

# KONSTRUKTION DER REAKTOREINBAUTEN DES THTR-300 MWE-PROTOTYP-KERNKRAFTWERKES UND ANALYSE DER DURCH ÄUSSERE BELASTUNGEN IN IHNEN HERVORGERUFENE SPANNUNGEN

B. BEINE, R. FRITZ, C. ELTER,

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

K. BRANDES,

*Fachgruppe Tragfähigkeit der Baukonstruktionen,  
Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, Germany*

## ABSTRACT

The elements of the core structure have to withstand stresses from different external and thermal loads. The load conditions and the mechanical behaviour as well as the idealised static systems for the core structure are described. The severest loads of the most important components of the core are presented.

### 1. EINLEITUNG (BILD 1)

Der gesamte Primärkreislauf - das Core und die 6 Dampferzeuger - ist voll in einen Spannbetonreaktordruckbehälter integriert. Das Kernstück der Gesamtanlage ist der Kugelhaufen mit seinen 675 000 Brennstoff-, Moderator- und Absorberelementen. Durch sein spezifisches dynamisches und statisches Verhalten sind die wesentlichen Parameter für den Entwurf vorgegeben.

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurde denjenigen Konstruktionselementen, die gegenüber dem Vorgänger des THTR-300, dem AVR-Reaktor in Jülich, eine neue Lösung darstellen bzw. anders beansprucht werden, besondere Aufmerksamkeit zugewandt.

### 2. KONSTRUKTIVE AUSFÜHRUNG DER COREINBAUTEN

#### 2.1 SEITLICHER THERMISCHER SCHILD (BILD 2)

Der aus einem ultraschallprüfbareren Gußeisen gefertigte seitliche thermische Schild bildet einen das Core umgebenden Zylinder von 13,75 m Höhe und 8,2 m Innendurchmesser und 30 cm Wandstärke. Fertigungs- und montagebedingt mußte der Zylinder in 2 m hohe Ringe aufgeteilt werden; jeder Ring ist seinerseits in 12 miteinander verschraubte Segmente unterteilt. Durch die Unterteilung in einzelne Ringe werden Beanspruchungen aus den sich im Betrieb einstellenden axialen Tempe-

raturprofilen weitestgehend vermieden.

Der seitliche thermische Schild hat, wie schon sein Name sagt, primär Abschirmungsaufgaben. Darüber hinaus muß er aber sämtliche aus dem Core radial nach außen wirkenden Kräfte aufnehmen; er muß also den Kugelhaufen und die aus einzelnen Blöcken aufgebauten Seitenreflektoren zusammenhalten. Die Kraftübertragung zwischen den Seitenreflektoren und dem thermischen Seitenschild übernehmen die Stützbolzen.

## 2.2 SEITENREFLEKTOREN (BILD 3)

Die Seitenreflektoren bestehen aus zwei ineinanderstehenden Zylindern (dem inneren und dem äußeren Seitenreflektor) von 11,25 m Höhe und je 500 mm Wandstärke. Die Blöcke des inneren Seitenreflektors haben folgende Abmessungen: Höhe 250 mm, Breite innen 240 mm, außen 290 mm, Länge 500 mm. In einem Ring nebeneinanderliegende Blöcke sind durch Keile gegeneinander fixiert. In einer von unten nach oben durchgehenden Säule übereinanderliegende Blöcke sind durch zylindrische Steckdübel miteinander verbunden. In jedem zweiten Stein einer Ringlage des inneren Seitenreflektors befindet sich eine Bohrung zur Aufnahme der 36 Reflektorstäbe.

Die Blockabmessungen im äußeren Seitenreflektor betragen:  
Höhe 500 mm, Breite innen 86 cm, außen 100 cm.

Die Hauptkriterien bei der konstruktiven Ausbildung der Seitenreflektoren waren:

1. Fertigungs- und montagebedingte Grenzen in den Abmessungen der Graphitteile
2. Nichtauswechselbarkeit der Reflektoren während der 30-jährigen Betriebsdauer
3. Weitestmögliche Unterdrückung von temperaturbedingten und strahlungsinduzierten Spannungen
4. Vermeidung von Zugbeanspruchung im Graphit durch äußere Belastungen

Aus diesen Kriterien resultiert die Auflösung der Seitenreflektoren in Einzelblöcke. Aus dem Kriterium 3 wird unmittelbar einleuchtend, daß die Blöcke des inneren Seitenreflektors wegen der hohen Dosisbelastung bis zu maximal  $13,6 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2$  (Di Ni) und der Temperaturgradienten geringere Abmessungen haben müssen als die des äußeren Seitenreflektors. Das Kriterium 2 führt dazu, daß als Material für den inneren Reflektor z.Zt. nur ein hochfestes isotropes Graphitmaterial auf Gilsonitbasis in Frage kommt, das die höchsten Festigkeitswerte aufweist und das z. Zt. strahlungsbeständigste Graphitmaterial darstellt.

Als Funktionselemente des Reaktors haben die Seitenreflektoren folgende Aufgabe:

1. Aufnahme- und Begrenzungselement für den Kugelhaufen zu bilden,
2. das Heißgas durch das Core zu führen,
3. als Reflektor und Abschirmung zu dienen.

Zur Überprüfung der Gewährleistung eines funktionsgerechten Verhaltens gemäß 1, 2

und 3 auch nach längerem Reaktorbetrieb wurde ein Demonstrationsversuch an einem 1:10 Modell des Seitenreflektors durchgeführt. Die Spalte, die sich durch strahlungsinduziertes Schrumpfen zwischen den Steinen des inneren Seitenreflektors einstellen, wurden dabei stark übertrieben ausgeführt, und zwar wurden an den Innenseiten 30 % Schrumpfung angenommen und darüber hinaus die Spalte mit geradlinigen Begrenzungsflächen ausgebildet, was das System labiler macht.

Der Aufbau in einer zylindrischen Plexiglaswand (simulierter thermischer Seitenschild) wurde zunächst ohne Dübel und Keile vorgenommen. (Bild 4)

Nach Lockerung des Plexiglasmantels (was z.B. temperaturbedingte Verschiebungsunterschiede zwischen dem thermischen Schild und dem Seitenreflektor simuliert) und Rütteln des Aufbaues kamen die Steine in Unordnung bis sie vereinzelt sogar herausfielen. Beim Herausnehmen einzelner Steine wurde Brückenbildung festgestellt. Nunmehr wurden Keile zwischen den Steinen eingesetzt (Bild 5). Nach Lösen des umschließenden Plexiglasmantels neigten sich die einzelnen Lagen gemeinsam. Einzelne Steine oder Säulen von übereinanderliegenden Steinen konnten nicht mehr aus dem Gesamtverband ausbrechen. Die gemeinsame Neigung der Steine in einer Lage ist von großer Bedeutung, da Ringe mit unterschiedlich geneigten Steinen sich nicht mehr in ihrem Umfang durch Kräfte von außen verkleinern ließen.

#### Aufbau nur mit Dübeln (Bild 6)

Ein Kippen der Steine konnte nicht mehr beobachtet werden. Ganze Säulen konnten sich jedoch aus dem Gesamtverband lösen.

#### Aufbau mit Keilen und Dübeln (Bild 7)

Bei gleichzeitiger Anwendung von Dübeln und Keilen wird aufgrund der Kombination der oben erläuterten Wirkungsweisen ein Verband hergestellt, der eine hohe Standicherheit bei großer Flexibilität aufweist.

### 2.3 BODENREFLEKTOR (BILD 8)

Die 30°-Neigung des trichterförmigen Bodenreflektors hat sich bereits im AVR-Reaktor bewährt und wurde beim THTR übernommen. In der Mitte des Bodenreflektors ist das Kugelabzugsrohr angeordnet.

Der Boden besteht aus regelmäßigen Sechskantsäulen mit einer Schlüsselweite von 258 mm. Jeder Stein ist mit axialen Bohrungen für den Heißgasdurchtritt von oben nach unten versehen. Die Sechskantsäulen ruhen auf Rundsäulen von 100 mm Durchmesser. In der so entstehenden Säulenhalle sammelt und vermischt sich das Heißgas.

Die Aufteilung des Bodenreflektors in einzelne Sechsecksäulen resultiert aus folgenden Überlegungen:

1. Weitestmögliche Unterdrückung von strahlungsinduzierten Spannungen
2. Wirtschaftliche Fertigung aus runden stranggepreßten Graphitformaten
3. Sicherung des Ausgleichs von unterschiedlichen Temperaturdehnungen einzelner Bodenzonen bei verschiedenen Reaktorleistungen

Unterhalb der Säulenhalle sind eine 25 cm dicke Graphitlage und eine 50 cm dicke Kohlesteinschicht aus Abschirmungs- und Isolierungsgründen auf der oberen Bodenplatte angeordnet. Die Aufteilung dieser Lagen in Rauten mußte aus Fertigungsgründen und zur Vermeidung von zu hohen stationären Temperaturbeanspruchungen vorgenommen werden.

#### 2.4 THERMISCHER BODENSCHILD

Der thermische Bodenschild besteht aus der oberen und der unteren Bodenplatte. Der 60 mm große Spalt zwischen den beiden Platten dient zur Kühlgasführung. Die obere Platte stützt sich über ca. 300 Rollenlager auf der unteren Platte ab. Diese ist mit 230 einstellbaren Rollenlagern auf dem Spannbetonbehälterboden aufgelagert.

Die Bodenplatten sind aus je 12 Segmenten zusammengesetzt. Die Segmente der oberen Bodenplatte sind nochmals in ein inneres und äußeres Segment unterteilt. Die Segmente sind an den Stoßstellen überlappt und durch Paßstifte miteinander verbunden.

#### 2.5 DECKENREFLEKTOR (BILD 2)

Der Deckenreflektor besteht aus sechseckigen Hängesäulen. Jeweils 6 Säulen umschließen eine kreisförmige Öffnung für einen der 42 frei in das Core eintauchenden Regelstäbe. An den freien Sechseckseiten sind Schlitze zur Kühlgasführung von oben nach unten eingefräst.

Jeder Deckenstein ist einzeln in seiner Schwerachse an einem Hängestab aus Stahl aufgehängt. Über ein System von Zwischenringen sind diese Hängestäbe an der Deckenplatte des Spannbetonbehälters befestigt.

#### 2.6 THERMISCHER DECKENSCHILD

Der thermische Deckenschild bildet den oberen Abschluß der Coreeinbauten. Er besteht - von unten nach oben - aus einer Gußeisenlage, einer Graphitlage und einer weiteren Gußeisenlage. Die einzelnen Lagen sind in ihrer Ebene wiederum in Sechseckelemente aufgeteilt. Der thermische Deckenschild ist an der aus dem Decken-

reflektor zum Spannbetonbehälter laufenden Hängekonstruktion befestigt.

## 2.7 STÜTZBOLZEN

Die Verbindung zwischen dem äußeren Seitenreflektor und dem thermischen Seitenschild wird durch die Stützbolzen hergestellt. Sie sind als 30 cm lange Pendelstützen ausgebildet. Damit sie unterschiedliche temperaturbedingte Verschiebungen in radialer Richtung zwischen den Graphiteinbauten und dem thermischen Seitenschild kompensieren können, haben sie in ihrer Längsrichtung ein einstellbares "Spiel".

## 2.8 VERDREHSICHERUNGEN

Durch die statisch gesehen als Pendelstützen wirkenden Stützbolzen wird eine mögliche Verdrehung des inneren und äußeren Seitenreflektors gegen den thermischen Seitenschild z.B. beim Lastfall "Einfahren der Corestäbe" nicht verhindert. Zur Gewährleistung der kinematischen Stabilität des Systems werden deshalb in 4 Ringlagen jeweils 3 flossenartig in den Graphitaufbau greifende Verdrehsicherungen am thermischen Seitenschild befestigt, die die tangentialen Kräfte aufnehmen können.

## 3. ANALYSE DER DURCH ÄUSSERE BELASTUNGEN HERVORGERUFENEN SPANNUNGEN

Neben den strahlungsinduzierten und durch Temperaturgradienten bedingten Spannungen in den Einzelteilen der Coreeinbauten treten Spannungen aus folgenden 5 Lastfällen auf:

1. Eigengewicht
2. Druckabfall des Kühlgases
3. Silodruck aus der Kugelfüllung
4. Kräfte beim Einfahren von Corestäben in den Kugelhaufen
5. Spannungen aus unterschiedlichen Temperaturverschiebungen einzelner Konstruktionsteile gegeneinander

Alle Teile des Coreaufbaus werden durch Kombinationen aus diesen 5 Lastfällen entsprechend dem jeweiligen Betriebszustand bzw. auch in Abhängigkeit von vorhergehenden Betriebszuständen beansprucht.

Die Deckenkonstruktion kann getrennt von den übrigen Coreeinbauten betrachtet werden, da sie unabhängig vom restlichen Coreaufbau am Spannbetonbehälter befestigt ist. Belastet werden die Elemente der Decke durch ihr Eigengewicht und den Druck-

abfall des Kühlgases in der Decke. (Bild 9)

Die maximalen Spannungen im Graphit betragen an der Befestigung der Hängestäbe  $8 \text{ kp/cm}^2$  Druck. Die Auf- und Abwärtsbewegungen der 42 Corestäbe in der Decke führen nicht zu Belastungen, da sich die Stäbe durch ein System von Spalten und Hülsen frei durch die Coredecke bewegen können.

Zwängungsspannungen zwischen dem Deckenreflektor und dem angrenzenden Seitenreflektor treten nicht auf, da die Temperaturen in dem Bereich, in dem diese Bauteile aneinander grenzen, primär von der Kaltgastemperatur bestimmt werden und außerdem die Seitenreflektoren im Rahmen des Spiels der Stützbolzen leicht nach außen ausweichen können.

Besondere Schwierigkeiten bereitet es, das Seitenwandssystem - innerer Seitenreflektor, äußerer Seitenreflektor, Stützbolzen, thermischer Seitenschild - in seinem mechanischen Verhalten zu erfassen.

Insbesondere sind Beanspruchungen infolge unterschiedlicher Temperaturverformungen zwischen der Kugelschüttung, den Seitenreflektoren und dem thermischen Seitenschild schwierig zu erfassen, da das der Berechnung zugrunde zu legende statische System je nach der vorausgehenden Belastungsgeschichte unterschiedlich sein kann.

Unter normalen Betriebsbedingungen ist der Überdruck des Gases in dem Ringraum zwischen thermischem Seitenschild und äußerem Seitenreflektor gegenüber dem Gasdruck samt Silodruck im Core so groß, daß die Reflektoren nach innen gedrückt werden. Es besteht also die Tendenz, daß diese Kräfte aus Druckabfall die Reflektoren gegen den sich sehr langsam bewegenden Kugelhaufen immer wieder zu einem spaltfreien Ring zusammendrücken. Rechnungen an einem einfach statisch unbestimmten System, bestehend aus einem geschlossenen Graphitring des äußeren Seitenreflektors, den Stützbolzen ohne Längsspiel und dem thermischen Seitenschild, haben gezeigt, daß eine Abkühlung des Seitenschildes gegenüber dem Reflektor, bei dem die oben beschriebene "Druckringtragwirkung" auftritt, mit Sicherheit zu Beschädigungen an den Graphiteinbauten führen würde.

Um ein solches Tragverhalten sicher zu vermeiden, werden die Stützbolzen so konstruiert, daß sie sich verkürzen können, d.h. es wird ein sogenanntes Druckspiel vorgesehen. (Bild 10)

Die Abbildung zeigt, daß sich im Normalbetrieb der thermische Seitenschild im oberen Bereich stärker nach außen verschiebt als die Seitenreflektoren. Damit keine Zugbeanspruchungen an den Einbindestellen der Stützbolzen im Graphit entstehen, müssen die Stützbolzen sich hier verlängern können, d.h. es muß ein Zugspiel vorgesehen werden. In dem als "Druckbereich" bezeichneten Abschnitt muß das oben erläuterte Druckspiel vorgesehen werden.

Beim Einfahren der Corestäbe müssen sich die Seitenreflektoren in Abhängigkeit von dem eingestellten Stützbolzenspiel wegen der hohen bei diesem Lastfall auftretenden Kräfte - bis zu 6 Mp pro Stützbolzen - den Temperaturverformungen des Seitenschildes anpassen.

Tritt jetzt ein Temperaturüberschlag im Kugelhaufen auf oder - was für das mechanische Verhalten gleichbedeutend ist - kühlt sich der thermische Seitenschild schneller ab als die Graphiteinbauten, so werden die auftretenden Kräfte im wesentlichen von dem Verformungsverhalten des Kugelhaufens bestimmt.

Eine erste rechnerische Abschätzung für die Steifigkeit bzw. den E-Modul des Kugelhaufens kann mit Hilfe eines elastischen Modells erhalten werden, in welchem die elastischen Formänderungen nur im Bereich der Berührungsstellen zwischen benachbarten Kugeln als wesentlich angesehen werden. Diese Verformungen lassen sich unter der Voraussetzung der Gültigkeit der Theorie der Härte von Hertz berechnen. Das Verhältnis von Abplattung der Kugel an der Berührungsstelle zum Kugelradius ergibt eine fiktive mittlere Dehnung ( $\epsilon$ ) der Einzelkugel. Über das Hooke'sche Gesetz läßt sich nun der E-Modul für eine Kugelreihe bzw. auch für eine aus Kugeln zusammengesetzte ebene Kreisscheibe unter radialer Last ermitteln. (Bild 11)

Die zweite und die dritte Abschätzung wurden anhand von semi-empirischen Beziehungen für die eindimensionale Zusammendrückbarkeit von Kugelschüttungen dichtester quadratischer und dichtester hexagonaler Lagerung vorgenommen. Diese Beziehungen wurden einer Veröffentlichung der TH Karlsruhe entnommen und geben jeweils einen Wert für die Dehnung an.

Durch Einsetzen der Beziehung für Spannungen in einer Kreisscheibe unter einer radialen Gleichlast am Umfang in das Hooke'sche Gesetz ergibt sich jeweils der E-Modul für diese beiden Kugelpackungen.

Alle drei Abschätzungen liefern, wie die Abbildung zeigt, größenordnungsmäßig gleiche Ergebnisse. In Wirklichkeit wird die Kugelschüttung jedoch weicher sein, da bei diesen Abschätzungen Bewegungen zwischen den Kugeln nicht berücksichtigt worden sind.

Die Bodenkonstruktion wird hauptsächlich durch vertikale Kräfte aus Eigengewicht, Gewicht der Kugelschüttung, Druckabfall im Coreboden sowie den senkrechten Kraftkomponenten aus der Belastung beim Einfahren der Corestäbe beansprucht. Aus diesen Lastfällen ergibt sich eine Druckspannung von maximal  $36 \text{ kp/cm}^2$  in den Säulen im Gassammelraum.

Horizontale Kraftkomponenten aus der Kugelschüttung und dem Lastfall "Einfahren der Corestäbe" werden über die Kontaktflächen benachbarter Steine in die Stützbolzen eingeleitet und von dort in den thermischen Seitenschild übertragen.

Über die Graphit- und Kohlesteinlagen unterhalb des Gassammelraumes werden die vertikalen Kräfte an die stählernen Bodenplatten übertragen und von dort an den Spannbetonbehälter abgegeben.

Zum Abschluß sollen die maximalen Belastungen der Stützbolzen und der Graphitsäulen im Gassammelraum angegeben werden.

Mit den Belastungen der Stützbolzen liegen zugleich die wesentlichen Belastungen der Seitenreflektoren und des thermischen Seitenschildes fest. Aus dem Lastfall "Einfahren der Corestäbe einschließlich Silodruck" beträgt die Belastung 6,0 Mp, aus dem Lastfall Abkühlung des thermischen Seitenschildes um 70 °C etwa 4 Mp und die maximale Belastung der Stützbolzen beträgt somit etwa 1c Mp.

Die Belastung der Graphitsäulen gibt einen Anhaltswert für die Beanspruchungen der gesamten Bodenkonstruktion; sie betragen 0,8 Mp aus dem Gewicht des Bodenreflektors einschließlich Druckabfall im Coreboden und 3,7 Mp aus dem Lastfall Einfahren der Corestäbe. Das entspricht einer Druckspannung im Graphit von 56 kp/cm<sup>2</sup>.

Insgesamt kann gesagt werden, daß die vorhandenen Beanspruchungen von der gewählten Konstruktion sicher aufgenommen werden können. In den keramischen Reaktoreinbauten sind die Beanspruchungen aus äußeren Lasten insbesondere im corenahen Bereich gegenüber den strahlungsinduzierten Spannungen sehr gering.



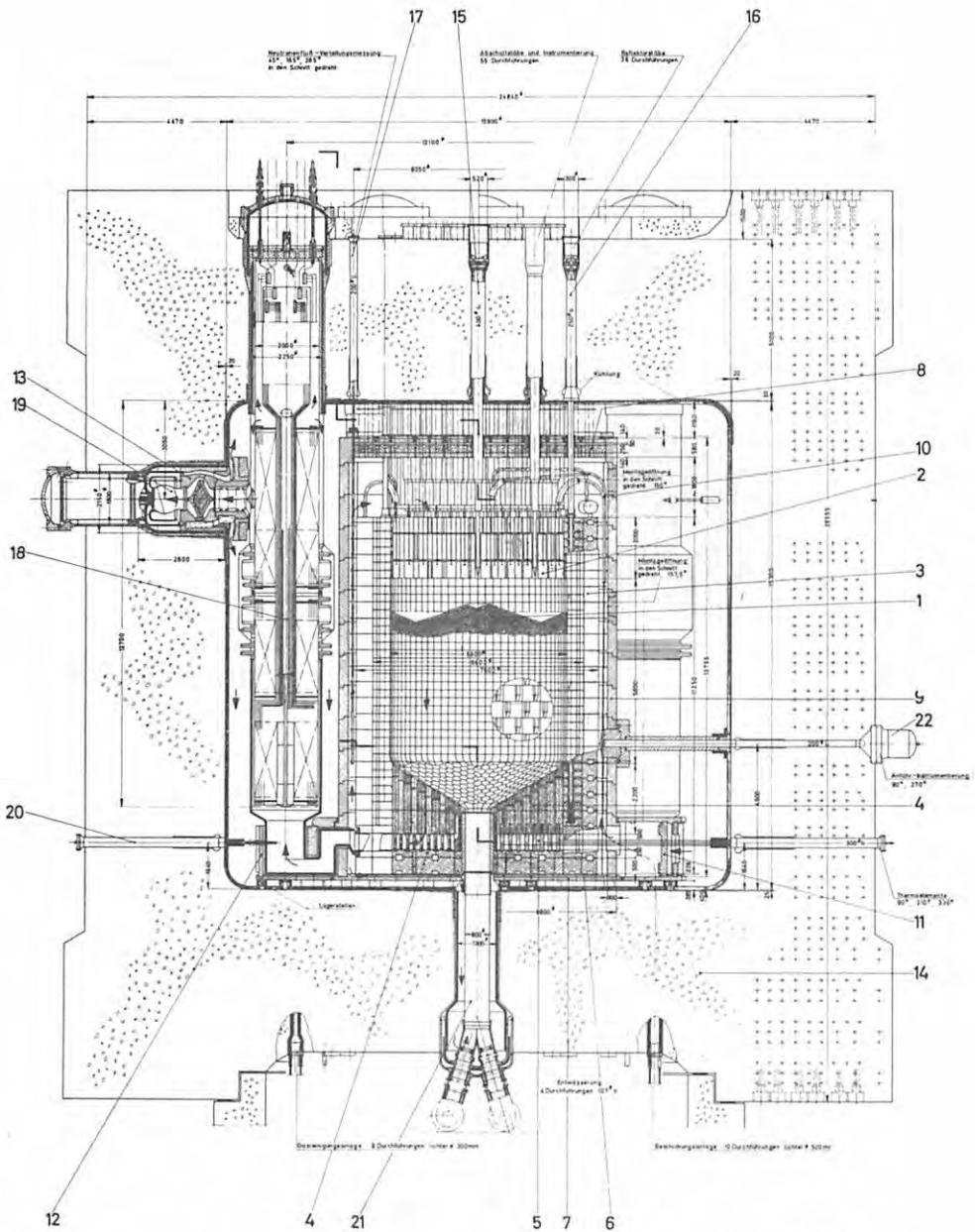
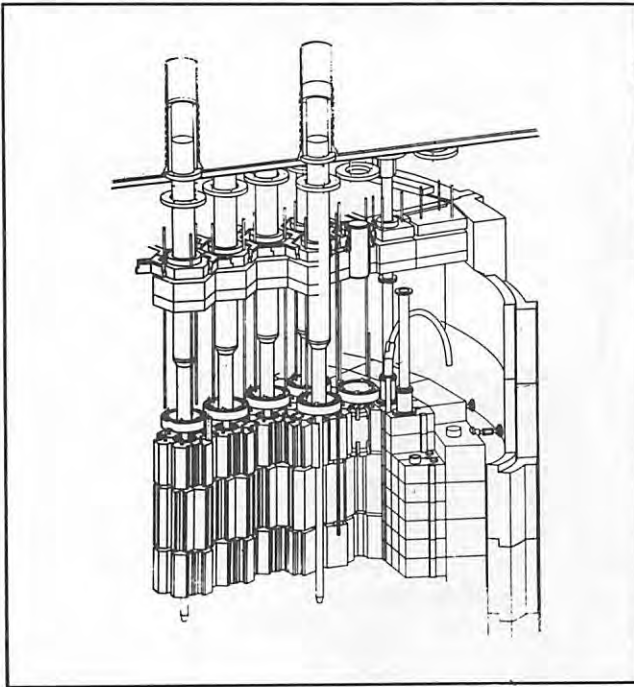


Abb. 1

- |  |                                     |                                  |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1 Kugelhauten                                  | 10 Brennelement-Förderreihe         | 19 Gedäse                        |
| 2 Coredecke                                    | 11 Abschirmung der BE-Förderreihe   | 20 Thermoelement im Heißgasstrom |
| 3 Selenreflektor (innere äußere Zylinderwand)  | 12 Abschirmung der Heißgaszule      | 21 Kugelzugrohr                  |
| 4 Coreboden (Bohrerreflektor u. unterer Boden) | 13 Abschirmung für Gebläseöffnung   | 22 Anfahr-Meßklemme              |
| 5 Sammelraum für Heißgas                       | 14 Spornbehälter                    |                                  |
| 6 obere Bodenplatte                            | 15 Abberstebe im Core               |                                  |
| 7 untere Bodenplatte                           | 16 Abberstebe im Selenreflektor     |                                  |
| 8 Therm. Dichtenschild                         | 17 Neutronenflussverteilungsmessung |                                  |
| 9 Therm. Selenenschild                         | 18 Dampferzeuger                    |                                  |



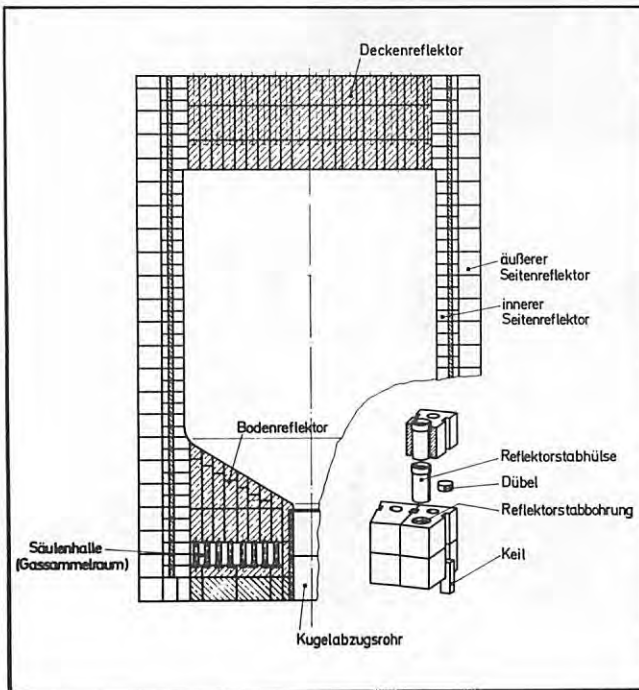
THTR

71.25-8

Abb. 2

DECKENREFLEKTOR

BBC/KRUPP



THTR

71.25-1

Abb. 3

KERAMISCHE  
EINBAUTEN

BBC/KRUPP

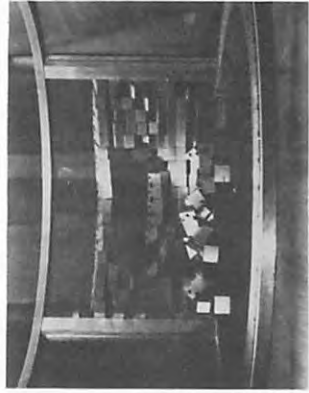
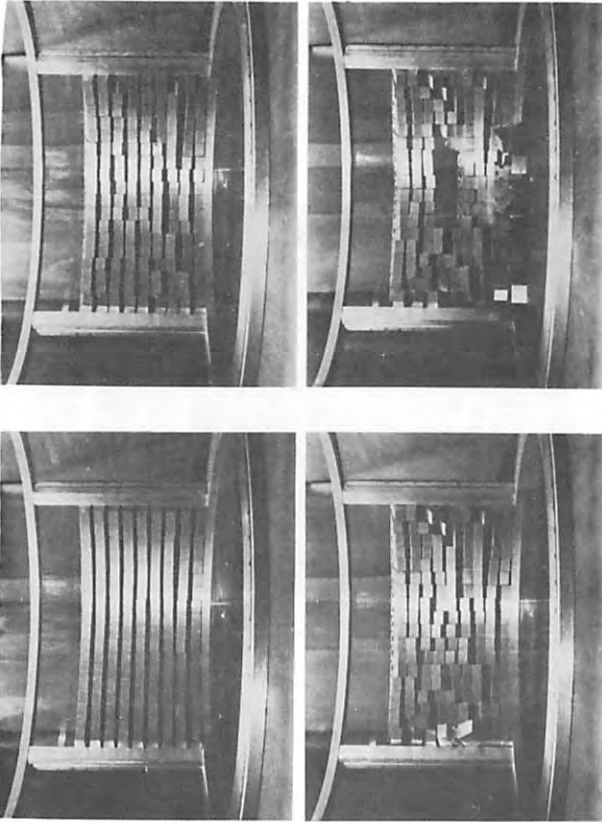
THTR

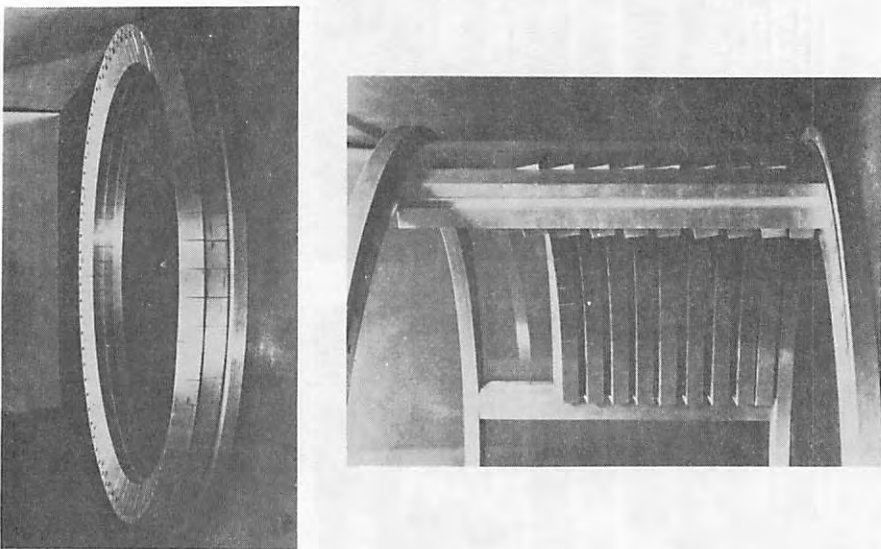
71.25-5

Abb. 4

SEITENREFLEKTOR  
AUFBAU OHNE KEILE  
UND DÜBEL

BBC/KRUPP



<p>THTR 71.25-6</p>	<p>Abb. 5</p> <p>SEITENREFLEKTOR AUFBAU MIT KEILEN</p>	
		<p>BBC/KRUPP</p>

THTR

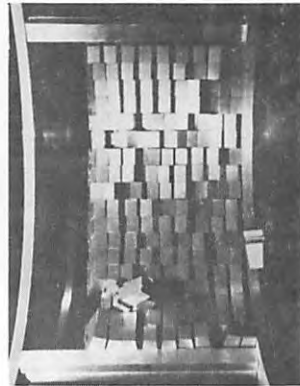
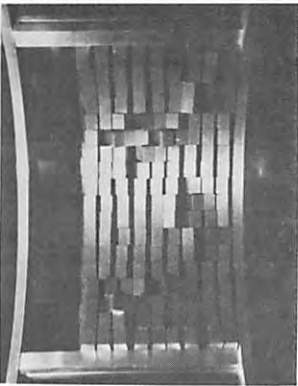
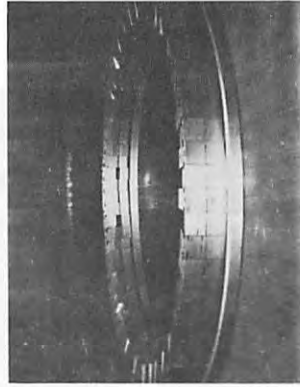
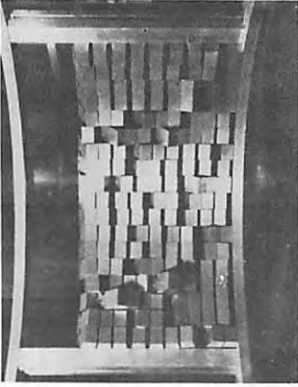
71.25-7

Abb. 6

SEITENREFLEKTOR

AUFBAU MIT DÜBELN

BBC/KRUPP



THTR

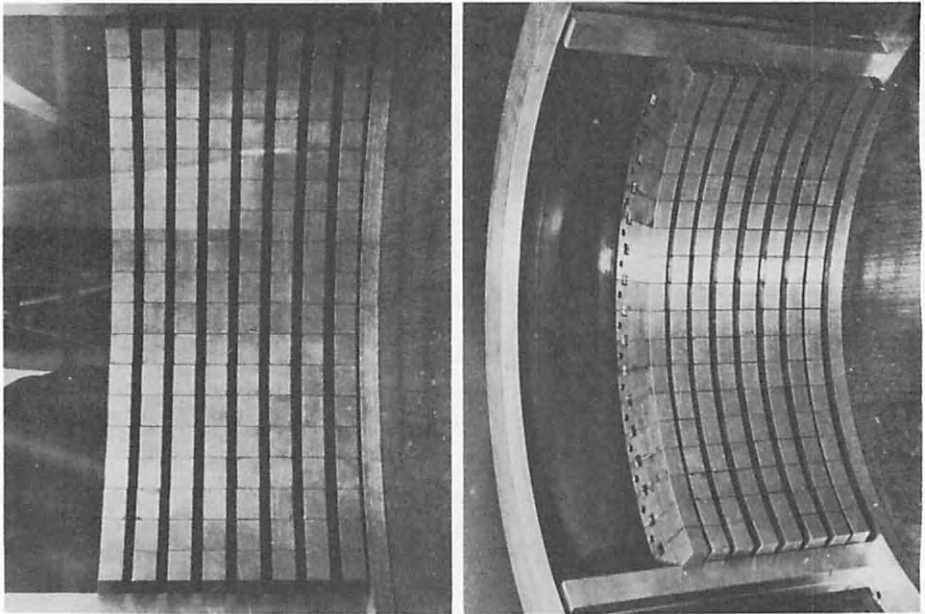
71.25-9

Abb. 7

SEITENREFLEKTOR

AUFBAU MIT KEILEN  
UND DÜBELN

BBC/KRUPP



THTR

69.10-1

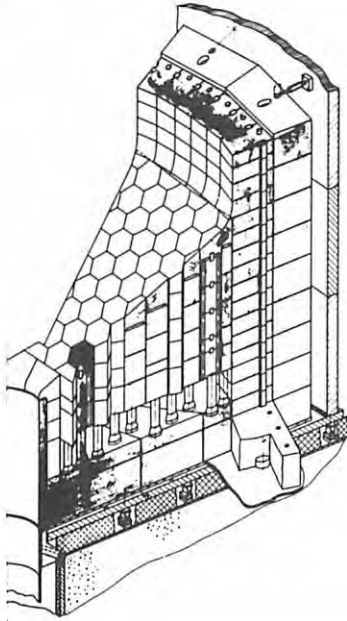


Abb. 8

THTR - 300 MW<sub>e</sub>  
Perspektive des  
Bodenreflektors

BBC / KRUPP

THTR

71.25-2

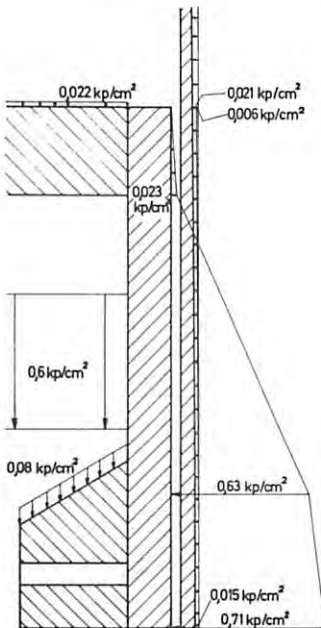
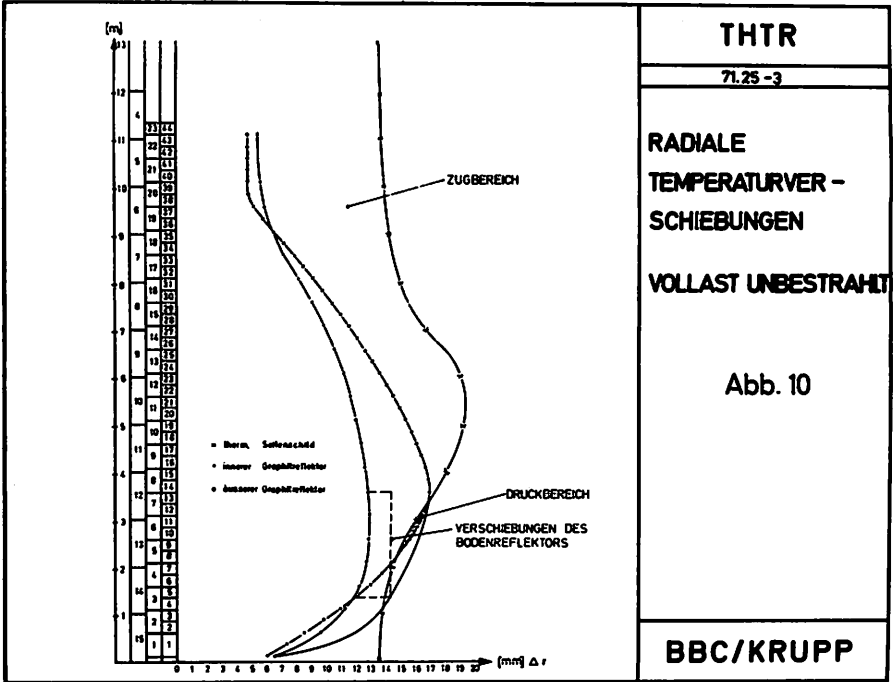


Abb. 9

BELASTUNGEN AUS  
DRUCKABFALL IM  
KÜHLGASKREISLAUF

BBC / KRUPP



**THTR**

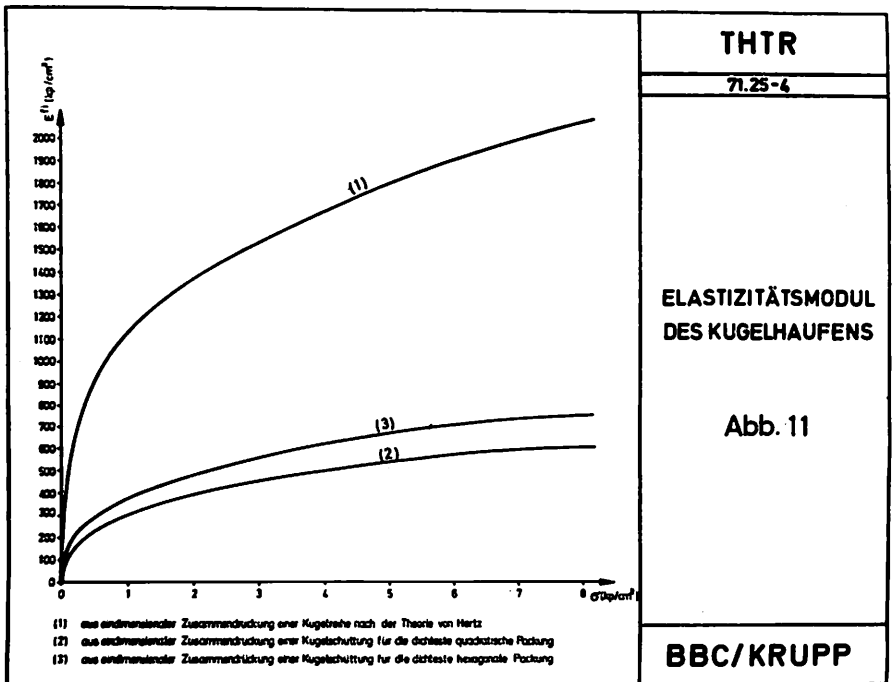
71.25-3

**RADIALE  
TEMPERATURVER-  
SchieBUNGEN**

**VOLLAST UNBESTRAHLT**

Abb. 10

**BBC/KRUPP**



**THTR**

71.25-4

**ELASTIZITÄTSMODUL  
DES KUGELHAUFENS**

Abb. 11

**BBC/KRUPP**