

ENTWURF UND BERECHNUNG EINES VORGESPANNTEN BETON-CONTAINMENTS FÜR AEG-SIEDWASSERREAKTOREN

(DESIGN AND STRUCTURAL ANALYSIS OF PRESTRESSED CONCRETE CONTAINMENT FOR AEG PRODUCT LINE 72 BWRs)

J. MATTERN

Fachbereich Kernreaktoren, AEG-Telefunken, D-6000 Frankfurt/Main, Germany

H. FRÜHAUF, K. MEERWALD

Abt. Kernenergie, Hochtief AG, D-6000 Frankfurt/Main, Germany

SUMMARY

The new AEG Product Line Boiling Water Reactor is to be provided with a Prestressed Concrete Containment Vessel replacing the Spherical Steel Containment that has been used for Reactors to date.

The Concrete Containment Vessel encloses a Pressure Reduction System and is made up of a cylindrical concrete structure with an inner steel liner. It comprises two rooms—a dry-well and a wet-well (condensation pool)—that are separated from one another by a permanent concentric cylindrical wall and an annular slab. Surrounding the Steel Reactor Vessel is an extra concrete cylinder that also acts as a shield.

The outer cylindrical wall of the Concrete Containment Vessel is prestressed. The base for the containment vessel is bonded to the foundation slab and the top slab is stiffened by the fuel element pool which is integral with the deck, thus eliminating the need for prestressing.

The following report explains the structural design with special consideration to particular development phases. Demonstrated are the adverse effects of the individual components such as piping, liner and the concrete structure itself with special attention to the technical safety aspects.

Special consideration was given to the design of the structure to enable analytical methods to be used to simplify the structural analysis.

Special problems, for example size, random close spaced penetrations or asymmetrical loading due to pressure relief effects require the use of computer programmes with two and three dimensional finite elements.

At present in Germany there exist no standards for Concrete Containment Vessels or for Prestressed Concrete Pressure Vessels for Reactors. There appears to be no purpose in setting down strict rules, while the requirements, especially those arising from safety aspects are still being evolved and they will vary for different reactor types.

For this particular project special design criteria have been imposed and by critically comparing the results, a design has been obtained that allows economical construction together with adequate safety features.

1. Allgemeines

Für den AEG-Siedewasser-Reaktor wird ein Betonsicherheitsbehälter vorgesehen, der die bisherigen kugelförmigen Stahlcontainments ablöst.

Der Sicherheitsbehälter wird mit einem Druckabbausystem als vorgespannter Betonzylinder mit innenliegender Stahldichthaut ausgeführt. Trag- und Dichtfunktion werden somit getrennt von den unterschiedlichen Materialien aufgenommen. Druck- und Kondensationskammer sind durch konzentrisch angeordnete zylindrische Wände mit ebenen Decken begrenzt. Auf den Sicherheitsbehälter aufgesetzt sind das Lager für neue Brennelemente mit Flutraum und Absetzbecken.

Die wesentlichen Abmessungen des Sicherheitsbehälters für eine 1300 MWe-Anlage mit reaktorinternen Umwälzpumpen sind:

lichter Durchmesser	29,0 m	
lichte Höhe	32,5 m	
ohne Kabelkanäle		
äußerer Durchmesser der Kondensationskammer-Innenwand	16,6 m	
lichte Höhe der Kondensationskammer		23,0 m
Freies Luftvolumen der Druckkammer		7900 m ³
Freies Luftvolumen der Kondensationskammer		6600 m ³
Wasservolumen der Kondensationskammer		3000 m ³

2. Belastungen

Die wesentlichen Belastungen für die Auslegung sind

2.1 Drücker

maximaler Innendruck	$p_i = 2,6 \text{ atü} = 3,6 \text{ ata}$
maximale Druckdifferenz zwischen Druckkammer und Kondensationskammer, Druckgefälle zur Kondensationskammer hin	$p = 1,1 \text{ ata}$

Wasserfüllung des gesamten Sicherheitsbehälters einschließlich des Aufsatzes für Flutraum, Absetzbecken und Brennelement-Lagerbecken bis + 39,0 m Höhe

2.2 Temperaturen

Die Temperaturen betragen im Betrieb im Mittel

Druckkammer	55°C
Kondensationskammer	35°C
Außentemperatur Gebäude	20°C

Bei Störfällen sind maximale Temperaturen zu erwarten

kurzfristig in der Druckkammer	180°C
in der Kondensationskammer	100°C

2.3 Strahlkräfte

Beim Bruch einer Frischdampfleitung ist mit einer Kraft von $P_{St} = 348 \text{ Mp}$ verteilt auf 3,2 m² Fläche zu rechnen.

2.4 Erdbeben

Als Sicherheitserdbeben wurde angesetzt:

horizontale Beschleunigung	0,2 g	
vertikale Beschleunigung	0,134 g	mit dem El-Centro-Spektrum

3. Konstruktionsbeschreibung

3.1 Entwicklungsstufen

Die Entwicklung des Betoncontainments stellt einen Iterationsprozeß dar, der sich bei laufender gegen- und wechselseitiger Beeinflussung der einzelnen Komponenten vollzieht. Dabei muß die Betonstruktur so gestaltet werden, daß die mannigfaltigsten Interessen wie z.B. die des Rohrleitungsbaues, der Sicherheitstechnik oder der Beladetechnik optimal erfüllt werden, bei einer gleichzeitigen Optimierung der Betonstruktur selbst.

Die einzelnen Iterationsschritte zu beschreiben, würde zu weit führen; es soll nur auf einige markante Punkte eingegangen werden.

Das Betoncontainment für die Baulinie 72 wurde erstmals auf der NUCLEX im Oktober 1972 in Basel vorgestellt. Der damalige Entwurf unterscheidet sich in drei wesentlichen Punkten von der Konstruktion, Stand März 1973:

- a) der Anordnung des Brennelementlagerbeckens
 - b) der Anordnung der Kondensationsrohre
 - c) der Fundamentausbildung
- (siehe Abbildung 1 und 2)

Zu a) Brennelementlagerbecken

Bei der damaligen Ringbeckenkonstruktion war die spannungs- und sicherheitsmäßige Beurteilung der Betonkonstruktion sehr kompliziert, und auch die technische Ausführung. Dafür sprach, daß das gesamte Reaktorgebäude niedriger gehalten werden konnte. Bei der jetzigen Konstruktion wird das Gebäude zwar um mehr als 4 m höher, dafür sind nicht zu übersehende Vorteile für die Sicherheit und Klarheit der Konstruktion erzielt worden.

Zu b) Anordnung der Kondensationsrohre

Beim alten Entwurf bestand die Decke zwischen Druck- und Kondensationskammer aus einer mit mehr als 120 Öffnungen durchlöcherten Kreisringplatte. Diese nahezu gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilten Öffnungen erschwerten die Verlegung von Rohrleitungen im oberen Druckkammerraum in nicht mehr vertretbarem Maße und ließen für eine spätere Anordnung von Ausschlagsicherungen keinen Spielraum mehr zu. Als Folge davon wurden die Kondensationsrohre in Sammlern zusammengefaßt, die über die innere Kondensationskammerwand mit der Druckkammer verbunden sind.

Zu c) Fundamentausbildung

Bei dem alten Entwurf setzte die Kondensationskammer direkt auf der Fundamentplatte auf. Es war vorgesehen, Kabel durch druckdichte Rohre durch die Kondensationskammer zu führen. Jedoch zeigte es sich, daß das zu einer nicht mehr vertretbaren Anzahl von Rohren geführt hätte, die die Funktionsfähigkeit der Kondensationskammer in Frage gestellt hätte. Als Ausweg wur-

den radial verlaufende Kanäle unterhalb des Bodens der Kondensationskammer angeordnet für die Aufnahme von Kabeln und der Scramleitungen. Damit vergrößert sich zwar die Fundamentdicke, gleichzeitig bietet sich so aber die Gelegenheit, eventuell beim GaU oder beim Erdbeben entstehende horizontale Kräfte im biologischen Schild und der inneren Kondensationskammerwand über seitliche Pressungen gegen den unteren mittleren Wandliner in das Fundament einzuleiten, wozu ansonster eine ausführliche Schubsicherung Beton - Liner - Beton unumgänglich wäre.

Anhand dieser drei Beispiele sollte kurz demonstriert werden, welche Punkte eine Konstruktion beeinflussen; sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. So wurde speziell auf die Kostenseite nicht hingewiesen, die mitunter auch recht interessante Aspekte liefert.

Die gesamten Untersuchungen dienen einem Hauptzweck, nämlich zu einer wirtschaftlichen und sicherheitstechnisch ausgewogenen Konstruktion zu gelangen.

3.2 Spezielle Eigenarten der Konstruktion

Die Containmentwand von 1,0 m Dicke schließt unten biegesteif an die Fundamentplatte an und bindet ebenfalls biegesteif oben in die ebene Deckenplatte ein.

Die Wand wird vorgespannt, horizontal mit Kabeln System Hochtief der Größe H.T. 124, die mit einem Umschlingungswinkel von ca. 240° in drei zueinander um je 120° versetzt angeordneten Lisenen verankert werden. Die vertikale Vorspannung - ebenfalls System H.T. - verläuft geradlinig. Bei der Anordnung der Durchführung wurde darauf geachtet, daß die Vorspannung so aufgebracht werden kann, daß möglichst wenig Kabel verzogen werden müssen. Die Containmentdecke von 1,5 m Dicke wird aufgehängt an zwei 12 m hohen Wandscheiben, die sehnenartig über den Zylinder geführt werden und gleichzeitig als Wandung für das Brennelementlagerbecken, den Flutraum und das Absetzbecken dienen (siehe Abb.3). In Deckenmitte ist eine Öffnung von ca. 9,50 m Durchmesser vorhanden zur Einbringung des Druckgefäßes. Die Öffnung wird mit einem Stahldeckel verschlossen. Um eine gute Deckeldichtung zu erzielen, wurde der Betonrand der Öffnung möglichst steif ausgebildet. Das wurde durch die bereits erwähnten zwei Wandscheiben erreicht, die mit zwei weiteren kleineren Scheiben gegeneinander verstrebt sind. Die Containmentdecke liegt nicht auf dem biologischen Schild auf. Es ist ein definierter Spalt vorgesehen, der ungehindert vertikale Relativbewegungen des biologischen Schildes gegen die Decke ermöglicht. Vorteilhaft bei dieser Anordnung ist die Kontinuität in der Linerführung.

Das gesamte Containment wird mit einem Liner ausgekleidet, der gleichzeitig als verlorene Schalung dient. Vom Containment wird die Kondensationskammer abgetrennt durch einen konzentrischen Zylinder von 0,8 m Wanddicke, der nicht vorgespannt wird, und der mit einer ebenen Deckenplatte abgeschlossen wird. Die Dichtigkeitsanforderungen für die Trennwand Druckzur Kondensationskammer sind gering, so daß auf eine Auskleidung der Kon-

densationskammer zunächst verzichtet wurde. Die innere Kondensationskammerwand ist nur im Bereich des Kondensationswassers mit einem Stahlliner versehen zum Schutz des Betons vor dem entmineralisierten Wasser.

4. Berechnungen

Es wurde darauf geachtet, eine der Sicherheitsanalyse leicht zugängliche Bauform zu erhalten, die es gestattet, auf analytische Rechenmethoden zurückzugreifen. Spezielle Probleme wie z.B. große Durchführungen, die dicht nebeneinander angeordnet sind oder asymmetrische Belastungen, die u.a. durch Abblasevorgänge hervorgerufen werden, erfordern den Einsatz von Programmen mit zwei- und drei-dimensionalen finiten Elementen.

Zu den Problemen, die mit analytischen Methoden nur schwer gelöst werden können, gehören auch Punktlasten, seien sie nun durch Strahlkräfte bei einem Unfall oder bei Ausblasevorgängen hervorgerufen. Für die Erfassung dieser Lasten wird oft auf die Arbeiten von Bijlaard (1) zurückgegriffen, jedoch gelten die von ihm erstellten Werte nur für bestimmte Bedingungen. Um Aussagen über den Schnittlastenverlauf in einer eingespannten Zylinderschale mit den Abmessungen der Druck- und Kondensationskammerwand (mittlerer Radius $a = 15,0$ m, Wanddicke $t = 1,0$ m) zu erhalten, wurde - unter Ausnutzung der Symmetrie - eine Halbschale untersucht für eine Einzellast von 100 Mp, verteilt auf eine Fläche von $2 \times 1,16 \times 2 \times 1,17$ m. Die Halbschale wurde in finite Elemente von je $1,16 \times 1,17$ m Größe unterteilt in Kombination von Platten- und Scheibenelementen; die Berechnung wurde mit dem Programm EASE auf einer CDC 6600-Rechenanlage durchgeführt. Als Ergebnisse dieser Rechnungen sind in den Abbildungen 4 und 5 die Schnittlasten, die bei Einzellasten im Lastschwerpunkt auftreten, aufgetragen in Abhängigkeit der Entfernung der Einzellast von der Einspannung. Mit einer damit gekoppelten Rechnung wurden die Auswirkungen von Ausblaslasten auf die Wand des Sicherheitsbehälters untersucht. Dabei zeigte es sich, daß die Konstruktion gegenüber dieser Belastung recht unempfindlich ist.

5. Sicherheitstechnische Auslegung

Es erscheint gerechtfertigt, ähnlich wie für dickwandige Spannbeton-Druckbehälter auch für Reaktorsicherheitsbehälter aus Spannbeton über die allgemein geltenden Normen wie DIN 1050, DIN 4227 u.a. hinausgehende Vorschriften zu erlassen. Damit soll bezweckt werden, die Möglichkeiten für eine wirtschaftliche und den Sicherheitsanforderungen voll entsprechende Konstruktion zu schaffen. Dieses Vorgehen wird dadurch gerechtfertigt, daß sich die Beanspruchungen von Containments wesentlich von denen üblicher Bauwerke unterscheiden.

Die Containments sind Behälter, die einmal als Raumabschluß dienen, zum anderen aber in ihren bestimmenden Belastungen nur Sicherungsfunktionen haben. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten dieser Sicherheitsfunktion ist jedoch im allgemeinen äußerst gering. Die Konstruktion muß so ausgelegt werden, daß beim Eintreten dieser Belastungen die für das Abfahren des Reaktors erforderlichen Organe funktionsfähig sind und daß keine

Radioaktivität freigesetzt wird. Es muß aber nicht unbedingt davon ausgegangen werden, daß nach dem Auftreten der Belastung der Behälter auch noch voll gebrauchsfähig bleibt. Damit können Spannungen für einzelne Werkstoffe zugelassen werden, die oberhalb der üblichen Bemessungsgrenzen liegen und auch damit zu größeren, teilweise bleibenden Deformationen führen. Bei der Festlegung der einzelnen Werte sollten dabei die jeweiligen Gegebenheiten berücksichtigt werden.

Zur Zeit gibt es in Deutschland keine speziellen Vorschriften für Reaktorsicherheitsbehälter aus Spannbeton. Ausgangspunkt dafür kann die Studie für einen Norm-Entwurf für Reaktordruckbehälter aus Spannbeton vom Juni 1972 sein (2). Ausgangswert für die Betonspannungen ist dabei die Zylinderdruckfestigkeit β_c nach 90 Tagen. Mit einem Sicherheitsbeiwert von $\gamma = 2,1$ ergibt sich für den Druckbereich zul $\sigma_D = \frac{\beta_c}{2,1}$. Für den Zugbereich werden die zulässigen rechnerischen Zugspannungen begrenzt auf zul $\sigma_Z = \frac{\beta_c}{30}$, in Sonderfällen auf zul $\sigma_Z = \frac{\beta_c}{10}$. Die Festlegungen für die Druckspannungen können für Containments übernommen werden, jedoch erscheint für die Festlegungen der Zugspannungen eine Erhöhung der Werte unter gewissen Bedingungen angebracht. Bei Containments, die von einem zusätzlichen Gebäude umgeben werden, können im Falle des größten auftretenden Innendrucks durchaus größere Risse auf der Behälteraußenseite zugelassen werden, ohne daß es dabei zu einer Korrosionsgefahr kommen kann, da diese Risse nur für eine sehr kurze Zeit vorhanden sind, wenn bei der Bemessung des Stahles dafür gesorgt ist, daß diese Risse sich nachträglich wieder voll schließen. Für den Spannstahl wird vorgeschlagen, die zulässigen Spannungen entsprechend dem oben genannten Entwurf festzulegen mit

$$\text{zul } \sigma \leq 0,7 \beta_z$$

$\leq 0,95 \beta_{0,01}$, während für die schlaffe Bewehrung

DIN 1045 sinngemäß angewendet werden sollte.

Für die Überlastnachweise des Spannbetoncontainments sollte eine zu Spannbetondruckbehältern unterschiedliche Regelung getroffen werden, da die Systemverhältnisse unterschiedlich sind. Wegen der dünnen Schale ist das Containment weitaus weniger als der dickwandige Druckbehälter durch ungewollte Leckagen und pressurized cracks gefährdet. Weiter steht das Containment während des ungestörten Betriebs nahezu ohne Innendruck - im Gegensatz zum Druckbehälter. Daher erscheint es angebracht, für den Überlastnachweis allein nur einen hypothetischen Innendruck gleich dem 1,5 fachen maximalen Störfalldruck zu wählen, wobei die Materialfestigkeiten weitgehend ausgenützt werden sollten.

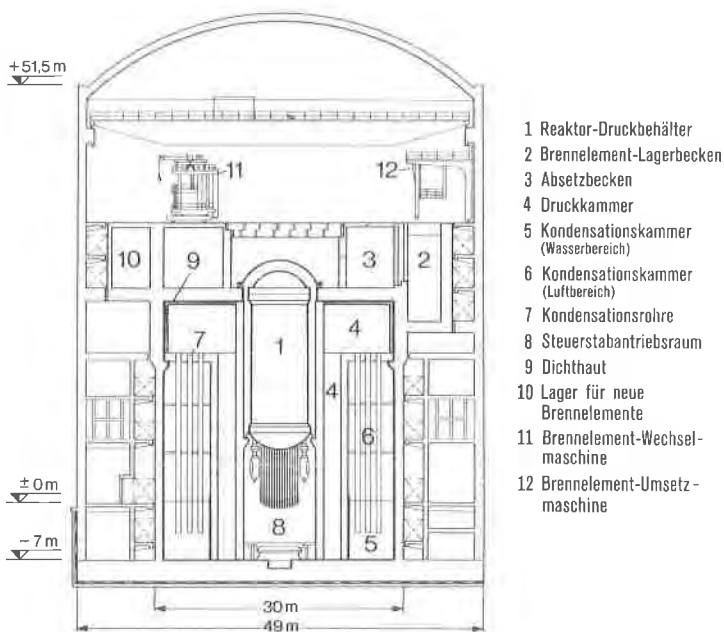
Betondruckspannungen	zul $\sigma_D = 0,9 \beta_c$
Spannstahl und Betonstahl	zul $\sigma = \beta_s$

6. Zusammenfassung

Der vorstehende Bericht gibt einen Überblick über die Entwicklung des Reaktorsicherheitsbehälters aus Spannbeton für AEG-Siedewasserreaktoren beim Stande von März 1973.

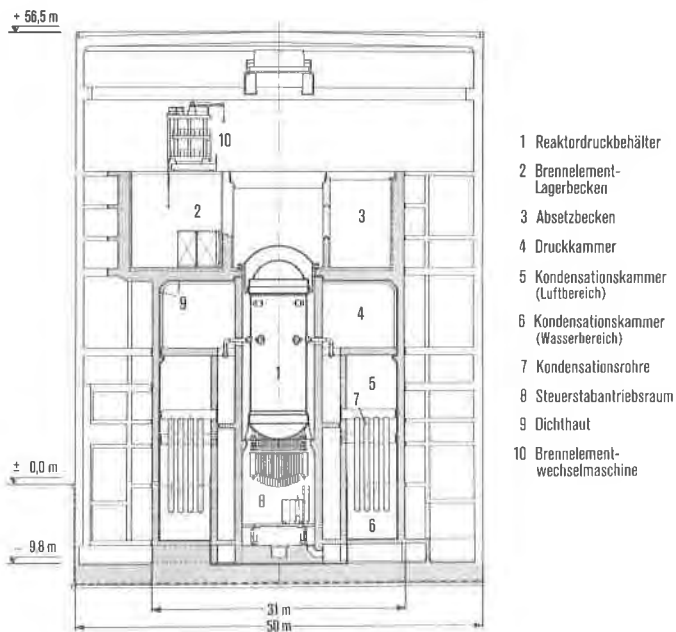
Literaturverzeichnis:

- 1 P.P. Bijlaard
Spannungen an zylindrischen Druckbehältern durch radiale Lasten
- 2 Reaktordruckbehälter aus Spannbeton
Studie für einen Normentwurf
Juni 1972 Beuth-Vertrieb GmbH Berlin, Köln, Frankfurt



- 1 Reaktor-Druckbehälter
- 2 Brennelement-Lagerbecken
- 3 Absetzbecken
- 4 Druckkammer
- 5 Kondensationskammer (Wasserbereich)
- 6 Kondensationskammer (Luftbereich)
- 7 Kondensationsrohre
- 8 Steuerstabantriebsraum
- 9 Dichthaut
- 10 Lager für neue Brennelemente
- 11 Brennelement-Wechselmaschine
- 12 Brennelement-Umsetzmaschine

Abb. 1 **S**icherheitsbehälter mit Reaktorgebäude
Stand Oktober 1972



- 1 Reaktordruckbehälter
- 2 Brennelement-Lagerbecken
- 3 Absetzbecken
- 4 Druckkammer
- 5 Kondensationskammer (Luftbereich)
- 6 Kondensationskammer (Wasserbereich)
- 7 Kondensationsrohre
- 8 Steuerstabantriebsraum
- 9 Dichthaut
- 10 Brennelement-wechselmaschine

Abb. 2 **S**icherheitsbehälter mit Reaktorgebäude
Stand März 1973

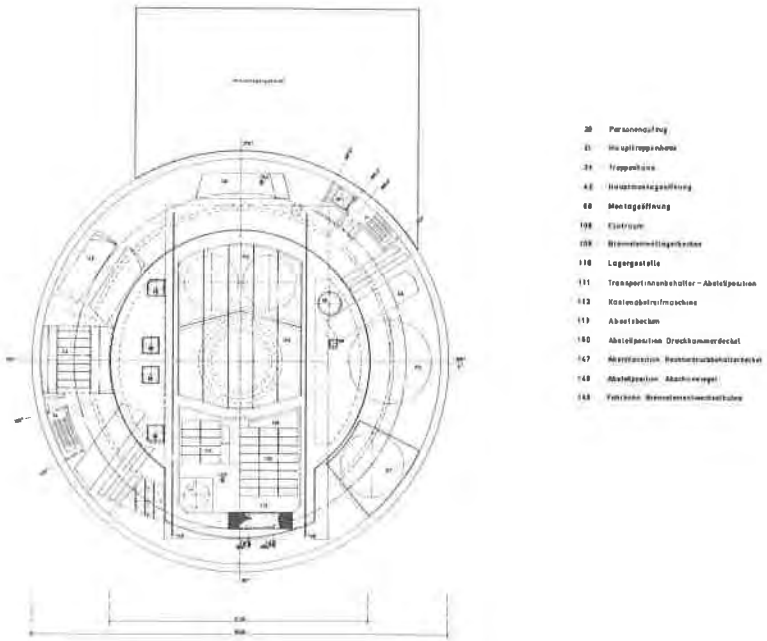


Abb. 3 Anordnung Brennelementlagerbecken
Flutraum und Absetzbecken
Stand März 1973

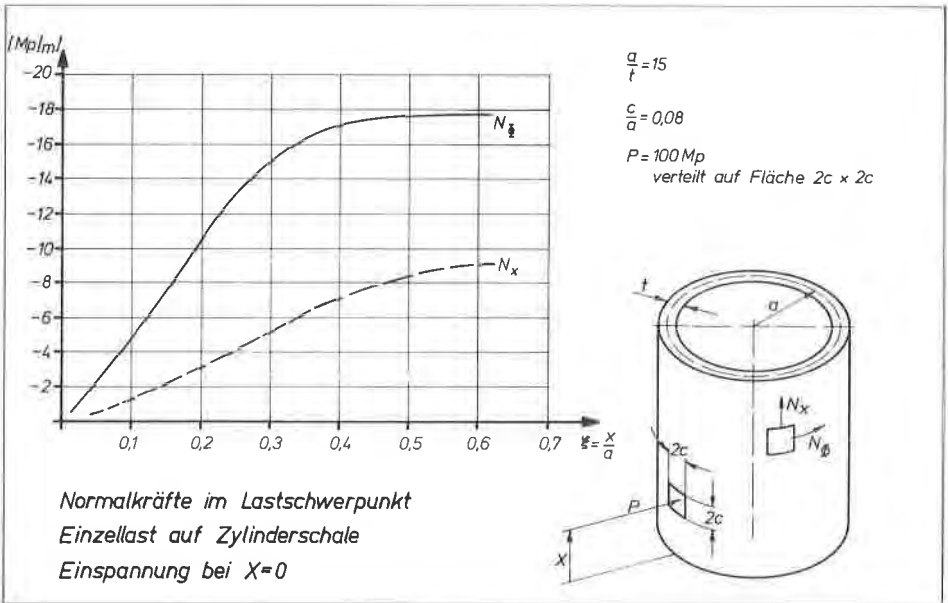


Abb. 4 Einzellasten auf Zylinderschalen - Normalkräfte

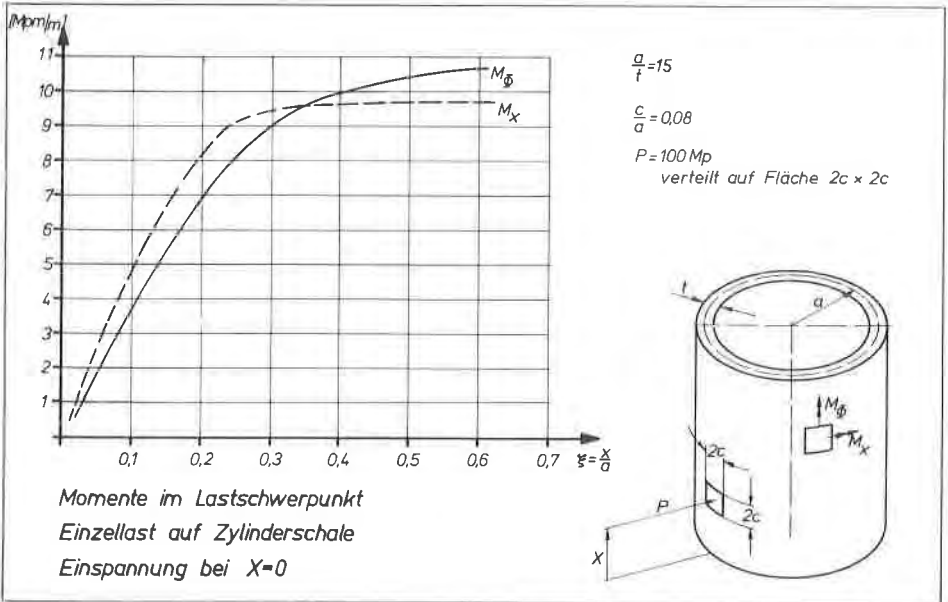


Abb. 5 Einzellasten auf Zylinderschalen - Momente