Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 77 (1959)

Heft: 9

Artikel: Der Einfluss der Deformationseigenschaften des Betons auf den Spannungsverlauf: erweiterte Fassung eines Vortrages

Autor: Rüsch, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84217

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

ORGAN DES SCHWEIZERISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTEN-VEREINS S.I.A. UND DER GESELLSCHAFT EHEMALIGER STUDIERENDER DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE G.E.P.

Der Einfluss der Deformationseigenschaften des Betons auf den Spannungsverlauf

Erweiterte Fassung des Vortrages, gehalten am 22. März 1958 in Locarno an der Tagung S.I.A./SVMT/SNGT von o. Prof. Dr.-Ing. **H. Rüsch**, Technische Hochschule München.

Man hat lange Zeit geglaubt, die Deformationseigenschaften unserer Werkstoffe könnten allein durch die Angabe des E-Moduls beschrieben werden. Dass dies nicht zutrifft, hat die Forschung schon vor Jahrzehnten nachgewiesen. In das Bewusstsein der Ingenieure ist diese Erkenntnis aber sehr spät eingedrungen. Erst nach dem Einsturz einer weitgespannten Flugzeughalle, bei der die langsam anwachsende plastische Deformation die Knickstabilität der Schale aufhob, haben die Konstrukteure die Notwendigkeit erkannt, die plastischen Verformungen bei ihren Berechnungen zu berücksichtigen. Es gibt aber auch heute noch Ingenieure, die sich bei der Bestimmung der Deformationseigenschaften der Werkstoffe die grösste Mühe geben, durch mehrmaliges Vorbelasten die plastischen Verformungen so weit auszuschalten, bis ihnen die Bestimmung eines elastischen Moduls gelingt, auf dem sie dann ihre Berechnung aufbauen. An dieser Einstellung ist allerdings auch schuld, dass sich die Forschung bislang viel mehr mit der Festigkeit als mit der Verformung der Werkstoffe beschäftigt hat. Dabei war man sich offenbar nicht voll bewusst, in wie starkem Masse die in einer Baukonstruktion auftretende Spannungsverteilung, und damit auch ihre Festigkeit, von den Verformungseigenschaften des Werkstoffes abhängt.

In letzter Zeit hat die Kenntnis des Verformungsverhaltens eine verstärkte Bedeutung erhalten. Sie bildet die Grundlage der Plastizitätstheorien. Leider muss man feststellen, dass diese Theorien schon viel weiter entwickelt sind als ihre Grundlagen. Deshalb kann man vielen an sich interessanten Arbeiten auf diesem Gebiet derzeit nur eine akademische Bedeutung zumessen.

In den folgenden Ausführungen wird versucht, für den Werkstoff Beton den derzeitigen Stand unserer Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Verformung und Festigkeit zu zeigen.

1. Welcher Art sind die auftretenden Verformungen?

Zur Klarstellung der Begriffe werden im folgenden die unterschiedlichen Arten der Verformungen definiert:

1.1 Elastische Verformungen. Dies ist jener Anteil, der nach Entlastung sofort wieder verschwindet.

1.2 Die anelastische Verformung tritt sowohl bei Belastung als auch bei Entlastung erst mit einer gewissen Verzögerung ein. Man spricht deshalb besser von verzögerter Elastizität.

1.3 Das Fliessen. Unter diesem Begriff fasst man alle bleibenden Verformungen zusammen, die nur unter dem Einfluss der Belastung entstehen. Sie sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen, unter denen beim Beton die durch die Last verursachten Aenderungen des Feuchtigkeitshaushaltes und viskose Verformungen im Bereich der Gele die grösste Rolle spielen. Bei hohen Laststufen sind auch Strukturstörungen von erheblichem Einfluss.

1.4 Die Temperaturverformung.

1.5 Das Schwinden. Unter diesem Begriff werden meist sämtliche bleibenden Verformungen zusammengefasst, welche am unbelasteten Beton im Laufe der Zeit eintreten. Sie sind auf mehrere Ursachen zurückzuführen (Abbau der Abbindewärme, Schrumpfen als Folge von chemischen Umwandlungen und Volumenminderung durch Austrocknen).

1.6 Die verzögerte Elastizität und das Fliessen sind im Versuch schwer zu trennen und werden deshalb meist gemeinsam unter dem Begriff «Kriechen» zusammengefasst.

1.7 Die Querkontraktion. Unter diesem Begriff fasst man die quer zur Spannungsrichtung auftretenden lastabhängigen Verformungen zusammen. Ihre Grösse wird durch die Poissonsche Konstante als Bruchteil der Längsverformung beschrieben. Die Querverformung weist sowohl elastische als auch verzögert-elastische und Fliessanteile auf.

Da die durch Temperatur und Schwinden hervorgerufenen Verformungen viel weiter geklärt erscheinen, sollen hier nur die lastabhängigen Verformungen und ihr Einfluss auf die Festigkeit ausführlich besprochen werden.

2. Der E-Modul

Es ist ausserordentlich schwierig, im Versuch den elastischen Verformungsanteil zuverlässig zu bestimmen. Man kann fast nie verhindern, dass die Elastizitätsmessung durch verzögert-elastische und plastische Verformungsanteile verfälscht wird. Die gekrümmte Form der Spannungs-Dehnungslinie ist fast ausschliesslich auf diese Ursache zurückzuführen und es ist eine unlösbare Aufgabe, sie durch eine einzige Zahl zu beschreiben. So kommt es, dass von den einen nach *Bild 1* die Neigung α_1 der Tangente im Ursprung, oder die Tangente α_4 im Bereich der Gebrauchslast als E-Modul bezeichnet wird, während andere wiederum die Neigung α_2 der Sehne bevorzugen. Ausserdem verläuft die Verformungslinie bei Belastung anders als bei Entlastung (α_3), anders, wenn man die Last zügig oder stufenweise aufbringt oder sie gar oftmals wiederholt (α_5).

Glanville [1, siehe Lit.-Verzeichnis am Schluss] hat gezeigt, dass man nur dann das wirkliche elastische Verhalten messen würde, wenn das Aufbringen der Last und die Beobachtung der Verformungen in der Zeit $t = 0$ erfolgen könnte. Da dies nicht ausführbar ist, hat er die bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten auftretende Verformung gemessen und in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen (siehe *Bild 2*). Durch Extrapolation nach $t = 0$ bekam er beim Beton für den normal verwendeten Spannungsbereich eine gradlinige Spannungs-Dehnungslinie, welche das wahre Elastizitätsgesetz gut darstellt.

3. Die verzögert-elastischen Verformungen

Den Einfluss der verzögert-elastischen Verformungen erkennt man am besten bei einem Kriechversuch. Das in *Bild 3* gezeigte Verformungsdiagramm gilt für den Fall, dass die

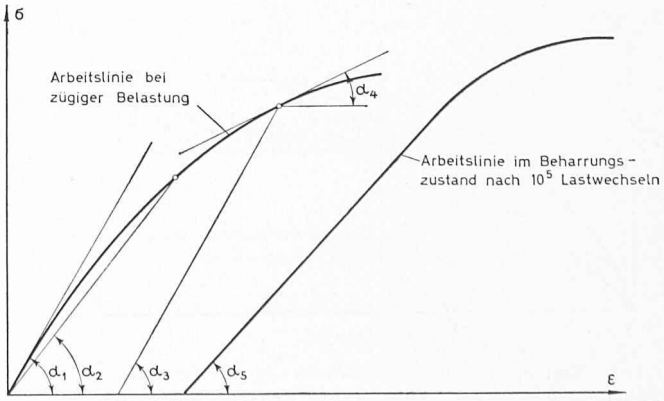


Bild 1. Die verschiedenen Definitionen des E-Moduls

lange Zeit auf den Beton einwirkende Last vorübergehend weggenommen wird. Bei der erneuten Belastung lenkt die Verformungskurve erst nach einiger Zeit wieder in die für ruhende Last geltende Charakteristik der Kriechkurve ein. Die Verformungsbeträge *a* und *b* entsprechen der verzögert-elastischen oder anelastischen Verformung. Beide Beträge werden gleich gross, sofern es sich um einen genügend alten Beton handelt, der während der kurzen Zeit der Entlastung seine elastischen Eigenschaften nicht verändert hat. Die anelastische Verformung ist auch in einem Zeitraum von einem Monat noch nicht beendet.

4. Das Fliessen

Wie schon erwähnt, werden die anelastischen Verformungen und das Fliessen in der Praxis meist nicht getrennt, sondern gemeinsam als Kriechen behandelt. Eine solche Trennung erscheint aber hier doch angebracht, da man nur auf solche Weise das Verformungsverhalten richtig darstellen kann. Man muss sich vor allem klar machen, dass ein Teil der Kriechverformung nicht als plastisch bezeichnet werden kann, da er beim Entlasten zurückgewonnen wird. Die Fliesskurve liegt also um den Betrag der anelastischen Verformung tiefer als die Kriechkurve. Für eine lange Belastungsdauer ist die Differenz annähernd konstant. Man kann anhand der Darstellung in *Bild 4* den Einfluss des Belastungsalters auf das Kriechen abschätzen. Man muss dazu nur die Abszissenaxe nach oben verschieben.

Die Form der Fliesskurve ist bekanntlich von vielen Einflüssen abhängig, unter denen vor allem die Zusammensetzung des Betons und die Feuchtigkeit der umgebenden Atmosphäre eine grosse Rolle spielen.

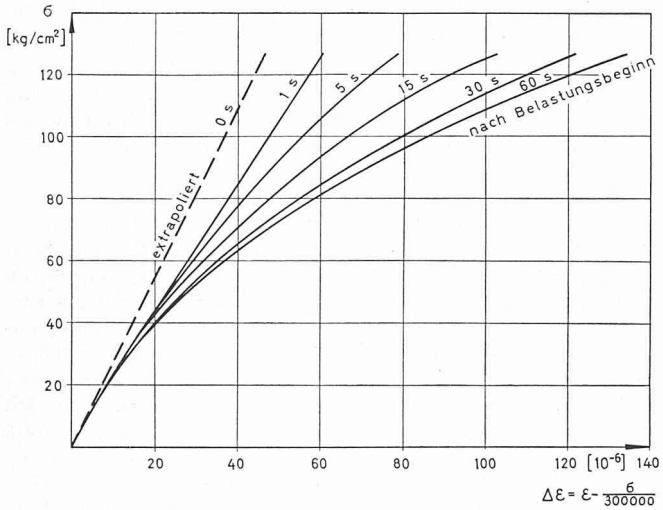


Bild 2. Versuch zur Bestimmung des wahren E-Moduls durch Extrapolation der für verschiedene Belastungsgeschwindigkeit gemessenen Verformungen (nach Glanville)

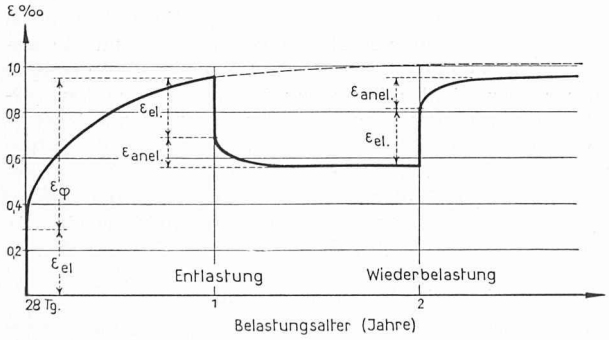


Bild 3. Bestimmung der anelastischen Verformung in einem Kriechversuch

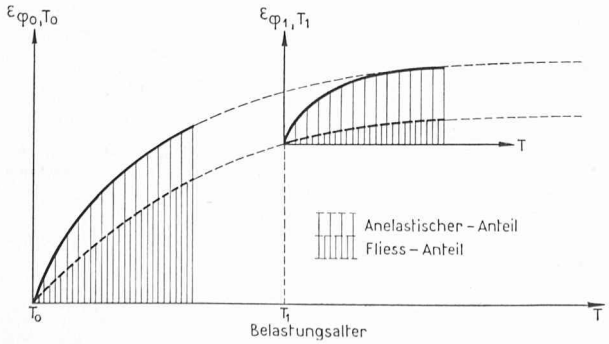


Bild 4. Einfluss des Belastungsalters auf das Kriechen und Trennung der Gesamtverformung in den elastischen, anelastischen und Fliess-Anteil

5. Neuere Ergebnisse von Kriechuntersuchungen

Davis [2] hat in seinen 1937 veröffentlichten Kriechversuchen festgestellt, dass der mineralogische Charakter der Zuschlagstoffe einen grossen Einfluss auf das Kriechen ausübt. Er hatte verschiedene Versuchskörper geprüft, deren Betone mit grösster Sorgfalt gleich zusammengesetzt waren und sich nur durch den mineralogischen Charakter der Zuschlagstoffe unterschieden. Diese Körper zeigten sehr unterschiedliche Kriechmasse. Dies erschien unwahrscheinlich. Wie konnte die Variation der mineralogischen Zusammensetzung das Kriechen verändern, wenn die Zuschlagstoffe selbst, wie bekannt ist, nur vernachlässigbare Kriecherscheinungen aufweisen?

Es erschien notwendig, diese Zusammenhänge erneut zu studieren. Versuche zu dieser Frage wurden am Materialprüfungsamt der Technischen Hochschule München in den letzten Jahren durchgeführt. Sie haben die Feststellung von Davis im wesentlichen bestätigt (vgl. *Bild 5*). Durch weitere Untersuchungen gelang es, die Ursachen für diese Erscheinungen aufzudecken.

Die eine Ursache liegt darin, dass die Zuschlagsstoffe verschieden grosse Anteile des Anmachwassers durch ihr Saugvermögen aufnehmen können. Bei völlig gleicher Zusammensetzung der Betonmischung kann deshalb nur der theoretische Wasserzementfaktor konstant gehalten werden, der wirksame Wasserzementfaktor wird aber um so kleiner, je mehr Wasser durch die Zuschlagsstoffe absorbiert und damit dem Zement entzogen wird. Ein Beton mit niedrigem Wasserzementfaktor wird aber nach den vorliegenden Erfahrungen weniger kriechen, dies um so mehr, als das in dem Zuschlagsstoff gespeicherte Wasser für längere Zeit ein feuchteres Klima aufrecht erhalten kann und damit ebenfalls eine Abnahme des Kriechens bewirkt.

Diese Erscheinung wird aber ganz von einer anderen Ursache übertönt, die sich in entgegengesetzter Richtung auswirkt. Versuche haben gezeigt, dass der Zementstein sehr stark kriecht. Die plastische Verformung nimmt also im Zementstein ihren Ausgang. Sie wird aber dadurch gebremst, dass beim Kriechen der Kraftweg vom Zementstein zum Ge-

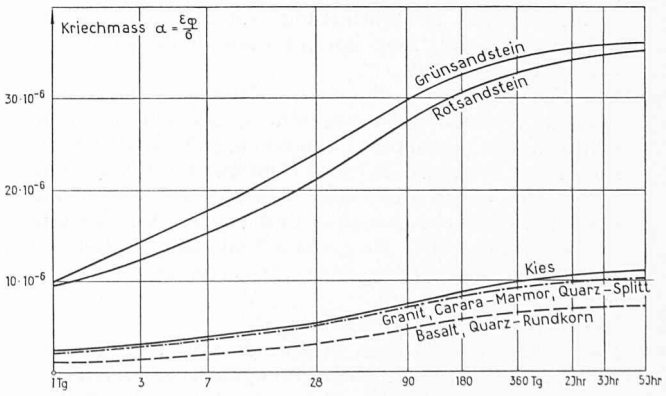


Bild 5. Der Einfluss der mineralogischen Zusammensetzung der Zuschlagstoffe auf das Kriechen. Spannung rd. 1/3 der Festigkeit; W/Z = 0,55, bei den beiden Betonen mit Sandstein W/Z = 0,75; Belastungsalter 28 Tage; Lagerung 0 bis 7 Tage bei 20 °C, rel. Feuchte 100 %; ab 7 Tage 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit (Klimaraum); aufgetragen ist die auf eine Spannung von 1 kg/cm² bezogene Kriechverformung

stein abwandert. Diese Verhältnisse werden durch das in *Bild 6* gezeigte Modell anschaulich dargestellt, bei dem das elastische Verhalten des Gesteins durch eine Feder und das vorwiegend viskose Verhalten des Zementsteins durch einen federbelasteten Zylinder dargestellt wird, der mit einer viskosen Flüssigkeit gefüllt ist. Beim Aufbringen der Last entsteht zuerst durch die Zusammendrückung der Federn die elastische Verformung. Das anschliessende Kriechen wird durch das langsame Einsinken des Kolbens hervorgerufen. Dabei wird die viskose Komponente so lange entlastet, bis die Verformung zum Stillstand kommt. Es ist nun leicht einzusehen, dass die gesamte plastische Verformung um so kleiner wird, je starrer die Federung des Gesteines ist. Mit anderen Worten heisst das, dass Gesteine mit hohem E-Modul zu viel geringeren Kriechverformungen führen werden als nachgiebige Gesteine. Tatsächlich zeigen die Versuchswerte eine klare Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul des Gesteins.

Von dieser Erkenntnis sollte man überall dort Gebrauch machen, wo das Kriechen von grossem Einfluss ist. Eine Betonstrasse wird z. B. um so weniger Risse bekommen, je grösser ihre Kriechverformungen sind. Es wäre deshalb von Vorteil, einen Zuschlagsstoff mit nicht allzu hohem E-Modul zu wählen. Für die Verschleisschicht wird dies allerdings nicht möglich sein. Im Gegensatz dazu ist das Kriechen bei vorgespannten Konstruktionen oder bei schlanken Gewölben sehr schädlich. Hier sind Gesteine mit hohem E-Modul von Vorteil. Das geringste Kriechen wird man wahrscheinlich erreichen, wenn man ähnlich wie beim Prepaktverfahren oder beim Rüttelgrobbeton dafür sorgen kann, dass die Zuschlagsstoffe sich auf möglichst grossen Flächen unmittelbar, also ohne zwischenliegende Mörtelschichten berühren.

6. *Die Querkontraktion*

Ueber die Querkontraktion sind bisher verhältnismässig wenig ausführliche Untersuchungen angestellt worden, wohl vor allem deswegen, weil die viel kleineren Querverformungen schwerer zu messen sind als die Längsverformungen. Diese Schwierigkeit wurde aber im letzten Jahrzehnt durch die Entwicklung von Messverfahren grosser Genauigkeit weitgehend beseitigt.

Im allgemeinen wird angenommen, dass die Querdehnungszahl im normalen Spannungsbereich etwa in der Grösse von $^1/_6$ liegt. In Wirklichkeit kann sie in einem verhältnismässig weiten Bereich schwanken. Sie ist auch spannungsabhängig und wächst bei Belastung bis zum Bruch stark an (vgl. die linke Kurve in Bild 17). In der unmittelbaren Umgebung der Bruchstelle können auch erheblich über 0,5 liegende Werte auftreten. Hieraus erklärt sich der grosse Einfluss der Querbewehrung auf die Druckfestigkeit des Betons. Erst die stark anwachsenden Querverformungen erlauben es, in der eingelegten Querbewehrung eine nennenswerte Kraft zu erzeugen, die auf den Beton eine stützende Wirkung ausübt. Dass dieser Einfluss nicht nur bei einer umschnürten Säule, sondern auch schon bei einer bügelbewehrten Biegedruckzone spürbar ist, haben unsere Messungen an exzentrisch belasteten Prismen gezeigt. *Bild 7* bringt ein Beispiel hiefür. Man sieht deutlich, dass im Bruchzustand die Querdehnung des Betons in der Nähe der Bügel spürbar verkleinert wird. Sie führt aber immer noch zur Ausnützung der Streckgrenze der Bügel. Bei grossen Bügelabständen konnten zwischen den Bügeln ungewöhnlich grosse Querdehnungen beobachtet werden. Dies ist aber nur darauf zurückzuführen, dass die Bügel ein direktes Auseinanderfallen des schon stark zerstörten Gefüges für den zwischen ihnen liegenden Bereich verhinderten.

Viel diskutiert wird auch die Frage, welche Querdehnung das Kriechen verursacht. Von einzelnen Forschern wurde behauptet, das Kriechen würde im Bereich der zulässigen Spannungen überhaupt keine Querverformungen auslösen. Diese Anschauung trifft nicht zu. Sie kann wohl nur durch die grossen Schwierigkeiten bei der Messung erklärt werden. Beim Kriechen wird nämlich im Druckversuch die plastische Querdehnung durch die gleichzeitig auftretende Schwindverkürzung kompensiert. Die Querverformung verschwindet also fast völlig. Wenn man aber die Schwind-

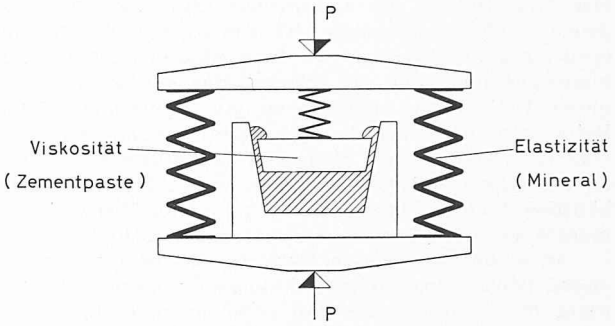


Bild 6. Modell für das statische System, das durch die Koppelung von Zementstein und Mineral zu einer gemeinsamen Tragwirkung entsteht

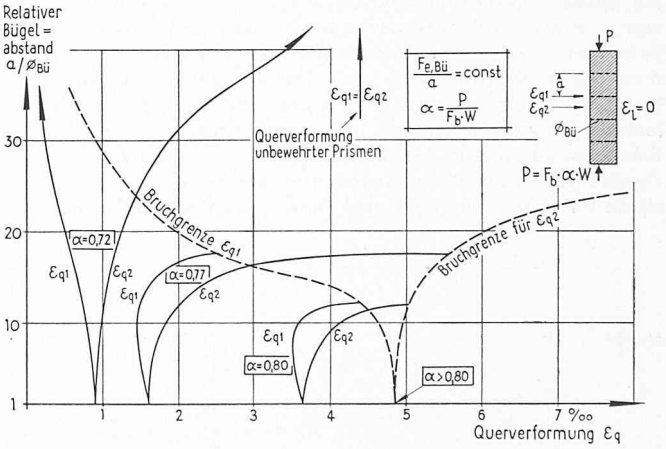


Bild 7. Die umschnürende Wirkung von Bügeln auf die Biegedruckzone der Balken zeigt sich an dem Vergleich der unmittelbar über und zwischen den Bügeln gemessenen Bruch-Querdehnung. Die Querdehnungen sind in Abhängigkeit vom Bügelabstand für verschiedene Belastungsgrade $\alpha = \frac{P}{F_b W}$ aufgetragen

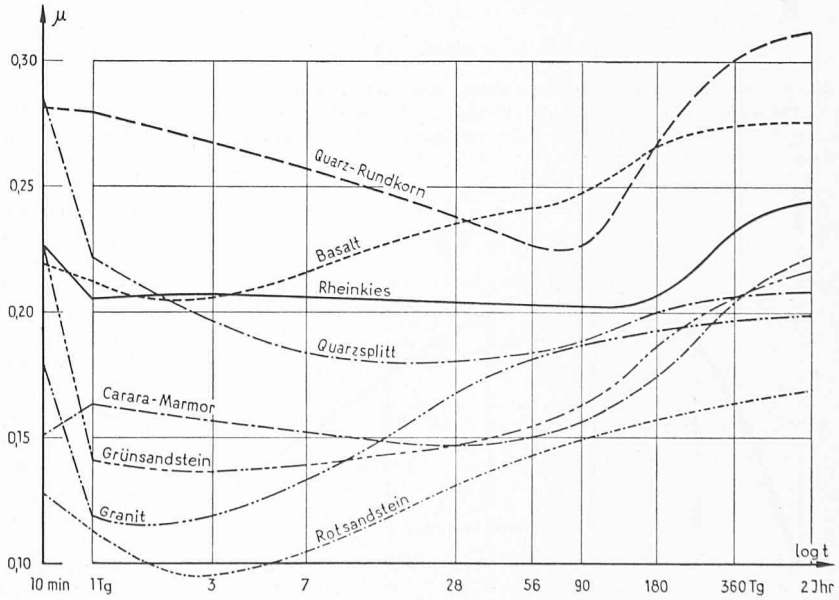


Bild 8. Einfluss des Kriechens auf die Querdehnungszahl μ bei den in Bild 5 dargestellten Kriechversuchen

verformung abzieht, ergeben sich für die Querverformung Kurven von der in *Bild 8* gezeigten Art. Die Querdehnungszahl sinkt anfangs geringfügig ab und steigt dann im Laufe der Zeit wieder mindestens auf den ursprünglichen Wert an.

7. Einfluss der plastischen Verformungen auf die Verteilung der durch die Belastung hervorgerufenen Spannungen

Der Konstrukteur verlangt im allgemeinen keine präzise Unterteilung der Gesamtverformung in die verschiedenen Verformungsanteile. Er möchte bei der Spannungsermittlung am liebsten von einer charakteristischen Spannungs-Dehnungslinie des Werkstoffes ausgehen. Die Form dieser Linie hängt aber davon ab, in welchem Alter der Beton zum erstenmal belastet wird, wie lange die Lasten einwirken und welcher Witterung das Bauwerk in den ersten Jahren seines Bestehens unterworfen ist. Da man diese Verhältnisse nicht im voraus genügend genau überblicken kann, muss man sich mit einer Abschätzung begnügen.

In einem wie weiten Bereich das für die Verformung massgebende Spannungs-Dehnungsdiagramm schon allein unter dem Einfluss der Zeit schwanken kann, soll *Bild 9* zeigen. Die linke, stark ausgezogene Begrenzungskurve dieses Diagramms zeigt eine normale Spannungs-Dehnungslinie, wie sie bei einem zentrisch belasteten Versuchskörper in einem üblichen Kurzzeitversuch auftritt. Links davon sind die Spannungs-Dehnungslinien für noch kürzere Belastungszeiten gezeigt, die bis zu einer Belastungsdauer von sechs Sekunden direkt gemessen wurden. Als Extremwert erhält man durch Extrapolation eine Gerade, welche für die hypothetische Belastungszeit $t = 0$ gilt. Wenn man nun die Belastung immer langsamer aufbringt oder — was den üblichen Bedingungen besser entspricht — die Last mit der Geschwindigkeit eines Kurzzeitversuches bis zu einer bestimmten Höhe steigert und dann konstant hält, ergeben

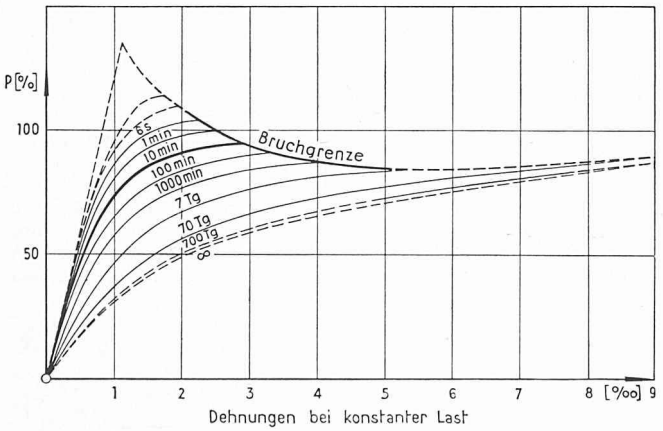


Bild 9. Einfluss der Belastungsdauer auf das Spannungs-Dehnungsdiagramm. Der rechts gestrichelt angedeutete Festigkeitsanstieg soll auf den Einfluss einer möglichen Nacherhärtung hinweisen

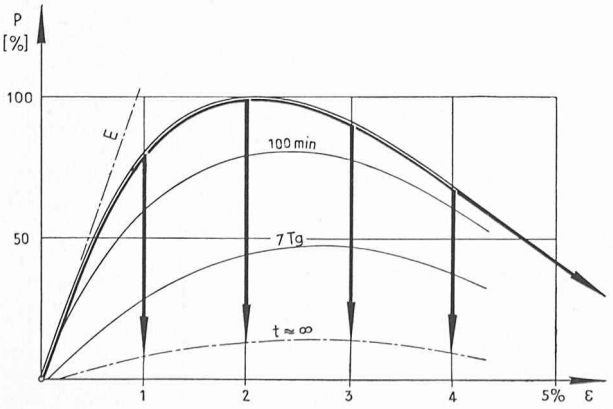


Bild 10. Einfluss der Zeit auf die einer konstanten Verformung entsprechende Spannung

sich unter der Wirkung des Kriechens immer flachere Verformungslinien, die für die Belastungsdauer $t = \infty$ zu der rechten Begrenzungslinie des Diagramms führen.

Ein solcher Kriechversuch lässt sich allerdings nur bis zu einem bestimmten Belastungsgrad auf die Zeit $t = \infty$ ausdehnen. Ueber dieser Grenze liegende Spannungen können nur eine beschränkte Zeit getragen werden und führen dann zum Bruch. Das Diagramm wird deshalb nach oben hin durch die Bruchgrenze abgeschlossen.

8. Einfluss der plastischen Verformung auf den Abbau der Zwängungsspannungen

Das beschriebene Diagramm gilt aber nur unter der Voraussetzung, dass eine konstante Last einwirkt. Diese Spannungs-Dehnungslinien können deshalb nur für die Bestimmung der durch Lasten hervorgerufenen Spannungszustände verwendet werden. Ausser dem Bereich der Lastspannungen interessiert aber den Bauingenieur im gleichen Masse der Bereich der Zwängungsspannungen, die durch eine erzwungene Verformung hervorgerufen werden, z. B. bei einem Gewölbe durch Ausweichen der Widerlager oder durch Schwinden.

Hierfür sind in *Bild 10* die entsprechenden Spannungs-Dehnungslinien gezeichnet. Sie werden gewonnen, wenn nicht die Spannung, sondern die Verformung mit der im Kurzzeitversuch üblichen Geschwindigkeit bis zu einer bestimmten Höhe gesteigert und dann konstant gehalten wird. Die dick ausgezogene Kurve zeigt die dann entstehenden Anfangsspannungen; die mit dünnen Linien bezeichneten Kurven geben an, wie weit die einer gewählten Verformung entsprechende Anfangsspannung im Laufe der Zeit durch die plastischen Verformungen abgebaut wird (Relaxation). Man sieht, dass sie für $t = \infty$ nahezu ganz verschwindet.

Dies ist eine sehr wichtige Feststellung. Sie gilt nicht nur für den Fall eines von aussen aufgebrachten Zwanges, sondern auch für die Eigenspannungszustände, die durch einen inneren Zwang, z. B. durch das ungleichmässige Schwinden eines Querschnitts oder durch eine ungleichmässige Verteilung der Abbindewärme ausgelöst werden. Wenn der Beton in solchen Fällen die am Anfang entstehenden Spannungen ohne Schaden aushält, ist jede Gefahr beseitigt. Nach den gezeigten Diagrammen wird schon nach sieben Tagen die Zwängungsspannung etwa auf die Hälfte abgesunken sein.

Der unvermeidbare Abbau der Zwängungsspannungen wirkt aber nicht immer günstig. Oft erzeugt der Konstrukteur die Zwängung absichtlich, um den Spannungszustand zu verbessern, z. B. beim Scheitelauspressen von Gewölben. *Bild 10* zeigt aber deutlich, dass solchen Bestrebungen der Erfolg versagt bleiben muss. Leider ist dies immer noch nicht genügend bekannt.

9. Die Spannungsverteilung in der Biegedruckzone eines Balkens

Die vorstehenden Ausführungen haben gezeigt, innerhalb welcher Grenzen die bei zentrischer Belastung bestimmten Spannungs-Dehnungslinien unter dem Einfluss der plastischen Verformung verschiedene Formen annehmen können. Im folgenden soll die Spannungsverteilung in der Biegedruckzone eines Balkens besprochen werden. Dabei zeigt sich, dass auch die Art der Belastung und die Querschnittsgestaltung einen grossen Einfluss auf den Spannungsverlauf haben.

Die in Bild 9 gezeigten Spannungs-Dehnungslinien gelten nur für zentrische Belastung und unter der Annahme, dass die Last mit konstanter Geschwindigkeit gesteigert wird. Sie enden deshalb bei jener Dehnung, die zum Höchstwert der Spannung führt. Bei der exzentrisch belasteten Biegedruckzone können aber grössere Dehnungen auftreten, die im abfallenden Spannungsbereich liegen. Nach einem Vorschlag von C. Rasch [3] kann man die für die Biegedruckzone massgebende Spannungs-Dehnungslinie aus Versuchen mit konstanter Dehngeschwindigkeit ableiten. In der Biegedruckzone ist die Dehngeschwindigkeit proportional dem Abstand der Nullinie. Man kann durch Auswertung der mit verschiedenen Dehngeschwindigkeiten durchgeführten Versuche eine Spannungs-Dehnungslinie gewinnen, die dieser

Bedingung entspricht. Solche Versuche hat Rasch in München durchgeführt, aus denen die in *Bild 11* gezeigte Form abgeleitet wurde, die bei Laststeigerung mit konstanter Dehngeschwindigkeit für verschiedene, bis zum Bruch verstreichende Zeiten gilt.

Es soll hier nun die Frage studiert werden, bis zu welcher Randverformung ε_{max} im Einzelfall diese Spannungs-Dehnungslinie ausgenützt werden kann. Der bis zu dieser Randverformung reichende Teil der Spannungs-Dehnungslinie ist dann affin zur Spannungsverteilung in der Biegedruckzone. Diese Frage kann man am besten dadurch beantworten, dass man die Randverformungen variiert und für die dadurch bestimmte Lage der Nullaxe und die durch Bild 11 bestimmte Spannungsverteilung das zugehörige Moment ausrechnet. Für die Festigkeit der Biegedruckzone ist jene Randverformung massgebend, welche zum Maximalwert des Momentes führt.

Eine solche Untersuchung wurde auf der Grundlage der gezeigten Spannungs-Dehnungslinie für mehrere Querschnittsformen der Biegedruckzone und zwei Extremwerte der Bewehrung durchgeführt. In *Bild 12* sind die zum maximalen Moment führenden Randverformungen schematisch markiert. *Bild 13* zeigt die in der Biegedruckzone auftretende Spannungsverteilung. Beim einen Extremwert mit dem Bewehrungsprozentsatz $\mu = 0$ liegt die neutrale Axe unmittelbar am oberen Rande. Der andere Extremwert hat trotz $\mu = \infty$ im Falle der Biegung mit Normalkraft eine reale Bedeutung. Die neutrale Axe liegt am unteren Rande und es entsteht eine endliche Zugkraft, die der Biegedruckkraft das Gleichgewicht hält. Bei Biegung mit Axdruck kann der dieser Zugkraft entsprechende «unendlich grosse Stahlquerschnitt mit der Stahlspannung Null» ganz durch eine in der Säule wirkende Normalkraft abgedeckt werden.

Die beiden Bilder zeigen, dass sowohl die Spannungsverteilung der Biegedruckzone als auch die Randstauchung innerhalb weiter Grenzen in Abhängigkeit von der Form des Druckquerschnitts und von der Lage der neutralen Axe schwanken können. In den letzten drei Jahrzehnten wurden viele Vorschläge für ein neues Bemessungsverfahren gemacht, welches das plastische Verhalten des Betons berücksichtigen soll. Sie unterscheiden sich fast nur durch die vorgeschlagene Spannungsverteilung und die Annahmen über die maximale Randstauchung. Für die Spannungsverteilung wurden Parabeln, Hyperbeln, Trapeze, Rechtecke und alle denkbaren Kombinationen solcher Kurven vorgeschlagen. Die vorgeschlagenen Randverformungen schwankten zwischen 1,5 und 5 ‰. Sämtliche Vorschläge gingen von der Anschauung aus, dass für alle Querschnittsformen und Bewehrungsgrade die gleichen Annahmen gelten sollten. Hierin liegt ein Trugschluss. Dass jeder dieser divergenten Vorschläge durch Versuchsergebnisse belegt werden konnte, erklärt sich einfach daraus, dass eben auch im Versuch sowohl die Spannungsverteilung als auch die Randverformung in Abhängigkeit von dem eben angeführten Gesetz sehr verschiedene Werte annehmen müssen.

Das genaue Studium des Verformungsverhaltens des Betons führt also zu der Möglichkeit, das bisher als Grundlage der Bemessung verwandte Elastizitätsgesetz durch eine allgemeingültige neue Vorstellung zu ersetzen. Man kann wahrscheinlich für jede Belastungsdauer oder Belastungsgeschwindigkeit und für jede Betongüte, ähnlich wie es in Bild 11 geschehen ist, eine Spannungs-Dehnungslinie angeben, aus welcher die Spannungsverteilung für alle Beanspruchungsarten abgeleitet werden kann. Die versuchsmässige Festlegung dieser Linien ist in meinem Institut im Gange und für einige Gebiete schon abgeschlossen.

Die in der Biegedruckzone eines Balkens auftretende Spannungsverteilung ist also zeitabhängig. Bei einem unter Dauerlast stehenden Balken wird die Sicherheit der Biegedruckzone meist durch die am Anfang auftretende Spannungsverteilung bestimmt; die Sicherheit der Zugzone aber hängt von der Dauer der Lasteinwirkung ab. Unter der Wirkung des Kriechens wächst nämlich die Stauchung am Druckrand an, die neutrale Axe sinkt ab und die Druckspannungen werden kleiner. Dabei nimmt aber der Hebelarm der inneren Kräfte ab und vergrössert die Stahlspannung.

Dies gilt für die üblichen Fälle der reinen Biegung, wo unter der dauernd einwirkenden Last die Druckspannungen als Folge des Wanderns der neutralen Axe rascher absinken als die Festigkeit. Je stärker man aber die Druckzone ausnützt, also je tiefer die neutrale Axe schon am Anfang liegt, um so geringer wird die bei ihrem Wandern entstehende Entlastung. Deshalb kann bei sehr starker Bewehrung, und vor allem bei Biegung mit Axdruck, unter Dauerlast auch die Betondruckzone gefährdet sein.

Man kann nun ohne grundsätzliche Schwierigkeiten durch eine systematische Auswertung der für verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten gefundenen Spannungs-Dehnungslinien die ungünstigsten Verhältnisse für jeden Be-

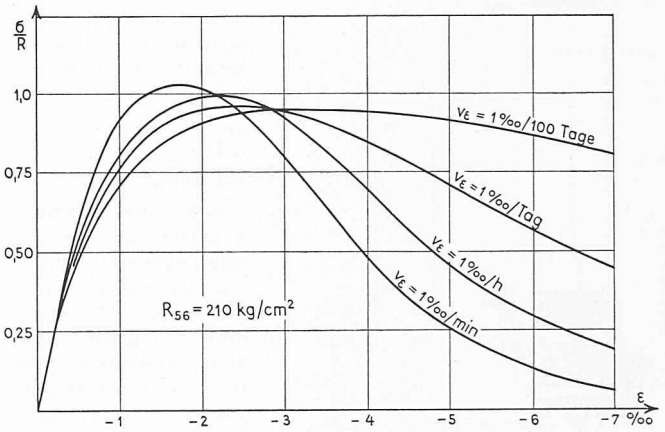


Bild 11. Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei Belastung mit konstanter Dehngeschwindigkeit, die so gewählt wurde, dass der Bruch nach 1 Minute, 1 Stunde, 1 Tag oder 1 Monat erfolgt

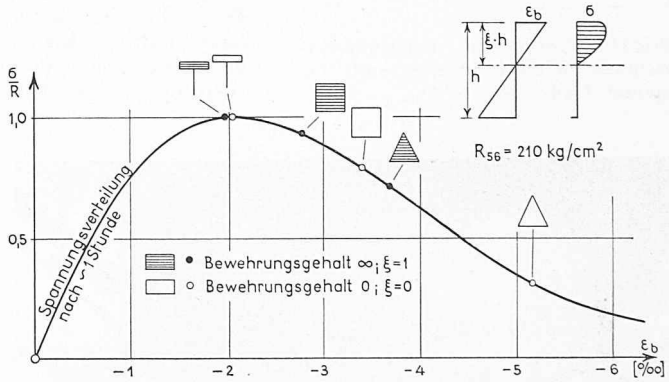


Bild 12. Die Abhängigkeit der zum Bruch führenden Randverformung von der Querschnittsform und vom Bewehrungsprozentsatz μ bei einem Beton mittlerer Güte und einer Belastungsdauer von etwa 1 Stunde

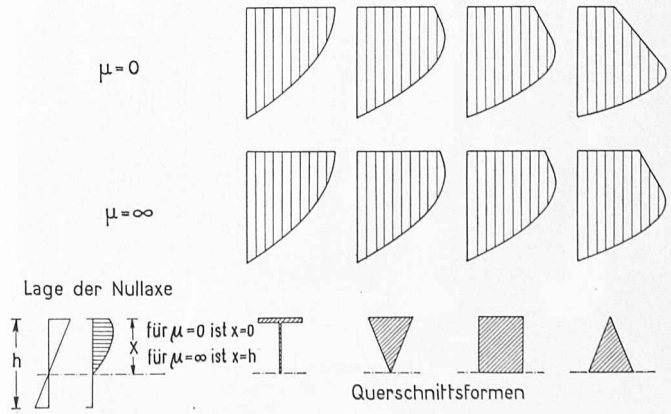


Bild 13. Die unter den in Bild 12 beschriebenen Verhältnissen in der Biegedruckzone zum Bruch führende Verteilung der Druckspannungen in Abhängigkeit von Querschnittsform und Bewehrungsprozentsatz

lastungszustand finden und die in den Bemessungsformeln auftretenden Koeffizienten ein für allemal festlegen. Beim Uebergang von der reinen Biegung über den Bereich der Biegung mit Axdruck bis zur reinen Druckbeanspruchung wird bei solchen Untersuchungen in immer steigendem Masse der unter dauernder Lasteinwirkung auftretende Festigkeitsabfall von Bedeutung werden. Aber auch der unter Dauerlast auftretende grosse Verformungszuwachs ist von erheblichem Einfluss, vor allem bei den Stabilitätsproblemen. Mit diesen Fragen sollen sich die nächsten Abschnitte beschäftigen.

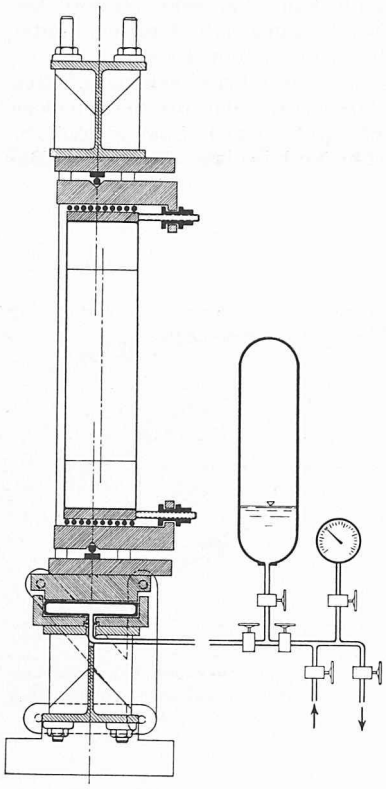


Bild 14. Hydraulische Belastungsvorrichtung für Langzeitversuche mit konstanter Last

10. Die Festigkeit unter dauernd ruhender Lasteinwirkung

Schon im Abschnitt 7 wurde auf den Festigkeitsabfall hingewiesen, der bei langdauernder Belastung eintritt. Dass dieser Festigkeitsabfall bisher nur in den Grundzügen bekannt war, ist verständlich. Um die Dauerstandfestigkeit zu bestimmen, muss man die Prüfkörper zum Teil über Jahre hinweg unter Last halten. Bisher haben geeignete Vorrichtungen gefehlt, welche die benötigten grossen Kräfte ohne teuere Massnahmen auf die Dauer aufrecht erhalten konnten.

Als in meinem Institut solche Untersuchungen in Angriff genommen wurden, war es deshalb notwendig, eine geeignete Belastungsvorrichtung zu konstruieren (siehe *Bild 14)*. Sie besteht aus einem kraftschlüssigen Prüfgerüst, einer einfachen hydraulischen Presse und einer Pressluftflasche, die als Windkessel der Aufrechterhaltung eines konstanten Druckes dient. Die Hauptschwierigkeit bestand darin, die hydraulische Presse so zu gestalten, dass kein Druckabfall durch Verlust an Pressflüssigkeit entsteht. Dies wurde durch eine Gummiblase erreicht, die den Zylinder von innen abdichtet, ohne die Bewegungen des Kolbens zu hindern.

Derzeit sind am Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Hochschule München in einem klimatisierten Raum ständig etwa 80 Prüfkörper unter Verwendung solcher Vorrichtungen der Einwirkung einer konstanten Last ausgesetzt. Eine zusätzliche Rollenvorrichtung gestattet es, die Prüfkörper auch unter Last zu verschieben und damit jederzeit die gewünschte Exzentrizität einzustellen. *Bild 15* zeigt einen Blick in diesen Klimaraum.

Zu welchen Ergebnissen solche Versuchsreihen führen, zeigt das in *Bild 16* dargestellte Anwachsen der Verformung in Abhängigkeit von Belastungsgrad und Zeit. Für Belastungsgrade bis hinauf zu etwa 60 % der Kurzzeitfestigkeit nimmt die Verformungsgeschwindigkeit im Laufe der Zeit rasch ab. Die Gesamtverformung nähert sich asymptotisch einem Grenzwert. Bei 70 % ist die Verformungsgeschwindigkeit in dem logarithmischen Zeitmasstab annähernd konstant. Es liegt also immer noch eine Beruhigung vor. Für höherliegende Belastungsgrade zeigen die Verformungskurven eine andere Tendenz. Die Verformungsgeschwindigkeit nimmt mit dem Logarithmus der Zeit zu und der Versuch endet mit dem Bruch. Die Bruchverformung ist in der Nähe der Dauerstandfestigkeit am grössten. In den hier beschriebenen Versuchen mit stark exzentrischer Belastung wuchs sie bis auf 15 ‰ an.

11. Ursachen des Festigkeitsabfalles unter dauernd ruhender Last

Brandtzaeg [4] hat schon früh den Gedanken ausgesprochen, dass der unter langdauernder Belastung auftretende Festigkeitsabfall durch eine im Kurzzeitversuch unbeobachtet bleibende vorzeitige Lockerung der inneren Struktur verursacht sein könnte. Er hat zum Beweis die im einaxigen Bruchversuch auftretende Volumenänderung angeführt. Nur bei niedrigen Druckspannungen entsteht die erwartete Volumenverkleinerung. Mit wachsender Last wird dieser Vorgang gebremst und in der Nähe der Bruchlast tritt an ihre Stelle sogar eine Volumenvergrösserung (siehe *Bild 17*). Da die Druckbeanspruchung das Volumen nur verkleinern kann, muss die bei hohen Spannungen einsetzende Volumenvergrösserung von einem neu hinzukommenden Umstand herrühren, z. B. einer inneren Gefügeauflockerung.

Diese Vermutung konnte durch neuere Untersuchungen bestätigt werden. Dabei wurde auf den in der Presse stehenden Prüfkörper einseitig ein mit konstanter Energie arbeitender Ultraschallsender aufgekittet. Auf der gegenüber-

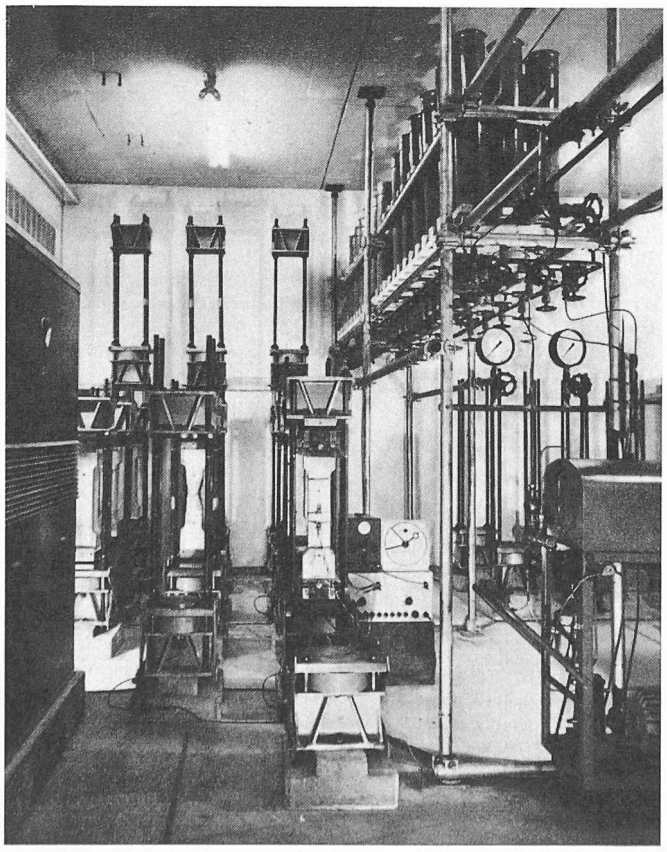


Bild 15. Aufstellung der Dauerstand-Pressen im Klimaraum

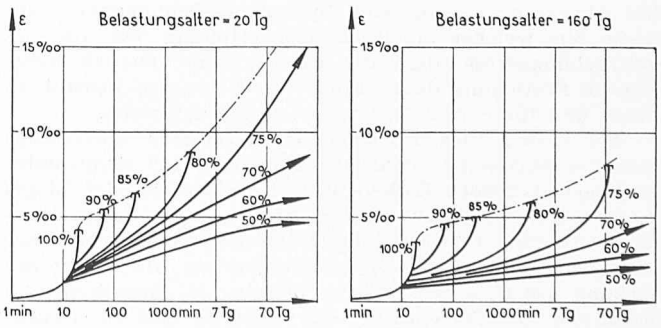


Bild 16. Die Zunahme der Verformung unter Dauerlast bei einem exzentrisch belasteten Prisma (Exzentrizität η = 0,6; Würfelfestigkeit W_{28} = 340 kg/cm²)

liegenden Seite des Prüfkörpers wurde die ankommende Energie abgenommen und gemessen.

Bild 18 zeigt ein Beispiel für den gemessenen Zusammenhang zwischen der aufgebrachten Last und der ankommenden Energie. Man erkennt deutlich, dass in Lastbereichen bis zu etwa 55 % der Bruchlast die ankommende Energie leicht zunahm. Dies deutet auf eine innere Verfestigung hin, da der durch Dämpfung verschluckte Energieanteil kleiner wurde. Wahrscheinlich haben sich schon vorhandene innere Gefügerisse mit steigender Last wieder geschlossen. Wenn die Last über diesen Bereich hinaus gesteigert wurde, entstand ein zuerst langsamer und ab 75 % rasch zunehmender Energieabfall. Diese ungewöhnlich starke Erhöhung der Absorption kann nur durch innere Gefügerisse erklärt werden, die in ihrem Bereich zu einer nahezu totalen Reflexion der Schallwellen führen. Auf diesem Wege konnte die von Brandtzaeg erstmalig ausgesprochene Vermutung bestätigt werden.

Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass das beschriebene Bild einer frühzeitig beginnenden Gefügelockerung nur dann so deutlich erkennbar wird, wenn die Schallmessung in dem Bereich der vorher nicht erkennbaren Bruchstelle durchgeführt wird. Aehnlich wie beim Stahl, der sich im Zugversuch nur an einer Stelle einschnürt, erreichen auch bei der Druckbelastung des Betons nur die in der Nähe der Bruchstelle auftretenden Verformungen grosse Werte. Dies muss man bei solchen Messungen beachten. Diese Schwierigkeit konnte bei Beobachtung der Zerstörungsgeräusche mit Hilfe eines angekoppelten Kristallmikrophons vermieden werden. Auch auf diesem Wege konnte die vorzeitig einsetzende Gefügelockerung bewiesen werden.

Der unter dauernd ruhender Last auftretende Festigkeitsabfall kann also durch eine Gefügelockerung erklärt werden. Die anfänglich eintretende Verfestigung ist bei etwa 75 % der Bruchlast wieder aufgehoben. Bei höheren Lastanteilen nimmt die Zerstörung des Gefüges sehr rasch zu und es ist nur eine Frage der Zeit, wann durch viskose Vorgänge die innere Reibung aufgehoben wird, die allein für eine vorübergehende Zeit eine höhere Tragwirkung erlaubt.

12. Die Knickfestigkeit

Während man auf anderen Gebieten die Tragkraft eines Bauteiles auf Grund einer so groben Vorstellung des Verformungsverhaltens, wie sie die Elastizitätstheorie liefert, wenigstens annähernd berechnen kann, ist dies bei den Stabilitätsproblemen nicht mehr möglich. Dies liegt daran, dass die Knicklast eines Bauteiles nicht durch die Festigkeit, sondern meist ausschliesslich durch das Verformungsverhalten des Werkstoffes bestimmt wird.

Das im vorstehenden Abschnitt erwähnte allgemein gültige Verformungsgesetz wird also gerade für Stabilitätsprobleme eine besondere Bedeutung erhalten. Leider lassen sich aber diese Probleme auf dieser Grundlage nicht mehr analytisch lösen. Man ist also gezwungen, auf dem Iterationswege vorzugehen. Dies ist schon bei der Berechnung der Knicksicherheit von Stahlbetonsäulen verhältnismässig mühsam. Eine grosse Hilfe bedeutet es aber, wenn man einem

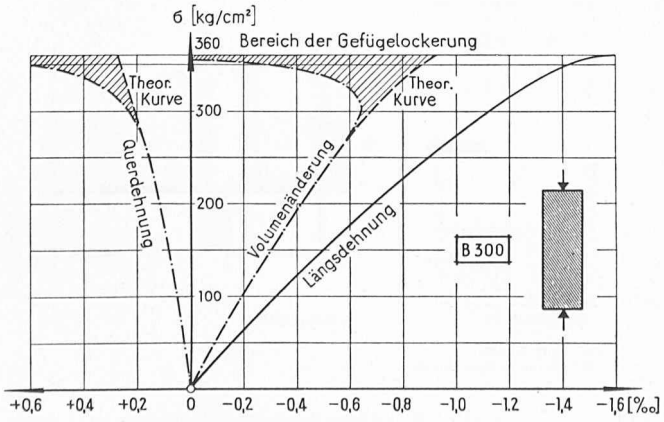


Bild 17. Zusammenhang zwischen Last und Volumenänderung bei einem einaxigen zentrischen Druckversuch

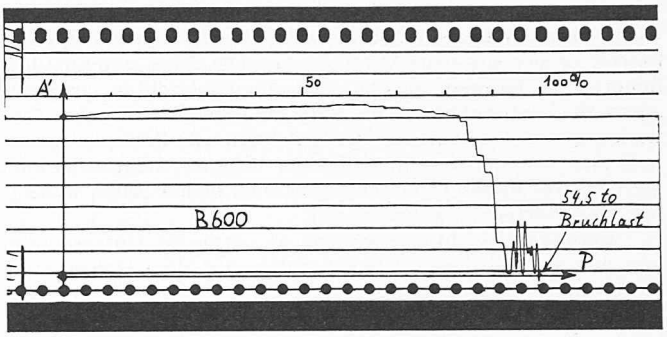


Bild 18. Bestimmung der Abhängigkeit der Absorption von Ultraschall von der Höhe der Last mit Hilfe der Kurve der vom Probekörper durchgelassenen Energie

Vorschlag von Dr.-Ing. Kordina [5] folgend die Abhängigkeit der beiden Randdehnungen ε_1 und ε_2 der Säule von den einwirkenden Schnittkräften N und M in Hilfsdiagrammen zusammenstellt. Solche Diagramme wurden bisher nur in Kurzzeitversuchen direkt bestimmt [6]. *Bild 19* zeigt als Beispiel die für einen Beton mit 300 kg/cm² Würfelfestigkeit geltenden Kurvenscharen. Sie können auf Grund der schon beschriebenen Erkenntnisse über den Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit noch verfeinert werden, haben sich aber auch in der vorliegenden Form schon sehr gut bewährt [5].

13. Ausblick

Die vorstehenden Ausführungen beschränkten sich auf eine sehr summarische Beschreibung unserer derzeitigen Kenntnis der elastischen und plastischen Verformungen

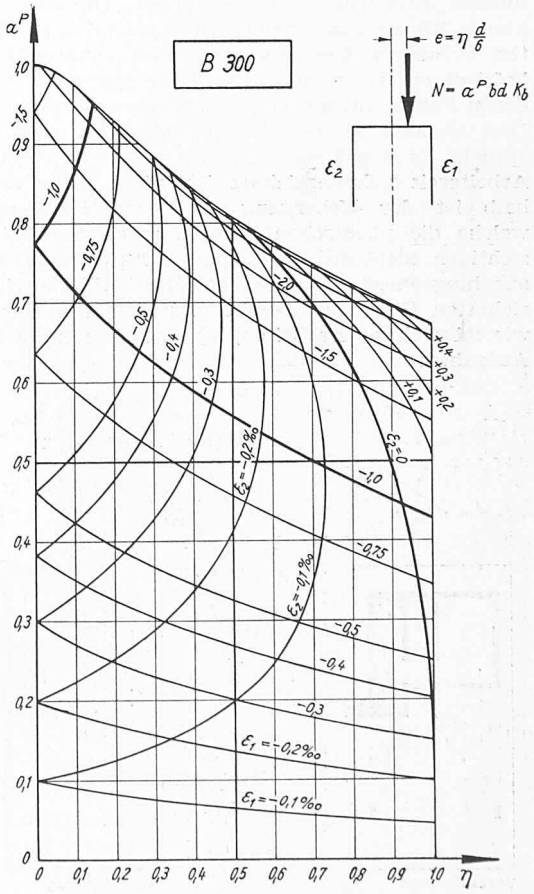


Bild 19. Kurvenscharen zur Bestimmung der Randverformungen ε_1 und ε_2 eines unbewehrten Rechteckquerschnittes aus B 300 unter einer zusammengesetzten Beanspruchung, die durch die bezogene Last α^p und die bezogene Exzentrizität η bestimmt ist

unter ruhender Druckbelastung. Die vorliegenden Versuchswerte konnten nur andeutungsweise wiedergegeben werden. Soweit es sich um neue Versuche handelt, wird eine ausführlichere Wiedergabe in den Forschungsberichten erfolgen. Auch die lastunabhängigen Verformungen unter der Einwirkung von Temperatur und Schwinden konnten innerhalb des zur Verfügung stehenden Raumes nicht behandelt werden. Auf diesen Gebieten lagen auch bisher schon wesentlich gesichertere Ergebnisse vor.

Besonders wichtig erscheint es, ähnliche Untersuchungen wie sie hier beschrieben wurden, auf dem Gebiet einer wechselnden Beanspruchung und auf dem Gebiet der Zugspannungen durchzuführen. Hier sind unsere Kenntnisse bisher noch sehr beschränkt. Vor allem interessiert ein Studium der Verformungen in dem abfallenden Bereich der Spannungs-Dehnungslinie, der mit unseren üblichen Prüfmaschinen meist nicht studiert werden kann, da die in der Maschine elastisch aufgespeicherte Energie sofort nach Erreichen der Zugfestigkeit den Bruch herbeiführt. Dem hinter der Zugfestigkeit liegenden Teil der Spannungs-Dehnungslinie kommt aber in der Praxis eine grosse Bedeutung zu. Er ist z. B. dafür verantwortlich, dass in unmittelbarer Nähe der Bewehrungsstäbe der Beton oft erst bei sehr grossen Dehnungen reisst. Eine besonders interessante Ausnutzung dieses Bereiches hat Mikhailov [7] beschrieben. Nach seinen Ausführungen ist es gelungen, durch die gemeinsame Verwendung von vorgespannten Fertigteilen und Ortbeton bei dickwandigen Konstruktionen den Ortbeton bis zu mehr als der zweifachen Bruchdehnung rissefrei zu halten. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die Zugfestigkeit des Betons mehr als bisher in Rechnung zu stellen.

Unsere Kenntnisse des Verformungsverhaltens des Betons sind also noch nicht befriedigend. Wir sind uns erst in neuester Zeit darüber klar geworden, in welchem Masse die genaue Kenntnis der vielfältigen Einflüssen unterworfene Form der Spannungs-Dehnungslinie die Festigkeit unserer Konstruktionen beeinflusst. Die auf einer so unklaren Konstanten, wie sie der E-Modul darstellt, aufgebauten bisherigen Bemessungstheorien konnten nur so lange befriedigen, als man in der Lage war, die damit verbundenen Fehler mit einem hohen Sicherheitsfaktor zuzudecken. Dies ist aber in der heutigen Zeit, die durch höhere Ansprüche an den Lebensstandard und eine Verringerung der Arbeitszeit gekennzeichnet ist, nicht mehr möglich. Deshalb ist der Uebergang zu neuen Bemessungstheorien, welche die plastischen Verformungen des Betons berücksichtigen, nicht mehr aufzuhalten. Es wurde aber schon darauf hingewiesen, dass solche Plastizitätstheorien einer gesicherten Grundlage bedürfen. Diese Grundlage so schnell wie möglich zu erarbeiten, ist eine unserer vordringlichsten Aufgaben.

Literaturangaben

[1] *Glanville W. H.:* Creep or Flow of Concrete under Load, «Building research technical paper» Nr. 12, 1930.

[2] *Davis R. E.* und *Davis H. E.:* Flow of Concrete under the Action of Sustained Loads, «Proc. ASTM», vol. 37, part 2, 1937.

[3] *Rasch, C.:* Stress-Strain-Diagrams of Concrete obtained by Constant Rates of Strain, Beitrag zum RILEM-Colloquium über den Einfluss der Zeit auf die Festigkeit und Verformung des Betons, München 1958.

[4] *Brandtzaeg, A.:* Wirkungsweise umschnürter Betondruckkörper, «Beton und Eisen» 1932, Heft 15.

[5] *Kordina, K.:* Stabilitätsuntersuchungen an Beton- und Stahlbetonsäulen, Dissertation an der Techn. Hochschule München.

[6] *Rüsch, H.:* Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone, Heft 120 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton; Berlin 1955. Verlag W. Ernst u. Sohn.

[7] *Mikhailov, O. V.:* Latest research on how non-stressed concrete works in precast monolithic constructions (Composite prestressed constructions), Vorbericht zum 3. Kongress der Fédération Internationale de la Précontrainte, Berlin 1958.

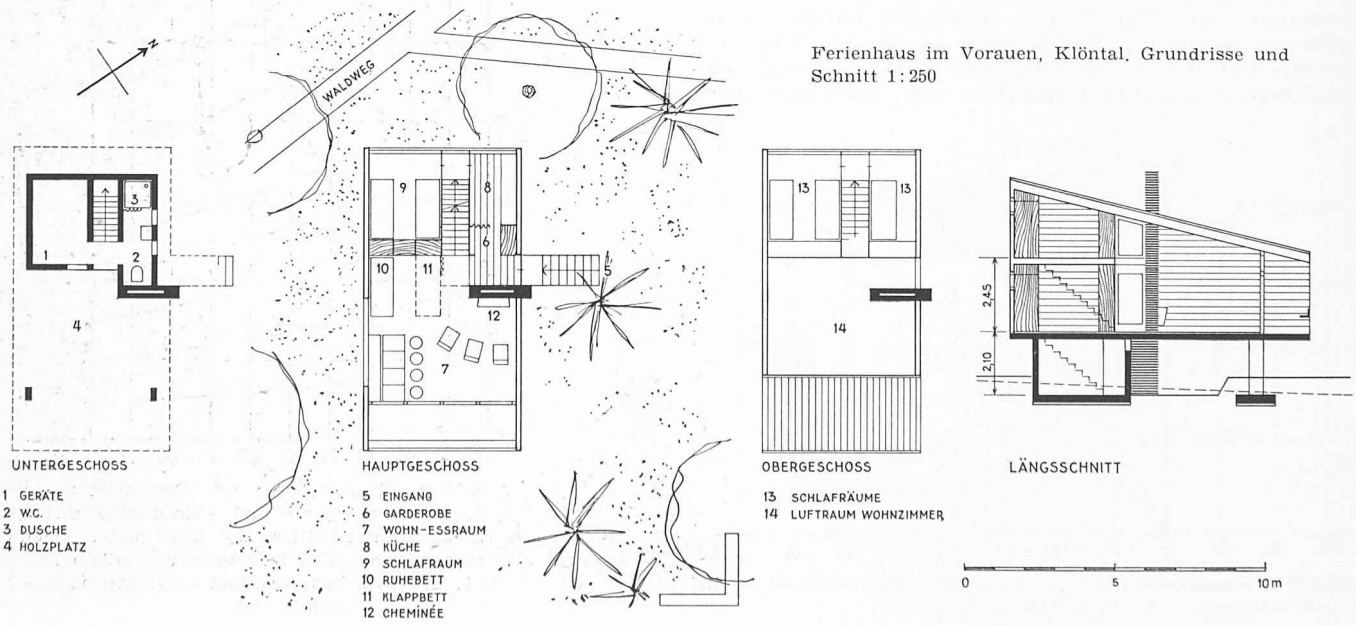
Adresse des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. *Hubert Rüsch,* Techn. Hochschule, Lehrstuhl für Massivbau und Materialprüfungsamt für das Bauwesen, München 2, Arcisstr. 21.

Ferienhaus im Vorauen, Klöntal

Architekt **Jakob Zweifel,** Zürich und Glarus — Hierzu Tafel 11

Das Problem der Einpassung von Ferienhäusern in die Landschaft wird oft von den entscheidenden Behörden missverstanden. Wenn ein Häuschen einem Berner Chalet oder einem Stall ähnlich ist, wenn es mit Ziegeln eingedeckt ist und ein Satteldach aufweist, wird es als in die Landschaft passend empfunden und bewilligt. Das Resultat sind die entstellten Landschaften. Im vorliegenden Fall liessen sich die Bewilligungsinstanzen, die zuerst gegen das Pultdach eingestellt waren, glücklicherweise eines bessern belehren.

Das Gebäude liegt am Waldsaum des Klöntalersees. Nur die Schmalseite des Gebäudes tritt in Form eines breiten Aussichtsfensters für den Passanten in Erscheinung. Diese Partie ragt über den Unterbau vor und wirkt daher schwebend und leicht. Das Pultdach ist in einer durchgehenden Fläche nach hinten gegen den Hang und die Waldpartie in normalem Gefälle ausgeführt. Es ergab sich so die Möglichkeit, im Dachgeschoss ein zusätzliches Kinderzimmer unterzubringen. Die Fundamente und Umfassungsmauern des Untergeschosses bestehen aus Beton, die Zwischenwände aus Kalksandsteinen. Das Haupt- und Obergeschoss sind in Holz konstruiert und verschalt. Das Dach ist mit Eternit eingedeckt worden.



Ferienhaus im Vorauen, Klöntal. Grundrisse und Schnitt 1:250