

Festigkeit und Verformung von Beton bei sehr tiefer Temperatur

Von Ferdinand S. Rostásy und Günter Wiedemann, Braunschweig *)

Übersicht

Der Einsatz von Spannbeton für den Bau von Behältern zur Speicherung von verflüssigtem Erdgas erfordert umfassende Kenntnisse des Werkstoffverhaltens von Spannstahl, Betonstahl und Beton im Bereich extrem tiefer Temperaturen. Dabei interessieren die Festigkeit und Verformbarkeit bei den Tieftemperaturen, also im eingefrorenen Zustand, aber auch nach ein- oder mehrmaligen Temperaturzyklen, die schockartig einwirken können.

Am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig wird seit drei Jahren das Tieftemperaturverhalten der genannten Baustoffe eingehend studiert. Aus dem Arbeitsbereich Beton wird im folgenden berichtet.

1. Einleitung

Seit den ersten Prognosen des Club of Rome wissen wir, daß die Vorkommen an Erdöl, dem derzeit wichtigsten Primärenergieträger, zur Neige gehen. Die Suche nach alternativen natürlichen Energieträgern führte zum Erdgas, das lange Zeit nicht wirtschaftlich gefördert werden konnte, ja sogar nutzlos abgefackelt wurde.

Natürliches Erdgas ist ein Gemisch aus ca. 90 % Methan, anderen Kohlenwasserstoffverbindungen und Stickstoff. Es ist wirtschaftlich, Erdgas im flüssigen Aggregatzustand zu transportieren und zu speichern, da bei der Verflüssigung eine Verringerung des Volumens von 1000 l Gas auf etwa 1,7 l Flüssigkeit eintritt. Verflüssigtes Erdgas (LNG) besitzt allerdings unter atmosphärischem Druck eine Temperatur von -162°C .

Die Verflüssigung von Erdgas ist eine erprobte Technologie. Die Lagerung und der Transport des sehr kalten LNG stellte und stellt die Bauindustrie jedoch vor schwierige materialtechnische und konstruktive Probleme. Bereits auf dem letzten FIP-Kongreß 1978 in London wurde erkennbar, daß sich die Betonbauindustrie dieser Herausforderung gestellt hat und daß der Einsatz von Spannbeton in diesem neuen Gebiet stetig zunimmt. Dabei wird er nicht nur für

*) Nach einem Vortrag von F. S. Rostásy auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '79 vom 3. bis 5. Oktober in Düsseldorf

Tanks bereits angewandt, sondern seine Verwendung ist darüber hinaus für den Bau von LNG-Transportschiffen und schwimmenden Verflüssigungsanlagen mit Zwischenspeichern vorgesehen.

Für den Einsatz des Spannbetons sprechen mehrere Gründe. Sie liegen nicht nur auf dem Gebiet Wirtschaftlichkeit, sondern vor allem auf dem Gebiet Sicherheit, denn vorgespannter Beton besitzt für den Katastrophenfall eine hohe Reißzähigkeit und einen hohen Brandwiderstand.

2. Werkstoffprobleme beim Bau von LNG-Behältern

LNG-Behälter werden heute aus Gründen der Sicherheit zweischalig hergestellt und bestehen aus den in Bild 1 dargestellten Bauteilen. Dabei kommen im allgemeinen die beiden nachfolgenden Varianten für die Baustoffe von Außen- und Innentank zur Anwendung [1, 2]:

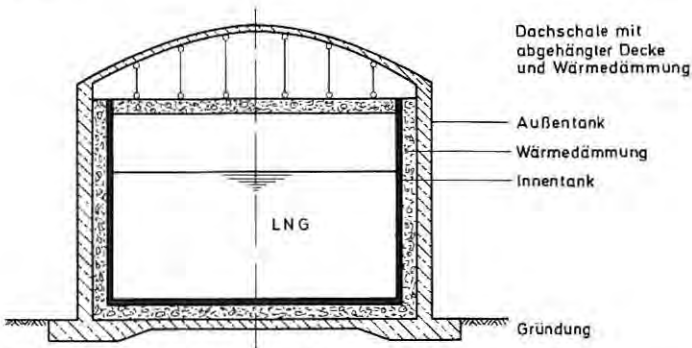


Bild 1 Aufbauschema eines LNG-Lagerbehälters

Variante I:

Außentank: Spannbeton

Innentank: kaltzäher, nickellegierter Stahl

Variante II:

Außentank: Spannbeton

Innentank: Spannbeton mit innenseitiger stählerner Dichthaut (Liner)

Der Innentank ist der eigentliche Lagerbehälter für das LNG. Er ist allseitig von einer Wärmedämmschicht umschlossen und besitzt die LNG-Temperatur von -162°C . Durch kontrolliertes und graduelles Kaltfahren bei der Erstbefüllung wird der Temperaturzwang klein gehalten. Aus betrieblichen Gründen und in Störfällen kann die vollständige Entleerung des Innentanks notwendig werden, der eine erneute Befüllung folgt. Es liegt dann eine Temperaturwechselbeanspruchung der Konstruktion vor.

Der Außentank aus Spannbeton besitzt eine Reihe von Schutzfunktionen: Er hat im Falle eines Lecks im Innentank die Freisetzung von

Gas zu unterbinden, da dieses mit Luft vermischt hochbrennbar ist. Er ist Schutzhülle gegen außergewöhnliche Einwirkungen von außen, wie z. B. Brand in Behälternähe u. a. m. Der Spannbetonaußentank ist im Regelbetrieb „warm“; es herrscht in ihm ein nur mäßiges Temperaturgefälle. Im Störfall einer Leckage des Innentanks kann es zu einer örtlichen und plötzlichen Abkühlung des Wandbetons kommen, die als Kälteschock bezeichnet wird.

Damit ergeben sich folgende Fragen für den Beton:

1. Wie verändert sich das Festigkeits- und Verformungsverhalten im eingefrorenen Zustand bei rd. -160°C ?
2. Wie verändert sich das Festigkeits- und Verformungsverhalten nach ein- oder mehrmaligem Kälteschock?
3. Welchen Einfluß üben ein- oder mehrmalige langsame Temperaturwechsel aus?

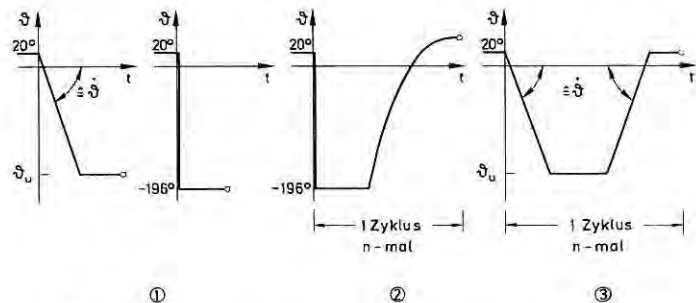
Natürlich stellen sich für die Baustoffe Spannstahl und Bewehrungsstahl, für die Verankerungselemente der Spannglieder und für die Verankerungen des Stahlbetons entsprechende Probleme. Sie können zu einer Frage zusammengefaßt werden: Führen extrem tiefe Temperaturen, noch dazu schockartig aufgebracht, zu einer Versprödung der metallischen Werkstoffe?

Die aufgeworfenen Werkstoffprobleme haben sowohl bei Bauunternehmen als auch an Hochschulen zu Forschungsarbeiten geführt. Am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig befaßt sich eine Arbeitsgruppe mit der Gesamtheit der Werkstofffragen, also auch mit dem Verhalten von Spannstahl, Spanngliedverankerungen und Betonstäählen sowie des Verbundes bei Tieftemperatur. Aus dem Arbeitsbereich Beton soll im folgenden berichtet werden.

3. Überblick über die Braunschweiger Versuche

3.1 Temperaturbeanspruchungen

Die Temperaturzustände in Betrieb und Störfall mußten im Versuch simuliert werden. Gewählt wurden dazu die drei in Bild 2 schemati-



□ Prüfungen

Bild 2 Temperaturfälle zur Simulation der Zustände in Betrieb und Störfall

tisch dargestellten Temperaturbeanspruchungen. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten bei der Tieftemperatur, also im eingefrorenen Zustand, wurde mit den Temperaturgeschichten 1 untersucht, wobei die Abkühlgeschwindigkeit (Steilheit des Abkühlastes) variiert wurde. Den ein- oder mehrmaligen Kälteschock zeigt die Temperaturgeschichte 2. Hier interessiert die Restfestigkeit bei Raumtemperatur. Die geregelten Abkühl- und Aufwärmvorgänge im Betrieb simuliert die Temperaturgeschichte 3.

Die Temperaturbehandlung der Probekörper erfolgt in Kammern programmiert und geregelt; das Kühlmedium ist Flüssigstickstoff. Die Probekörper können in der Kammer mit oder ohne Vorlast temperiert und geprüft werden.

3.2 Untersuchte Werkstoffe

Die Untersuchungen begannen an Zementstein und Normmörteln nach DIN 1164 aus Portland- und Hochofenzement. Die ausgewählten Bindemittel entsprachen einander hinsichtlich Festigkeit und Mahlfineinheit. Mit diesen Versuchen sollte das Tieftemperaturverhalten der Bindemittelphase allein studiert werden, da bei Beton üblicher Zusammensetzung wegen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Betonbestandteile mit zusätzlichen Einflüssen zu rechnen war.

Daran anschließend wurden Betone untersucht, die etwa der Festigkeitsklasse B 35 entsprachen. Die Prüfungen erfolgten erst im Alter von rd. 100 Tagen, da auch in der Praxis der Beton nicht früher beansprucht wird. Als Betonzuschlag wurden quarzitischer Sand und Kies verwendet.

3.3 Struktur- und Feuchtezustand

Es war zu erwarten, daß das Tieftemperaturverhalten zum einen von Porosität und Struktur des Zementsteins, zum anderen von der Menge des in den Poren enthaltenen Wassers abhängen würde. Aus diesen Gründen wurden der Wasserzementwert und der Feuchtezustand der Mörtel und Betone variiert.

3.4 Messungen, Prüfungen

Der Einfluß tiefer Temperaturen wurde unmittelbar und mittelbar gemessen. Veränderungen der Druck- und Spaltzugfestigkeit gegenüber den Festigkeiten bei Raumtemperatur und das Temperaturdehnverhalten liefern einen unmittelbaren Einblick. Durch Messung der Laufzeit des Schalls, des Verzehrs an Schallenergie sowie durch die Porosimetrie erhält man wertvolle, mittelbare Informationen über Strukturänderungen.

3.5 Versuchskörper

Die Druckfestigkeit und das Verformungsverhalten wurden an zylindrischen Probekörpern von 8 cm Durchmesser und 16 cm Höhe ermittelt, die Spaltzugfestigkeit an Körpern von 8 cm Durchmesser

und 8 cm Länge. Das Temperaturdehnverhalten von Zementmörtel wurde in einem Dilatometer an Bohrkernen von 1,2 cm Durchmesser und 4 cm Länge bestimmt.

4. Verhalten von Beton bei Tieftemperatur

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton im eingefrorenen Zustand ist von grundsätzlichem Interesse. Es ist bereits seit längerer Zeit bekannt, daß die Festigkeitswerte und der Elastizitätsmodul mit fallender Temperatur ansteigen [3, 4, 5, 6].

4.1 Festigkeitsverhalten

Den Festigkeitsanstieg am Beispiel der Druckfestigkeit zeigt Bild 3. Er ist um so größer, je höher der Feuchtigkeitsgehalt des Betons zum Zeitpunkt des Einfrierens ist. Bei wassersatten Betonen wurde das Drei- bis Vierfache der Raumtemperaturfestigkeit β_0 festgestellt. Ein vor dem Einfrieren bei 105°C getrockneter Beton zeigte hingegen nur einen kleinen Zugewinn.

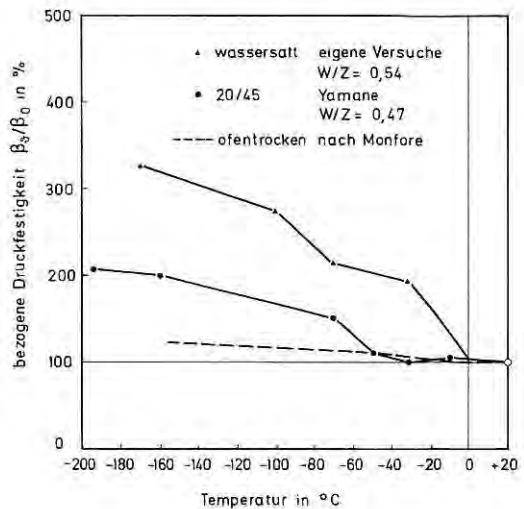


Bild 3
Einfluß des
Feuchtegehalts
des Betons
auf die Tieftem-
peraturfestigkeit

Beim Abkühlen gefriert das Porenwasser nicht bei einem festen Gefrierpunkt, sondern mit abnehmender Porengröße bei immer tieferen Temperaturen [7], die bis zu -90°C reichen. Damit beruht die große Festigkeitssteigerung eines wassersatten Zementsteins im eingefrorenen Zustand auf zwei verschiedenen Mechanismen: Zum einen vermag das Eis Kräfte zu übernehmen, wobei Festigkeit und E-Modul des Eises bei Abnahme der Temperatur gleichermaßen anwachsen. Zum anderen werden die Poren vom Eis mit einer Druckvorspannung erfüllt. Sie stellen dadurch keine Gefügeschwachstellen mehr dar.

Ist ein Teil des Wassers vor dem Gefrieren verdunstet oder durch Trocknung ausgetrieben worden, so wird die Festigkeit größenordnungsmäßig nur in dem Maße ansteigen können, wie noch gefrierbares Wasser im Porenraum vorliegt. Ein künstlich vollständig getrockneter Beton kann daher keine wesentlich erhöhte Tieftemperaturfestigkeit aufweisen.

Von der Anmachwassermenge des Betons wird ein dem Zementgehalt proportionaler Anteil chemisch gebunden und ein weiterer, geringerer Anteil so in den Zementstein eingelagert, daß er zwar verdampfbar, jedoch nicht gefrierbar ist. Die darüber hinausgehende Menge des Anmachwassers ist gefrierbar; sie nimmt bei gleichem Zementgehalt mit ansteigendem Wasserzementwert überproportional zu. Wie zu erwarten ist, steigt daher die Tieftemperaturfestigkeit mit Zunahme des Wasserzementwerts bei wassersattem Beton stark an, siehe Bild 4.

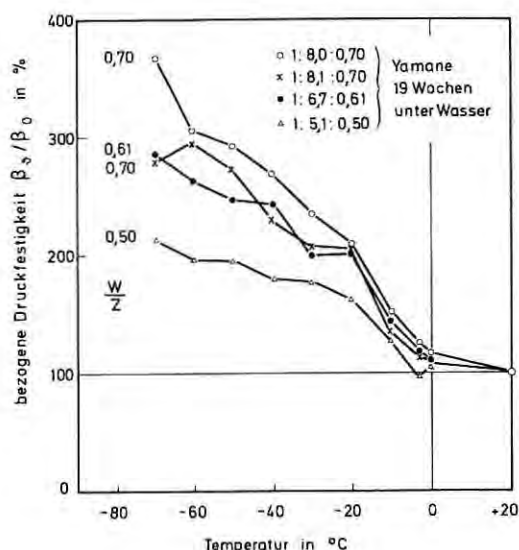


Bild 4
Einfluß des Wasserzementwerts wassersatter Betone auf die Tieftemperaturfestigkeit

4.2 Verformungsverhalten

Bild 5 zeigt Spannungs-Dehnungs-Linien von Betonen, die bis zur Prüfung im Alter von rd. 90 Tagen unter Wasser bzw. im Normklima 20/65 vorgelagert worden waren, jeweils bei Raumtemperatur und bei -170°C (zentrischer Druck). Während des Versuchs befanden sich die Körper in einer Temperaturkammer und wurden über Stahl-Druckstempel, die durch Öffnungen im Boden und der Decke der Kammer geführt waren, belastet. Zur Aufnahme der Spannungs-Dehnungs-Linien war jeder Probekörper mit 3 elektrischen Dehnmessstreifen (im Winkel von 120°) beklebt. Die Temperaturkompensation wurde mit Hilfe eines weiteren Probekörpers erreicht, der ebenfalls mit 3 DMS beklebt war und direkt neben dem zu prüfenden Körper in der Kammer stand. Die Prüfmaschine wurde gesteuert gefahren.

Bild 5
Spannungs-
Dehnungs-Linien
von Beton bei
 $+20^{\circ}\text{C}$ und
 -170°C bei
unterschiedlicher
Vorlagerung

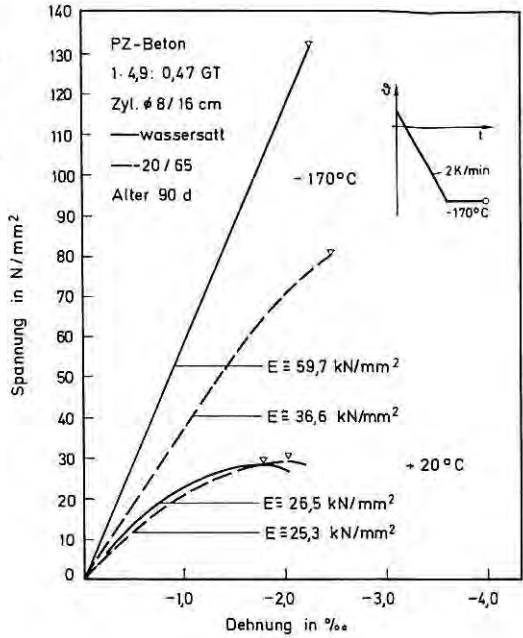
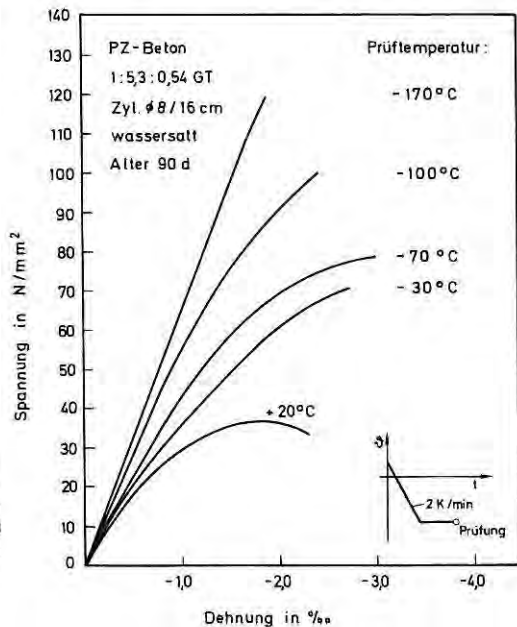


Bild 6
Spannungs-
Dehnungs-Linien
von wassersattem
Beton bei $+20^{\circ}\text{C}$
und verschiedenen
Tief-
temperaturen



Wassersatter Beton zeigt bei -170°C ein ausgeprägtes linear-elastisches und sprödes Verhalten. Der im Normklima 20/65 gelagerte Beton zeigt im letzten Beanspruchungsdrittel ein leichtes Abkrümmen von der Hookeschen Geraden. Es fällt auf, daß die Bruchdehnungen bei -170°C etwa gleich groß sind wie die bei Raumtemperatur. Das Arbeitsvermögen – wohl nur elastischer Natur – steigt gegenüber Raumtemperatur an. Der Feuchtezustand beeinflusst das Spannungs-Dehnungs-Verhalten.

Der Druckelastizitätsmodul bei $+20^{\circ}\text{C}$ ist hier als Sekantenmodul zwischen dem Ursprung und etwa einem Drittel der Festigkeit definiert. Bei Tieftemperatur bezeichnet E die Steigung der in Bild 5 eingetragenen Geraden. Der E-Modul steigt bei -170°C mit zunehmender Feuchte des Betons an; er erreicht rd. das 2,3fache gegenüber Raumtemperatur.

In Bild 6 ist die Abhängigkeit des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens wassersatter Betone von der Tieftemperatur im Vergleich zur Raumtemperatur dargestellt. Es fällt auf, daß die Dehnung unter der Höchstspannung bei -30 und -70°C um rd. 1% größer ist als bei Raumtemperatur, während bei -170°C diese Dehnung wieder der bei Raumtemperatur entspricht. Dieses Verhalten hängt vermutlich mit dem Temperaturdehnverhalten der wassersatten Betone zusammen (vergleiche Abschnitt 7).

5. Verhalten von Beton bei Kälteschock

Die Beanspruchung der warmen Außenschale eines LNG-Behälters durch Kälteschock infolge eines Lecks im Innentank ist wesentlicher Bestandteil des Sicherheitskonzepts. Wichtig ist dabei die Frage, ob der Beton durch eine schlagartige Abkühlung auf LNG-Temperatur einen nennenswerten Verlust der Festigkeit bei Raumtemperatur β_0 erleidet.

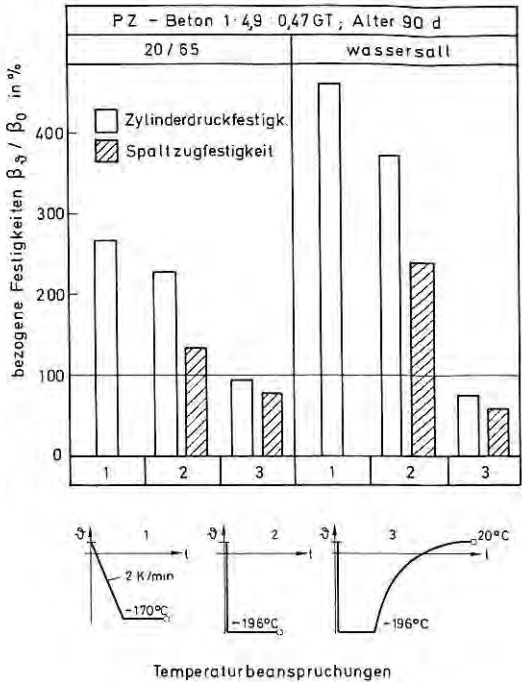
Diese Frage wird in Bild 7 für einen Portlandzementbeton im Alter von 90 Tagen behandelt, der bis zur Prüfung entweder unter Wasser oder bei 65 % relativer Luftfeuchtigkeit lagerte. Drei unterschiedliche Temperaturbeanspruchungen wurden untersucht.

Die Tieftemperaturdruckfestigkeit nach schockartiger Abkühlung ist etwas geringer als nach geregelter, langsamer (2 K/min) Abkühlung.

Viel wesentlicher für den LNG-Tank ist die Restfestigkeit bei Normaltemperatur, die nach Reparatur eines Lecks wieder im Außenmantel herrscht. Maßgebend ist also der Temperaturfall 3. Die Druckfestigkeit erfährt durch einen einmaligen Kälteschock nur einen geringen Verlust und nur bei wassersattem Beton. Die Spaltzugfestigkeit wird deutlich geschädigt: Um rd. 15 % bei angetrocknetem und um rd. 40 % bei wassersattem Beton. Die Schädigung nimmt mit jedem weiteren Schockzyklus zu.

In weiteren, umfangreichen Untersuchungen wurde neben der Betonzusammensetzung, dem Alter des Betons, dem Feuchtezustand auch die Bindemittelart variiert. Die Schädigung ist bei wassersattem Beton unabhängig vom Prüfalter; sie verschwindet bei austrocknendem Beton mit zunehmender Trocknungsdauer.

Bild 7
Einfluß der
Temperaturbean-
spruchung auf
die Festigkeit



6. Verhalten bei zyklischer Temperaturbeanspruchung

Bei jedem Befüll- und Entleervorgang eines LNG-Tanks mit einem Spannbetoninnenbehälter muß durch Steuerung der Wandtemperaturen das allmähliche Anfahren an die Solltemperatur mit kleinstmöglicher Gradienten über die Wanddicke erreicht werden. Nur auf diese Weise ist es möglich, den Temperaturzwang zu beherrschen. Damit stellt sich die Frage, ob zyklische Temperaturwechsel zu einer Beeinträchtigung des Werkstoffs führen.

In dieser Hinsicht wurden Mörtel und Betone unterschiedlicher Zusammensetzung, unterschiedlicher Wasserzementwerte und Bindemittel untersucht, wobei das Prüfalter rd. 120 Tage betrug. Wegen der besonderen Rolle des Wassers beim Frost-Tau-Wechsel wurde die relative Luftfeuchte des Lagerungsklimas und damit die mittlere Feuchtigkeit in weitem Bereich variiert: Zwischen den Stufen „wassersatt“ und 20/65 wurden relative Luftfeuchtheiten von 90, 85, 80 und 75 % eingeschaltet.

Durch Halteperioden an Tief- und Raumtemperatur wurde das Temperaturfeld homogenisiert, also Gleichheit mit der Kammertemperatur hergestellt. Nach bestimmten Zyklenzahlen wurde die Restfestigkeit bei 20°C geprüft.

Bei wassersattem Beton führt jeder Temperaturzyklus zu einer Schädigung. In Bild 8 ist sowohl für einen PZ- als auch für einen HOZ-Beton die mit jedem Zyklus zunehmende Schädigung von wassersattem Beton dargestellt. Es gibt keine nennenswerten Un-

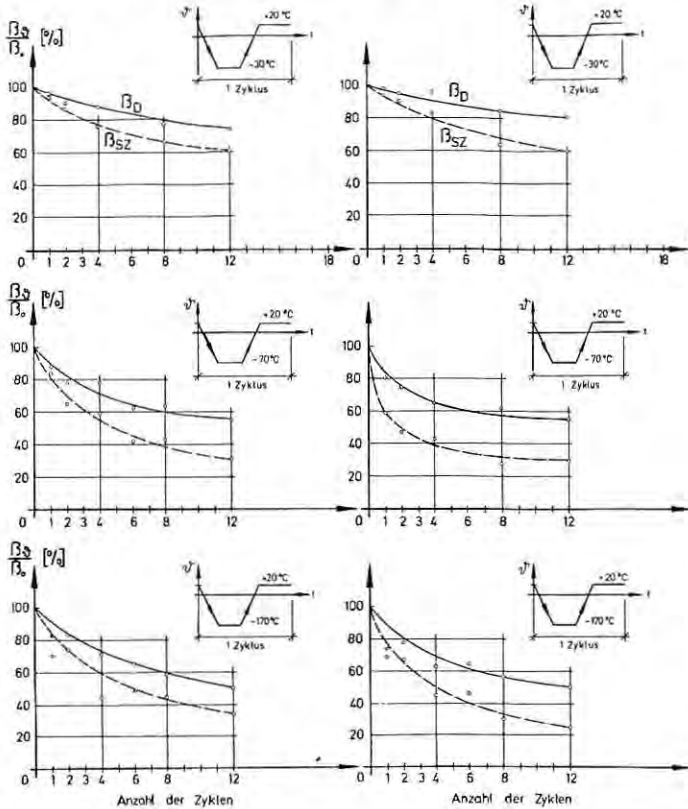


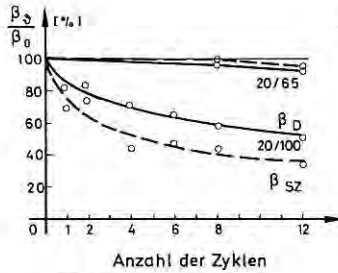
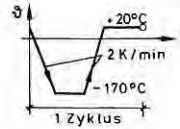
Bild 8 Restfestigkeiten wassergesättigten Betons nach zyklischer Tieftemperaturbeanspruchung

terschiede im Abfall der Festigkeiten zwischen den gewählten Bindemitteln. Die Spaltzugfestigkeit erfährt eine größere Einbuße als die Druckfestigkeit.

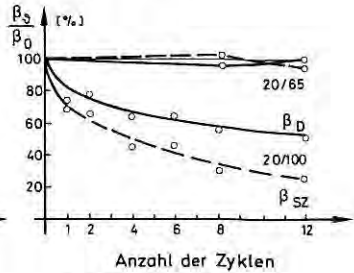
Nach Temperaturzyklen bis -30°C sind die Festigkeitsverluste geringer als nach Zyklen bis -70°C . Offensichtlich ist bei -30°C noch nicht das gesamte in den Poren eingelagerte Wasser gefroren. Nach Zyklen bis -170°C entsprechen die Restfestigkeiten den nach den Zyklen bis -70°C gemessenen Werten. Bei -70°C ist das Porenwasser, das beim Gefrieren zu einer Schädigung des Betons führt, zu Eis geworden (vergleiche auch Abschnitt 7). Die Versuche deuten also darauf hin, daß Temperaturen unterhalb von rd. -70°C zu keinen zusätzlichen Festigkeitsverlusten führen.

Die entscheidende Rolle der Betonfeuchtigkeit für das Ausmaß der Schädigung zeigt Bild 9. Im unteren Bereich ist der Abfall an Festigkeit der wassersatten Betone dargestellt. Im oberen Bereich ist das Verhalten von Proben gezeigt, die nach 40tägiger Wasserlagerung

Temperaturbeanspruchung



PZ-Beton 1:5,3:0,54 GT



HOZ-Beton 1:5,3:0,54 GT

Bild 9 Einfluß der Betonfeuchte auf die Restfestigkeit von Beton nach zyklischer Tieftemperaturbeanspruchung

rd. 90 Tage im Klima 20/65 austrocknen konnten. Es trat dann praktisch keine Schädigung mehr auf.

Damit drängt sich die Frage auf, ob es für Beton einen kritischen Feuchtegehalt gibt, bei dessen Überschreitung es zu Schäden infolge zyklischer Temperaturbeanspruchung kommt. Versuche zur Klärung dieser Frage sind angelaufen. Erste Ergebnisse zeigen, daß eine Ausgleichfeuchte, die sich nach längerer Lagerung bei + 20 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit einstellt, nicht mehr zu Schäden führt. Das Umsetzen dieser Ergebnisse auf reale Bauteilabmessungen und Trocknungsbedingungen soll mit der Diffusionstheorie trocknender Körper erfolgen.

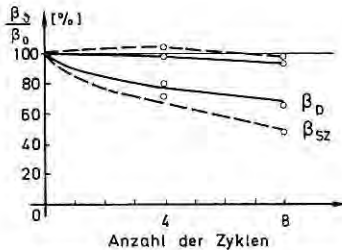
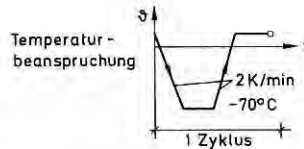


Bild 10 Restfestigkeiten von wassersatttem Beton mit bzw. ohne Stahlfasern nach zyklischer Tieftemperaturbeanspruchung

PZ-Beton 1:5,3:0,54 GT, wassersättig
Zugabe: 2 Vol.-% Stahlfasern $d = 0,4 \text{ mm}$
 $l = 25 \text{ mm}$

Bei wassergesättigtem Stahlfaserbeton (Zugabe 2 Vol.-%) waren nach 4 bzw. 8 Temperaturzyklen bis -70°C so gut wie keine Festigkeitsverluste festzustellen. In Bild 10 sind die Restfestigkeiten dargestellt. Bezugsgrößen sind jeweils die Festigkeiten der untemperierten Betone mit bzw. ohne Stahlfasern. Durch die Zugabe von 2 Vol.-% Fasern wurde die Ausgangsdruckfestigkeit um 11 %, die Ausgangsspaltzugfestigkeit um 46 % erhöht.

7. Temperaturdehnverhalten

Parallel zur Festigkeit wurden auch das Temperaturdehnverhalten und die Porenstruktur untersucht, um Einblick in die Schädigungsprozesse zu erhalten. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur über das Temperaturdehnverhalten der Versuchskörper berichtet; über die Veränderungen der Porenstruktur infolge von Tieftemperaturbeanspruchungen geben die Literaturstellen [9] und [10] Auskunft.

In einem Stoff von so großer Porosität und innerer Oberfläche wie Zementstein gefriert das Porenwasser weder bei 0°C noch insgesamt schlagartig. Der Gefrierpunkt von 0°C gilt nur für freie Oberflächen unter atmosphärischem Druck. Das Gefrieren erstreckt sich vielmehr über einen weiten Temperaturbereich. Die Gefrierpunktniedrigung hat zwei Gründe: Erstens enthält das Porenwasser gelöste Stoffe, und zweitens wird in feinporösen Stoffen wegen der Wechselwirkungen zwischen Wasser und Feststoff der Gefrierpunkt verschoben. Letzteres bedeutet, daß das Wasser in den groben Poren vor dem in Feinporen gefriert.

Aus diesen Gründen muß man davon ausgehen, daß im Porensystem gleichzeitig und nebeneinander Wasser und Eis über einen Tieftemperaturbereich existieren, der sich bis zu -90°C erstreckt [7, 8].

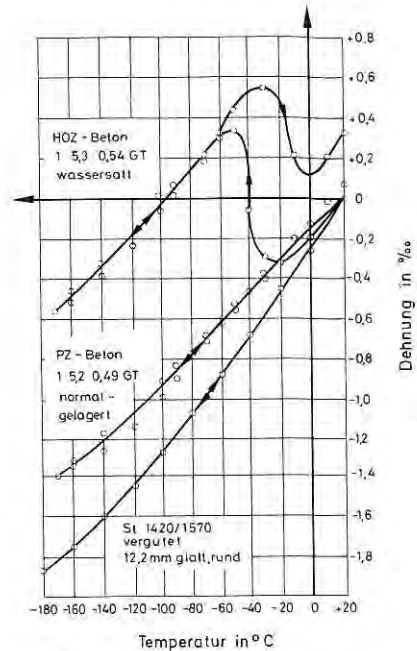
Nach derzeitiger Kenntnis scheinen für eine Frostschädigung die beiden nachfolgenden Mechanismen maßgebend. Gefriert Wasser zu Eis, so erfährt es eine Volumenzunahme von rd. 9 %. Wird diese Volumenzunahme behindert, so entsteht ein hoher Expansionsdruck (Porenwasserüberdruck). Im Inneren von Poren stehen adsorbierte, flüssigkeitsähnliche Wasserschichten in unmittelbarem Kontakt mit Eis. Der Dampfdruckunterschied zwischen beiden preßt dieses Wasser aus, das an anderer Stelle sofort gefriert und dann den Eisdruck steigert [11].

Die Anteile dieser Mechanismen auf eine Frostschädigung sind unbekannt. Sie führen beide zu Spannungen im Gefüge und zu Mikrorissen, die als irreversible Gefügaufweitung meßbar werden.

Bild 11 zeigt vergleichend das Temperaturdehnverhalten von Spannstahl, normalgelagertem und wassergesättigtem Beton. Spannstahl und normalgelagerter Beton dehnen sich bei der Abkühlung und Erwärmung nahezu linear, wobei bei den hier untersuchten Baustoffen der Spannstahl eine deutlich größere Dehnung bei gleicher Temperaturenniedrigung aufweist.

Die Temperaturdehnkurve eines wassergesättigten Betons weist drei typische Bereiche auf: Im ersten Bereich (ab $+20^{\circ}\text{C}$) findet eine Kontraktion der Probe statt. Im zweiten Bereich – als Übergangsbe-

Bild 11
Temperaturdehnverhalten
von Spannstahl,
normalgelagertem und
wassersatttem Beton



reich bezeichnet – dehnt sich die Probe aus. Diese Expansion ist um so ausgeprägter, je höher der W/Z-Wert und der Feuchtigkeitsgehalt der Probe sind. Ferner hängt sie von der Beschaffenheit der Porenstruktur ab. Im dritten Bereich ist eine nahezu lineare Kontraktion zu beobachten.

Diese Bereiche werden beim Schmelzen des Poreneises rücklaufend durchfahren, wobei die Ausdehnung des Auftauens die des Gefrierens übertrifft und eine irreversible Gefügaufweitung hinterläßt.

Bild 12 zeigt die Expansion beim Gefrieren des Porenwassers in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt und W/Z-Wert der Proben. Die in Bild 11 dargestellten Werte wurden bei stationärer Temperatur mechanisch gemessen (Beton-Zylinder \varnothing 8/16 cm), während die in den Bildern 12 und 13 dargestellten Temperatur-Dehnungslinien an Mörtelbohrkernen (\varnothing 1,2/4,0 cm) bei sich kontinuierlich ändernder Temperatur (2,5 K/min) in einem Dilatometer gemessen wurden; deshalb ergibt sich ein Versatz in der Abkühl- und Erwärmungskurve.

Bild 13 zeigt das Temperaturdehnverhalten bei 12 Temperaturzyklen. Jeder Zyklus vergrößert die bleibende Dehnung. Nach 12 Zyklen beträgt diese rd. 2,8‰. Mit Hilfe der Bilder 11 bis 13 läßt sich erklären, daß eine Abkühlung auf Temperaturen unterhalb -70°C keine zusätzliche Schädigung brachte (vergleiche Abschnitt 6). Die Expansion des Probekörpers infolge der Eisbildung des Porenwassers ist bei dieser Temperatur abgeschlossen. Diese Expansion führt zu der Gefügaufweitung und damit zur Materialschädigung.

Bild 12
Temperaturdehnverhalten
verschiedener Mörtel

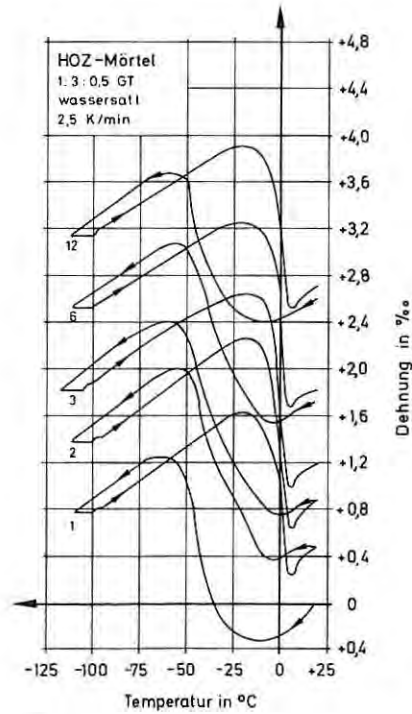
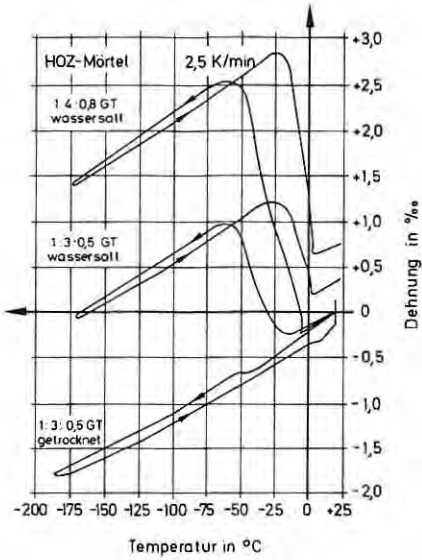


Bild 13
Temperaturdehnverhalten
von Mörtel bei 12 Tem-
peraturzyklen

Die Expansion im Temperaturbereich von -20 bis -70°C dürfte auch mit eine Ursache für die größere Bruchdehnung der Probekörper bei -30 bzw. -70°C sein (siehe Bild 6).

Abschließend soll noch einmal angemerkt werden, daß wassergesättigter Beton und Stahl extrem unterschiedliche Temperaturdehnungen aufweisen können, was theoretisch zu einer starken Beeinträchtigung des Verbundes führen könnte. Entsprechende Untersuchungen werden in nächster Zeit in Angriff genommen

8. Zusammenfassung

Unter den Tieftemperaturen steigen die Festigkeitswerte des Betons an, und zwar um so mehr, je feuchter der Beton ist (Bilder 3 und 4). Gemessen am duktilen Verhalten bei Raumtemperatur wird das Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Richtung rein linear-elastisch und spröde verändert. Gleichwohl werden bei zentrischer Beanspruchung Druckbruchdehnungen von -2% erreicht (Bilder 5 und 6)

Die Restfestigkeit bei Raumtemperatur nach sowohl einem Kälteschock als auch nach langsamer Abkühlung mit Erwärmung erfährt einen Abfall, der mit Zunahme der Betonfeuchte, des W/Z-Wertes, der Tieftemperatur und der Zahl der Temperaturzyklen ansteigt. Bei Temperaturen unter rd. -70°C entstehen keine weiteren temperaturbedingten Schädigungen (Bilder 7, 8 und 9). Alle betontechnischen Maßnahmen zur Reduzierung des gefrierbaren Wassers sind von Vorteil, wie z. B. niedriger W/Z-Wert, Betonverflüssiger u. a. Das Temperaturdehnverhalten von Stahl und wassergesättigtem Beton unterscheidet sich grundlegend (Bilder 11 und 12).

SCHRIFTUM

- [1] Büchl, G.: Flüssiggasspeicher aus Spannbeton. In: „Festschrift Ulrich Finsterwalder – 50 Jahre für DYWIDAG“. Dyckerhoff & Widmann AG, München 1973, S. 91/94.
- [2] Dartsch, B.: Spannbetonbehälter für verflüssigtes Erdgas. beton 28 (1978) H. 5, S. 163/165.
- [3] Wischers, G., und J. Dahms: Das Verhalten des Betons bei sehr niedrigen Temperaturen. beton 20 (1970) H. 4, S. 135/139, und H. 5, S. 195/201; ebenso Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971, S. 57/88.
- [4] Yamane, S., H. Kasami und T. Okuno: Properties of concrete at very low temperatures. ACI Publication SP 55. Amer. Concr. Inst., Detroit 1978, S. 207/221.
- [5] Monfore, G. E., und A. E. Lentz: Physical properties of concrete at very low temperatures. Journal PCA Res. and Devel. Lab. 4 (1962) Nr. 2, S. 33/39; ebenso PCA Res. Departm. Bull. 145, Portl. Cem. Assoc., Skokie 1962.
- [6] Moskvín, V. M., M. M. Kaptien und L. N. Antonov: Einfluß von Temperaturen unterhalb des Frostbereiches auf die Festigkeit und die elastoplastischen Eigenschaften von Beton. Beton i železobeton 13 (1967) Nr. 10, S. 18/21 (in russisch).

- [7] Wittmann, F. H.: Interaction of hardened cement paste and water. Journal Amer. Ceram. Soc. 56 (1973) Nr. 8, S. 409/415.
- [8] Meier, U. G.: Über das Gefrieren von Wasser in feinporösen Feststoffen. beton 29 (1979) H. 1, S. 24/27.
- [9] Rostásy, F. S., R. Weiss und G. Wiedemann: Changes of pore structure of cement mortars due to temperature. Cement and Concrete Research 10 (1980) No. 2 (in Vorb.).
- [10] Rostásy, F. S., U. Schneider und G. Wiedemann: Ein Beitrag zum Tief-temperaturverhalten von Zementmörtel und Beton. In: Forschungsbeiträge für die Baupraxis. (Kordina-Festschrift.) Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1979, S. 115/131.
- [11] Setzer, M. J.: Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 280, Berlin 1977, S. 43/117; spez. Kapitel 4: Frostbeständigkeit.