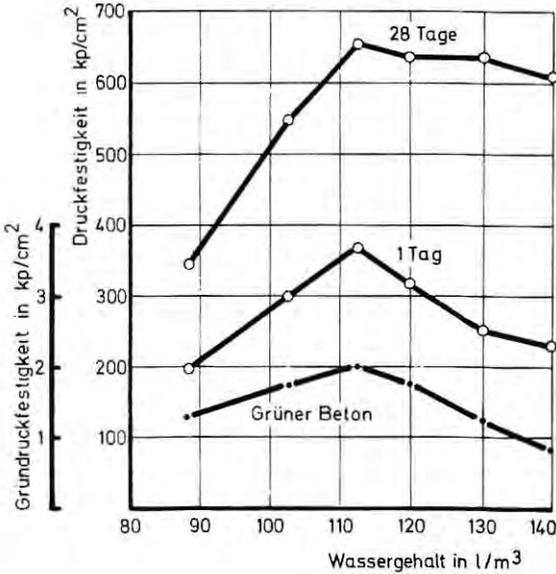
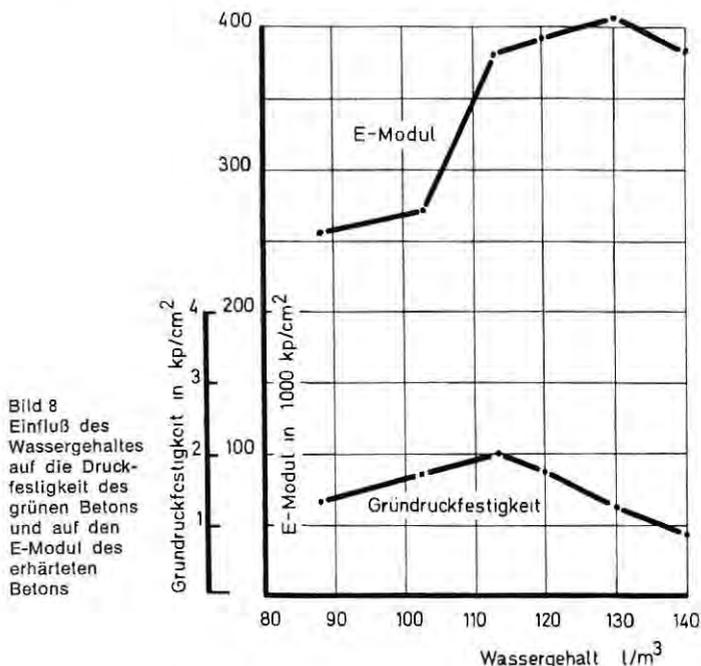


Bild 7  
Einfluß des  
Wassergehaltes  
auf die Druck-  
festigkeit von  
grünem und  
von erhärtetem  
Beton

ger affiner Verlauf mit der Grün-Druckfestigkeit vorhanden ist, ist das bei der 28-Tage-Festigkeit nicht der Fall. Im Alter von 28 Tagen verhalten sich Betone mit geringeren Wassergehalten deutlich schlechter gegenüber denen mit höheren Wassergehalten, z. B. erreicht der 90-l-Beton nur etwa die halbe Druckfestigkeit des Betons mit rd. 110 l Wasser/m<sup>3</sup>.

Im Prinzip ganz ähnlich verhält es sich mit dem in Alter von 28 Tagen gemessenen Elastizitätsmodul, der in Bild 8 zusammen mit der Grün-Druckfestigkeit aufgetragen ist.



Noch ausgeprägter und für die Praxis z. T. besonders bedeutsam zeigen sich entsprechende Unterschiede in der *Wasserdurchlässigkeit*. In Bild 9 sind die Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsprüfung nach DIN 1048 für den 28 Tage alten Beton schematisch dargestellt, und zum Vergleich ist die Grün-Druckfestigkeit mit aufgetragen. Während in die Betone mit den höheren Wassergehalten von 120 bis 140 l/m<sup>3</sup> das Wasser nur sehr wenig eindringt, sind die Betone mit geringerem Wassergehalt sehr undicht und lassen bereits unmittelbar nach Aufbringen der ersten Druckstufe von 1 kp/cm<sup>2</sup> große Wassermengen durch. Selbst bei einer abweichend von DIN 1048 durchgeführten Prüfung mit viel kleineren Wasserdrücken erwiesen sich die Betone mit 90 und 100 l Wasser als undicht.

Man weiß, daß sehr steife, unzureichend verdichtbare Betone wasserdurchlässig sind, auch wenn sie eine hohe Druckfestigkeit

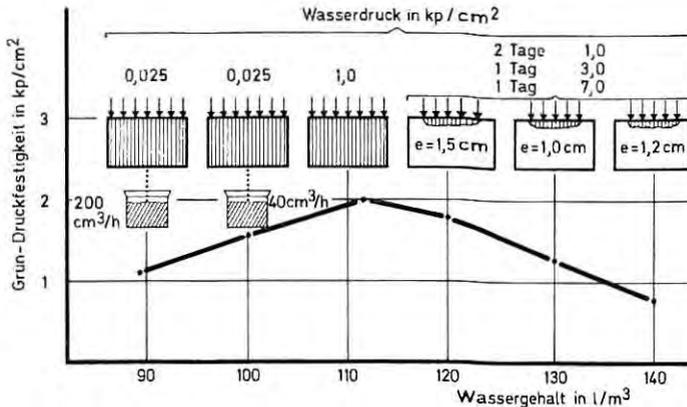


Bild 9 Einfluß des Wassergehaltes auf die Druckfestigkeit des grünen Betons und die Wasserdurchlässigkeit des erhärteten Betons

nach 28 Tagen aufweisen. Dies trifft hier nach Bild 7 für den Beton mit  $110 \text{ l/m}^3$  Wasser mit einer 28-Tage-Druckfestigkeit von über  $600 \text{ kp/cm}^2$  zu, obwohl dieser Beton nach Augenschein nicht auffallend porig erschien und eine Rohdichte von  $2350 \text{ kg/m}^3$  hatte.

Die Bilder 10 und 11 zeigen Anschnitte eines Betons mit einem höheren, für die Verdichtung ausreichenden Wassergehalt ( $120 \text{ l/m}^3$ ) bzw. einen dafür zu geringen ( $90 \text{ l/m}^3$ ). Während die verbliebenen Poren in den Betonen mit höheren Wassergehalten fast rund und geschlossen sind, haben die Poren in den Betonen mit niederen Wassergehalten längliche oder unregelmäßige Form.

Auch andere Betoneigenschaften, die eng mit dem Gefüge bzw. der Wasserdurchlässigkeit zusammenhängen, werden ähnlich beeinflusst.

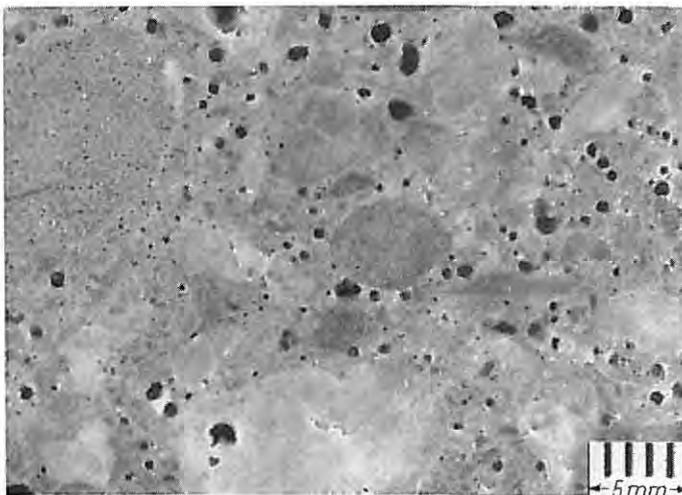


Bild 10 Anschnitt eines Betons mit  $120 \text{ l/m}^3$  Wasser

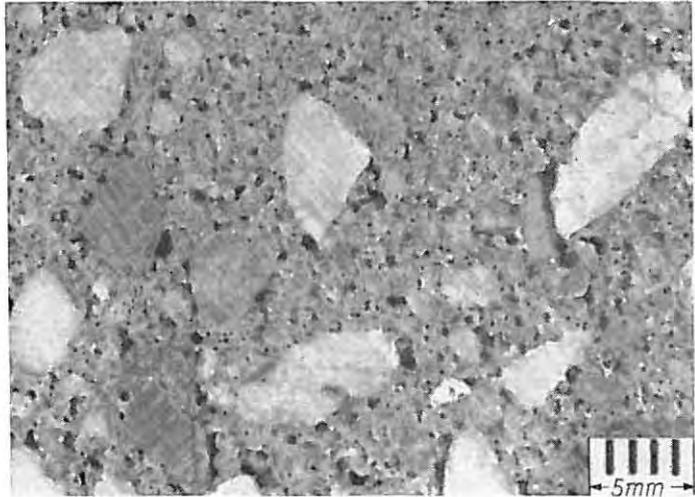


Bild 11 Anschliff eines Betons mit 90 l/m<sup>3</sup> Wasser

Die Prismen in Bild 12, die aus Beton mit zunehmendem Wassergehalt hergestellt wurden, stehen mit dem Fuß in Wasser. Wie durch die Höhe des im Beton aufgesaugten Wassers ersichtlich wird, nimmt auch das *Aufsaugvermögen* mit zunehmendem Wassergehalt (hier bis 120 l/m<sup>3</sup>) entsprechend der zunehmenden Dichte des Betons ab.

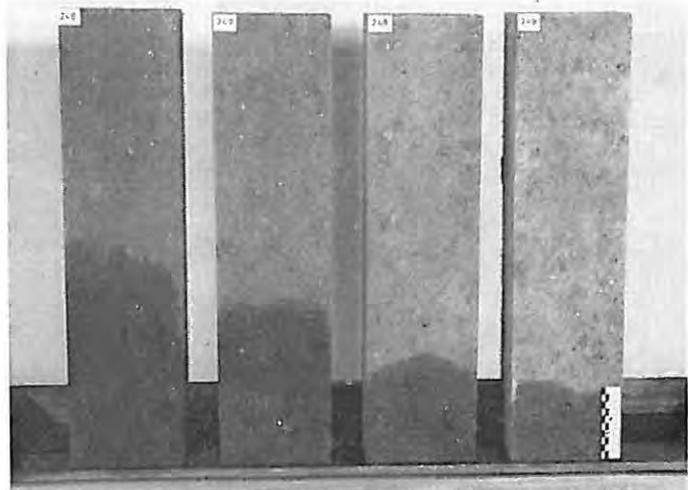


Bild 12 Wasseraufsaugen von Betonprismen 10 cm · 15 cm · 70 cm aus Beton mit Wassergehalten von rd. (von links nach rechts) 90 l/m<sup>3</sup>, 100 l/m<sup>3</sup>, 110 l/m<sup>3</sup> und 120 l/m<sup>3</sup>

Es ist verständlich, daß solche Unterschiede sich auf den *Frostwiderstand* auswirken. Bild 13 zeigt einen **Würfel** des Betons mit nur 90 l Wasser/m<sup>3</sup>, der im Frostversuch bereits nach 7 Frost-Tau-Wechseln Risse aufwies und schließlich zerfiel. Immerhin betrug seine 28-Tage-Druckfestigkeit rd. 350 kp/cm<sup>2</sup> (siehe Bild 7). Auch die Betone mit 100 und 110 l Wasser/m<sup>3</sup> wurden noch durch Frost angegriffen, wenn auch nicht so stark. Dagegen wiesen die Betone mit den Wassergehalten von 120 bis 140 l/m<sup>3</sup> auch nach mehreren Hundert Frost-Tau-Wechseln keine Schäden auf.

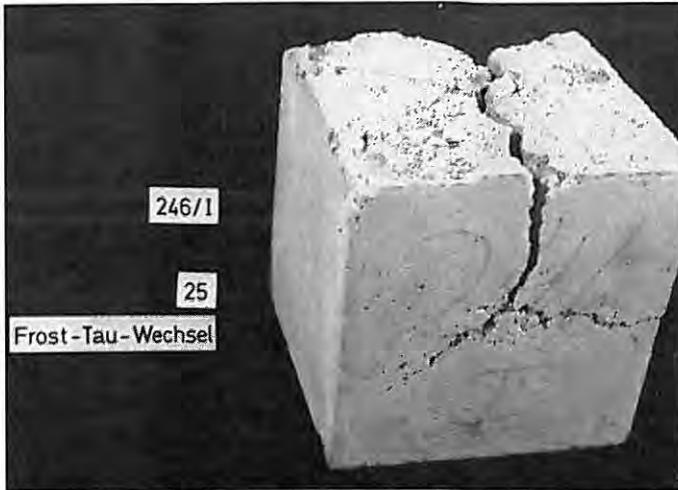


Bild 13 Würfel 10 cm · 10 cm · 10 cm aus Beton mit einem Wassergehalt von 90 l/m<sup>3</sup> nach 25 Frost-Tau-Wechseln

Von der Wasserdurchlässigkeit und dem -aufsaugvermögen bei der Herstellung hängt auch die Möglichkeit des Auftretens von *Kalkaussinterungen* ab. Sie bilden sich besonders dann, wenn z. B. in wasserdurchlässige Betonwaren bald nach der Herstellung Wasser eindringen kann. Bild 14 zeigt, wie an der Unterseite von Platten 12 cm · 20 cm · 20 cm aus Beton mit Wassergehalten von 90 bzw. 100 l/m<sup>3</sup> Tropfenbildung mit Aussinterungen auftreten, wobei auf die Plattenoberseite nur eine Wasserschicht von etwa 20 mm Höhe aufgebracht war.

### 2.3 Praktische Folgerungen

Aus den in Abschnitt 2.2 mitgeteilten Ergebnissen folgt, daß es nicht sinnvoll ist, bei der Herstellung von Betonsteinerzeugnissen aus einem üblicherweise sehr steifen Beton den Wassergehalt so zu wählen, daß bei einer anwendbaren, bestimmten Verdichtungsenergie die höchste Grün-Druckfestigkeit erreicht wird. Es besteht dann die Gefahr, daß durch geringfügige, im praktischen Fabrikationsbetrieb unvermeidliche Schwankungen im Wassergehalt ein Abgleiten in den „zu trockenen“, d. h. links vom Festigkeitsmaxi-

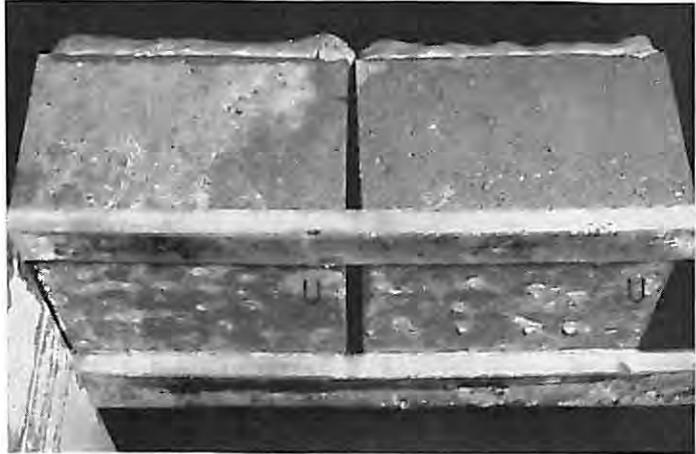


Bild 14 Kalkausblühungen und Aussinterungen an der Unterseite U von Betonplatten 12 cm · 12 cm · 20 cm 1 Tag nach Aufbringen einer 20 mm hohen Wasserschicht; Wassergehalt im Frischbeton bei der linken Platte 90 l/m<sup>3</sup>, bei der rechten Platte 100 l/m<sup>3</sup>

zum befindlichen Bereich erfolgt. Hierdurch wird zwar die Grün-Druckfestigkeit nur verhältnismäßig geringfügig beeinflusst, die Festbetoneigenschaften — und hier wiederum besonders die Wasserdurchlässigkeit und die mit ihr zusammenhängenden Eigenschaften — werden aber entscheidend verschlechtert.

Es ist also erforderlich, den Wassergehalt des Frischbetons immer deutlich im Bereich der höheren Wassergehalte rechts vom Festigkeitsmaximum zu halten. Falls dann die Grün-Druckfestigkeit für eine spezielle Produktionsaufgabe nicht ausreicht, muß entweder die Verdichtungsenergie durch Verlängerung der Rüttelzeit oder aber der Zementgehalt bzw. allgemein der Mehlkorngelalt erhöht werden.

In der Einstellung des „richtigen“ Wassergehaltes liegt daher ein grundsätzlicher Unterschied zwischen der Praxis der Herstellung von Betonwaren und dem Betonieren auf Baustellen vor. Während im letzteren Fall die Anwendung zu wasserreicher Betone in vielerlei Hinsicht abträglich ist, ist es bei der Herstellung von Betonwaren umgekehrt: Hier besteht im Hinblick auf die Festbetoneigenschaften die Gefahr der Verarbeitung zu trockener und nicht mehr ausreichend verdichtbarer Betone.

### 3. „Junger“ Beton

#### 3.1 Allgemeines

Die Eigenschaften der Baustoffe lassen sich in verschiedene Gruppen gliedern:

Die Festigkeitseigenschaften, also z. B. Druck- und Zugfestigkeit, das Verformungsverhalten,

die Porosität und damit zusammenhängende Eigenschaften, wie z. B. Wasser- oder Gasdurchlässigkeit,

die Beständigkeit gegen chemische und physikalische Einflüsse.

Diese Eigenschaften sind grundsätzlich auch in der Übergangsphase des jungen Betons von Wichtigkeit. Um nur zwei Beispiele anzuführen, sei einmal auf die heute oft geforderte sehr schnelle Anfangs-Festigkeitsentwicklung hingewiesen und andererseits daran erinnert, daß junger Beton durch Frost stark gefährdet ist, bis er die sogenannte „Gefrierbeständigkeit“ erreicht hat [3]. Von besonderer Bedeutung kann jedoch das Verformungsverhalten des jungen Betons werden.

So können z. B. besonders in horizontalen Betonflächen im jungen Beton Risse auftreten, wenn der Beton zu einem Zeitpunkt, wo er nicht mehr so weich ist, um von allein wieder „zusammenfließen“ zu können, durch äußeren Zwang bzw. durch behindertes Schwinden über seine Bruchdehnung hinaus beansprucht wird. Wir benötigen daher einen Aufschluß über die Größe und Entwicklung der Bruchdehnung sowie die Relaxationsfähigkeit des Betons in dieser Phase.

Auch die durch die Hydratation des Zementes freigesetzte Wärme, die zu einer mehr oder weniger großen Erwärmung des Betons führt, kann die Ursache für das Entstehen von Rissen in jungem Beton sein. Durch viele Messungen ist der Temperaturverlauf in Bauwerken in Abhängigkeit von den jeweiligen speziellen Bedingungen (Zement und Zementgehalt, Bauteilabmessungen, Eigenschaften der Schalung, Umgebungstemperatur) bekannt. Eine befriedigende Berechnung der durch ungleichmäßige Temperaturdehnungen hervorgerufenen Wärmespannungen scheidet jedoch oft an der mangelnden Kenntnis der Verformungsgrößen, wie z. B. des Elastizitätsmoduls und des Spannungsabbaus infolge Relaxation in der Phase des jungen Betons.

### 3.2 Spannungs-Stauchungs-Linie und Elastizitätsmodul

Die *Spannungs-Stauchungs-Linie* stellt die mathematische Verknüpfung zwischen der Spannung aus äußerer Belastung und der Verformung im Druckversuch dar. Um diese Zusammenhänge an jungen Betonen mit vergleichsweise sehr geringer Festigkeit prüfen zu können, mußten Prismen mit größerem Querschnitt verwendet werden als in DIN 1048 für Prüfungen an erhärteten Betonen vorgeschrieben ist. Für die Untersuchungen wurden daher Prismen 20 cm · 20 cm · 40 cm benutzt. Die Länge der Meßstrecke betrug 200 mm. Die Verformungen wurden mit sehr leichtgängigen Meßbühren gemessen, die mit Hilfe zweier Leichtmetallbügel an den Betonprismen befestigt waren (Bild 15). Mit dieser Einrichtung ließen sich die Spannungs-Stauchungs-Linien von Betonen mit Druckfestigkeiten bis herab zu etwa 1 kp/cm<sup>2</sup> feststellen. Die Belastung wurde in 10 Stufen von etwa je 1/10 der Bruchlast aufgebracht. Nach Erreichen der jeweiligen Laststufe wurde die Belastung 15 Sekunden lang konstantgehalten und am Ende dieser Pause die Verformung an den Meßbühren abgelesen.

Bild 15  
 Versuchsanordnung  
 zur Bestimmung der  
 chungs-Linie und  
 Spannungs-Stau-  
 des Elastizitätsmo-  
 duls an jungem Be-  
 ton

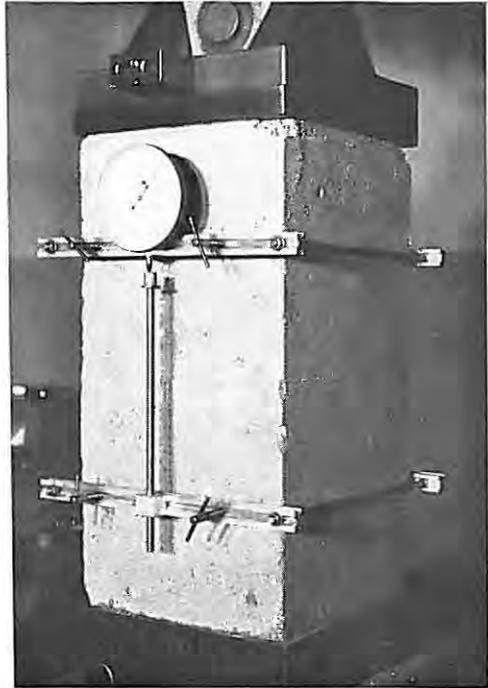


Bild 16 zeigt die bezogenen Spannungs-Stauchungs-Linien eines Betons mit einem Zementgehalt von  $Z = 350 \text{ kg/m}^3$  (PZ 275) und einem Wasserzementwert von  $W/Z = 0,50$  für verschiedene Altersstufen. Auf der Ordinate sind nicht die absoluten Druckspannungen, sondern die auf die Prismendruckfestigkeit bezogenen relativen Druckspannungen aufgetragen. Auf diese Weise lassen sich die Spannungs-Stauchungs-Linien sehr unterschiedlicher Altersstufen des Betons in einem Diagramm darstellen. Das unterschiedliche Verformungsverhalten des jungen und des in der Erhärtung fortgeschrittenen Betons ist zu erkennen. Der entscheidende Übergang von der anfänglich sehr gestreckten, fast geradlinigen Spannungs-Stauchungs-Linie, wie sie z. B. auch von Böden aus der Bodenmechanik her bekannt ist, zu der für erhärtete Betone typischen gekrümmten Form vollzieht sich in einem Alter zwischen der 4. und der 8. Stunde nach der Herstellung des Betons. Die Prismenfestigkeit betrug nach 4 h etwa  $2 \text{ kp/cm}^2$  und im Alter von 8 h etwa  $13 \text{ kp/cm}^2$ . (Zur Einschränkung der Bildbreite ist die auf der Abszisse aufgetragene Stauchung bei  $4\text{‰}$  abgebrochen worden; z. B. steigt die 4-h-Kurve fast linear bis auf  $17\text{‰}$  weiter an.)

In Bild 17, in dem die absoluten Spannungs-Stauchungs-Linien des gleichen Betons für die ersten Stunden aufgetragen sind, ist der Übergang noch deutlicher zu sehen. Außer dem fast geradlinigen Verlauf der 4-h-Kurve fällt auf, daß sich allgemein mit zu-

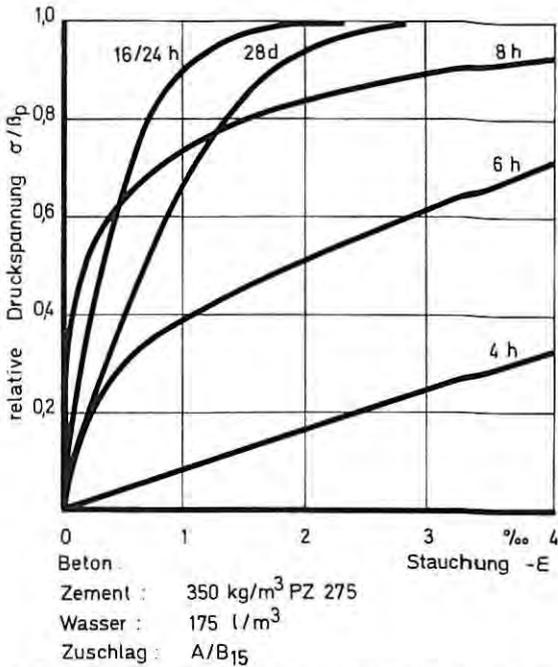


Bild 16 Relative Spannungs-Stauchungs-Linien von Betonen in Abhängigkeit vom Betonalter ( $\sigma$  = Druckspannung;  $\beta_p$  = Prismendruckfestigkeit)

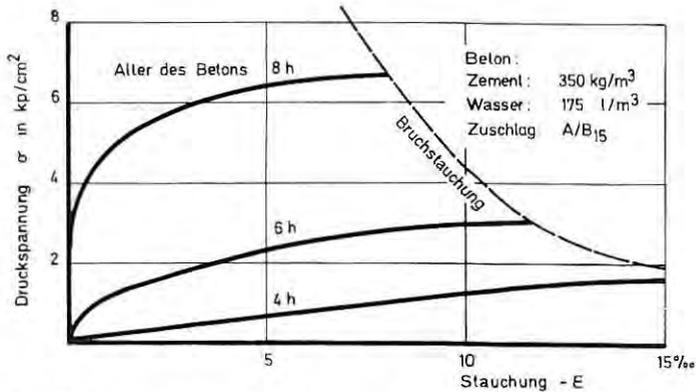


Bild 17 Spannungs-Stauchungs-Linien von jungen Betonen in Abhängigkeit vom Alter des Betons

nehmendem Alter die Bruchstauchung schnell verringert. Dieser Sachverhalt ist in Bild 18 noch einmal gesondert dargestellt. (Hier ist auch auf die formell gute Übereinstimmung mit der im Biegeversuch festgestellten Bruchdehnung, Bild 22, hinzuweisen, wobei

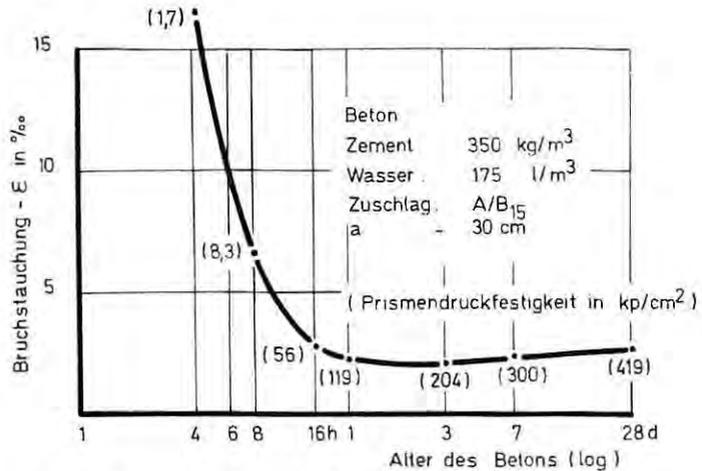


Bild 18 Bruchstauchungen in Abhängigkeit vom Alter des Betons  
(a = Ausbreitmaß nach DIN 1048)

allerdings kein Synchronismus besteht. Das Verformungsminimum wurde bei den untersuchten Betonen im Druckversuch später erreicht als im Biegeversuch.)

Bei der Bestimmung des Verformungsmoduls unter Druckbelastung im jungen Beton muß unterschieden werden, ob die Bestimmung als Verformungsmodul aus der Neigung der Spannungs-Stauchungs-Linie bei *erstmaliger* Belastung oder aber — wie es z. B. in der Neufassung von DIN 1048 vorgesehen ist — als Elastizitätsmodul nach *mehrfacher* Be- und Entlastung erfolgt. Bei älterem Beton ist der Unterschied der Verformung zwischen beiden Belastungsverfahren relativ gering. Er beträgt nur etwa 10 %. In der Phase des jungen Betons kann der Unterschied dagegen zwei Zehnerpotenzen und mehr betragen.

In Bild 19 ist die Spannungs-Stauchungs-Linie eines 4 h alten Betons bei erstmaliger Belastung mit dem typischen, fast geradlinigen Verlauf aufgetragen. An einem zweiten Versuchskörper des gleichen Alters wurde ebenfalls die Spannungs-Stauchungs-Linie ermittelt, aber während der Belastung einmal eine Entlastung vorgenommen. Deutlich wird der sehr große Unterschied zwischen dem Anstieg der Linien, d. h. also der Verformungsmoduln, bei der ersten und zweiten Belastung sichtbar.

In der Phase des jungen Betons, während der auch in der Praxis die erstmalige Belastung des Betons erfolgt, interessieren nun beide Verformungsmoduln: Der Verformungsmodul bei erstmaliger Belastung und der E-Modul nach mehrfacher Schwellbelastung. Es wurden daher beide Moduln ermittelt, wobei der Verformungsmodul bei der ersten Belastung als Sekantenmodul der Spannungs-Stauchungs-Linie zwischen dem Koordinatenursprung und  $\frac{1}{3}$  der Bruchlast errechnet und als  $E_0$ -Modul bezeichnet wurde. Mit E-Modul ist dagegen der Modul bezeichnet, der nach 10facher

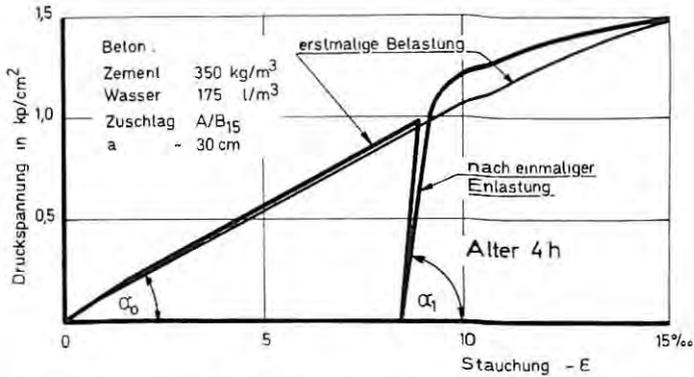


Bild 19 Spannungs-Stauchungs-Linie eines jungen Betons bei erstmaliger Belastung sowie bei einer folgenden Entlastung mit Wiederbelastung

Be- und Entlastung bis zu etwa  $\frac{1}{3}$  der Bruchlast aus dem Anstieg der Sekante erhalten wurde. In Bild 20 ist die Entwicklung der beiden Verformungsmoduln  $E_0$  und  $E$  sowie zusätzlich der Festigkeit in logarithmischem Maßstab eingetragen.

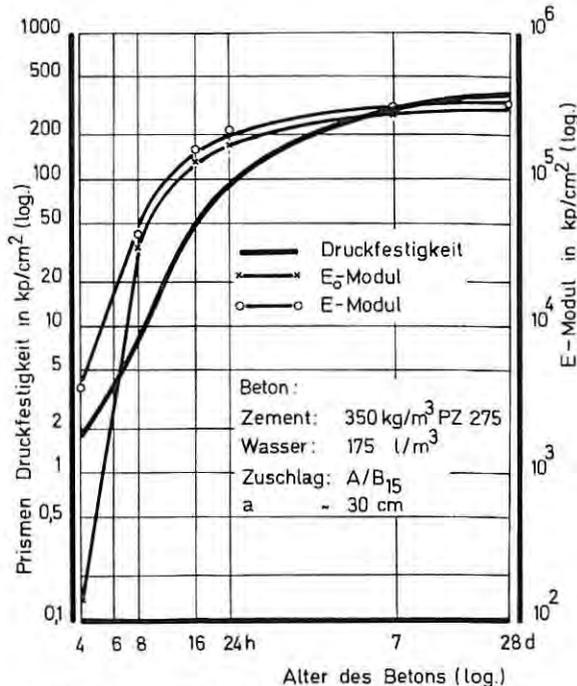


Bild 20 Elastizitätsmoduln  $E_0$  und  $E$  sowie Druckfestigkeit eines Betons in Abhängigkeit vom Alter

Nach Abschluß der „jungen“ Phase, also etwa nach 24 h, ist die bekannte Tatsache zu erkennen, daß der E-Modul schwächer wächst als die Festigkeit. In der vorausgehenden Phase des jungen Betons nimmt dagegen der E-Modul relativ schneller zu als die Festigkeit. Besonders deutlich wird dies beim  $E_0$ -Modul, der zwischen den Altersstufen 4 h und 8 h um das 150fache größer wird. Dieses Anwachsen des  $E_0$ -Moduls geschieht so schnell, daß daraus sowohl meßtechnische als auch baupraktische Probleme erwachsen. Z. B. können deshalb relativ geringfügige Temperaturunterschiede und die damit verbundenen Unterschiede im Erhärtungsverlauf in ein und demselben Betonteil zu sehr unterschiedlichem Verformungsverhalten an verschiedenen Stellen dieses Bauteils in der jungen Phase des Betons führen.

### 3.3 Bruchdehnung

Bild 21 zeigt schematisch die bereits früher [1] ausführlich beschriebene Versuchsanordnung und gleichzeitig die Versuchsergebnisse einer Versuchsreihe, in der die Bruchdehnung des jungen Betons untersucht wurde.

Die Versuche wurden an Betonplatten von 1,55 m Länge, 50 cm Breite und 12 cm Höhe durchgeführt, die auf drei Stützen gelagert waren. Die Mittelstütze unter der biegsamen Bodenschale

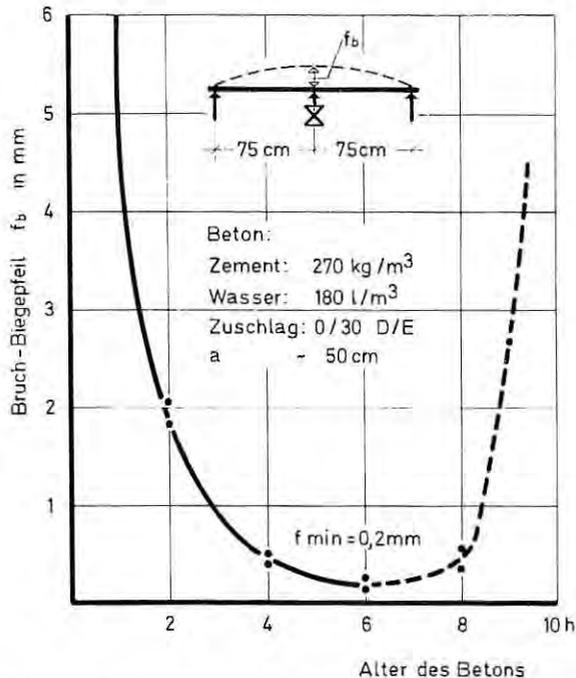


Bild 21 Bruchbiegegefeile von Platten aus jungem Beton in Abhängigkeit von der Zeit

lung wurde nach unterschiedlich langen Erhärungszeiten des Betons so lange angehoben, bis ein RiB im oberen Plattenrand auftrat. Das Anheben erfolgte in Stufen von 0,2 mm mit einem zeitlichen Abstand von einer Minute. Das Bild zeigt die Untersuchungsergebnisse mit einem sehr weich angemachten Beton, wie er häufig im Hochbau verwendet wird. Naturgemäß ist der Beton in den ersten Stunden sehr stark verformbar; die Verformbarkeit nimmt dann schnell ab, und die Kurve erreicht ein Minimum. Der ansteigende Ast ist gestrichelt eingezeichnet, weil hier der gemessene Biegepeil nicht mehr die Durchbiegung der Betonplatte wiedergibt. Denn die Festigkeit des Betons war bereits so weit angewachsen, daß sich beim Anheben der Mittelstütze die Platte von den Randauflagern abhob.

Wird das Abheben der Platten verhindert, so verläuft der ansteigende rechte Kurvenast nach Bild 22 flach ansteigend. Mit dem rechten Ordinatenmaßstab läßt sich die aus dem Biegepeil er-

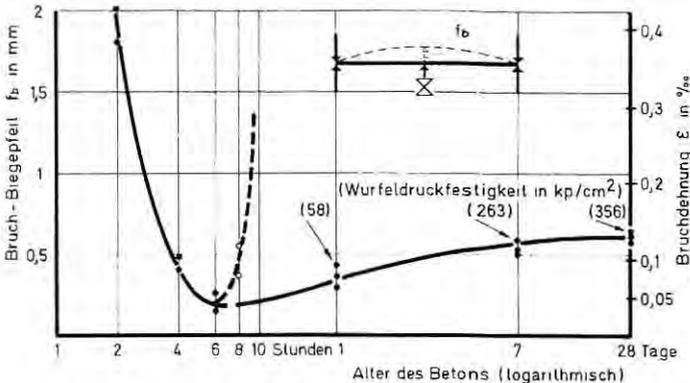


Bild 22 Bruchbiegepeile  $f_b$  und Bruchdehnung  $\epsilon$  biegebeanspruchter Betonplatten in Abhängigkeit vom Alter des Betons

rechnete Bruchdehnung der Randfaser ablesen. Man sieht, wie die Bruchdehnung nach dem Erreichen des Minimums allmählich wieder ansteigt.

Der Verlauf solcher Kurven ändert sich mit verschiedenen Parametern, wie z. B. mit der Betonzusammensetzung und vor allem mit den äußeren Bedingungen wie Temperatur, Wind usw. Darauf wird hier nicht eingegangen, da zum Teil bereits an anderer Stelle [1] darüber berichtet wurde. Bemerkenswert ist, daß die Bruchdehnung bei der hier gewählten Verformungsgeschwindigkeit beim Minimum des Bruchbiegepeils nur rund 0,05 ‰ beträgt, das sind 0,05 mm/m, also ein sehr geringer Wert. Es kommt daher darauf an, besonders den jungen Beton vor aufgezwungenen Formänderungen zu schützen, die sich in der Praxis z. B. sehr häufig durch Bewegungen oder Quellen der Schalung bzw. des Untergrundes einstellen können.

### 3.4 Frühes Schwinden

Auch durch Schwinden kann der junge Beton verformt werden. In Bild 23 ist das freie Schwinden eines Betons im jungen Alter aufgetragen. Die Versuche wurden mit Beton der gleichen Zusammensetzung wie für die in Bild 21 dargestellten Biegeversuche durchgeführt. Bild 23 zeigt, daß die Größe des Schwindens unter sonst gleichen Verhältnissen sehr stark von der Windgeschwindigkeit, also von der Wasserverdunstung, abhängig ist. Es gibt darüber hinaus eine ganze Reihe weiterer Parameter, die an verschiedenen Stellen untersucht worden sind, auf die aber hier nicht im einzelnen eingegangen werden soll. Die Schwindmaße im jungen Beton können nach Bild 23 sehr groß sein, und zwar wesentlich größer als die des erhärteten Betons, die zwischen etwa 0,2 und 0,5 ‰ liegen. Im Beispiel des Bildes werden z. B. nach 4 Stunden 0,7 bzw. 3 ‰ oder mm/m erreicht. Demgegenüber liegt die Bruchdehnung des jungen Betons etwa bei 0,05 ‰

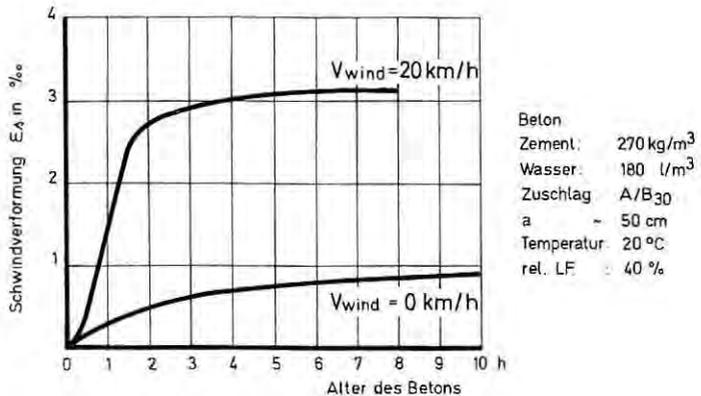


Bild 23 Verformungen von jungem Beton durch unbehindertes Schwinden

und steigt später allmählich auf rund 0,12 ‰ an. Die Verformung durch freies Schwinden ist demnach in jungem Beton um eine gute Zehnerpotenz größer als die Bruchdehnung. Wenn es trotzdem auch bei behindertem Schwinden alles in allem nur selten zu Rissen im jungen Beton kommt, muß unter praktischen Belastungsbedingungen die Bruchdehnung tatsächlich größer sein. Dies ist der Fall, weil offensichtlich die Belastungs- bzw. Verformungsgeschwindigkeit im jungen Beton eine viel größere Rolle spielt als im erhärteten Beton und die Spannungen durch Relaxation relativ schnell abgebaut werden.

### 3.5 Relaxation

Bild 24 zeigt den Abbau von Druckspannungen in einem Zeitraum von 180 min durch Relaxation im jungen und im älteren Beton. Die Kurven lassen erkennen, daß die ursprünglich aufge-

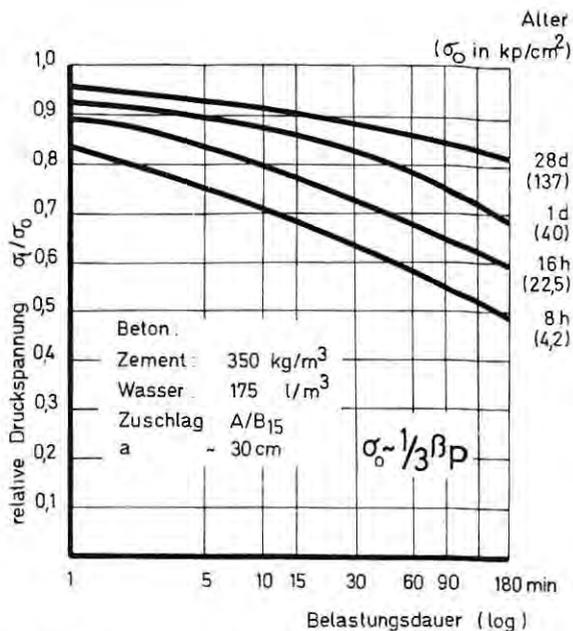


Bild 24 Druckspannungsabbau durch Relaxation in Abhängigkeit vom Alter des Betons ( $\sigma_t$  = Spannung nach  $t$  Minuten;  $\sigma_0$  = Spannung bei Belastungsbeginn, die zu rd.  $\frac{1}{3}$  der Prismendruckfestigkeit  $\beta_P$  gewählt wurde)

brachte Druckspeannung in jedem Alter abgebaut wird, und zwar um so schneller, je jünger der Beton ist. Das gilt für die relativen Spannungen. Dabei muß selbstverständlich berücksichtigt werden, daß die absoluten Spannungen in den jüngeren Betonen viel geringer waren als in den älteren.

Der reine Zugversuch liefert prinzipiell ähnliche Kurven. Der Spannungsabbau durch die Relaxation kann dabei noch schneller vonstatten gehen und in besonderen Fällen nach wenigen Minuten bereits vollständig sein, ohne daß makroskopische Risse auftreten.

Das Relaxationsverhalten des jungen Betons wurde auch mit der in Abschnitt 3.3 erwähnten Versuchseinrichtung im Biegeversuch untersucht. Die in Bild 25 dargestellten Ergebnisse für 2 h und 4 h alten Beton sind dazu in das Bild 21 eingetragen worden. Die Kurve des Bildes 21 gibt an, um welches Maß die Mittelstütze zu einem bestimmten Zeitpunkt angehoben werden mußte, um an der Plattenoberseite einen Riß zu erzwingen. Z. B. betrug dieses Maß (Bruch-Biegepeil) nach 2 Stunden  $f_b = 2$  mm. Nun wurde in einer weiteren Versuchsreihe an Platten aus dem gleichen Beton die Mittelstütze nach 2 Stunden und in einer anderen Versuchsreihe nach 4 Stunden nicht bis zum Bruch, sondern nur um etwa  $\frac{3}{4}$  des Bruch-Biegepeils angehoben, also z. B. nach 2 Stunden um 1,5 mm. Nach 30 Minuten wurde dann jeweils die Mittelstütze bis zum Bruch angehoben. Es zeigte sich, daß die *zusätzliche* Ver-

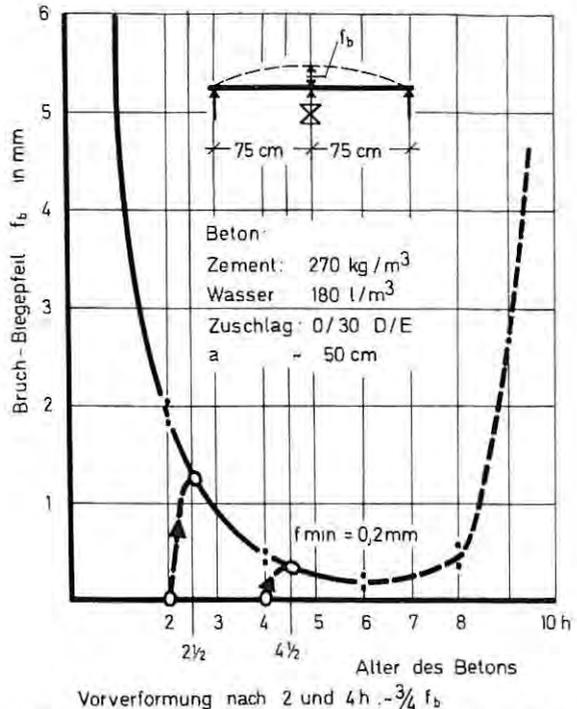


Bild 25 Bruchbiegepfeil auf Biegung beanspruchter Platten aus jungem Beton nach stufenweiser Verformung während 30 min

formung nach den 30 Minuten (Alter des Betons  $2\frac{1}{2}$  Stunden) mit rd. 1,2 mm genau so groß war wie beim Beton, der nach  $2\frac{1}{2}$  Stunden direkt bis zum Bruch belastet worden wäre. Führt man diesen Versuch für verschiedene Zeiten aus, so ergibt sich für die zusätzliche Verformung fast die gleiche Kurve wie die in Bild 21 dargestellte Kurve für die direkt, also rascher aufgebrauchte Verformung. Die durch die Verformung hervorgerufenen Spannungen sind also bereits nach 30 Minuten abgebaut gewesen. Es hat nach den bisherigen Versuchsergebnissen den Anschein, als ob dieser Abbau sogar noch schneller erfolgt und daß er sich auch mehrfach wiederholen läßt. Das bedeutet, daß die Zugverformbarkeit bis zum Bruch, also der Bruch-Biegepfeil, bei einer sehr langsam erzwungenen Verformung größer wird als bei einer relativ rasch auftretenden Verformung wie in Bild 21.

#### 4. Zusammenfassung

Die Grün-Druckfestigkeit des Betons hängt vor allem von der Verdichtungsenergie, dem Wassergehalt und dem Zementgehalt ab. Bei einer bestimmten Verdichtungsenergie können relativ geringe Schwankungen im Wassergehalt die Festbetoneigenschaften sehr stark beeinflussen. Es ist anzustreben, immer einen aus-

reichend hohen Wassergehalt anzuwenden, da bei zu trockenen Mischungen die Festbetoneigenschaften sehr stark verschlechtert werden.

Unter den Eigenschaften des „jungen“ Betons kommt besonders dem Verformungsverhalten Bedeutung zu. In den ersten Stunden nach der Herstellung sind sowohl die Bruchstauchung als auch die Bruchdehnung sehr groß. Beide nehmen dann aber schnell ab. Gleichzeitig steigt der Elastizitätsmodul (Verformungsmodul) schnell an, und zwar wesentlich schneller als die Festigkeit. Der Spannungsabbau durch Relaxation vollzieht sich im jungen Beton schneller als im weitgehend erhärteten Festbeton.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Wierig, H.-J.: Eigenschaften von „grünem, jungem“ Beton. Druckfestigkeit — Verformungsverhalten — Wasserverdunstung. beton 18 (1968) H. 3, S. 94/101.
- [2] Wierig, H.-J.: Zur Frage der Theorie und Technologie des grünen Betons. Habilitationsschrift TU Hannover 1971.
- [3] Basalla, A.: Über die Widerstandsfähigkeit des jungen Betons gegen Frosteinwirkung. Der Bauingenieur 39 (1964) H. 4, S. 153/156.