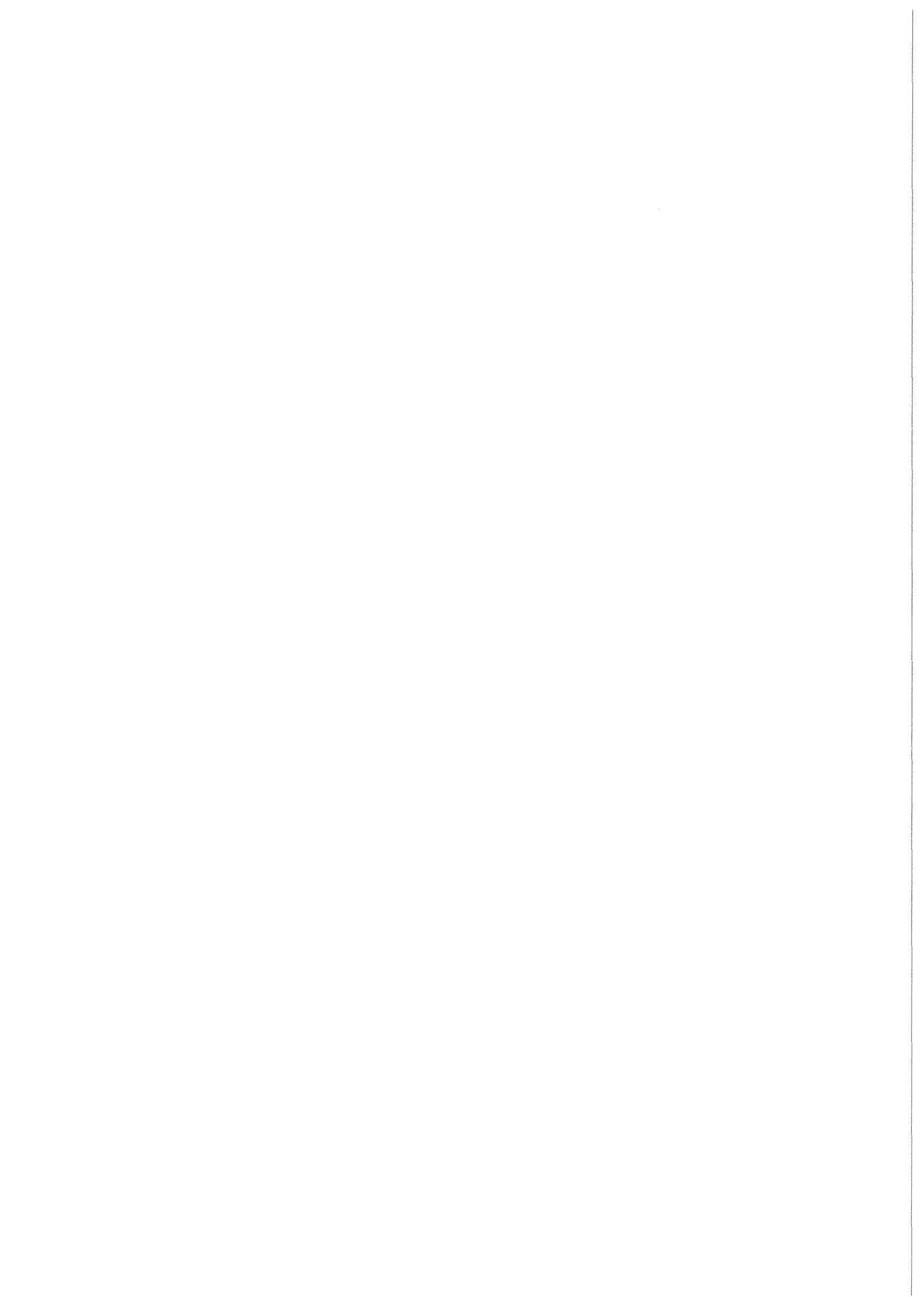


**KfK 4434
Juni 1988**

Auslegungsstudie über wasser- und gasgekühlte Outboard-Abschirmblankets für NET

**E. Bojarsky, U. Fischer, G. Reimann, H. Reiser,
R. Brook, R. Diethelm, S. E. Schweizer
Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Kernfusion**

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Kernfusion

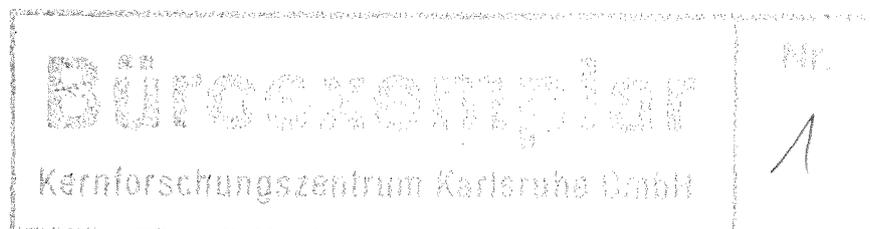
KfK 4434

Auslegungsstudie über wasser- und gasgekühlte Outboard- Abschirmblankets für NET

E. Bojarsky, U. Fischer, G. Reimann, H. Reiser,
R. Brook *, R. Diethelm *, S.E. Schweizer *

* Firma Gebr. Sulzer, Winterthur

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe



Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Inhaltsverzeichnis:	Seite
1 Einleitung	1
2 Randbedingungen	1
3 Wassergekühlte Varianten	3
3.1 Untersuchte Konzepte	3
3.2 Auslegungsdaten	5
3.3 Ausführung des Wasserrohrkonzeptes	7
3.4 Ausführung des Wasserkastenkonzepthes	9
3.5 Diskussion der Lösungen	12
4 Heliumgekühlte Variante	13
4.1 Auslegung	13
4.2 Konzeptentwurf	14
4.3 Beurteilung der Lösung	16
5 Vergleich der Kühlmittelvarianten	17
6 Referenzen	19

Zusammenfassung :

Das Kernforschungszentrum Karlsruhe hat mit der Kommission der Europäischen Gemeinschaften die Durchführung von Arbeiten zur Entwicklung von Abschirmblankets für NET vereinbart. Zu untersuchen waren wassergekühlte Abschirmblanketkonzepte und - als Backup-Lösung - eine Version mit Heliumkühlung. Als Grundlage galt die NET-Normalversion gemäß dem Stand Ende 1985.

Der Bericht enthält die Ergebnisse der Studie. Diese wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Sulzer, Winterthur, erstellt und befaßt sich mit den Outboardblankets.

Es wird gezeigt, daß wassergekühlte Blankets relativ leicht hergestellt werden können. Im Betrieb sind die Beanspruchungen des Materials infolge Temperaturgradienten und Kühlmitteldruck gering. Es besteht ein großes Potential, durch Zusatz von Lithiumsalzen zum Kühlmittel Tritium zu erzeugen.

Dagegen führt Heliumkühlung zu gewissen - wohl lösbaren - Schwierigkeiten bei der Auslegung und zu einem höheren Fertigungsaufwand.

Design study on water and gascooled outboard shield blankets for NET

Abstract :

The Karlsruhe Nuclear Research Center entered into an agreement with the Commission of the European Communities on execution of development work geared to shielding blankets for NET. The concept to be investigated concerned water cooled shielding blankets and, as a backup solution, a variation with helium cooling. The NET standard version as of late 1985 was considered as the basis of the investigations.

The results of the study prepared in cooperation with the Sulzer company, Winterthur, and relating to the outboard blanket are contained in this report, which shows that it is relatively easy to fabricate water cooled blankets. The stresses acting on the material during operation as a result of temperature gradients and coolant pressure are low. By addition of lithium salts to the coolant a great potential of tritium generation is offered.

On the other hand, helium cooling is associated with some difficulties in design and with higher expenditure in fabrication. However, these difficulties can probably be overcome.

1 Einleitung

Es wird davon ausgegangen, daß NET während der Physikphase nicht sinnvoll mit DEMO-relevanten, das heißt für Leistungserzeugung geeigneten Brutblankets bestückt werden kann, und daß auch während der nachfolgenden Technologiephase nur einzelne Blanketpositionen mit Testbrutblankets besetzt sein werden. Das freie Blanketvolumen muß durch Abschirmblanketsegmente ausgefüllt werden, die primär dazu geeignet sein müssen, die nach außen dringende Neutronen- und Gamma-Strahlung auf zulässige Werte zu verringern. Die Konstruktion der Blanketsegmente soll einfach und robust sein. Die Herstellung soll mit heute zur Verfügung stehenden Mitteln leicht möglich sein.

In Zusammenarbeit mit der Firma Sulzer, Winterthur, wurde eine Studie über die Auslegung und Fertigung der Abschirmblanketsegmente für die Outboardseite von NET durchgeführt. Die Studie erstreckt sich auf die neutronenphysikalische, thermohydraulische und thermomechanische Auslegung sowie auf Überlegungen zur Herstellung und Prüfung der Komponenten. Als Kühlmittel wurde einerseits Wasser bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur und andererseits Helium in Betracht gezogen.

Das Fazit der Studie ist, daß wassergekühlte Blankets relativ leicht hergestellt werden können. Die Materialbeanspruchungen während des normalen Betriebs sind gering. Dagegen führt Heliumkühlung wegen der zwangsweise sehr viel größeren Kühlmittelaufheizspanne zu gewissen Schwierigkeiten bei der Auslegung, die aber überwindbar sein sollten. Der Fertigungsaufwand ist wesentlich höher als bei den wassergekühlten Versionen.

2 Randbedingungen

Als Grundlage der Studie wurden Bedingungen vorgegeben, von denen die wichtigsten hier aufgelistet sind:

- Als Basis für die Auslegung der Blankets dient die Normalversion von NET nach dem Stand von Ende 1985 /1/ mit Doppelnullkonfiguration und 48 7,5°-Segmenten. Die mittlere Neutronenbelastung der Ersten Wand soll 1 MW/m², die Fusionsleistung 600 MW betragen.

- Die Abschirmblankets werden - wie das für spätere Brutblankets geplant ist - innerhalb von segmentförmigen geschlossenen Kästen angeordnet, die aus einem Erste-Wand-Segment, radial verlaufenden Seitenwänden und der tragenden Rückwand bestehen. Die Ausbildung der Segmengtkästen einschließlich der Ersten Wand ist nicht Bestandteil der Studie.

Bei den wassergekühlten Blanketversionen soll die Erste Wand ebenfalls durch Wasser gekühlt werden. Referenzkonzept ist eine Erste Wand mit strahlungsgekühlten Graphitziegeln und poloidal verlaufenden Kühlrohren /2, 3/. Das Kühlsystem der Blankets soll unabhängig vom Erste-Wand-Kühlsystem sein.

Das heliumgekühlte Abschirmblanket soll mit einer heliumgekühlten Ersten Wand versehen werden. Entsprechend dem KfK-Entwurf für ein heliumgekühltes Brutblanket /3/ wird die Wärme durch toroidal verlaufende Kühlrohre abgeführt. Erste-Wand-Kühlrohre und Blanket werden nacheinander vom Kühlmittel durchströmt.

- Referenzmaterial für alle Teile des Blankets und der Ersten Wand ist der Stahl AISI 316L.

Die Materialbeanspruchung wird nach dem Abschnitt NB des ASME-Code /4/ beurteilt. Wenn Vergleichsspannungen berechnet werden, gilt für die maximal zulässigen Werte:

$\sigma_{zul} = S_m$	für allgemeine primäre Membranspannung
$\sigma_{zul} = S_m \cdot 1,5$	für primäre Membran- plus Biegespannungen
$\sigma_{zul} = S_m \cdot 3,0$	für Spannungsbereich aus Überlagerung der primären und sekundären Spannungen (ohne lokale Spitzen)

Die S_m -Werte für AISI 316L können /4/ entnommen werden. Sie sind in Tabelle 1 zusammen mit weiteren Stoffwerten aufgeführt.

Die Anzahl der zulässigen Lastwechsel N als Funktion der Ausschlagspannung S_a soll mit Hilfe von Abbildung 1 /4/ bestimmt werden.

Abbildung 1 gilt für Raumtemperatur. Für Temperatur T /°C/ ist einzusetzen

$$S_a = \frac{E(20^\circ\text{C})}{E(T)} K \cdot \frac{SI}{2}$$

mit

E Elastizitätsmodul (N/mm²)

K Formfaktor /4/

SI Differenz zwischen maximaler und minimaler Spannung

Tabelle 1: Materialdaten für AISI 316L
Klasse 1 (/4/, Div. 1, Appendix I)

Temperatur /°C/	21	93	204	316	427
S _m -Wert /N/mm ² /	119	119	107	93	85
Elastizitätsmodul E /N/mm ² /	195·10 ³		183·10 ³		166·10 ³
Wärmeleitfähigkeit λ /W/mK/	15				
Wärmeausdehnungs- Koeffizient α /K ⁻¹ /	16·10 ⁻⁶				

3 Wassergekühlte Varianten

3.1 Untersuchte Konzepte

Wasser ist von vielen Blickpunkten her das ideale Kühlmittel für die NET-Abschirmblankets. Infolge seiner Eigenschaft, Neutronen zu moderieren, ist ein hoher Wasseranteil im Abschirmblanket zulässig; trotzdem wird im Permanent-schild und in den Wänden der Supraleitenden Magnete eine ausreichende Abschirmwirkung erreicht. Ein hoher Wasseranteil ist vorteilhaft hinsichtlich der zu manipulierenden Gewichte, hinsichtlich der aktivierten Stahlmassen und der Nachwärmeentwicklung. Schließlich besteht die Option zum Erbrüten von Tritium - worauf später eingegangen wird.

Aus diesen Gründen wurden im Rahmen dieser Studie zwei Blanketkonzepte mit hohem Wasseranteil untersucht, nämlich ein Rohrkonzept und ein Kastenkonzept.

Beim **Rohrkonzept** besteht das Blanket aus poloidal verlaufenden Rohren, die - zur Erzielung einer besseren Bedeckung entsprechend der örtlichen Breite des Kastens - jeweils aus wenigstens drei Rohrstücken mit verschiedenen Durchmessern zusammengesetzt sein können. Abbildung 2 zeigt einen Vorschlag für die

Auslegung der Rohre in der Torusmittelebene. Es wurde angenommen, daß das Wasser jeweils in einem Rohr der ersten Reihe nach unten und in einem Rohr der dritten Reihe zurückströmt. Ebenso soll mit Reihe zwei und vier verfahren werden.

Das gesamte Blanketsegment wird von einem Hauptkühlsystem versorgt. Zur Beherrschung eines Ausfalles dieses Systems ist ein Notkühlsystem erforderlich, aus dem alle Blanketrohre einzeln versorgt werden (Eintritt in erste und dritte Rohrreihe, Austritt aus zweiter und vierter Reihe).

Als Alternative zu dem Rohrkonzept wurde ein **Kastenkonzept** ausgearbeitet. Das Blanketsegment besteht hier aus einer geschlossenen kastenförmigen Stahlkonstruktion. Abbildung 3 zeigt den Querschnitt in Torusmittelebene. Poloidal verlaufende Zwischenwände im Innern dienen zur Versteifung gegen Kräfte durch den Kühlmitteldruck und gegen die elektromagnetischen Kräfte bei Plasma-Zusammenbrüchen sowie zur Lenkung des Kühlwasserstromes. Vorgesehen ist eine vierfache Durchströmung in poloidaler Richtung. Das Wasser strömt durch den vorderen Kanal nach unten; es wird nach oben, dann wieder nach unten umgelenkt und fließt schließlich im hintersten Kanal nach oben zu den Austrittsleitungen. Diese Strömungsführung wurde vorgesehen, um zu geringe Wassergeschwindigkeiten zu vermeiden, die zu örtlichem Stillstand der Strömung oder Strömungsumkehr führen könnten. Bei Ausfall des Kühlsystems soll die Nachwärme wieder durch ein Notkühlsystem abgeführt werden. Das Wasser wird direkt in die vorderen Kühlkanäle eingeleitet. Nach dem Austritt aus dem Blanket soll das Notkühlwasser durch einen Kondensator/Kühler geleitet werden, der den im Falle eines großen Lecks entstehenden Dampf beseitigt.

Abgesehen von der Unterteilung in die genannten beiden Konzeptvarianten ergaben sich im Verlauf der Studie noch verschiedene Auslegungsvarianten. Es trat nämlich immer mehr die Überlegung in den Vordergrund, das Kühlmittel Wasser durch eine wässrige Lithiumsalzlösung zu ersetzen. So kann ohne Umbauarbeit ein Abschirmblanket als Tritium-Brutblanket betrieben werden. Das Potential und die Probleme eines solchen Brutblankets wurden in /5/ ausführlich behandelt. Es wurde gezeigt, daß die Tritiumbrutrate mit derjenigen der besten Flüssigmetall- und Feststoff-Brutblanketkonzepte vergleichbar ist.

Die Tritiumbrutrate in der wässrigen Lithiumsalzlösung kann noch weiter erhöht werden, wenn in die vorderen Kühlkanäle des Blanketkastens Berylliumplatten als Neutronenmultiplikator eingebracht werden. Die Platten - gewählt wurden zwei Schichten von je 50 mm Beryllium - werden durch die Lithiumsalzlösung

gekühlt. Auf diese Weise wird eine Tritiumbrutrate erreicht, die die Werte aller andern Konzepte deutlich übertrifft /5/.

Aus allen möglichen Kombinationen von Blanketkonzept- und -auslegungsvarianten wurden schließlich folgende vergleichende Konstruktions- und Auslegungsstudien durchgeführt:

Konstruktive Gestaltung:

- Rohrblanket mit H₂O-Kühlung
- Kastenblanket mit H₂O bzw. H₂O/LiOH-Kühlung
- Kastenblanket mit H₂O/LiOH-Kühlung und Beryllium

Auslegungsrechnungen:

- Kastenblanket mit H₂O-Kühlung
- Kastenblanket mit H₂O/LiOH-Kühlung
- Kastenblanket mit H₂O/LiOH-Kühlung und Beryllium

3.2 Auslegungsdaten

Es wurden umfangreiche Neutronikrechnungen durchgeführt /5/. Dabei lag das Hauptgewicht auf dreidimensionalen Monte-Carlo-Rechnungen. Zugrunde gelegt wurde das kastenförmige Blanket gemäß Abbildung 3 mit einer radialen Tiefe des Blanketkastens von 350 mm. Im Rechenmodell berücksichtigt wurden die gekühlten Seitenwände des Segmentkastens mit der Kupferauflage und die Erste Wand. Es wurde angenommen, daß die chemische Zusammensetzung des Kühlmittels im Blanket und in der Ersten Wand identisch ist.

Die radiale Wärmequellverteilung und die Gesamtleistung pro Blanketsegment wurde für folgende Varianten durchgerechnet:

- a) Reines Wasser als Kühlmittel. Innerhalb des Blanketkastens beträgt die volumetrische Stahl-/Wasserverteilung 0,15/0,85. Der radiale Verlauf der Wärmequellverteilung in der Torusmittelebene ist in Abbildung 4 dargestellt.
- b) Als Kühlmittel wird eine wässrige LiOH-Lösung mit 127 g LiOH/l mit 60 % ⁶Li-Anreicherung im LiOH angenommen (Dies entspricht nahezu der Sättigungs-

dichte bei 20 °C). Die übrigen Annahmen entsprechen denen unter a). Die Leistungsdichten zeigt Abbildung 5.

- c) Kühlmittel ist wieder die LiOH-Lösung aus b). Innerhalb des Blanketkastens, nahe der zum Plasma gerichteten Seite, sind zwei Schichten von Berylliumblöcken von je 50 mm Dicke in der geometrischen Anordnung gemäß Abbildung 7 vorgesehen. Der sich ergebende radiale Leistungsdichteverlauf ist in Abbildung 6 dargestellt.

Für die Berechnung der Gesamtleistung der Blanketsegmente wurden die aus früheren Rechnungen bekannten geometrischen Verhältnisse des gasgekühlten Brutblankets /6/ angenommen.

In Tabelle 2 werden die wichtigsten thermohydraulischen Daten für je ein Outboard-Abschirmblanketsegment der oben aufgeführten Auslegungsvarianten a) bis c) zusammengestellt. Die Kühlmitteltemperaturen werden so gewählt, daß sich kleine thermische Spannungen und geringe zyklische Belastungen ergeben. Die Kühlmittelzustände sind ähnlich denen in normalen Forschungsreaktoren, zum Beispiel vom Typ des Karlsruher FR2.

Tabelle 2: Auslegungsdaten für das wassergekühlte Outboard-Blanketsegment

	H ₂ O	H ₂ O + LiOH	H ₂ O + LiOH + Be
Leistung	5,3 MW	5,6 MW	5,4 MW
Kühlmittel Eintrittstemperatur	50 °C	50 °C	50 °C
Kühlmittel Austrittstemperatur	80 °C	80 °C	80 °C
Kühlmitteldurchsatz	42 kg/s	45 kg/s	43 kg/s
Systemdruck (absolut)	7 bar	7 bar	7 bar

Zu Tabelle 2 ist zu bemerken, daß für diese ersten Auslegungsrechnungen die für die thermodynamische Auslegung relevanten Stoffwerte von Wasser auch für wässrige Lithiumsalzlösungen angenommen wurden.

Die Abschirmwirkung der kanisterförmigen Blanketsegmente wurde mittels ein-dimensionaler Rechnungen in Zylindergeometrie berechnet /5/; dabei wurde nachgewiesen, daß genügend Sicherheit (Faktor 2 bis 20) gegenüber den diver-

sen zulässigen Dosiswerten - insbesondere im Bereich der supraleitenden Magnete - erreicht wird.

Die Abschirmwirkung des rohrförmigen Blankets ist wegen der Neutronen-Streaming-Effekte etwas schlechter als die des Kastens. Da eine Berechnung sehr aufwendig wäre, wurde darauf - und auf die damit verbundene Optimierung dieses Konzeptes - im Rahmen dieser Studie verzichtet.

3.3 Ausführung des Wasserrohrkonzeptes

Konstruktion

Abbildung 8 gibt eine Übersicht über die Konstruktion eines rohrförmigen Blanketsegmentes.

Die Rohranordnung der Abbildung 2 wurde übernommen. Der Kühlmitelein- und -austritt befindet sich oben; unten sind die Rohre der ersten und dritten, bzw. der zweiten und vierten Reihe durch Bogen miteinander verbunden. Im Bereich der Rohrbogen erfolgt die Abstützung der Blanket-Rohre auf die Segmentkasten-Rückwand. Die Abstützkonsolen werden durch einbezogene, gegenüber den Blanketrohren offene Rohre vom Blanket-Kühlsystem her gekühlt. Gegenüber den Blanketrohren sind die Blanketrohre jeweils einer Reihe (die etwa gleiche thermische Ausdehnung haben) über sattelförmige Bleche miteinander starr verbunden (Schnitt B-B und Schnitt C-C in Abbildung 8). Gegenüber den Wänden des Segmentkastens sind Abstandshalter vorgesehen, deren Reibflächen durch spezielle Beschichtungen am Fressen gehindert werden müssen. Die Abstandshalter werden so eingestellt, daß sich die Seitenwände des Segmentkastens beim Auftreten großer Querkräfte infolge rascher Magnetfeldänderungen an den Rohrregistern abstützen können.

Die vorgeschlagene Führung der Kühlmittelzu- und -abführleitungen ermöglicht das Entgasen der Blanketrohre beim Füllen des Kühlsystems.

Spannungen, Verformungen

Für die Auslegung des Rohrblankets wird vorausgesetzt, daß der Wassermengenstrom durch feste oder einstellbare Drosselorgane so eingestellt wird, daß sich etwa gleiche Aufwärmung in den vorderen und hinteren Rohrpaaren ergibt.

Da die einzelnen Rohrreihen sich von der unteren Abstützung aus frei nach oben ausdehnen können, können Spannungen infolge behinderter Dehnungen in Richtung der Rohrachse ausgeschlossen werden.

Untersucht wurden die Spannungen bzw. Verbiegungen, die durch die radialen Temperaturdifferenzen innerhalb der Blanketrohre entstehen. Die Abschätzung wurde für die erste (plasmanächste) Rohrreihe durchgeführt.

Mit den Rohrabmessungen $D = 145/137$ mm, $L = 6300$ mm ergeben sich:

- Temperatur der dem Plasma zugewandten Rohrwand:

$$T_{\max} = 109,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Temperatur der dem Plasma abgewandten Rohrwand:

$$T_{\min} = 88,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Die maximale Differenzdehnung im Rohr beträgt:

$$\Delta L/L = (T_{\max} - T_{\min}) \cdot \alpha$$

$$\Delta L/L = 3,36 \cdot 10^{-4}$$

Wird eine Verbiegung der Blanketrohre verhindert, beträgt die Spannung:

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta L}{2L}$$

$$\sigma = 0,195 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,36 \cdot 10^{-4}}{2} = 32,8 \text{ N/mm}^2$$

Diese Spannung ist weit unterhalb des zulässigen Wertes.

Bei unbehinderter Verbiegung der Rohre würde der temperaturbedingte Biegeradius betragen:

$$R = D \cdot \left(\frac{L}{\Delta L} \right)$$

$$R = 407 \text{ m}$$

und die resultierende Rohrauslenkung in der Torus-Mittelebene wäre

$$\Delta r = 12,2 \text{ mm.}$$

Herstellung, Prüfung

Die Blanketrohre werden vor dem Zuschneiden gebogen. Alle Schweißnähte an den Rohren werden als V-Nähte mit voll durchgeschweißter Wurzel (TIG-pulsierend) hergestellt. Ihre Prüfung erfolgt durch Ultraschall und/oder Röntgen sowie Oberflächenrißprüfung auf der Außenseite. Jedes U-Element wird einer Druckprobe unterworfen. Darauf folgt eine nochmalige zerstörungsfreie Prüfung der druckführenden Nähte sowie eine weitere Dichtheitsprüfung.

Der Zusammenbau erfolgt auf der freiliegenden Rückwand des Segmentkastens von der Mitte aus nach beiden Seiten, wobei die Schweißnähte laufend geprüft werden.

3.4 Ausführung des Wasserkastenskonzeptes

Konstruktion

Es wurden zwei verschiedene Varianten des kastenförmigen Blankets durchkonstruiert.

Die Ausführung des **Blanketkastens ohne Beryllium** zeigen die Abbildungen 9 (Übersicht) und 10 (Details). Bei dieser Variante werden die einzelnen Kammern von vorne (Plasmaseite) nach hinten nacheinander durchströmt, weil hierdurch die geringsten Temperaturdifferenzen innerhalb der Kastenkonstruktion auftreten. Lochbleche im Eintritt zur ersten und dritten Kammer sorgen für eine gleichmäßige Wasserverteilung. Bei Ausfall der Normalkühlung oder bei einem Leck des Blanketkastens wird Wasser für die Notkühlung oben in die vordere Kammer über ein gelochtes Rohr eingespritzt und durch eine eigene Leitung aus der letzten Kammer abgeführt. In den höchsten Punkten der beiden mittleren Kammern (im Bereich der Kühlmittelumlenkung nach unten) müssen kleine Entgasungsbohrungen zum Austrittskanal hin angebracht werden.

Die Befestigung des Blanketkastens an der Segmentkasten-Rückwand erfolgt etwa auf der Höhe der Torusmittelebene durch zwei Rohre, die zum Wasserkasten hin offen sind. Gefederte Gleitschuhe übernehmen die Führung und Kraftübertragung zwischen Blanket- und Segmentkasten bei toroidal angreifenden Kräften, beispielsweise infolge magnetischer Feldänderungen.

Die Aufteilung des **Blanketkastens mit Berylliumplatten** ist in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt. Hier strömt das Kühlmittel in den Spalten um die Berylliumplatten herum nach unten und parallel durch die beiden hinteren Kammern nach oben und in die Auslaßleitungen. Die Wasserspalte rund um die Berylliumplatten wurden so dimensioniert, daß ein guter Kompromiß zwischen erzielbarer Tritiumbrutrate und gleichmäßiger Erwärmung des Kühlmittels (d.h. Anpassung der Kühlmitteldurchsätze an die radiale Wärmequellverteilung) erzielt wird.

Die Berylliumplatten sind mit dichten Edelstahlhüllen umgeben. Die Befestigung erfolgt durch Rundstäbe, die mit dem Beryllium verlötet und mit der Berylliumumhüllung einerseits sowie mit der Kastenzwischenwand andererseits verschweißt sind.

Berechnung

Durchgeführt wurden für beide Kastenkonzepte Handrechnungen zur Bestimmung der Kühlmitteldurchsatzmengen in den einzelnen Kanälen, der Druckverluste, der Kühlmitteltemperaturen und der Wärmeübergangszahlen zu den Wänden. Mit diesen Eingabedaten wurden zweidimensionale Finite-Elemente-Rechnungen mit dem Programm ANSYS /7/ zur Ermittlung der Temperaturverteilung und der Vergleichsspannungen in den Kastenstrukturen durchgeführt.

Die Ergebnisse sind für beide Kastenvarianten - ohne und mit Berylliumplatten - nicht sehr verschieden; daher wird hier nur die Variante mit Beryllium beispielhaft dargestellt. Abbildung 13 zeigt die Temperaturverteilung und Abbildung 14 die Spannungen und Deformationen in dem als symmetrisch zur Mittelachse angenommenen Kastenquerschnitt.

Die Spannungswerte in Abbildung 14 ergeben sich aus dem Kühlmitteldruck von 7 bar und den Temperaturdifferenzen. Die maximale Spannung beträgt 61,7 N/mm². Wenn man diese Spannung pessimistisch als reine Primärspannung (Membran- und Biegespannung durch Innendruck) annimmt, ist sie zu vergleichen mit der zulässigen Spannung

$$\sigma_{zul} = S_m \cdot 1,5 = 119 \cdot 1,5 = 178,5 \text{ N/mm}^2.$$

Hierbei ist allerdings der dreidimensionale Einfluß noch nicht berücksichtigt. Dieser Einfluß wurde durch Handrechnungen abgeschätzt. Dazu wurde die maximale Temperaturdifferenz über einen Querschnitt des Kastens bestimmt.

Dieser Querschnitt maximaler Temperaturunterschiede liegt in der Nähe der Kühlmittlein- und -austrittsstutzen. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen zwei benachbarten Versteifungsplatten beträgt hier 16 K. Wenn man annimmt, daß beide Platten starr verbunden sind, so ergibt sich folgende Spannung:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T / 2 = 0,195 \cdot 10^6 \cdot 0,16 \cdot 10^{-4} \cdot 16 / 2 = 25,0 \text{ N/mm}^2.$$

Diese Spannung ist sehr klein und tritt zudem in einem Bereich auf, in dem die Spannungen infolge Innendruckes klein sind.

Herstellung, Prüfung

Alle Schweißnähte des Kastens sowie für die Kühlmittleitungsanschlüsse und die Befestigung an der Segmentbox werden mit einem halbautomatischen TIG- oder MIG-Impuls-Verfahren mit einer voll durchgeschweißten Wurzel und anschließend mit Elektrode zuverlässig ausgeführt. Voraussetzung für eine einwandfreie Naht ist eine genaue Anpassung im Wurzelbereich. Die gewählte Kastenkonstruktion gestattet einen guten Zugang zu allen Schweißnähten.

Zur Ermittlung der optimalen Schweißparameter werden im voraus und mitlaufend Schweißproben angefertigt, die hinsichtlich Material, Abmessungen usw. der Originalschweißnaht entsprechen. Die Schweißproben werden den Prüfungen der Originalnaht unterzogen; sie dienen zusätzlich für die Herstellung von Schliffen und die Durchführung von metallographischen Untersuchungen.

Die Prüfung der Wurzelnahtrückseite erfolgt visuell (Endoskop); die Nahtoberfläche wird nach wichtigen Schweißschritten (z.B. nach Einbringen der Wurzellage) und nach Fertigstellung der Schweißnaht durch Farbeindringverfahren auf Oberflächenrisse hin untersucht. Für die volumetrische Prüfung (auch im Wurzelbereich) kommt die Ultraschallprüfung infrage.

Nach Abschluß der Schweißarbeiten erfolgt eine Druck- und Dichtheitsprüfung sowie eine nochmalige Ultraschallprüfung der außen liegenden Schweißnähte.

Beim Blanketkasten mit Beryllium werden die Berylliumplatten während des Verschweißens des vorderen Kastenteils eingebaut und zwar so, daß die Zugänglichkeit zu den Schweißnähten und deren Prüfung durch Endoskop gewährleistet bleibt.

3.5 Diskussion der Lösungen

Die Rohrversion des Abschirmblankets hat einen sehr übersichtlichen konstruktiven Aufbau. Die Herstellung bietet keine Schwierigkeiten. Es sind verhältnismäßig wenige druckführende Schweißnähte nötig. Diese sind einfach herzustellen und gut prüfbar.

Die Herstellung der Kastenversion bereitet ebenfalls keine wesentlichen Schwierigkeiten. Etwas größer ist der Arbeitsaufwand, insbesondere für das Zuschneiden der Bleche, das Anpassen der Schweißkanten, die Herstellung langer und anspruchsvoller Schweißnähte mit dem notwendigen Prüfaufwand. Es wurde abgeschätzt, daß das Verhältnis der Herstellungskosten für das Rohrblanket zu denen für das Kastenblanket sich etwa wie 2/3 verhalten würde.

Die Spannungen infolge behinderter thermischer Dehnungen sowie durch den Kühlmitteldruck sind bei beiden Versionen bei entsprechender konstruktiver Auslegung gering. Sie sind besonders übersichtlich bei der Rohrversion.

Ein wirklich gravierender Vorteil der Kastenversion ist die bessere und gleichmäßigere Abschirmwirkung, und beim Einsatz von Lithiumsalz-Beimischungen die bessere erzielbare Brutrate. Dies führte letztlich dazu, daß die Kastenversion als Referenzlösung bearbeitet wurde. Die Rohrversion könnte wieder in die Diskussion kommen, falls eines Tages für ein echtes DEMO-geeignetes wassergekühltes Brutblanket hohe Kühlmitteldrücke und -temperaturen gefordert werden sollten.

4 Heliumgekühlte Variante

4.1 Auslegung

Bei den Überlegungen zum heliumgekühlten Abschirmblanket wurde zunächst diskutiert, in die vorderen Schichten ein Moderator material wie z.B. Zirkonhydrid einzubringen. Da ein derartiges Konzept jedoch technisch nicht durchführbar erschien, wurden nur noch Lösungen mit Stahl als Neutronenabsorber weiterverfolgt. Eine technisch sehr attraktive Möglichkeit wären wieder poloidal verlaufende Rohre mit möglichst hohem Stahlanteil. Jedoch spielen hier die Neutronen-Streaming-Effekte eine noch größere Rolle, als beim wassergekühlten Blanket, so daß als Referenzkonzept schließlich eine Lösung mit massiven Stahlplatten gewählt wurde.

Abbildung 15 zeigt die Anordnung der Platten innerhalb des Segmentkastens. Die Gesamtdicke der Stahlplatten wurde so dimensioniert, daß alle Anforderungen bezüglich der maximal zulässigen Neutronen- und Gamma-Fluenz sowie der Wärmeleistung in den Magneten mit einer ausreichenden Sicherheitsmarge erfüllt werden.

Die radiale Verteilung der Wärmequell dichte in den Abschirmplatten sowie deren Gesamtleistung wurden mittels dreidimensionaler Monte-Carlo-Rechnungen bestimmt. Abbildung 16 zeigt die Maximalwerte in der Torus-Mitteleben sowie die poloidal gemittelten Leistungsdichtedaten.

Die Abschirmplatten werden in poloidaler Richtung von jeweils zwei Reihen von Kühlkanälen durchzogen. Diese haben einen quadratischen Querschnitt. Die Querschnittsfläche der Kühlkanäle, ihre Anzahl sowie ihre Anordnung innerhalb der Abschirmplatten wurde so gewählt, daß innerhalb der einzelnen Platten möglichst geringe Temperaturdifferenzen auftreten. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, daß sich in allen vier Platten etwa gleiche Kühlmittel-Druckverluste und -Aufheizspannen ergeben.

In Tabelle 3 sind die wichtigsten thermohydraulischen Daten eines heliumgekühlten Abschirmblanketsegmentes zusammengestellt. Es wurde berücksichtigt, daß das Kühlgas nacheinander durch die Kühlrohre der ersten Wand und durch die Kühlkanäle der Abschirmplatten geleitet wird. Die in Tabelle 3 aufgeführten Kühlmittelzustände entsprechen den neuesten Daten des heliumgekühlten Brutblankets /8/. Möglicherweise können bei genauerer Berechnung der Abschirmblanketauslegung kleine Korrekturen erforderlich werden.

Tabelle 3: Auslegungsdaten für das heliumgekühlte Outboard-Blanketsegment

Heliumdruck am Eintritt in das Blanketsegment	6,05 MPa
Leistung der Abschirmplatten	5075 kW
Heliumtemperatur am Eintritt Erste Wand	200 °C
Heliumtemperatur am Eintritt Blanket	ca. 260 °C
Heliumtemperatur am Austritt Blanket	450 °C
Heliumdurchsatz durch Erste Wand und Blanket	5,2 kg/s
Druckabfall in den Blanketkühlkanälen *)	ca. 0,55 bar

*) Der Gesamtdruckabfall gemäß /8/ im Blanketsegment beträgt 2,1 bar.

4.2 Konzeptentwurf

Konstruktion

Einen Vorschlag für die technische Realisierung eines heliumgekühlten Abschirmblankets zeigen die Abbildungen 17 bis 20.

Das Kühlgas wird in zwei Hauptleitungen von oben her zugeführt (Überblick in Abbildung 17). Von den Zuführungsleitungen zweigen die radial-toroidal verlaufenden Erste-Wand-Kühlrohre ab. Das Kühlgas wird in zwei weiteren poloidal verlaufenden Leitungen wieder gesammelt und über Verteiler von unten her in die Kühlkanäle der einzelnen Abschirmplatten geleitet. Es tritt am oberen Ende der Platten wieder aus und verläßt das Blanketsegment durch die Austrittsleitungen. Die Konstruktion der unteren Gasverteilungs- und der oberen -sammelkanäle in den Abschirmplatten ist in den Abbildungen 20 bzw. 18 dargestellt.

In Höhe der Torusmittelebene sind die Abschirmplatten untereinander verbunden und mittels zwei von Helium durchströmten Kastenkonstruktionen an der Segmentkasten-Rückwand befestigt (Abbildung 19). Da unterschiedliche mittlere Temperaturen der Platten zu erwarten sind, müssen sich die Platten in poloidaler Richtung unabhängig voneinander ausdehnen können. Die Dehnungsunterschiede müssen in den Kühlgaszu- und -ableitungen durch Faltenbälge aufgenommen werden.

Das Abschirmblanketsegment wird von zwei voneinander unabhängigen Kühlsystemen versorgt, an die jeweils zwei - nicht einander gegenüberliegende - Platten angeschlossen sind (Abbildung 20, Schnitt D-D und E-E).

Bei Ausfall eines der Kühlsysteme muß die Nachwärme der nicht mehr gekühlten Platte an die beiden Nachbarplatten bzw. bei der vorderen höchstbelasteten Platte an die Nachbarplatte und die Erste Wand durch Strahlung übertragen werden. Dabei wird sich - bei zwei Prozent Nachwärmeleistung und einer Heliumtemperatur von minimal 200 °C - ein Temperaturunterschied zwischen gekühlten und ungekühlten Platten von maximal etwa 230 K einstellen. Vorausgesetzt ist bei dieser Abschätzung, daß durch Beläge auf den Plattenoberflächen die Strahlungszahlen auf $\varepsilon \geq 0,8$ angehoben werden. Derartige Beläge sind für die Beschichtung der Ersten Wand derzeit in Entwicklung.

Spannungen, Verformungen

Spannungsrechnungen wurden für die höchstbelastete Abschirmplatte durchgeführt. Hierfür wurde wieder das Finit-Elemente-Programm ANSYS benutzt /7/.

Das Rechenmodell ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Randbedingungen für die Deformationen sind eine Symmetriebedingung in der y-z-Ebene der Abbildung 21 und ein verallgemeinerter ebener Spannungszustand in z-Richtung (polidale Richtung).

Ergebnisse: Die maximale Spannung infolge Kühlmitteldruck und der betrieblichen Temperaturdifferenzen in der Platte beträgt 210 N/mm². Sie tritt an der Stelle "a" in Abbildung 21, nahe der Ecke des vorderen Kühlkanals auf.

Diese (Vergleichs-)Spannung ist eine Sekundärspannung. Der zulässige Spannungswert beträgt demnach gemäß /4/

$$\sigma_{zul} = S_m \cdot 3,0 = 85 \cdot 3,0 = 257 \text{ N/mm}^2.$$

Abgeschätzt wurde weiterhin die Wechselfestigkeit. Dazu wird mit der maximalen Spannung von 210 N/mm² eine minimale Spannung nach vollem Temperaturengleich auf 200 °C verglichen. Diese Spannung infolge des Kühlmitteldrucks beträgt an der Stelle "a" 25 N/mm².

Mit Hilfe der Gleichung

$$S_a = \frac{E(20^\circ\text{C})}{E(T)} K \cdot \frac{SI}{2}$$

aus Abschnitt 2 und der Abbildung 2 kann der zulässige Formfaktor für die kritische Stelle "a" bestimmt werden:

$$S_a = \frac{195000}{165000} \cdot K \cdot \frac{210-25}{2} = K \cdot 109$$

Mit $N = 10^5$ Zyklen entsprechend $S_a = 281 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich ein zulässiger Formfaktor $K_{zul} = 2,57$.

Es bereitet keine Schwierigkeiten diesen Formfaktor durch eine gute Ausrundung der Kühlkanal-Ecken und entsprechende Ausbildung der Schweißnähte zu erreichen.

Herstellung, Prüfung

Die gefrästen Nuten für die Kühlkanäle werden durch genau angepaßte Blechstreifen verschlossen, die nach dem Elektronenstrahlverfahren eingeschweißt werden. Dies ist nach den Erfahrungen der Firma Sulzer bei sorgfältiger Arbeit zuverlässig möglich. Die Prüfung erfolgt durch speziell anzupassende Ultraschalltechnik und eventuell mittels Endoskop vor dem Anschließen der Endstücke.

Die Platten werden erst nach dem Verschließen der Kanäle gebogen. Die Endstücke und Rohrleitungen können nach dem TIG- und/oder MIG-Verfahren angeschweißt werden. Infolge der engen Platzverhältnisse ist der Montagereihenfolge spezielle Beachtung zu schenken, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Verbindung zu den Kühlregistern der Ersten Wand.

Die Druck- und Dichtheitsprüfungen sind so einzuplanen, daß die Behebung eventueller Undichtheiten an Schweißnähten noch zuverlässig möglich ist.

4.3 Beurteilung der Lösung

Die skizzierte Lösung scheint von den Spannungen her realisierbar zu sein, wie die Abschätzungen in Abschnitt 4.2 zeigen; jedoch wären noch genauere Untersuchungen, insbesondere zum Ermüdungsverhalten infolge instationärer Vorgänge durchzuführen.

Vertiefte Studien wären auch noch zur Montage des Blanketsegmentes erforderlich. Infolge der sehr engen Platzverhältnisse ist die Zugänglichkeit für die Installation der Platten und Rohrleitungen und insbesondere für die Ausführung und Prüfung der vielen Montageschweißnähte beim Zusammenbau mit dem Kühlsystem der Ersten Wand problematisch. Spezielle Beachtung erfordert auch die Auslegung und die Ausführung der Faltenbälge.

5 Vergleich der Kühlmittelvarianten

Im Verlauf der Studie zeigte sich, daß als Kühlmittel für die NET-Abschirmblankets kaltes, druckloses Wasser in nahezu allen Bereichen Vorteile gegenüber Helium aufweist. Die wichtigsten Aspekte seien nochmals stichwortartig zusammengefaßt:

- Kühlmittelaufheizspanne und -druck müssen bei Gaskühlung um ein Vielfaches höher sein, als bei Wasserkühlung, wenn die Volumenströme und Pumpleistungen beherrschbar bleiben sollen. Die Konsequenzen hieraus sind:
 - . Differenzdehnungen von großen Bauteilen, thermische Spannungen,
 - . konstruktive Probleme beim Ausgleich der Verformungen,
 - . Erschwerung der Konstruktion durch hohen Kühlmitteldruck,
 - . insgesamt erhöhter Fertigungsaufwand.

Es ist zu erwarten, daß bei einer vertieften Betrachtung des instationären und des gestörten Betriebes diese Nachteile der Heliumkühlung noch mehr Gewicht erhalten würden.

- Bei Heliumkühlung fehlt die Neutronenmoderation des Wassers. Daher sind relativ große Stahlmassen zur Erzielung einer ausreichenden Abschirmwirkung erforderlich. Nachteile sind:
 - . höhere Nachwärmeentwicklung,
 - . größere Massen aktivierter Strukturmaterialien,
 - . größere Massenkräfte bei Disruptions oder Erdbeben.

- Zugunsten von Helium sprechen seine Eigenschaften als Inertgas:
 - . Im Normalbetrieb sind die mit Wasserkühlung verbundenen Probleme, nämlich Dissoziation im Strahlenfeld und Korrosion nicht vorhanden.
 - . Im gestörten Betrieb können keine chemischen Reaktionen irgendwelcher Art, gegebenenfalls verbunden mit Wärme- und/oder Gasentwicklung stattfinden.

6 Referenzen:

- /1/ Commission of the European Communities
NET Status Report December 1986, NET Report 51
- /2/ Nuclear Fusion Project: Semi-annual Report of the Association KfK/
EURATOM, April 1986 - September 1986,
KfK 4165, EUR 10534e, November 1986
- /3/ Nuclear Fusion Project: Semi-annual Report of the Association KfK/
EURATOM, October 1986 - March 1987,
KfK 4276, EUR 10535e, Mai 1987
- /4/ ASME Code III, Ausgabe 1986
- /5/ M. KÜCHLE, et al.
Potential and Problems of an Aqueous Lithium Salt Solution Blanket for
NET
KfK 4271, Juli 1987
- /6/ U. Fischer
Multi-dimensional Neutronics Analysis of the "Canister Blanket" for NET
KfK 4255, April 1987
- /7/ Programm ANSYS
SWANSON ANALYSIS SYSTEMS INC.,
Houston, Pennsylvania, 15342 (USA)
- /8/ M. Dalle Donne et al.
Pebble Bed Canister: The Karlsruhe Ceramic Breeder Blanket Design for
NET
wird veröffentlicht in Nuclear Technology

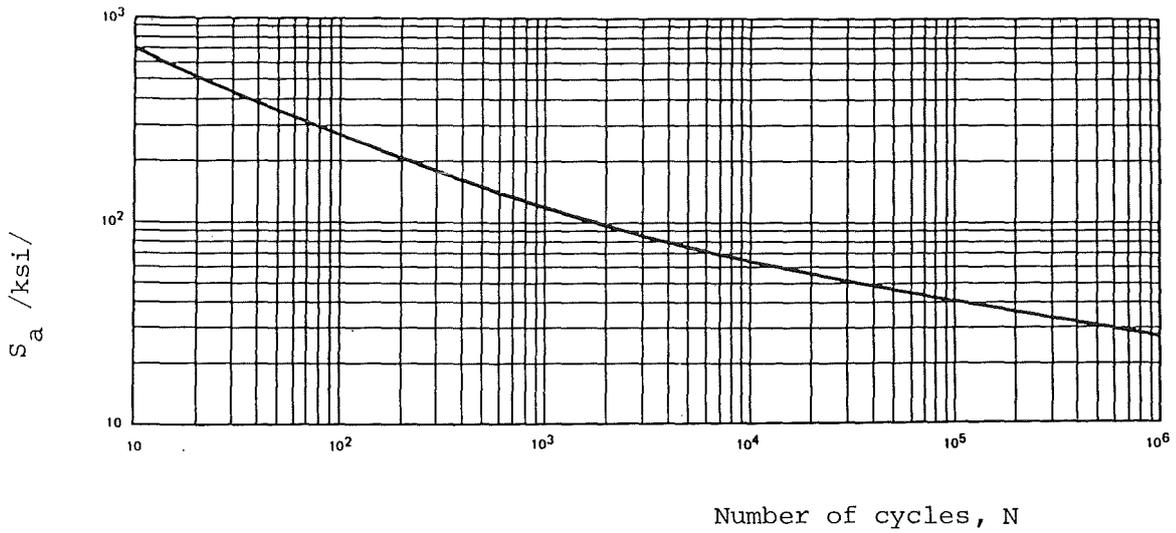


Abbildung 1: Design fatigue curve for austenitic steels, nickel-chromium-iron alloy, nickel-iron-chromium alloy and nickel-copper alloy (/4/, Appendix I)
 ($E = 28,3 \cdot 10^6$ psi = $199 \cdot 10^3$ /N/mm² /)

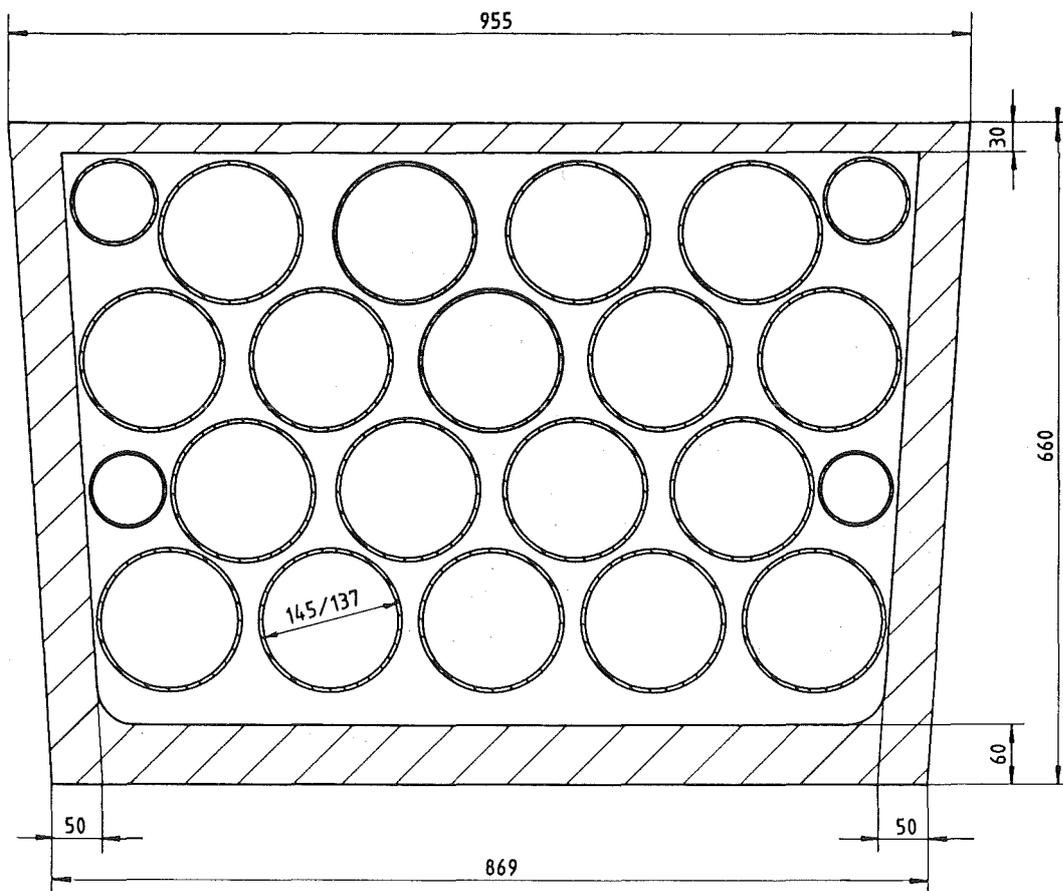


Abbildung 2: Wassergekühltes Abschirmblanket,
 Rohrkonzept

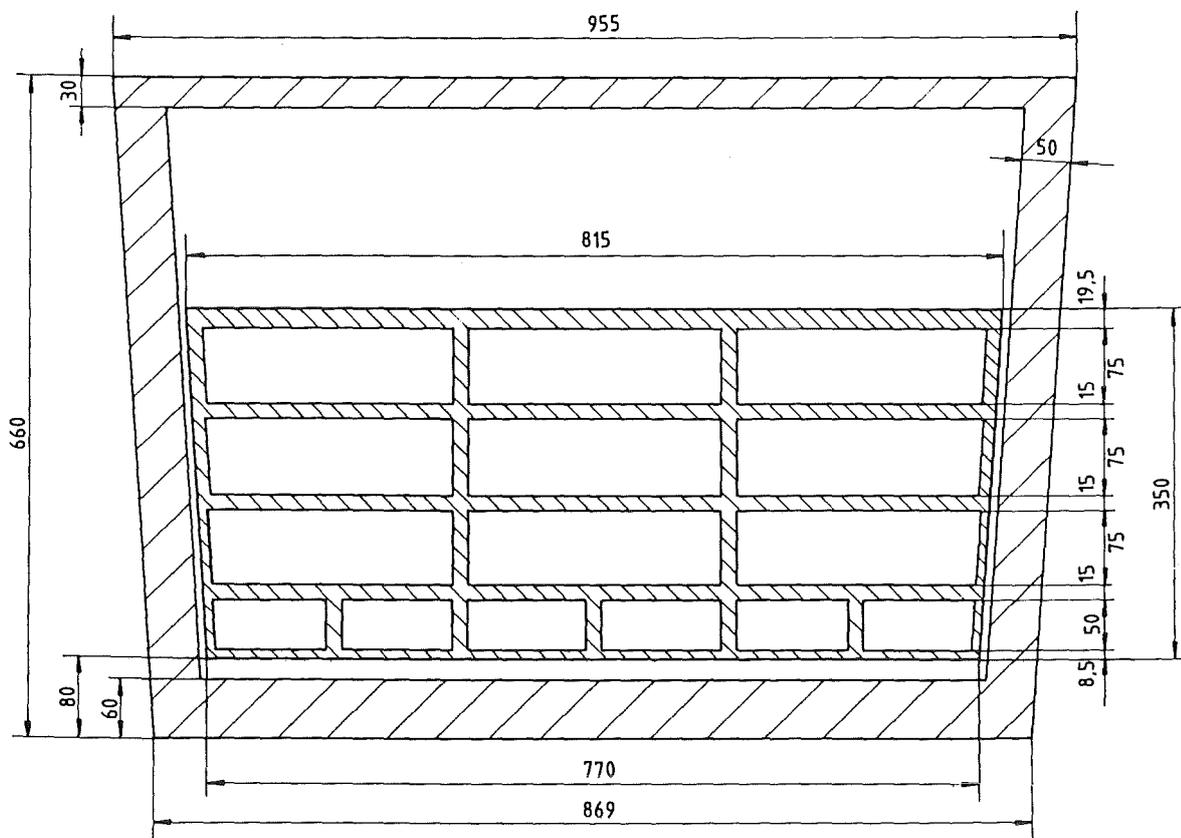


Abbildung 3: Wassergekühltes Abschirmblanket
Kastenkonzept

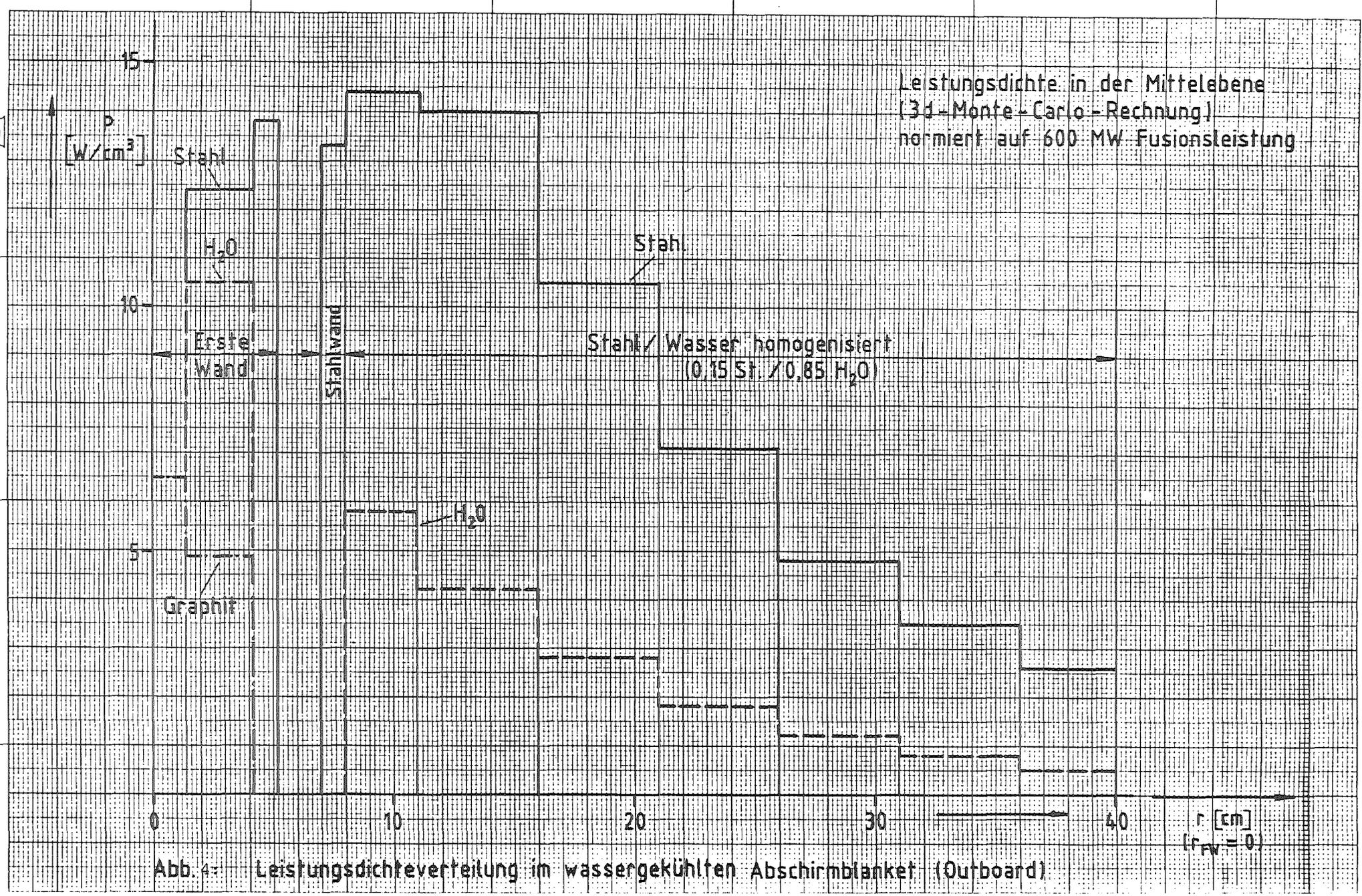


Abb. 4: Leistungsdichteverteilung im wassergekühlten Abschirmblanket (Outboard)

Leistungsdichte in der Mittelebene
 (3d-Monte-Carlo-Rechnung)
 normiert auf 600 MW Fusionsleistung

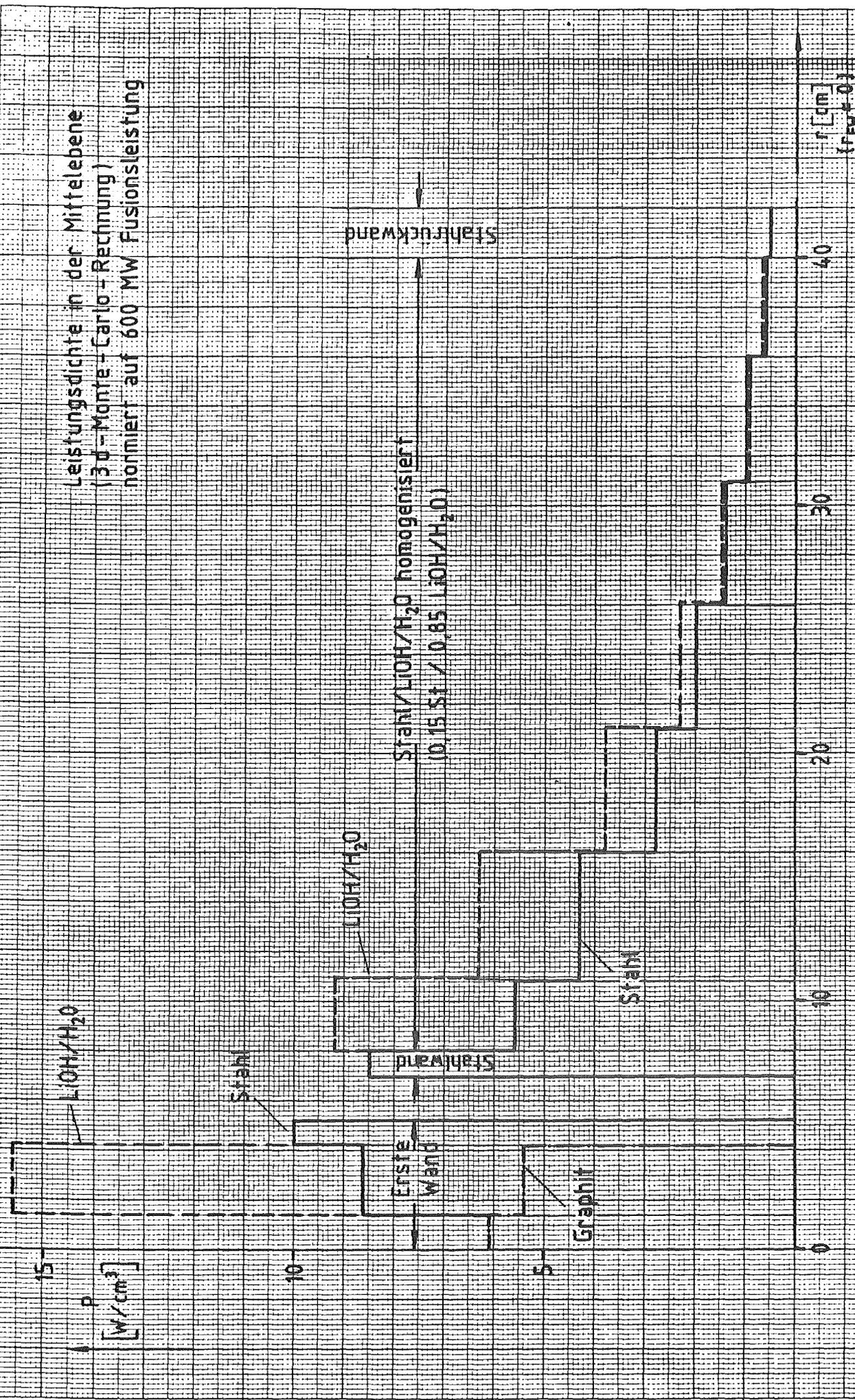


Abb. 5: Leistungsdichteverteilung im LiOH / H₂O - Blanket (Outboard)

Leistungsdichte in der Mittelebene
 (3d-Monte-Carlo-Rechnung)
 normiert auf 600 MW Fusionsleistung

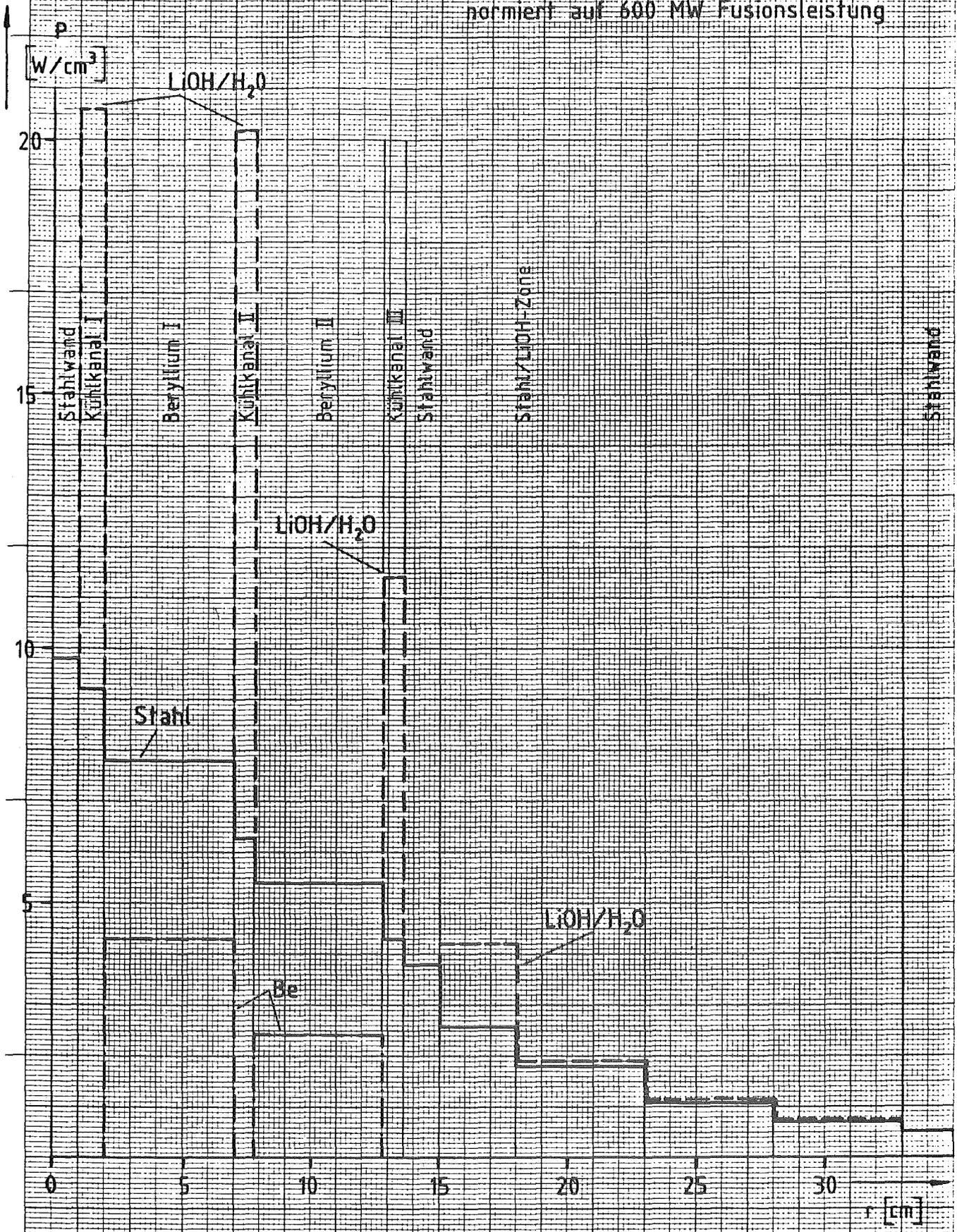


Abb. 6: Leistungsdichteverteilung im LiOH-Blanket mit Beryllium (Outboard)

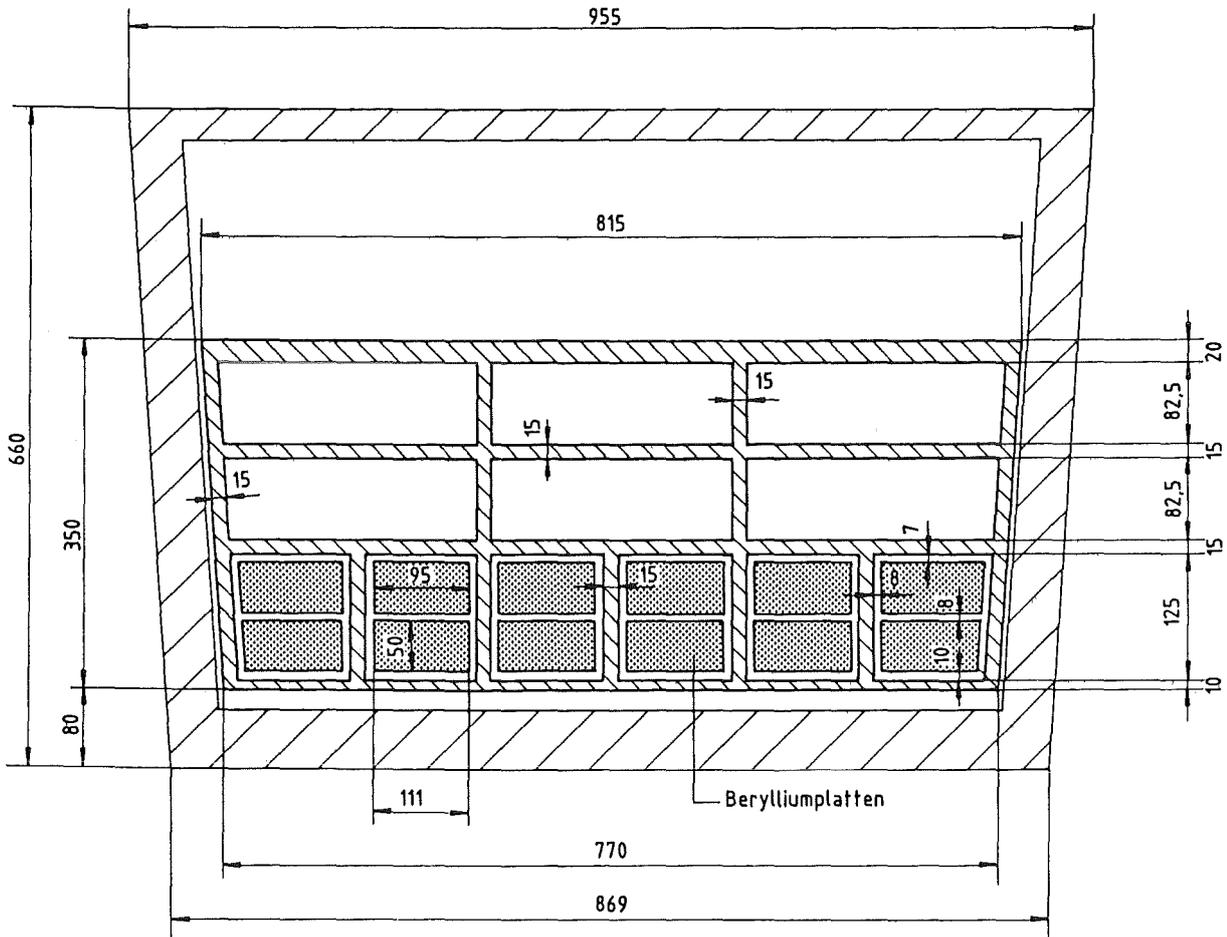


Abbildung 7: Abschirm-/Brutblankettkonzept mit $H_2O/LiOH$ und Beryllium

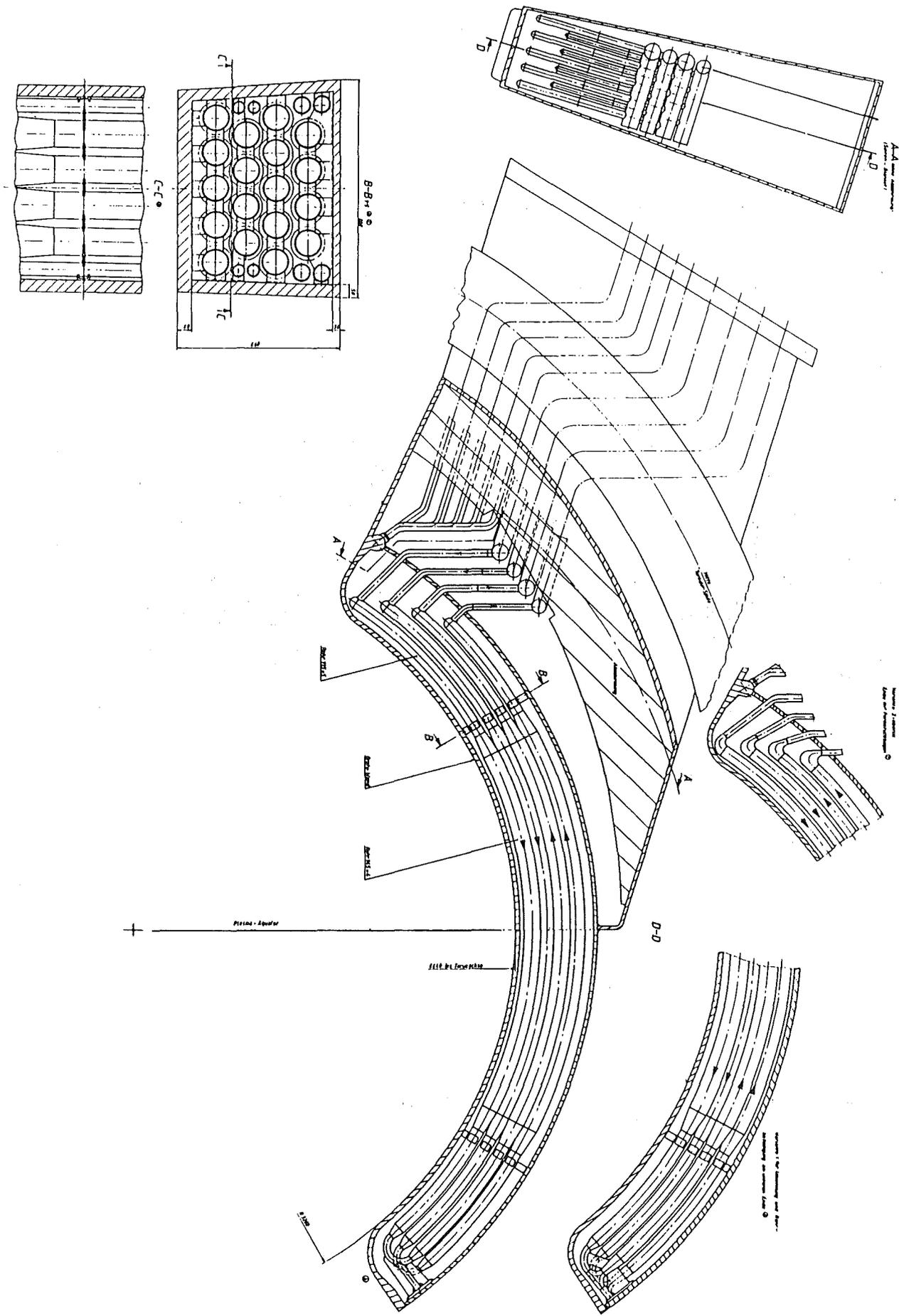
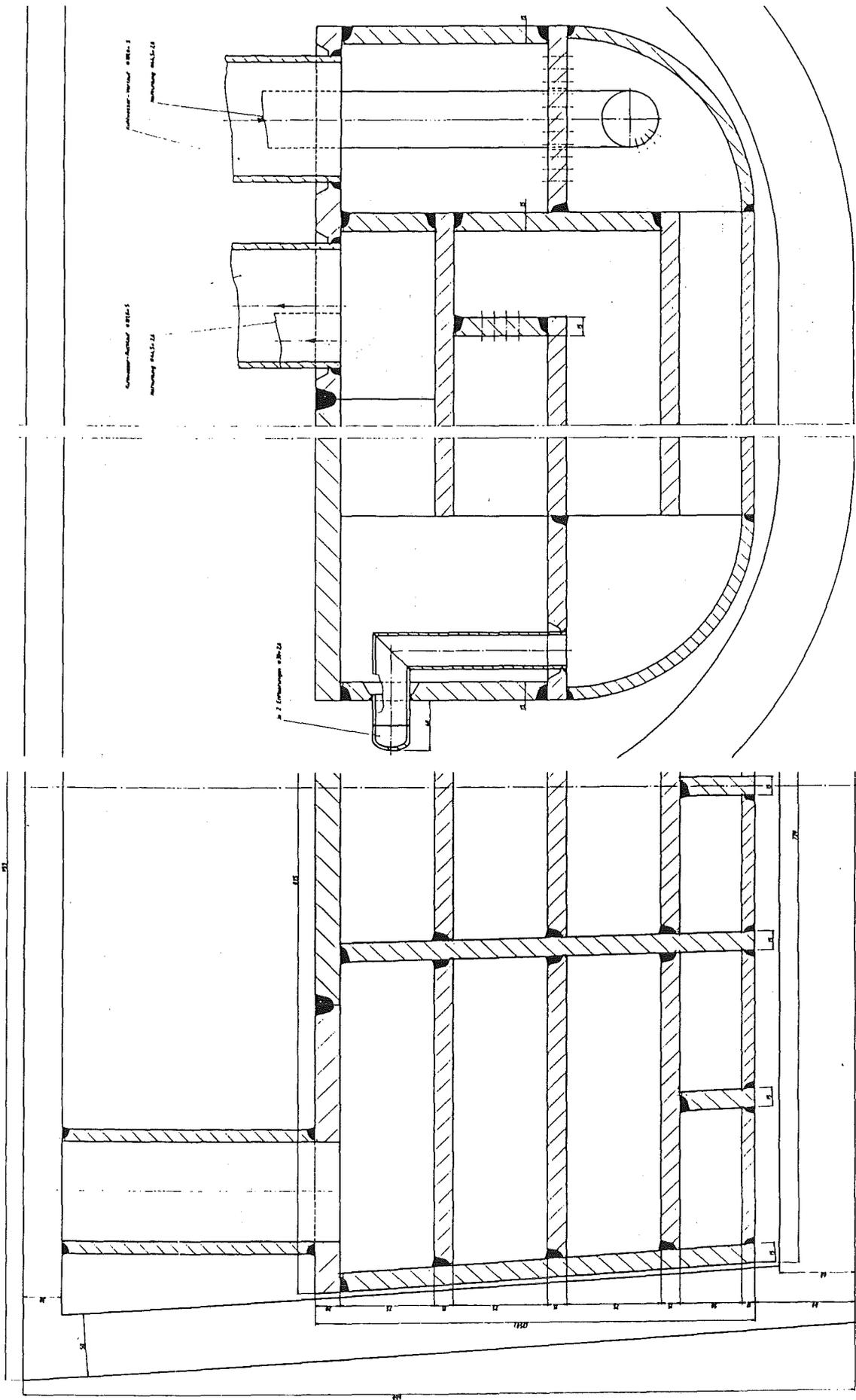


Abbildung 8: Wasserrohrblanket (Übersicht)

Gezeichnet von	Gezeichnet am	Gezeichnet bei
Geprüft von	Geprüft am	Geprüft bei
Stücke für KTR		
für Best. Nr. 10-103 089.357 (Rohrformige Abschlusskappe)		
SULZER 10-103 089.357		



Zusammenstellung siehe Zeichnung 0-103 089 371

Abbildung 10: Blanketkasten ohne Beryllium (Längs- und Querschnitt)

NO			
103	0-103 089 371		
Studie für KIK			
NET ON			
SULZER 0-103 089 371			

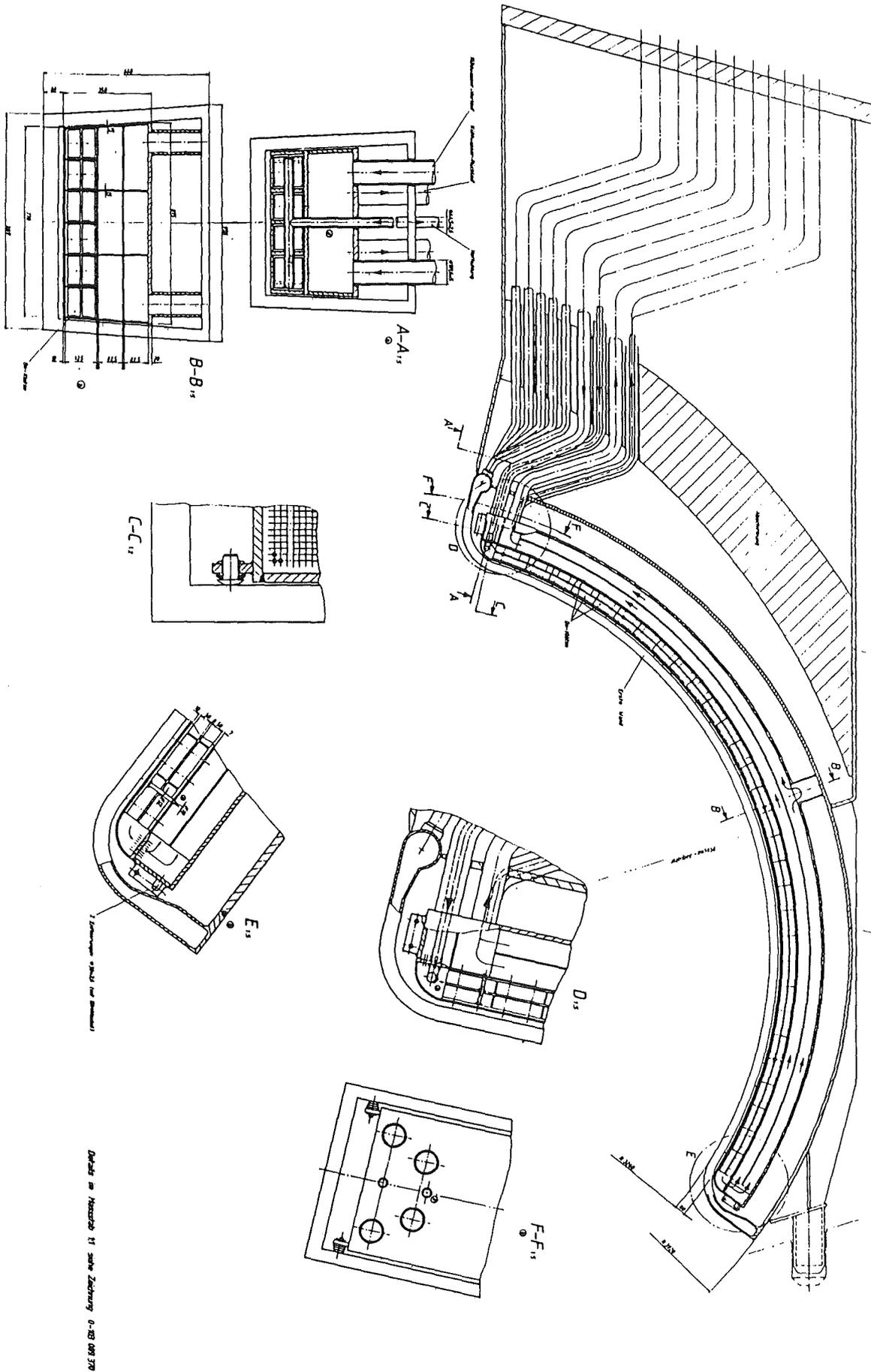
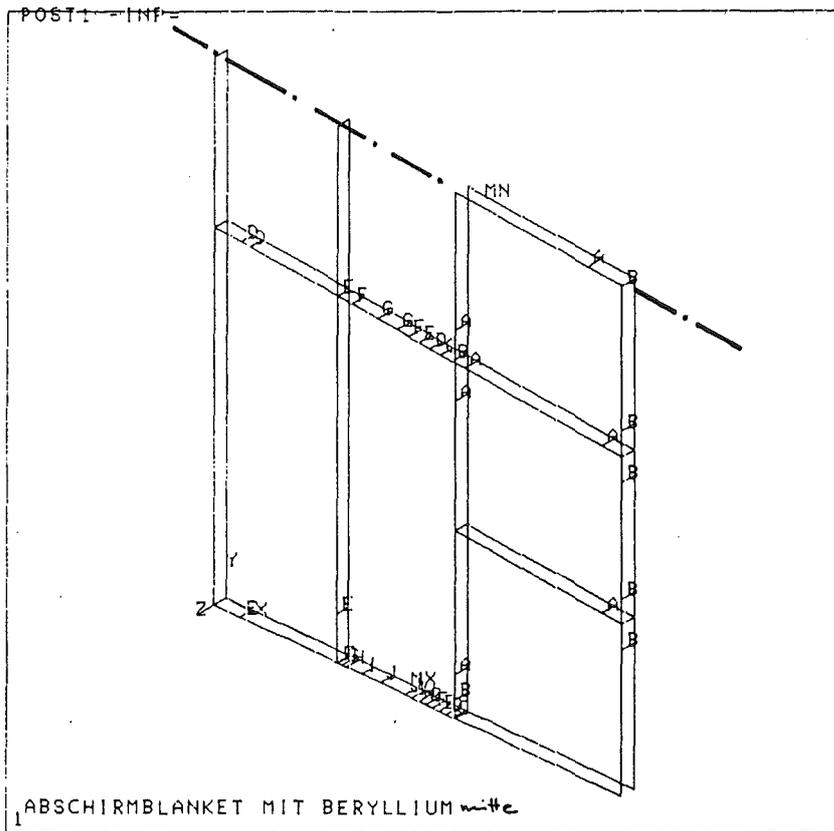


Abbildung 11: Blanketkasten mit Beryllium-Platten (Übersicht)

①	Gezeichnet	19.11.58	
②	Gezeichnet	19.11.58	
③	Gezeichnet	19.11.58	
④	Gezeichnet	19.11.58	
⑤	Gezeichnet	19.11.58	
⑥	Gezeichnet	19.11.58	
⑦	Gezeichnet	19.11.58	
⑧	Gezeichnet	19.11.58	
⑨	Gezeichnet	19.11.58	
⑩	Gezeichnet	19.11.58	
Studie für KFK			NET DN
Beryllium-Platten Abschirmkasten			
SULZER			Q-103.089.368



ANSYS 4.2B
 JUL 14 1987
 10:49:15
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=1
 TEMP

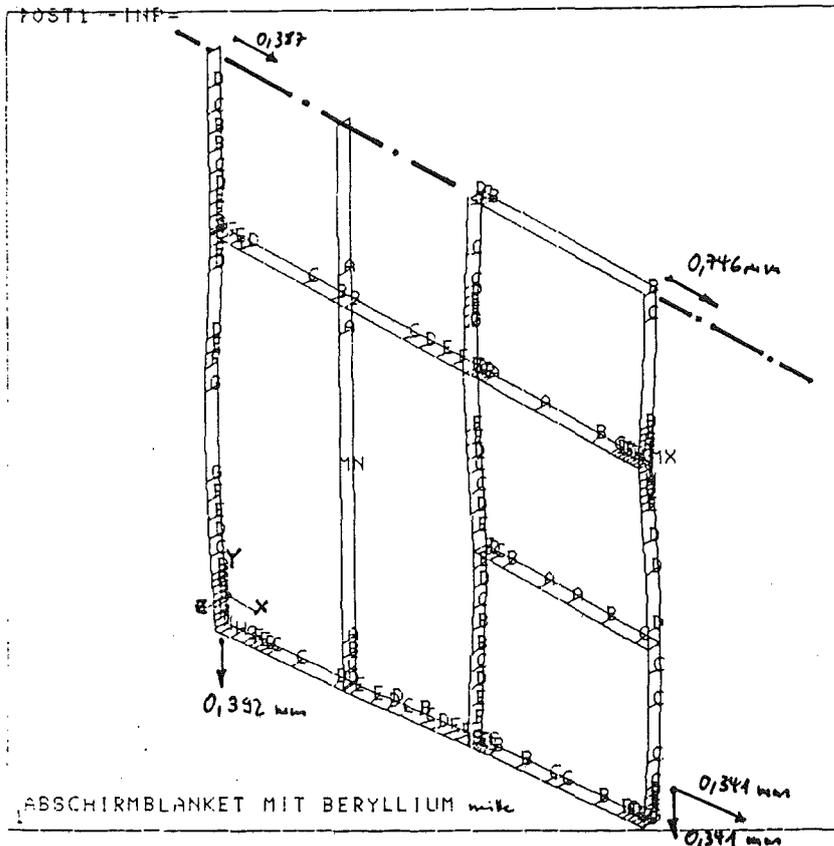
XU=1
 YU=1
 ZU=1
 DIST=244
 XF=163
 YF=210
 ZF=.13

EDGE
 MX=99
 MN=67.4

[°C]

A=69.7
 B=72.7
 C=75.7
 D=78.7
 E=81.7
 F=84.7
 G=87.7
 H=90.7
 I=93.7
 J=96.7

Abbildung 13: Temperaturverteilung in Kastenmittelebene



ANSYS 4.2B
 JUL 14 1987
 12:59:41
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=1
 S1
 BOTTOM

XU=1
 YU=1
 ZU=1
 DIST=244
 XF=163
 YF=210
 ZF=.13

EDGE
 MX=61.7
 MN=.198

[N/mm²]

A=3.97
 B=9.97
 C=16
 D=22
 E=28
 F=34
 G=40
 H=46
 I=52
 J=58

Abbildung 14: Spannungen und Deformationen infolge Temperatur und Innendruck

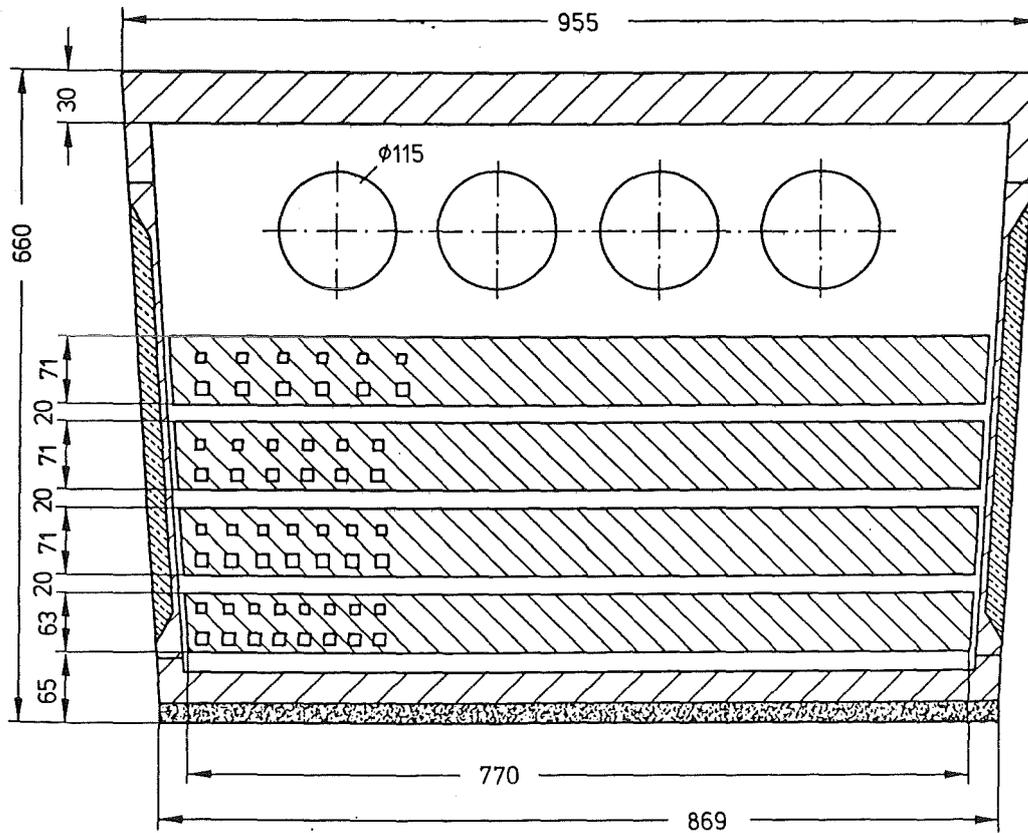
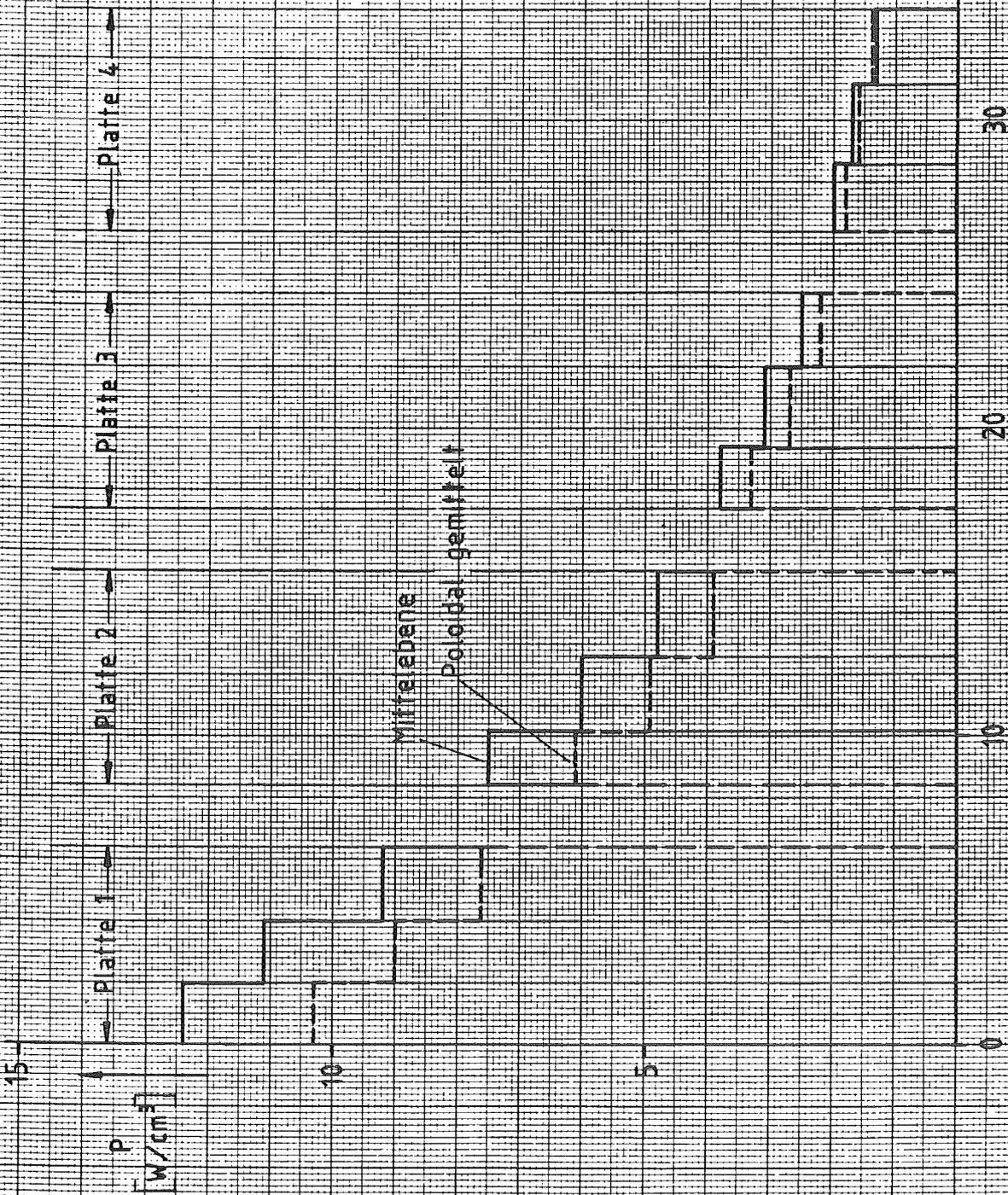


Abbildung 15: Heliumgekühltes Abschirmblanket



Leistungsdichte in der Mittelebene und poloidal gemittelt (3d-Monte-Carlo-Rechnung) normiert auf 600 MW Fusionsleistung

Abb. 16: Leistungsdichteverteilung im heliumgekühlten Abschirmblanket (Outboard)

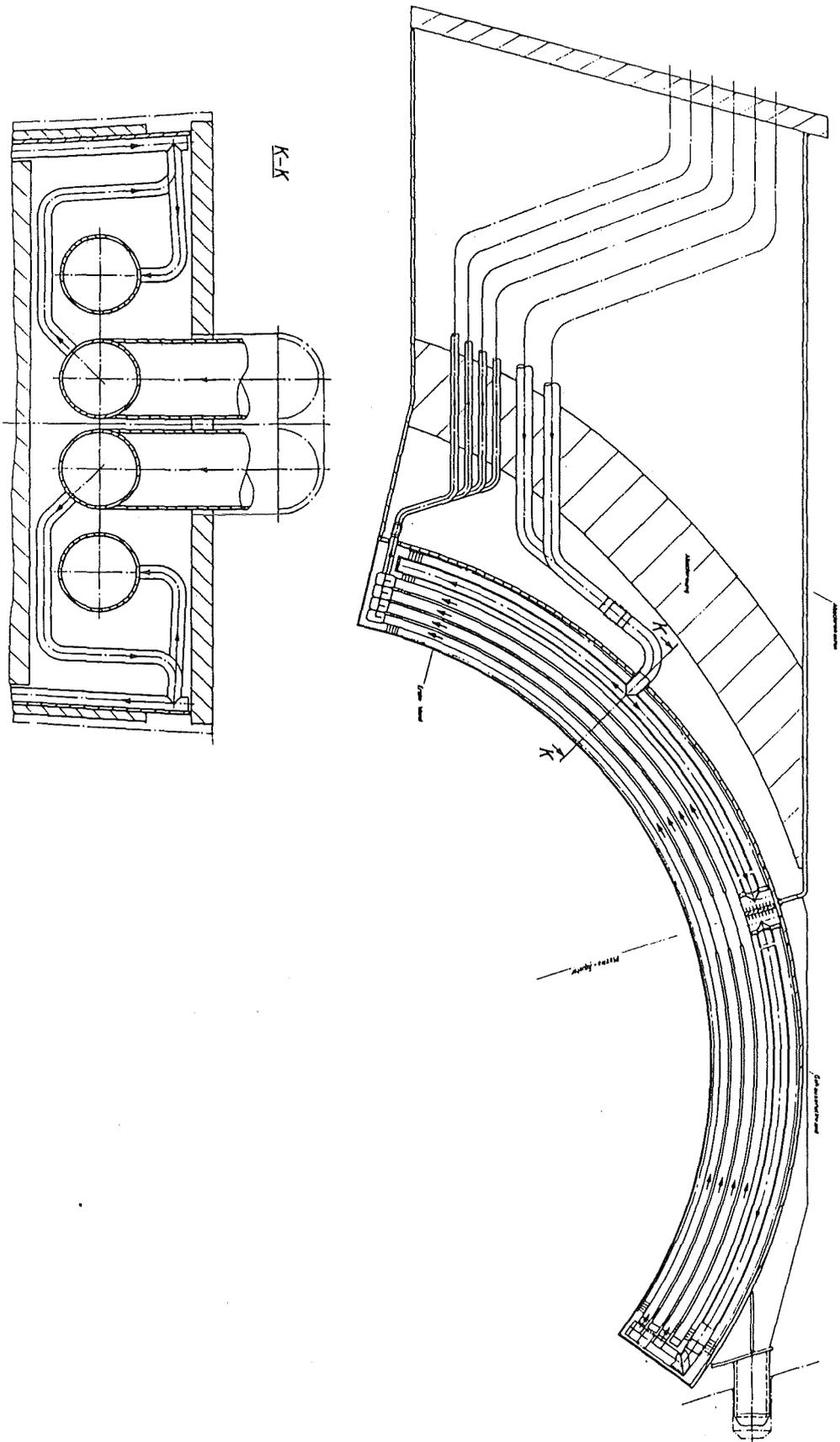


Abbildung 17: Heliumgekühltes Abschirmblanket (Übersicht)

0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
Studie für KIK		NET DN	
1:100 mm Heliumgekühltes Abschirmblanket			
SULZER		0-103 089 374 1/4	

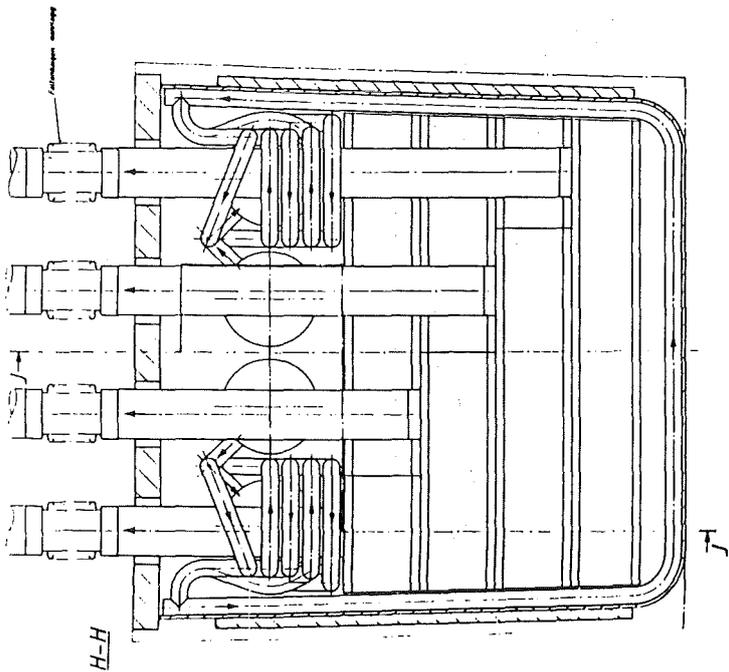
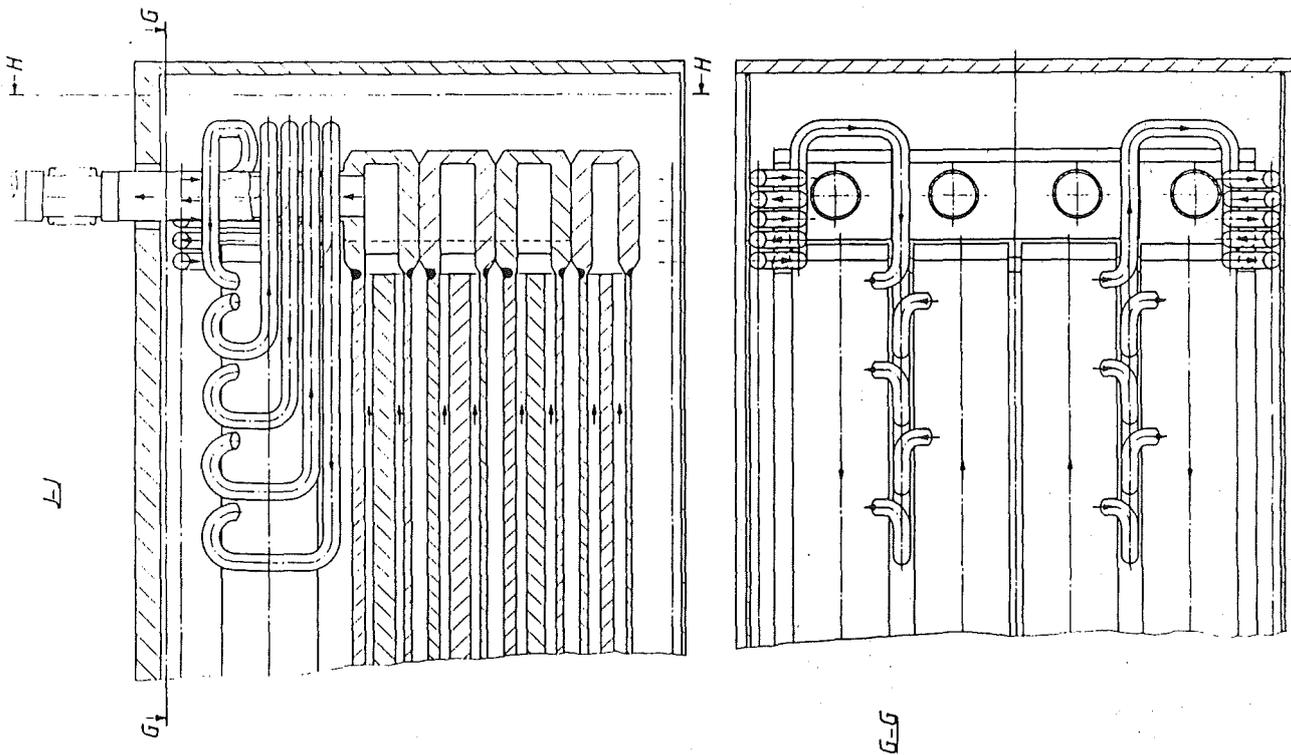


Abbildung 18: Heliumgekühltes Abschirmblanket, obere Kühlmittel-Sammelkanäle

10			
10	10	10	10
Studie für KFK			
Heliumgekühltes Abschirmblanket NET DN			
SULZER 0-103 089 374 2/4			

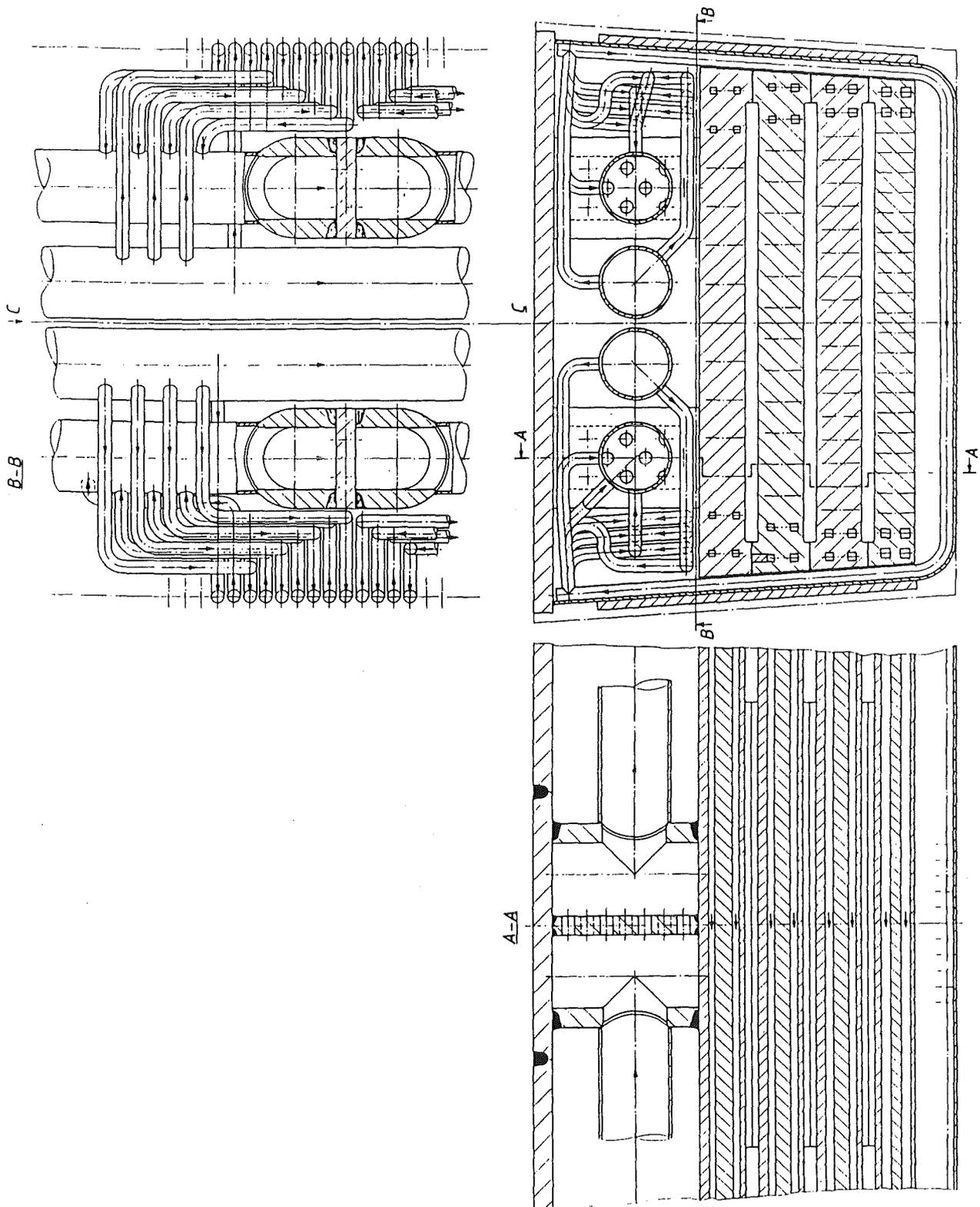
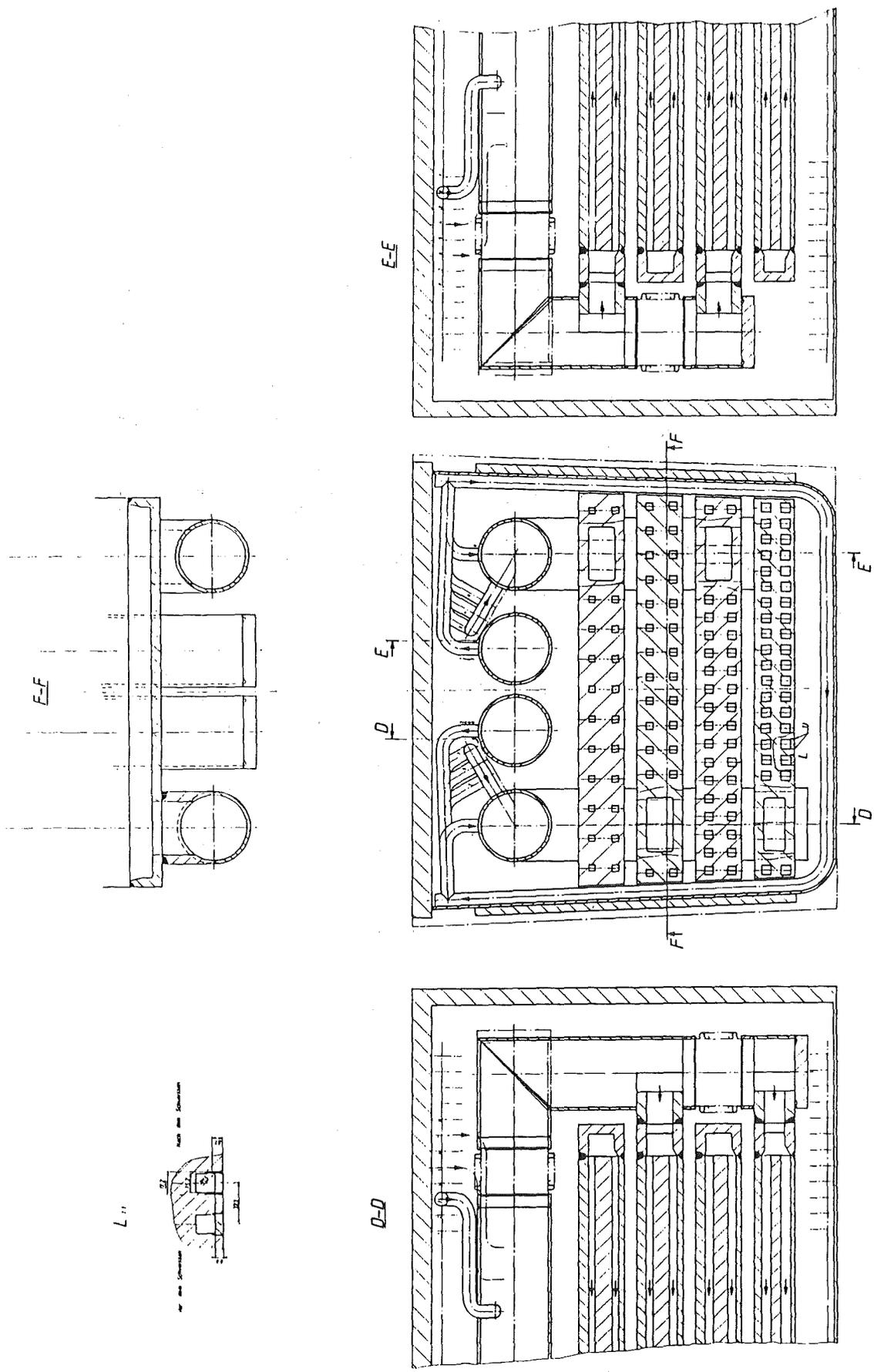


Abbildung 19: Heliumgekühltes Abschirmblanket
Plattenbefestigung in Torus-
Mittellebene

Gezeichnet	Geprüft	Freigegeben
Studie für KIK		
100 x 150 mm Heliumgekühltes Abschirmblanket/NET DN <small>normales Blanket</small>		
SULZER 0-103 089 374 3/4		



1) Alle Abstände auf 12.5-Gewindesteigungen

Abbildung 20: Heliumgekühltes Abschirmblanket untere Kühlmittel-Verteilerkanäle

10			
11	12	13	14
15	16	17	18
19	20	21	22
23	24	25	26
27	28	29	30
31	32	33	34
35	36	37	38
39	40	41	42
43	44	45	46
47	48	49	50
51	52	53	54
55	56	57	58
59	60	61	62
63	64	65	66
67	68	69	70
71	72	73	74
75	76	77	78
79	80	81	82
83	84	85	86
87	88	89	90
91	92	93	94
95	96	97	98
99	100	101	102

Studie für KTK
 Heliumgekühltes Abschirmblanket NET DN
 0-103 089 374 4/4
 SULZER

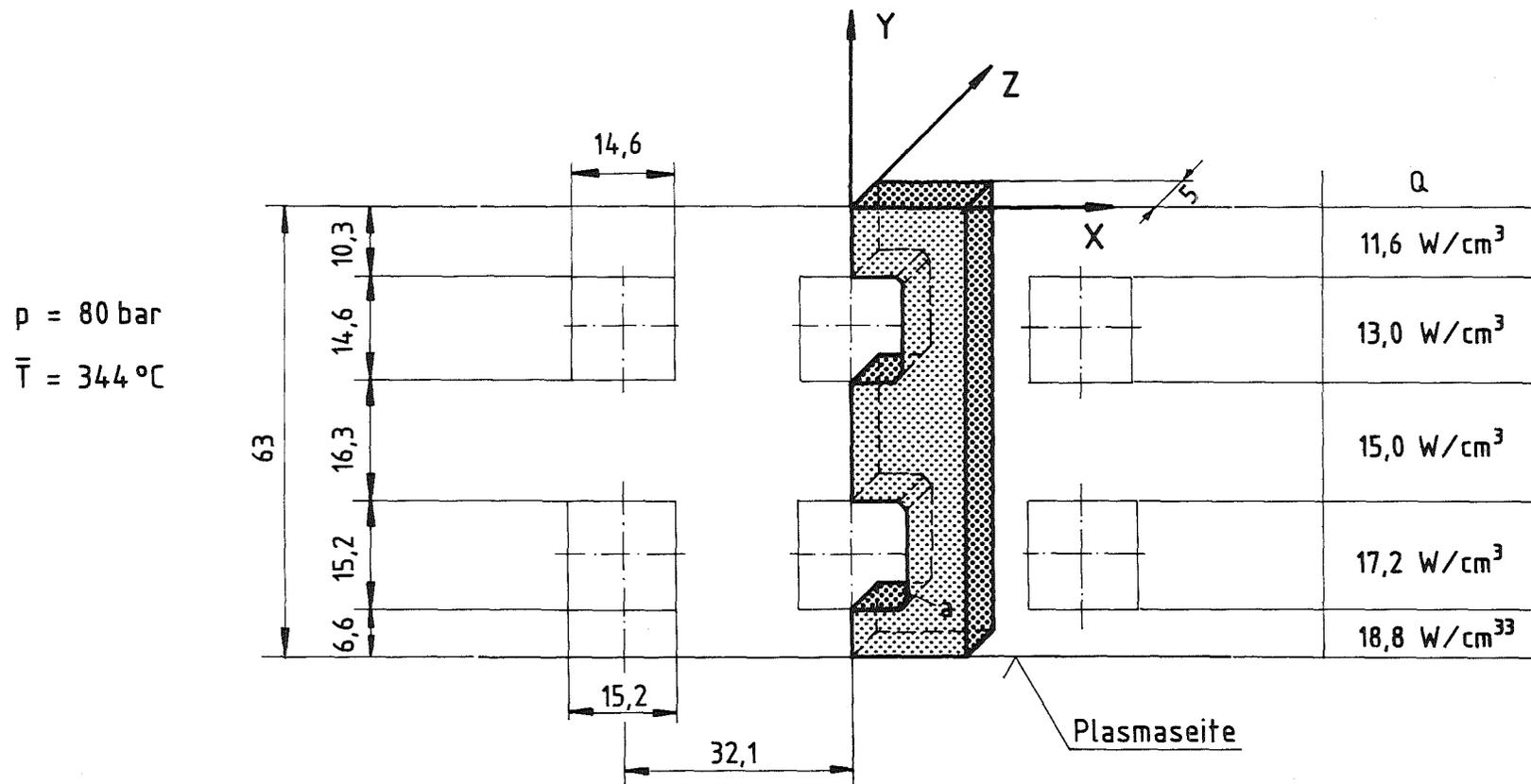


Abbildung 21: Querschnitt durch eine heliumgekühlte Abschirmplatte, Modell für Festigkeitsrechnungen