

# Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung

Von Helmut Weigler, Darmstadt \*)

## Übersicht

*Bauteile aus Beton haben in erster Linie solche Lasten aufzunehmen, die dauernd vorhanden sind. Die üblichen Bemessungsverfahren berücksichtigen in gewissem Maße auch den Einfluß zusätzlicher, nur zeitweise vorhandener Lasten. Wenn darüber hinaus Belastungen zu häufig wiederholten Spannungen veränderlicher Größe führen, müssen sie gesondert erfaßt werden. Die bei häufig wiederholten wechselnden Lasten ertragbare Beanspruchung des Betons, die Dauerschwingfestigkeit, wird in typisierten Druckschwellversuchen mit konstanter Schwingbreite ermittelt. Auf die Kurzzeitfestigkeit bezogen, ist sie weithin unabhängig von Betonzusammensetzung und Festigkeitsklasse. Wenn sich die Schwingbreite zeitlich verändert und nicht bei jedem Lastwechsel die maximale Schwingbreite erreicht wird, ist die Tragfähigkeit eines Bauteils größer. Versuche und Verfahren zur Ermittlung der Dauerfestigkeit werden beschrieben. Auch über die Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei exzentrischer Belastung und über die Einflüsse wiederholter Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen wird berichtet. Die Ausführungen machen deutlich, daß nicht allein die Festigkeit, sondern auch die Verformbarkeit von wesentlicher Bedeutung für die Eignung eines Baustoffs ist.*

## 1. Allgemeines

Bei der Bemessung eines Bauwerks geht man üblicherweise davon aus, daß die aufzunehmenden Lasten dauernd vorhanden sind und setzt dementsprechend für die Betonfestigkeit den Rechenwert  $\beta_R = 0,85 \cdot 0,8 \cdot \beta_{WN}$  an, wobei der Beiwert 0,8 das Verhältnis Dauerstand- zu Kurzzeitfestigkeit beschreibt. Dies ist zutreffend für eine ruhende Belastung. Aber auch die Auswirkung einer über die Zeit veränderlichen Nutzlast wird damit in der Mehrzahl der Fälle ausreichend erfaßt. Der Anteil des Eigengewichtes an der Gesamtbelastung eines Bauteils liegt im Regelfall zwischen  $\frac{1}{2}$  und  $\frac{2}{3}$ . Für das entsprechende Verhältnis Unter- zu Oberspannung beträgt die Dauerschwingfestigkeit ebenfalls etwa 80 % der Kurzzeitfestigkeit.

\*) Nach einem Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '80 vom 1. bis 3. Oktober in Hannover

Nicht erfaßt wird damit die Auswirkung einer Belastung, die zu häufig wiederholten Spannungen veränderlicher Höhe führt. Bauwerke, bei denen das Verhalten des Betons unter einer solchen Beanspruchung für die Tragfähigkeit maßgebend sein kann, sind z. B. turmartige Gebäude, bei denen die Windbelastung dominiert, oder Meeresbauwerke, bei denen der Lastfall Wellen die entscheidende Bemessungsgröße darstellt.

Betonbauteile sind aber vielfach noch einer anderen Einwirkung ausgesetzt, nämlich wiederholten Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen. Diese bewirken im Beton wechselnde Zugeigenspannungen, die sich den konstruktionsbedingten Zugspannungen überlagern.

## **2. Dauerschwingfestigkeit**

### **2.1 Wöhlerlinie**

Die bei häufiger Lastwiederholung ertragbare Beanspruchung, die Dauerschwingfestigkeit, ist generell kleiner als die bei zügiger Laststeigerung von Null bis zum Versagen ermittelte Kurzzeitfestigkeit. Die Ursache dafür ist, daß Belastungswechsel hinreichender Größe im Werkstoff Strukturänderungen, z. B. in Form von Mikrorissen, hervorrufen, die sich über die Zeit akkumulieren und schließlich zum Bruch führen. Man bestimmt Festigkeit und Lebensdauer in typisierten Dauerschwingversuchen und schließt aus den Ergebnissen auf das Verhalten unter ähnlichen Beanspruchungen.

Die Grundlage bildet die im Einstufenversuch unter zentrischer Druckbelastung ermittelte Wöhlerlinie. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen Schwingbreite und ertragbarer Lastspielzahl bei einer vorgegebenen Unterspannung. Im allgemeinsten Fall geht sie im Bereich  $10^6$  bis  $10^8$  Lastwechsel in eine Horizontale über, deren Ordinate die Dauerschwingfestigkeit darstellt. Die Wöhlerlinie hat aber noch eine weitergehende Bedeutung. Sie unterteilt nämlich das Festigkeitsverhalten eines Werkstoffes schlechthin in drei charakteristische Bereiche (Bild 1). Der Bereich um den Schnittpunkt mit der Spannungsachse entspricht der Kurzzeitfestigkeit. Daran schließt sich unterhalb des geneigten Astes der Zeitfestigkeitsbereich an. Hier führt jede Schwingbeanspruchung früher oder später zum Bruch, die Lebensdauer ist also begrenzt. Dieser Bereich geht unterhalb des waagerechten Astes über in den Dauerfestigkeitsbereich, Beanspruchungen bis zu dieser Höhe können beliebig oft ertragen werden, die Lebensdauer ist unbegrenzt. Rechts und oberhalb der Wöhlerlinie befindet sich der Bereich der Betriebsfestigkeit. Er beschreibt die Lebensdauer für alle die Fälle, in denen keine über die Zeit konstante Schwingbeanspruchung vorliegt, sondern in denen sich – wie in der Praxis überwiegend – die Schwingbreite in gesetzmäßiger oder zufälliger Folge verändert.

### **2.2 Zeit- und Dauerfestigkeit**

Die bezogene Dauerschwingfestigkeit, also das Verhältnis Dauer- zu Kurzzeitfestigkeit, ist weithin unabhängig von Zusammenset-

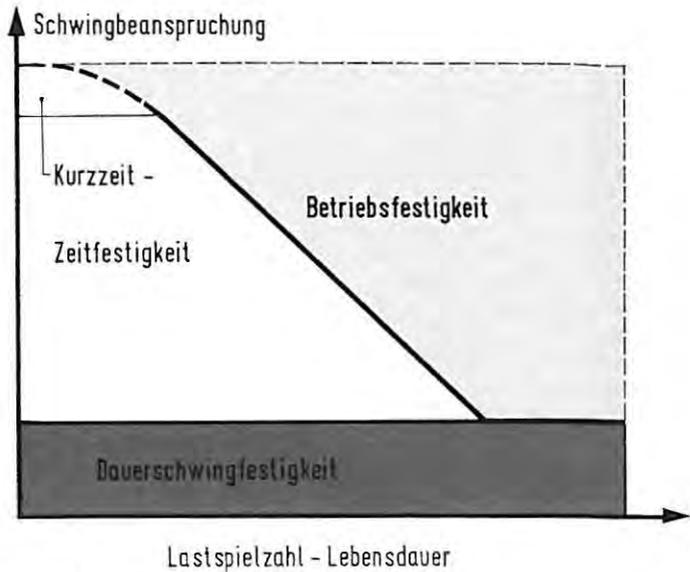


Bild 1 Bedeutung der Wöhlerlinie

zung und Festigkeitsklasse des Betons. Die Wöhlerlinien für jeweils konstante Unterspannung bilden bei halblogarithmischer Darstellung Geraden, die allerdings bis zu  $10^6$  Lastwechseln den erwarteten Übergang zur Horizontalen vermissen lassen (Bild 2). Die Bruchlastspielzahlen auf den einzelnen Spannungsniveaus sind logarithmisch normalverteilt. Ihre Streuung läßt zunächst vermuten, daß man nicht von einer mittleren Wöhlerlinie, sondern von einem Ver-

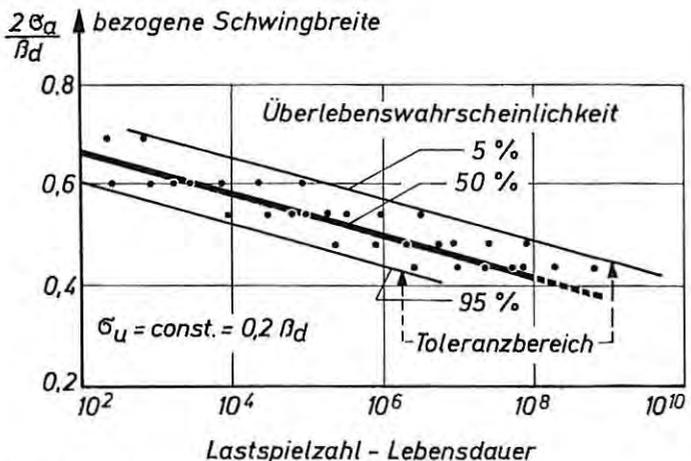


Bild 2 Wöhlerlinien für konstante Unterspannung [1]

trauensbereich ausgehen müsse. Ein solcher Bereich läßt sich durch die Linien für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % und 5 % beschreiben. Nun lassen sich aber die genannten Streuungen allein durch die Streuung der als Bezugswert gewählten Kurzzeitfestigkeit erklären [1]. Da die Bemessung bereits von einem unteren Toleranzwert dieser Kurzzeitfestigkeit ausgeht, kann man die bezogene Dauerschwingfestigkeit der mittleren Wöhlerlinie mit 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit entnehmen.

Bild 2 gilt für eine Unterspannung, also eine ständig vorhandene Grundbelastung, entsprechend  $0,2 \beta_c$ . Bild 3 enthält zusätzlich Wöhlerlinien für eine Unterspannung von  $0,05$  und  $0,4 \beta_c$ . Es zeigt, daß mit steigender Unterspannung die Dauerschwingfestigkeit abnimmt. Es erfolgt jedoch im untersuchten Bereich bis  $10^7$  Lastwechsel kein Übergang in die Horizontale. Auch schneiden sich die linear extrapolierten Kurven nicht exakt in einem Punkt. Da Überschneidungen unrealistisch sind, muß man annehmen, daß sich im Bereich größer  $10^9$  ein allmählicher Übergang vollzieht. Unter dieser Annahme ergibt sich für Normalbeton eine Quasi-Dauerfestigkeit von etwa  $0,4 \beta_c$  [1].

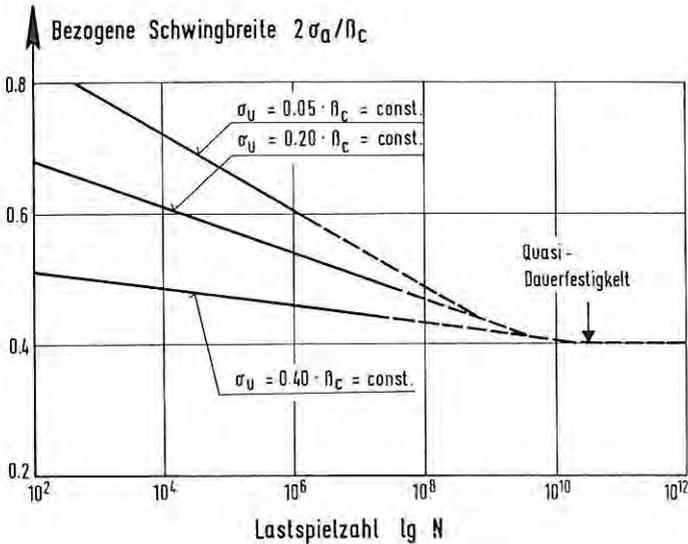
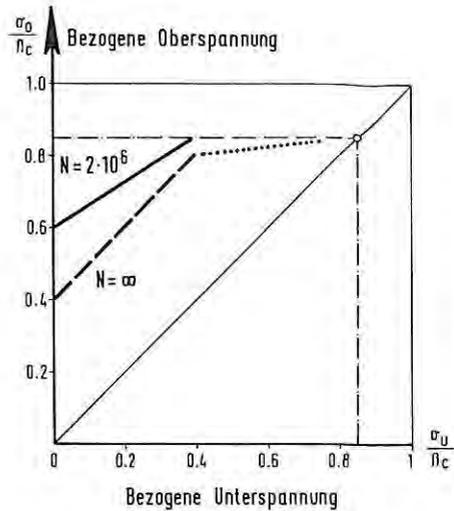


Bild 3 Wöhlerlinien für konstante Unterspannung [1]

Aus den Ergebnissen der Wöhlerversuche erhält man das Dauerfestigkeitsschaubild, das unmittelbar die ertragbare Oberspannung in Abhängigkeit von der Unterspannung beschreibt (Bild 4). Es ist dadurch charakterisiert, daß für die Lastwiederholung „unendlich“ die Begrenzungslinie parallel zur Winkelhalbierenden verläuft. Der Abstand zwischen den beiden Geraden entspricht der Schwingbreite. Bezogene Schwingbreiten von  $0,4$  werden also beliebig oft ertragen, solange die bezogene Oberspannung den Wert  $0,8$  nicht überschreitet. Für eine begrenzte endliche Lastspielzahl ist die ertrag-

Bild 4  
Dauerfestigkeits-  
schaubild [1]



bare Schwingbreite, die Zeitfestigkeit, naturgemäß größer, was in einer Spreizung der Begrenzungslinien zum Ausdruck kommt. Die Fortsetzung der Kurven nach rechts ist nicht eindeutig, was jedoch für die praktische Bemessung ohne Bedeutung ist.

Die dargestellten Gesetzmäßigkeiten gelten auch für eine häufig wiederholte Zugbeanspruchung und eine Druck-Zug-Wechselbeanspruchung.

### 2.3 Betriebsfestigkeit

In der Mehrzahl der Fälle verändert sich die Schwingbreite in gesetzmäßiger oder zufälliger Folge. Eine solche Beanspruchungsfolge läßt eine größere Lebensdauer erwarten, als wenn bei jedem Wechsel die maximale Schwingbreite wirkt. Die bei einer vorgegebenen Grenzlastspielzahl ertragbare maximale Schwingbreite ist größer als die bisher genannten Werte. Sie wird als Betriebsfestigkeit bezeichnet und kann in Mehrstufenversuchen ermittelt werden. Dies setzt voraus, daß aus Langzeitbeobachtungen ein repräsentativer Beanspruchungsablauf bekannt ist.

#### 2.3.1 Lastkollektiv

Die Auszählung der gemessenen Beanspruchungen liefert eine Summenhäufigkeitslinie der einzelnen Beanspruchungsstufen, das sog. Kollektiv. Es gibt Auskunft über Größe und Verteilung der Spannungsausschläge. Aus den vielfältigen möglichen Kollektivformen sind in Bild 5 zwei typische Fälle dargestellt. Die Rechteckform entspricht einer stets gleichbleibenden Schwingbreite, es ist die obere Grenzkurve aller möglichen Formen. Die gekrümmte Kurve, die sog. Normalverteilung, entspricht einer streng regellosen, also rein zufallsbestimmten Schwingbeanspruchung. Dem sind in

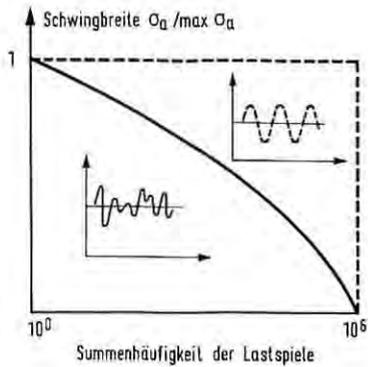


Bild 5  
Kollektivtypen für konstante  
und veränderliche Schwing-  
breiten

Bild 6 drei typische, reale Kollektive gegenübergestellt [2]. Zunächst sind die möglichen Spannungsverteilungen aus der Verkehrsbelastung von Brücken innerhalb eines Zeitraumes von 100 Jahren dargestellt. Die gestrichelt eingetragene Kurve beschreibt eine Normalverteilung. Das Bild zeigt weiter die Verteilung infolge Windbelastung über 50 Jahre. Man erkennt einen überproportionalen Anteil der kleinen Ausschläge. Schließlich ist noch die Verteilung infolge Wellenbelastung über 25 Jahre wiedergegeben. Hier liegt fast eine Normalverteilung vor.

Für den Versuch wird die jeweilige Verteilung durch eine Treppenkurve angenähert, wobei eine betriebsähnliche Durchmischung der

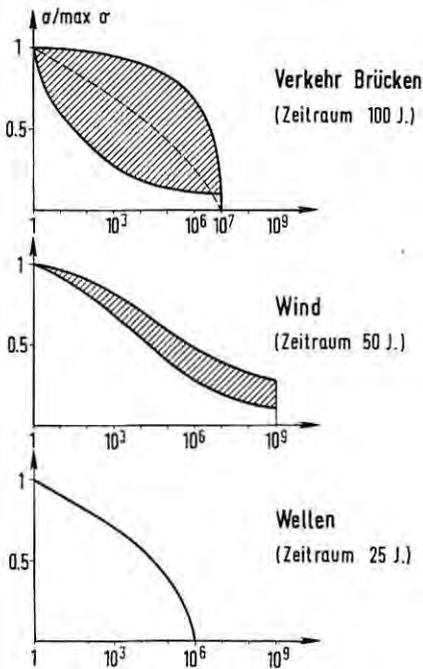


Bild 6  
Reale Lastkollektive (Sum-  
menhäufigkeit der Bean-  
spruchung) [2]

verschieden hohen Stufen durch eine periodische Aneinanderreihung von Teilfolgen erreicht wird. Man spricht von einem Blockprogrammversuch. Mit einem solchen Programm ist jedoch immer nur jeweils ein bestimmter Kollektivtyp erfaßbar. Eine uneingeschränkte Beurteilung mit vertretbarem Aufwand bedingt ein Verfahren, das es erlaubt, allein mit Hilfe bekannter Wöhlerlinien die Auswirkungen von Belastungsstufen unterschiedlicher Größe und Häufigkeit rechnerisch zu erfassen.

### 2.3.2 *Akkumulation*

Der Wunsch nach einem solchen Verfahren ist so alt wie die Beschäftigung mit Fragen der Dauerfestigkeit, und es gibt eine dementsprechende Anzahl von Vorschlägen. Das einfachste Verfahren erhält man bei Annahme einer linearen Auswirkungsakkumulation. Man benutzt als Maßzahl für die Auswirkung der einzelnen Belastungsabschnitte das Verhältnis der jeweils auftretenden ( $n_i$ ) zu den ertragbaren ( $N_i$ ) Lastwechselzahlen, wobei die jeweils ertragbaren Lastwechsel der zugehörigen Wöhlerlinie entnommen werden. Die Verhältniswerte  $n_i/N_i$ , die Teilauswirkungen, werden aufaddiert. Sie bilden die sog. Minersumme, die für den Fall eines Dauerfestigkeitsbruches definitionsgemäß gleich 1 ist. Ein gegebenes Beanspruchungskollektiv führt danach dann nicht zum Bruch, wenn die Minersumme innerhalb des angesetzten Nutzungszeitraums kleiner 1 bleibt. Dabei tragen Beanspruchungen unterhalb der Dauerschwingfestigkeit zur Minersumme nicht bei, da ja deren ertragbares  $N_i$  unendlich ist. Ob und inwieweit dies bei Beton zutrifft, ist umstritten. Man muß daher für die Brauchbarkeit dieses Verfahrens zwei Fälle unterscheiden:

- (1) alle Beanspruchungen liegen im Bereich der Zeitfestigkeit,
- (2) ein Teil der Beanspruchungen liegt im Bereich der Quasi-Dauerfestigkeit,

#### 2.3.2.1 *Zeitfestigkeitsbereich*

Hierfür liegen die Ergebnisse von Mehrstufenversuchen mit einer bezogenen Unterspannung von  $0,2 \beta_c$  und bezogenen Schwingbreiten zwischen  $0,54$  und  $0,64 \beta_c$  vor [1]. Ein Einfluß der Reihenfolge und der Durchmischung von hohen und niedrigen Laststufen war nicht eindeutig erkennbar. Es wurde die relative Summenhäufigkeit der logarithmierten Minersummen errechnet. Die Auftragung im Wahrscheinlichkeitsnetz ergibt mit guter Näherung eine Gerade (Bild 7). Die Minersummen sind also ebenso wie die Bruchlastspielzahlen im Wöhlerversuch logarithmisch normalverteilt. Daß der Mittelwert mit  $1,16$  vom Sollwert 1 abweicht, spricht noch nicht gegen die Brauchbarkeit des Verfahrens, entscheidend ist die Streuung. Eine solche ist allein schon durch die Streuung der Bruchlastspielzahlen in den zugehörigen Wöhlerversuchen bedingt. Die danach zu erwartende Häufigkeitsverteilung ist in Bild 7 gestrichelt eingetragen. Man erkennt, daß die Abweichungen vom Sollwert noch etwas größer sind als bei unmittelbarer Auswertung. Die Streuung der Minersummen ist also allein aus der Streuung der Dauerschwingfestigkeit und damit aus der Streuung der Kurzzeitfestigkeit zu erklä-

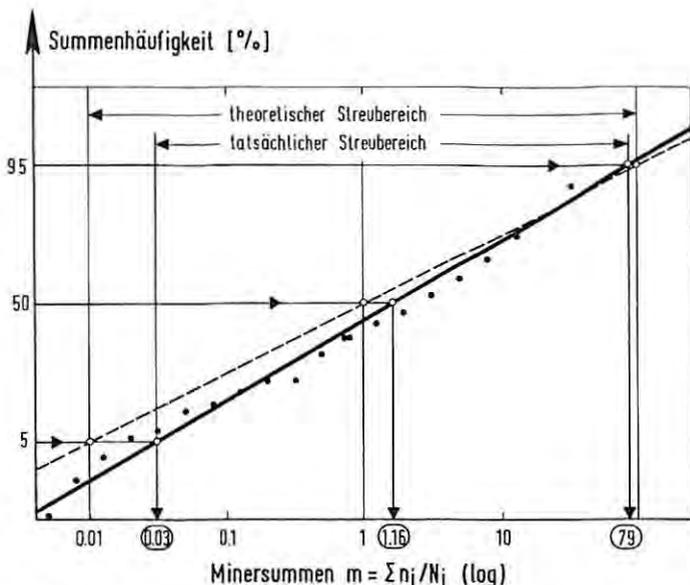


Bild 7 Minersummen  $\log m$  [1]

ren. Danach kann die Auswirkung einer betriebsähnlichen Beanspruchung im Zeitfestigkeitsbereich mit Hilfe der linearen Akkumulation ausreichend abgeschätzt werden.

### 2.3.2.2 Quasi-Dauerfestigkeitsbereich

Hier ist wegen der erforderlichen hohen Lastspielzahlen eine unmittelbare Klärung durch Mehrstufenversuche nicht möglich. Es bleibt nur, Kenngrößen zu bestimmen, welche die Strukturänderungen des Betons unter einer Dauerschwingbeanspruchung beschreiben, und daraus auf die ertragbare Beanspruchung bzw. die Lebensdauer zu schließen. Dazu kann man die Schallemissionsanalyse benutzen, da diese in besonderem Maße geeignet ist, Zustandsänderungen im Werkstoff zu erfassen [4].

Das Verfahren beruht auf der Registrierung und Auswertung von Schallimpulsen, die z. B. bei Ribbildung und Ribfortpflanzung im Inneren der Probe infolge der dabei freigesetzten elastischen Energie emittiert werden. Für die Aufbereitung der empfangenen Signale bestehen verschiedene Methoden. Die einfachsten Kennwerte sind die Impulsrate, das ist die Zahl der je Zeiteinheit freigesetzten Impulse und die daraus durch Integration abgeleitete Impulssumme. Sie beschreibt die Häufigkeit der durch eine innere Strukturänderung bewirkten Emissionen, ohne deren Intensität zu berücksichtigen. Eine weitergehende Aussage erhält man durch Einbeziehung der Impulsamplituden oder noch besser durch eine Analyse der Impulsflächen, welche die letztlich maßgebende freigesetzte Energie beschreiben. Für die bisherigen Auswertungen wurde die Impuls-

summe herangezogen. Die Untersuchungen über die Aussagefähigkeit der Amplituden- und Impulsflächenanalyse bei Beton sind noch nicht abgeschlossen.

Es wurden zunächst Einstufenversuche durchgeführt [3], um die Impulssumme bei Beanspruchungen entsprechend einer Wöhlerlinie zu ermitteln. Das Verhalten von Beton bei häufig wiederholter Belastung verschiedener Höhe verdeutlicht Bild 8. Aufgetragen ist die auf den Bruchzustand bezogene Impulssumme  $S/S_u$  über der bezogenen Lastspielzahl. Dabei beschreibt die Impulssumme Grad und Entwicklung der Strukturänderung, hier Schädigung genannt.

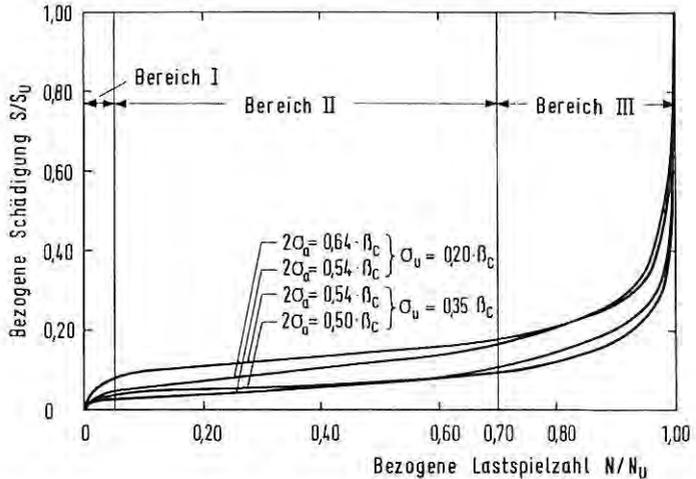


Bild 8 Zeitlicher Schädigungsverlauf bei Einstufenbeanspruchung [3]

Die Kurvenverläufe lassen drei charakteristische Bereiche erkennen. Danach führen bereits wenige Lastspiele zu begrenzten Veränderungen, die dann aber zunächst nicht nennenswert zunehmen. Die entscheidende und letztlich zum Bruch führende Änderung, die instabile Rißfortpflanzung, setzt erst im letzten Viertel der Lebensdauer ein.

Anschließend wurden Mehrstufenversuche durchgeführt und zwar in drei Varianten (Bild 9). Im Fall A lagen beide Beanspruchungsstufen deutlich im Zeitfestigkeitsbereich. In den Fällen B und C wurde eine Beanspruchungsstufe im Zeitfestigkeitsbereich und die zweite im Quasi-Dauerfestigkeitsbereich angenommen. Unterschiedlich war das Verhältnis der Teillastspielzahlen. In den Diagrammen A, B und C von Bild 9 ist jeweils über der Laufzeit die Impulssumme  $S$  als Kennwert für die Veränderung aufgetragen, hier Gesamtschädigung genannt. Die Darstellungen enthalten zwei Kurven. Die ausgezogenen Linien entsprechen den unmittelbar im Mehrstufenversuch gemessenen Werten. Die gestrichelten Kurven wurden rechnerisch gewonnen. Es wurden dazu die Teilschädigungen aufsummiert, die während der beiden abwechselnd aufgebracht

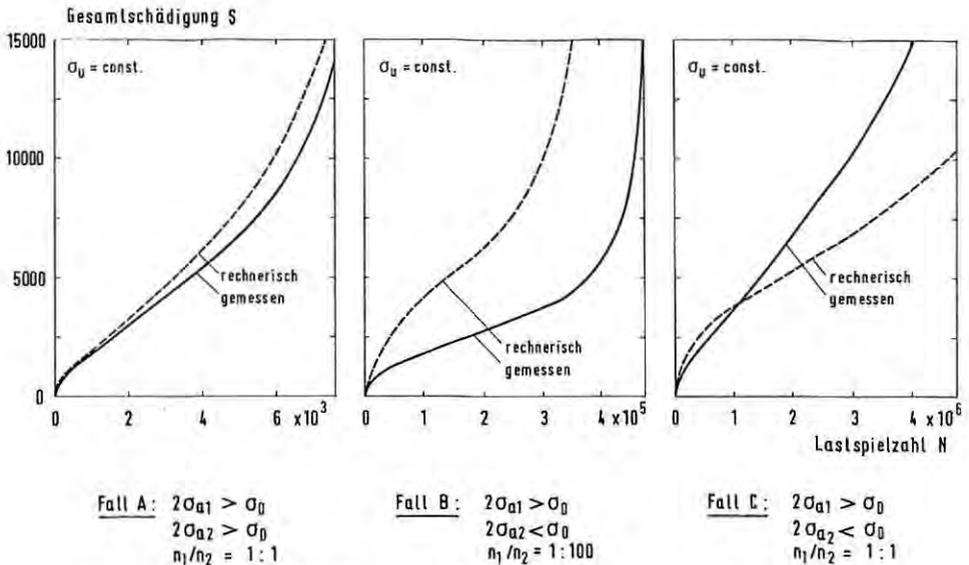


Bild 9 Schädigungsverlauf bei Mehrstufenbeanspruchung [3]

spruchungsstufen nach den Ergebnissen der zugehörigen Einstufenversuche zu erwarten waren.

Im Fall A sind beide Kurven nahezu identisch. Damit ist auch indirekt die Gültigkeit der linearen Akkumulation, der Minerregel, im Zeitfestigkeitsbereich bestätigt.

In den Fällen B und C, eine Beanspruchungsstufe im Dauerfestigkeitsbereich, besteht keine Übereinstimmung zwischen Rechen- und Meßwert. Das bedeutet zunächst einmal, daß auch Beanspruchungen im Quasi-Dauerfestigkeitsbereich zur Veränderung des Betongefüges beitragen. Wesentlich ist aber offenbar das Verhältnis der Teillastspielzahlen. Überwiegt die Häufigkeit der niedrigen Laststufe, im Fall B im Verhältnis 100:1, so kommt es zu einer Art Trainiereffekt, der die Lebensdauer insgesamt erhöhen kann. Die Minerregel, die dies nicht berücksichtigt, führt in solchen Fällen zu einer Beurteilung, die auf der sicheren Seite liegt. Liegt jedoch die Häufigkeit der einzelnen Laststufen jeweils in der gleichen Größenordnung, Fall C, so kommt es zu einer überproportionalen Schädigung. Die Minerregel ist in solchen Fällen nicht anwendbar.

### 3. Spannungsverteilung in der Biegedruckzone

Alle bisher genannten Ergebnisse wurden in zentrischen Druckschwellversuchen gewonnen. Sie sind unmittelbar übertragbar auf zentrisch beanspruchte Bauteile, aber nicht auf die Biegedruckzone. Hier erfährt nur die Randfaser den vollen Spannungsbetrag. Die rechnerisch weniger beanspruchten Nachbarfasern können sich aber an der Spannungsaufnahme beteiligen und bewirken eine Um-

lagerung, was zu einer scheinbaren Erhöhung der Randfaserfestigkeit bzw. zu einer Erhöhung der ertragbaren rechnerischen Randspannung führt. Dieser Effekt ist für ruhende Belastung hinreichend bekannt. Er kommt in der Parabel-Rechteck-Spannungsverteilung nach Bild 11 DIN 1045 zum Ausdruck.

Um zu klären, ob und inwieweit dies auch bei häufig wiederholter Belastung zutrifft [5], wurde die Biegedruckzone durch exzentrisch belastete Prismen simuliert (Bild 10). Die Körper wurden einer Druckschwellbelastung ausgesetzt. Dabei entsprach die Unterlast einer max. Fasertension von etwa  $0,2 \beta_{\sigma}$ . Die Oberlast wurde so gewählt, daß der Bruch nach rd. 700 000 bzw. rd. 40 000 Lastspielen eintrat. Es wurde also der Zeitfestigkeitsbereich abgedeckt. Gemessen wurden die Dehnungen an mehreren über den Querschnitt verteilten Fasern. Als Ergebnis erhält man die Dehnungsgeschichte ausgewählter Fasern über die Laufzeit. Die Kurven in Bild 10 oben rechts beschreiben z. B. die Dehnungsentwicklung der Rand- und der Mittelfaser unter Ober- und Unterlast. Diese Dehnungsverläufe wurden sodann getrennt in entsprechend verformungsgesteuerten zentrischen Druckschwellversuchen nachgefahren und die dazu erforderlichen Lasten registriert. Als Ergebnis erhält man die Spannungsgeschichte der einzelnen Querschnittsfasern über die Laufzeit (Bild 10 unten links). Man erkennt, daß die Beanspruchung der

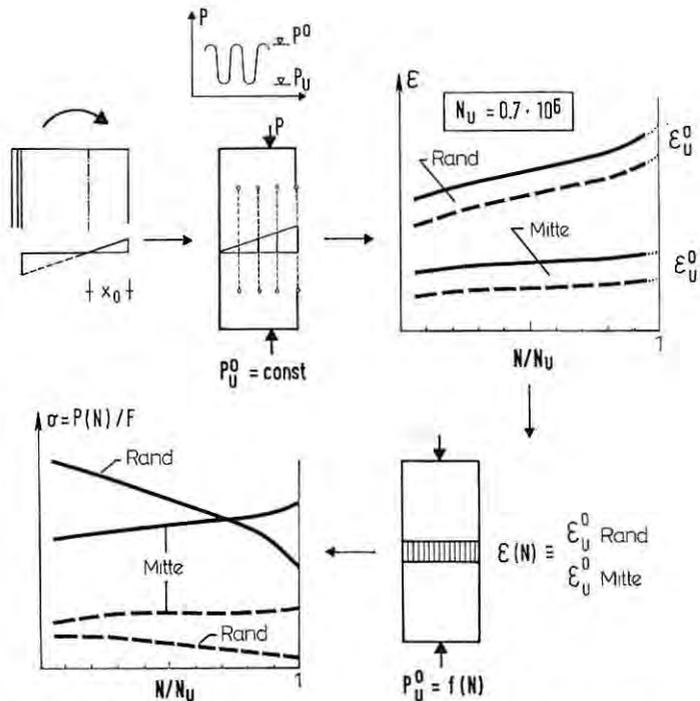


Bild 10 Ermittlung der Spannungsverteilung in exzentrisch beanspruchten Querschnitten [5]

Randfaser mit fortschreitender Lastwiederholung deutlich abnimmt. Damit läßt sich die Spannungsverteilung über die Biegedruckzone zu bestimmten Zeitpunkten konstruieren. Das Ergebnis kann mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingungen kontrolliert werden. Bild 11 zeigt die Änderung der Spannungsverteilung mit fortschreitender Lastwiederholung. Aufgetragen ist die bezogene Oberspannung über der Druckzonenhöhe zum Zeitpunkt  $1/4$ ,  $1/2$  und  $3/4$  der Bruchlastspielzahl. Zusätzlich eingetragen ist die rechnerische Dreieckverteilung bei Versuchsbeginn ( $N=0$ ). Schließlich ist auf der Spannungssache noch die nach den Wöhlerlinien zu erwartende zentrische Dauerschwingfestigkeit um  $0,8 \beta_c$  markiert. Die Darstellung vermittelt 3 Beobachtungen:

- Die Spannungen der jeweils maximal beanspruchten Fasern liegen in der Größenordnung der zentrischen Dauerschwingfestigkeit.
- Die rechnerische Randspannung stellt sich nicht ein. Die zugehörige Druckkraft wird vielmehr durch eine stärkere Aktivierung der Nachbarfasern erreicht, was in einer größeren Völligkeit der Spannungsverteilung zum Ausdruck kommt.
- Mit fortschreitender Lastwiederholung erfolgt eine Spannungsumlagerung vom Rand nach innen.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Tragfähigkeit der Biegedruckzone unter einer häufig wiederholten Belastung im Zeitfestigkeitsbereich im Prinzip mit einer ähnlichen Spannungsverteilung errechnet wer-

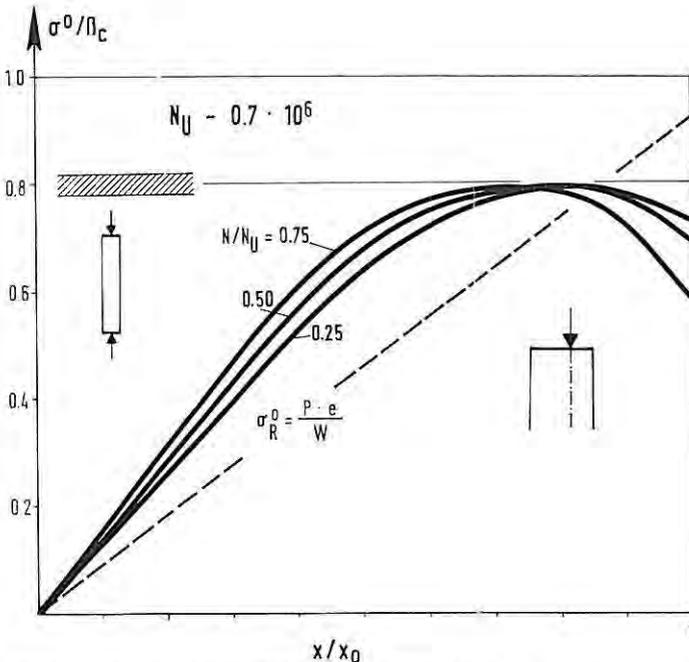


Bild 11 Spannungsverteilung in der Biegedruckzone [5]

den kann wie unter ruhender Belastung. Bedenkt man, daß die Parabel-Rechteck-Verteilung nach DIN 1045 keine mechanisch hergeleitete Funktion darstellt, sondern daß sie nach Rüsç [6] bewußt als „eine geometrisch einfach zu definierende Idealisierung entworfen wurde, die bei der Bemessung zu befriedigenden Ergebnissen führt“, so erscheint ihre Anwendung auch im vorliegenden Fall vertretbar.

#### 4. Wiederholte Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung

Bauteile im Freien sind einer wiederholten Austrocknung und Befeuchtung, wiederholten Temperaturänderungen vorzugsweise in den oberflächennahen Bereichen und u.U. ausgeprägten Frost-Tau-Wechseln im mehr oder weniger durchfeuchteten Zustand ausgesetzt. Es entsteht ein Temperatur- und Feuchtigkeitsgefälle zwischen Kern und Oberfläche der Bauteile. Die den Änderungen in den einzelnen Fasern zugehörigen Verformungen werden behindert. Es kommt, verstärkt durch den heterogenen Betonaufbau, wiederholt zu Zugeigenspannungen, die sich den konstruktionsbedingten Zugspannungen überlagern. Nun bleiben diese Beanspruchungen, eine werkstoffgerechte Konstruktion vorausgesetzt, in der Regel ohne gravierende Auswirkung, wenn man sich hinsichtlich der Betonzusammensetzung und der Ausgangsstoffe in dem durch langjährige Erfahrung abgesicherten Bereich bewegt, den Beton ordnungsgemäß verarbeitet und ausreichend nachbehandelt. Im übrigen pflegen wir diese Beanspruchung zwar als eine Dauerbelastung, aber doch als eine „ruhende“ Belastung im Sinne der eingangs gegebenen Definition anzusehen. Diese Betrachtungsweise wird, wie Versuche zeigen, den tatsächlichen Verhältnissen nicht ganz gerecht.

Dazu wurden Würfel einer konstanten Spaltzugbelastung entsprechend 0,4 bis 0,6 der Spaltzugfestigkeit ausgesetzt und in diesem Zustand wiederholten Frost-Tau-Wechseln unterworfen. Ausgehend von + 20 °C wurden sie im wassergesättigten Zustand an Luft auf – 20 °C eingefroren und anschließend wieder in Wasser aufgetaut. Die Prüfkörper wurden dabei früher oder später durch Spaltbruch zerstört. Damit war die Lebensdauer eindeutig durch die Zahl der ertragenen Wechsel beschrieben. Bild 12 zeigt den Zusammenhang zwischen der bezogenen Spaltzugspannung als der Grundbelastung und der Lebensdauer in halblogarithmischer Darstellung für drei Betone mit Wasserzementwerten von 0,4, 0,65 und 0,9. Für 0,4 und 0,65 überlappen sich die Streubereiche, die Ergebnisse für 0,9 sind davon deutlich abgesetzt.

Die Versuche sind nach Art und Umfang nicht ausreichend, um zahlenmäßige Zusammenhänge herzuleiten. Dies schon allein deswegen nicht, weil die tatsächlichen, vielfältigen Klimabeanspruchungen mit dem gewählten Zyklus nicht im einzelnen erfaßt werden. Aber sie beleuchten die Auswirkung hygrothormaler Beanspruchungen und machen zwei Tendenzen deutlich:

- Bei gleicher Klimabeanspruchung ist die Lebensdauer um so geringer, je größer die lastbedingte Zugspannung. Eine solche liegt im Bauteil z. B. im Verankerungs- und Stoßbereich der Beweh-

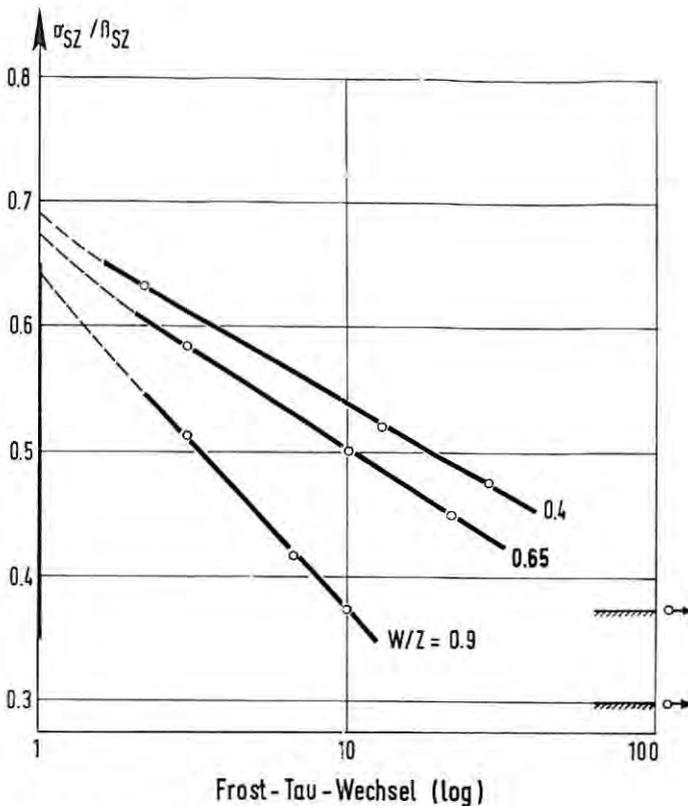


Bild 12 Zusammenhang Spaltzugbeanspruchung – Ertragbare Frost-Tau-Wechsel

rung oder im Einleitungsbereich von Einzelkräften vor. Zwar bringen wir die Betonzugfestigkeit bei der Bemessung nicht in Ansatz. Aber ohne ihre Existenz und ihre stillschweigende Inanspruchnahme wäre Stahlbeton nicht ausführbar. Daß diese Verhältnisse mit steigendem Wasserzementwert ungünstiger werden, ist nicht überraschend.

- Die dargestellten Kurven haben den Charakter einer Wöhlerlinie, gekennzeichnet durch einen logarithmisch linearen Zusammenhang zwischen Spannung und „Lastwechselzahl“. Die am rechten Rand eingetragenen „Durchläufer“-Proben, die nach 100 bis 300 Wechseln unzerstört ausgebaut wurden – signalisieren eine Quasi-Dauerfestigkeit.

Das bedeutet insgesamt, daß klimatische Einflüsse zu lokalen Betonbeanspruchungen führen, die nach Art und Auswirkung mit häufig wiederholten Beanspruchungen aus Verkehrs- und Nutzlasten vergleichbar sind. Dies allerdings mit einem wesentlichen Unterschied: Während die bezogene Dauerschwingfestigkeit praktisch unabhängig von der Festigkeitsklasse, der Betonzusammensetzung

und damit auch von der Zementsteingüte ist, besteht hier ein entscheidender Einfluß des Wasserzementwertes.

Wir sollten den Charakter dieser Vorgänge in unser Bewußtsein aufnehmen und sollten Zusammensetzung und Verarbeitung des Betons darauf abstellen. Das bedeutet, die Anforderungen an Mindestzementgehalt, Wasserzementwert, Nachbehandlung und Lieferbedingungen zu überdenken. Zu allererst aber sollten wir so konstruieren, daß die unvermeidbaren Zugspannungen auf ein Minimum begrenzt werden. Das heißt, wir sollten hinsichtlich Abmessungen und Bewehrungsführung wieder werkstoffgerechter konstruieren.

## 5. Schlußbemerkung

Vorstehend wurde der Stand unserer Kenntnisse über das Verhalten des Betons bei häufig wiederholter Beanspruchung dargestellt. Dem sei noch zum Abschluß eine grundsätzliche Überlegung angefügt. Wir beschreiben und beurteilen den Werkstoff Beton üblicherweise allein mit dem Kennwert Festigkeit. Dabei waren und sind wir bestrebt, die Festigkeit anzuheben und gleichzeitig den Ausnutzungsgrad zu erhöhen. Das eine ist unvollständig, das andere erscheint mir wenig glücklich. Für die Eignung eines Werkstoffes ist nicht nur die Festigkeit maßgebend, sondern in gleicher Weise auch die Verformbarkeit, genauer gesagt die Bruchzähigkeit. Sie wird beim Beton nach den bisherigen Erkenntnissen durch die Bruchzähigkeit in der Kontaktzone Matrix-Zuschlag bestimmt [7]. Dafür geeignete Kriterien und Prüfverfahren zu entwickeln, ist Gegenstand laufender Forschungsarbeiten ebenso wie die Untersuchung, ob und mit welchen betontechnologischen Maßnahmen die Bruchzähigkeit verbessert werden kann. Letztlich entscheidend ist, wieviel Energie vom Werkstoff bis zum Versagen aufgenommen werden kann, vereinfacht ausgedrückt sein Arbeitsvermögen, das in erster Näherung durch die Fläche unter der vollständigen Spannungs-Dehnungs-Linie beschrieben wird. Das Arbeitsvermögen bestimmt auch die Fähigkeit, lokale Zusatzspannungen abzubauen und umzulagern, ohne daß es zu einem Versagen in größeren Bereichen kommt. Nun gilt aber, ungeachtet aller noch offenen Einzelfragen, daß das auf die Kurzzeitfestigkeit bezogene Arbeitsvermögen des Betons mit steigender Festigkeit abnimmt. Schon allein aus diesem Grund sollten wir, unabhängig von der Frage der zuverlässigen Herstellung, von der Anwendung überhöhter Festigkeitsklassen Abstand nehmen.

## SCHRIFTTUM

- [1] Klausen, D., und H. Weigler: Betonfestigkeit bei konstanter und veränderlicher Dauerschwellbeanspruchung. Betonwerk + Fertigteiltechnik 45 (1979) H. 3, S. 158/163.
- [2] Herzog, M.: Realistischer Betriebsfestigkeitsnachweis für massive Eisenbahnbrücken. Die Bautechnik 54 (1977) H. 4, S. 118/123.  
DIN 1055 Teil 4 – Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten nicht schwingungsanfälliger Bauwerke (Ausgabe Mai 1977).

Pook, L. P.: Proposed Standard Load Histories for Fatigue Testing Relevant to Offshore Structures. NEL Report 624, Department of Industry, National Engineering Laboratory, Oktober 1976.

- [3] Weigler, H., und D. Klausen: Ermüdungsverhalten von Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 45 (1979) H. 4, S. 214/220.
- [4] Weigler, H., und D. Klausen: Die Schallemissionsanalyse. Betonwerk + Fertigteil-Technik 45 (1979) H. 12, S. 709/716.
- [5] Weigler, H., und R. Dillmann: Spannungsverteilung in der Biegedruckzone unter häufig wiederholter Belastung. Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [6] Rüsck, H.: Stahlbeton – Spannbeton, Band 1. Werner-Verlag, Düsseldorf 1973.
- [7] Hilsdorf, H. K.: Sinn und Grenzen der Anwendbarkeit der Bruchmechanik in der Befontechnologie. Forschungsbeiträge für die Baupraxis, K. Kordina zum 60. Geburtstag. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1979.