

# Beton für den Bau von Kernkraftwerken \*)

Von Wilhelm Manns, Düsseldorf

## Übersicht

*Bei Kraftwerkneubauten wird in Zukunft der Anteil der Kernkraftwerke im Vergleich zu den konventionellen Kraftwerken zunehmen. Besonderheiten für Betonbauten zu Kernkraftanlagen treten nur dann auf, wenn der Beton auch die Aufgabe des Strahlenschutzes zu übernehmen hat. Als Strahlenschutzbeton kann sowohl Normalbeton als auch Schwerbeton mit einer Rohdichte über  $2,80 \text{ kg/dm}^3$  verwendet werden.*

*Die Strahlenschutzwirkung von Beton gegen Gammastrahlen steigt ungefähr proportional mit seiner Rohdichte. Die Rohdichte kann daher als Gütemerkmal für den Strahlenschutz benutzt werden. Ausgehend von der Rohdichte, die der Berechnung des Strahlenschutzes zugrunde liegt (Entwurfsrohddichte), wird die bei der Eignungs- oder Güteprüfung einzuhaltende Frischbeton- oder Festbetonrohddichte festgelegt; hierbei sind der im Beton verbleibende Teil des Anmachwassers und die zu erwartende Streuung der Rohdichte zu berücksichtigen.*

*Für eine besonders wirksame Neutronenabschwächung ist ein höherer Gehalt an leichten Atomen (Wasserstoff) zweckmäßig, als er normalerweise im Normalbeton und auch im Schwerbeton enthalten ist. Da freies Wasser im Beton bei Temperaturen über  $80^\circ\text{C}$  in trockenen Räumen praktisch vollständig verdampft, läßt sich der Wassergehalt unter diesen Umweltbedingungen nur durch kristallwasserhaltigen Zuschlag erhöhen. Zum Beispiel gibt Serpentinestein als Zuschlag den größeren Teil seines Wassergehalts von rd. 13 Gew.-% erst bei Temperaturen über  $350^\circ\text{C}$  ab.*

*Spannbetondruckbehälter für Reaktoren wurden bisher nur mit Normalbeton gebaut. Für die Konstruktion und Bemessung erlangen dabei Betoneigenschaften eine Bedeutung, die sonst nicht zu berücksichtigen waren und die daher nur wenig erforscht wurden. Neuere Untersuchungen betreffen u. a. den Einfluß der Temperatur auf das spezifische Kriechmaß von lufttrockenem und vor Austrocknung geschütztem Beton bei einachsiger und mehrachsiger Druckbeanspruchung sowie die Dauerstandfestigkeit von Beton unter mehrachsiger Druckbeanspruchung.*

---

\*) Unter Berücksichtigung von Beiträgen zum ACI-Seminar „Concrete for Nuclear Reactors“ (Berlin, Okt. 1970).

## 1. Allgemeines

Zu den wichtigen volkswirtschaftlichen Aufgaben der Zukunft gehört die sichere und wirtschaftliche Deckung des Energiebedarfs, der sich in den industrialisierten Ländern nahezu in jedem Jahrzehnt verdoppelt. In den kommenden Jahren wird ein immer größer werdender Anteil der benötigten elektrischen Energie von Kernkraftwerken erzeugt werden, so daß auch bei Kraftwerkneubauten der Anteil der Kernkraftwerke im Vergleich zu den konventionellen Kraftwerktypen (Wärme- und Wasserkraftwerke) zunehmen wird.

Konventionelle Wärmekraftwerke werden heute meist in gemischter Bauweise aus Stahl- oder Spannbeton und Stahl errichtet. Je nach den örtlichen und konjunkturellen Gegebenheiten beträgt bei ihnen das Kostenverhältnis Beton- zu Stahlbau 50 : 50 bis 65 : 35. Bei Kernkraftwerken wird sich das Verhältnis zugunsten des Massivbaus verschieben, weil das Kesselhaus, das bei konventionellen Wärmekraftwerken wegen der leichteren Umbaumöglichkeit meist in Stahlbauweise errichtet wird, bei Kernkraftwerken durch das Reaktorgebäude ersetzt wird, bei dem gegenüber dem Kesselhaus in weit größerem Umfang die Betonbauweise herangezogen wird.

Die Wärmequelle eines Kernkraftwerkes ist der Reaktor, der bei der immer mehr angewendeten integrierten Bauweise zusammen mit dem Kühlmittelkreislauf, den Dampferzeugern und sonstigen Betriebseinrichtungen (Primärteil) in einem Spannbetondruckbehälter untergebracht wird. (Für „Spannbetondruckbehälter“ wird in der angelsächsischen Literatur meist die Abkürzung PCRV für „prestressed concrete reactor vessel“ benutzt.)

Reaktordruckbehälter in Spannbeton weisen nicht nur Vorteile hinsichtlich der Fertigung und auch der Betriebssicherheit auf, sondern sind insbesondere wirtschaftlicher als Druckbehälter in Stahl. Zur Zeit sind 6 Reaktor-Spannbetondruckbehälter in Betrieb mit im Mittel 6 Jahren Betriebserfahrung. Weitere 14 Reaktordruckbehälter sind in Amerika und Europa in der Planung oder Konstruktion [1].

Spannbetondruckbehälter für Reaktoren werden meist als Zylinder mit ebenen oder gewölbten Böden ausgeführt; sie sind in vereinfachter Darstellung ein vorgespannter massiver Betonblock mit einer oder mehreren inneren Aussparungen für das Reaktorsystem. Der Reaktordruckbehälter für das VEW-Kraftwerk Westfalen in Schmehausen wird bei einer Wanddicke von rd. 5 m einen Innenraum von etwa 16 m Durchmesser und 16 m Höhe umschließen und rd. 10 000 m<sup>3</sup> Beton erfordern [2].

Bei Kernkraftwerken werden jedoch die anderen Anlagen wie bei konventionellen Kraftwerken errichtet (Kühltürme, Schornstein, Wasseraufbereitungsanlage und Maschinenhaus, die bauliche Anlage für den Sekundärteil, mit Turbinen, Kondensator, Generator, Vorwärmer und Pumpen).

Beim Kernkraftwerk Obrigheim wurden bei einer elektrischen Nettoleistung von rd. 300 MW insgesamt etwa 60 000 m<sup>3</sup> Beton eingebaut [3].

Besonderheiten beim Einsatz von Beton in Kernkraftwerken treten dann auf, wenn der Beton im Primärteil neben raumabschließenden und tragenden auch strahlenschutztechnische Aufgaben übernimmt. Der Beton muß daher nicht nur eine ausreichende Festigkeit und Dichtigkeit aufweisen, sondern auch die bei der Kernspaltung auftretenden biologisch schädlichen Strahlen wirksam abschwächen. Von den verschiedenartigen Kernstrahlen haben die Gamma- und Neutronenstrahlen das größte Durchdringungsvermögen. Die Bemessung eines Strahlenschutzschildes aus Beton richtet sich daher nach der Gamma- und Neutronenstrahlung; er gewährleistet dann auch Schutz gegen die anderen auftretenden Strahlenarten, wie z. B. Alpha- und Betastrahlen. Die Abschwächung der Gammastrahlen durch Beton steigt ungefähr proportional mit seiner Rohdichte an, während für die Neutronenabsorption auch leichte Atome (Wasserstoff), d. h. Betone mit einem möglichst großen Wassergehalt, erforderlich sind.

Als Strahlenschutzbeton ist sowohl Normalbeton, dessen Rohdichte in der Neufassung von DIN 1045 mit höchstens  $2,8 \text{ kg/dm}^3$  angegeben ist, als auch Schwerbeton mit einer Rohdichte über  $2,8 \text{ kg/dm}^3$  geeignet. Normalbeton schwächt im allgemeinen die bei der Kernspaltung entstehenden Neutronenstrahlen besser ab als die gleichzeitig entstehenden Gammastrahlen, so daß für eine Bemessung des Strahlenschutzes durch Normalbeton im allgemeinen seine Gammastrahlenabsorption maßgebend ist. Schwerbeton hat demgegenüber eine wesentlich höhere Gammastrahlenabsorption bei nahezu gleicher Abschwächung der Neutronenstrahlen wie Normalbeton. Durch Verwendung wasserhaltiger Zuschläge für den Schwerbeton kann die Neutronenabsorption gesteigert werden.

Für den Einsatz von Beton im Reaktor werden Kenntnisse von Betoneigenschaften benötigt, die sonst keine Bedeutung hatten und die bisher nur wenig untersucht worden sind. Einen Überblick über den Stand dieser Erkenntnisse und neueste Forschungsergebnisse vermittelte das erste nicht in Amerika durchgeführte Seminar des American Concrete Institute (ACI) mit dem Thema „Concrete for nuclear reactors“. Das Seminar fand vom 5. bis 9. Oktober 1970 in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in Berlin mit 80 Teilnehmern aus 20 Ländern statt. Etwa 70 Beiträge und die anschließenden Diskussionen, die später als Tagungsbericht (Proceedings) vom ACI veröffentlicht werden, gaben Einblick in die Forschungsergebnisse über Berechnungsmethoden und Modellversuche vorgespannter Reaktordruckbehälter und die im Hinblick auf die Verwendung von Beton im Reaktorbau maßgebenden Stoffeigenschaften von Normal- und Schwerbeton.

Der Schwerpunkt dieser Ausführungen galt den Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Beton unter verschiedenen mehrachsigen und langandauernden Spannungszuständen, der Auswirkung von höheren Betriebstemperaturen (bis  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  für Normalbeton, bis  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  für Schwerbeton) auf die Festigkeit, dem Kriechen und dem Wassergehalt bei höherer Temperatur sowie dem Einfluß von Kernstrahlen auf die Betoneigenschaften und der Betonrohddichte zur Beurteilung der Strahlenschutzwirkung.

Die Themen des Seminars überdeckten ein weites Gebiet; im folgenden wird auf die Ausführungen über die Rohdichte des Betons, seinen Wassergehalt sowie sein Festigkeits- und Verformungsverhalten näher eingegangen.

## 2. Betonrohichte

Ausreichender Strahlenschutz ist dann gewährleistet, wenn die bei den Strahlenschutzberechnungen angenommene Rohdichte (Entwurfsrohichte) zuverlässig eingehalten wird, d. h. wenn die Wahrscheinlichkeit der Unterschreitung dieses Wertes in der Grundgesamtheit gering ist, z. B. 5 % nicht übersteigt.

Als Entwurfsrohichte gilt häufig die Trockenrohichte, die sich im Anschluß an eine Erhärtung des Betons unter festgelegten Lagerungsbedingungen, meist Normlagerung, nach der Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei einer bestimmten Temperatur ergibt. Diese Trocknungstemperatur entspricht in der Regel der Gebrauchstemperatur (Betriebstemperatur), die der Beton während des Reaktorbetriebs annimmt.

Das im Beton bei dieser Temperatur verbleibende Wasser beeinflusst die Rohdichte zwar nur geringfügig, es ist jedoch in starkem Maße für die Neutronenstrahlenabschwächung maßgebend. Je nach Wasserzementwert wird nur ein Teil des Anmachwassers vom Zement chemisch und damit nicht verdampfbar gebunden. Dieser Anteil beträgt bei Normzementen nach DIN 1164 nach weitgehender Hydratation etwa 20 Gew.-% des Zementgewichts. Der über diesen Anteil hinausgehende Betrag des Anmachwassers wird teilweise in den Gelporen der Hydratationsprodukte physikalisch durch Adsorption festgehalten oder er findet sich in den größeren Kapillarporen des Zementsteins. Inwieweit das Wasser aus den Gel- und Kapillarporen nicht verdunstet, also im Beton verbleibt, hängt von den äußeren Bedingungen ab. Bei Luftlagerung im Normklima (20 °C, 65 % rel. Feuchte) beträgt dieser Gehalt, meist als Ausgleichsfeuchte bezeichnet, 3 bis 5 Vol.-%. Bei langdauernden Temperaturen oberhalb 80 °C geht die Ausgleichsfeuchte praktisch auf Null zurück, und der zur Neutronenabschwächung wirksame Wassergehalt beschränkt sich auf den chemisch gebundenen Anteil.

Um für eine Entwurfsrohichte die bei der Eignungs- oder Güteprüfung einzuhaltende Frischbeton- und Festbetonrohichte festlegen zu können, benötigt man außerdem Angaben über die zu erwartende Streuung der Rohdichten, die wie jede andere Eigenschaft des Betons nur in gewissen Grenzen eingehalten werden kann.

Bild 1 enthält die Häufigkeitsdiagramme der Rohdichten von getrocknetem Normalbeton und Schwerbeton, der als Strahlenschutzbeton in einem Kernkraftwerk verwendet wurde [4]. Die Häufigkeitsdiagramme zeigen näherungsweise die Form der Normalverteilung, so daß sich die aufgetretene Streuung mit der Standardabweichung kennzeichnen läßt. Für den Normalbeton beträgt

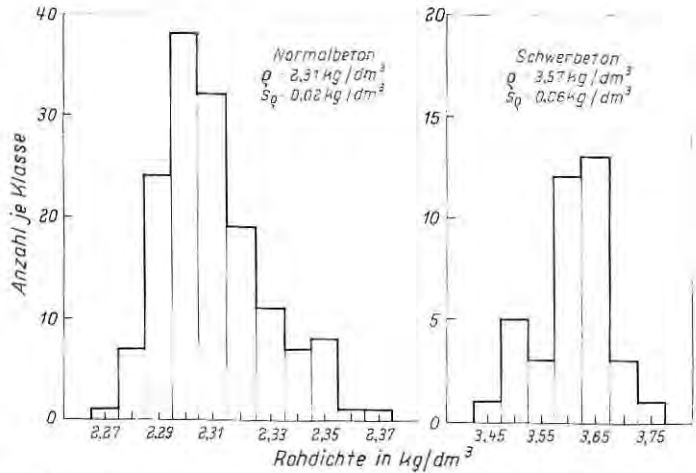


Bild 1 Trockenrohichte  $\rho$  und Standardabweichung  $s_\rho$  von Strahlenschutzbeton (Lagerung: 28 Tage unter Wasser von 20 °C, anschließend an Luft von 80 °C bis zur Gewichtskonstanz) [4]

die Standardabweichung  $s_\rho = 0,02 \text{ kg/dm}^3$  bei einer mittleren Festbetonrohichte von  $\rho = 2,31 \text{ kg/dm}^3$ ; für den Schwerbeton fanden sich entsprechend  $s_\rho$  zu  $0,06 \text{ kg/dm}^3$  und  $\rho$  zu  $3,57 \text{ kg/dm}^3$ .

Obwohl die hier aufgeführten Standardabweichungen zunächst nur für das hier gewählte Beispiel gelten, kann doch in der Praxis, wie auch andere Untersuchungen gezeigt haben [5 u. a.], bei guter Bauausführung mit ähnlichen Standardabweichungen gerechnet werden.

Mit der vorgesehenen Entwurfsrohichte läßt sich die bei der Eignungsprüfung einzuhaltende Frischbetonrohichte angeben:

$$\rho_{fb} = \rho_{iN} + 1,64 s_\rho + W_v$$

Hierin bedeuten:

- $\rho_{fb}$  = Frischbetonrohichte in  $\text{kg/dm}^3$
- $\rho_{iN}$  = Entwurfsrohichte in  $\text{kg/dm}^3$
- $s_\rho$  = Standardabweichung der Rohdichte in  $\text{kg/dm}^3$
- $W_v$  = Anteil vom Wassergehalt, der bei Betriebstemperatur des Betons verdunstet, in  $1/\text{dm}^3$   
 (Dieser Anteil kann bei Betriebstemperaturen oberhalb 80 °C gleich dem gesamten Wassergehalt  $W$  des Betons, vermindert um das durch den Zement  $Z$  chemisch gebundene Wasser, gesetzt werden, also angenähert  $W_v = W - 0,2 Z$ , d. h. bei einem Zementgehalt in der Größenordnung von  $300 \text{ kg/dm}^3$   $W_v = W - 60$ .)

### 3. Beton aus Zuschlägen mit höherem Kristallwassergehalt

Anfänglich wurden Strahlenschutzschilde versuchsweise aus aufeinander liegenden Schichten von Stahl und Preßvollholz herge-

stellt; mit dem Stahl wurde eine hohe Dichte erreicht und mit dem vergüteten Vollholz der für die Neutronenabschwächung wichtige Wasserstoff eingebaut. Diese Strahlenschutzschilde wiesen jedoch hohe Konstruktionskosten auf und eigneten sich nur für niedrige Betriebstemperaturen [6]. Aus diesen Gründen wurde später Beton mit hoher Rohdichte (Schwerbeton) für den Strahlenschutz eingesetzt; damit waren gleichzeitig günstige Festigkeitseigenschaften und niedrige Stoffkosten verbunden. Bei Schwerbeton aus gewöhnlichen, weitgehend kristallwasserfreien Schwerzuschlägen (Baryt, Magnetit, Stahl o. ä.) verbleibt bei höheren Temperaturen allerdings nur das im Zementstein chemisch gebundene Wasser (siehe Abschnitt 2). Den für die Neutronenabschwächung erforderlichen Betrag an Wasser im Beton kann man durch kristallwasserhaltige Zuschläge erhöhen. Neben Limonit (Brauneisenstein) diente in jüngerer Zeit auch mehrfach Serpentin (ein Schichtsilicat der chemischen Zusammensetzung  $3 \text{MgO} \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) als Zuschlag, siehe u. a. [7 bis 10]. Dieses Magnesiumsilicat findet in der faserigen Form als Asbest weitgehende Verwendung im Bauwesen.

Serpentin enthält bei einer Kornrohddichte von rd.  $2,60 \text{ kg/dm}^3$  rd. 13 Gew.-% Kristallwasser und damit einen nahezu ebenso großen Kristallwassergehalt wie Limonit. Serpentin gibt jedoch seinen Kristallwassergehalt im Vergleich zu Limonit erst bei wesentlich höheren Temperaturen ab, siehe Bild 2 [7]. Während Limonit bereits ab  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  entwässert, findet eine wesentliche Entwässerung des Serpentin erst ab rd.  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  statt.

Mit dieser Eigenschaft des Serpentin als Zuschlag bleibt der Neutronenschutz bis zu Betriebstemperaturen von etwa  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  erhalten. Serpentin, der für Strahlenschutzbeton verwendet wird, muß

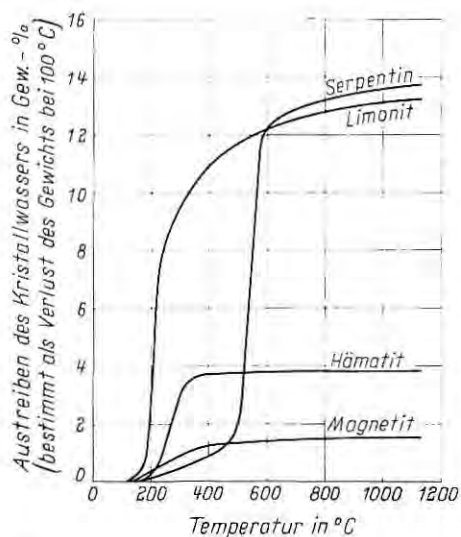


Bild 2  
Austreiben des Kristallwassers von Zuschlägen für Strahlenschutzbetone durch Erhitzen (Hauptminerale: Serpentin, Limonit, Hämatit, Magnetit) [7]

eine möglichst hohe Kornfestigkeit und hohen Wassergehalt aufweisen. Er darf nur geringe Mengen faseriger Bestandteile (Asbest) enthalten, weil durch größeren Gehalt die Verarbeitung insbesondere bei Ausgußmörtel sehr erschwert wird und der Wasserbedarf für eine bestimmte Verarbeitbarkeit ansteigt. Beton mit Serpentin als alleinigem Zuschlag enthält mehr gebundenes Wasser als für die Neutronenabschwächung notwendig ist, so daß in der Praxis meist ein Teil des Serpentin zur Steigerung der Gammastrahlenabsorption durch schwere Zuschläge (Magnetit, Stahl o. ä.) ersetzt werden kann.

In einem Anwendungsfall [7] wurden bei Ausgußbeton, dessen vorher in die Schalung eingebrachtes Grobzuschlaggerüst aus Stahlstücken und Serpentinshotter im Gewichtsverhältnis 2:1 bestand, Druckfestigkeiten von rd. 250 kp/cm<sup>2</sup> an Betonzylindern (d = 15 cm, h = 30 cm) erreicht. Der Ausgußmörtel war aus 1 Gew.-T. Zement, 1,30 Gew.-T. Serpentin-Brechsand und 0,60 Gew.-T. Wasser zusammengesetzt. Die Druckfestigkeit von 5-cm-Würfeln fand sich zu rd. 325 kp/cm<sup>2</sup>.

#### 4. Festigkeit und Verformung von Normalbeton

Festigkeit und Verformung des Betons in Spannbetondruckbehältern entstehen unter anderen Bedingungen als in üblichen Spannbetonbauwerken. Soll von der Würfeldruckfestigkeit (DIN 1048) im Alter von 28 Tagen die Festigkeit des Betons im Druckbehälter abgeleitet werden, so sind teils festigkeitserhöhende, teils festigkeitsmindernde Einflüsse zu beachten, wie z. B. die Temperaturerhöhung in den dicken Wänden infolge Hydratation des Zements und bei Inbetriebnahme des Reaktors, die Nacherhärtung oder die Veränderungen durch Kernstrahlen. Für die Umrechnung ist ferner zu beachten, daß die Würfeldfestigkeit durch einachsigen Druck im Kurzzeitversuch erhalten wurde und im vorgespannten Druckbehälter eine langdauernde mehrachsige Belastung wirkt.

Über einige der hier genannten Einflüsse liegen noch nicht so viele Untersuchungsergebnisse vor, daß eine gesicherte Aussage möglich ist. Der Einfluß der Temperaturbeanspruchung des Betons durch die Hydratation und die Inbetriebnahme des Reaktors wird z. B. noch sehr unterschiedlich beurteilt. Einige Versuchsergebnisse [11] deuten an, daß es vorteilhaft ist, wenn die Wärmedehnzahlen von Zuschlag und Zementstein möglichst übereinstimmen, was bei Zuschlägen mit hohem Quarzgehalt der Fall wäre. Andere Versuchsergebnisse [12, 13] lassen keinen nachweisbaren Einfluß der Zuschlagart erkennen. Mit einer geringen Abminderung der Festigkeit (etwa 10 bis 20 %) ist jedoch in dem für Spannbetondruckbehälter wichtigen Temperaturbereich zu rechnen [11 bis 13]. Eine Beurteilung des Einflusses der Hydrationswärme auf die Festigkeits- und Formänderungseigenschaften ist möglich, wenn der Beton bei der Eignungsprüfung mit einer Temperatur erhärtet, die ungefähr dem mittleren Temperaturverlauf im Bauteil entspricht. Dem Temperaturverlauf in der Wand eines Spannbetondruckbehälters ist in Bild 3 [11] der im Labor angepaßte, mittlere Temperaturverlauf gegenübergestellt.



Bild 3  
Temperaturverlauf  
(maximaler und minimaler Wert) in einer Wand eines Spannbetonbehälters und idealisierte Wärmebehandlung für Laboruntersuchungen [11]

Durch viele Versuchsergebnisse ist belegt, daß sich bei mehrachsiger kurzzeitig wirkender Druckbeanspruchung die Belastbarkeit des Betons zum Teil sehr stark erhöht, siehe auch [14, 15]. Da auf den Beton des Spannbetonbehälters ein mehrachsiger, langdauernder Druck wirkt, sind Untersuchungsergebnisse über das Dauerstandverhalten unter mehrachsiger Belastung von großer Bedeutung. Versuche über die zweiachsige, langfristig wirkende Druckbeanspruchung scheinen zu ergeben, daß die Dauerstandfestigkeit von Beton bei zweiachsiger Druckbeanspruchung rd. 80 % der Kurzzeitfestigkeit beträgt, die sich unter bestimmten Druckverhältnissen einstellt, siehe Bild 4 [16]. Damit ist die Dauerstandfestigkeit über den gesamten zweiachsigen Belastungsbereich etwa ebenso groß wie die Dauerstandfestigkeit bei einachsigen Druck.

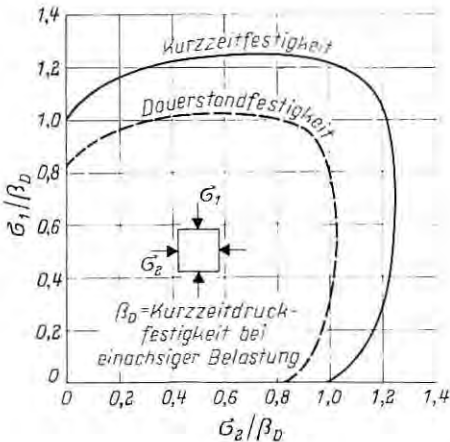


Bild 4  
Festigkeit von Beton unter zweiachsiger Druckbeanspruchung bei Kurzzeit- und Langzeitbelastung [16]



Verschiedentlich wurde der Einfluß eines langdauernden hohen Neutronenflusses auf die Betoneigenschaften untersucht [11, 17 bis 19], dabei wurde bei einigen Untersuchungen für den praktisch interessierenden Bereich ein allerdings nur sehr geringfügiger (rd. 10 %) Festigkeitsrückgang beobachtet [11, 17].

Das Kriechen bei der Bemessung von vorgespannten Druckbehältern kann nicht allein auf das bekannte Kriechen unter einachsiger Druckbelastung bei Normbedingungen (20 °C, 65 % rel. Feuchte) abgestellt werden. Vielmehr muß das Kriechverhalten auch bei höheren Temperaturen, unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten und mehrachsigen Beanspruchungen bekannt sein. Es kann als gesichert betrachtet werden, daß das spezifische Kriechmaß unter höheren Temperaturen sowohl für lufttrockenen als auch für wassergesättigten Beton stark anwächst, siehe u. a. [14]. Diese Aussage, bisher nur an einachsigen Kriechversuchen bestätigt, kann nach neueren Untersuchungsergebnissen auch auf zwei- und mehrachsige Spannungszustände übertragen werden, siehe Bild 5 [20]. Nach dieser Untersuchung waren die spezifischen Kriechmaße bei höherer Temperatur größer, auch wenn der Beton nach der Herstellung vor Austrocknung geschützt (versiegelt) wurde; dies fand sich sowohl bei einachsiger als auch bei dreiachsiger Belastung. Bei lufttrockenen Betonen waren die Kriechwerte in der Regel jedoch etwas größer als bei den versiegelten Betonen. Kriechversuche unter dreiachsiger Beanspruchung, höherer Temperatur und konstanter Feuchtigkeitsbedingungen erfordern aufwendige Versuchs- und Meßeinrichtungen [21]. Eine Senkung der Versuchskosten ließe sich bereits erreichen, wenn das mehrachsige Kriechen von Beton aus Versuchswerten abgeleitet werden könnte, die eine einachsige Belastung liefert [22].

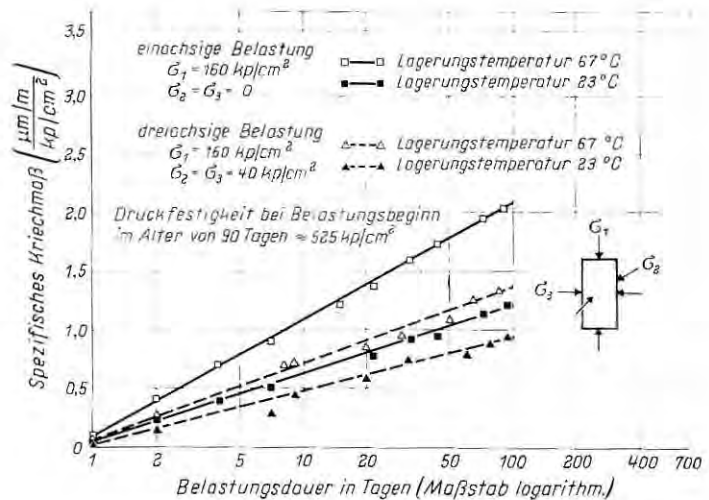


Bild 5 Einfluß der Temperatur auf das spezifische Kriechmaß von Beton bei einachsiger und dreiachsiger Druckbeanspruchung (Beton gegen Wasserabgabe geschützt) [20]

## 5. Schlußbemerkung

Die Verwendung von Beton im Reaktorbau wirft sowohl für Normalbeton als auch für Schwerbeton eine Vielzahl von stofflichen Fragen auf, die durch Untersuchung einer Reihe von bisher unbekanntem Stoffeigenschaften zu klären sind. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können z. T. auch für andere Anwendungsgebiete nützlich werden.

## SCHRIFTTUM

- [1] Plaehn, J. L.: A practical approach to the design philosophy of prestressed concrete reactor vessels — Importance of concrete properties to PCRV design. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 2.
- [2] 300-MW-Kernkraftwerk der HKG mit Thorium-Hochtemperaturreaktor im VEW-Kraftwerk Westfalen. Konsortium THTR (BBC AG und BBK GmbH).
- [3] Mitteilungen Siemens-Bauunion: Kernkraftwerk Obrigheim, H. 51, Febr. 1970, S. 3/5.
- [4] Karasuda, S., und I. Hoshino: Dry density of concrete at elevated temperature. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 10.
- [5] Pihlajavaara, S. E.: A preliminary recommendation for design, making and control of radiation-shielding structures. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 2.
- [6] Davis, H. S.: Concrete for radiation shielding — in perspective. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 1.
- [7] Davis, H. S.: Iron-serpentine concrete. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 13.
- [8] Hönig, A., F. Vesely, M. Samalikova, B. Stoces und M. Havranek: Serpentine concrete for Czechoslovakia A-2 reactor shielding. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 13.
- [9] Ohgishi, S., S. Miyasada und J. Chida: On properties of magnetite and serpentine concrete at elevated temperatures for reactor shielding. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 13.
- [10] Klang, H.: Versuche über das Wasserrückhaltevermögen dreier Betone für Abschirmzwecke. Beton- und Stahlbetonbau 64 (1969) H. 9, S. 222/223.
- [11] Browne, R. D., und R. Blundell: The relevance of concrete property research to pressure vessel design. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 2.
- [12] Mears, A. P.: Long term tests on the effect of moderate heating on the compressive strength and dynamic modulus of concrete. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 5.
- [13] Wischers, G.: Einfluß einer Temperaturänderung auf die Festigkeit von Zementstein und Zementmörtel mit Zuschlagstoffen verschiedener Wärmedehnung. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 28, Düsseldorf 1961.
- [14] Manns, W.: Baustoffe des konstruktiven Ingenieurbauwes. beton 19 (1969) H. 6, S. 268/270 (Symposium Southampton 1969).
- [15] Bericht über den VI. FIP Congress, Prag 1970 (in Vorbereitung).
- [16] Linse, D.: Strength of concrete under biaxial longtime loading. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 4.
- [17] Eilleuch, M. F., F. Dubois und J. Rappeneau: Effects of neutron radiation on special concretes and their components. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 12.
- [18] Kelly, B. T., I. E. Brocklehurst, D. Mottershead und S. Mc Nearney: The effects of reactor radiation on concrete. Symposium Euratom, Brüssel 1969.

- [19] Dubrovskij, V. B., S. S. Ibragimov, A. Ja. Ladygin und B. K. Pergamenšik: Effect of neutron irradiation on some properties of heatresistant concrete. Soviet Atomic Energy 21 (1966) Nr. 2, S. 740/744 (Übersetzung aus: Atomnaja energija 21 (1966) Nr. 2, S. 108/112).
- [20] Mc Donald, I. E.: An experimental study of multiaxial creep in concrete. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors. Session 8.
- [21] Jundi, N., T. W. Kennedy, E. S. Perry und J. N. Thompson: An experimental approach to triaxial creep at elevated temperatures. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 8.
- [22] Chaung, J. W., T. W. Kennedy, E. S. Perry und J. N. Thompson: Predictions of multiaxial creep from uniaxial creep tests. Beitrag zum ACI-Seminar, Berlin 1970: Concrete for Nuclear Reactors, Session 8.