

**SPEZIELLE PROBLEME BEI DER BERECHNUNG VON
SPANNBETON-REAKTORDRUCKBEHÄLTERN UNTER
BERÜCKSICHTIGUNG INSTATIONÄRER TEMPERATURFELDER
UND NICHT-LINEAREN MATERIALVERHALTENS**

**(SOME SPECIAL PROBLEMS REGARDING THE ANALYSIS OF
PRESTRESSED CONCRETE REACTOR PRESSURE VESSELS WITH
DUE CONSIDERATION TOWARDS THE NON-STATIONARY
TEMPERATURE FIELDS AND THE NON-LINEAR BEHAVIOUR
OF THE MATERIAL**

V. HANSSON, G. SCHNELLENBACH

*Institut für Konstruktiven Ingenieurbau,
Ruhr-Universität Bochum, D-463 Bochum, Germany*

SUMMARY

In this paper some special problems of calculations of local stress conditions influenced by non-linear material behaviour are presented and the influence on required reinforcement and on the overall behaviour of the vessel are discussed. Calculations are performed by the dynamic relaxation method, and the formulation of non-linear material behaviour is described and characteristic results are given. Some examples deal with the behaviour of tensile zones of the THTR-pressure vessel with overpressure in addition to service load conditions. Other examples are concerned with stresses at hot spots, that are produced by local insulation failure.

When temperature is raised in a local area of the inner surface during operation transient local temperature fields build up in addition to the normal temperature crossfall. They cause local compressive stresses which are reduced by creep. Higher creep in this region due to the local temperatures will also produce a redistribution of stresses effected by other loads. The temperature in the hot spot changes with the internal gas temperature. If temperature is removed after nearly a steady state of stress is reached, the local thermal stresses build up with reversed sign almost without recovery of creep. Dependent on the overall stresses in the vessel wall and the dimensions and temperature of the hot spot more or less severe local tensile stress fields develop in the region of the hot spot. For some examples for different shapes of regions the effects have been calculated in view of the local stresses and the overall behaviour of the vessel. The influence of local cracking and conclusions for the required reinforcement are discussed.

With some other examples the influence of tensile stress zones and local cracking on the overall behaviour of the pressure vessel and on local stresses is of interest. The existence of tensile zones depends on the geometry of the vessel, on the prestressing, and on the loading conditions. As an example, the THTR-pressure vessel is taken under overpressure conditions. Local tensile stress zones develop here especially when an overload in addition to service load conditions is considered. Calculations with and without assumed cracked zones are performed. The calculation method for the cracked zones, results, the influence on the overall behaviour of the vessel, and the required reinforcement are discussed.

2. Allgemeines

Örtliche Spannungszustände, die an geometrisch ausgezeichneten Stellen wie Eckbereiche oder Öffnungen auftreten oder die durch besondere örtliche Belastungen wie z.B. heiße Stellen oder Lasteintragungen hervorgerufen werden, sind im allgemeinen von geringem Einfluß auf das Gesamttragverhalten des Behälters. Nichtlineares Verhalten des Betons bei Druckspannungskonzentrationen bedingt hier einen Abbau der Spannungsspitzen, die bei einer elastischen Berechnung auftreten würden. Bei Eigenspannungszuständen werden hierbei die Gesamtkräfte abgebaut. Für Lastzustände erfolgen Kraftumlagerungen in benachbarte Bereiche. Bei Zugspannungszuständen ist hier meist eine auftretende Rißbildung mit den zugehörigen Spannungsumlagerungen von beträchtlichem Einfluß auf die Größe der auftretenden Zugspannungen. Besonders bei örtlichen Spannungsfeldern mit geringer Ausdehnung, die durch die Geometrie und Zwängungsspannungsanteile mit hervorgerufen werden, liefert eine Zugkraftermittlung mit Zugrundelegung ungerissenen Betons und einer Abdeckung dieser Kräfte durch Bewehrung sehr konservative Bewehrungsquerschnitte.

Mit den heutigen numerischen Rechenverfahren ist es möglich, auch das Verhalten solcher örtlichen Bereiche mit nichtlinearem Verhalten zu untersuchen. In diesem Beitrag werden als Beispiele örtliche Spannungszustände im inneren Eckbereich des THTR-Spannbetonbehälters bei Überlastung mit Rißbildung sowie Spannungszustände im Bereich örtlicher heißer Bereiche an der Behälterinnenseite, die durch das Betonkriechen und zeitlich mit dem Betrieb schwankende Temperaturen beeinflusst werden, untersucht. Die Berechnungen erfolgten mit dem Verfahren der dynamischen Relaxation, wobei nichtlineares Verhalten durch Rißbildung entsprechend einer in [5] aufgezeigten Berechnungsmethode berücksichtigt wurde. Mit den numerischen Rechenverfahren lassen sich heute praktisch beliebige Ansätze zum Materialverhalten und Systemänderungen in Abhängigkeit von der Belastung erfassen, so daß die Qualität der Berechnungen weitgehend durch das bekannte Wissen über das Materialverhalten und geeignete Ansätze bestimmt wird.

3. Berechnungsansätze zur Erfassung der Rißbildung bei bewehrtem Beton

Bei der numerischen Berechnung nichtlinearer Probleme wird das nichtlineare Verhalten der Konstruktion durch eine Anzahl von Schritten mit linearem Verhalten angenähert. Hierbei werden bei jedem Berechnungsschritt ein geändertes System mit über dem Berechnungsgebiet veränderlichen, elastischen Materialkennwerten berücksichtigt.

Für die Berechnung von bewehrtem Beton im Zustand II kann angenommen werden, daß die erfolgte Rißbildung nur von der größten aufgetretenen Zugbeanspruchung abhängig ist. Wird der Einfluß der Rißbildung bei der Laständerung z.B. Innendruckerhöhung ausgehend von einem Betriebszustand des Spannbetonbehälters untersucht, so sind die durch das Kriechen entsprechend der Temperaturverteilung in der Wandung beeinflussten Betonspannungen und daraus resultierende Beanspruchungen der Bewehrung aus dem Betriebszustand zu berück-

besichtigen.

Zur Erfassung der Rißbildung kommen zwei Rechenverfahren in Frage. In dem einen Falle werden konkrete Risse vorausgesetzt, und die Tragwirkung der Bewehrung durch eine Berücksichtigung gesonderter Stabelemente für die Bewehrungsstäbe erfaßt, wobei die Zwischenreaktionen mit Einzel-, Linien- oder Volumenkräften auf den Beton wirken. Solche Berechnungen sind mit der dynamischen Relaxation möglich, indem im Berechnungsgebiet entsprechende Stäbe mit einer Kopplung mit den Behälterverformungen und Volumenlasten vorgesehen werden. Bei dieser Kopplung z.B. durch Federn muß eine genaue Formulierung des Spannungs- und Verformungsverhaltens der Bewehrung bei rutschendem Verbund vorgenommen werden. Wie aus Meßergebnissen ersichtlich ist, sind der Rißabstand und der genaue Rißverlauf nur schwer vorher angebbar, und sie sind von vielen Faktoren wie Stabdurchmesser, Rundstahl oder gerippter Stahl, Beschaffenheit des Verbundes, Stahlspannung, Betonierungsvorgang, Überdeckung, Bewehrungsgrad, Betonqualität und ungleichmäßiges Betongefüge abhängig. Da diese Einflüsse durch Versuche noch nicht umfassend untersucht sind, ist es schwierig, zutreffende Rechenannahmen zu formulieren.

Bei der Berücksichtigung des Verhaltens von Bereichen im Zustand II durch die Einführung des im folgenden erläuterten fiktiven Materialgesetzes werden erheblich weniger und besser bekannte experimentelle Daten zum Verhalten gerissenen und bewehrten Betons benötigt. Wie bereits erwähnt sind für die Rißbildung die Art des Verbundes und das Gleiten der Bewehrung von maßgeblicher Bedeutung. Zwischen der bezogenen Haftkraft und dem mittleren Rißabstand α_m besteht ein Zusammenhang, aber Formeln, die α_m aus der bezogenen Haftkraft berechnen, enthalten Konstanten, für die Versuche stark streuende Werte liefern. Man kann aber mit guter Genauigkeit aus dem mittleren Rißabstand α_m mit:

$$w_m = k_m \frac{\alpha_m \sigma_e}{E_e} \quad (1)$$

die mittlere Rißweite w_m berechnen. Hierin bedeuten k_m einen Koeffizienten, σ_e die Spannung im Stahl im Riß und E_e den E-Modul des Stahles. Der Beiwert k_m bringt den Anteil des Betons an der Aufnahme der Zugspannungen zwischen den Rissen zum Ausdruck. Die auf den Gesamtquerschnitt bezogene Spannung im Riß $\bar{\sigma}$ kann mit dem Bewehrungsverhältnis μ [%] aus der Stahlspannung σ_e im Riß berechnet werden:

$$\bar{\sigma} = \frac{\mu}{100} \sigma_e \quad (2)$$

Bei der Ermittlung der Gesamtverformung im gerissenen Bereich senkrecht zu den Rissen kann der Anteil des ungerissenen Betons ohne großen Fehler vernachlässigt werden, und die auf die Längeneinheit bezogene Verformung des gerissenen Bereiches, die als fiktive Dehnung gedeutet werden kann, ergibt sich damit zu:

$$\bar{\epsilon} = \frac{w_m}{\alpha_m} = \frac{100}{2,1 \cdot 10^6} \bar{\sigma} k_m \quad (3)$$

Damit läßt sich ein fiktiver Verformungsmodul angeben:

$$\bar{E} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} = \mu \cdot 21000 \frac{1}{k_m} \text{ [kp/cm}^2\text{]} \quad (4)$$

Wenn den Riß begleitende kartesische Koordinaten vorgegeben werden, so kann hinsichtlich dieser Koordinaten orthotropes Verhalten angenommen werden. Mit (4) kann die Steifigkeit senkrecht zum Riß formuliert werden. Aus den Randbedingungen am Riß und zusätzlichen Annahmen für die Fälle Riß in einer bzw. zwei Richtungen können auch die Steifigkeiten in den anderen Richtungen ermittelt und als Komponenten eines fiktiven Elastizitätstensors eingeführt werden. Im Gebrauchszustand kann z.B. angenommen werden, daß sich die Risse nur so geringfügig öffnen, daß die Schubsteifigkeit erhalten bleibt. Diese Komponenten des Elastizitätstensors gelten für eine Einheitsbasis \bar{g}_i in Richtung der Hauptspannungen, von denen ausgehend die Rißbildung angenommen wurde. Mit diesen Richtungen ist auch die Transformationsmatrix bekannt, um die Komponenten des Elastizitätstensors im Berechnungskoordinatensystem E^{ijkl} mit

$$E^{ijkl} = \frac{\delta x^i}{\delta \bar{x}^m} \frac{\delta x^j}{\delta \bar{x}^n} \frac{\delta x^k}{\delta \bar{x}^p} \frac{\delta x^l}{\delta \bar{x}^q} \bar{E}^{mnpq} \quad (5)$$

zu ermitteln. Hierbei treten im allgemeinen Werte für alle Komponenten des Elastizitätstensors auf, so ergeben sich z.B. aus Schubverzerrungen Beanspruchungen in den Koordinatenrichtungen und umgekehrt.

Für die aufgezeigten Berechnungsansätze werden quantitative Angaben zum Beiwert k_m benötigt, und es sind die folgenden Ergebnisse von Versuchen an bewehrtem Beton von Bedeutung. Risse entstehen senkrecht zu den Hauptzugspannungen und richten sich nicht nach der Bewehrung. Wenn es sich nicht um eine ausgezeichnete Stelle handelt, kann nicht vorher gesagt werden, wo einzelne Risse auftreten werden, da dies durch Veränderlichkeiten im Materialgefüge beeinflusst ist. Das Rißbild liegt bei der kritischen Last, d.h. beim Übergang in den Zustand II, in der Regel fest, nur in Ausnahmefällen treten zwischen der kritischen Last und dem Bruch noch zusätzliche Risse in einem Rißbereich auf. Experimentelle Ergebnisse in [7] zeigen, daß für Stahlspannungen $\sigma_e < 3000 \text{ [kp/cm}^2\text{]}$ und abweichende Bewehrungsrichtungen $\delta < 15^\circ$ die Zunahme der gemessenen Verformungen praktisch vernachlässigbar ist. Für Winkel $> 15^\circ$ müssen eine Vergrößerung der Verformungen und das Kräftespiel der Bewehrung im Riß z.B. durch Einführung entsprechender Gruppen innerer Lasten berücksichtigt werden.

Quantitative Angaben für den Beiwert k_m kann man dem Verlauf in Bild 7 (nach [6]) entnehmen. Der Wert für k_m aus Versuchsergebnissen streut nur verhältnismäßig wenig und besitzt bis zur Stahlspannung von ca. 3000 kp/cm^2 nur eine geringe Veränderlichkeit. Da die Rißabstände durch Ansteigen der Spannungen im Beton neben dem Riß bis zur Zugfestigkeit festgelegt sind, besagt die Konstanz von k_m für verschiedene Einflußgrößen, daß die Spannungsanstiege im Beton bei gutem Verbund in kleinen Rißabständen oder bei schlechtem Verbund in größeren Rißabständen ähnlich sein müssen.

Für das Ergebnis einer Berechnung mit den aufgezeigten Ansätzen für die gerissenen Bereiche müssen Aussagen zu Rißweiten und Rißabständen mit Rißformeln, wie sie z.B. in /6/ angegeben sind, ermittelt werden. Aufgrund der hierfür stärker streuenden experimentellen Ergebnisse könnten mögliche Grenzwerte abgeschätzt werden. Für Hinweise auf weitere Literatur sowie eine Überprüfung der Berechnungsmethode an veröffentlichten Ergebnissen experimenteller Scheibenuntersuchungen soll hier auf /5/ verwiesen werden.

4. Der Einfluß der Rißbildung auf örtliche Zugspannungszonen im inneren Eckbereich

Mit den Berechnungen, die durchgeführt wurden, sollte der Einfluß einer örtlichen Rißbildung auf die aus Zugbereichen resultierenden Zugkräfte untersucht werden. Von Interesse sind hierbei die erforderliche Bewehrung und die Stahlausnutzung. Auf Gesichtspunkte, die das Gesamttragverhalten des Behälters in Hinblick auf eine Systemänderung und die Ausbildung des Bruchmechanismus im Überlastbereich betreffen, wird im Beitrag H 2/3 eingegangen.

In den Berechnungsbeispielen wird der THTR-Spannbetondruckbehälter zugrunde gelegt. Weiter wird von einer Belastungsgeschichte ausgegangen, bei der der Behälter von einem durch das Betonkriechen beeinflussten Betriebszustand eine zusätzliche elastische Innendruck- und Temperaturerhöhung erhält. Berechnungen hierzu sind bislang für den rotationssymmetrischen Fall unter besonderer Berücksichtigung des inneren Eckbereiches ausgeführt worden. Bild 1 zeigt den Berechnungsraster, der zugrunde gelegt wurde. Der untere Eckbereich, für den im folgenden detaillierte Ergebnisse dargestellt sind, ist auf dem Bild angelegt. In /5/ ist abweichend von dem sonst bei der dynamischen Relaxation benutzten Rechenraster /1/ ein Raster eingeführt worden, der die Bildung der bei allgemeinen Koordinaten erforderlichen Ableitungen in einfacher Form gestattet. Diese Ableitungen sind auch für die Berücksichtigung der Rißbildung nach Punkt 3 erforderlich, sie wurden für diese Berechnungen durch Interpolationen von einem Raster wie in /1/ ausgehend ermittelt.

In Bild 3 sind die Hauptspannungen im unteren Eckbereich für den Zustand aufgetragen, daß der Behälter 2 Jahre lang unter Vorspannung, Eigengewicht und Temperaturwirkung unter Kriechen und Schwinden gestanden hat und daß dann unter Zugrundelegung des Zustandes I ein Innendruck von 64 atü und eine Erhöhung des Temperaturgradienten um den Faktor 0,2 aufgebracht werden. Die Ergebnisse für diesen Zustand mit Rißbildung sind mit einem Berechnungsablauf mit folgenden Schritten ermittelt worden:

1. Im ersten Berechnungsschritt wird der Ausgangszustand langfristig heißdrucklos unter Berücksichtigung der Kriechumlagerungen und des Kriechinflusses auf die Temperaturspannungen berechnet. Die Berechnung erfolgt mit einem direkten Verfahren, siehe /8/.
2. Zusätzlich zu den Spannungen aus 1. wird der Prüfdruck für den elasti-

schen Fall mit Zustand I berücksichtigt. Für alle Punkte werden die Hauptspannungen berechnet. In den Punkten, in denen eine bestimmte Hauptzugspannung überschritten wird, wird ein modifiziertes Materialgesetz; das entsprechend Kapitel 3 die Ribbildung in Richtung der Hauptzugspannung und die jeweils vorhandene Bewehrung berücksichtigt, eingeführt. In den Bereichen mit entsprechend den Hauptzugspannungen gerichteter Ribbildung werden die Spannungen aus Schritt 1 entsprechend den durch das Kriechen bedingten Dehnungen mit dem die Ribbildung erfassenden fiktiven Materialgesetz umgerechnet. Hierdurch werden die aus dem Ausgangsbetriebszustand resultierenden Verformungen im Ribbereich mit den Vordehnungen der Bewehrung erfaßt. Die Spannungen des ersten Berechnungsschrittes sind getrennt abgespeichert.

3. Für das modifizierte System wird der bereits im 2. Schritt ermittelte Verformungszustand eventuell mit einem Faktor als Ausgangszustand angenommen, der Spannungs- und Verformungszustand berechnet und wieder entsprechend 2. verfahren.
4. Iterationsschritte entsprechend 2. und 3. können für eine Laststufe so lange fortgeführt werden, bis an keinem Punkt mehr Überschreitungen eines Ribkriteriums auftreten.
5. Das Verhalten bei weiterer Laststeigerung kann untersucht werden, indem auf dieses System neue Belastungen aufgebracht werden und wieder Berechnungsschritte entsprechend 2. bis 4. ausgeführt werden.

Die dynamische Relaxation ist zur Untersuchung solcher Probleme gut geeignet, da sich erstens beliebige elastische Spannungs-Verformungsbeziehungen erfassen lassen und zweitens beim Iterationsprozess bereits ermittelte Verformungen als Ausgangswerte für die weitere Berechnung benutzt werden können. Die Festlegung der Ribbildung kann entweder mit einem entsprechenden Kriterium programmintern oder nach Zwischenausdrucken von Hand erfolgen.

Einen Eindruck vom Gesamtspannungszustand des Behälters in der r-z-Ebene mit örtlichen Ribbildungen an den inneren Ecken liefert Bild 2. Entsprechend der zuvor erläuterten Darstellung der Hauptspannungen im unteren Eckbereich für den ungerissenen Zustand sind in den Bildern 4 und 5 Hauptspannungen im Beton für zwei weitere unterschiedlich große Ribbereiche dargestellt. Die Hauptspannungskreuze geben hier ein anschauliches Bild über das jeweilige Tragverhalten im unteren Eckbereich, der Einfluß auf das Gesamttragverhalten wird in Beitrag H 2/3 im Zusammenhang mit der Bildung eines Tragsystems für den Bruchzustand diskutiert. Aus den Bildern 3 bis 5 ist ersichtlich, daß eine Stabilisierung der Ribbildung stattfindet. Dies ist dadurch begründet, daß das Auftreten der Zugspannungen hier durch die Geometrie der Behälterwandung, die Vorspannungsanordnung und Eigenspannungszustände infolge Kriechumlagerungen beeinflußt wird. Für den Schnitt a-a in den Bildern 2 bis 4 sind die Spannungsverläufe im Beton in Bild 6 für unterschiedlich weite Ribbildung zum Vergleich aufgetragen. Es zeigt sich, daß die maßgeblichen Zugspannungsmaxima neben dem Ribbereich mit dessen Ausweitung abnehmen, bis sie bei

einem Rißbereich entsprechend Bild 5 schließlich ganz verschwinden.

Die Zugkräfte, die sich hierbei im Stahl ergeben, sind in diesen Bildern nicht mit aufgetragen. Im Schnitt a-a wurde ein Bewehrungsprozentsatz von 1 bis 1,5 % innerhalb der ersten 50 cm am Liner berücksichtigt, dies entspricht einem Gesamtstahlquerschnitt von ca. 65 cm^2 auf 1 m des Umfangs. Die errechneten Stahlspannungen im Schnitt a-a nehmen, wenn die Rißbildung entsprechend der in den Bildern 4 und 5 dargestellten Bereiche fortschreitet, nur um ca. 10 % zu. Maximale Werte für Beanspruchungen des Bewehrungsstabes treten nicht im Schnitt a-a sondern im Scheitel der Ausrundung auf, für sie wurden für diesen Überlastzustand Werte von ca. 3900 kp/cm^2 berechnet. Abschätzungen zur wahrscheinlichen Größenordnung von Rißweiten und Rißabständen führen nach [6] bei Zugrundelegung der ermittelten Zugbereiche, von Bewehrungsstäben $\varnothing 25$ und eines Betons mit guten Festigkeitseigenschaften auf Rißabstände von 20 bis 30 cm und Rißweiten von ca. 0,3 mm.

Zu den hier angegebenen Ergebnissen sind auch Berechnungen mit vereinfachten Annahmen zur Erfassung des Tragverhaltens der gerissenen Bereiche durchgeführt worden. Hierbei sind eine isotrope Steifigkeitsabminderung im Rißbereich und orthotrope, koordinatenparallele Steifigkeitsänderungen zugrunde gelegt worden. Es zeigte sich, daß mit diesen Rechenmodellen das Gesamttragverhalten und Kraftresultierende im Zugbereich erfaßt werden, daß aber örtliche Zusatzspannungen und Richtungsabweichungen der Spannungen im Rißbereich und seiner direkten Umgebung auftreten.

5. Örtliche heiße Bereiche mit nichtlinearem Verhalten

Als weiteres Beispiel für örtliche Spannungszustände in Reaktordruckbehältern, die stark von nichtlinearem Materialverhalten beeinflußt werden, sollen örtliche heiße Bereiche, die an Wärmebrücken und bei Isolierungsschäden entstehen können, behandelt werden. Das grundsätzliche Verhalten der Spannungen in solchen Stellen kann an entsprechend ausgewählten Rechenmodellen untersucht werden. Hierzu wurde ein heißer Bereich von 1 m Durchmesser an einem herausgeschnittenen Wandabschnitt ausgewählt. Die am Behälter auftretenden Effekte können durch Überlagerungen mit Ergebnissen der normalen Behälterberechnungen erfaßt werden.

Während der Aufheizphase treten entsprechend dem Aufbau des örtlichen Temperaturfeldes instationäre Temperaturspannungen auf, die durch das bei höheren Temperaturen stärkere Kriechen gleichzeitig erheblich abgebaut werden. Diese instationären Druckspannungen an der heißen Stelle sind stark von ihrer Entstehungsgeschichte abhängig, d.h. das unterschiedliche zeitliche Auftreten der Temperaturen während des Reaktorbetriebes für Wärmebrücken, Isolierungsschäden und bei Zugrundelegung einer Behälterauslegung mit oder ohne Vorerwärmung vor Inbetriebnahme sind hier von Bedeutung. Wenn es sich um einen Isolierungsschaden handelt, so kann z.B. davon ausgegangen werden, daß die Temperaturspannungen aus der gleichmäßigen Erwärmung der inneren Oberfläche bereits durch Kriechen während des Betriebes oder eines Aufwär-

mungsprozesses zu einem erheblichen Anteil abgebaut sind.

Da bei den durchgeführten Untersuchungen die Druckspannungen weniger kritisch waren, wird das Augenmerk im wesentlichen auf Zugspannungen und den Einfluß möglicher Rißbildungen gerichtet, die durch Kriechumlagerungen und Temperaturwechsel entstehen können. Wie schon erwähnt wurde, werden die Temperaturspannungen verhältnismäßig schnell durch Kriechen stark abgebaut. Für eine Betriebsunterbrechung ist mit einer schnelleren Abkühlung der heißen Bereiche zu rechnen. Hierbei treten damit von dem Spannungszustand aus, der durch das erfolgte Kriechen entstanden ist, die örtlichen Temperaturspannungen mit umgekehrtem Vorzeichen auf. Da für diesen Zustand zu beachten ist, daß der Beton zuvor langfristig bei hohen Temperaturen und hohen Druckspannungen gestanden hat und daß Kriecherholungen bei folgenden niedrigen Spannungen und Temperaturen verhältnismäßig gering sind, so werden diese Spannungen ungünstigerweise als elastisch berücksichtigt. Um den Einfluß der örtlichen Temperaturspannungen aufzuzeigen, sind in den Bildern 9 bis 11 Ergebnisse für die reinen Temperaturspannungszustände dargestellt. Für die Berechnungsbeispiele wurde eine mittlere Temperatur an der Behälterinnen-seite von 45° C zugrunde gelegt und im heißen Bereich eine Temperatur von 85° C. Mit den Rechenannahmen:

1. volle Dehnungsbehinderung in der Oberfläche
2. freie Ausdehnung senkrecht zur Oberfläche
3. $E = 400\ 000\ \text{kp/cm}^2$
4. $\alpha_t = 10 \cdot 10^{-6}\ 1/^{\circ}\text{C}$
5. $\nu = 0,2$

ergeben sich Spannungen von ca. $-200\ \text{kp/cm}^2$ aus vollständig behinderter Temperatúrausdehnung in der Oberfläche. Bei einem örtlichen, 85° C heißen Bereich von 1 m Durchmesser in einer Wand, die sonst eine Randtemperatur von 45° C besitzt, liefert die elastische Berechnung nur eine Erhöhung der Druckspannungen im heißen Bereich in Bild 9, die etwas weniger als die Hälfte dieses Wertes beträgt, da sich diese heiße Stelle durch Verformung der Umgebung ausdehnen kann. Bei streifenförmigen heißen Bereichen stellt sich parallel zum Streifen hingegen weitestgehendst volle Dehnungsbehinderung ein. Bei Zugrundelegung einer Abhängigkeit des Kriechens von der Temperatur und der Zeit entsprechend Bild 8 ergeben sich die in Bild 10 dargestellten Temperaturspannungen nach erfolgtem Betonkriechen. Für den reinen Temperaturfall, daß bei einem 85° C heißen Bereich von 1 m Durchmesser nach erfolgtem Kriechen eine Abkühlung des heißen Bereiches auf 45° C stattfindet, ergibt sich hier entsprechend Bild 11 eine Randspannung von über $+50\ \text{kp/cm}^2$. Überlagert man diese Spannungen mit Spannungszuständen aus Betriebszuständen in der Behälterwand und beachtet, daß hier noch entsprechende Anteile aus Kriechumlagerungen der Spannungen aus Lastzuständen im Bereich einer heißen Stelle hinzukommen, so muß z.B. an folgenden Stellen damit gerechnet werden, daß an örtlich begrenzten Stellen der Beton in den Zustand II übergehen könnte:

1. Im mittleren Bereich der Zylinderwand im drucklosen Zustand.
2. Im und neben dem inneren Eckbereich, wenn der Innendruck wieder aufgebracht ist und sich der heiße Bereich noch nicht wieder erwärmt hat.

Der Übergang dieser Bereiche in den Zustand II ist für das Gesamttragverhalten des Behälters von untergeordneter Bedeutung, da sich durch die örtliche Rißbildung die Spannungen als örtliche Zwängungsspannungen abbauen. Die Bewehrung hat hierfür praktisch nur eine Bedeutung für die Rißverteilung, und es ergibt sich keine in das Wandungsinne fort schreitende Rißbildung. Nimmt man z.B. in Zonen mit Rißbildung im Eckbereich, die in Punkt 4 behandelt sind, einen solchen heißen Bereich mit Kriechumlagerung und Abkühlung an, so ergeben sich nur für den Punkt des Auftretens erster Risse bei der Innendrucksteigerung nennenswerte Unterschiede. Die Ergebnisse für Zustände mit Rißbildung, die in den Bildern 2, 4 und 5 angegeben und in Punkt 4 erläutert sind, werden praktisch kaum beeinflußt. Es wäre nur mit etwas größeren Rißweiten zu rechnen. Rißweiten für den untersuchten Fall eines kreisförmigen heißen Bereiches können wie folgt abgeschätzt werden.

Würde für ein ungünstigstes Gedankenmodell im heißen Bereich von 1 m Durchmesser überhaupt keine rißverteilende Wirkung einer Bewehrung angenommen, so wäre mit längs des Durchmessers verlaufenden Rissen zu rechnen. Diese begrenzten Risse würden zu einem Verschwinden der örtlichen Zwängungsspannungen führen, und es könnten für den untersuchten Fall mögliche Rißweiten in der Größenordnung von:

$$2 \cdot r \cdot \Delta t \cdot \alpha_t = 2 \cdot 50 \cdot 40 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0,04 \text{ cm}$$

auftreten. Dieser Wert gilt für einen Rißabstand von 1 m. Hauptsächlich bewirkt eine Bewehrung eine feinere Rißverteilung mit kleineren Rißweiten. Die Größenordnung von Rißweiten und Rißabständen in Abhängigkeit von der Bewehrung kann z.B. nach [6] abgeschätzt werden. Für den ca. 100 cm * 50 cm grossen Zugquerschnitt des örtlichen heißen Bereiches in Bild 11 für σ_{φ} liefert bereits eine Bewehrung von 4 \emptyset 20/m mit einer bezogenen Haftkraft von $\frac{80 \cdot 4 \cdot 6,3}{5000 \cdot 40} \approx 0,01$ nach Bild 16 in [6] einen Rißabstand von ca. 25 bis 50 cm und damit eine Reduzierung der zuvor ermittelten Rißweite auf Werte in der Größenordnung von 0,01 bis 0,02 cm. Damit liefern hier bereits Bewehrungsprozentsätze, die erheblich unter den Werten liegen, die bei einer Zugkeildeckung zu berücksichtigen wären, vertretbare Rißabstände und Rißweiten, ohne daß diese geringere Bewehrung eine Rückwirkung auf das Gesamttragverhalten des Behälters besitzt.

6. Literaturverzeichnis

- [1] G. SCHNELLENBACH: Die Dynamische Relaxation als zweckmäßiges Verfahren zur räumlichen Berechnung von Spannbetondruckbehältern. 2. Informationstagung über Reaktordruckbehälter aus Spannbeton und ihre Wärmeisolierung, Brüssel 1969
- [2] V. HANSSON, K. SCHIMMELPFENNIG: Das Verhalten der Werkstoffe Stahl und Beton in Spannbeton-Druckbehältern, Ermittlung der Werkstoffeigenschaften und Rechnungsannahmen. Vulkan-Verlag Dr. W. Classen, Essen, Konstruktiver Ingenieurbau - Berichte Heft 10, 1971
- [3] G. SCHNELLENBACH: Allgemeine Berechnung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern unter Berücksichtigung von nichtlinearen Spannungs- Dehnungsgesetzen nach der Methode der dynamischen Relaxation. First International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin 1971
- [4] F. STANGENBERG: Berechnung des 1:5-THTR-Druckbehältermodells und Vergleich mit Meßergebnissen des Modellversuchs. Bericht Nr. 9 der Forschungsgruppe Reaktordruckbehälter im Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität, Bochum 1972
- [5] V. HANSSON: Zur praktischen Berechnung von Scheiben mit beliebiger Geometrie und allgemeinem Materialgesetz, Konstruktiver Ingenieurbau Berichte Heft 14, Vulkan-Verlag Dr. W. Classen, Essen 1973
- [6] H. RÜSCH: Der Zusammenhang zwischen Rißbildung und Haftfestigkeit unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung hoher Stahlspannungen, 5. Konferenz der Internationalen Vereinigung für Brücken- und Hochbau, Lissabon 1956
- [7] J. PETER: Zur Bewehrung von Scheiben und Schalen für Hauptspannungen schiefwinklig zur Bewehrungsrichtung, Dissertation
- [8] V. HANSSON, G. SCHNELLENBACH, H. SCHULTZ, W. ZERNA: Die dynamische Relaxation zur Berechnung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern. Erscheint 1973 in der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton



Bild 1 Berechnungsraster

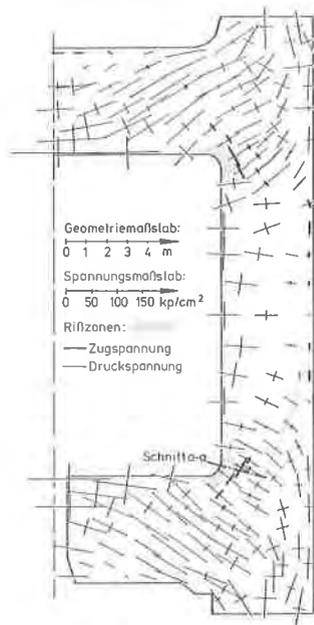


Bild 2 Behälter im Überlastungsbereich mit kleinen Rißzonen, Hauptspannungen in der r-z-Ebene für den Gesamtbehälter

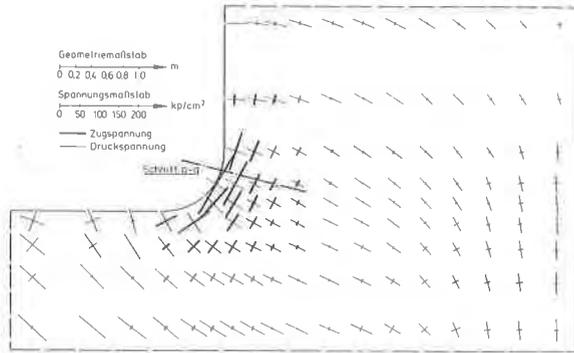


Bild 3

Behälter im Überlastungsbereich ohne Rißbildung, Hauptspannungen in der r-z-Ebene im unteren Eckbereich

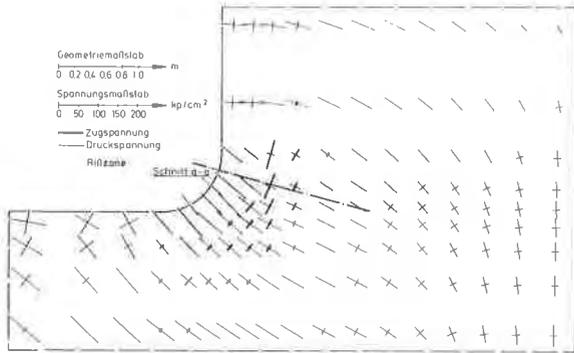


Bild 4

Behälter im Überlastungsbereich mit kleinen Rißzonen, Hauptspannungen in der r-z-Ebene im unteren Eckbereich

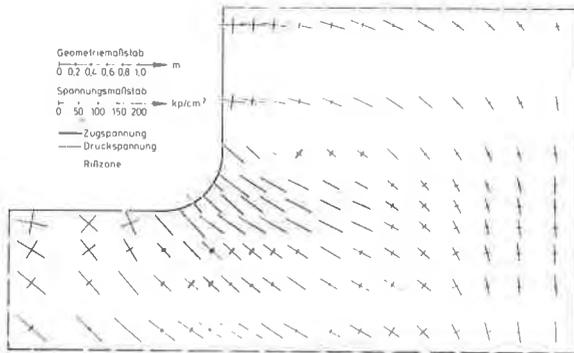


Bild 5

Behälter im Überlastungsbereich mit großen Rißzonen, Hauptspannungen in der r-z-Ebene im unteren Eckbereich

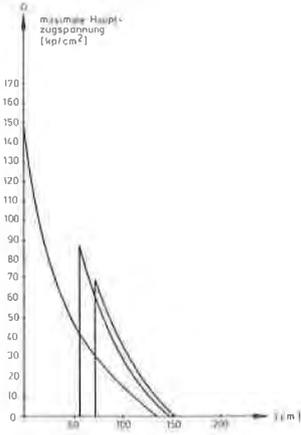


Bild 6 Zugspannungsverläufe für den Schnitt a-a in den Bildern 2, 4 und 5

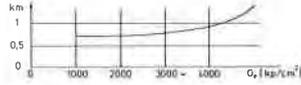


Bild 7 Beiwert k_m für Rißformel nach [6]

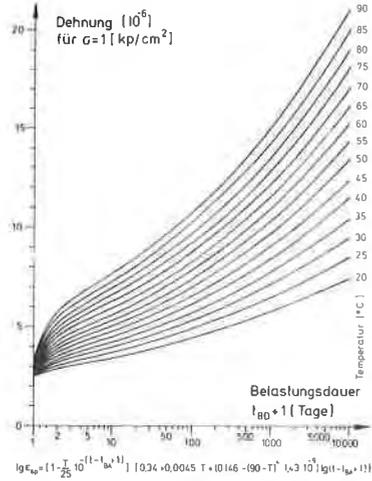


Bild 8 Kriechfunktion

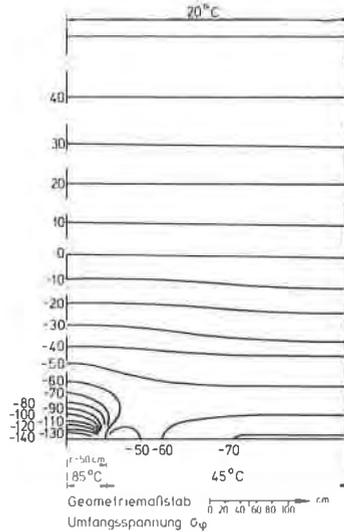
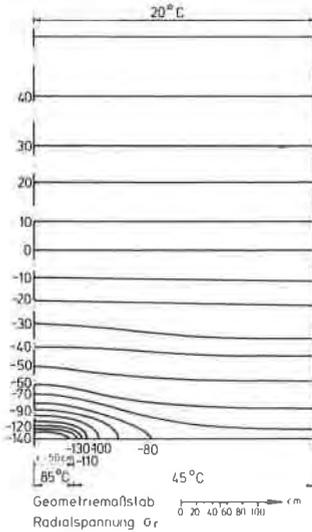


Bild 9 Wandungsausschnitt mit heißem Bereich von $\varnothing 1$ m, elastische Temperaturspannungen

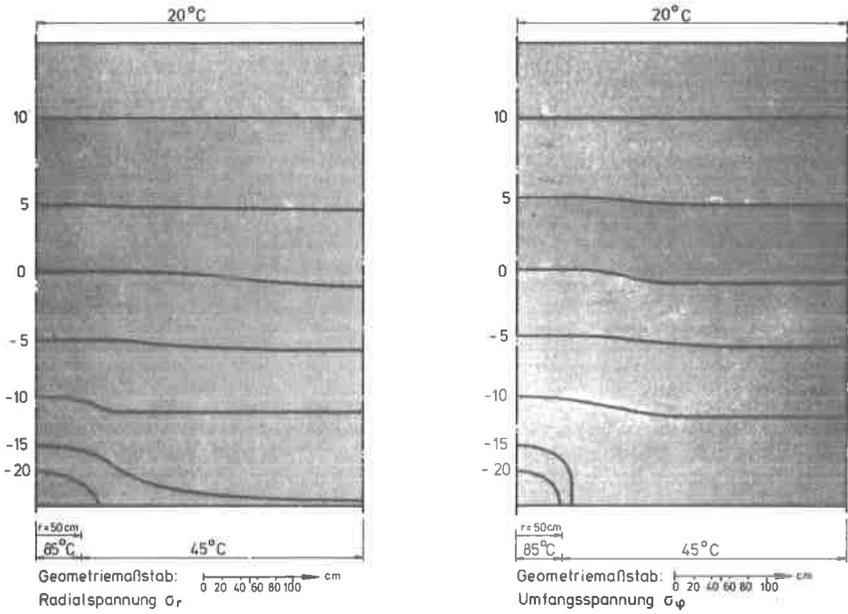


Bild 10 Wandungsausschnitt mit heißem Bereich von \varnothing 1 m, Temperaturspannungen nach erfolgtem Kriechen

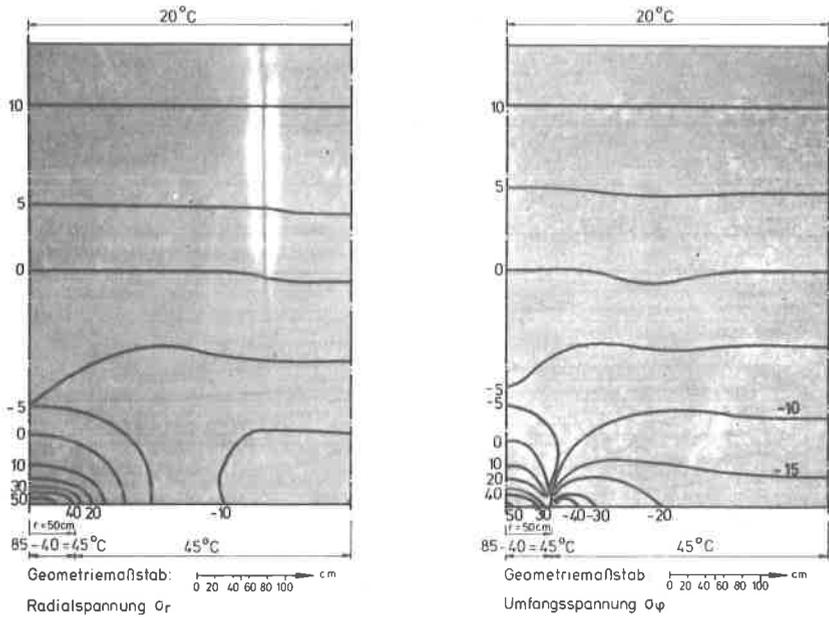


Bild 11 Wandungsausschnitt mit heißem Bereich von \varnothing 1 m, Temperaturspannungen nach Kriechen und örtlicher Abkühlung des heißen Bereiches