

## DER SPANNBETONBEHÄLTER DES THTR-300-MWe-PROTOTYP-KERNKRAFTWERKES

H. LOTZ, H.-G. SCHWIERS, J. SCHÖNING,

*Technische und physikalische Abteilungen,  
Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Mannheim, Germany*

### ABSTRACT

The first prestressed concrete pressure vessel for a nuclear plant in Germany will be constructed for the THTR-300 MWe-power plant.

The paper gives information on the design and the calculations of the p.c.p.v. and its components, the liner, the cooling system, and the insulation.

#### 1. ALLGEMEINES

Der Druckbehälter für das THTR-300 MWe-Kernkraftwerk in Schmehausen wird als Spannbetonbehälter (SBB) ausgeführt.

Der SBB ist ein wesentlicher Bestandteil des Gesamtkraftwerkes, da er viele Teilfunktionen erfüllt. So ist er nicht nur ein Druckgefäß für das Core, sondern durch die integrierte Bauweise auch Aufnahme- und Abschaltanraum für die Primärkomponenten Gebläse, Dampferzeuger und Abschaltanlage. Er wirkt als Abschirmung und fungiert wegen seiner hervorragenden Sicherheitseigenschaften und der spezifischen Gestaltung der Verschlüsse als Sicherheitsbehälter. Dadurch ist ein zusätzliches Containment nicht erforderlich. Diese Merkmale und die Anforderung nach Ausbaubarkeit der Primärkomponenten bestimmen die Form und Ausführung des SBB.

#### 2. BESCHREIBUNG DES SPANNBETONBEHÄLTERS

Der SBB hat die Form eines stehenden Zylinders mit ebenem Boden und Deckel und ähnelt damit in seiner Form den in Frankreich, England und USA ausgeführten Spannbetonbehältern (Abb.1). Seine Hauptauslegungsdaten sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Der Behälterinnendruck wird vom Spannbeton aufgenommen. Hierzu wird der

Beton mit Spanngliedern vorgespannt. Da die Vorspannung nicht für alle Lastfälle an jeder Stelle Zugspannungen ausschließt, werden verbleibende Zugspannungen von schlaffer Bewehrung aufgenommen.

Tabelle 1

AUSLEGUNGSDATEN

Lichter Durchmesser	15,90 m (Innenkante Liner)
Lichte Höhe	15,30 m (Innenkante Liner)
Betondicke der zyl. Wand	4,45 m ohne Lisenen
Betondicke der Böden	5,10 m
Ausrundung der Vouten	0,73 m (Innenkante Liner)
Betriebsdruck	40 ata
Evakuierter Behälter	1 torr
Prüfdruck (= Auslegungsdruck)	47 ata
max. Druckänderungsgeschwindigkeiten	
Druckanstieg	+ 0,045 atm/sec
Druckabfall	- 0,032 atm/sec
Mittl. Betontemperatur am Liner	ca. 45 °C
Lufttemperatur entlang der äußeren Oberfläche des Behälters	24 °C imMittel
Kühlgastemperatur	
im Normalbetrieb	260 °C
kurzfristig bei Störfällen	300 °C
Temperaturänderungsgeschwindigkeit des Kühlgases	10 °C/min

Die Gasdichtigkeit wird durch eine an der Innenseite des Behälters befestigte Stahlauskleidung erzielt. An der Behälterinnenseite des Liners ist eine Isolierung und betonseitig ein Kühlrohrsystem angebracht. Hierdurch werden einerseits die Wärmeverluste begrenzt und andererseits der Beton vor zu hohen Temperaturen geschützt; gleichzeitig werden damit große Temperaturgradienten vermieden. An der Außenseite des Behälters ist eine Luftführungswand angebracht, die dafür sorgt, daß die Außentemperatur des Behälters nahezu konstant bleibt.

Die Durchführungen des Behälters werden mit Panzerrohren ausgekleidet. Diese Panzerrohre sind mit dem Liner verschweißt und bilden zusammen mit den Behälterabschlüssen eine geschlossene gasdichte und - soweit sie aus dem Behälter herausragen - druckfeste Auskleidung.

Für die Behälterabschlüsse wird eine Doppelabschlußkonstruktion zugrunde gelegt, wobei zwei Ausführungsmöglichkeiten zur Anwendung kommen:

1. Zwei unabhängig voneinander angeordnete Deckel
2. Ein Abschlußdeckel mit vorgeschalteter Durchflußbegrenzung

Der Behälter wird über eine Ringwand auf der Fundamentplatte abgestützt. Elastomere Lager zwischen Ringwand und Behälter ermöglichen dem Behälter, Druck- und Temperaturschwankungen zu folgen.

Das Behälterverhalten wird durch eine Vielzahl von Meßwertaufnehmern erfaßt, die im Betonkörper, am Liner, an den Behälterabschlüssen und in der Isolierung angeordnet werden. Es sind insgesamt 560 Temperaturmessungen, 640 Dehnungsmessungen mittels Dehnungsmeßstreifen, 250 Dehnungsmessungen mittels Saitendehnungsgebern und 30 für Kraftmessungen an den Spannkabeln vorgesehen. Teilweise werden Messungen bereits während der Montage durchgeführt.

### 3. BETONTEIL

#### 3.1 Technische Einzelheiten

Die Behälterinnenabmessungen sind durch die Primärkomponenten vorgegeben. Bei gleichem Innenraumvolumen wäre ein kleinerer Durchmesser und eine größere Höhe sicherlich wirtschaftlicher, jedoch wäre dann die Anordnung der austauschbaren Dampferzeuger, z.B. oberhalb oder unterhalb des Cores mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden gewesen.

Zur Vorspannung werden vertikale Kabel und horizontale Ringkabel nach dem BBRV-System verwendet. Letztere sind im zylindrischen Bereich 6-fach, im Bereich der Deckel 9-fach je Lage angeordnet. Sie sind je um  $90^\circ$  in einer Ringspanneinheit versetzt und werden an der Außenseite des Zylinders in Lisenen verankert. Jedes Spannkabel hat 145 Einzeldrähte von 7 mm Durchmesser. Als Material ist ein Spannstahl St 145/160 vorgesehen, was einer zulässigen Spannkraft von ca. 690 t oder einer Bruchlast von 890 t je Kabel entspricht. Das Gesamtgewicht der Spannkabel beträgt ca. 1650 t.

Zur Aufnahme von örtlichen Zugspannungen im Beton werden im Mittel ca. 40 kg Bewehrung je  $m^3$  eingebaut. Diese wird an der inneren und äußeren Oberfläche, in der Nähe von Durchführungen und im Übergangsbereich von Zylinderwand und Deckel angeordnet. Insgesamt sind es ca. 400 t.

Der Beton des Behälters besteht aus kalzitischen Zuschlägen, um einen geringen Temperaturausdehnungskoeffizienten von  $\alpha_t = 0,75 \cdot 10^{-5}$  zu erzielen und um damit die Temperaturspannungen möglichst klein zu halten. Die angestrebte einachsiale Zylinderdruckfestigkeit beträgt nach 90 Tagen  $\beta_{c,90} = 460 \text{ kp/cm}^2$ .

#### 3.2 Berechnung des Behälters

Der Behälter ist für zwei verschiedene Stadien zu berechnen: Einmal muß nachgewiesen werden, daß der Behälter in allen Gebrauchszuständen keine unzulässigen Spannungen erfährt, zum anderen muß ein Nachweis des Grenztragverhaltens geführt werden.

### 3.2.1 Gebrauchszustände

In den Gebrauchszuständen werden alle denkbaren Betriebs- und Störfälle zusammengefaßt. Die Berechnungen selbst werden mit speziellen Rechenprogrammen durchgeführt, die auf der Methode der finite Elemente oder der dynamischen Relaxation beruhen. Es werden dabei verschiedene Programmtypen verwendet. Während die allgemeinen Berechnungen mit rotationssymmetrischen Programmen durchgeführt werden, kann für Detailrechnungen wie z. B. Untersuchungen von Durchführungen auf dreidimensionale Programme zurückgegriffen werden. Der Einfluß der Durchführungen wird in den rotationssymmetrischen Berechnungen durch modifizierte Materialannahmen erfaßt, die aus Nebenbetrachtungen gewonnen werden.

Die Berechnungen müssen für verschiedene Zeitpunkte durchgeführt werden, da Spannbetonbehälter - im Gegensatz zu Stahlbehältern - zeitlich veränderliche Eigenschaften besitzen, die durch das Schwinden und Kriechen des Betons bedingt sind. Die Belastungsgeschichte muß also beim Spannbetonbehälter berücksichtigt werden.

Die für die Dimensionierung bestimmten Lastfälle sind u.a.

- die Vorspannung nach ihrem Aufbringen,
- die Druckprobe mit einem 1,1-fachen Störfalldruck,
- der Normalbetrieb, jeweils zum Beginn und zum Ende der Betriebszeit,
- der Störfall, jeweils zum Beginn und zum Ende der Betriebszeit,
- der "heiße", drucklose Behälter jeweils zum Beginn und zum Ende der Betriebszeit.

Der Betriebszeitraum ist auf 30 Jahre ausgelegt. Die Berechnungen werden hauptsächlich mit linear-elastischen Materialannahmen durchgeführt. Das Kriechen des Betons läßt sich durch eine viscoelastische Berechnung erfassen durch Verwendung entsprechend modifizierter Materialangaben, wie z.B.

$$E(t) = \frac{E_0}{1 + \psi(t)}, \text{ wobei } E(t) \text{ den rechnerischen, fiktiven Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt } t, E_0 \text{ den ursprünglichen, tatsächlichen Wert und } \psi(t) \text{ die Kriechzahl zum Zeitpunkt } t \text{ bei Berücksichtigung der Temperatur und der Belastungsverhältnisse bedeutet.}$$

Die Berechnungen liefern die Spannungs- und Verformungszustände, wobei den letzteren besondere Bedeutung für die Auslegung der Primärkomponenten zukommt.

Die zulässigen Betonspannungen wurden gegenüber den in den DIN-Normen festgelegten Werten verändert. Die DIN-Normen sind aufgestellt worden für Bauwerke, die nach idealisierenden Theorien der Flächen- und Balken-tragwerke berechnet werden, die hauptsächlich also auch nur für ein- und

zweidimensionale Spannungszustände gelten. Die zulässigen Spannungen konnten daher von der einachsialen Betonfestigkeit abgeleitet werden. Demgegenüber handelt es sich beim Spannbeton-Reaktordruckbehälter wegen seiner dicken Wände und Decken um ein dreidimensionales Tragwerk, bei dem der Spannungs- und Verformungszustand auch dreidimensional berechnet wird. Die dabei dann zu berücksichtigende mehrachsiale Betonfestigkeit kann sich beträchtlich von der einachsialen Betonfestigkeit unterscheiden, so steigt sie z.B. bei allseitigem Druck sehr stark an. Dazu kommt, daß es sich bei Spannbetonbehältern um Bauwerke handelt, die von der Belastung und der Konstruktion her als genauer erfaßbar anzusehen sind als übliche Bauwerke. Es war daher sinnvoll, für den Spannbetonbehälter besondere Vorschriften zu erlassen.

Die dreiachsiale Betonfestigkeit wird durch die Größe der drei Hauptspannungen und deren Verhältnis zueinander bestimmt. Die Betonspannungen werden demzufolge über ihre Hauptspannungen beurteilt. Als zulässig gilt in Normalbereichen ein Hauptspannungsverhältnis mit einem Sicherheitsabstand von 1,5 zur dreiachsialen Betonfestigkeit. Aus ähnlichen Gründen wurden auch andere Spannungen für die Spannglieder zugelassen, die über den Werten der DIN 4227 liegen. Für die Betriebslastfälle wurde festgesetzt

$$\begin{aligned} \text{zul } \sigma_z &\leq 0,5 \beta_s \\ &\leq 0,7 \beta_z. \end{aligned}$$

Wenn diese Erhöhung gegenüber der DIN 4227 jedoch voll ausgenutzt werden soll, muß die Relaxation des Spannstahles bei den Spannungsnachweisen berücksichtigt werden.

### 3.2.2 Grenzzustände

Die Sicherheit des Behälters muß nachgewiesen werden als Sicherheit der Dichtigkeit und als Sicherheit der tragenden Konstruktion. Das geschieht einmal durch den Nachweis der Linerintegrität, zum anderen durch den Nachweis der Grenztragfähigkeit des Spannbetonbehälters.

Der Nachweis der Linerintegrität bei dem 1,5-fachen Betriebsdruck oder dem 1,6-fachen Störfalldruck ist in der Geschichte der Berechnung von Spannbetonbehältern neu. Er scheint jedoch wegen der hervorragenden Bedeutung eines integren Liners für das Betriebs- oder Überlastverhalten des SBH gerechtfertigt. Der 1,4-fache Abstand zum Betriebsdruck stellt in etwa den Bereich dar, in dem sich der Behälter noch elastisch verhält. Es wird daher nach den gleichen Methoden wie für den Gebrauchszustand gerechnet. Sollte aufgrund der Spannungsanalyse mit Rissen im Beton zu rechnen sein, so werden die betreffenden Bereiche derart mit schlaffer Bewehrung versehen, daß von ihr die gesamten Zugspannungen abgedeckt werden.

Beim Nachweis der Grenztragfähigkeit des Spannbetonbehälters wird der Liner aus der Betrachtung ausgeklammert. Er wird als vollkommen dicht angesehen, so daß mit "pressurized cracks" nicht zu rechnen ist.

Die Sicherheit wird nach einem Überlastungsfaktor für einen hypothetischen Innendruck bewertet. Ein erhöhter Temperaturgradient im Beton ist dagegen von untergeordnetem Einfluß auf die Sicherheitsbetrachtung des Behälters. Infolge von Temperaturgradienten ändert sich zwar die Spannungsverteilung im Beton, das Integral der Spannungen in einer Querschnittsfläche bleibt jedoch davon unbeeinflusst, so daß das Kräftegleichgewicht zwischen dem Innendruck und der Vorspannung durch die Temperatur nicht verschoben wird. Es ist z. Zt. noch kein Verfahren entwickelt worden, mit dem die Bestimmung der Grenztragfähigkeit eindeutig und widerspruchsfrei vorgenommen werden kann. Die Schwierigkeiten liegen dabei weniger bei den zur Verfügung stehenden Rechenmethoden und Rechenprogrammen. Es sind dreidimensionale Rechenprogramme vorhanden, die sich mit entsprechendem Aufwand sicherlich auf eine Reiß-Bruch-Berechnung erweitern lassen. Das Problem liegt vielmehr hauptsächlich in den Annahmen für das Materialverhalten begründet. Die Kenntnisse über die Zusammenhänge, die beim Beton einschließlich seiner Bewehrung bei dreiaxialen Beanspruchungen zu Rissen und zum Bruch führen, fehlen teilweise völlig, teilweise liegen nur sehr wenige vereinzelte Versuchsergebnisse vor. Eine aussagekräftige dreidimensionale Reiß-Bruch-Berechnung ist deshalb noch nicht möglich.

Man ist deshalb auf Näherungsmethoden angewiesen. Eine davon ist die Methode der kinematischen Kette. Dabei wird von dem Modell ausgegangen, daß der Behälter in einzelne Betonblöcke aufreißt, die in sich als völlig starr angesehen werden und miteinander über Beton-Fließgelenke verbunden sind (Abb.2). Es lassen sich dann Gleichgewichtsbedingungen anschreiben, die Aussagen über eine mögliche Steigerung des Innendruckes und damit die Bruchsicherheit ermöglichen. Die Temperatur wird bei dieser Betrachtung ebenso ausgeklammert wie Schwinden und Kriechen des Betons und die Relaxation des Spannstahles.

Die geforderten Sicherheitsfaktoren betragen hierbei für den Wandbereich 2,8 und für die Deckenplatte 3,4 bei voller Ausnutzung der Materialfestigkeiten. Der höhere Sicherheitsfaktor für die Decke soll ein evtl. Schubversagen desselben abdecken. Alternativ kann die Sicherheit der Decke über eine Gewölbebetrachtung ermittelt werden. Dafür gilt als Sicherheitsfaktor ein Wert von 3,0. Dabei dürfen die Betonspannungen  $\sigma = \beta_c$  und die Spannstahlspannungen  $\sigma_s = \beta_s$  nicht überschreiten.

Der Spannbetonbehälter ist bislang im Rahmen von Vordimensionierungsrechnungen untersucht worden. Dabei hat es sich gezeigt, daß die Konstruktion den an sie gestellten Erwartungen vollauf genügt. Bruchsicherheits-

berechnungen nach der Methode der kinematischen Kette erbrachten die geforderten Sicherheiten in den Decken, die Bruchsicherheiten der Wandbereiche wurden z.T. weit überschritten. Der Behälter wurde außerdem in mehreren Modellen untersucht, auf die an anderer Stelle besonders eingegangen wird (siehe Vortrag Meerwald H 5/5). Als Ergebnis dieser Untersuchung wurde u.a. bestätigt, daß beim Behälter des THTR durch die Durchführungen in den Decken praktisch keine Minderung der Tragfähigkeit zu erwarten ist.

#### 4. LINER

##### 4.1 Technische Beschreibung

Die Gasdichtheit des Behälters wird durch eine innere Stahlauskleidung, dem sogenannten Liner, gewährleistet. Außerdem dient der Liner als innere Schalung während des Betonierens als Befestigungselement für Isolierung und Kühlung sowie als Ausschnittsverstärkung bei großen Durchführungen durch die Betonwandungen. Seine Form ist durch die Abmessungen des SBB bestimmt. Er besteht aus einem stehenden Blechzylinder mit ebenen Böden, wobei die Verbindung von Boden und Decke zum zylindrischen Teil durch je ein torusförmiges Übergangsstück erfolgt. Die Linerwandstärken werden aus montagetechnischen Gründen unterschiedlich gewählt. (Zylinderwand  $t = 20$  mm; Boden  $t = 25$  mm, Decke  $t = 30$  mm).

Die Verankerung des Liners mit dem Beton geschieht mittels Bolzen von  $20$  mm  $\varnothing$ , die im Raster von  $200 \times 200$  mm bis  $300 \times 300$  mm an den Liner angeschweißt werden und somit die Verbindung zur druckaufnehmenden Komponente des Behälters darstellen. Da der Liner nun gezwungen ist, allen Verformungen des Betonkörpers zu folgen, wird beim THTR-300 als Material für den Liner ein alterungsbeständiger Feinkornstahl mit ca.  $29$  kp/mm<sup>2</sup> Streckgrenze,  $28$  % Dehnung und eine Kerbschlagzähigkeit nach JSOV bei  $0$  °C von  $7$  bzw.  $4$  kpm/cm verwendet. Abb. 3 zeigt eine isometr. Darstellung des Liners und gibt einen Überblick über die zahlreichen Panzerrohre in Boden, Wand und Decke.

##### 4.2 Montage

Der Schwerpunkt der Montage wird auf die Vorfertigung gelegt. Durch diese Maßnahme ist es außerdem möglich, den hohen Toleranzforderungen an den Liner - diese werden durch die einzelnen Komponenten der Reaktoreinbauten zum Teil bereits vorgegeben - gerecht zu werden.

Neben der Vorfertigung in der Werkstatt des Herstellers kann in der Reaktorhalle des Kraftwerkes auf einer direkt über dem SBB installierten Stahlbühne zu werkstattähnlichen Bedingungen Parallelfertigung durchgeführt werden, so daß sich die Montagearbeit auf der Baustelle auf das Zu-

sammenschweißen von möglichst großen Einheiten beschränkt.

Die Errichtung des Liners erfolgt in enger Verknüpfung mit den Betonierarbeiten, der Montage der Rohrliner sowie in Abstimmung mit den Montagearbeiten der Behältereinbauten. Nach Fertigstellung der Krananlagen in der Reaktorhalle wird auf der oben erwähnten Bühne mit der Vorfertigung des Linerbodens begonnen. Dieser wird als eine Einheit abgesenkt, mit den Rohrlinern verschweißt, wonach das Untergießen des Betons für den SBB-Boden beginnt.

Die Montage der Linerwand besteht aus dem Zusammenschweißen von 12 vertikalen Segmenten, die mit Kühlrohren versehen von der Werkstatt angeliefert werden. Das hierbei erforderliche Stützgerüst ist so ausgebildet, daß einerseits der durch das Betonieren der Zylinderwand entstehende Betonseitendruck aufgenommen werden kann, andererseits die Arbeiten im Innern des Behälters durch das Gerüst nicht behindert werden. Wegen der beschränkten Krankapazität wird die Montage des Linerdeckels in 3 Etappen durchgeführt.

Nach beendeter Vorfertigung eines äußeren Ringes wird dieser als Einheit abgesenkt, auf ein Stützgerüst aufgelagert und mit der Voute verschweißt, wonach die analogen Schritte mit dem inneren Teil des Deckels mit bereits montierten Panzerrohren erfolgen. In Parallelarbeit hierzu werden die ersten der 6 Panzerrohre für die DE abgesenkt, gerichtet und an die Stützen angeschweißt.

Durch sorgfältige Abstimmung dieser Montagephasen, die wiederum Eckergebnisse für die Betonierarbeiten sowie Errichtungsfähigkeit der Behältereinbauten darstellen, ist es möglich, die Termine des Gesamtbaublaufs auf ein Minimum zu beschränken.

#### 4.3 Auslegung und Berechnung

Die Berechnung des Liners beschränkt sich auf zwei wesentliche Kriterien.

1. Bestimmung der Spannungs- und Dehnungsverteilung im idealen störungsfreien homogenen Liner. Ausgangspunkt der Berechnung ist die Annahme, daß durch die Verankerung von Liner und Beton, dem Liner vom Betonbehälter Verformungen aufgezwungen werden. Zusätzliche Belastungen erfolgen durch die beim Betrieb hervorgerufene Erwärmung gegenüber dem Montagezustand aufgrund der behinderten freien Ausdehnungsmöglichkeit des Liners.
2. In Überlagerung zu 1 Bestimmung der Spannungen und Dehnungen, die auf das nichtideale Verhalten des Liners zurückzuführen sind. Die Ursache entstehender Zusatzkräfte ist auf folgende Faktoren zurückzuführen:



- a) Konstruktiv bedingte Waddickenunterschiede
- b) Waddickenunterschiede innerhalb der Walztoleranzen
- c) Unterschiedliche physikalische Eigenschaften des Stahls
- d) Unstetigkeitsstellen, hervorgerufen durch die Geometrie des Behälters
- e) Fertigungs- und montagebedingte Unebenheiten im Blech
- f) Störstellen im Liner (bedingt z.B. durch die zahlreichen Öffnungen)

Die Summierung aller Beanspruchungen führt zu dem für den Nachweis der Sicherheit maßgebenden Lastfall, wobei die Bolzen durch das unterschiedliche Dehnverhalten des Liners auf Schub beansprucht werden.

Die teilweise hohen Dehnungen an der Betoninnenseite sowie die im Vergleich zur Linerstärke geringen Bolzenanstände fordern neben Untersuchungen im Rahmen der Elastizitätstheorie eingehend Kenntnis über das Verhalten der Linerbleche im elasto-plastischen Bereich.

Ausgangspunkt der Berechnungen ist eine experimentell gewonnene Kurve für den einaxialen Fall, die den Verlauf der Druckspannungen bezogen auf die relativen Verschiebungen für den verwendeten Stahl darstellt und die Festlegung einer Kurve der zweiaxialen Verformungsspannung ermöglicht. Abb. 4 zeigt die kritischen Beulspannungen bezogen auf das Verhältnis Bolzenabstand: Linerdecke für den ein- und zweiaxialen Fall.

Die Erfahrung zeigt, daß keine Beulen mehr auftreten, wenn das Verhältnis Bolzenabstand/Linerdicke kleiner als 15 ist. Das gleiche gilt analog, wenn der entsprechende Punkt im plastischen Bereich liegt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß man es wie bereits erwähnt, bei der Berechnung des Liners mit kurzen Teilen zu tun hat, die den klassischen Hypothesen der Elastizitätstheorie nicht mehr entsprechen. Für den elasto-plastischen Bereich ist man daher gezwungen, einen reduzierten Elastizitätsmodul zu definieren, welcher in den Berechnungen anstelle des E-Moduls zu verwenden ist.

Bei Ausdehnung obiger Berechnungen auf Bleche mit Ursprungsfehlern kommt man zu dem Ergebnis, daß bei gleicher Verformung ein Blech ohne Ursprungsfehler einer höheren Spannung ausgesetzt werden kann, als das selbe Blech mit Fehlern.

Für die Berechnung der Linerverankerung wird ein Rechenschema verwendet, das die Gesamtheit Verankerung - Liner - Beton als ein System von Federn und Knotenpunkten betrachtet. Da die Bolzen elastisch im Beton eingebettet sind, ist es erforderlich, eine Kurve experimentell zu ermitteln, die die Scherkraft als Funktion der Zwangsverschiebung der Verankerung darstellt.

Bei der Bemessung der Bolzen wird davon ausgegangen, daß 2 innerhalb der Walztoleranzen mit Extremwerten behaftete Bleche aneinanderstoßen, wobei das "dicke" Blech eben, das "dünnere" mit einer Unebenheit versehen angenommen wird, diese Bleche sich außerdem im Bereich der größten betonseitigen Dehnungsgradienten befinden. Die Reibung zwischen Liner und Beton wird dabei vernachlässigt.

## 5. WÄRMESCHUTZSYSTEM

Die spezifischen physikalischen Eigenschaften des Baustoffs Beton lassen nur begrenzte Betriebstemperaturen zu. Eine weitere Einschränkung in thermischer Hinsicht bewirken die für die Geometrie und Konstruktion des SBB zulässigen Wärmespannungen. Aus diesen Gründen ist ein Wärmeschutzsystem für den SBB erforderlich, das in den Wänden das Temperaturgefälle auf 20 bis 25 °C beschränkt und an der inneren SBB-Oberfläche eine mittlere Temperatur von 40 bis 45 °C bewirkt. Darüber hinaus sind lokale Temperaturspitzen bis zu ca. 80 °C zulässig.

Diese thermischen Bedingungen werden von einem Wärmeschutzsystem aufrechterhalten, das nach einem klassischen Konzept ausgeführt wird, wobei sich eine Isolierung auf der Innenseite des Liners befindet und ein Kühlsystem auf der Außenseite des Liners im Beton eingebettet angebracht ist. Abb. 5 zeigt einen Schnitt durch das System, Isolierung, Liner, Kühlung.

### 5.1 Isolierung

Auf der Innenseite des Liners befindet sich eine metallische Isolierung, bei der Metallfolien abwechselnd mit geeigneten Abstandhaltern zur notwendigen Isolierungsdicke aufeinander geschichtet werden. Um eine möglichst gute Isolierwirkung zu erzielen, ist die Größe der Hohlräume in der Isolierung so auf die physikalischen Eigenschaften des Kühlgases abgestimmt, daß die natürliche Konvektion, die normalerweise zwischen den Wänden mit unterschiedlicher Temperatur entsteht, optimal eingeschränkt wird. Abgedeckt wird die Isolierung von etwa 500 x 500 mm großen Platten von ca. 5 mm Dicke. Auf je eine Ecke dieser Abdeckplatten ist eine kleine quadratische Platte aufgeschweißt, die sich mit den Ecken der drei benachbarten Abdeckplatten überlappt. Durch jede dieser Eckplatten ragt ein ca. 14 mm dicker auf den Liner aufgeschweißter Bolzen, der die Isolierung gegen den Liner preßt. Versagt einer dieser Bolzen, so kann die betreffende Abdeckplatte dennoch nicht aus dem Isolierungsverband herausfallen, da sie noch von den Eckplatten dreier benachbarter Abdeckplatten gehalten wird.

Das hier beschriebene System ist das Grundsystem für ungestörte Linerbereiche. In gestörten Bereichen (z.B. Decke oder in der Nähe von

Durchbrüchen) wird dieses System entsprechend den lokalen Erfordernissen abgewandelt.

## 5.2 Kühlsystem

Das Kühlsystem wird von Rohren ( $33,7 \text{ } \varnothing \times 3,2$ ) gebildet, die von außen direkt auf den Liner bzw. auf die Panzerrohre der Durchführungen geschweißt sind. Die Wirksamkeit und der Einfluß der Ausführung der Schweißnähte wurde in Versuchen ermittelt.

Aus Sicherheitsgründen werden alle Oberflächen stets von zwei getrennten, voneinander unabhängigen Kühlsystemen gekühlt. In der Ausführung sieht das so aus, daß von beiden Systemen immer abwechselnd Kühlrohre nebeneinander verlegt sind. Fällt ein System aus, so bedeutet das für den betroffenen Bereich nur eine Verdoppelung des Kühlrohrabstandes. Die Strömungsrichtung in benachbarten Kühlrohren ist entgegengerichtet, so daß die Aufheizung des Kühlwassers in den Kühlrohren in gewisser Weise kompensiert wird.

An einigen Stellen weicht die Ausführung des Kühlsystems vom normalen System ab. Abb. 6 zeigt den Übergang vom Bodenliner zum Kugelabzugsrohr. Weil die Ecken durch Kühlrohre schlecht zu erreichen sind, sind an derartigen Stellen Wasserkammern vorgesehen. Diese Wasserkammern gehören zum Kühlsystem des entsprechenden Panzerrohres.

Damit im Falle einer Störung jedes Kühlrohr überprüft werden kann, werden die Kühlrohre einzeln aus dem SBB herausgeführt und erst dort in Sammlern (etwa 7 Rohre pro Sammler) zusammengefaßt.

Beim Kühlsystem des THTR-300 können vier Bereiche unterschieden werden:

1. Zylindrischer Teil des SBB
2. Boden des SBB
3. Decke des SBB
4. Panzerrohre

Hierbei sind die Panzerrohre noch einmal je nach örtlicher Lage in vier Gruppen unterteilt.

Ein Prinzipbild der Liner Kühlung zeigt Abb.7. Man erkennt die getrennten Systeme für Boden, Zylinder und Decke.

## 5.3 Auslegung und Berechnung

Die für die Auslegung des Wärmeschutzsystems erforderlichen Randbedingungen sind eng mit den anschließenden Komponenten wie Beton und Liner

verknüpft.

Um zu hohe Temperatur-Gradienten in den Betonwänden zu vermeiden, wird eine mittlere Linertemperatur von ca.  $40^{\circ}\text{C}$  bei Funktionstüchtigkeit beider Systeme angestrebt. Eine weitere Randbedingung ist durch die Begrenzung des zulässigen Wärmeverlustes auf  $1000\text{ W/m}^2$  vorgesehen. Dieser Wert leitet sich aus Optimalisierungsberechnungen für die Betriebskosten ab. Durch die Festlegung dieser Parameter wird eine wesentliche Einschränkung der konstruktiven Variationsmöglichkeit der einzelnen Komponenten des Wärmeschutzsystems bewirkt. Dies soll durch einige Diagramme verdeutlicht werden.

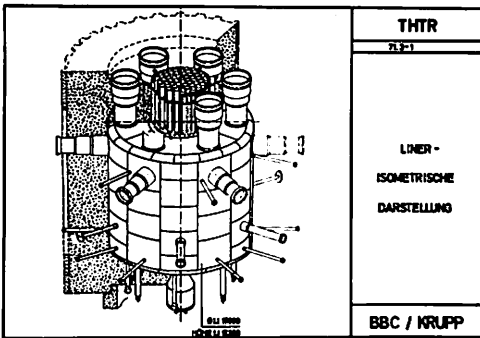
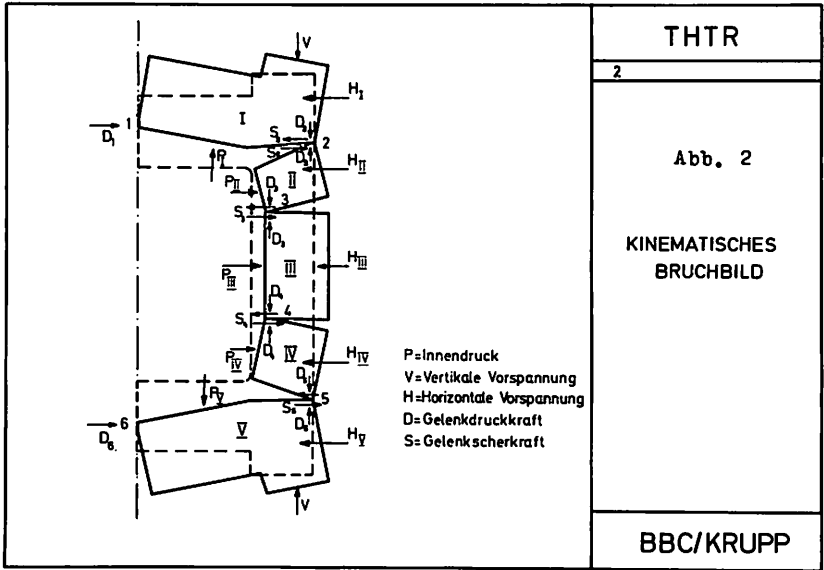
In Abb. 8 ist der Zusammenhang zwischen Kühlrohrabstand und Isolierungsdicke für eine mittlere Linertemperatur von  $40$  bzw.  $45^{\circ}\text{C}$  dargestellt. Das Diagramm zeigt, daß die Temperatur sowohl durch eine dünne Isolierung mit eng verlegten Kühlrohren als auch durch eine dicke Isolierungsschicht mit in größeren Abständen verlegten Rohren erreicht werden kann.

Aus dem Diagramm der Abb. 9 ist die zu dem vorher gezeigten Zusammenhang zwischen Isolierungsdicke und Kühlrohrabstand gehörige Wärmestromdichte ersichtlich.

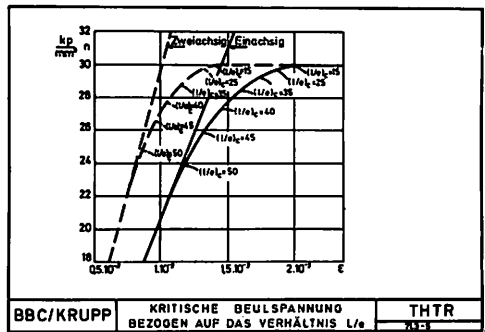
Bei Beschränkung des Wärmeverlustes auf  $1000\text{ W/m}^2$  sowie der mittleren Linertemperatur auf ca.  $40$  ergibt sich hieraus ein Kühlrohrabstand von ca.  $150\text{ mm}$  bei einer entsprechenden Isolierungsdicke von  $70\text{ mm}$ . Bei Ausfall eines Kühlsystems, d.h. bei Verdoppelung des Kühlrohrabstandes von  $150$  auf  $300\text{ mm}$ , ist mit einem Ansteigen der mittleren Linertemperatur auf einen Wert knapp über  $45^{\circ}\text{C}$  zu rechnen.

Die Geschwindigkeit des Kühlwassers beträgt  $1\text{ m/sec}$ , dabei heizt sich das Kühlwasser um ca.  $2^{\circ}\text{C}$  auf.





**Abb.3**



**Abb.4**

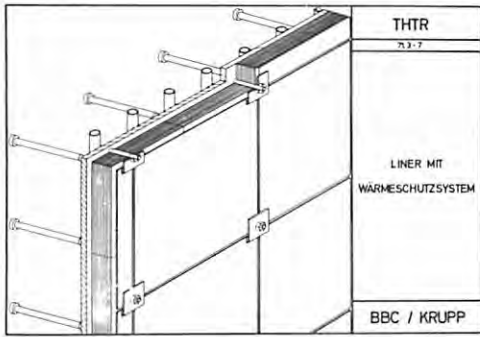


Abb.5

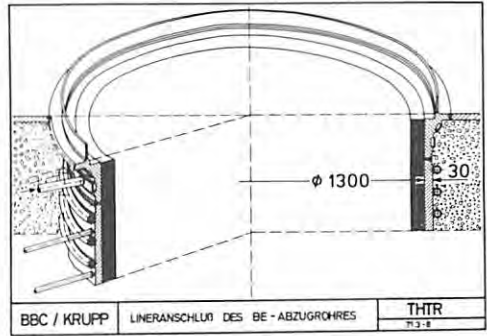


Abb.6

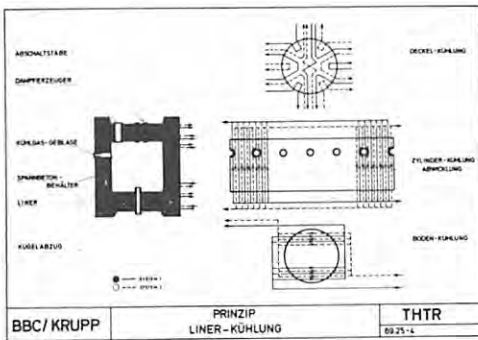


Abb.7

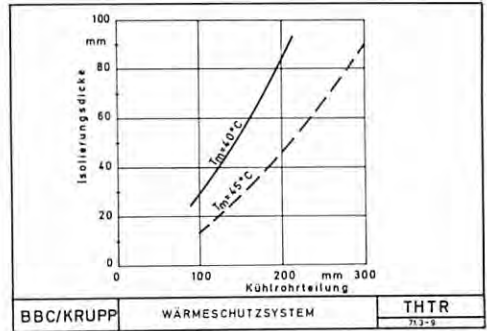


Abb.8

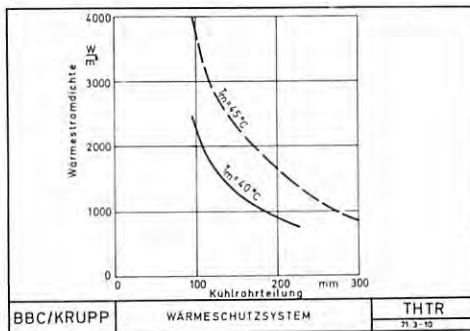


Abb.9

DISCUSSION

Q

D. LANGAN, U. K.

Could you explain what ultimate load analysis you did, particularly the assumptions made for the end caps and how did the results compare with your model tests ?

A

H. G. SCHWIERS, Germany

For ultimate load analysis of caps we used inverted dome analysis. In model-tests we found a good correlation between theoretical calculations and test results. Please look at paper H 5/5 of Mr. Meerwald.

Q

R. D. BROWNE, U. K.

Could you please explain how in your visco-elastic analysis method, you handled the effect of sustained and transient temperature throughout the life of the vessel ?

A

H. G. SCHWIERS, Germany

Die stationären und instationären Temperaturen und ihre Verteilung werden in Zeitabschnitten erfasst und durch entsprechende Variation der E-Module in der Rechnung berücksichtigt.