

**COREWAND- UND COREBODENBELASTUNGEN
IN EINEM KUGELHAUFENREAKTOR
BEIM EINFAHREN DER ABSORBERSTÄBE**

G. MERTEN,

Versuchsabteilung, Brown Boveri/Krupp Reaktorbau GmbH, Jülich, Germany

1. Abstract

The core of the Thorium-High-Temperature Reactor (THTR) has a cylindrical reflector wall and a conical bottom, both consisting of graphite material with a central outlet. It is filled up with a large number of spherical fuel elements of 6 cm diameter with a graphite shield.

The absorber rod system developed for the THTR enables the free insertion of the rods into the pebble bed. In the upper zone of the pebble bed rods require a certain volume which is created by lifting the pebble bed like in a liquid. In the lower zone of the pebble bed the inserted volume of the absorber rods has to be made available by reducing the void volume.

In this way pressure will be established in the reactor core. The knowledge of the pressure distribution within the pebble bed is of great importance with reference to the control rod system and to the graphite construction of the core wall and the core bottom.

However, there are several parameters which influence the pressure distribution in the pebble bed, e. g. temperature, friction as a function of gas atmosphere, specific weight of the spheres and pressure losses of the streaming cooling gas along the pebble bed.

The influence of these parameters can be described by an exponential law. The characteristic features of pressure distribution in bulk material which differ from those of liquids can be summarized as follows:

- a) Dependence of pressure distribution on core height is not linear.
- b) Pressure distribution is anisotropic.
- c) Pressure distribution depends heavily on core geometry.
- d) Pressure distribution depends on the history of the pebble bed.
- e) Level surfaces of pressure are not horizontal plains as in a liquid but curved areas.

2. Problemstellung

In das mit ca. 675.000 tennisballgroßen Brennelementen gefüllte zylindrische Core des Thorium-Hochtemperatur-Reaktors - im Folgenden kurz THTR genannt - fährt ein Teil der zylindrischen Absorberstäbe von 105 mm \emptyset frei in die Kugelschüttung ein.

Durch das Fließen der Kugeln im Core während des Umwälzens treten dynamische Belastungen an Wand- und Bodenreflektor des Cores auf. Das Einfahren der Stäbe verursacht eine weitere zusätzliche Beanspruchung dieser Einbauten.

Für die Auslegung dieser Corebauteile ist die Kenntnis ihrer Beanspruchung während des gesamten Reaktorbetriebes erforderlich, da sie bei Beschädigungen nicht ausgetauscht werden können.

3. Einleitung

3.1 Beschreibung des Cores

Das zylindrische Core des THTR-300 mit 5600 mm \emptyset , 4500 mm Höhe und dem unter 30° nach innen geneigten Coreboden ist aus lose aneinandergefügten Graphitblöcken aufgebaut. (Abb. 1)

Die Steine im Boden haben überwiegend die Form regelmäßiger Sechskantsäulen, die mit axialen Bohrungen für den Kühlgasdurchtritt versehen sind.

Die innere Corewand besteht aus nahezu rechteckigen aufeinandergeschichteten Graphitsteinen mit Abmessungen von (250 x 244) mm. Die Blöcke sind durch Bolzen und Keile untereinander verbunden und über einstellbare Stahlanker am thermischen Seitenschild befestigt.

Die Bodenkonstruktion und die seitliche Reflektorwand ruhen auf einer Stahlplatte, die auf Rollen gelagert ist.

Aus Öffnungen in der aufgehängten Coredecke fahren die 42 Absorberstäbe in die Kugelschüttung ein. Die zylindrischen Corestäbe haben einen Außendurchmesser von 105 mm. Die Absorberstabspitze ist konisch ausgebildet und endet in einer konkaven Kalotte mit dem annähernden Durchmesser einer Graphitkugel.

In der Coredecke befinden sich ebenfalls die Schlitze für den Gasdurchtritt. Das Kühlgas Helium durchströmt den Kugelhaufen von oben nach unten.

3.2 Art der Beanspruchung

Die Graphiteinbauten des THTR sind nicht ausbaubar. Deshalb muß für die Auslegung die gesamte Reaktorlebensdauer von 30 Jahren zugrundegelegt werden.

Beansprucht werden die Reaktoreinbauten durch:

1. Korrosion
2. Bestrahlung und Temperatur
3. mechanische Belastungen

In diesem Vortrag sollen nur die mechanischen Beanspruchungen näher betrachtet werden. Mechanische Beanspruchungen treten durch folgende Gegebenheiten auf:

1. Eigengewicht der Einbauten
2. Eigengewicht der Kugelschüttung
3. Druckabfall des Kühlgases an der Kugelschüttung
4. Differenzdehnung zwischen Kugelschüttung und Seitenreflektor
5. Einfahren der Absorberstäbe

Die höchsten Beanspruchungen treten beim Einfahren der Absorberstäbe auf.

4. Mechanik der Krafteinleitung

4.1 Eigengewicht der Einbauten

Das Eigengewicht des Graphits der Core-Konstruktion mit ca. 590 Mp ist als statische Last zu betrachten.

4.2 Eigengewicht der Kugeln

Aber bereits das Gewicht der ca. 675.000 Brennelemente im Core, von denen jedes knapp 200 p wiegt, ist nicht mehr als statische Belastung anzusehen, wenn die Kugeln durch das Core fließen. Beim Abzug einer Kugel am Coreaustritt bewegen sich die übrigen Kugeln, je nach Position im Core, um einen Betrag zwischen $(4 - 80) \cdot 10^{-3}$ mm weiter. Hierdurch findet ein ständiger Wechsel der an der Kraftübertragung beteiligten Kugeln statt. Dies wirkt sich auf dem Coreboden und an der Corewand als Druckschwankungen aus. Die Druckschwankungen auf der Gesamtfläche eines Graphit-Wandsteines sind schwächer ausgeprägt als die von einem kleinen Flächenelement, das nur von einer Kugel belastet werden kann. Eine einzelne Kugel z. B. am Coreboden, wie in Abb. 2 zu sehen ist, kann sowohl nur mit ihrem Eigengewicht von ca. 200 p auf ihre Unterlage drücken, wenn sie unterhalb einer stabilen Brücke

liegt, andererseits kann theoretisch auch das gesamte Gewicht der darüberliegenden Kugelsäule über sie abgeleitet werden.

Auf der Fläche eines Graphitsteines des Seitenreflektors liegen im Mittel 18 Kugeln von 25 theoretisch möglichen. Durch die größere Anzahl der Einzelbelastungen auf diese Fläche sind die Schwankungen nicht so groß.

Die Höhe der Schwankung ist eine Funktion der Coretiefe. Je geringer die Kugelgeschwindigkeit in größeren Tiefen ist, umso weniger ausgeprägt sind auch die Belastungsschwankungen. Das Belastungsspektrum genügt einer Normalverteilung, wie es auch die Gerade der Abb. 3 in dem Wahrscheinlichkeitsnetz angibt.

Die Druckverteilung in dem Kugelhaufen ist auch ganz anderer Natur als z. B. in einer Flüssigkeit. Während des Umwälzens bildet sich über der zentralen Kugelabzugsöffnung ein Druckgewölbe in der Schüttung aus. In der Verrundung zwischen Corewand und Coreboden und auf dem Coreboden selbst findet es seine Abstützung. Deutlich ist dies in dem Isodynenschaubild der Abb. 4 zu sehen, wo die Linien gleicher Kraft dargestellt sind, die beim Einfahren an der Spitze eines einzelnen Absorberstabes in die Kugelschüttung gemessen werden.

Der Radialdruck auf die zylindrische Reflektorwand des THTR, wie er unter normaler Luft sein würde, ist als Funktion der Tiefe in der Abb. 5 für den Mittelwert und den Maximalwert dargestellt. Der Wanddruck steigt bis auf 3 m Coretiefe linear an, erreicht hier sein Maximum und nimmt dann wieder ab.

Vom Coreboden werden ca. 85 % des Kugelgewichtes aufgenommen, während der restliche Teil von ca. 15 % durch Reibungskräfte an der Corewand in vertikaler Richtung abgeleitet werden.

4.3 Spezifisches Gewicht - Kühlgasdruckabfall

Das Helium-Kühlgas, welches das Core von oben nach unten durchströmt, findet in der Kugelschüttung einen Widerstand, der einen Druckverlust des strömenden Gases zur Folge hat. Dieser Druckverlust kommt einer scheinbaren Erhöhung des spezifischen Gewichtes der Kugeln gleich.

Das wirksame spezifische Gewicht errechnet sich nach der Beziehung:

$$\gamma = \gamma_{\text{Kugel}} + \frac{\Delta p}{H_{\text{eff}} \cdot f} \quad (1)$$

γ [p cm ⁻³]	spezifisches Gewicht der Kugeln bzw. Kugeln bei strömendem Gas
Δp [p cm ⁻²]	Kühlgasdruckabfall an der Kugelschüttung
H_{eff} [cm]	effektive Kugelschütthöhe
f [-]	Füllfaktor der Kugelschüttung

Der Einfluß des spezifischen Gewichtes auf die Corewand- bzw. Corebodenbelastung geht nach einem Proportionalansatz mit einem empirisch gewonnenen Exponenten von $\alpha = 1,2$ stärker als linear ein.

$$F_1 = F_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right)^\alpha \quad (2)$$

Die Radialkraft auf den Corereflektor als Funktion des spezifischen Gewichtes auf doppellogarithmischem Papier aufgetragen, ergibt eine Gerade mit der Steigung $\alpha = 1,2$.

Im Reaktor nehmen die mittleren Corewandbelastungen, wie Abb. 6 zeigt, entsprechend dem Kühlgasdruckabfall zu.

4.4 Reibungseinfluß

Der Reibungskoeffizient von Graphit auf Graphit ist eine Funktion der Temperatur und der Gasatmosphäre.

Durch die Ausgasung steigt der Reibwert des Graphits in reinem Helium deutlich an. Auf der anderen Seite zeigt der Reibungskoeffizient mit steigender Temperatur eine monoton abnehmende Tendenz.

Im Core kann der Reibwert von Graphit je nach dem Betriebszustand des Reaktors zwischen $\mu = 0,13$ und $\mu = 0,6$ liegen.

Der Einfluß der Reibung auf die Wand- und Bodenkraft geht nach dem Exponentialansatz

$$\frac{F_{\mu 1}}{F_{\mu 2}} = \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^\beta \quad (3)$$

mit dem Exponenten $\beta = 0,28$ nur sehr schwach ein.

4.5 Differenzdehnungen

Differenzdehnungen zwischen dem Kugelhaufen und der Core-Konstruktion werden hervorgerufen durch Temperaturgradienten und durch Strukturveränderungen im Graphit. Als mechanische Beanspruchung könnten sie sich jedoch nur im ruhenden Kugelhaufen auswirken. Sobald die Kugeln sich durch das Umwälzen bewegen, werden auftretende Spannungen sofort wieder abgebaut.

Wesentliche Verspannungen der Reflektorkonstruktion sind nicht zu erwarten, da irgendwelche Längenänderungen durch die Möglichkeit der Relativbewegung der Graphitblöcke zueinander ausgeglichen werden.

5. Belastung der Core-Konstruktion durch einfahrende Absorberstäbe

Wenn der Reaktor für längere Zeit abgeschaltet werden soll, fahren 42 Absorberstäbe ganz in die Kugelschüttung ein. Die Spitzen der Stäbe stehen in ihrer Einstellung dann 0,5 m über dem Coreboden. Das eingetauchte Stabvolumen von ca. $1,64 \text{ m}^3$ nimmt den Raum von ca. 1,3 % des gesamten Kugelschüttvolumens ein. Dieses Volumen wird freigemacht durch teilweises Anheben der Kugelschüttung und im weiteren Bereich durch die Verdichtung des Haufens.

Besonders durch den Verdichtungseffekt verspannt sich der Kugelhaufen und die Kräfte müssen von den Graphiteinbauten der Corewand und des Corebodens aufgenommen werden.

Die Kräfte an einem in die Kugelschüttung einfahrenden Absorberstab teilen sich auf in

1. Stabspitzenkräfte
2. Konuskräfte
3. Schaftkräfte.

Stabspitzenkräfte sind definiert als Treffer und somit Belastung von einer einzelnen Kugel durch die Stabspitze selbst. Dieses Ereignis tritt pro Stab und Einfahrt im Mittel ca. 28-mal auf. Mit zunehmender Eintauchtiefe der Stäbe nehmen die Kräfte linear zu.

Am Stabkonus sind im Mittel ständig 18 Kugeln an der Kraftübertragung beteiligt. Auch diese Kräfte nehmen linear mit der Tiefe zu. Sie liegen, bezogen auf die Belastung einer einzelnen Kugel, ca. 30 % niedriger als die Stabspitzenkräfte.

Der Schaft des Absorberstabes hält die Verspannungen in der Kugelschüttung,

die beim Eindringen der Stabspitze entstehen, aufrecht.

Die beim Einfahren des Stabes auftretenden vertikalen Reibungskräfte zwischen den Kugeln und dem Absorberstabhüllrohr betragen ca. 30 % der Gesamteinfahrkräfte.

5.1 Corewand

Beim Einfahren der Absorberstäbe in die Kugelschüttung steigen die horizontalen Corewandbelastungen linear bis zum Coreboden an (s. Abb. 7). Bei 42 gemeinsam in das Core einfahrenden Stäben treten maximale Wandbelastungen von $2,2 \text{ kp cm}^{-2}$ in 4 m Tiefe auf. Dieser Wert gilt ohne Kühlgasdruckabfall bei einem Reibungskoeffizienten von Graphit mit $\mu = 0,6$.

Die vertikale Kraft am Seitenreflektor ist beim Einfahren der Absorberstäbe nach oben gerichtet. Die Wand wird also angehoben. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch die Reibungskraft der nach oben ausweichenden Kugeln beim Eindringen der Stäbe.

5.2 Coreboden

Auf den Coreboden lastet das gesamte Gewicht der Brennelemente mit ca. 13,5 Mp, ein Teil vom Gewicht des durch die einfahrenden Stäbe angehobenen Seitenreflektors und die gesamten Eindrückkräfte der Absorberstäbe. Die maximalen Flächenbelastungen am Coreboden erreichen Werte bis zu $3,5 \text{ kp cm}^{-2}$ bei ausgegastem Graphit und ohne Kühlgasdruckabfall.

Im späteren praktischen Reaktorbetrieb werden jedoch nur mittlere Werte von ca. $1,5 \text{ kp cm}^{-2}$ auftreten (s. Abb. 8), z. B. bei Kaltunterkritischfahren des Cores. Der Reibwert beträgt dann $\mu 0,13$. Um die zentrale Kugelabzugsöffnung herum nimmt die Bodenbelastung ab. Hier können die Kugeln in das Abzugsrohr hinausweichen.

Als differentielle Belastung einer einzelnen Kugel wurden am Coreboden Maximal-Kräfte von 400 kp gemessen. Diese Belastungspulse sind jedoch sehr schmal, denn bereits eine nur geringfügige Bewegung der Schüttung verlagert die Kraftübertragung auf andere Kugeln.

6. Modellversuche

Die Wand- und Bodenbelastungen des THTR-300 MWe wurden in 1:10 und 1:6 maßstabgetreu verkleinerten Modellen gemessen. Abb. 9 zeigt die

Gesamtansicht des 1:6-THTR-Coremodell-Versuchsstandes.

6.1 Corewand

Die Corewand bestand aus einem zusammenhängenden Plexiglaszylinder. In ihr waren die Störmulden, die eine Strukturbildung der Kugeln an der Wand verhindern, eingearbeitet. Die Meßdosen mit den frei angebrachten Meßflächen waren über die gesamte Corehöhe verteilt. Die rechteckigen Meßflächen waren maßstäblich in Form und Größe einem der Graphitblöcke, aus denen der gesamte Seitenreflektor aufgebaut ist, nachgebildet (s. Abb.10). An diesen Flächen, die im Mittel von 18 Kugeln belastet wurden, wurde die integrale Kraft auf einen Graphitstein gemessen. Um die Kraft einer einzelnen Kugel auf die Corewand messen zu können, war statt der rechteckigen Meßfläche ein Stößel von 0,416 Kugeldurchmesser durch die Behälterwand in das Core geführt worden (s. Abb. 11). Der geringe Durchmesser gewährleistete, daß der Stößel maximal nur von einer Kugel belastet werden konnte.

Zur Messung der vertikalen Kräfte im Seitenreflektor war die Corewand gegenüber dem Coreboden verschiebbar. Die Wand stand auf drei Meßwertaufnehmern, mit denen die Kräfte erfaßt wurden.

6.2 Coreboden

Der Coreboden der Modelle bestand aus einem Lochblech, wie Abb. 11 zeigt, dessen Bohrungen und Lochteilungen denen im THTR entsprachen. Zur Messung der differentiellen Kraftmessungen waren hier die gleichen Meßstößel installiert wie in der Corewand.

Die Meßflächen zur Erfassung der integralen Kraft waren den sechseckigen Flächen der Graphitbodensteine aus dem 1:1-Core geometrisch ähnlich nachgebildet. Die 6 Meßpositionen waren hier ebenfalls über den gesamten Coreradius verteilt.

7. Versuchsdurchführung

Aus Zeiteinsparungsgründen wurden die Kugeln in den Modellen mit 6.750 Stück pro Minute umgewälzt. Im Reaktor beträgt die Umwälzrate 500 Kugeln pro Stunde. Zur Messung des statischen Kugeldrucks auf die Corewand wurden über $4 \cdot 10^6$ Kugeln umgewälzt. Diese hohe Umwälzrate war erforderlich, da der Kugeldruck auf Boden und Wand großen statistischen Schwankungen unterlag.

Zur Messung der differentiellen Kräfte müssen z. B. über 50.000 Kugeln umgewälzt werden, ehe eine Kugel, die sich im unteren Teil des Cores an der Wand befindet, um den Betrag ihres Durchmessers weiter absinkt und an dieser Stelle eine neue Information registriert werden kann. Da die Messungen quasistatischer Natur sind, wurden DMS-Kraftmeßdosens eingesetzt. Um eine Beeinflussung der Messungen zu vermeiden, müssen Kraftaufnehmer mit hoher Stufigkeit eingesetzt werden.

In den Modellen wurden die Experimente teilweise mit Graphitkugeln so wie im THTR durchgeführt. Zur Variation des Parameters Reibung wurden auch noch Tonkugeln verwandt. Vom spezifischen Gewicht her liegen sie sehr nahe bei dem Graphit mit $\gamma_{\text{Graphit}} = 1,6 \text{ p cm}^{-3}$ zu $\gamma_{\text{Ton}} = 2,0 \text{ p cm}^{-3}$. In unglasierter Ausführung haben die Tonkugeln einen Reibungskoeffizienten, der dem des ausgegasten Graphits bei niedriger Temperatur von $\mu = 0,6$ entspricht. Mit einer Glasur überzogen, beträgt der Reibwert $\mu = 0,18$ ähnlich wie bei Graphit unter normaler Atmosphäre.

Der Einfluß des spezifischen Gewichtes auf die Corewand- und Bodenkräfte wurde mit Hilfe des Kühlgasdruckabfalles ermittelt. Es wurde, wie im Reaktor, ein Gas (in diesem Fall Luft) durch den Kugelhaufen gedrückt, dessen Druckabfall an der Kugelschüttung proportional der scheinbaren Erhöhung des spezifischen Gewichtes ist.

8. Modellgesetz

Die Kräfte auf die Corewand und den Boden im Reaktor sind direkt proportional den gemessenen Werten in den Modellen multipliziert mit dem Quotienten der Modellverhältnisse in der 3. Potenz, dem sogenannten Maßstabsexponenten (Abb. 13). Um bei der Angabe des Druckes die Bezugsflächen in cm^2 beibehalten zu können, ist dieser Wert durch 10^2 zu dividieren.

$$\frac{F_{\text{Reaktor}}}{F_{\text{Modell}}} = \left(\frac{m_{\text{Reaktor}}}{m_{\text{Modell}}} \right)^n \quad (4)$$

F_{Reaktor}	Kraft im Reaktor
F_{Modell}	Kraft im Modell
$m_{\text{Reaktor}} = \frac{1}{1}$	Modellverhältnis Reaktor
$m_{\text{Modell}} = \frac{1}{10} \text{ oder } \frac{1}{6}$	Modellverhältnis Modell
n	= 3 oder 1 Maßstabsexponent bei Kräften oder Drücken

Das spezifische Gewicht der Kugeln geht mit dem Exponenten $\alpha = 1,2$ in das Umrechnungsglied ein. Der Ansatz erweitert sich um den Ausdruck

$$\left(\frac{\gamma_{\text{Reaktor}}}{\gamma_{\text{Modell}}} \right)^\alpha \quad (5)$$

γ_{Reaktor} Spezifisches Gewicht der Reaktorbrennelemente
 γ_{Modell} Spezifisches Gewicht der Modellkugel
 $\alpha = 1,2$ Exponent des spezifischen Gewichtes

Für den Term der Reibung wurde empirisch ein Exponent von $\beta = 0,28$ gefunden. Unter Berücksichtigung dieses Parameters erweitert sich der Ansatz um den Ausdruck

$$\left(\frac{\mu_{\text{Reaktor}}}{\mu_{\text{Modell}}} \right)^\beta \quad (6)$$

μ_{Reaktor} Reibungskoeffizient der Kugeln im Reaktor
 μ_{Modell} Reibungskoeffizient der Kugeln im Modell
 $\beta = 0,28$ Exponent des Reibungsterms

Als Produktansatz der einzelnen Formalismen (4), (5) und (6) ergibt sich folgendes Modellumrechnungsgesetz mit

$$\frac{F_{\text{Reaktor}}}{F_{\text{Modell}}} = \left(\frac{m_{\text{Reaktor}}}{m_{\text{Modell}}} \right)^n \cdot \left(\frac{\gamma_{\text{Reaktor}}}{\gamma_{\text{Modell}}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{\mu_{\text{Reaktor}}}{\mu_{\text{Modell}}} \right)^\beta \quad (7)$$

Die Gültigkeit dieses Ansatzes wurde in den Coremodellen und an einem Coreausschnitt, einer sogenannten Corezelle im Maßstab 1:1, recht gut bestätigt.

THTR

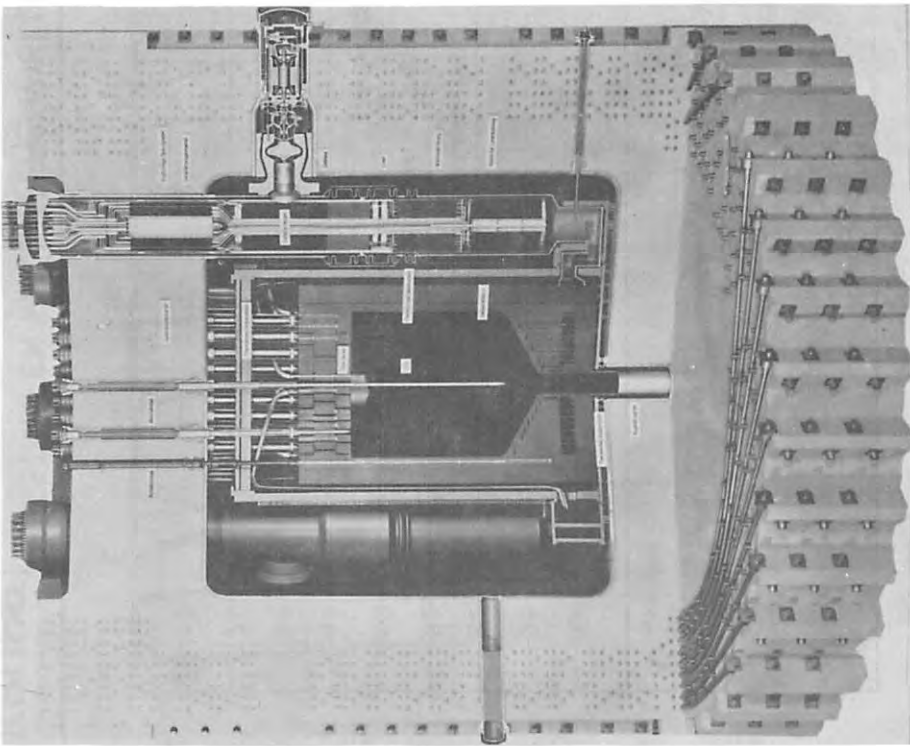
70.6-3

Schnittmodell THTR
Druckbehälter

Sectional View of THTR
Pressure Vessel

Abb. 1

BBC/KRUPP



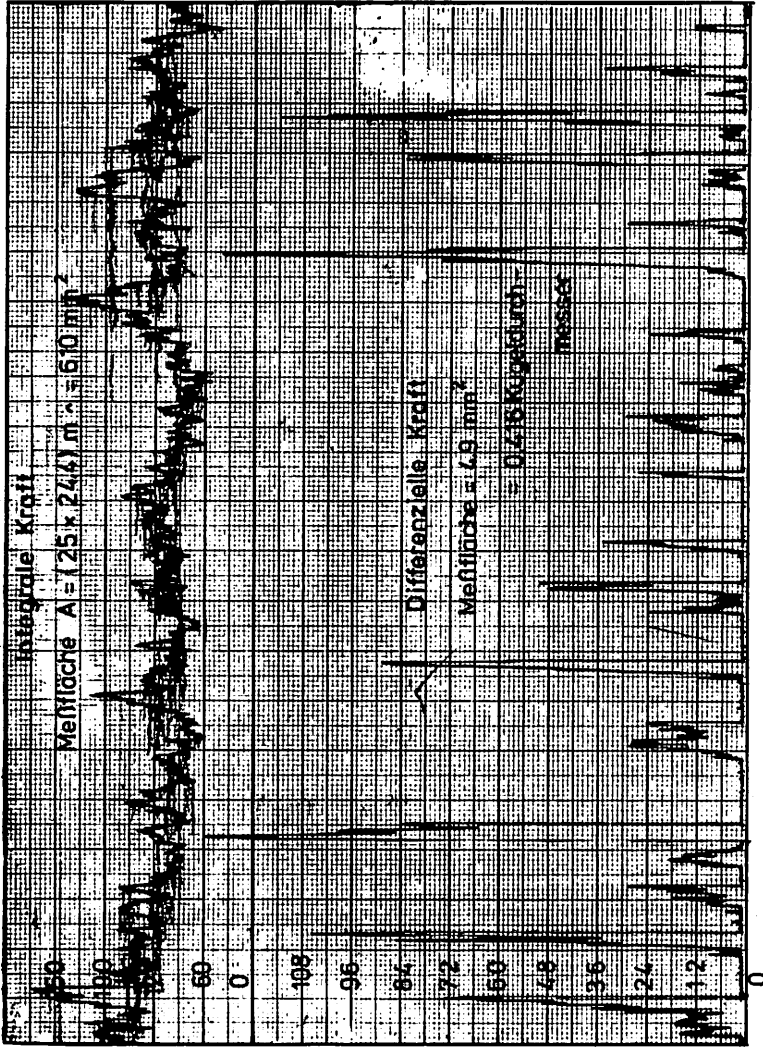


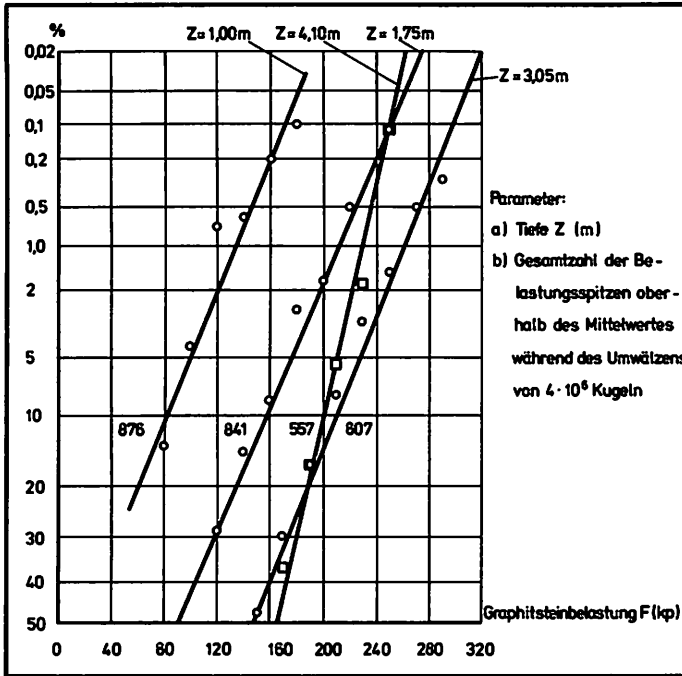
Abb. 2

MESSTREIFEN MIT DIFFERENZIELLER UND
INTEGRALER COREWANDBELASTUNG

BBC / KRUPP

THTR

71.15-2

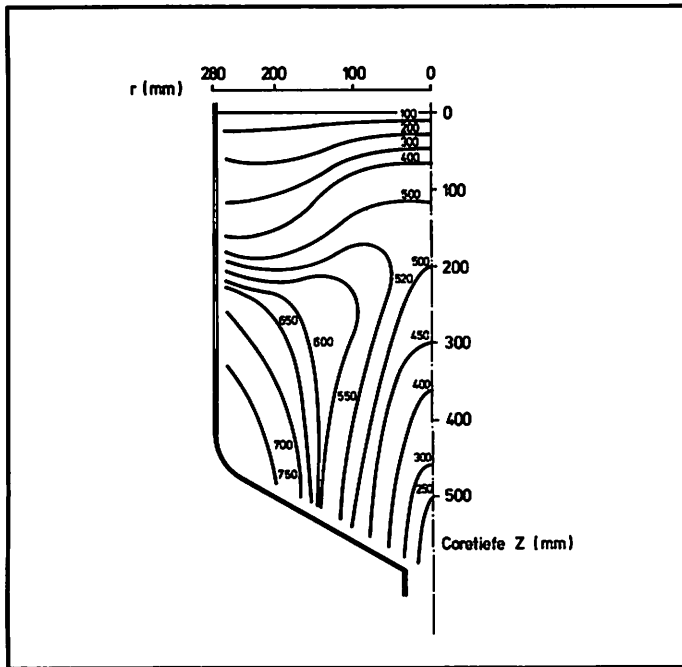


THTR
 71.15-3

**HÄUFIGKEIT IN %
 DER BELASTUNGEN
 AUF EINEM GRAPHIT-
 STEIN IM THTR**

Abb. 3

BBC / KRUPP



THTR
 71.15-4

**ISODYNEN IM 1:10
 THTR 300 MW CORE-
 MODELL**

Abb. 4

BBC / KRUPP

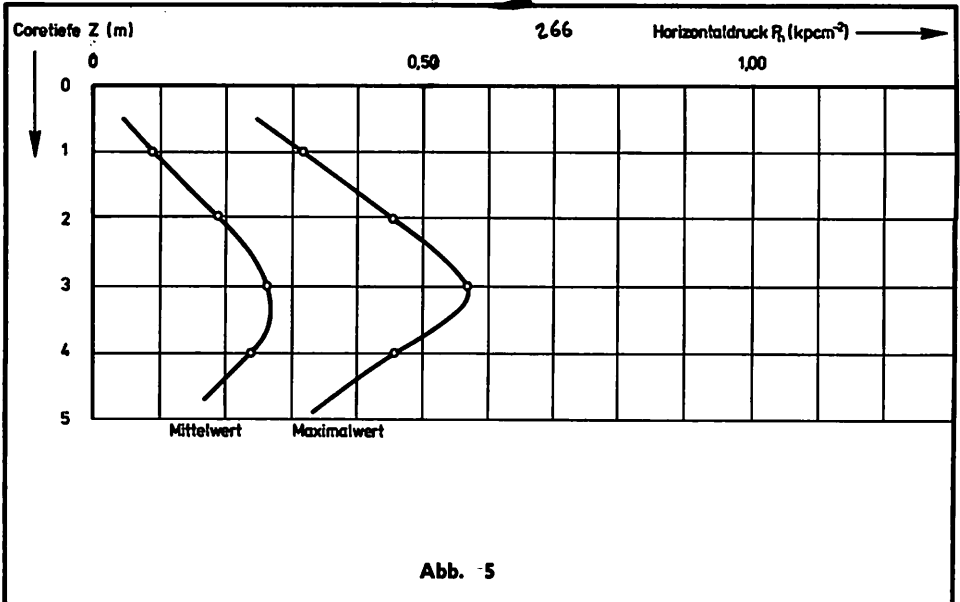


Abb. -5

BBC/KRUPP

HORIZONTALDRUCK P_h AUF DIE COREWAND
ALS FUNKTION DER TIEFE

THTR

71.15-5

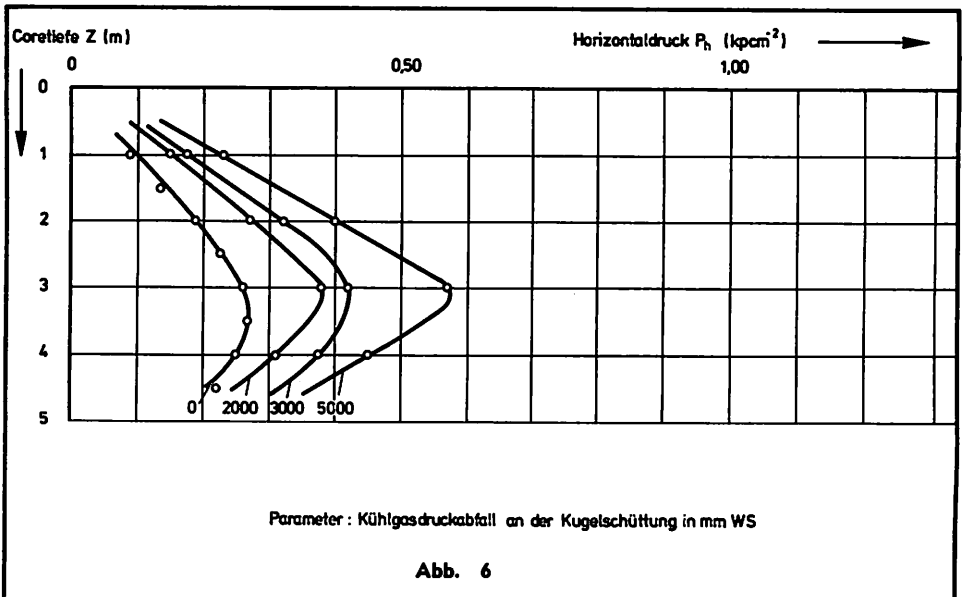


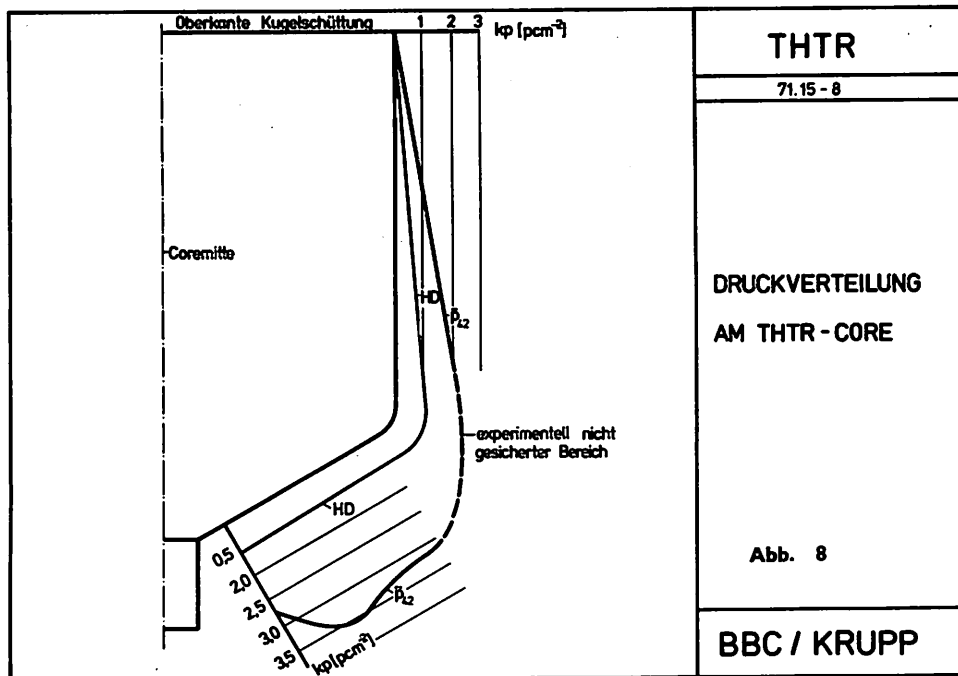
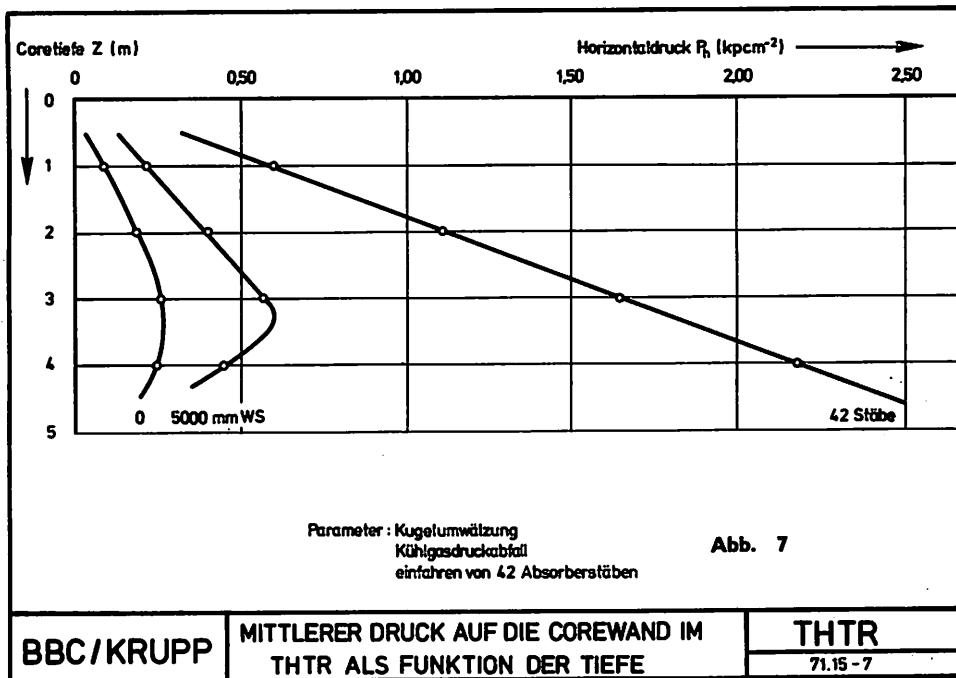
Abb. 6

BBC/KRUPP

MITTLERER DRUCK AUF DIE COREWAND IM
THTR ALS FUNKTION DER TIEFE

THTR

71.15-6



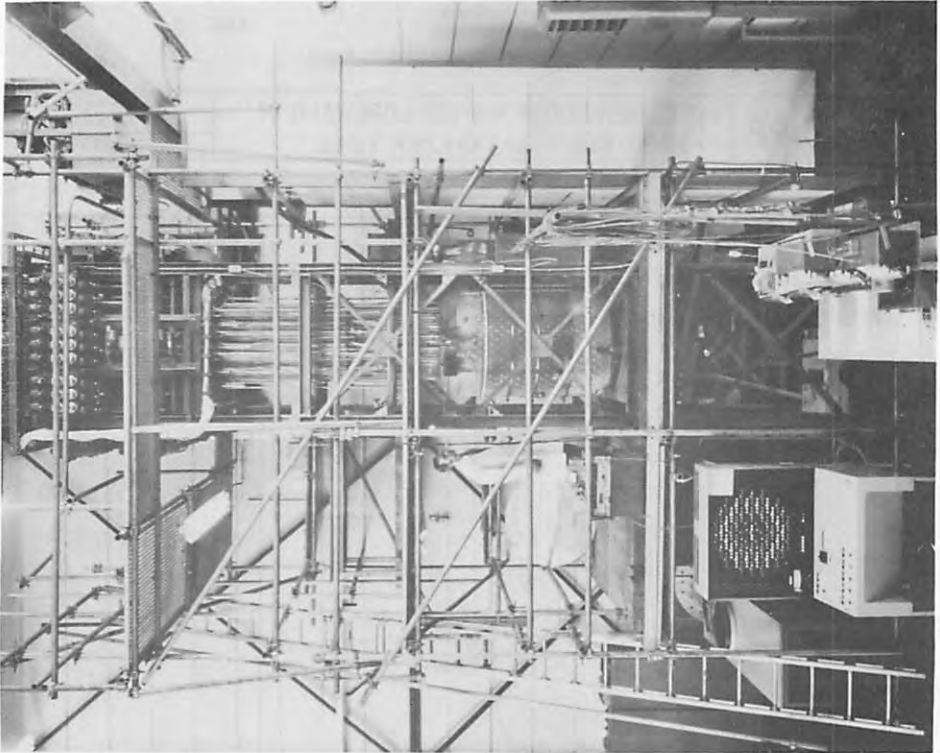
THTR

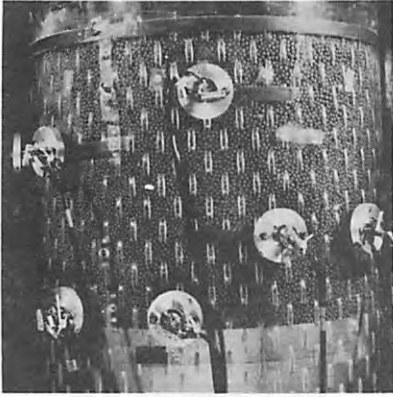
71.15 - 9

**VERSUCHSSTAND DES
1:6 THTR 300 MW_{eI}
Coremodells**

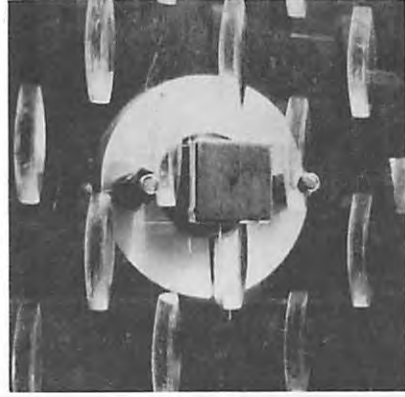
Abb. 9

BBC / KRUPP





a) Meßstellen an der Corewand



b) Meßfläche in der Corewand zur
Messung der Graphitsteinbelastung

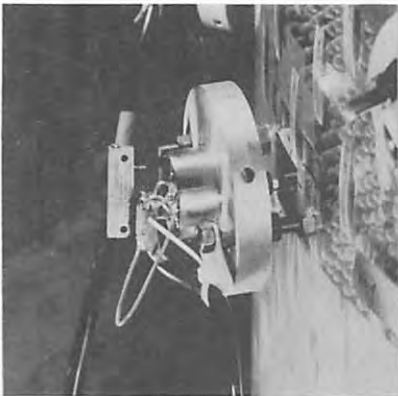
Abb. 10

BBC/KRUPP

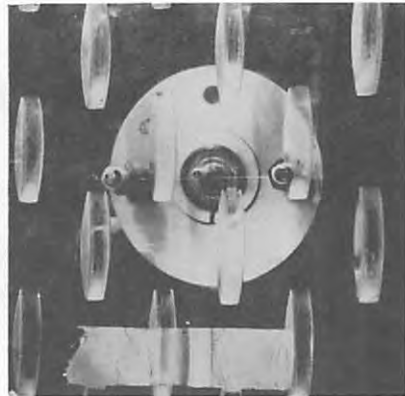
MESSTELLEN AM 1:10-300MW-THTR-COREMODELL

THTR

71.15-10



a) Meßstelle zur Wandkraftmessung



b) Meßfläche in der Core-Wand zur Bestimmung
der differentiellen Kraft

Abb. 11

BBC/KRUPP

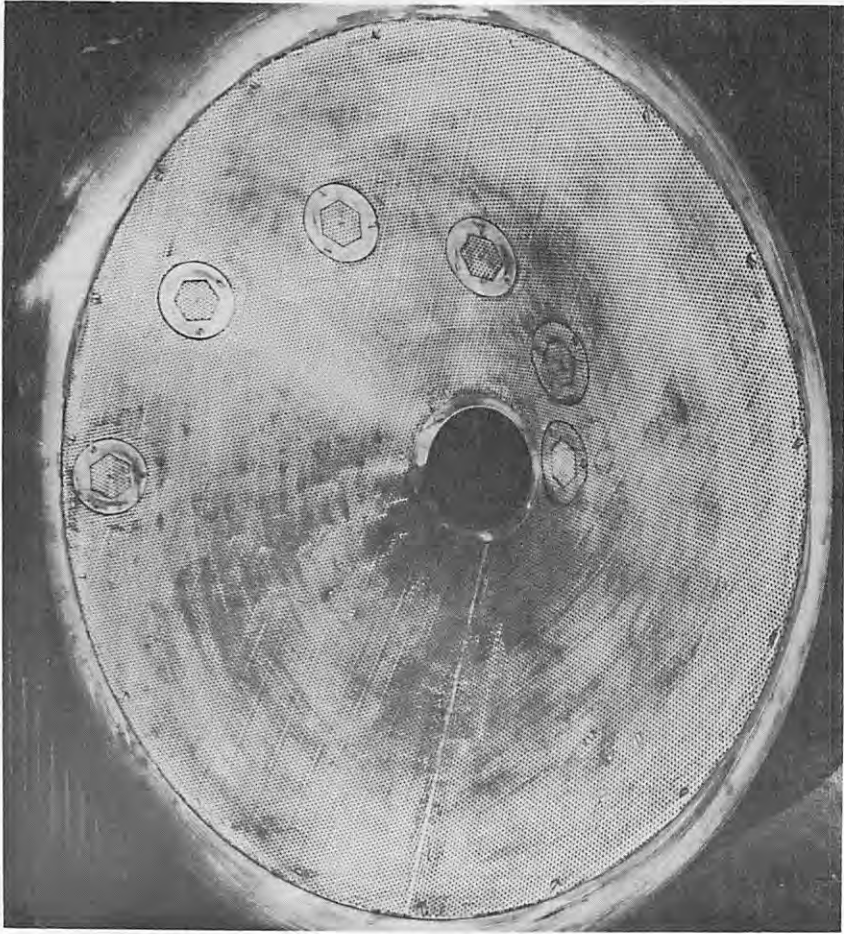
MESSTELLEN AM 1:10-300MW-THTR-COREMODELL

THTR

71.15-11

Anordnung der Bodenkraftmessstellen

Abb. 12



THTR

715-12

MESSTELLEN AM 1:10-300MW-THTR-COREMODELL

BBC / KRUPP

DISCUSSION

G. W. G. KLEIST, Germany

Q The stresses calculated are very small (ca. 3.5 kp/cm²). Is it worthwhile to perform calculations which give stresses far below the UCS of graphite ?

G. MERTEN, Germany

A Die angegebenen Werte gelten nur unter bestimmten Voraussetzungen.

1. Mittelwert über die Oberfläche eines ganzen Graphitsteines.
2. Ohne Kühlgasdruckabfall.
3. Bei hohem Reibungswert $\mu = 0,6$.

Die Belastung einer einzelnen Kugel auf ihre Unterlage ist wesentlich grösser. Es treten hierbei grössere Flächenbelastungen auf.

W. M. VOGGENREITER, Germany

Q Inwieweit ist die Gefahr einer Brückenbildung im oberen Bereich des Kugelabzugsrohres vorhanden ?
Welche Massnahmen könnte man bei Reaktorbetrieb dann ergreifen ?

G. MERTEN, Germany

A Bei dem gewählten Durchmesser der Kugelabzugsöffnung können sich keine Kugelbrücken aufbauen. Damit beantwortet sich auch der zweite Teil der Frage.

L. MEYER, Switzerland

Q Welches ist der Einfluss der Einfahrtgeschwindigkeit der Absorberstäbe auf die resultierenden Beanspruchungen ?

G. MERTEN, Germany

A Der Einfluss der Stabeinfahrtgeschwindigkeit auf die Brennelemente und auf die Corekonstruktion wurde in dem Bereich, wie er im späteren Reaktorbetrieb wirklich vorgeesehen ist, untersucht (bis max. 1 m sec⁻¹). Ein messbarer Einfluss wurde nicht gefunden.

V. LEHMANN, Germany

Q Haben Sie bei Strömungsversuchen am Modellcore je irgendwelche Schwingungsprobleme gefunden und wenn ja, welche Auswirkung haben diese ?

A

G. MERTEN, Germany

In den Modellen wurden während des Strömens von Kühlgas keine Schwingungserscheinungen entdeckt.

Q

H. SCHUSTER, Germany

In die Gleichung zur Umrechnung der an einem Modell gemessenen Kräfte in Kräfte, die am Reaktor auftreten, geht der Reibungskoeffizient mit einem sehr kleinem Exponenten ein. Gibt es dafür eine Erklärung ?

A

G. MERTEN, Germany

Eine eindeutige Erklärung ist mir nicht bekannt. Gleiche Erfahrungen wurden aber auch in anderen technischen Bereichen gemacht, z. B. in der Silotheorie.

Eine Erklärung wäre vielleicht die vorherrschende Mischreibung:

- Stoffreibung,
- Gleitreibung,
- Rollreibung,

z. B. dürfte der Anteil der Rollreibung einen reduzierenden Einfluss haben.

Q

A. DOMANN, Germany

Gelten die Ausführungen über ein 3-maliges Einfahren der Core-Stäbe für ein Ein- und Ausfahren der Stäbe in ihrer ganzen Länge ?

A

G. MERTEN, Germany

Die Angabe gilt für das Einfahren der Absorberstäbe über ihre gesamte Länge.

Q

H. G. SCHAFSTALL, Germany

Sie haben die Kräfte angegeben, die durch das Einfahren eines oder aller Stäbe in den Kugelhaufen auftreten. Wie ändern sich die Kräfte durch das mehrmalige Einfahren aller Stäbe in den Kugelhaufen ?

A

G. MERTEN, Germany

Die Stäbe können häufiger nacheinander in die Kugelschüttung einfahren, ohne dass zwischendurch Kugeln umgewälzt werden und unzulässig hohe Belastungen auftreten würden. Jedoch können die Stäbe nicht beliebig häufig einfahren; 2- bis 3-mal nacheinander.