SYSTEMANALYTISCHE UND PARAMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN VON SPANNBETON-REAKTORDRUCKBEHÄLTERN

(SYSTEMANALYTIC AND PARAMETRIC STUDIES OF PRESTRESSED CONCRETE REACTOR PRESSURE VESSELS)

G. SCHNELLENBACH, G. HARTMANN, U. ICK

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau,
Ruhr-Universität Bochum, D-463 Bochum, Germany

SUMMARY

The arrangement and the location of heat exchangers play a decisive role in determining the form and size of PCPVs and influences at the same time the size of the reactor building as well.

The integrated arrangement of heat exchangers inside the vessel or inside the wall, respectively, are compared with the nonintegrated system. Advantages and disadvantages of the different systems are discussed. The studies deal with the economical and technical optimum layout of the vessel and also take into account the demands placed on the reactor building. Measures of safeguarding against internal and external influences are discussed in this context.

Nuclear power stations of larger capacities based on the present concepts lead to a great deficiency of energy if not at work. In order to prevent this loss of energy alternative concepts were developed, e.g. to equip nuclear power stations with more than one reactor, for instance with three reactors of smaller capacity attached to one common turbine. It is possible in this way to limit the loss of energy by running the rest of the reactors in case one of them is shut down either due to some defect or due to refuelling. The possibilities for the arrangement of these reactors under such a concept are discussed.

To arrive at economic solutions for the construction of PCPVs parametric studies are necessary. Such studies of PCPVs for gas-cooled reactors are carried out with special attention to comparative safety rules. Such studies are discussed with reference to parameters like geometry, inside temperature and prestressing. The thickness of the vessel walls, the relation between the thickness of cylinder and cover plates and the connection between the cylinder and the cover plate with reference to the anchoring of the liner are of special interest concerning the parameter geometry.

The temperature conditions have a great influence upon the deformation of the vessel and upon the stresses in the steel components. Such investigations are carried out under various assumptions for the temperature dependent creep behaviour of concrete. Further, the influence of the inside temperature upon prestressing and upon the reinforcement of PCPVs is discussed. The parametrical studies with reference to prestressing include the influence of the degree of prestress upon the reinforcement with regard to the geometry and elevated temperatures as well as the alternatives between prestressing single cables inside the vessel walls and a prestressing by wire winding.

1. Einleitung

Die Entwicklung der Spannbetonbehälter-Technologie hat in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte gemacht. Während man die ersten Spannbetonbehälter noch weitgehend aufgrund der damaligen technischen Möglichkeiten des allgemeinen konstruktiven Ingenieurbaus konzipierte, sind heute durch die Entwicklung dieser Technologie die Voraussetzungen geschaffen, um Spannbetonbehälter für Kernkraftwerke weitgehend optimal auslegen zu können. Die erarbeiteten Berechnungsverfahren geben die Möglichkeit, mit Hilfe systematischer Untersuchungen verschiedener Behälterkonzeptionen reaktortechnisch optimale und in Bezug auf die Gesamtanlage wirtschaftliche Lösungen zu finden. Ebenso lassen sich u.a. mit diesen Berechnungsverfahren eine Reihe parametrischer Untersuchungen durchführen. In Bezug auf das noch nicht für alle Belange ausreichend genau bekannte Materialverhalten können durch solche Untersuchungen die Eigenschaften festgestellt werden, die einen größeren Einfluß auf den Spannbetonbehälter haben und damit weiterer Forschungen bedürfen. Gleichzeitig ergeben sich grundsätzliche Tendenzen für den Einfluß der Veränderlichkeiten der Materialeigenschaften, was für die Auswahl der Baustoffe von Wichtigkeit ist. Weitere Ziele von parametrischen Untersuchungen sind u.a. die Schaffung von Auslegungs- und Entwurfskriterien für Spannbetonbehälter fortschrittlicher Konzeption und die Bereitstellung von Unterlagen, die dem Konstrukteur schnell einen Überblick darüber geben, z.B. welche Behälterwandstärken, welche Kostenrelationen und welcher Platzbedarf für einen Spannbetonbehälter bei gegebenen Belastungen zu erwarten sind. Weiter können die parametrischen Untersuchungen die Entscheidung über die Auslegung des Wärmeschutzsystems des Spannbetonbehälters in Abhängigkeit von seiner Temperaturbelastung erleichtern.

Ziel solcher systemanalytischer und parametrischer Studien ist also allgemein die Optimierung von Spannbetonbehältern in funktionaler, sicherheitstechnischer, wirtschaftlicher und konstruktiver Hinsicht. Die Forschungsgruppe Reaktordruckbehälter des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum beschäftigt sich u.a. mit diesen Untersuchungen. Einige Ergebnisse werden im folgenden mitgeteilt, dabei muß wegen der Vielzahl der Studien eine Beschränkung auf nur wenige Problemkreise vorgenommen werden.

2. Untersuchungen zur Behälterkonzeption

Die Anordnung und die Lage der Wärmetauscher ist von großem Einfluß auf die Form und Größe von Spannbeton-Reaktordruckbehältern und den Platzbedarf in der Reaktorhalle. Dem Entwurf eines Spannbetonbehälters sollten deshalb Optimierungsstudien, die nicht nur die Belange des Behälters, sondern die des gesamten Kraftwerks berücksichtigen, vorangehen. An einem Beispiel mit dem Raumbedarf für Reaktor und Wärmetauscher des THTR sowie dessen Belastungen und Auslegungsbedingungen wurde eine solche Studie unter Berücksichtigung der Auslegung des Behälters, des Platzbedarfs in dem Reaktorgebäude und sicherheitstechnischer Überlegungen durchgeführt. Bei den untersuchten Behälterkonzeptionen wurde auf einen kugelförmigen Behälter verzichtet. Die außergewöhnlichen Schwierigkeiten bei der Ausführung und Vorspannung dieser in statischer Hinsicht optimalen Behälterform sind bekannt. Die durchgeführten Untersuchungen können nur Tendenzen aufzeigen,

da im aktuellen Fall die besonderen Belange je nach Reaktortyp, Lage und Größe von Öffnungen im Behälter, Frage des Containments, Standort des Kernkraftwerks usw. berücksichtigt werden müssen.

Aus Bild 1 sind die untersuchten Konzeptionen ersichtlich. Bei der integrierten Lösung mit den Wärmetauschern seitlich des Cores (Konzeption z.B. THTR) tritt der größte Innendurchmesser auf. Damit werden die größte Vorspannung und die maximale Stärke der Abschlußplatten erforderlich. Die beiden anderen integrierten Konzeptionen weisen neben den Vorteilen des kleineren Spannstahlbedarfs und der kleineren Plattenstärken auch noch den wesentlich geringeren umbauten Raum auf, der den Platzbedarf in der Reaktorhalle widerspiegelt. Der in statischer Hinsicht sehr klaren und auch wirtschaftlichen Lösung des hohen Zylinders (Konzeption z.B. EDF 4 und Bugey) stehen als Nachteile das sehr hohe Reaktorgebäude bzw. Containment, das für diese Lösung erforderlich ist, und die Schwierigkeiten bei der Reparatur und dem Auswechseln der Wärmetauscher entgegen. Die Möglichkeit, die Wärmetauscher besser reparieren oder auswechseln zu können, ist einer der Hauptvorteile des Konzepts, bei dem die Wärmetauscher in der Zylinderwandung angeordnet sind (Konzeption z.B. Hartlepool). Trotz der größeren Fläche, die mit Liner und Wärmeschutzsystem zu versehen ist, und trotz des im Vergleich zu den anderen Behältern höheren Bedarfs an schlaffer Bewehrung erscheint deshalb die Lösung mit Wärmetauschern in der Wandung insgesamt gesehen als optimal. Diese Lösung würde noch vorteilhafter, wenn es gelänge, zu wirtschaftlicheren Wärmeschutzsystemen oder höheren Betontemperaturen als heute üblich zu kommen.

Ein Spannbetonbehälter mit nichtintegriertem System würde zwar zu kleineren Behälterabmessungen führen, zusätzlich jedoch Behälter für die Wärmetauscher benötigen. In Bild 1 sind zwei größere Wärmetauscher in 2 getrennten Spannbetonbehältern berücksichtigt. Man erkennt aus dem Vergleich keine bedeutenden Vorteile gegenüber der integrierten Anordnung des Pod-Boiler-Typs. Zusätzlich ist der Aufwand für die Herstellung von 3 kleineren Spannbetonbehältern in mancher Hinsicht wesentlich größer als bei der Erstellung eines massenmäßig vergleichbaren Einzelbehälters. Die nichtintegrierte Anordnung dürfte damit wirtschaftlich kaum Vorteile bieten. Andererseits hat die integrierte Anordnung durch den Einschluß des gesamten Primärkreises in einen Spannbetonbehälter ein wesentlich größeres Sicherheitspotential. Dies gilt nicht nur für Störfälle im Kernkraftwerk, sondern auch für die heute diskutierten Einwirkungen von außen wie Sabotage oder im Falle eines fehlenden oder nicht dafür ausgelegten Containments einer äußeren Explosionsbelastung oder eines Flugzeugabsturzes, so daß der integrierten Anordnung der Vorzug zu geben ist.

Ein wesentlicher Fortschritt wäre natürlich für gasgekühlte Reaktoren der direkte Kreislauf mit in den Spannbetonbehälter integrierter Heliumturbine.

3. Studien zur optimalen Anordnung von 3 Leistungsreaktoren für ein Kernkraftwerk

Bei Kernkraftwerken großer Leistung tritt bei den jetzigen Konzeptionen während der Stillstandszeiten des Reaktors ein großer Energieausfall ein. Um dies zu verhindern, wurde bereits diskutiert, Kernkraftwerke mit mehreren, z.B. drei Reaktoren kleinerer Leistung für eine gemeinsame Turbine auszustatten. Auf diese Weise

ist es möglich, beim Ausfall oder der Beschickung eines Reaktors die übrigen weiterzufahren und so den Energieausfall zu beschränken. Es werden die Anordnungsmöglichkeiten für ein Kernkraftwerk mit 3 Kugelhaufenreaktoren von je 330 MWe Leistung diskutiert, wobei auch drei Reaktoren in einem gemeinsamen Spannbetonbehälter untergebracht werden. Einem Reaktor sind 2 Wärmetauscher zugeordnet. Als Belastung für diese Untersuchung wurde ein Innendruck von 40 atü und eine Temperaturdifferenz von 30° C angenommen. Die untersuchten Systeme und einige der Ergebnisse gehen aus Bild 2 hervor.

Beim Behältertyp I sind die 3 Reaktoren und die zugehörigen 6 Wärmetauscher gemeinsam in einem einzigen zylindrischen Spannbetondruckbehälter integriert. Die Druckbelastung wurde in einem, in zwei und in allen drei Reaktorsystemen angesetzt. Der letztere Lastfall war für die Bemessung der Vorspannung maßgebend. Infolge Temperaturbelastung stellt sich ein sehr gleichförmiges Temperaturfeld ein und ein daraus resultierender günstiger Verlauf der Spannungen. Die hier zweckmäßige Wahl einer Wickelvorspannung überdrückt in idealer Weise die Zugspannungen aus den verschiedenen Lastfällen. Der ermittelte Baustoffbedarf und der Arbeitsaufwand zeigten für diese Behälterkonzeption im Verhältnis zu den anderen untersuchten Typen, bei denen jeweils drei Einzelbehälter nebeneinander angeordnet wurden, die wirtschaftlichsten Werte.

Der Behältertyp II erwies sich vom Lastfall Vorspannung her als ungünstig. Eine Wickelvorspannung hat wegen der unterschiedlichen Krümmung im Bereich maximaler Betonzugspannungen die geringste Wirkung. Zusätzlich mußten gekrümmte Einzelspannglieder, die zwischen Reaktor- und Wärmetauscheröffnung geführt sind, vorgesehen werden.

Der Behältertyp III hat von den Einzelbehältern die geringste Beton-Querschnittsfläche. Die Vorspannung mit innenliegenden Spannkabeln führt hier durch die im Vergleich zu den anderen Typen komplizierte Geometrie zu einem unwirtschaftlichen Stahlbedarf. Dies gilt sowohl für den Spannstahl als auch für die schlaffe Bewehrung.

Aus den Erfahrungen mit den Typen II und III wurde die Behälterform IV entwickelt. Hier lassen sich die auftretenden Spannungen aus Innendruck und Temperatur durch eine Wickelvorspannung ähnlich gut überdrücken wie bei Typ I. Hieraus ergibt sich ein günstiger Spannstahlbedarf.

Der Vergleich der Einzeltypen zeigte, daß der Behältertyp IV zwar den größten Betonquerschnitt aufweist, jedoch sich durch die einfache Form und den geringen Spannstahlbedarf als wirtschaftlichster Entwurf erweist. Doch insgesamt ist der Behältertyp I vom Baustoffbedarf und vom Arbeitsaufwand her die wirtschaftlichste der untersuchten Behälterkonzeptionen. Als weiterer bedeutender Vorteil des Behälters I ist der geringe Gesamtflächenbedarf anzusehen. Daraus ergeben sich bedeutende Einsparungen beim Bau des Reaktorgebäudes und Vorteile für den Betrieb der gesamten Anlage.

4. Parametrische Studien zu den Betoneigenschaften

4.1 Vorbemerkungen

Die Eigenschaften des Betons sind bekanntlich nicht mit der Genauigkeit erfaßbar, wie dies bei anderen Baustoffen, z.B. Stahl, möglich ist. Zu einem gewissen Streuungsbereich, der in den Eignungsprüfungen oder anderen Untersuchungen festgestellt werden kann, kommen Änderungen abhängig vom Alter des Betons, durch Feuchtigkeitsverlagerungen, durch Temperaturabhängigkeit usw. hinzu. Diese möglichen Änderungen der Materialeigenschaften sind teilweise für Spannbeton-Reaktordruckbehälter in wirtschaftlicher und sicherheitstechnischer Hinsicht interessant, in sicherheitstechnischer Hinsicht insbesondere in Bezug auf das Behälterverformungsverhalten und die damit zusammenhängenden Fragen. Es wurden deshalb einige parametrische Untersuchungen zu den wichtigsten Eingenschaften des Betons durchgeführt.

4.2 Kriechen des Betons

Bei umfangreichen Untersuchungen zum Einfluß des Kriechens unter Berücksichtigung der Behälterbelastungen und deren betrieblich bedingten Änderungen wurden in [3] und [5] festgelegte Kriechgesetze und Grenzwerte für die temperaturabhängigen spezifischen Kriechdehnungsanteile zugrundegelegt. Die Kriechgesetze besaßen bei erhöhten Temperaturen ungefähr gleiche Endkriechwerte, für das Kriechen bei Raumtemperatur waren jedoch deutlich unterschiedliche Endkriechwerte vorgegeben. Die zum Vergleich durchgeführten Rechnungen führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Das qualitative Spannungsbild bleibt praktisch unverändert.
2. Für ein Kriechgesetz mit stärkerem relativem Unterschied des Kriechens für die Außen- und Innenrandtemperatur ergeben sich größere Kriechumlagerungen im Querschnitt, d.h. es findet eine stärkere Umlagerung von Lastspannungen statt, die zum relativen Unterschied des Kriechens proportional ist.
3. Die Verformungen des Behälters aus Lastzuständen werden im wesentlichen durch das Kriechen bei der mittleren Temperatur der Behälterwandung bestimmt, so daß sie sich für verschiedene Kriechgesetze ungefähr im Verhältnis dieser Werte zueinander verhalten.
4. Verformungen aus der Temperaturerhöhung werden durch das Kriechen kaum beeinflußt. Die Temperaturspannungen werden stark abgebaut. Für den Abbau der stationären Temperaturspannungen haben relative Unterschiede zwischen innen und außen im allgemeinen eine geringere Bedeutung als das mittlere Kriechen. Dies um so mehr, da die verbleibenden Spannungen nur einen geringeren Anteil zur Gesamtbeanspruchung liefern.

Wenn auch das Betonkriechen in Bezug auf den Abbau von bestimmten Eigenspannungen einen günstigen Einfluß haben kann, so ist doch wegen der Beanspruchungen, die den Stahlauskleidungen des Behälters durch seine Verformungen aufgezwungen werden, ein Beton geringen Kriechmaßes anzustreben. Dies gilt auch für den Behälter selbst, da sich durch größere Spannungsumlagerungen infolge des Kriechens auch die Spannungen aus der Vorspannung umlagern, die dann bei betrieblich bedingten Last- und Temperaturwechseln evtl. in den maßgebenden

Bereichen nicht mehr zur Verfügung stehen, was zu einer Verstärkung der schlaffen Bewehrung führen kann.

Wegen der großen Bedeutung des Betonkriechens auf den Spannungs- und Verformungszustand von Spannbetonbehältern sollten die Materialforschungen auf diesem Gebiet intensiv weitergeführt werden.

4.3 Elastizitätsmodul des Betons

Diese Materialkenngröße ist u.a. ebenfalls abhängig von der Temperatur, dem Alter und der Feuchtigkeit des Betons. Der Einfluß dieser Veränderlichkeit ist jedoch bei den heute zur Diskussion stehenden Temperaturen im Vergleich zu dem des Betonkriechens gering. Für die Praxis ist es deshalb ausreichend, den Elastizitätsmodul als konstant anzusehen und die Veränderlichkeit in der Kriechfunktion, die dann als Funktion der zeitlichen und temperaturabhängigen Gesamtverformung anzusehen ist, zu berücksichtigen. Für Temperaturen, die höher sind als heute üblich, wird der Einfluß eine Größenordnung einnehmen, die eine gesonderte Betrachtung erforderlich macht.

4.4 Querkontraktion

Die Größe der Querkontraktion ist im Rahmen der üblichen Streuung im allgemeinen von untergeordneter Bedeutung. Sie hat einen geringen Einfluß auf die Gesamtverformung, auf die Zwängungen bei Stahlkomponenten und auf den Spannungszustand im Bereich von hohen Spannungskonzentrationen. Hier ergeben sich durch extreme Spannungen in einer oder zwei Richtungen auch Spannungserhöhungen in den anderen Richtungen abhängig von der Querkontraktion, die jedoch für eine Behälterbemessung nicht maßgebend werden können. An die Genauigkeit der Größe der Querkontraktion sind deshalb keine besonderen Anforderungen zu stellen.

4.5 Wärmeleitfähigkeit

Die Größe der Wärmeleitfähigkeit kann im Laufe der Zeit, im wesentlichen abhängig von Feuchtigkeitsveränderungen im Behälterquerschnitt, andere Werte annehmen, d.h. in den Randbereichen und am Liner wird eine Verminderung der Wärmeleitfähigkeit eintreten. Die Wärmeleitzahl selbst hat praktisch nur einen Einfluß auf den zeitlichen Aufbau von Temperaturfeldern, d.h. sie könnte unter Umständen für das Kriechen bei Aufheizvorgängen oder bei Temperaturwechseln interessant sein. Der stationäre Endzustand ist im Bereich der für den Beton möglichen Schwankungsbreiten der Wärmeleitfähigkeit fast unabhängig von ihrer Größe. Bild 3 zeigt am Beispiel einer Kreisringscheibe den geringen Einfluß der Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit auf die stationäre Temperaturverteilung und den zugehörigen Spannungszustand.

4.6 Wärmeausdehnungskoeffizient

Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist im wesentlichen abhängig von der Wahl der Zuschlagstoffe des Betons. Eine Änderung im Laufe der Lebensgeschichte des Behälters ist nach [5] nur in geringem Umfang zu erwarten. Der Einfluß der Wärmeausdehnung auf die Spannungen ist bei einmaligem Aufheizen und dann konstant gehaltener Temperatur des Behälters wegen des starken Kriechabbaus der Temperaturspannungen gering. Temperaturschwankungen während der Betriebszeit können jedoch meist nicht ausgeschlossen werden. Wegen der geringeren Kriechfähigkeit des Betons

mit zunehmendem Alter ist dann u.U. nur noch ein unwesentlicher Spannungsabbau möglich. Aus diesem Grund ist ein Beton mit möglichst kleiner Wärmeausdehnung anzustreben.

4.7 Andere Materialeigenschaften

Von den bisher nicht behandelten Materialeigenschaften sind in diesem Zusammenhang nur noch das Schwinden des Betons und die Relaxation des Spannstahls von Interesse. Bei beiden Eigenschaften sind die Einflüsse grundsätzlich bekannt, so daß sich parametrische Untersuchungen weitgehend erübrigen. Die Notwendigkeit der weiteren Erforschung dieser Materialeigenschaften ist unbestritten.

5. Parametrische Untersuchungen mit den Parametern Innendruck, Temperatur, Geometrie, Vorspannung

5.1 Vorbemerkungen

Parametrische Untersuchungen haben das Ziel der optimalen Auslegung. Da die Behälterbelastungen und die Abmessungen vom Reaktortyp abhängig sind, ist in dieser Hinsicht bei parametrischen Untersuchungen von Spannbetonbehältern eine Unterscheidung zwischen Leichtwasserreaktoren und Reaktoren mit Gaskühlung notwendig. In Bezug auf die Geometrie erfolgte bei den durchgeführten Untersuchungen eine Beschränkung auf die zylindrische Form, da die Kugelform, wie bereits in Abschnitt 2 erwähnt, ihre besonderen ausführungstechnischen Schwierigkeiten mit sich bringt.

5.2 Leichtwasserreaktoren

Die Druckbehälter von Leichtwasserreaktoren werden z.Z. für Innendrücke von ca. 100 - 200 atü (potentiell mögliche Maximaldrücke) ausgelegt. Um die Änderung der bisher üblichen Konstruktion des Reaktorgebäudes und seiner Einbauten beim Einsatz von Spannbetonbehältern gering zu halten, werden möglichst kleine Wanddicken angestrebt. Die erforderliche Wandstärke wird durch den Platzbedarf der Spanngliedverankerungen der Vertikalvorspannung, durch die zulässigen Betondruckspannungen und die ringförmige Vorspannung bestimmt. Für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden für die vertikale Richtung BBRV-Spannglieder mit einer Spannkraft von 630 Mp zugrundegelegt. Die horizontalen Zugkräfte wurden durch eine Wickelvorspannung abgedeckt.

Für die zylinderförmigen Behälter wurden Vergleicherechnungen durchgeführt, um für verschiedene Vorspanngrade, Innendrücke und Innenradien einen Überblick über die Stärke des Konstruktionsbetons der Behälterwandung zu erhalten. Die Ergebnisse sind aus den Bildern 4 bis 6 ersichtlich. Dabei wurden eine Betonfestigkeit β_{C90} = 460 kp/cm^2, eine Temperaturbelastung von 30^0 C, Kriecheinflüsse nach [3] und zulässige Materialbeanspruchungen nach [1] berücksichtigt. Selbstverständlich stellen auch hier diese Angaben nur Anhaltswerte dar, da je nach besonderen Gegebenheiten die hier getroffenen Voraussetzungen nicht mehr voll zutreffen.

Die Untersuchungen der Wanddicken wurden für zwei Arten der Vorspannung durchgeführt, und zwar für eine beschränkte Vorspannung* nach [1] und für eine partielle Vorspannung mit einer fiktiven mittleren Zugspannung von $\beta_{C/10}$. Die Mindestwanddicke des zylindrischen Teiles hängt im wesentlichen nur von den Vorspannkräften und Temperaturbeanspruchungen sowie den zulässigen Betonbeanspruchungen

* Definition vgl. DIN 4227

ab. Da die Vorspannkräfte und die Temperaturbeanspruchungen bei der partiellen Vorspannung geringer sind, ergeben sich hier auch geringere Wandstärken, vgl. auch Abschnitt 5.3.

Bild Nr. 4 zeigt die Abhängigkeit der Mindestwanddicken vom Innendruck p_i und vom Innenradius r_i. Die Behälterabmessungen bei Annahme einer beschränkten Vorspannung sind durch die ausgezogenen Kurvenscharen dargestellt, während sich bei Wahl einer partiellen Vorspannung die ermäßigten Wandstärken entsprechend den gestrichelten Linienzügen ergeben.

Außerdem ist die Differenz der Wanddicken bei beschränkter und partieller Vorspannung angegeben. Es ist ersichtlich, daß die Differenzen der Wandabmessungen bei Behältern mit wachsendem Innenradius und Innendruck zunehmend größer werden. Es zeigt sich hieraus die Bedeutung einer partiellen Vorspannung. Dieser Vorteil wird bei steigender Temperaturdifferenz, der die Behälterwandungen ausgesetzt sind, noch größer. Hierzu wird auf Abschnitt 5.3 verwiesen.

Die Bilder 5 und 6 können als Dimensionierungshilfe für die Größe der Vorspannung angesehen werden. Sie zeigen die Abhängigkeit der erforderlichen Vorspannkraft V vom Innenradius r_i und von der gewählten Wanddicke d für Innendrücke von 160 kp/cm^2 bzw. 200 kp/cm^2 und $\Delta t = 30^0$ C bei der beschränkten Vorspannung.

Zu den angegebenen Wandstärken ist für die Ermittlung der Außenabmessungen des Spannbetonbehälters der Platzbedarf für die Wickelvorspannung hinzuzurechnen. Dieser hängt vom verwendeten Verfahren ab. Für das Prisma-Verfahren sind dazu Angaben in [6] enthalten. Bei größeren Wandstärken des Behälters ist unter Umständen eine Kombination von innenliegenden Spanngliedern und einer Wickelvorspannung sinnvoll, um eine optimale Wanddicke zu erhalten.

5.3 Gasgekühlte Reaktoren

Der THTR-Behälter wurde bereits vor mehreren Jahren konzipiert, der Baubeginn mehrmalig verschoben. Durch diese Umstände entspricht der THTR-Behälter bekanntlich in Bezug auf einige technische Belange nicht mehr dem neuesten Stand der Technik, z.B. die Lisenenvorspannung. Dagegen ist bei denjenigen Ausführungs- und Auslegungsfragen eine Anpassung an die heutigen Erkenntnisse erfolgt, bei denen dies ohne Änderung der Grundkonzeption möglich war. Es bot sich durch die zuerst genannten Umstände die Gelegenheit an, zu untersuchen, welche Verbesserungen nach den heutigen Erfahrungen für den THTR-Behälter möglich wären und wie man ihn optimaler hätte auslegen können.

Der THTR-Behälter ist mit einer Lisenenvorspannung vorgespannt. Diese Art der Vorspannung bedeutet eine größere Wandstärke des zylindrischen Behälterteiles und damit einen größeren Platzbedarf in dem Reaktorgebäude. Zusätzlich wird durch die Einleitung der Vorspannkräfte der Horizontalvorspannung eine beträchtliche schlaffe Bewehrung erforderlich. Die Überschneidungen der Spannglieder, die bei der Lisenenvorspannung im Bereich der Verankerungen auftreten und die Spannkraftverluste durch Reibung sind weitere Nachteile der Lisenenvorspannung. Hinzu kommen Erschwernisse bei der Schalung der Lisenen, beim Einfädeln der Spannkabel usw., so daß einer Vorspannung in geschlossenen Ringen, wie sie nur als außenliegende Vorspannung möglich ist, ob in Form von Einzelkabeln oder in Form einer Wickelvorspannung, der Vorzug

zu geben ist. Bei einer solchen Vorspannung würde sich die Zylinderwandstärke des THTR auf ca. 3,30 m vermindern lassen. Eine Verkleinerung der Dicken der Abschlußplatten wäre hingegen nur möglich, wenn über den Schubbruch bessere Kenntnisse vorliegen würden. Die Fortführung des Zylinders über die Abschlußplatten hinweg erscheint auch heute noch für diesen Behälter richtig, da bei einer Ringvorspannung auf diese Weise eine dem Innendruck entgegenwirkende Vorspannung der Abschlußplatten erreicht werden kann. Damit ergäbe sich ein Behälter, wie er in Bild 7 gezeigt ist.

Bei der Frage der optimalen Auslegung ist der Vorspanngrad zu diskutieren. Eine volle Vorspannung im Sinne der DIN 4227 läßt sich bei Spannbeton-Reaktordruckbehältern nicht ganz erreichen, da durch den Abbau von Temperaturspannungen infolge des Betonkriechens und durch Kriechumlagerungen von Lastspannungen im Querschnitt unter den extremen Belastungsänderungen während des Betriebes nicht in allen Bereichen des Behälters die notwendigen Spannungen aus der Vorspannung erhalten bleiben. Damit wird immer ein gewisser Bedarf an schlaffer Bewehrung, insbesonder in gestörten Bereichen notwendig sein. Aus der Gegenüberstellung einiger Vorteile von voller oder beschränkter Vorspannung gemäß DIN 4227 mit der partiellen Vorspannung gehen die Vorteile der partiellen Vorspannung für solche Bauwerke hervor.

Vorteile der

vollen oder beschränkten Vorspannung	partiellen Vorspannung
geringere Gesamtverformungen	kleinere Stauchungen der Stahlauskleidungen
geringerer Gesamtstahlbedarf durch Verwendung sehr hochfesten Spannstahles	geringere Temperaturbeanspruchungen
	geringere Zylinderwandstärken möglich
	Spannkraftverluste (Kriechen, Schwinden, Relaxation) ohne nachteiligen Einfluß

Die Kosten für verschiedene Vorspanngrade wurden aufgrund aktueller Preise für den in Bild 7 dargestellten Behälter abgeschätzt. Die Belastungen entsprechen denen des THTR-Behälters. Dabei wurden die voraussichtlichen Kosten des THTR-Behälters mit 100 % angesetzt. Der preisliche Vorteil der partiellen Vorspannung ist aus Bild 7 deutlich erkennbar. Würde man von einer Temperaturdifferenz von $\Delta t = 60^{\circ}$ C gegenüber $\Delta t = 30^{\circ}$ C ausgehen, ergäben sich noch deutlichere Vorteile. Bei einer verhältnismäßig geringen Vorspannung verschwindet der Kostenunterschied für die beiden untersuchten Temperaturfälle, da durch den Bruchzustand genügend schlaffe Bewehrung zur Verfügung steht, der zur Abdeckung von Temperaturbeanspruchungen insbesondere bei Lastwechseln nötig ist. Bei Unterschreiten einer gewissen Grenze der Vorspannung erreicht man keine weiteren Einsparungen mehr, da der Aufwand beim Einbau der erforderlichen großen Menge an schlaffer, wenn auch hochfester Bewehrung, und beim Betonieren beträchtlich steigt. Ein vollkommen schlaff bewehrter Behälter dieser Größe und Belastungen dürfte ausführungstechnisch kaum noch realisierbar sein.

Zusätzliche Kosteneinsparungen würden sich durch die mit diesem Behälter

mögliche Verringerung des umbauten Raumes der Reaktorhalle ergeben.

Eine weitere Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ließe sich durch die Anwendung neuer Baustoffe erreichen. Der Baustoff Stahlfaserbeton ist ein quasihomogener Baustoff mit einer verhältnismäßig hohen garantierbaren Zugfestigkeit. Neben den konstruktiven Vorteilen dieses Baustoffes, vgl. Beitrag H 3/1, könnte der Stahlfaserbeton durch die nutzbare Zugfestigkeit die durch die Schubbruchsicherung bedingte große Stärke der Abschlußplatten vermindern. Dadurch ergäben sich weitere Einsparungen an Beton und Stahlmassen. In Bild 8 sind die Abmessungen des THTR-Behälters und die eines optimierten Druckbehälters gegenübergestellt. Durch den Stahlfaserbeton könnte bei diesen Verhältnissen die Behälterhöhe um ca. 1,83 m verringert werden. Dies ergäbe zusammen mit der optimierten Wanddicke eine Verkleinerung des umbauten Raumes des Reaktorgebäudes um ca. 30.000 m^3, d.h. um etwa ein Drittel ihres Volumens. Eine Ersparnis ist auch aus dem Gewichtsvergleich beider Behälter ersichtlich, es würden große Vorteile für die Unterkonstruktion des Reaktordruckbehälters entstehen.

Eine Verringerung der Wandstärken eines Spannbetonbehälters führt zwangsläufig zu einer Vergrößerung der Verformungen, dies gilt insbesondere für eine Verminderung der Stärke der Abschlußplatten. Je nach Vorspanngrad, Temperaturbelastung und Kriecheigenschaften des Betons treten damit größere Stauchungen bzw. Zugdehnung der Stahlkomponenten ein. So kann neben anderen Problemen der Stahlauskleidungen auch die Frage der Ausbildung des Übergangs vom zylindrischen Teil in die Abschlußplatten für den Liner erhöhte Bedeutung erlangen. In statischer Hinsicht würde man in Bezug auf den Behälter eine Ausrundung, wie sie z.B. beim THTR-Behälter erfolgte, bevorzugen. Im Falle der partiellen Vorspannung würde sich jedoch der Liner im Ausrundungsbereich unter größeren Zugdehnungen in größerem Maße vom Beton lösen wollen. Für die Linerverankerungen würden damit größere Beanspruchungen auftreten. Vorteilhafter wäre in einem solchen Fall die für den Liner und seine Verankerungen klarere Konstruktion des nicht ausgerundeten oder abgeschrägten Überganges vom Zylinder zu den Platten, wie sie bei einigen englischen Behältern bereits ausgeführt wurde. Für den Spannbetonbehälter bedeutet eine solche theoretische Singularität kein grundsätzliches Problem.

Literaturverzeichnis

[1] ZERNA, W., THTR-Spannbetonbehälter, Bericht Nr. 1: Nachweise für den Gebrauchszustand, 1972.

[2] ZERNA, W., THTR-Spannbetonbehälter, Bericht Nr. 2: Nachweise der Grenzzustände, 1972.

[3] HANSSON, V.: Werkstoffannahmen zum Kriechen und Schwinden des Betons in Reaktordruckbehältern, Bericht Nr. 3 der Forschungsgruppe Reaktordruckbehälter, Ruhr-Universität Bochum, 1971.

[4] SCHIMMELPFENNIG, K.: Die Festigkeit des Betons bei mehraxialer Belastung, Bericht Nr. 5 der Forschungsgruppe Reaktordruckbehälter, Ruhr-Universität Bochum, 1971.

[5] EIBL, J., et al.: Studie zur Erfassung spezieller Betoneigenschaften im Reaktordruckbehälterbau (Studie erstellt im Auftrag des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton).

[6] MÜHE, L.: Polygonalgeführte, gewickelte Ringspannbewehrung mit mehreren Zwischenverankerungen aller Spanndrahtringe, 2. Informationstagung über Reaktordruckbehälter und ihre Wärmeisolierung, Brüssel, 18.-20.11.1969. Tagungsveröffentlichung S. 433 ff.

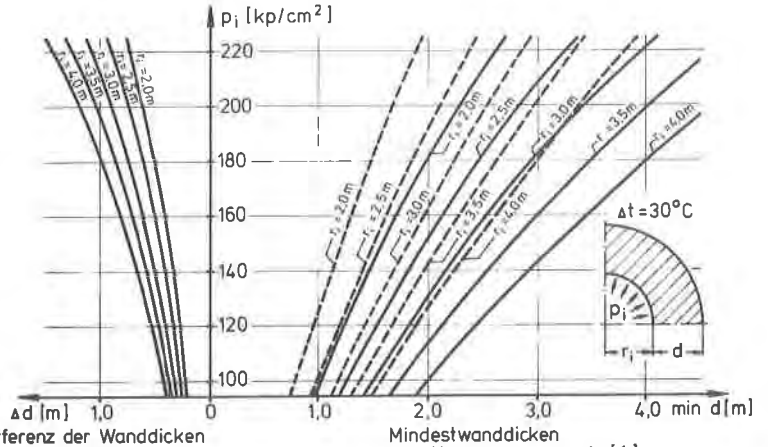
Geometrie M 1:500 WT = Wärmetauscher				
	22,50 / 23,50	21,50 / 21,70 6 WT (8 WT)	14,90 / 36,40	2x 7,10 / 14,90 / 18,70 / 21,70 (nichtintegrierte Anordnung, 2WT)
Beton	100 %	98 % (90 %)	64 %	62 %
Spannstahl	100 %	58 % (55 %)	61 %	51 %
Wärme-isolierung	100 %	135 % (146 %)	89 %	98 %
Umbauter Raum	100 %	84 % (78 %)	71 %	80 %

Bild 1 Vergleich verschiedener Anordnungsmöglichkeiten der Wärmetauscher

Geometrie M 1:500	Behälter I	Behälter II	Behälter III	Behälter IV
	je 3 Behälter erforderlich			
	7,00 / 24,00	18,20 / 7,00 / 12,00	15,00 / 7,00 / 12,00	7,00 / 15,20
Beton-fläche	100 %	121 %	111,2 %	130,77 %
Art der Vorspan-nung	Wickel-vorspannung	Wickelvorspan-nung u innenlie-gende Spannkabel	innenliegende Spannkabel	Wickel-vorspannung
Spannstahl St 145/160	100 %	151,7 %	141,6 %	108,8 %

Innendruck 40 kp/cm², Temperaturdifferenz $\Delta t = 30°C$

Bild 2 Anordnungsmöglichkeiten von 3x330 MWe-Reaktoren



Differenz der Wanddicken bei partieller Vorspannung und Vorspannung nach [1]

Mindestwanddicken
—— Vorspannung nach [1]
--- partielle Vorspannung (nach Abschnitt 5.2)

Bild 4 Mindestwanddicken bei Spannbeton-Reaktordruckbehältern für Leichtwasserreaktoren.

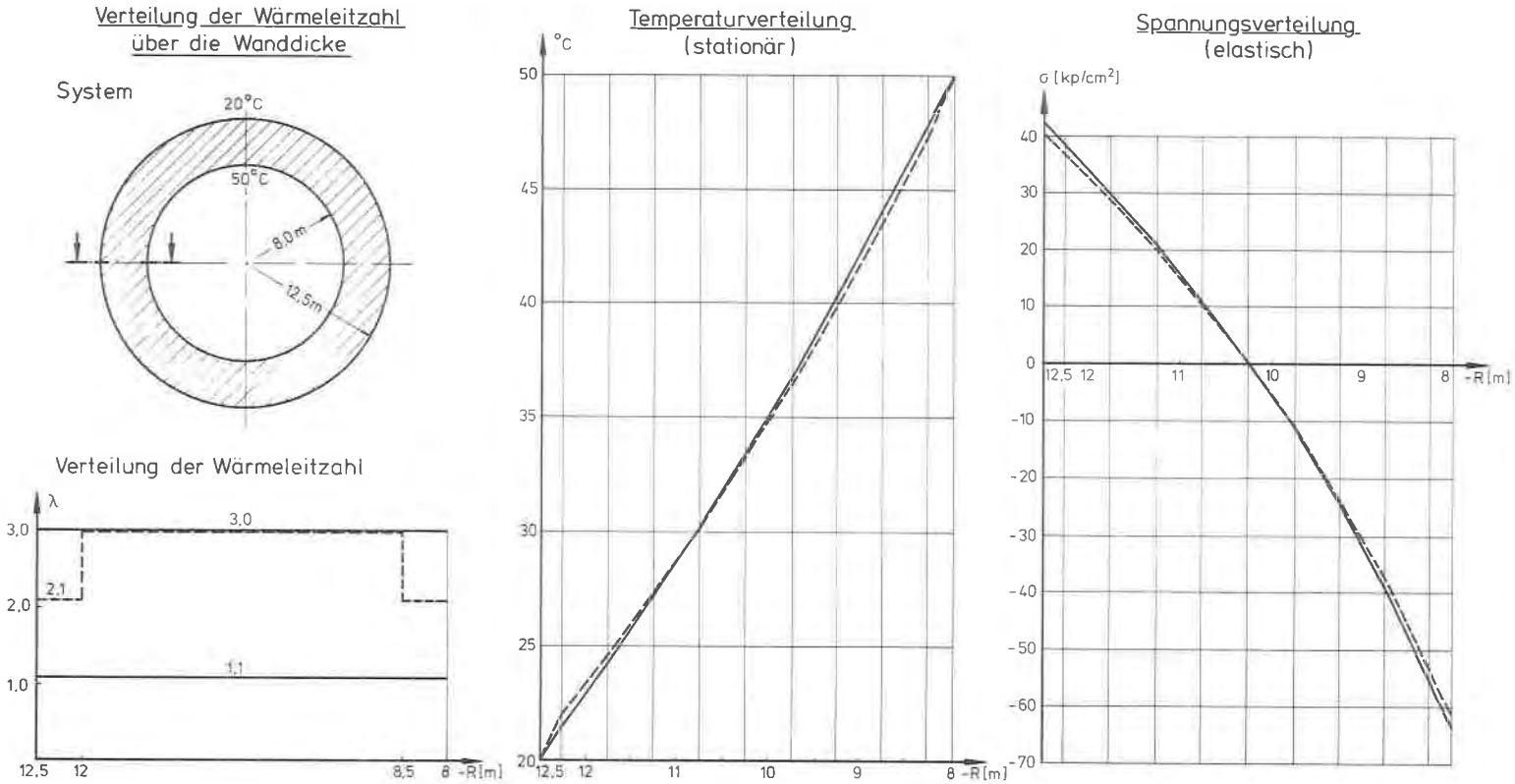


Bild 3 Einfluß der Wärmeleitfähigkeit λ auf den Spannungszustand

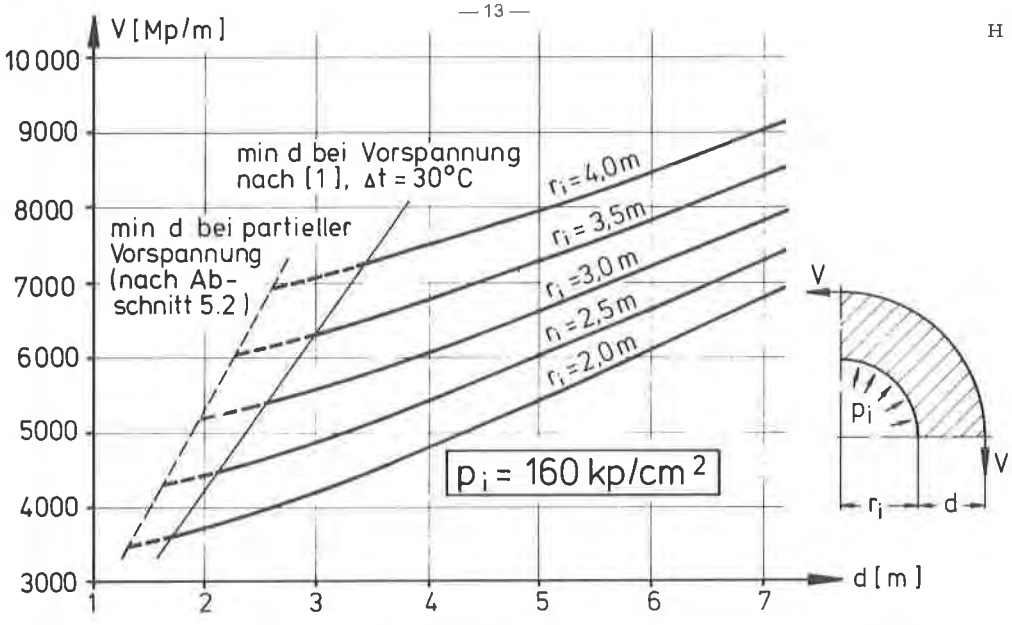


Bild 5 Erforderliche Vorspannkraft für Spannbeton-Reaktordruckbehälter bei p_i = 160 kp/cm²

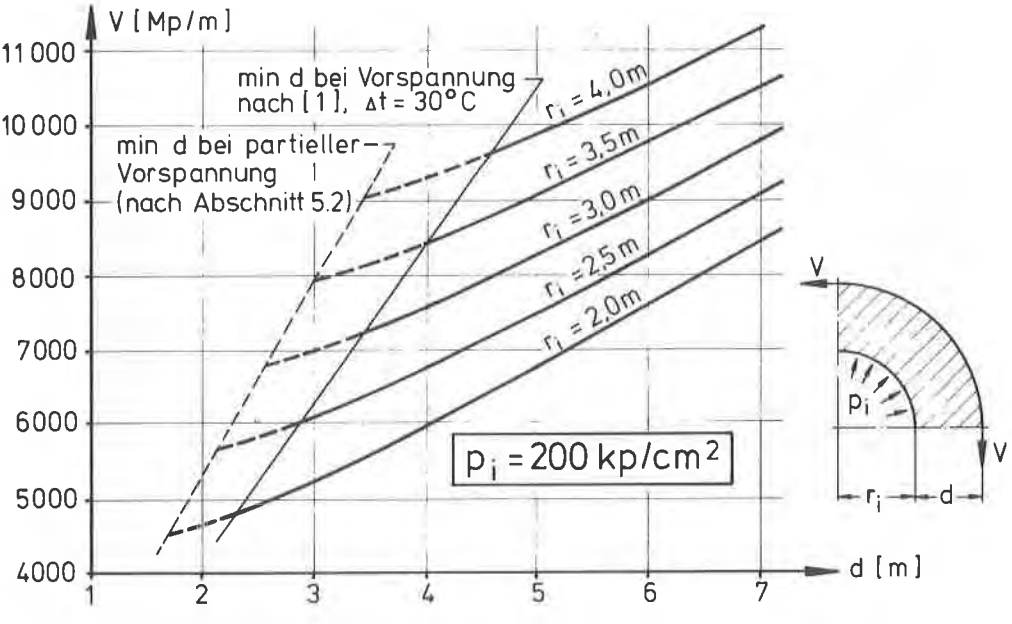


Bild 6 Erforderliche Vorspannkraft für Spannbeton-Reaktordruckbehälter bei p_i = 200 kp/cm²

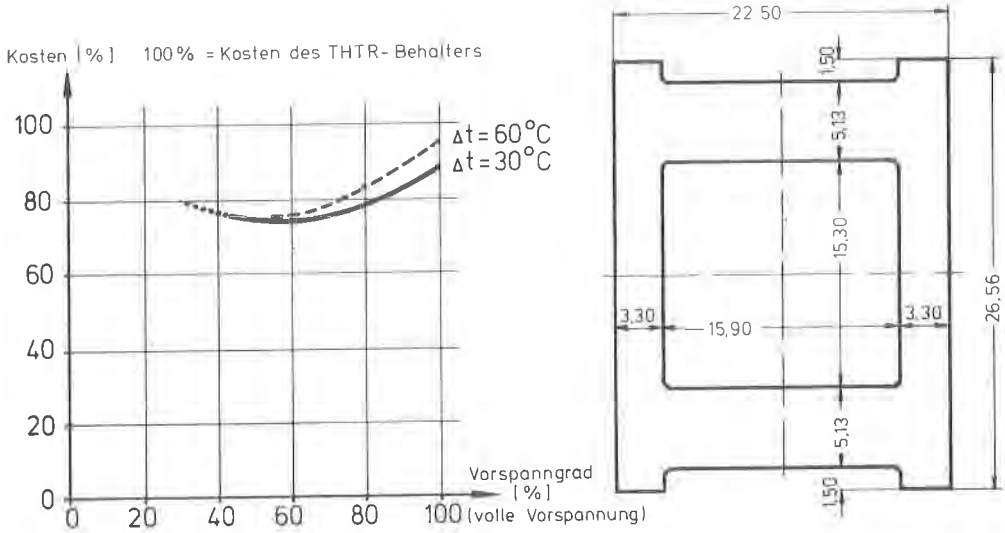


Bild 7 Abhängigkeit der Kosten eines Spannbeton-Reaktordruckbehälters von Vorspanngrad und Temperatur

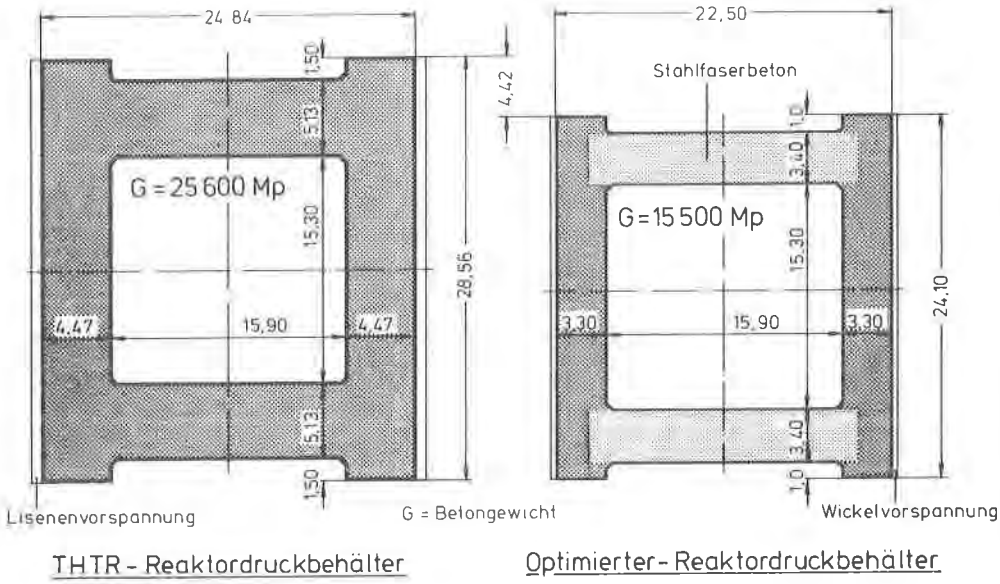


Bild 8 Optimierte Behälterabmessungen eines Spannbeton-Reaktordruckbehälters bei Verwendung von Stahlfaserbeton für die Abschlußplatten (beschränkte Vorspannung)