

**UNTERSUCHUNGEN ZUR GRENZTRAGFÄHIGKEIT
VON SPANNBETON-REAKTORDRUCKBEHÄLTERN**
**(INVESTIGATIONS ON ULTIMATE LOAD DESIGN OF
PRESTRESSED CONCRETE REACTOR PRESSURE VESSELS)**

K. SCHIMMELPFENNIG, V. HANSSON

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

SUMMARY

According to conventional prestressed concrete engineering practice, ultimate load safety has to be calculated in the design of prestressed concrete pressure vessels for nuclear reactors. Because of complicated geometry and large wall dimensions, this analysis cannot be performed with normally used methods, since the failure mechanism cannot be predicted by well established criterions as for usual prestressed concrete constructions.

For earlier vessel projects, ultimate load tests on large scale concrete models together with considerably simplified calculations of kinematic rigid body mechanisms were used to demonstrate a sufficient safety factor. Further development of the rigid body method and preparation of a computer program for simple handling led to a design tool which is still useful in estimating ultimate load capacity of vessels, particularly in early design stages. Some examples concerning that method are presented.

More accurate analysis, especially in order to investigate the development of the failure mechanism due to progressive cracking without model testing, may be done by using numerical computer programs for three-dimensional continua, for example the dynamic relaxation technique which was used for the authors' investigations. By application of a material law taking account of the behaviour of concrete in a cracked state, it is possible to predict the crack propagation towards the probable failure model. This is demonstrated by a calculation of the THTR vessel, which is in good agreement with experimental results of the THTR-1:5-model.

With these informations on the failure mechanism it is furthermore possible to use three-dimensional continua computer programs for quantitative statement of ultimate vessel safety. Single cracks are chosen in accordance to the above determined crack propagation at the haunches and in the wall with consideration of transverse reinforcement. Coaxial and circumferential cracking may be corrected by a step by step calculation corresponding to stresses in the construction. Stress redistributions due the concrete plastification may be considered. Results of a calculation example based on THTR vessel geometry show, that in the cylindrical region elastic deflections are small compared with the total displacements, i.e. rigid body behaviour is predominant, whereas in the plane and slabs a pressure dome originates. From the vessel displacements produced by ultimate pressure the maximal prestressing steel stresses can be evaluated. An important advantage of this method compared with rigid body mechanism investigations is that no difficulties with the compatibility of the system arise.

1. Aufgabenstellung

Die Durchführung eines Bruchsicherheitsnachweises für Spannbeton-Druckbehälter erfordert es, auf rechnerischem Wege das Verhalten der Konstruktion bei einer hypothetischen Innendrucksteigerung vom Betriebsdruck bis zur Erschöpfung der Tragfähigkeit nachzuvollziehen. Da man sich hierbei nur für die Sicherheit der Betonkonstruktion interessiert, trifft man üblicherweise die Annahme, daß der Liner bis zum Erreichen des Berstdruckes dicht bleibt.

Während das Spannungs-Dehnungsverhalten des Spannstahls sich zuverlässig beschreiben läßt, zumal sich die Spannkabel weitgehend aus dem Verbund lösen, bereitet die Erfassung des nichtlinearen Verhaltens des Stahlbetons bei den im Überlastungsfall auftretenden Beanspruchungen größere Schwierigkeiten, besonders bei der Aufgabe, die Vorgänge in den ebenen Abschlußplatten zylindrischer Behälter bei Laststeigerung bis zum Bruch theoretisch wiederzugeben.

Zu Beginn der Entwicklung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern hatte man wegen dieser Probleme den Schwerpunkt bei der Führung von Bruchsicherheitsnachweisen auf die Untersuchung von Beton-Modellen gelegt, sowohl ganzer Behälter als auch insbesondere von Abschlußplatten allein. Parallel dazu geführte Berechnungen waren meist nur grobe Abschätzungen, die sich im wesentlichen auf die Untersuchung einer ausreichenden Dimensionierung der Vorspannung bezogen.

Wenn auch bis jetzt gewisse Fortschritte in den Berechnungsverfahren erzielt worden sind, so sind zu diesem Zeitpunkt die Forschungen auf diesem Gebiet noch lange nicht als abgeschlossen zu bezeichnen. In diesem Referat sollen Bruchsicherheitsberechnungen mit kinematischen Starrkörpermodellen sowie genauere Verfahren im Rahmen einer Kontinuumsberechnung behandelt werden. Die sich daraus ergebenden Aufgabenstellungen für weiterführende Untersuchungen mit dem Ziel, Bruchsicherheitsnachweise allein auf rechnerischem Wege führen zu können, sollen abschließend erörtert werden.

2. Methode der kinematischen Bruchmodelle

2.1 Grundsätzliche Überlegungen

Bei Behältern mit einem nicht übermäßig hohen Grad schlaffer Bewehrung zeigte sich in Modellversuchen, daß bei ansteigendem Innendruck eine Tendenz zur Bildung örtlich begrenzter Rißzonen und zum Öffnen weniger größerer Einzelrisse bei weiterer Laststeigerung vorhanden war. Dies führte zu der Überlegung, man könne das Verhalten der Konstruktion unter Vernachlässigung der internen elastischen Verformungen durch einen Starrkörper-Mechanismus beschreiben, dessen einzelne Blöcke durch die genannten konkreten Einzelrisse begrenzt werden und die um plastische Gelenke in diesen Rissen Relativbewegungen zueinander ausführen. Durch Gleichgewichtsbeachtungen an einem solchen Mechanismus läßt sich der Überlastungsfaktor ermitteln, bei dem in einer der Werkstoffkomponenten zuerst die Grenzbean-

spruchung erreicht wird. Die Bilder 1 und 2 geben den Ansatz der Kräfte am Bruchmodell am Beispiel des Pod-Boiler-Typs wieder. Während der eigentliche Berechnungsgang keine besonderen Probleme birgt, liegt die eigentliche Schwierigkeit dieses Verfahrens darin, den maßgebenden Bruchmechanismus aufzufinden. Dies ist derjenige, für den der bei Erschöpfung des Arbeitsvermögens erreichte Innendruck zu einem Minimum wird. Sieht man hier von einer geschlossenen Lösung ab, die mit vertretbarem Aufwand nicht möglich ist, da eine Vielzahl wechselseitiger Beeinflussungen der einzelnen Komponenten des Mechanismus zu berücksichtigen ist, so stellt sich die Forderung, alle denkbaren Mechanismen versuchsweise zu berechnen, um als maßgebenden den herauszufinden, der bei dem geringsten Innendruck die Grenztragfähigkeit erreicht.

Die theoretisch unendlich große Zahl möglicher Bruchmodelle läßt sich mit verschiedenen Mitteln reduzieren. Hier seien einige Hilfsmittel stichpunktartig aufgeführt:

- Bei Behältern mit üblicher Geometrie: Vergleich mit Ergebnissen anderer Projekte.
- Besonderheiten der Behältergeometrie (Lage größerer Wanddurchbrüche für Wärmetauscher, Gebläse u.ä., Anordnung der Vorspannung): Hieraus lassen sich bisweilen Aufschlüsse darüber gewinnen, wo die Rißbildung ansetzen wird.
- Vergleich mit Beton-Großmodellen: Überlastungsversuche an Modellen zum untersuchten Behälter (wenn vorhanden) oder zu vergleichbaren Projekten geben Aufschluß über die Bildungstendenzen des Bruchmechanismus. (Daß man auf dieses Hilfsmittel möglichst sollte verzichten können, wurde eingangs erwähnt.)
- Elastische Behälterberechnungen mit isotropem Materialverhalten nach numerischen Verfahren: Rechenergebnisse von Lastfällen mit über den Betriebsdruck hinausgehendem Innendruck lassen erkennen, an welchen Stellen des Behälters zuerst die Betonzugfestigkeit überschritten wird und demnach Risse auftreten werden. Auch die Richtung anfänglicher Risse läßt sich im Prinzip aus der Richtung der Hauptspannungen erkennen.
- Numerische Behälterberechnung, welche die Rißbildung in bewehrtem Beton berücksichtigt: Nähere Angaben hierzu erfolgen im Abschnitt 3.

Die genannten Hilfsmittel gestatten es, die Zahl der möglichen kinematischen Bruchmodelle bereits so weit einzuschränken, daß im weiteren durch Versuchsrechnungen der Mechanismus mit der kleinsten potentiellen Energie unter vertretbarem Aufwand ermittelt werden kann. (Bild 3 zeigt z.B. das wahrscheinlichste Bruchmodell bei einer dem THTR-Behälter entsprechenden Geometrie.) Bereitet man zudem, wie am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau geschehen - vgl. [1]-, die erforderlichen Rechenvorgänge in Form eines elektronischen Rechenprogrammes auf, so erhält man die Möglichkeit, die in gewissem Umfange vor Beginn der Berechnung erforderlichen Hypothesen hinsichtlich ihres Einflusses auf Bruchmechanismus und aufnehmbare Belastung

zu überprüfen und gegebenenfalls zur sicheren Seite hin zu korrigieren. Besonders im Vorentwurfsstadium lassen sich auf diese Weise mit minimalem Aufwand Aufschlüsse über erreichbare Sicherheitsfaktoren gewinnen. Hier wird auch in Zukunft dieses Verfahren seine gute Einsatzmöglichkeit behaupten können. Auch bei parametrischen Studien unterschiedlicher Behälterkonzeptionen - vgl. Beitrag H 3/5 - ist nach wie vor ein sinnvoller Einsatz möglich.

Von besonderer Bedeutung für die Bewegungen des Mechanismus ist die Lage des Gelenkes zwischen zylindrischem Teil und Abschlußplatten, siehe z.B. Bilder 4 und 5. Durch die Lage dieses plastischen Gelenkes wird bestimmt, welcher Anteil der Ringvorspannung als auf den Deckel wirkend angesehen werden kann, besonders aber auch, in welcher Weise alle Spannglieder relativ zueinander Dehnungen erfahren. Sämtliche durchgeführten Rechenbeispiele zeigen in der Tat, daß sich für eine bestimmte Höhenlage des Gelenkes ein ausgeprägtes Minimum des erreichbaren Innendruckes einstellt. Die Lage dieses Minimums ist dabei nahezu unabhängig von den vorgegebenen Grenzbeanspruchungen des Spannstahles, siehe Bilder 4, 5 und 7.

2.2 Ansätze zum Materialverhalten

Da die Bruchsicherheit eines Spannbeton-Druckbehälters, abgesehen von eventuellem Schubbruch im Deckel, im wesentlichen durch den Spannstahl bestimmt wird, ist eine möglichst gute Erfassung von dessen Spannungs-Dehnungslinie erforderlich. In dem genannten Rechenprogramm wurde eine näherungsweise Beschreibung durch eine Gerade mit anschließender quadratischer Parabel gewählt. Andere Näherungen sind ebenso möglich. Es kann wahlweise gewickelte oder innenliegende lisenenverankerte Ringvorspannung berücksichtigt werden. Im letzteren Falle werden die Ankerkräfte und Umlenkräfte unter Berücksichtigung von Reibung und ungewollter Umlenkung im Programm ermittelt und gleichmäßig über den Umfang verteilt.

In den Rissen zwischen den einzelnen Blöcken des kinematischen Mechanismus kommt die vorhandene schlaife Bewehrung zur Wirkung und gegebenenfalls auch Liner oder Panzerrohre, sofern diese entsprechend den geltenden Vorschriften berücksichtigt werden dürfen. Es ist im Rahmen der hier beschriebenen Betrachtungsweise nicht möglich, aus den Relativbewegungen der Blöcke des Mechanismus zueinander genaue Rückschlüsse auf die Dehnungen des Bewehrungsstahles, der die Risse zwischen den Blöcken überbrückt, zu ziehen. Denn die Annahme konkreter Einzelrisse stellt zwar hinsichtlich des Verhaltens des Gesamtmechanismus eine genügend gute Näherung dar, für die Beurteilung des Verbundes zwischen Stahl und Beton im Rißbereich selbst ist sie nicht brauchbar. Deswegen ist man hier auf Abschätzungen angewiesen. Für den im Verbund liegenden Bewehrungsstahl wird es meistens sinnvoll sein, im Bruchzustand die Streckgrenze anzusetzen. Dies ist für die Beurteilung des Verhaltens des Gesamtmechanismus eine ausreichende Näherung, die auf der sicheren Seite liegt. Man sollte allerdings einige Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Grenzspannungen für den schlaffen Stahl durchführen, um ein Gefühl dafür zu bekommen, welchen Einfluß dies

auf die Bruchsicherheit des gesamten Mechanismus hat. In den plastischen Gelenken zwischen den Elementen des Mechanismus werden Biegemomente aufgenommen. Für deren Ermittlung ist eine Aussage über die Gestalt der Betondruckzone erforderlich. Dies geschieht auf der Grundlage der von H. Rüsç in [2] beschriebenen Versuchsergebnisse. In Abhängigkeit von Betongüte und Belastungsgrad werden Parameter zur Charakterisierung der Spannungsverteilung in der Druckzone ermittelt. Die Zuordnung bestimmter Spannungsverteilungen zu bestimmten Verformungszuständen des Bruchmechanismus ergibt sich nicht zwangsläufig. Deshalb sollte man hier einige Vergleichsrechnungen mit unterschiedlichen Belastungsgraden der Druckzonen durchführen, um den dadurch entstehenden Einfluß auf den Sicherheitsfaktor erkennen zu können. Eigene Berechnungen haben indes gezeigt, daß es bei üblichen Konstruktionen meist genügt, dem Bruchzustand des Behälters die Grenzbeanspruchungen dieser Druckzonen zuzuordnen.

2.3 Berechnungsablauf und Beispiele

Spannbetondruckbehälter mit ebenen Abschlußplatten werden üblicherweise so dimensioniert, daß bei steigendem Innendruck die Grenze der Tragfähigkeit durch Versagen im zylindrischen Bereich erreicht wird. In dem Ablauf des Rechenprogramms wird deshalb zunächst der Sicherheitsfaktor für den zylindrischen Teil ermittelt. Vorgegeben wird die Radialverschiebung in Behältermitte. Mit dieser vorgegebenen Auslenkung werden Systeme mit unterschiedlicher Neigung der Fuge zwischen Zylinder und Deckel untersucht und nach dem zugrunde liegenden Prinzip des Minimums der potentiellen Energie das maßgebende System ermittelt. Es wird angenommen, daß die Relativverdrehungen der Blöcke des Mechanismus in den plastischen Gelenken um die nach den Angaben in Abschnitt 2.2 ermittelten Nulllinien erfolgen. Die Lage dieser Drehpunkte hängt damit von den Zwischenreaktionen in diesen Fugen ab, diese sind wiederum Funktionen des Innendruckes und der vertikalen Vorspannung. Letztere ist andererseits aus Gründen der Geometrie eine Funktion der Lage der Drehpunkte und eine Funktion der Verformung des Deckels. Diese ist aufgrund der Gleichgewichtsbedingung für die Deckelsektoren abhängig vom Innendruck. Die Erfüllung dieser wechselseitigen Abhängigkeiten erfolgt auf iterativem Wege durch mehrere Korrekturschleifen in besagtem Rechenprogramm.

Für das so ermittelte maßgebende System, für das der erreichbare Sicherheitsfaktor ein Minimum wird, wird anschließend der hypothetische Fall einer weiteren Steigerung des Innendruckes auf den Deckel allein behandelt, um dessen zusätzliche Sicherheit zu ermitteln. Dabei werden zur sicheren Seite hin in der Fuge zwischen Zylinder und Deckel die Schnittkräfte aus dem zuvor ermittelten Bruchzustand für den Gesamtbehälter angesetzt. Die der Berechnung zugrundeliegende Tragwirkung der Abschlußplatten stellt quasi eine Kombination aus Plattenwirkung und Gewölbewirkung dar. Von Plattenwirkung kann man sprechen, weil in den radialen Bruchlinien geweckte Biegemomente der Belastung entgegenwirken, siehe Bilder 1 und 2. Gewölbewirkung entsteht dadurch, daß die resultierende Betondruckkraft in den Druckzonen der Radial-

fugen und die Resultierende aus der auf den Deckel wirkenden Ringvorspannung in unterschiedlicher Höhe angreifen. Diese Höhendifferenz entspricht dem effektiven Stich des Gewölbes. Durch die radiale Versetzung der Resultierenden aus vertikaler Vorspannung und der Betondruckkraft in der Eckfuge ist zusätzlich eine gewisse elastoplastische Einspannung der Abschlußplatte gegeben. Der Bruchzustand der Abschlußplatte gilt als erreicht, wenn sich im obersten Ringspannglied (beim oberen Deckel) oder im innersten Vertikalspannglied die Grenzbeanspruchung einstellt.

In den Bildern 4 bis 6 sind Ergebnisse einer Studie zur Bruchsicherheitsberechnung am Beispiel des THTR-Behälters dargestellt. Es wurden zwei mögliche Fälle untersucht, einmal ein Mechanismus mit einem horizontalen RiB auf der Außenseite in Behältermitte, zum anderen ein solcher mit zwei horizontalen Rissen außen in Höhe der Durchbrüche für die Gebläse sowie in Höhe der Durchbrüche für Thermoelemente, Anfahr- und Betriebsinstrumentierung. In den Bildern 4 und 5 sind für diese beiden Alternativen die Rechenwerte zum Nachweis der maßgebenden Bruchfuge zwischen Zylinder und Abschlußplatte sowie zur Ermittlung der Bruchsicherheit des zylindrischen Teils aufgetragen. Als rechnerische Bruchgrenze des Spannstahls wurde eine Dehnung $\epsilon_{Gr} = 2\%$ angesetzt. Für unterschiedliche vorgegebene Spannglieddehnungen in Behältermitte zeigen die eingetragenen Kurven für die Lage des Gelenkes in der oberen Behälterhälfte als Funktion des Innendruckes einheitlich ein Minimum für einen RiBwinkel von 14° . In dem Bereich, wo die Kurven gestrichelt sind, überschreitet die zugehörige Maximaldehnung der Vertikalvorspannung die Grenze von 2% . Der Beginn dieses Bereiches ist durch eine gestrichelte Kurve markiert. Wie aus Bild 4 ersichtlich, erreichen im ersten der untersuchten Fälle vertikale und horizontale Vorspannung nahezu beim gleichen Innendruck die Grenzdehnung, nämlich bei $\nu = 3,76$. Im zweiten Fall (Bild 5) erreicht aufgrund der anderen kinematischen Gegebenheiten die Vertikalvorspannung zuerst die Bruchgrenze und wird damit maßgebend für die Bruchsicherheit. Der erzielte Bruchsicherheitsfaktor beträgt hier nur $\nu = 3,35$. Damit würde diese Alternative maßgebend für den Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit werden. In Bild 6 sind für beide Fälle die Überlastungsfaktoren über der Spannstahl-Dehnung aufgetragen. Man erkennt, daß hier stets die Vertikalvorspannung über die erreichte Bruchsicherheit entscheidet.

Die Bilder 7 und 8 zeigen Ergebnisse einer in gleicher Weise durchgeführten Berechnung auf der Grundlage der Angaben in [3] und [4] für den Dunge-ness-B-Behälter. Bild 7 läßt erkennen, daß auch hier die Lage des plastischen Gelenkes zwischen Zylinderbereich und Abschlußplatte unabhängig von dem durch die maximale Spannstahl-Dehnung vorgegebenen Verformungsgrad des Behälters ist. Im Gegensatz zu den in Bild 4 dargestellten Ergebnissen ist hier nicht die Vertikalvorspannung, sondern die Ringvorspannung maßgebend für das Erreichen der Grenztragfähigkeit. Die in Bild 4 eingezeichnete Grenzkurve für $\epsilon_{\text{vertikal}} = 2\%$ würde hier außerhalb des Auftragsbe-

reiches liegen, siehe auch die gestrichelte mit 1 gekennzeichnete Linie in Bild 8. Die Bruchsicherheit der Abschlußplatten liegt hier deutlich über der des zylindrischen Teils.

3. Elastische Kontinuumsberechnung mit Rißbildung

Wie schon in Abschnitt 2.1 angedeutet, können Kontinuumsberechnungen nach numerischen Verfahren, welche die Rißbildung im Beton bei steigendem Innendruck beschreiben, wertvolle Bestandteile einer Bruchsicherheitsuntersuchung sein. Das Verfahren der Dynamischen Relaxation, siehe z.B. [5], das sich hierfür als besonders gut geeignet erweist, wurde benutzt, um mit der bei numerischen Verfahren üblichen Methode, das nichtlineare Verhalten durch eine Anzahl aufeinanderfolgender Rechenschritte mit jeweils linearem Verhalten zu beschreiben, die Vorgänge in den Behälterwandungen bei Überlastung zu verfolgen. Durch Annahme einer Rißbildung an den Stellen mit den höchsten Zugspannungen kann hierbei die Ausbreitung der gerissenen Zonen mit den entsprechenden Systemänderungen untersucht werden. Bei der Berechnung werden keine konkreten Einzelrisse angenommen, sondern das Verhalten der Elemente mit Rißbildung wird durch einen fiktiven Elastizitätstensor erfaßt. Dieses Verfahren wird näher in [6] sowie in Beitrag H 1/3 beschrieben. Auf die Vorgänge im Rißbereich selbst wird ebenfalls im Beitrag H 1/3 näher eingegangen. Hier soll entsprechend der Thematik mehr Augenmerk auf das Gesamtverhalten des Behälters gerichtet werden. Die Bilder 9 und 10 zeigen Richtung und Größe der Hauptspannungen in der r-z-Ebene einer rotationssymmetrischen Berechnung des THTR-Behälters. Der Belastungszustand ist eine kurzzeitige Innendruckbelastung mit 1,6-fachem Betriebsdruck (= 64 atü) und eine kurzzeitige Anhebung des Temperaturgradienten um 20 % nach zweijährigem heiß-drucklosem Zustand. In Bild 9 ist ein erster Rechenschritt mit kleinen Rißbereichen im inneren Eckbereich mit den höchsten Zugspannungen dargestellt, an deren Rändern noch Zugspannungen oberhalb bzw. in der Größenordnung der Betonzugfestigkeit auftreten. Die Lage dieser Stellen mit den größten Zugspannungen gibt die Richtungen an, in denen ein Fortschreiten der Rißbildung zu erwarten ist. Wie aus dem Bild zu ersehen ist, zeigt sich hier die gleiche Tendenz für die Richtungen der Rißbildung, wie es beim kinematischen Bruchmodell in Bild 11 vorausgesetzt wurde. In Bild 10 ist ein folgender Rechenschritt mit einem Fortschreiten der Rißbildung entsprechend den Zugspannungen wiedergegeben. Die Rißbereiche haben sich entsprechend vergrößert; vor den einzelnen Rißzonen sind nur noch Zugspannungen bis ca. 25 kp/cm^2 vorhanden; die Rißbildung hat sich damit für diese Innendruckstufe stabilisiert. Besonders aus Bild 10 ergeben sich bemerkenswerte Hinweise auf den entstehenden Bruchmechanismus:

- ausgeprägte Risse auf der Innenseite in den Ecken mit sehr flacher Neigung (Nach der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Starrkörper-Methode ergaben sich für die obere Ecke 14° gegenüber der Horizontalen, für die untere Ecke 10° .)
- beginnende Rißbildung an der Außenseite in Höhe der Gebläse und der Ther-

moelemente (Gleiche Ergebnisse zeigten Starrkörper-Untersuchungen und Messungen am THTR-1:5-Modell [7].)

- Rißbildung außen in der Mitte der Abschlußplatten, auch - hier nicht dargestellt - normal zur Umfangsrichtung (Die verbleibenden Druckspannungen in der unteren Platte erklären sich aus den Reaktionen des Kugelabzugsrohres.)
- Entstehung eines ausgeprägten Druckgewölbes in den Abschlußplatten.

Insgesamt ergeben sich aus dieser Berechnung bereits die entscheidenden Charakteristika des zu untersuchenden Bruchmodells. Zumal sich hierfür die gleichen Bildungstendenzen abzeichnen wie am 1:5-Modell, darf gefolgert werden, daß es bei dem jetzigen Stand der Berechnungsmöglichkeiten für Bruchsicherheitsuntersuchungen nicht mehr erforderlich ist, Beton-Großmodelle von Gesamtbehältern zu errichten zu zu testen. Weiterhin zeigt eine Gegenüberstellung der Spannungsbilder mit kleinen und größeren Rißbereichen (Bilder 9 und 10) sowie der zugehörigen Verformungsbilder (hier nicht wiedergegeben), daß solche Unterschiede in örtlich begrenzten Bereichen bei dieser Druckstufe auf das Gesamtverhalten des Behälters keinen sehr großen Einfluß haben.

Bei einer weiteren Innendruckerhöhung treten eine Vergrößerung der Zugspannungen vor den Elementbereichen mit Rißbildung und damit ein mögliches Fortschreiten der Tiefe der Rißzonen auf. Als Grenzfall ergibt sich der Zustand der Tragfähigkeit. Dieser Zustand kann auch durch geeignete Vorgabe eines entsprechenden Systems direkt berechnet werden. Mit der bei dem Verfahren der dynamischen Relaxation gegebenen Möglichkeit der iterativen Veränderung des angenommenen Systems kann dieses Rechenmodell unter Ausnutzung der bereits gewonnenen Ergebnisse variiert werden, so daß mit verhältnismäßig geringem Aufwand ähnliche Untersuchungen, wie in Abschnitt 3 beschrieben, durchgeführt werden können. Auf solche Berechnungen, die auf bestehende Bemessungsrichtlinien abgestimmt sind, wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

4. Kontinuumsberechnung zu Bruchmodellen

4.1 Beschreibung des Verfahrens

Bei Tragfähigkeitsuntersuchungen nach der Methode der kinematischen Bruchmodelle wird die kinematische Verträglichkeit des gesamten Systems nur näherungsweise erfüllt, da die sich gegeneinander verdrehenden Elemente des Mechanismus in allen drei Richtungen nicht klein gegenüber den Gesamtmaßen des Behälters sind und die Drehachsen nicht parallel liegen. Außerdem sind bei dem Starrkörper-Verfahren die Aussagen über die in den Abschlußplatten herrschenden Betondruckspannungen nur sehr überschläglicher Natur. Das im folgenden beschriebene Verfahren bringt hinsichtlich dieser beiden Punkte Verbesserungen. Es wird zwar nach wie vor ein Bruchmodell in seiner grundsätzlichen Bildungstendenz vorgegeben; jedoch wird die Verträglichkeit stets gewährleistet, und es lassen sich zudem detailliertere Aussagen über Betondruckzonen und gerissene Bereiche machen.

Auch hier wird ein Rechenprogramm zur rotationssymmetrischen Berechnung von Spannbeton-Druckbehältern nach dem Verfahren der Dynamischen Relaxation verwendet. Die rotationssymmetrischen Reißflächen, d.h. die schrägen Risse zwischen zylindrischem Teil und Abschlußplatten sowie sonstige horizontale Risse im Zylinderbereich, sind entsprechend den vorangegangenen Ausführungen vorherzubestimmen. Entsprechend der Lage dieser Risse werden im Berechnungsraster Normal- und Schubspannungen bei jedem Iterationsschritt zur Simulierung der Risse in geeigneter Weise gleich Null gesetzt. Die Wirkung der die Risse überbrückenden schlaffen Bewehrung wird durch Vorgabe ideeller Zugspannungen als äußere Kräfte in den entsprechenden Bereichen der Reißufer simuliert. Zonen, in denen der Behälter in tangentialer, radialer oder in beiden Richtungen gerissen ist, werden zunächst geschätzt und durch Nullsetzen der entsprechenden Normalspannungen in jedem Iterationsschritt berücksichtigt. Ebenso werden die Breiten der Druckzonen, die im Anschluß an die rotationssymmetrischen Reißflächen verbleiben, zunächst geschätzt. Unter Vorgabe dieser Zusatzbedingungen wird eine Berechnung des Behälters für den Lastfall Vorspannung + Grenzdruk durchgeführt. Dabei verhält sich der Behälter mit Ausnahme der genannten Sonderbereiche als elastisches Kontinuum. Aus den sich ergebenden Spannungen und Verformungen lassen sich nunmehr Rückschlüsse auf die Richtigkeit der getroffenen Annahmen hinsichtlich der gerissenen Bereiche ziehen. Dementsprechend werden Korrekturen der vorgegebenen Zusatzbedingungen durchgeführt. Ebenso kann in Bereichen hoher Betondruckspannungen das Plastizieren des Betons durch Abminderung des E-Moduls näherungsweise erfaßt werden. Die Größenordnung der Abminderung läßt sich z.B. anhand der in Bild 11 angegebenen Arbeitslinie abschätzen.

Für diese Art der Berechnung erweist sich das benutzte Verfahren der Dynamischen Relaxation als besonders vorteilhaft, da die Korrekturvorgänge sehr flexibel gehandhabt werden können und keinen großen zusätzlichen Rechenzeitbedarf bewirken.

4.2 Berechnungsbeispiel

In Bild 11 sind für ein Beispiel einer solchen Bruchsicherheitsberechnung der gewählte Rechenraster und die verwendeten Zusatzbedingungen dargestellt. Der zugrundegelegte Spannbetondruckbehälter entspricht hinsichtlich Geometrie und Auslegung der Vorspannung dem THTR-Prototyp. Die Berechnung wurde für 2,8-fachen Betriebsdruck durchgeführt. Die schlaffe Bewehrung wurde geschätzt. Die konkreten Einzelrisse und die sie überbrückende Bewehrung wurden entsprechend den zuvor gemachten Angaben berücksichtigt.

Die übrigen Eintragungen in Bild 11 geben die Tragwirkung des Betons wieder, wie sie sich nach Durchführung der erforderlichen Korrekturschritte ergab. Man erkennt, daß nahezu der gesamte Zylinderbereich in Umfangsrichtung gerissen ist. Lediglich im Bereich der Eckrisse besteht Druckkontakt. In beiden Abschlußplatten ist die Ausbildung von Druckgewölben, die sich zum Scheitel hin verjüngen, zu erkennen. Noch anschaulicher wird dies in

Bild 12, in dem Verlauf und Größe der Hauptspannungen in der r-z-Ebene für diesen Lastfall dargestellt sind. Im Bereich des Gewölbescheitels wurde Plastizieren des Betons entsprechend der angegebenen Kennlinie berücksichtigt. In den Druckzonen, die in Verlängerung der vorgegebenen konkreten Einzelrisse verbleiben, ergibt die Berechnung relativ geringe mittlere Druckspannungen. Der größte hier errechnete Wert liegt weit unter der für den Gebrauchszustand üblicherweise zulässigen Spannung. Hier findet also kein rechnerisch erfaßbares Plastizieren des Betons statt.

Bild 13 zeigt eine Darstellung des verformten Behälters. Man erkennt deutlich, daß die Verschiebungen des Systems im wesentlichen durch das Klaffen der Einzelrisse verursacht werden. Der eingezeichnete Rißverlauf erklärt sich aus der Wahl des Rechenrasters und ist in seinen Einzelheiten ohne Einfluß auf das Ergebnis. Die internen Verformungen der Bereiche zwischen den Rissen sind vergleichsweise gering. Man findet hierin die Berechtigung dafür, den Bruchzustand an einem kinematischen Starrkörpermechanismus zu betrachten. In den Abschlußplatten finden dagegen deutliche Verformungen statt, besonders im Zentralbereich der Platten. Das läßt sich aus der Gewölbebildung und dem Plastizieren erklären.

Mit den Verschiebungen liegen die Dehnungen des Spannstahls vor. Sie sind vom Programm bereits während der Rechnung berücksichtigt worden. Bei dem hier beschriebenen Beispiel liegen die Spannstahlspannungen sämtlich unter den nach den zugehörigen Richtlinien zulässigen Grenzspannungen.

5. Zusammenfassung und Zielsetzung weiterer Forschungen

Dieser Beitrag sollte einen kurzen Aufriß über Berechnungsmethoden bei Bruchsicherheitsnachweisen für Spannbeton-Reaktordruckbehälter geben. Es wurde gezeigt, wie unabhängig von Modellversuchen mit Hilfe weiterentwickelter numerischer Rechenverfahren die Rißbildung im bewehrten Beton bei steigendem Innendruck erfaßt werden und damit das progressive Entstehen eines realistischen Bruchmechanismus erkannt werden kann. Ein verbessertes Verfahren für den Bruchsicherheitsnachweis am so ermittelten Bruchmechanismus wurde vorgestellt. Schließlich wurde auch von einer leicht handhabbaren Aufbereitung des herkömmlichen Verfahrens der kinematischen Bruchmodelle berichtet, das so noch seinen Platz bei Vorentwürfen und parametrischen Studien behaupten kann.

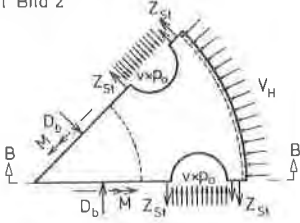
Diese Verfahren führen aus dem Grunde zu brauchbaren Ergebnissen hinsichtlich der Bruchsicherheit des Gesamtbehälters, weil bis heute die ebenen Abschlußplatten der Behälter üblicherweise stark überdimensioniert werden. Man will so die Gefahr eines Schubbruches in den Platten als für den Behälter maßgebende Versagensart vermeiden. Hinsichtlich deren Beherrschung auf theoretischem Wege bestehen nämlich noch gewisse Unsicherheiten. Die Forschungsarbeiten für eine zutreffende rechnerische Behandlung dieses Problems sind noch nicht abgeschlossen. Hierzu sind besonders auf dem Materialsektor noch weitere Untersuchungen erforderlich, damit ein Anschreiben der Bruchbedingungen am einzelnen Volumenelement möglich wird. Bei entspre-

chenden Fortschritten könnten die Sicherheitsfaktoren im Vergleich zu den derzeit noch geforderten Werten reduziert werden, insbesondere die gegenüber dem Gesamtbehälter erhöhten Sicherheitsbeiwerte der Abschlußplatten. Es ist denkbar, daß man auf diese Weise zu wirtschaftlicheren Konstruktionen gelangt.

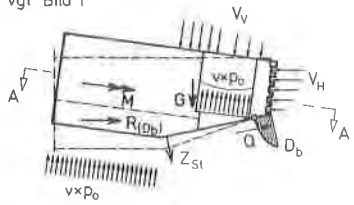
Literatur

- [1] SCHIMMELPFENNIG, K., "Überlastungsnachweise für Spannbeton-Reaktor-druckbehälter", Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Forschungsgruppe Reaktordruckbehälter, Ruhr-Universität Bochum, Bericht Nr. 8, Teil 1, 1972.
- [2] RÜSCH, H., "Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone. Festigkeit und Verformung des exzentrisch gedrückten Rechteckquerschnittes aus unbewehrtem Beton bei kurzzeitiger Lasteinwirkung", Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 120, Berlin 1955.
- [3] WARNER, P. C., "The Dungeness B Vessels", Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels, London 1967, paper 3.
- [4] FINIGAN, A., "Ultimate Analysis of the Dungeness B Vessels", Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels, London 1967, paper 31.
- [5] SCHNELLENBACH, G., "Allgemeine Berechnung von Spannbeton-Reaktor-druckbehältern unter Berücksichtigung von nichtlinearen Spannungs-Dehnungsgesetzen nach der Methode der Dynamischen Relaxation", Proceedings of the First International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin 1971.
- [6] HANSSON, V., "Zur praktischen Berechnung von Scheiben mit beliebiger Geometrie und allgemeinem Materialgesetz", Konstruktiver Ingenieurbau - Berichte, Heft 14, Vulkan-Verlag Essen, 1973.
- [7] STANGENBERG, F., "Berechnung des 1:5 - THTR - Druckbehältermodells und Vergleich mit Meßergebnissen des Modellversuchs", Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Forschungsgruppe Reaktordruckbehälter, Ruhr-Universität Bochum, Bericht Nr. 9, 1972.

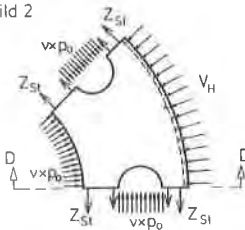
Horizontalschnitt A-A
vgl. Bild 2



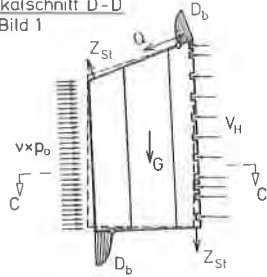
Vertikalschnitt B-B
vgl. Bild 1



Horizontalschnitt C-C
vgl. Bild 2



Vertikalschnitt D-D
vgl. Bild 1



D_b Befordruckkraft
 Z_{st} Zugkraft der schlaffen Bewehrung
 V_H Umlenkkraft aus horiz. Vorspannung

M Moment in den Bruchlinien
 p_o Betriebsdruck
 v Sicherheitsfaktor

V_v Kräfte aus Vertikalvorspannung
 $R_{(D_b)}$ Radialkomponente der Befordruckkraft
sonstige Bezeichnungen wie in Bild 1

G Eigengewicht
 Q Querkraft

Bild 1 Kräfte am Bruchmodell,
Horizontalschnitte,
Beispiel: Pod-Boiler-Typ

Bild 2 Kräfte am Bruchmodell,
Vertikalschnitte,
Beispiel: Pod-Boiler-Typ

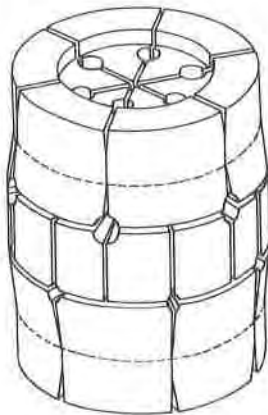


Bild 3 Kinematisches Bruchmodell anschaulich,
Beispiel: THTR-Prototyp

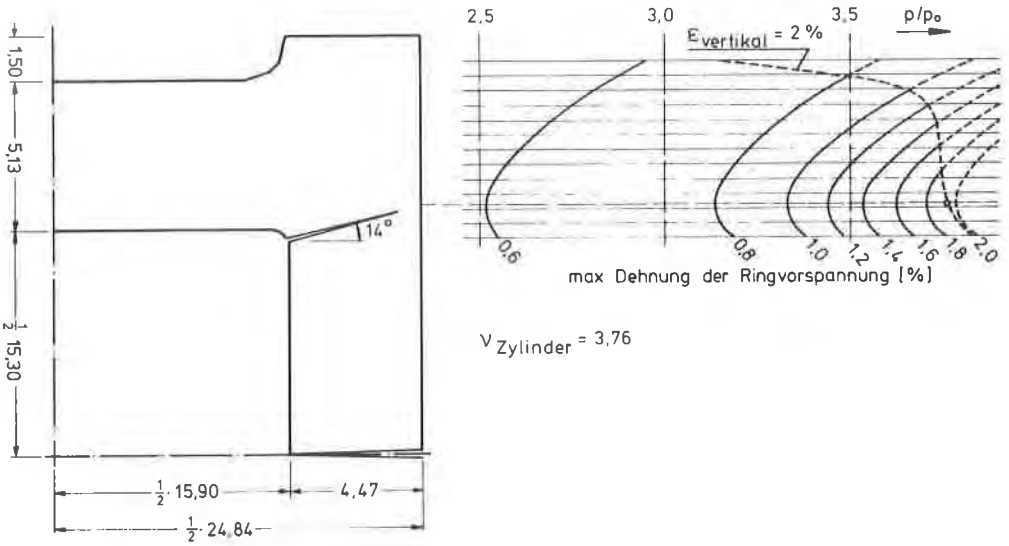


Bild 4 Maßgebende Bruchfuge zwischen Zylinder und Abschlußplatte bei Annahme eines Risses in Behältermitte, Beispiel: THTR-Prototyp

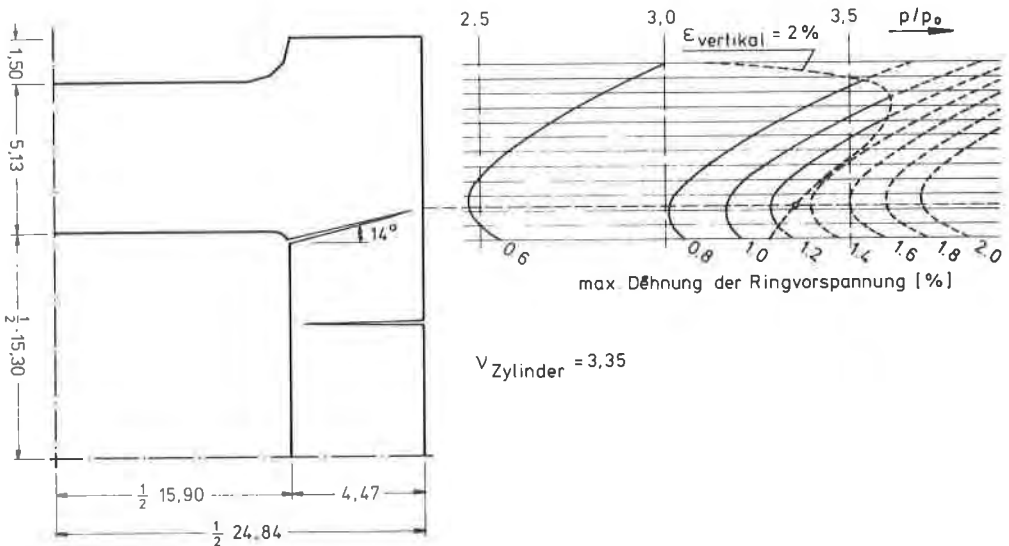


Bild 5 Maßgebende Bruchfuge zwischen Zylinder und Abschlußplatte bei Annahme von Rissen jeweils im Bereich von Durchbrüchen, Beispiel: THTR-Prototyp

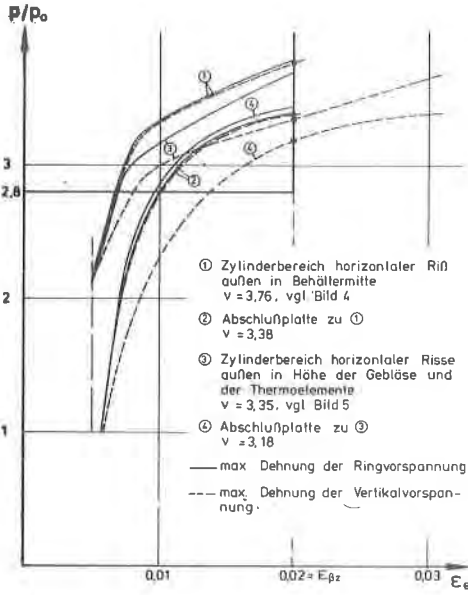


Bild 6 Dehnung des Spannstahls in Abhängigkeit vom Innendruck, Beispiel: THTR-Prototyp

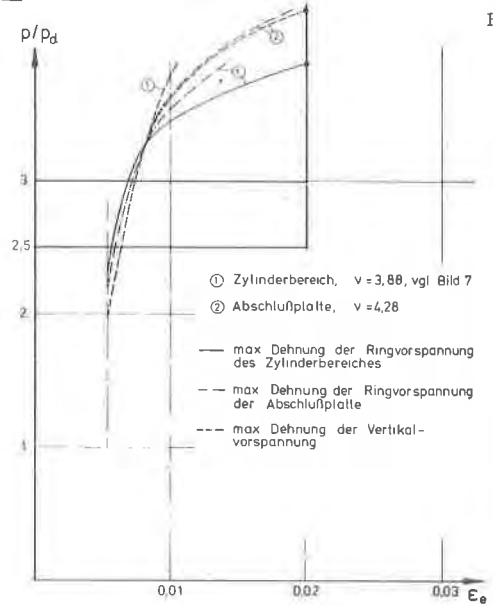
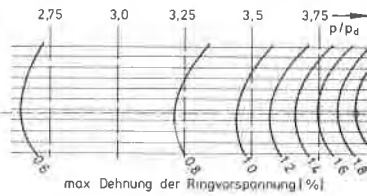
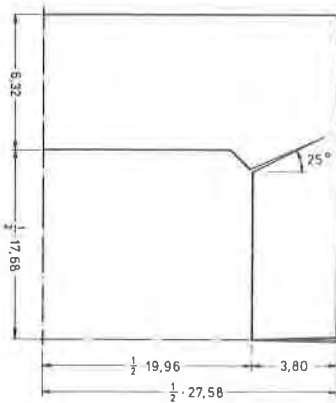


Bild 8 Dehnung des Spannstahls in Abhängigkeit vom Innendruck, Beispiel: Dungeness B



$\nu_{\text{Zylinder}} = 3.88$

Bild 7 Maßgebende Bruchfuge zwischen Zylinder und Abschlußplatte, Beispiel: Dungeness B

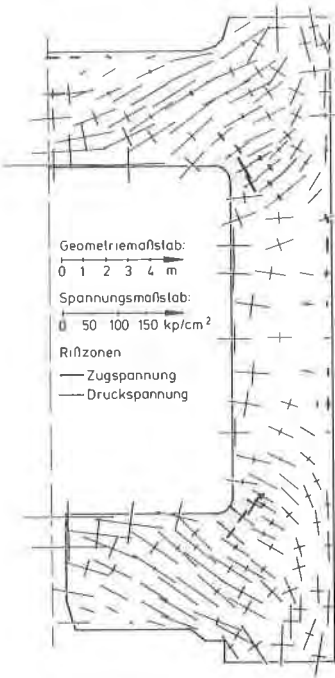


Bild 9 Rißbildung (kleiner Rißbereich) bei 1,6-fachem Betriebsdruck, Beispiel: THTR-Prototyp

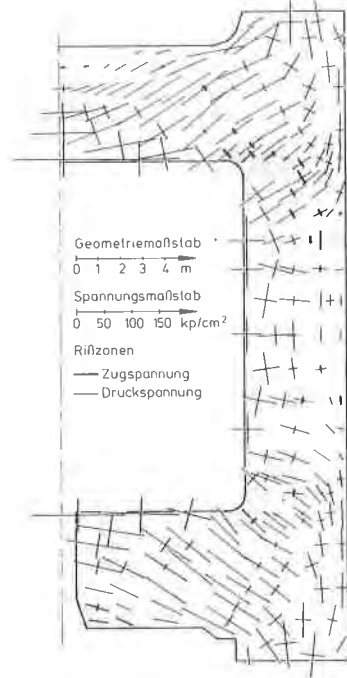


Bild 10 Rißbildung (großer Rißbereich) bei 1,6-fachem Betriebsdruck, Beispiel: THTR-Prototyp

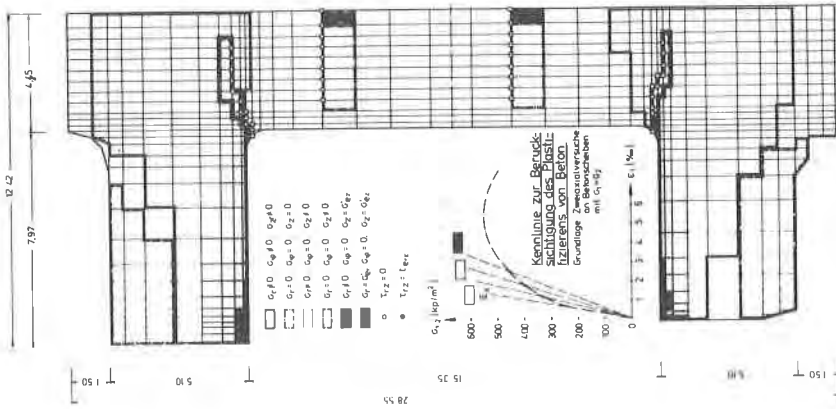


Bild 11 Kontinuumsberechnung zu Bruchmodellen, Tragverhalten von Beton und schlaffer Bewehrung bei $p = 2,8 p_0$, Beispiel: THTR-Prototyp

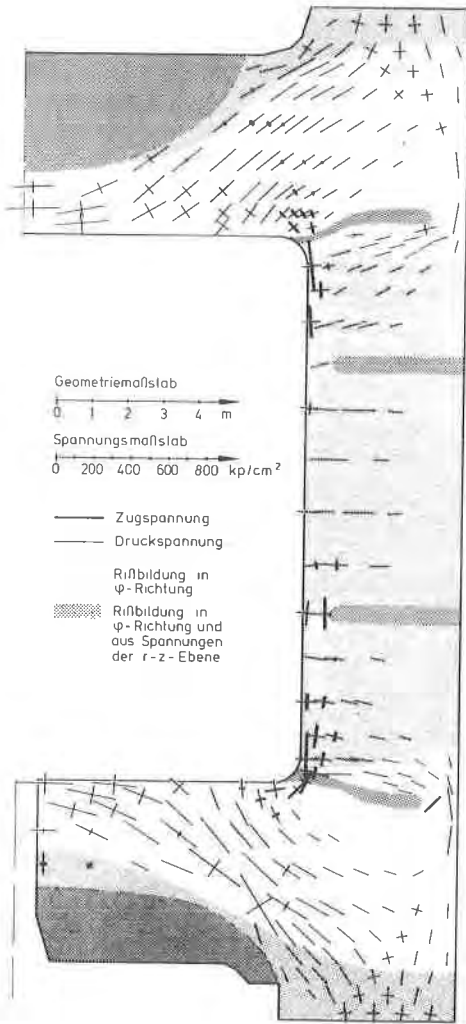


Bild 12 Kontinuumsberechnung zu Bruchmodellen, Hauptspannungen der r-z-Ebene bei $p = 2,8 p_0$, Beispiel: THTR-Prototyp

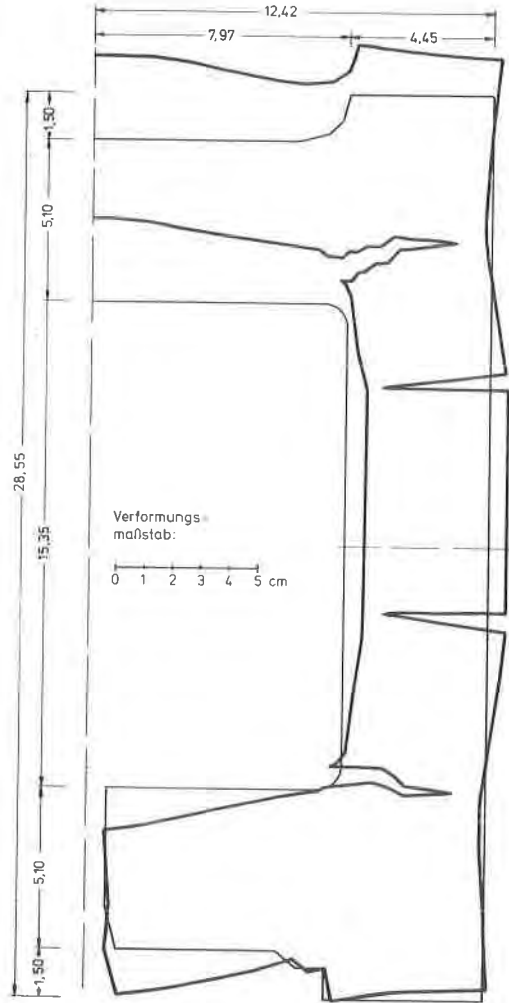


Bild 13 Kontinuumsberechnung zu Bruchmodellen, Verformungszustand bei $p = 2,8 p_0$, Beispiel: THTR-Prototyp