

DECKELVARIANTEN FÜR EINEN SPANNBETONBEHÄLTER
FÜR LEICHTWASSERREAKTOREN
(LIDS FOR A PRESTRESSED CONCRETE PRESSURE VESSEL
FOR LIGHT WATER REACTORS)

P. BINDSEIL, R. DIETRICH, M. EICK

*Krupp Forschungsinstitut, Krupp Maschinenfabriken, Krupp Universalbau,
Fried. Krupp GmbH, D-43 Essen, Germany*

SUMMARY

Increasing problems of machining and transportation of future thick-walled steel vessels for light water power reactors lead us to the development of PCPV design concepts for on-site construction, that means easy transport and erection of the different components without expensive devices on the site.

Following a survey on known designs for lids, there is given a definition of the task for the development of our own design concepts. Herein are accentuated such criteria which appear essential: automation, machining and handling.

For the main part two solutions for a removable lid will be referred to:

- lid with a space structure of steel, and a
- lid made of concrete.

Firstly there will be described principles of design and general properties of the lid structure.

Secondly an example is given for the solution of the design problem of transmitting the forces of the lid being induced by inner pressure of the vessel into the wall of the prestressed concrete pressure vessel. With this design it is not necessary to remove each *single* part of the device for transmitting the forces before removing the lid-body.

Furthermore, the design of a jointing is described which allows a reduction of the length of the elements for transmitting the forces of the lid.

For critical assessment of the realization of the lids, a stress analysis is prerequisite. A detailed analysis is necessary as loadings have locally extremely high values and also due to the space structure of the lids. Its purpose is to locate points with peak stresses. Numerical calculations for stress and strength analysis were executed by a computer program being able to analyse linear elastic systems by the Finite Element Method. These calculations gave results on the distribution of deformations, normal and shear stresses within the structure of the lids as a function of radius and height of the lid.

1. Einleitung

Größere Sicherheit im Hinblick auf plötzlichen Druckanstieg, die Verwendung konventioneller Baustoffe, eine baustellengerechte Herstellung durch Wegfall großer Stahlteile, einfache Fertigungsüberwachung und keine Beschränkung der Behältergröße durch das Fertigungsverfahren sind als Vorteile des Spannbetondruckbehälters gegenüber einem Stahldruckbehälter zu nennen.

Die hierauf abgestimmten Konstruktionsprinzipien gelten zunächst für den im wesentlichen zylindrischen Baukörper, aber insbesondere für solche Bauteile, wie der bewegliche Deckel, der Boden, der Liner, die Isolierung, die Durchführungen, etc.

Die hier behandelten Konstruktionen für bewegliche Deckel stellen dabei Lösungsvorschläge dar, welche folgenden extremen Anforderungen genügen:

- Behälterinnendurchmesser: 7.500 mm
- Behälterinnendruck (Betrieb): 88 kp/cm²
- Behälterinnentemperatur: 300°C
- Sonstige Anforderungen, wie Strahlenbelastung, u.a., resultieren aus der Leistung eines Referenzbehälters von: 1.600 MWel

Nachteile bekannt gewordener Deckelkonstruktionen wie schwierige Handhabung aufgrund einer großen Deckelmasse, aufwendige Fertigung und Transport bei Anwendung konventioneller Deckelformen, Vorrichtungen für die Kraftübertragung zwischen Deckel und der Behälterwand sowie dem Dichtungsflansch, welche einen hohen Bedienungsaufwand erfordern, werden bei den hier vorliegenden Lösungen weitgehend vermieden.

Die nachfolgend beschriebenen Deckelkonstruktionen können als grundsätzlich realisierbar angesehen werden. Es wird eingegangen auf die während der Entwicklungsphase aufgetretenen wesentlichen Probleme der Konstruktion, der Herstellung und der Berechnung.

2. Stahldeckel

2.1 Zur Konstruktion und Herstellung

Der den Behälterdruck aufnehmende Teil der Deckelkonstruktion, der Deckelkörper, ist als räumliches Tragwerk aufzufassen, welches aus senkrecht stehenden miteinander fest verbundenen sechseckförmigen Stahlrohren gebildet wird. Die äußeren Begrenzungen dieser Tragstruktur richten sich im wesentli-

chen nach dem Behälterinnendurchmesser und den Drucklasten. Die später noch näher beschriebene Zusammenbaufolge der Stahlrohre und die einfachen Muster, welche sich bei Quer- oder Längsschnitten durch die Tragstruktur zeigen, gestatten nun eine leichte Realisierung des Deckelkörpers an die geforderten Druckbehälterdaten: so werden die Stahlrohre bzw. deren Stegbleche einfach an ihren Längskanten gegeneinandergeschweißt, und zwar von der Mitte des Deckelkörpers beginnend, bis der Deckeldurchmesser erreicht ist, und die Rohre bzw. deren Stege werden in einfacher Weise abgelängt, um die entsprechend den Innendrucklasten geforderte Deckelhöhe zu erreichen.

Diese Konstruktion ist also unempfindlich gegen Änderungen der Druckbehälterabmessungen, vor allem größerer Durchmesser, wodurch ein hoher Grad an Typisierung in Konstruktion und Herstellung zu erwarten ist.

Wie schon oben gesagt, zeigt die Tragstruktur im Querschnitt ein sechseckiges Muster. Dieses Muster wird dadurch realisiert, daß die Knotenpunkte durch sternförmige Profile (3 Arme, 120° voneinander entfernt) gebildet werden und deren Arme bzw. Kanten mit angrenzenden, hochkant stehenden Blechen verschweißt sind. Diese Bleche, hier auch Stegbleche genannt, sind daher als Teile der Seitenwandung eines jeden sechseckigen Tragprofils aufzufassen. Streng betrachtet besteht die (innerhalb des Deckeldurchmessers liegende) Tragstruktur des Deckels also aus sternförmigen Profilen und Stegblechen. Im Prinzip ist diese Konstruktion auch einschließlich der druckfesten Struktur des Deckelumfanges vorgesehen: die sich dort ergebenden Knotenpunkte haben, ebenfalls im Querschnitt gesehen und massenbehaftet gedacht, auch die Form eines sternförmigen Profils - nur sind die Winkel der Arme verschieden von 120° und zwei Arme weisen jeweils die gleiche Krümmung wie der Deckeldurchmesser auf; die dazwischenliegenden Stege sind Abschnitte der zylindrischen Deckelwandung. (Siehe Bild 1).

Die Ausbildung der Knotenpunkte weist folgende Vorteile auf, die in der Anordnung von Stumpfstoßen der anschließenden Stegbleche begründet liegen:

- die Herstellung wird einfacher als bei Kehlnähten,
- die Prüfungen der Schweißnähte werden einfacher,
- es sind aussagekräftigere Prüfungen der Schweißnähte möglich, als es bei Kehlnähten der Fall wäre,
- indem die Schweißnähte vom ideellen Knotenpunkt (geometrischer Ort der Systemlinien des Musters) genügend entfernt sind, bleiben die Schweißeigenspannungen im Bereich des Knotenpunktes gering.

Diese Konstruktion der Knotenpunkte führt insgesamt zu einer höheren Bewertung der Schweißnahtfestigkeit, z.B. in gleicher Höhe als der Grundwerkstoff,

als dies durch T-Stöße der Stegbleche möglich wäre.

Es ist leicht zu sehen, daß ein Knotenpunkt mit drei Stegblechen die geringste Anzahl Schweißnähte bei Stumpfstoß (nämlich 3) aufweist. Parallelepipede würden dagegen je Knotenpunkt vier solcher Schweißnähte aufweisen.

Durch die Anordnung eines sechseckförmigen Querschnittsmusters ist weiterhin der Vorteil einer guten Zugänglichkeit von innen des einzelnen Tragprofils gegeben, da es der Kreisform gut angenähert ist.

Parallelepipede und Trapeze sind auch in dieser Hinsicht ungünstiger, da die Verhältnisse Diagonale zu Seitenabständen größer sind.

Vielecke mit einer größeren Seitenzahl als sechs würden zwar eine bessere Zugänglichkeit bieten, doch wäre die Herstellung aufwendiger als bei Elementen für ein sechseckförmiges Querschnittsmuster, da die zwischen den Knotenpunkten liegenden Stegbleche ein- oder mehrfach abgewinkelt werden müssen.

Ein Fünfeck würde nun ähnlich gute Eigenschaften im Hinblick auf die Zugänglichkeit (etwas schlechter) und die Herstellung (besser, ein Stegblech weniger) aufweisen als ein Sechseck, doch wären die Festigkeitseigenschaften einer dergestalt aufgebauten Tragstruktur ungünstiger, und zwar aus folgendem Grund:

- um eine hohe Steifigkeit gegen die seitlich auf den Deckel wirkende Druckbelastung und die schräg von oben von der Anlagefläche der Druckübertragungselemente her wirkenden Kräfte zu erzielen, sollen die Verbindungslinien der Knotenpunkte, im Deckelquerschnitt gesehen, zum einen möglichst eine Gerade bilden und zum anderen, über den vollen Kreis gesehen, zur Deckellängsachse hinzielen (also möglichst deckungsgleich mit Radien sein); Muster mit Fünfecken oder Parallelepipeden erfüllen nun diese Forderung schlecht; Muster mit Sechsecken können hier als günstiger angesehen werden. (Siehe Bild 1, Schnitt C-D).

Zur Aufnahme der Innendruckkräfte wird die Tragstruktur des Deckelkörpers unten, an der schrägen Auflagefläche und an der vorteilhaft als Zylindermantel auszubildenden Seitenfläche mit Blechen versehen, welche zusätzlich eine Dichtfunktion haben können. Diese Abdeckung ist an der Deckelunterseite fest mit den Wandungen jedes sechseckigen Tragprofils verbunden, am Deckelumfang verbindet sie die Steglängskanten der hier in Längsrichtung aufgeschnittenen Tragprofile. Die Oberseite der Deckeltragstruktur wird dagegen mit einzelnen sechseckigen Platten derart abgedeckt, daß eine leichte Zugänglichkeit für spätere Wiederholungsprüfungen und Inspektionen gegeben ist.

Wie in / 1 / schon angedeutet, so können auch bei dieser Deckelkonstruktion die Hohlräume der Tragstruktur mit einem geeigneten festen oder losen Abschirmmaterial gefüllt werden, und zwar vorteilhaft nicht bis zur gesamten Deckelhöhe, um die Deckelmasse nicht zu groß werden zu lassen.

Eine Erhöhung der Beulsteifigkeit - aufgrund seitlicher Drucklasten - übernehmen bei der vorliegenden Konstruktion Bleche, welche quer zur Deckelachse angeordnet sind, entsprechend dem inneren Querschnitt der Tragprofile geformt sind und in bestimmter Teilung entlang der Deckellängsachse in jedes Tragprofil fest eingebaut werden. (Siehe Bild 1 Schnitt A-B):

Von dieser Möglichkeit braucht natürlich nur entsprechend den tatsächlichen Kraftverhältnissen im Deckelkörper Gebrauch gemacht werden. So kann es denkbar sein, daß in einem konkreten Anwendungsfall die gewählten Teilungen des Querschnittsmusters und die Wanddicke der Stegbleche ohne solche Querbleche ausreichen, in einem anderen Fall nur in einem bestimmten kreisringförmigen Bereich solche Verstärkungen notwendig sind und schließlich bei großen Verhältnissen Deckeldurchmesser zur Teilung des Querschnittsmusters über den ganzen Querschnitt und zusätzlich enger Teilung in Richtung der Deckellängsachse derart verstärkt werden muß.

An der Unterseite des Deckelkörpers sind, um die Ausdehnung der Deckelstruktur infolge von Temperatureinwirkungen in Grenzen zu halten, von unten aus gesehen eine druckfeste Dichthaut, eine thermische Isolierung und ein Kühlsystem angeordnet. Durch Bolzen wird ein Ausbeulen der Dichthaut verhindert.

Von der druckfesten zylindrischen Wandung des Deckelkörpers ist eine ähnliche Konstruktion vorgesehen und nach außen hin mit einer Dichthaut abgeschlossen.

Über Tragpratzen liegt der Deckel mit seinem Eigengewicht auf einer Verstärkung der Dichthaut der zylindrischen Wandung des Druckbehälters auf.

Bild 2 gibt Aufschluß über den Zusammenbau des Deckelkörpers, der Isolierung und des Liners.

Die aus Strangpreßprofilen und Blechen zusammengeschweißten Sektionen des Deckelkörpers stellen zum einen den überwiegenden Materialanteil des Deckels, zum anderen bieten sie gute Möglichkeiten automatischer Fertigung. Die Strangpreßprofile werden einschließlich der Schweißfasen fertig gepreßt, so daß bei den Vormaterialien nur die Stegbleche geschnitten und die Kanten bearbeitet werden müssen. In Vorrichtungen werden die Strangpreßprofile dann mit den Stegblechen automatisch verschweißt, z.B. nach dem UP-Verfahren. Diese Vorrichtungen sind dabei so gestaffelt in ihrem Aufbau, daß sie dem Fortschritt der Sektion auf dieser Fertigungslinie entsprechen. So werden in

einer ersten Vorrichtung das erste Stegblech an ein Strangpreßprofil geschweißt, in einer zweiten Vorrichtung das zweite, in einer dritten Vorrichtung das dritte und schließlich in einer vierten Vorrichtung diese Schweißgruppen mit den fehlenden Strangpreßprofilen verbunden entsprechend dem Umfang der jeweiligen Sektion.

Die ebenfalls auf Bild 2 dargestellte Endmontage des Deckels beginnt mit dem Zusammenschweißen der Sektionen zum Deckelkörper. Das Heften der Sektionen geschieht dabei derart, daß die Sektionen auf einer ebenen Platte stehen, und zwar entsprechend der späteren Einbaulage. Sind alle Steglängsnähte geschweißt, wird der Deckel auf Kopflage gestellt. Die untere Deckelplatte wird angeschweißt und der heiße Liner für die Deckelunterseite befestigt; der dazwischenliegende Raum wird dann schon mit keramischer Isolierung ausgefüllt. Die quer zur Deckellängsachse liegenden sechseckigen Platten werden eingebaut, und zwar in der hier vorliegenden Montageposition von oben beginnend. Danach wird der Deckel wieder gewendet und die Bauteile für die Deckelschräge angeschweißt. Mit dem Einschweißen der sechseckigen Platten für die obere Deckelseite ist der eigentliche Deckelkörper fertiggestellt. Es folgt abschließend die Montage der Strukturen für den Liner und dessen oberen Abschluß an der zylindrischen Mantelfläche des Deckelkörpers sowie der am Deckel angeordneten Teile der Abdichtung.

Der Deckel wird durch Stützelemente unter einer Neigung von 45° gegen die Innenwandung des Druckbehälters abgestützt. Die Stützelemente sind auf zwei Teilkreisen angeordnet, um die Kräfte gleichmäßig zu verteilen und die Stützlänge zu verringern. (Siehe Bild 3).

Die Stützelemente sind als Druckschrauben ausgebildet, bei der eine Gewindespindel durch eine in Gleitlagern drehbar gelagerte und durch eine Schnecke angetriebene Mutter in Richtung ihrer Längsachse bewegt wird, wobei die Mutter axial unbeweglich gelagert ist. Diese Elemente überbrücken den Abstand zwischen Deckel und Druckbehälter in einem Zuge, können automatisch betätigt werden und bleiben fest verankert, so daß keine Montagearbeiten erforderlich sind während des Deckelein- oder -ausbaues.

Ein Torus nimmt die Relativbewegungen des Deckels gegenüber dem Behälter auf. Er ist mit dem Dichtungsflansch verbunden, in welchem zwei O-Ringe liegen. Zwischen diesen Dichtungen ist eine Absaugung zur Leckkontrolle vorgesehen. Klammerförmige Elemente erzeugen die für das Dichthalten dieser Flanschverbindung erforderliche Druckkraft. Sie sind verschiebbar angeordnet, so daß die Möglichkeit besteht, auch diese Verbindung mit einer geeigneten stationären Vorrichtung automatisch zu betätigen. (Siehe Bild 3)

2.2. Berechnung des Stahldeckels

Zur Beurteilung der Beanspruchung des Stahldeckels erwies es sich als zweckmäßig, eine detaillierte Spannungsanalyse durchzuführen. Die konstruktive Gestaltung (wabenförmiger Aufbau) sowie die Beanspruchung des Stahldeckels infolge des Innendruckes und der daraus resultierenden Reaktionskräfte an den schrägen Abstützungen (Bild 4) machte es notwendig, die numerischen Rechnungen mit Hilfe eines digitalen Rechenprogramms, das die Berechnung linear elastischer Systeme nach der "Finite Element Method" gestattet, durchzuführen. Es wurde das Rechenprogramm SAP angewendet / 2 /.

Zur Diskretisierung der Struktur wurde der Stahldeckel über die Höhe in sechs Ebenen eingeteilt (Bild 4). Für die Ebene I einschließlich der schrägen Abstützungsfläche, Ebene VI und zwischen den einzelnen Ebenen wurden Plattenelemente gewählt. Die Belastung der Ebene VI infolge des Innendruckes von 88 kp/cm^2 wurde auf äquivalente Knotenpunktskräfte umgerechnet. Für die Reaktionskräfte an der schrägen Abstützung wurden ebenfalls Knotenpunktskräfte angesetzt. Für die Elemente am Umfang des Stahldeckels wurden Schalenelemente gewählt, so daß an den Seiten des Stahldeckels eine gleichmäßig verteilte Flächenlast vorgegeben werden konnte. An der schrägen Abstützfläche wurden außerdem "Boundary Elements" mit einer hohen Steifigkeit vorgesehen. Hierdurch war es möglich festzustellen, ob in diesem Bereich infolge der Verformungen Zugkräfte auftreten, d.h. ob an den Abstützflächen ein teilweises Abheben möglich ist. Querstege zur Erhöhung der Steifigkeit der Deckelkonstruktion wurden bei der Rechnung nicht berücksichtigt.

Als Ergebnis der numerischen Rechnung wurden die Knotenpunktsverschiebungen und die Normal- und Schubspannungen in den Schwerpunkten der einzelnen Elemente erzielt. Aus den so ermittelten Spannungen wurden nach der Hypothese der größten Gestaltsänderungsarbeit Vergleichspannungen errechnet. Die erzielten Ergebnisse für die Ebenen I, II und VI, die als repräsentativ angesehen werden können, sind in den Bildern 5 bis 15 dargestellt.

Die Verformungsbilder (Bild 6, 10 und 13) lassen erkennen, daß die maximale Durchbiegung in der Mitte des Stahldeckels ca. 4 mm beträgt und daß sie über dem Umfang des Stahldeckels ungleichmäßig ist. Die Ursache dieser ungleichmäßigen Verformung ist in der unsymmetrischen Anordnung der sechseckigen Stahlrohre zu sehen.

Diese ungleichmäßigen Verformungen spiegeln sich auch in den Spannungsverläufen wieder, die in den Bildern 7, 8, 11, 14 und 15 dargestellt sind. Hierbei wird deutlich, daß, wie erwartet, in der Nähe der Abstützungen Spannungsspitzen auftreten, die aber sehr schnell abgebaut werden. Bemerkenswert ist jedoch, daß die maximalen Spannungen nicht in diesem Bereich auftreten, sondern in den am Umfang des Stahldeckels liegenden Schalenelementen, die durch

den Innendruck beansprucht werden (vergl. Bild 15). Die Ergebnisse führen zu folgenden Schlußfolgerungen:

- a) Es empfiehlt sich, eine möglichst symmetrische Anordnung der sechseckigen Rohre vorzusehen, damit die Verformungen des Stahldeckels gleichmäßiger werden.
- b) Die Wände am Umfang des Stahldeckels müssen verstärkt werden, damit unzulässig hohe Spannungsspitzen in diesem Bereich nicht auftreten.
- c) Im Bereich der schrägen Abstützflächen tritt ein teilweises Abheben infolge der Verformungen des Stahldeckels nicht auf.

3. Betondeckel

3.1. Aufgabenstellung

Der im folgenden beschriebene Entwurf eines nicht vorgespannten Betondeckels strebt eine Lösung an, die durch die Formgebung ein möglichst zwängungsloses Abtragen der Innendruckbelastung in Form von Gewölbedruckspannungen gestattet. Dadurch wird ein betongerechter Spannungszustand und ein minimaler Materialverbrauch erreicht. Letzter ist besonders wichtig, da er wegen des geringen Gewichtes der Behältereinbauten die Auslegung des Gebäudekranes direkt beeinflußt.

3.2. System und Belastungen

3.2.1. Allgemeines

Der Deckel hat wie unter 1. beschrieben die Innendruckbelastung des Behälters aufzunehmen und über eine geeignete Übergangskonstruktion auf den eigentlichen SBB abzuleiten. Daneben erhält er noch Temperatur- und Strahlenbelastung, die bei der gewählten Konstruktion im wesentlichen Eigenspannungszustände ohne große Reaktion auf den restlichen Behälter darstellen.

Die Übergangskonstruktion und die Dichtung ähneln weitgehend den unter 2. beschriebenen Lösungen. Liner, Isolierung und Kühlsystem entsprechen der Konstruktion der "normalen" Bereiche des SBB.

SBB = Spannbetondruckbehälter

3.2.2. Form des Deckels

Der Deckel ist als relativ schlanke, konkave Kugelkalotte mit druckseitig ebenem Abschluß ausgebildet. Die Auflager stützen die Kalotte unter einem Winkel von ca. 45° . Dadurch kann sich eine Gewölbetragwirkung ausbilden. Durch parametrische Variationen der vorgewählten Form kann der Spannungszustand den Gegebenheiten des Materials optimal angepaßt werden. In den bisherigen Spannungsuntersuchungen wurde der Liner noch nicht berücksichtigt.

3.2.3. Belastungen

Innendruck:

Er ist maßgebend für die Form und die Abmessungen des Deckels. Dabei ist auch die seitliche Höhenlage der Dichtung von Einfluß.

Temperatur:

Eine gleichmäßige Temperaturerhöhung erzeugt wegen der Art der Lagerung fast keine Spannungen.

Ein Temperaturgradient im Beton, zu $\Delta T = 20^{\circ}$ angesetzt, erzeugt weitgehend unabhängig von möglichen Formvarianten Zwängungsspannungen im Deckel. Die dabei auftretenden Zugspannungen sind gering und werden im Betriebszustand durch den Innendruck überdrückt.

Strahlung:

Beton ist bekanntermaßen ein sehr gutes Abschirmungsmedium. Die entstehenden Temperaturbelastungen sind noch nicht berücksichtigt.

3.4. Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen

3.4.1. Allgemeines

In einigen Voruntersuchungen wurden zunächst Form und Auflagerbedingungen des Deckels sowie die Höhenlage der Dichtung variiert. Die daraus abgeleitete Lösung sieht die Dichtung knapp unterhalb der Deckeldruckstützen vor, die aus zwei übereinander liegenden Reihen von über dem Deckelumfang verteilten Stützelementen (wie in Kap. 2. beschrieben) bestehen.

3.4.2. Spannungsanalyse

Die Spannungsanalyse wurde mit Hilfe eines Finite-Element-Programms rotationssymmetrisch durchgeführt. Dabei wurden die Druckstützen durch in deren Systemlinien angesetzte Stabelemente (ohne Steifigkeit in Umfangsrichtung) eingeführt. Die Steifigkeit wurde so gewählt, daß die Nachgiebigkeit des SBB näherungsweise erfaßt ist.

Die berechneten Lastfälle sind Bild 16 zu entnehmen.

Die resultierenden Hauptspannungen sind als Trajektorien geplottet. Der Spannungszustand nähert sich recht gut dem idealen Gewölbespannungszustand an. Bis auf örtlich eng begrenzte Spaltzugbereiche an der oberen Auflagerung treten keine Zugspannungen auf. Die Spannungen in Deckelmitte betragen auf der Unterseite maximal $\sigma_r = \sigma_\theta \approx - 250 \text{ kp/cm}^2$ (Druckspannung)
an der Mantelseite $\sigma_r = \sigma_\theta \approx - 170 \text{ kp/cm}^2$ (Druckspannung)

Die maximal auftretende Zugspannung aus Temperatur im drucklosen Zustand beträgt $\sigma_z \approx 15 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$ (auf der Deckelaußenseite).

Die Rechnungen ergeben, daß ein Betondeckel der untersuchten Form mit den gewählten Abmessungen möglich ist.

Vor der endgültigen Dimensionierung sind noch folgende Punkte zu klären:

- Festlegung zulässiger Spannungen
- Untersuchung des Bruchverhaltens

Die vorliegende Konstruktion unterscheidet sich vom restlichen SBB durch die Art der Belastung:

Der Innendruck stellt die einzige nennenswerte Belastung dar, so daß bei Lastzyklen eine Schwellspannung in Höhe der maximalen Spannungen aufgebracht wird. Die z.B. in / 3 / angegebenen zulässigen Spannungswerte für SBB's können daher nicht ohne weiteres übernommen werden. Die Höhe zulässiger Druck- und Zugspannungen wird unter anderem von der Lastgeschichte des SBB abhängen. Die maximale Lastwechselzahl wird allerdings während der Betriebszeit des Reaktors ≈ 100 betragen. Einflüsse auf die Festigkeit des Betons werden beim vorliegenden Spannungsniveau gering sein. Die Höhe der zulässigen Zugspannung hat Einfluß auf die Auslegung des Kühlsystems. Das Betonkriechen ist bisher noch nicht berücksichtigt worden. Sein Einfluß wird wegen der geringen Standzeiten der max. Belastungen geringer sein als im restlichen SBB.

Die Höhe der zul. Druckspannungen wird auch direkt durch die einzusetzende

Bruchlast des Deckels bestimmt, da weder wesentliche Spannungsumlagerungen noch die Ausbildung eines vom ursprünglichen abweichenden Bruchsystems zu erwarten sind. Untersuchungen zum Bruchverhalten stehen noch aus.

Abschließend sei noch bemerkt, daß sich für abnehmbare Deckel, die eine große Zahl von Durchbrüchen erhalten, eine aus den beiden erläuterten Entwürfen kombinierte Lösung anbietet, wie sie vom erstgenannten Verfasser als Prinzip bereits in / 1 / vorgeschlagen worden ist.

4. Schlußbetrachtungen

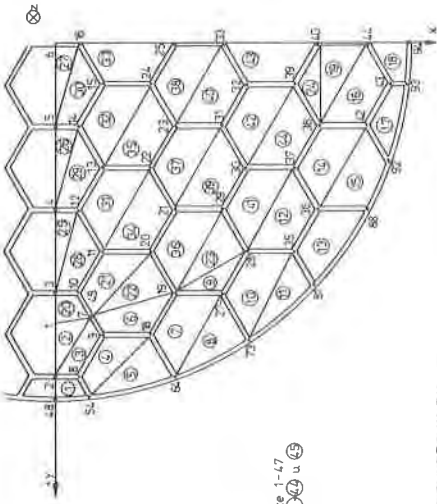
Gegenüber in anderen Veröffentlichungen beschriebenen Konstruktionen für bewegliche Deckel kann für beide hier erläuterte Entwürfe zunächst gesagt werden, daß der Ein- und Ausbau des Deckels durch Verwendung automatischer Vorrichtungen einfacher bzw. schneller vor sich gehen kann.

Die Betonvariante ergibt im Vergleich mit bekannten Konstruktionen aus Beton eine relativ geringe Masse aufgrund der günstigen Gestaltung. Sie weist gegenüber der Stahlvariante den Vorteil auf, daß sie relativ einfacher herzustellen ist und der Strahlenschutz integriert ist.

Die Stahlvariante - als Deckel mit räumlichem Tragwerk - weist gegenüber der Betonlösung eine geringere Masse auf und hat bessere Sicherheitseigenschaften gegenüber "einlagigen", schalenförmigen Deckeln. Der hier beschriebene Stahldeckel kann auch eine günstige Lösung für einen Spannbetondruckbehälter mit Druckwasserreaktor darstellen, da bei diesem Reaktortyp eine Vielzahl von Durchführungen durch den Deckel gehen und das wabenförmige Querschnittsmuster dieses Stahldeckels in dieser Hinsicht angepaßt ist. Die durchgeführten Festigkeitsberechnungen haben gezeigt, daß die diskutierten Lösungen grundsätzlich ausführbar sind.

Literaturverzeichnis

- / 1 / Gasbrüter-Memorandum, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Februar 1971, Seite C 82; KfK-Nr. 1373 (Auch EUR - 4575 1 d).
- / 2 / SAP, A General Structural Analysis Program
by Edward L. Wilson, University of California, Berkeley, California
- / 3 / THTR-Spannbetonreaktordruckbehälter, Bericht Nr. 1,
Gebrauchszustände von Prof. Dr.-Ing. Zerna, Fassung März 1971



Ebene I
 Höhe $z = 0$ mm
 Nr der Knotenpunkte 1-47
 Nr der Elemente ①-④ u. ⑤

BILD 5 Skizze zur Beschreibung der Topologie der Ebene I

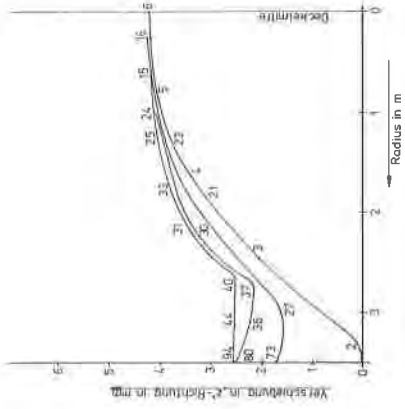


BILD 6 Verformung des Stahldeckels in z-Richtung in der Ebene I

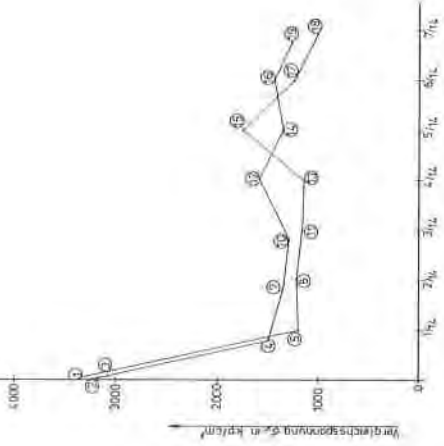


BILD 8 Vergleichsspannung in den Bandedementen der Ebene I

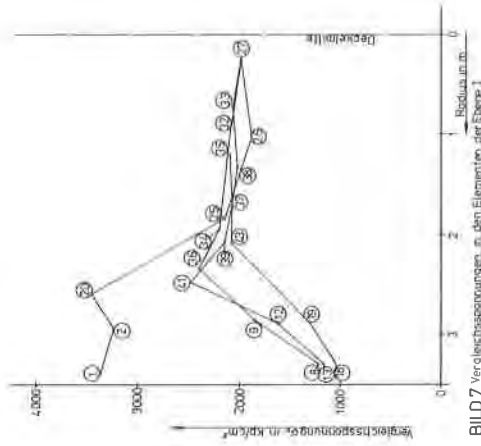
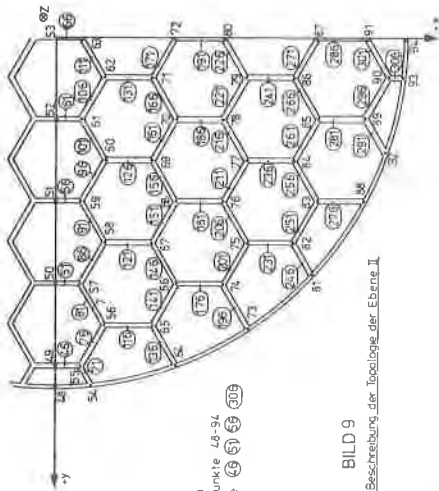


BILD 7 Vergleichsspannungen in den Elementen der Ebene I



Ebene II

Höhe $z = 75.5$ cm
 Nr der Knotenpunkte 48-94
 Nr der Elemente 63 (61) 63 (20)3

BILD 9

Skizze zur Beschreibung der Topologie der Ebene II

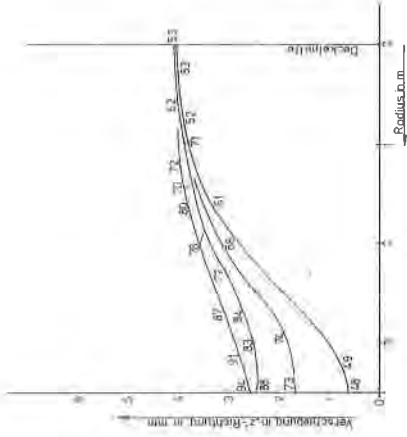


BILD 10 Verformung des Stahldeckels in $x-z$ -Richtung in der Ebene II

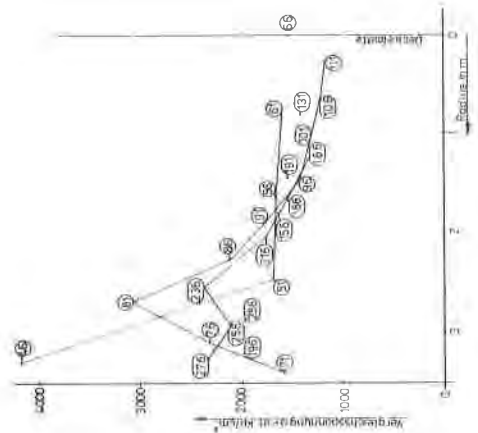
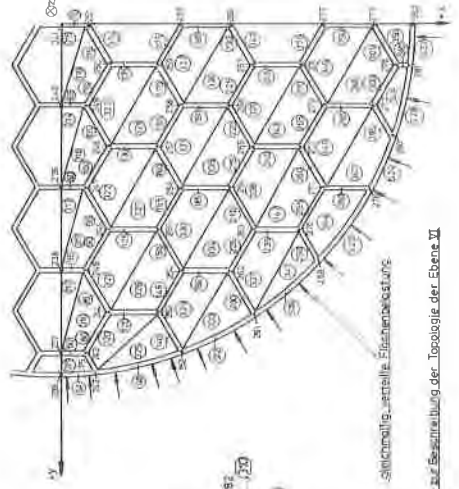


BILD 11 Vergleichsspannungen in den Elementen der Ebene II



Ebene II
 Höhe $z = 377.5$ cm
 Nr der Knotenpunkte 21-75
 Nr der Elemente 103 (101) 103
 50 (48) 50 (10) 50 (10) 50 (10) 50 (10)

BILD 12 Skizze zur Beschreibung der Topologie der Ebene II

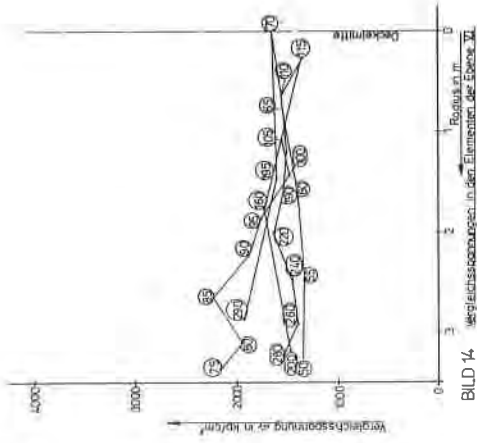


BILD 14 Vergleichsspannungen in der Ebene der Epoxy-Resin

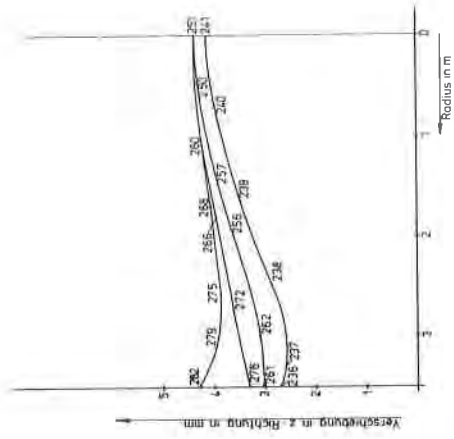


BILD 13 Verformung des Stahldeckels in z-Richtung in der Ebene der Epoxy-Resin

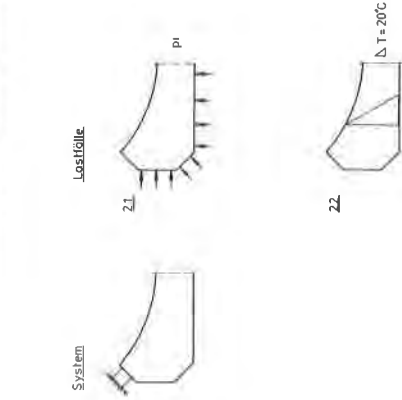


BILD 16

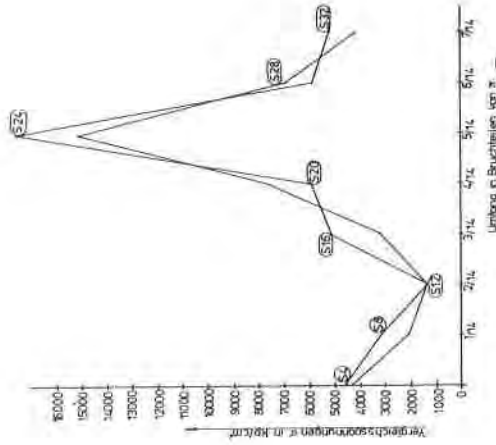


BILD 15 Vergleichsspannungen in den Schalenanteilen der Ebene der Epoxy-Resin

