

REAKTORDRUCKBEHÄLTER AUS SPANNBETON MIT HEISSER DICHTHAUT

J. NÉMET,

*Reaktorbau Forschungs- und Baugesellschaft mbH & Co.,
Seibersdorf, Austria*

ABSTRACT

Prestressed concrete reactor vessels designed and built up to now have a cold steel liner and a thermal insulation covering the liner from inside and penetrated by the reactor coolant. Failures of the liner especially due to failures of the insulation cannot be easily detected and repaired. Inspections of the liner during the reactor lifetime desirable from safety considerations are not possible.

To overcome this drawback a new reactor vessel concept has been designed based on the use of a hot liner in direct contact with the reactor coolant at core entrance temperature. The thermal insulation is placed between the liner and the prestressed concrete structure. Thus the liner is accessible for inspection and repair.

In order to keep low the stress amplitude in the liner at each temperature cycle, the prestressed concrete structure is kept at an elevated temperature level.

The hot liner concept leads to technological problems yet to be solved, e.g. temperature and stress cycling of the liner and elevated temperatures of the prestressed concrete.

To explore these problems and to show the feasibility and reliability of the hot liner concept a large scale model vessel (internal pressure 100 at, liner temperature 300°C) has been designed and built at the Reactor Centre Seibersdorf. The necessary preliminary investigations are covering the development of suitable concrete, insulation, liner materials, welding and anchoring procedures and concrete instrumentation for elevated temperatures.

1. EINLEITUNG

Spannbetondruckbehälter wurden bisher für gasgekühlte Reaktoren eingesetzt. Gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren und schnelle Brüter werden ebenfalls mit Spannbetonbehältern konzipiert. Die Verwendbarkeit solcher Druckbehälter für Wasserreaktoren hängt allerdings von einer befriedigenden Lösung des Problems der Wärmedämmung und Kühlung, sowie von der Möglichkeit der Inspektion der für die Betriebssicherheit wesentlichen Bestandteile des Behälters ab. Im Rahmen des Projektes "Spannbetonbehälter / Heliumkreislauf" soll ein Druckbehälter mit heisser Dichthaut und erhöhter Wandtemperatur an einem Großmodell erprobt werden, bei dessen Konzeption diesen Problemen Rechnung getragen wurde.

2. WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ZIELE

Mit dem Projekt werden folgende Ziele verfolgt:

- a) Entwicklungsarbeiten am Spannbeton-Reaktorbehälter für gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren (einschließlich gasgekühlte Brüter) mit neuartigem Dichtungs- und Isolierungskonzept (heiße Dichthaut - erhöhte Wandtemperatur);
- b) Untersuchung der Tauglichkeit des Konzepts für Leichtwasserreaktoren unter Einbeziehung eines speziellen Deckelkonzepts (Siemens-Voest);
- c) Entwicklungsarbeiten an Komponenten für Heliumsysteme, wobei die Möglichkeit der späteren Einbeziehung von Prozeßwärmekomponenten offen gehalten wird.

Im Folgenden soll nun über die ersten beiden Punkte referiert werden.

Es fallen folgende Hauptaufgaben an:

Entwurf, Berechnung, Bau und Erprobung eines Reaktor - Spannbetonbehältermodells unter realistischen Betriebsbedingungen für gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren;

in der ersten Testphase Verwendung von Druckwasser unter Betriebsbedingungen von Leichtwasserreaktoren;

Entwicklung und Erprobung von hitzebeständigen Betonarten für Behälter und Wärmeisolierung sowie einer im direkten Kontakt mit dem Kühlmittel stehenden (heißen) Dichthaut, einschließlich der Penetrationen;

Erprobung eines Behälterdeckels mit neuartiger Niederhaltung, der auch für Leichtwasserreaktoren verwendbar ist;

Einsatz eines regelbaren Kühl- und Heizsystems für den Spannbeton.

3. BESCHREIBUNG DES BEHÄLTERS

3.1 Behälterkonzept

Die Schwierigkeiten und Risiken der bisher gebauten und geplanten Spannbetondruckbehälter liegen hauptsächlich

- a) in der Notwendigkeit, den Spannbeton und die Stahldichthaut (Liner) durch eine innerhalb der Dichthaut liegende Wärmedämmung vor der hohen Temperatur des Reaktorkühlmittels zu schützen (kalte Dichthaut)
- b) in der zeitlichen Veränderlichkeit des Spannbetons zufolge Schwinden, Kriechen, Feuchtigkeitswanderung (Austrocknung) und der dadurch bewirkten Spannungsänderungen und -umlagenungen.

Die Konsequenzen dieser beiden Fakten sind im wesentlichen bekannt und sollen hier nur kurz zusammengefaßt werden.

zu a)

Die innerhalb des Druckraumes liegende Wärmedämmung hat zur Folge, daß die kalte Dichthaut auf niedrigem Temperaturniveau bleibt. Andererseits wird die Wärmedämmung vom Reaktorkühlmittel durchdrungen, so daß an schadhafte Stellen der Wärmedämmung die Dichthaut sich bis auf die Temperatur des Reaktorkühlmittels erwärmen kann, ein Betriebsfall, für den sie nicht ausgelegt ist und der infolge Überbeanspruchung

zu Beschädigungen der Dichthaut führen kann. Beginnende Schäden können aber nicht festgestellt werden, weil die Dichthaut durch die Wärmedämmung verdeckt und somit Inspektionen nicht zugänglich ist.

zu b)

Die Langzeitveränderlichkeit des Spannbetons wirkt sich auf den Spannungszustand, die Formänderungen und damit auf die Sicherheit des Behälters aus. Da die Änderung der Betoneigenschaften weitgehend vom Austrocknungsgrad des Behälterbetons abhängt, dieser aber schwer im voraus zu bestimmen ist, und seine zeitliche Veränderlichkeit derzeit noch kaum vorausgesagt werden kann, ist die Schwierigkeit, diesen Einfluß rechnerisch zu erfassen, daher ausserordentlich groß.

Um diesen Schwierigkeiten zu begegnen, wurden zwei Möglichkeiten untersucht:

- i. Die Wärmedämmung wird außerhalb der Stahldichthaut angeordnet, wobei diese dann die Temperatur des Reaktorkühlmittels annimmt. Es ist dies der Fall der heißen Dichthaut.
- ii. Der Spannbeton des Behälters wird noch vor Inbetriebnahme des Reaktors weitgehend stabilisiert, so daß die während der Betriebszeit auftretenden Änderungen geringfügig bleiben.

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, daß das Konzept der heißen Dichthaut durchführbar ist, insbesondere wenn man die Temperatur des Spannbetons anhebt und dadurch die Zwängspannungen in der Dichthaut verringert. Das dabei auftretende Hauptproblem liegt nämlich darin, daß bei jedem Temperaturzyklus des Reaktors die Dichthaut, die sich gegenüber dem kaltbleibenden Spannbeton nicht ausdehnen kann, hohe Zwängspannungen erleidet und zum Beulen neigt. Bei einer höheren Zahl vom Temperaturzyklen entsteht daher die Gefahr eines Ermüdungsbruches. Die Hauptschwierigkeit bei einer heißen Dichthaut ist daher

die Sicherstellung einer ausreichenden Zahl von zulässigen Temperaturzyklen in der Dichthaut (und somit im Reaktorkühlmittel) während der vorgesehenen Lebensdauer des Reaktors.

Die zulässige Anzahl der Lastzyklen hängt in diesem Fall von dem Temperaturunterschied zwischen der Dichthaut und dem Spannbeton und von dem Unterschied ihrer Wärmedehnungen ab. Je geringer der Temperaturunterschied ist und je weniger die Dichthaut sich gegenüber dem Spannbeton auszudehnen versucht, umso geringer sind die Zwängung und die Beulgefahr, und umso größer wird daher die zulässige Zahl der Last- (Temperatur) Zyklen sein.

Um eine ausreichend hohe Zahl von Lastzyklen zu erreichen gibt es daher zwei Möglichkeiten:

- i. Der Temperaturunterschied zwischen Dichthaut und Beton wird niedrig gehalten. Das ist nur möglich durch eine Erhöhung der Betontemperatur, weil die Temperatur der heißen Dichthaut vom Reaktorbetrieb her vorgegeben ist.
- ii. Die Verwendung von Beton mit großer und von Stahl für die Dichthaut mit niedriger Wärmedehnung.

Den größeren Einfluß hat dabei die Erhöhung der Betontemperatur. Es wurde deshalb eine gegenüber bisherigen Ausführungen stark erhöhte Betontemperatur von im Mittel 110°C im Spannbeton gewählt (Abb.1). Die Betontemperatur soll über ein eingebettetes Rohrsystem geregelt und in gewissen Grenzen den Temperaturzyklen der Dichthaut und somit des Reaktorbetriebes angepaßt werden können. Die Erhöhung der Wandtemperatur bietet aber auch die Möglichkeit, die Stabilisierung des Betons zu beschleunigen. Das Kriechen wird durch die hohe Temperatur beschleunigt, so daß ein Großteil der Spannungsverluste durch Kriechen noch vor Inbetriebnahme des Behälters durch Nachspannen ausgeglichen werden kann.

Das Konzept führt, infolge der Herabsetzung der Zwäng -

spannungsamplituden in der heißen Dichthaut und der erhöhten Spannbetontemperatur, zu einer größeren Anzahl von Schwierigkeiten als bei "kaltem" Spannbeton, aber die Schwierigkeitsgrade sind wesentlich geringer.

3.2 Auslegungsdaten:

Betriebsbedingungen:

Betriebsdruck: $p_B = 100 \text{ atü}$
Prüfdruck: $p_p = 115 \text{ atü}$
Betriebstemperatur: $T_{\max} = 300^\circ\text{C}$ (an der Dichthaut)

Abmessungen:

Der Behälter hat kreiszylindrische Form mit lotrechter Achse, eine untere Abschlußplatte aus Beton und einen Stahldeckel.

Innendurchmesser: $d_i = 1,50 \text{ m}$
Außendurchmesser: $d_a = 3,88 \text{ m}$
Nutzbare Innenhöhe: $h_i = 8,00 \text{ m}$
Gesamthöhe: $h_a = 12,17 \text{ m}$

3.3 Öffnungen

Der Modellbehälter erhält eine achsiale Öffnung in der unteren Bodenplatte für das Gebläse mit 0,50 m Durchmesser, zwei radiale Durchbrüche mit 0,30 m Durchmesser und eine obere Öffnung über den ganzen Behälterquerschnitt mit 1,1 m Durchmesser. Diese Öffnung wird mit einem abnehmbaren Stahldeckel verschlossen, der sich über Pendelstützen auf einen Spannbetonring abstützt. Somit sind alle möglichen Öffnungsarten weitgehend im Versuch vertreten.

3.4 Aufbau des Behälters

Der Behälter besteht , in der Reihenfolge vom Druckraum

nach außen, in radialer Anordnung aus folgenden Schichten:

Stahldichthaut:	5 mm dick
Isolierbeton:	250 mm dick
Kühlhaut (Stahl):	5 mm dick
Mörtelfuge:	50 mm dick
Spannbeton:	750 mm dick
1 Lage Spannglieder:	32 mm dick

Der Aufbau der unteren Bodenplatte ist analog. Der obere Spannbetonring, auf den sich der Stahldeckel abstützt, ist durch eine Gleitfuge vom übrigen Behälter getrennt.

3.5 Kühl- und Heizsysteme

Um die Betontemperatur regeln zu können, erhält der Behälter zwei Rohrsysteme:

ein erstes Rohrsystem befindet sich an der Grenzfläche zwischen Isolierbeton und Spannbeton, auf einem 5 - 6 mm dicken Blechmantel (Kühlhaut, kann als zweite Dichthaut ausgebildet werden) befestigt;

ein zweites Rohrsystem ist im Spannbeton verteilt.

Beide Systeme können sowohl als Kühlung als auch als Heizung betrieben werden.

3.6 Temperaturverlauf

Bei Anfahren des Behälters wird die Dichthaut auf 300°C erwärmt. Parallel dazu wird der Spannbeton mit Hilfe der beiden Kühl-Heiz-Systeme mit konstantem Temperaturgefälle von 20°C soweit erwärmt, daß seine Temperatur an der Grenzfläche zum Isolierbeton 120°C, an der Außenseite 100°C, beträgt.

Im Normalbetrieb und während aller Temperaturzyklen bei denen die Temperatur der Dichthaut nicht unter 120°C sinkt, bleibt die Temperatur des Spannbetons konstant. Erst, wenn die Dichthauttemperatur unter 120°C sinkt, wird die Spannbetontemperatur mit Hilfe der beiden Kühl-systeme so weit mitgesenkt, daß in der Dichthaut keine Zugspannungen entstehen.

4. PROJEKTORGANISATION

Das Projekt Spannbetonbehälter/Heliumkreislauf wird in weitgespannter Kooperation österreichischer Industriefirmen mit dem Forschungszentrum Seibersdorf durchgeführt und erhält grosszügige Förderung vom Forschungsförderungsfonds der gewerblichen Wirtschaft, vom Bundesministerium für Bauten und Technik und von der Jubiläumsstiftung der Österreichischen Nationalbank.

Am Gemeinschaftsprojekt sind folgende Unternehmungen und Institutionen beteiligt:

Firma	Verantwortungsbereich
Reaktorbau Forschungs- und Baugesellschaft (RFB)	gesamter Spannbetonbehälter
Felten & Guilleaume Fabrik elektr.App. AG	} Spanndrähte
Alpine Montangesellschaft	
Gebr. Böhler & Co Aktiengesellschaft	Armaturen
Schoeller-Bleckmann Stahlwerke AG	Gasreinigungssystem
Siemens AG	Konzept des Stahldeckels
Simmering-Graz-Pauker AG (SGP) für Maschinen-, Kessel- und Waggonbau	Rekuperator, Behälterkühlung
Vereinigte Österreichische Eisen- und Stahlwerke AG (VOEST)	heiße Dichthaut, Deckel und Durchführungen
Wagner-Biro Aktiengesellschaft	Dampferzeuger
Österreichische Studiengesellschaft für Atomenergie GmbH (SGAE)	Koordination, Betrieb, Heizstrecke, Gebläse, Instrumentierung und EDV, Nebeneinrichtungen

Jeder der Beteiligten bringt die von ihm gefertigte Komponente oder sonstigen Anteil als Eigenleistung in das Gemeinschaftsprojekt ein.

5. BERECHNUNG UND SICHERHEIT

- 5.1 Zur Durchführung der Vorberechnung wurden auch hier, wie allgemein üblich, vereinfachte Methoden angewendet. Das vorliegende Konzept des Druckbehälters unterscheidet

sich jedoch von ähnlichen Untersuchungen dadurch, daß der lasttragende Teil unter wesentlich höheren Temperaturen steht und daß die Wärmeisolierung, die hinter der Dichthaut angeordnet ist, selbst zum lasttragenden Teil dazugehört. Aus diesem Aufbau allein ergibt sich schon, daß die Materialeigenschaften innerhalb der Dicke der Wand unterschiedlich und wesentlichen zeitlichen Änderungen unterworfen sind, was auch bei Vorberechnungen keinesfalls mehr vernachlässigt werden kann, insbesondere auch deshalb nicht, weil die Beanspruchung des innersten Elementes, der heißen Dichthaut, entscheidend vom Verformungsverhalten des Spannbetonteiles bestimmt wird. Dieser Einfluß geht so weit, daß auch der Bauvorgang selbst schon Rücksicht auf die Beanspruchungen in der Dicht - haut nehmen muß und dadurch entscheidend mitbestimmt wird.

Als Grundlage für die Berechnung wurden daher die Materialeigenschaften entsprechend den vorliegenden Versuchsergebnissen und Literaturstudien in Abhängigkeit von der Zeit und Temperatur dargestellt. Es läßt sich dies durch einfache bzw. leicht programmierbare Funktionen mit guter Näherung erreichen. Damit sind zu jedem Zeitpunkt an je - der beliebigen Stelle entsprechend der Temperaturverteilung die Kennwerte für die Verformung bekannt, nämlich E-Modul, Kriechkennwerte, Querdehnzahl, u.s.w., wodurch der Ablauf des Kräftespiels und der Formänderungen überblickt werden kann. Ein umfangreicheres Rechenprogramm, nach endlichen Elementen aufgestellt, gibt dann die erforderlichen Erkenntnisse und Vergleichsmöglichkeiten mit den Versuchsergebnissen.

Die Temperaturverteilung wird durch Betriebstemperatur, Umwelttemperatur, Isolierungen, Wärmeleit Zahlen und insbesondere durch die Kühl-Heizsysteme bestimmt und ist somit weitgehend einflußbar.

5.2 Das thermo-elastische und thermo-plastische Verhalten des Behälters.

Für die Berechnung des Behälters wurde ein eigenes Re-

chenprogramm entwickelt. Das Rechenprogramm STIDI dient zur Ermittlung der Spannungsverteilung eines dickwandigen, zylindrischen Spannbetonbehälters. Es ermöglicht unter Zugrundelegung der Rotationssymmetrie zweidimensional die numerische Behandlung des folgenden Problems.

Gegeben ist ein Zylinder mit i. a. z-abhängigem Innenradius r , festem Außenradius r_a und ebenen Endflächen bei $z = 0$ und $z = h$. Gesucht sind die axialen und radialen Verschiebungen sowie die entsprechenden Dehnungen, Spannungen, Hauptspannungen und Hauptspannungsrichtungen zufolge einer vorgegebenen zweidimensionalen Verteilung der Temperatur, der Spannungssprünge an den Maschengrenzen (z.B. auf Grund von Innendruck und Vorspannung) und eventuell fix vorgegebener Verschiebungen einzelner Maschenpunkte an den Rändern.

Ein Unterprogramm dieses Rechenprogrammes berücksichtigt das thermo-elastische und thermo-plastische Verhalten des Betons mit geschlossenen Ausdrücken. Diese gestatten es, für jeden Zustand von Last, Temperatur und Zeit die jeweilige Verformung, das sind die elastische Dehnung und das Kriechen, zu ermitteln.

England und Ross haben unter dem Titel "Reinforced Concrete Under Thermal Gradients" über Versuche berichtet und die Ergebnisse graphisch dargestellt. Die dort schon geglätteten Kurven wurden durch einen möglichst gut zutreffenden Ausdruck dargestellt. Im Anschluß an die Auswertung der Ergebnisse von England und Ross wurde eine Annahme getroffen, welche in der Zeitabhängigkeit einem höheren Reifezustand des Betons bei Belastung Rechnung trägt und die Abhängigkeit des Kurzzeitmoduls von der Temperatur wesentlich reduziert.

Die thermo-elastischen und thermo-plastischen Verformungen wurden folgend dargestellt (Abb. 2).

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t) \cdot f_3(t,T) \quad (1)$$

wobei σ die Spannung, E_0 der Elastizitätsmodul bei 20°C zum Zeitpunkt der Lastaufbringung, T die Temperatur und t die Zeit ist.

Die Funktion $f_1(T)$ berücksichtigt den Einfluß der Temperatur auf den Elastizitätsmodul bei Lastaufbringung, $f_2(t)$ das Fortschreiten der Dehnung mit der Zeit bei 20°C und $f_3(t,T)$ den beschleunigenden Einfluß der Temperatur auf den zeitlichen Ablauf.

Es wurden folgende Funktionen angenommen:

$$f_1(T) = 1 + 0,542 \left[1 - e^{-0,005(T-20)} \right] \quad (2)$$

Die Funktion fällt von 100% des Ausgangswertes bei 20°C auf 85% bis 100°C und nähert sich dann entsprechend der Exponentialfunktion asymptotisch dem Endwert von 0,65 E_0 . Sollten Versuchsergebnisse ein anderes Verhalten des Betons ergeben, kann das Rechenprogramm ohne Schwierigkeiten durch Änderung der Konstanten der Funktion $f_1(T)$ an die neuen Versuchsergebnisse angepaßt werden.

$$f_2(t) = 1 + \frac{0,75 \cdot t}{(4,5 + t)} \quad (3)$$

$$f_3(t,T) = 1 + \frac{t}{10+t} \cdot \frac{(T-20)}{40+(T-20)} \quad (4)$$

Auch die Funktionen $f_2(t)$ und $f_3(t,T)$ können durch neue Ergebnisse aus den laufenden Kriechversuchen durch Änderung der Konstanten leicht verbessert werden.

Der Endwert des Elastizitätsmoduls geht bei diesen getroffenen Annahmen $T = 300^\circ\text{C}$ und $t = \infty$ auf.

$$E_{\infty, 300^\circ\text{C}} = \frac{E_0}{5,4} = 0,185 E_0 \quad (5)$$

Die Annahme des hohen Einflusses der Temperatur auf elastische und plastische Verformungen des Betons wurde unter Beachtung der bisherigen Versuchsergebnisse getroffen.

Wie oben erwähnt läßt sich das Rechenprogramm leicht ändern und man kann so neue Erkenntnisse auf dem Gebiet des thermo-elastischen und thermo-plastischen Verhalten des Betons berücksichtigen.

6. INSTRUMENTIERUNG und EDV

Um das Verhalten von Beton und Dichthaut bei mechanischer und thermischer Belastung meßtechnisch zu erfassen, ist der Einbau folgender Geber im Versuchsbehälter vorgesehen:

- 50 Stück Widerstands-Dehnungsmeßgeber in Viertelbrückenschaltung mit eingebautem Thermoelement im Isolierbeton;
- 200 Stück Saiten-Dehnungsgeber im Spannbeton, bei denen die Empfängerspule als Widerstandsthermometer verwendet wird;
- 132 Stück Widerstands-Dehnungsgeber in Viertelbrückenschaltung mit eingebautem Thermoelement auf Dichthaut und Stahldeckel.

Die Kurz- und Langzeit-Eigenschaften der Beton-Dehnungsgeber wurden aufgrund der Betriebsbedingungen untersucht und in Zusammenarbeit mit den Herstellerfirmen die in Anbetracht der hohen Betriebstemperaturen erforderliche Weiterentwicklung durchgeführt.

Zur Erfassung der Meßdaten wird eine Vielstellenmeßanlage eingesetzt. Diese wird Daten über Dehnung und Temperatur des Behälters, der Dichthaut, des Deckels und einiger kritischer Punkte des Heiz-Kühlsystems und der Penetrationen einem Digitalrechner zur weiteren Verarbeitung zuleiten. Der Rechner wird die Anlage in wichtigen Funktionen überwachen, die Meßwerte nach vorgegebenen Kriterien klassifizieren und bei unzulässigen Betriebszuständen eine Alarmmeldung auslösen. Außerdem wird er in die Steuerung der Versuchsanlage eingreifen, Regelaufgaben in den Versorgungseinrichtungen übernehmen und

im Falle einer Alarmmeldung Notmaßnahmen selbsttätig einleiten. Mit Hilfe dieser Anlage wird die Flut der Meßdaten schon während der Messung soweit aufgearbeitet, daß der Versuchsleiter den Betriebszustand jederzeit überblicken und kritische Bedingungen bereits im Entstehen erkennen kann.

7. VORVERSUCHE

7.1 Materialuntersuchungen

7.1.1 Spannbeton bei erhöhter Temperatur

Um die Zwängspannungen in der heißen Dichthaut zu vermindern ist es erforderlich, die Betriebstemperatur des ganzen Spannbetonbehälters anzuheben. Voruntersuchungen haben gezeigt, daß eine Spannbetontemperatur von etwa 120°C reichen würde. Da Spannbeton bei so hoher Temperatur noch nirgends verwendet wurde, musste ein umfangreiches Experimentalprogramm in Angriff genommen werden.

An den Beton werden, aufgrund seiner Funktionen, insbesondere der Entlastung der heißen Dichthaut, u.a. folgende Forderungen gestellt:

- hohe Druckfestigkeit
- hohe Zugfestigkeit
- geringer Elastizitätsmodul
- große Wärmedehnung
- gute Temperatur- und
- gute Temperaturwechselbeständigkeit.

Vorversuche haben gezeigt, daß insbesondere mit magnetischen Kalk als Zuschlagstoff Betone mit den geforderten Eigenschaften hergestellt werden können (Abb.3).

Es wurden daraufhin in einer Serie von Untersuchungen mit verschiedenen Zementsorten und Zusätzen Probekörper hergestellt und im Betonofen Temperaturzyklen bis 150 bzw. 180°C unterworfen. Es wurden jeweils die Warm- und nach dem Wiederabkühlen die Kaltefestigkeiten verfolgt. Es konnte insbesondere eine gute Temperaturwechselbeständigkeit erreicht werden. Das thermo-plastische Verhalten des Betons wird zur Zeit untersucht.

7.1.2 Spannstahl bei erhöhter Temperatur

Das Relaxationsverhalten patentiert gezogener und schlußangelassener Spannbetondrähte bei erhöhten Temperaturen wurde im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes von den Herstellerfirmen Felten & Guilleaume bzw. Alpine Montangesellschaft untersucht. Die Langzeitversuche haben bestätigt, daß im vorgesehenen Temperaturbereich die Relaxation zwar erhöht ist, aber ansonsten genau den gleichen Verlauf nimmt wie bei Raumtemperatur.

7.1.3 Isolierbeton

Der Isolierbeton, der zwischen der Stahldichthaut und dem Spannbeton angeordnet wird, muß folgende Bedingungen optimal erfüllen:

- a) den Innendruck des Primärkühlmittels vor der Dichthaut auf den Spannbeton übertragen;
- b) die Verankerung (Beulsicherung) der Stahldichthaut aufnehmen unter möglichster Vermeidung von Wärmebrücken zum Spannbeton hin;
- c) die Temperatur des Primärkühlmittels mit Hilfe eines an ihrer Grenzfläche zum Spannbeton angeordneten Kühlsystems auf einen für den Spannbeton zulässigen Wert abbauen;
- d) die dabei auftretenden Zwängspannungen über die Lebensdauer des Reaktors und unter Berücksichtigung der zu erwartenden Betriebszyklen aufnehmen;
- e) durch die auftretende Strahlung keine untragbaren Veränderungen ihrer Eigenschaften zu erleiden;
- f) gute Wärmedämmeigenschaften aufweisen.

Es wurden verschiedene Zuschlagstoffe, Zemente und Zusätze untersucht und schliesslich Blähton als Zuschlagstoff ausgewählt (Abb.4). Es konnten mit verschiedenen Zementen und Zusätzen zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich Druck- und Spaltzugfestigkeit, Temperatur- und Temperaturwechselbeständigkeit bis 300°C erzielt werden.

Thermoplastisches Verhalten und Strahlenbeständigkeit sind Gegenstand laufender Untersuchungen.

7.1.4 Dichthaut und Verankerung

Das Konzept der heißen Dichthaut erfordert einen Werkstoff, der unter den vorhersehbaren Betriebsbedingungen bei Vorliegen der Membranspannungen nur im elastischen und nicht im plastischen Bereich beansprucht wird. Der Stahl soll daher bei Betriebstemperatur eine entsprechend hohe Lage der Streckgrenze aufweisen, zudem wird gutes Zeitfestigkeitsverhalten, geringe Wärmedehnung und Korrosionsbeständigkeit verlangt.

Aufgrund eingehender, bei VOEST durchgeführter Untersuchungen wurde der zuerst in Aussicht genommene Stahl 17 - 4 PH ausgeschieden und als neuer Werkstoff ein hochfester martensitischer Chrom-Nickelstahl des Typs 13 4 gewählt. Er hat bei 300°C eine Streckgrenze von 60 kp/mm². Er ist gut schweißbar und korrosionsbeständig. Bestrahlungsversuche sind im Gange.

Die Verankerung der Dichthaut in dem Isolierbeton erfolgt mit Hilfe von Kopfbolzen, 100 mm lang, 12 mm Ø. Schweißversuche wurden mit befriedigendem Ergebnis durchgeführt.

7.2 Versuchsring

Die große Zahl von Entwicklungsarbeiten und Voruntersuchungen, die auf folgenden Gebieten durchgeführt werden

Isolierbeton,
Spannbeton bei erhöhter Temperatur
(Beton und Spannstahl),
Dichthaut und Verankerung,
Meßverfahren bei erhöhter Temperatur,

und deren Ergebnisse beim Bau des Spannbetonbehälters mit heißer Dichthaut erstmalig verwertet werden sollen, lassen es angezeigt erscheinen, dem Behälterbau einen technologischen Großversuch vorangehen zu lassen. Es

wurde deshalb ein Versuchsring geplant, der einen 1 m hohen Ausschnitt aus der zylindrischen Behälterwand, im Maßstab 1:1 darstellt (Abb.5).

Versuchsziel

Am Versuchsring soll neben dem Aufbau des Behälters, der Vorbehandlung des Isolier- und Spannbetons (thermisches Vorkriechen bzw. Austrocknen) und dem Einbau der Instrumentierung vor allem das Zusammenspiel der Dicht-
haut und ihrer Verankerung mit dem Isolierbeton und dem Spannbeton in einem technologischen Vorversuch erprobt und die dabei gewonnenen Erfahrungen beim Bau des Behälters verwendet werden. Außerdem sollen bei technischen Einzelfragen verschiedene Lösungsvarianten untersucht werden. Der Versuchsring wird nach seiner Fertigstellung vom Innenraum des zylindrischen Mittelteiles über Dichthaut und Isolierbeton, sowie über das eingebaute Heiz-Kühlssystem aufgeheizt und zyklischer, thermischer Belastung unterworfen. Dabei muß die fehlende Entlastung der Dichthaut durch den Innendruck, die beim Normalbetrieb im Reaktorbehälter auftritt, durch eine entsprechend verminderte Dichthauttemperatur berücksichtigt werden. Erst im Endstadium der Versuche soll die Temperatur der Dichthaut auf 300°C gebracht und so der grösste Reaktorunfall (plötzlicher Kühlmittelverlust bei höchster Betriebstemperatur) simuliert werden.

Ein 1 m hoher Ausschnitt der Dichthaut samt Ankerbolzen wird den vorgesehenen Thermo-Zyklen unterworfen. Die Temperatur wird so gewählt, daß die Zwängung in der Dichthaut jener entspricht, die im Normalbetrieb im Reaktor auftritt.

Im Isolierbeton soll die Art der Einbringung und Verdichtung sowie die Wirkung der Dichthautverankerung, geprüft werden.

Der Spannbetonring wird einer thermischen Vorbehandlung unterworfen, wie sie für den Versuchsbehälter auch vorgesehen ist: Erwärmen auf 80 - 120°C, einige Wochen auf Temperatur halten und nach Abklingen von Kriechen und

Schwinden nachspannen. Erst in diesem stabilisierten Zustand wird der Kraftschluß zwischen Spannbeton und Isolierbeton durch Auspressen der frei gelassenen Fuge hergestellt.

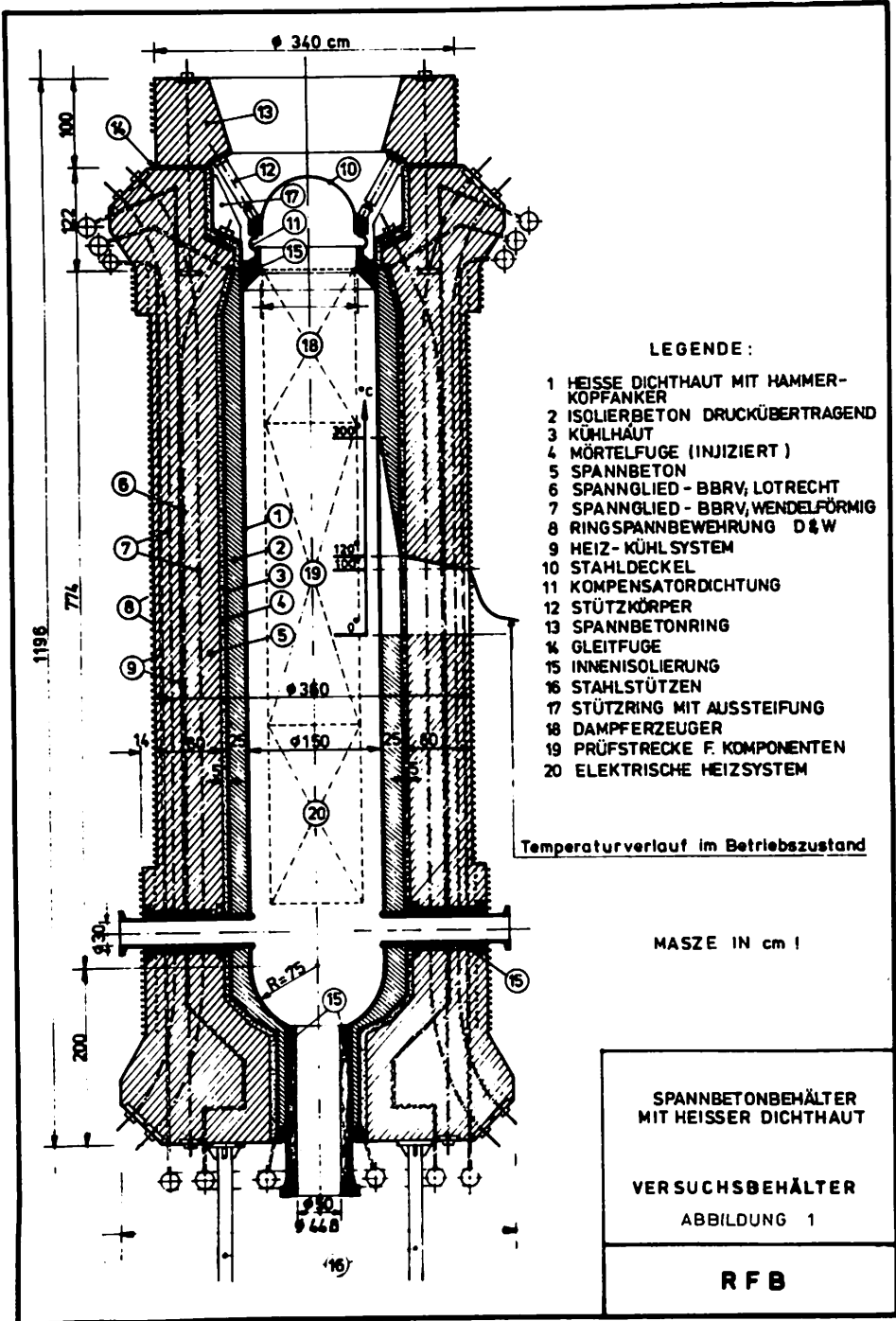
Ein wesentliches Versuchsziel sind Einbau und Inbetriebnahme von Dehnungsgebern im Isolierbeton (Widerstandsdehnungsgeber) und im Spannbeton (Saitendehnungsgeber). Neben den Dehnungsgebern werden im Versuchsring auch drei Glötzl-Druckgeber, Saitendehnungsgeber von Taylor-Woodrow/England und fluidische Geber der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, eingesetzt und erprobt.

Der Versuchsring ist fertiggestellt und wird zur Zeit aufgeheizt.

Mit dem Bau des Versuchsbehälters wurde bereits begonnen. Seine Fertigstellung ist für Frühjahr 1972 vorgesehen. Im Sommer 1972 wird mit den Versuchen unter Betriebsbedingungen für Leichtwasser-Reaktoren begonnen.

LITERATUR

- 1 ENGLAND, G.L., ROSS, Reinforced Concrete Under Thermal Gradients. Magazine of Concrete Research, Vol. 14, Nr. 40, March 1962.
- 2 NEMET, J. Bautechnische Entwicklungsaufgaben auf dem Gebiet der Kernenergie. Zement und Beton 50/51 (1970), S. 45-50.
- 3 TARBES, B., Caisson en béton précontraint à peau chaude. Informationstagung über Arbeiten auf dem Gebiet von Spannbetonbehältern und ihrer Isolierung, Euratom, Brüssel, 7-8XI.1967.
- 4 NESITKA, A., Berechnung und Sicherheit eines Spannbetonbehälters mit heißer Dichthaut. Gemeinschaftsprojekt "Spannbetonbehälter/Heliumkreislauf".
- 5 WALLUSCHEK-WALLFELD, W., Das thermoelastische und thermoplastische Verhalten des Spannbetonbehälters mit heißer Dichthaut. Gemeinschaftsprojekt "Spannbetonbehälter/Heliumkreislauf".
- 6 WALLNER, F., Werkstoffuntersuchungen für die heiße Dichthaut und deren Verankerung. Gemeinschaftsprojekt "Spannbetonbehälter/Heliumkreislauf".
- 7 NATHSCHLÄGER, P., Das Rechenprogramm STIDI. Gemeinschaftsprojekt "Spannbetonbehälter/Heliumkreislauf".



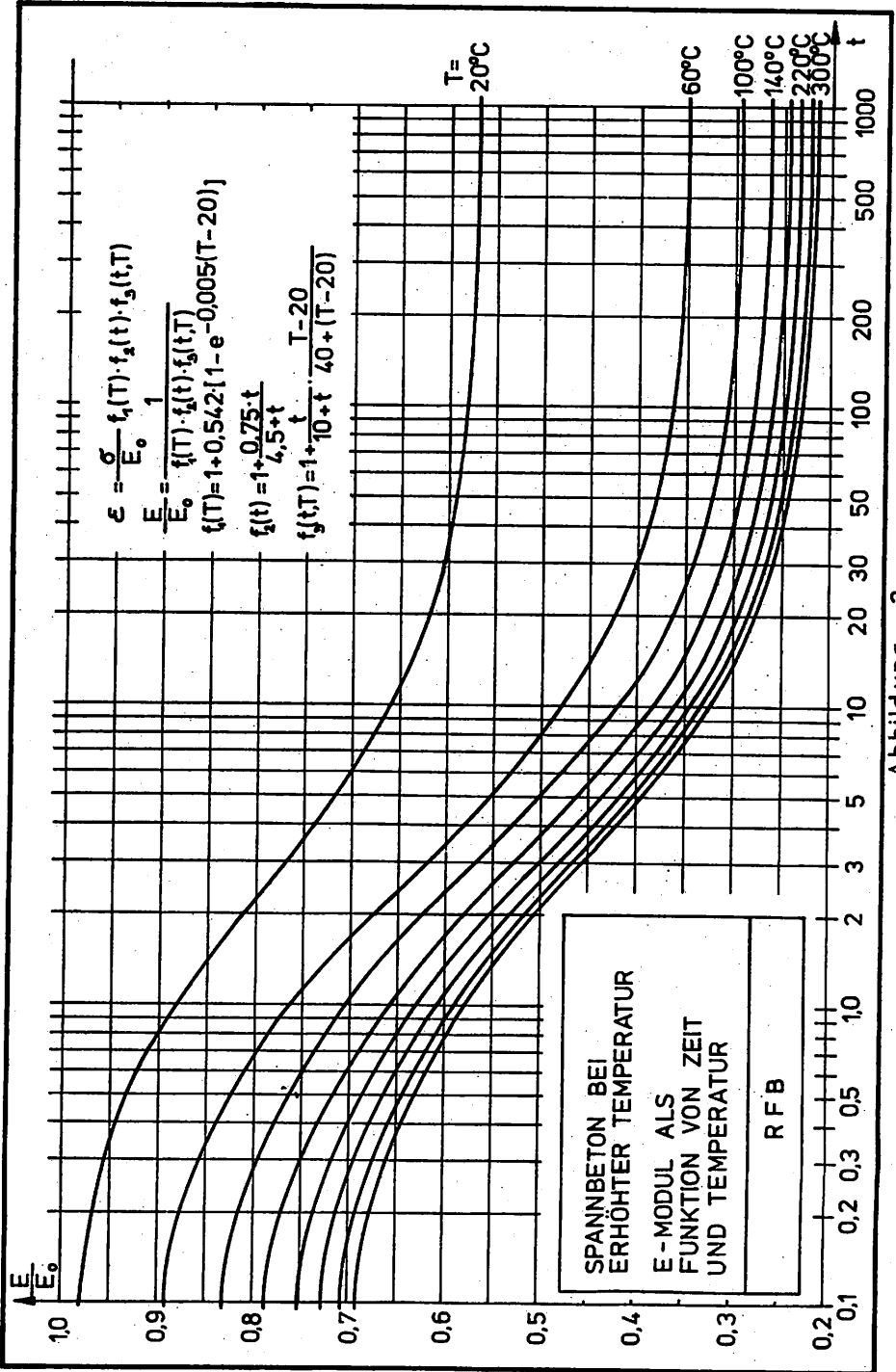


Abbildung 2

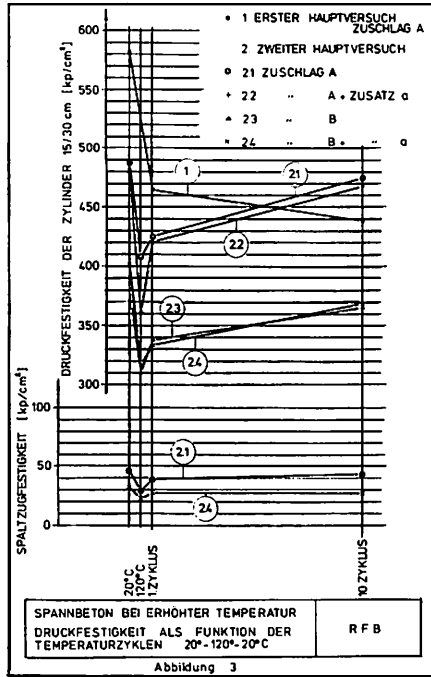


Abbildung 3

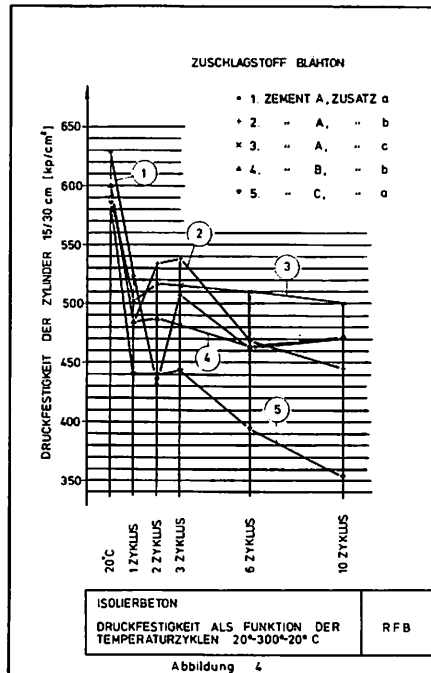
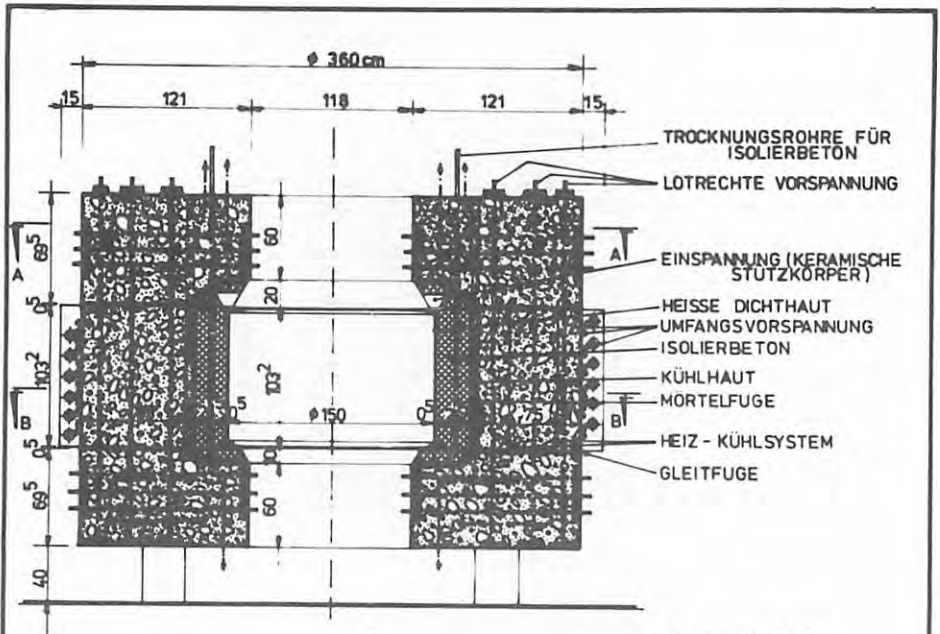
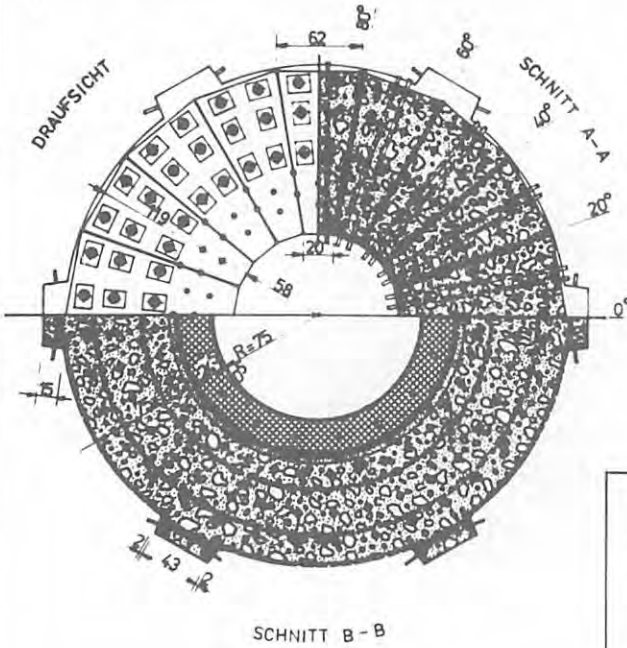


Abbildung 4



MASZE IN cm !



SPANNBETONBEHÄLTER
 MIT HEISSE DICHTHAUT

 VERSUCHSRING
 AB BILDUNG 5

 R F B

A. J. WILLIAMS, U. K.

Q The problems of insulation make this project a very attractive one. There are however uncertainties connected with the anchorage of the liner. At temperature, the liner will go into yield, and the concrete behind it will experience compressive creep. When the temperature is removed, the liner will contract away from the concrete and the concrete will crack. This could cause irreversible damage to the liner anchorages that would become worse with progressive cycling.

I should like to ask whether it is intended to carry out temperature cycling and if so, whether it is intended to examine the liner anchorages after the test.

J. NEMET, Austria

A At temperatures cycles 100-300°C the liner stays under compression. To insure compression in the liner at lower temperatures the vessel wall temperature has to be lowered. It is intended to carry out temperature cycling with the experimental ring and to examine the anchorages afterwards. The model vessel itself will be cycled as well.

W. KRAEMER, Sweden

Q During transients as cold start up or cold shut down, I guess you could get very high temperature gradients within the insulating concrete especially if the concept is adopted to water reactors, where good heat transfer between the reactor coolant and the liner exists. Have you looked at those transients and are the resulting temperature gradients within the insulating concrete acceptable ?

J. NEMET, Austria

A As long as the primary coolant temperature does not fall below 100°C, the liner stays under compression and the temperature gradients in the insulating concrete are acceptable. For lower liner temperatures the vessel wall temperature has to be lowered. These transients are now being investigated.

R. D. BROWNE, U. K.

Q Was the strength recovery with temperature cycling shown for the non-insulating concrete related to the weight loss and strength increase due to drying ? What was the weight change with number of cycles ?

J. NEMET, Austria

A Constant weight of test cylinders was reached at the first cycle. With further cycles no more weight loss took place.