ASPECTS ON THE DESIGN OF MODERN PCRV WITH RESPECT TO THE HHT-VESSEL

G. SCHNELLENBACH, K. SCHIMMELPFENNIG

Zerna, Schnellenbach & Partner Consulting Engineers,
Viktoriastrasse 45, D-4630 Bochum 2, Germany

Summary

In the present time, activities in designing PCRV in the Federal Republic of Germany are concentrated on development of the vessel for a high temperature reactor with helium turbine in direct circuit, spherical fuel elements and an electrical output of 600 MWe, called HHT-Demo-Anlage. There are a number of new requirements for such a vessel given by the characteristics of the plant and by the decision to integrate the whole gas circuit in a prestressed concrete vessel.

The paper gives a short survey on the special conditions for such a PCRV, on methods for preliminary design and the problems to be solved hereby, on trends concerning advanced design criteria and on research and development work still necessary. (The liner with its special problems is not regarded in this paper.)

Special conditions for the vessel caused by the peculiarity of this type of power plant are mainly the numerous pods for the different heat exchangers and the auxiliary cooling systems, the horizontal turbine tunnel below the core cavity, which persistently disturbes the symmetry of the vessel geometry, and the lot of gas ducts between cavities and pods, most of them with additional coaxial tubes. It is intended to subject the vessel concrete to higher temperatures than usual today, to place the liner cooling systems in some distance from the liner and to install a venting system in order to avoid gas pressure in the concrete in case of a liner leakage. The numerous closures must be removable and must allow the arrangement of a high number of vertical prestressing tendons of the vessel.

Already in the preleminary design, a lot of problems have to be solved such as minimization of the overall dimensions under consideration of stresses in the ligaments during the different load cases, space required for the vertical tendons, prestressing of the turbine region, where no wire wound circumferential tendons can be arranged and aggravating circumstances arise due to the lot of gas ducts and the four fuel withdrawing tubes. Some experiences gained herein are outlined.

It is obvious that a vessel with these requirements cannot be realized by using the design criteria of former projects. Modifications are mainly necessary with regard to the degree of prestressing in connexion with the allowance of concrete cracking, higher concrete temperatures - especially in the space between liner and cooling pipes -, venting system etc. The advance requested in this field is briefly discussed. Finally, the main points of experimental research work necessary for the HHT vessel design are described. These concern the questions on concrete under elevated cyclic temperatures - also under accident conditions -, large prestressing tendons, ventage and liner cooling system and vessel closures.

1. Neuartige Anforderungen an den SBB für eine HHT-Demo-Anlage

In der Bundesrepublik Deutschland konzentrieren sich zur Zeit die Aktivitäten der Entwicklung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern (SBB) auf den Behälter für ein Demonstrationskraftwerk mit Hochtemperaturreaktor nach dem Kugelhaufenprinzip und Helium-Turbine im direkten Kreislauf, vgl. /1/. Das gewählte Auslegungsgrundkonzept, den gesamten Gaskreislauf integriert in einem Spannbetonbehälter unterzubringen, stellt einen großen weiteren Schritt hinsichtlich der Anforderungen an ein solches Bauwerk dar.

Gegenüber dem HTR-Behälter, dem bisherigen Endpunkt der Entwicklung, ist das augenfälligste neu hinzugekommene Merkmal die große, horizontale im unteren SBB-Bereich angeordnete Kaverne für die Gasturbine, welche eine nachhaltige Störung der symmetrischen Eigenschaften des Behälters bedeutet, siehe Bild 1. Der Turbinenstollen wird mit einem abnehmbaren Behälterabschluß verschlossen; auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich eine Nische für den Generator, welcher möglichst weit in den Behälter hereingerückt werden muß, damit die Welle zwischen Turbine und Generator möglichst kurz wird und die Abmessungen des Reaktorschutzgebäudes nicht zu ungünstig beeinflußt werden. Die Anzahl der vertikalen Kavernen für Wärmetauscher und Gebläse ist größer als beim HTR-Behälter; zudem liegen mehr unterschiedliche Arten vor, so daß eine Symmetrie nur zur Vertikalebene durch die Turbinenachse besteht. Kennzeichnend sind ferner die Vielzahl der Verbindungsleitungen, welche in Höhe der Turbine konzentriert sind, sowie die vier Kugelabzugsrohre. Diese komplizierte Anordnung von Hohlräumen führt schon vom Prinzip her zu Schwierigkeiten bei der Festlegung der Vorspannung, für die es Auslegungsziel sein muß, sowohl bei drucklosen wie druckbeaufschlagten Kavernen und Verbindungsleitungen einerseits keine unzulässigen Betondruckspannungen, andrerseits möglichst keine Betonzugspannungen zu erzeugen. Daß wegen der wenig ausgeprägten Symmetrieeigenschaften der Berechnungsaufwand immens steigt, versteht sich.

Neben diesen geometrischen Besonderheiten gibt es eine Reihe von weiteren Merkmalen, die eine Weiterentwicklung gegenüber dem HTR-Konzept bedeuten. So wird das Linerkühlksystem hier nicht auf den Liner aufgeschweißt, sondern es soll im Abstand von ca. 0,20 m hinter dem Liner angeordnet werden. Der dazwischenliegende Beton wird je nach dem, ob der Liner eine Wärmeisolierung erhält oder nicht, in Normalbereichen Temperaturen bis 110 ^{o}C bzw. in den Rückwärmeüberhitzer- (RWÜ) und Vorkühlerkavernen (VK) bis 150 ^{o}C auf der Linerseite ausgesetzt sein. Auch die sich im Bereich zwischen den Karvernen einstellende Betontemperatur wird höher als bisher üblich sein, nämlich ca. 70 ^{o}C. Das zwischen Liner und Kühlrohren vorgesehene Drainagesystem, welches zur Vermeidung von Druckbeaufschlagung des Betons im Falle von Liner-Leckagen dienen soll, stellt eine weitere Besonderheit dar. Schließlich sei noch auf die besonderen Anforderungen hingewiesen, die sich aus der Notwendigkeit ergeben, daß die Abschlüsse der Kavernen entfernbar sein müssen und die koaxial geführten Heißgasleitungen ausbaubar sein müssen.

Diese Fülle neuer Anforderungen, die durch eine Anzahl zusätzlicher Detail-Randbedingungen zu ergänzen wäre, macht deutlich, daß für dieses Projekt Aufgaben, die bisher noch nicht anstanden, gelöst werden müssen und auch die Auslegungsbedingungen entsprechend dem inzwischen fortgeschrittenen Wissensstand und den Ergebnissen noch erforderlicher Entwicklungsarbeiten fortentwickelt werden müssen. (Dieser Beitrag beschäftigt sich nur mit der Spann-

betonkonstruktion, also nicht mit dem Liner, für welchen ebenfalls gegenüber der bisherigen Praxis weitergehende Anforderungen bestehen.)

2. Gesichtspunkte für die Vordimensionierung eines HHT-Behälters

Die vielfältigen geometrischen und sonstigen Randbedingungen machen bereits die Vordimensionierung eines solchen Behälters komplizierter als bei bisherigen Projekten. Zudem hat diese Entwurfsphase mit aller Sorgfalt zu erfolgen, da wegen des hohen Berechnungsaufwandes mehrfache Spannungs- und Verformungsanalysen infolge unzureichender Vordimensionierung nach Möglichkeit ausgeschlossen werden müssen. Einige Gesichtspunkte hierzu, die der Mitarbeit der Verfasser an einem Forschungsvorhaben für diese Aufgabe entstammen (vgl. /2/), seien im folgenden kurz skizziert.

Ausgehend von den geometrischen Randbedingungen wie Kavernendurchmesser, Kavernenlängen, erforderliche Verbindungsleitungen, deren Durchmesser usw., wird zweckmäßigerweise zunächst der Behältergrundriß hinsichtlich der prinzipiellen Anordnung der Kavernen zueinander festgelegt. Hierbei ist besonders auf möglichst kurze Verbindungsleitungen und den Platzbedarf für die Kavernenverschlüsse zu achten. Von Einfluß auf die Grundrißgestaltung und damit letztlich den Behälterdurchmesser ist insbesondere der Platzbedarf für die vertikale Vorspannung - vorwiegend für die Spanngliedverankerungen, aber auch für die Spanngliedführung im Behälterinnern, wobei Gesichtspunkte wie Platzbedarf für Linerverankerungen, schlaffe Bewehrung, Linerkühlsystem, Drainagesystem sowie die Temperaturen und die Strahlung bei Spanngliedführung in Kavernennähe eine Rolle spielen. Besonders im Schnitt in Höhe der Turbinenachse ergibt sich hier eine Reihe von Zwangspunkten.

Ausschlaggebend für den Durchmesser des Behälters sind letztlich die Abmessungen der sogenannten Ligamente, das sind die Abstände der Kavernen voneinander und vom Behälteraußenrand. Zu deren Optimierung werden zweckmäßig Scheibenberechnungen durchgeführt, wobei folgende Kriterien für die Zulässigkeit der Ligament-Abmessungen gelten:

- Unter Anfangsvorspannung (ohne Verluste) müssen die Druckspannungen zulässig sein.
- Unter Vorspannung im Endalter, überlagert mit dem Auslegungsdruck, soll die resultierende Kraft im Ligament möglichst noch eine Druckkraft sein. Andernfalls muß die zur Aufnahme der Zugkräfte erforderliche schlaffe Bewehrung ohne konstruktive Schwierigkeiten unterzubringen sein.
- Es müssen zusätzliche Spannungserhöhungen beachtet werden, wo Verbindungsleitungen die Ligamente durchdringen.

Bild 2 gibt im Prinzip wieder, wie sich Veränderungen der Ligament-Abmessungen - unterschiedlich für Kavernen nahe dem Außenrand und der Core-Kaverne - auf die Höhe der Randspannungen auswirken.

Im Zusammenhang mit der Festlegung des Behältergrundrisses steht die Dimensionierung der vertikalen Vorspannung. Es hat sich gezeigt, daß bei den vorliegenden Gegebenheiten die Auslegung für Gebrauchszustände und nicht die für den Grenzzustand der Tragfähigkeit maßgebend ist. Grundsätzliche Aussagen liefern hierfür Gleichgewichtsbetrachtungen für horizontale Schnitte unter Einbeziehung eines aufgrund von Erfahrungen festgelegten Erhöhungsfaktors zur Abdeckung zusätzlicher Effekte wie Biegewirkung der horizontalen Platten, Temperaturbeanspruchungen usw.

Auslegungsbestimmend wird bei dieser Vorgehensweise der Horizontalschnitt durch die Turbinenachse wegen der Vielzahl horizontaler Verbindungsleitungen. Es kann nicht als optimale Lösung angesehen werden, wenn zur Aufnahme der resultierenden Vertikalkräfte aus dem Druck in diesen Rohren Spannglieder über die gesamte Behälterhöhe vorgesehen werden, obwohl eine Aufnahme dieser Kräfte örtlich im Bereich der Rohrleitungen ausreichend wäre. Hier sind noch Verbesserungen wünschenswert. Dadurch würde sich eine Verminderung des Spannstahlbedarfs ergeben; mit einer Reduzierung des Behälterdurchmessers insgesamt ist andrerseits aufgrund der Spannungsverhältnisse in den Ligamenten nicht zu rechnen.

Im Zusammenhang mit der Anordnung der Vertikalvorspannung muß auch die Frage der Ausführung der zahlreichen Behälterabschlüsse geklärt werden. Hier sind grundsätzlich zwei Bauweisen möglich:

1. Die abnehmbaren Verschlüsse werden direkt mittels durchgefädelter Spannglieder gehalten.
2. Die Verschlüsse stützen sich gegen Auflager im SBB ab, die ihrerseits möglichst weitgehend durch Spannglieder gehalten werden.

Welche Lösung letztlich zu bevorzugen ist, hängt von noch durchzuführenden Detailuntersuchungen ab, siehe auch Abschnitt 4. Auf jeden Fall sollten die hierfür herangezogenen Spannglieder nicht mit einzelnen Ankerköpfen, sondern in umlaufenden Stahlringen, die im ersten Fall den Rand des Deckels, im zweiten Fall den Rand der Öffnung bilden, verankert werden, damit der Platzbedarf in sinnvollen Grenzen bleibt.

Für die Dimensionierung des HHT-Behälters in vertikalen Schnitten sind im wesentlichen geometrische Randbedingungen maßgebend, wie z. B. Durchmesser und Längen der Kavernen, Fixpunkte für die Zuführung von Verbindungsleitungen, und im Turbinenbereich insbesondere die Bedingungen für die Führung der Kugelabzugsrohre, die an der Turbinenkaverne vorbei zwischen Zuleitungen zu dieser hindurch unter Einhaltung bestimmter Vorschriften hinsichtlich Neigung und Abknickungen geführt werden müssen. Die Bauhöhe im Turbinenbereich wird im wesentlichen durch diese Randbedingungen bestimmt.

Während die Festlegung der Wickelvorspannung im oberen Behälterbereich und im Zusammenhang damit die Ermittlung der optimalen Stärke der oberen Abschlußplatte über der Core-Kaverne keine besonderen Schwierigkeiten macht, wirft die Vorspannung des Turbinenbereiches große Probleme auf. Hier ist wegen des Abschlusses des Turbinenstollens und der Nische für den Generator eine Wickelvorspannung nicht möglich. Statt dessen sind folgende Lösungen denkbar:

- Vorspannung durch Erhöhung der angrenzenden Wickelvorspannung,
- Vorspannung durch transversale Einzelspannglieder,
- Lisenenvorspannung mit Spannkabelführung im Bereich außerhalb der Kavernen,

sowie jedwede Kombination dieser Grundkonzepte. Grundsätzlich sollte von einer Verstärkung der Wickelvorspannung direkt oberhalb und unterhalb des auszusparenden Bereiches Gebrauch gemacht werden. Studien der Verfasser hierzu haben gezeigt, daß eine solche Vorspannung deutlich in den Turbinenbereich ausstrahlt und weitgehend zur Vorspannung der weiter innen gelegenen Bereiche genügt. Lediglich in den Randzonen ohne Bewicklung würden Zugspannungen auftreten, die allerdings eine erhebliche schlaffe Bewehrung erforderlich machen würden. Um dem abzuhelfen, ist eine nur mäßige Vorspannung des Turbinenbereiches selbst ausreichend. Von den Verfassern wurde deshalb vorgeschlagen, auf die von anderer Seite vorgesehene transversale Vorspannung dieses Bereiches zu verzichten (außer parallel zur Turbinenachse) und statt dessen Spannglieder

umlaufend im Bereich außerhalb der Kavernen zu verlegen und an Lisenen zu verankern, siehe Bild 3. (Der Darstellung liegt ein Alternativentwurf mit gegenüber Bild 1 abweichender Kavernenanordnung zugrunde.) Diese Vorspannung übt bereichsweise unterschiedlich durch Umlenkkräfte (Bereich II in Bild 3) und durch die Radialkomponenten der Ankerkräfte (Bereich I) die benötigten Radialpressungen aus. In den Bereichen von Turbinenverschluß und Generatornische müssen diese Spannglieder in vertikaler Richtung umgelenkt werden (vgl. Bild 4) und zweckmäßig zur Vermeidung zu großer Höhendifferenzen in geraden Spuren geführt werden, vgl. Bild 3. Dies ist jedoch ohne weiteres möglich, da der erforderliche radiale Vorspannungsdruck durch die ohnehin erforderlichen turbinenparallelen Spannglieder erzeugt wird (Bereich III). Das so gefundene Vorspannungskonzept hat den großen Vorteil, daß die vielen konstruktiven Schwierigkeiten, die bei ausschließlich transversaler Spanngliedführung im Turbinenbereich entstehen, weitgehend vermieden werden.

3. Modifizierung der Auslegungsbedingungen im Vergleich zu bisherigen SBB

Der bisherige Stand genehmigungsreifer Auslegungsbedingungen für SBB in der Bundesrepublik Deutschland wird durch die Auslegungsbedingungen für den Spannbetonbehälter der projektierten HTR-1160 MWe-Anlage repräsentiert, vgl. /3/. Da derartige Papiere hierzulande bisher immer projektbezogen entwickelt wurden und die HTR-Auslegungsbedingungen zudem dem Wissensstand vor mehreren Jahren entsprechen, erscheint es derzeit unumgänglich, daß auch für den endgültigen Entwurf des HHT-Behälters eine neue Bemessungsrichtlinie erstellt werden muß, die auf die neuartigen Gegebenheiten dieses Bauwerks eingeht und Fortschritte des Wissensstandes verarbeitet.

Darin muß insbesondere der komplexen Geometrie des HHT-Behälters Rechnung getragen werden, die es nicht erlaubt, alle Teilquerschnitte stets zu überdrücken. Bereits die in Scheibenberechnungen ermittelten Ligamentspannungen zeigen, daß eine Dimensionierung derart, daß in allen Teilquerschnitten stets Druckresultierende vorliegen, wie es das HTR-Papier /3/ noch fordert, nicht zu sinnvollen Behälterquerschnitten führt. Im Turbinenbereich wird dieses Problem verstärkt auftreten. Deshalb sollte hier in größerem Umfange eine teilweise Vorspannung mit Auslegung der schlaffen Bewehrung aufgrund von Zustand-II-Berechnungen zugelassen werden. Dabei könnte sogar daran gedacht werden, auch den hochfesten Betonstahl St 1080/1320 für diesen Zweck als schlaffe Bewehrung zuzulassen. Da im Innern eines solchen Behälters die Dehnungen keinen solchen Beschränkungen wie im sonstigen Stahlbetonbau unterliegen, ist die Festlegung einer zulässigen Spannung für Gebrauchszustände für diesen Stahl in Höhe von ca. 500 N/mm^2 eine sinnvolle Größenordnung.

Weiterhin müssen die Auslegungsrichtlinien den vorgesehenen erhöhten Betontemperaturen im Vergleich zu bisherigen Projekten Rechnung tragen, und zwar sowohl der großräumigen mäßigen Erhöhung auf ca. 70 ^{o}C, wie auch der deutlichen Erhöhung in den Schichten zwischen Liner und Kühlsystem. Die den Berechnungen zugrundezulegenden Materialkennwerte müssen diesen Bedingungen angepaßt werden; insbesondere ist zu klären, welche Tragfunktion man der Zwischenschicht zwischen Liner und Kühlsystem noch zubilligen kann, da in Temperaturbereichen bis 150 ^{o}C in Abhängigkeit von Betonzusammensetzung und Belastungsgeschichte schon Festigkeitseinbußen stattfinden können. Auch ist bei diesen Temperaturen dem Freisetzen von Wasser aus

dem Beton Aufmerksamkeit zu schenken. Entsprechende Auslegungsbedingungen sind im Zusammenhang mit Experimenten - vgl. Abschnitt 4 - zu entwickeln. In stärkerem Maße noch müssen die Wirkungen erhöhter Temperaturen in Bezug auf Heißstellen und Störfallabläufe in Betracht gezogen werden.

Schließlich sei noch stichwortartig erwähnt, daß auch die vorgesehenen größeren Einzelspannglieder - es sind Größenordnungen von 20 000 KN Bruchlast in der Diskussion - sowie die beabsichtigte Verwendung eines Betons der Güteklasse B 55 der besonderen Berücksichtigung bei den Auslegungsbedingungen bedürfen. Es sollte auch überdacht werden, in welcher Form ein Grenztragfähigkeitsnachweis zu führen ist und in welcher Höhe der Prüfdruck angesichts der stark unterschiedlichen Betriebsdrücke in bestimmten Gruppen von Kavernen anzusetzen ist.

Alle diese Fragen sind Gegenstand der gegenwärtigen Forschungsarbeit, die unter Beteiligung der Verfasser betrieben wird.

4. Schwerpunkte der noch erforderlichen experimentellen Entwicklungsarbeiten

Begleitend zu den Entwicklungsarbeiten hinsichtlich theoretischer Fragestellungen, Berechnungen und Konstruktion wird von der planenden Firma, der Hochtemperatur Reaktorbau GmbH, Mannheim, ein ausgedehntes Versuchsprogramm bestritten. Nach Ansicht der Verfasser haben die im folgenden besprochenen Themen besonderes Gewicht für die Entwurfsarbeiten des HHT-Behälters.

Es soll ein Beton sehr hoher Güteklasse, die bei Bau von SBB bisher nicht vorgekommen ist, verwendet werden. Hier gilt es zunächst einmal, die unter den vorliegenden Einsatzbedingungen optimale Rezeptur durch Versuche zu bestimmen. Kriterien hierfür sind insbesondere das Festigkeitsverhalten unter erhöhten (zyklischen) Temperaturbeanspruchungen, die Wärmedehnung, die möglichst gering sein sollte, ein möglichst geringes Schwinden und Kriechen sowie eine möglichst hohe Steifigkeit.

Für den einmal festgeschriebenen Beton sind sämtliche für die Behälterberechnung erforderlichen Materialkennwerte zu bestimmen. Für die Auslegung von Heißstellen und die Beherrschung von Störfällen mit instationären Temperaturbeanspruchungen oberhalb der Größenordnung der Betriebstemperaturen ist die Untersuchung des Verhaltens dehnungsbehinderter Betonproben unter den in Frage kommenden thermischen Bedingungen von großem Interesse, da theoretische Nachweisführungen hierfür sehr zu Konservativitäten neigen.

Die versuchsmäßige Entwicklung von Vorspannsystemen für die Einzelspannglied-Vorspannung sollte im Zusammenhang mit der Entwicklung geeigneter Behälterabschluß-Konzepte erfolgen. Ein nicht geringer Teil der Vertikalvorspannung dient zur Aufbringung der Rückhaltekräfte für die Behälterabschlüsse auf der SBB-Oberseite, so daß Verankerungsmöglichkeiten zu entwickeln sind, die eine Konzentrierung um die Kavernenquerschnitte herum erlauben, vgl. auch Abschnitt 2. Werden die Deckel direkt durch Spannglieder gehalten, so sind Systeme, die ein möglichst einfaches Manipulieren der Deckel erlauben, zu entwickeln. Hier kann an Koppelanker oder vergleichbare Vorrichtungen gedacht werden, die ein Entspannen der Behälterabschlüsse ermöglichen, ohne daß die Spannglieder über ihre volle Länge bis zur Unterkante des SBB gelöst werden müssen.

Schließlich wird es unabdingbar sein, Funktionsmodelle für die vorgesehene Bauweise des vom Liner distanzierten Kühlsystems, des Drainagesystems und in Zusammenhang damit der gewählten Bauweise des Liners sowie einer Verankerungen herzustellen und zu testen.

Literatur

/1/ SCHÖNING, J., SCHWIERS, H.G., "The Characteristics of the PCRV for the HHT-Demo-Plant", IAEA Specialists Meeting on Vessel Concepts for Gas-Cooled Reactors, Lausanne, 23-25 October 1978

/2/ ZERNA, W., SCHNELLENBACH, G., "Studie zur Optimierung des Spannbetondruckbehälters für die HHT-Demo-Anlage", Bochum, Juli 1978

/3/ ZERNA, W., SCHNELLENBACH, G., "Gutachtliche Ausarbeitung der Bemessungsrichtlinien für den Spannbetonbehälter des HTR-Kernkraftwerkes", Bochum, Juli 1976

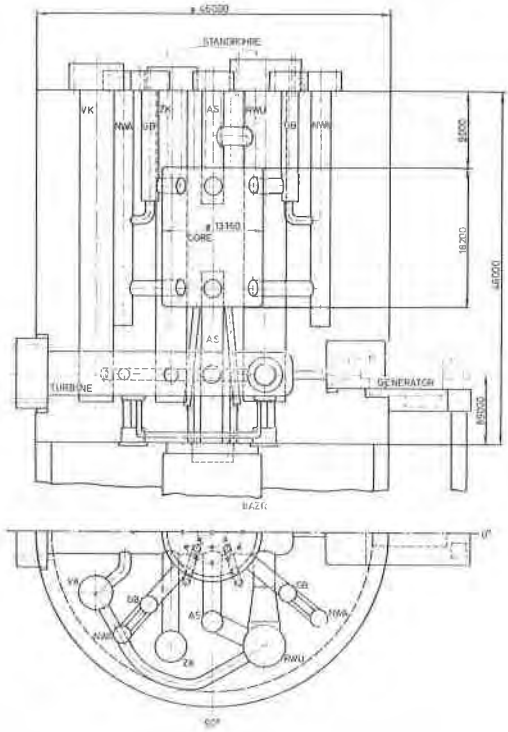

Bild 1
Spannbetondruckbehälter für HHT-Demo-Anlage, Übersicht

VK	Vorkühler	NWA	Nachwärmeabfuhrsystem
ZK	Zwischenkühler	GB	Gebläse (für NWA)
RWÜ	Rekuperator	KAZR	Kugelabzugsrohr
AS	Ausbauschacht Hochdruckstollen		

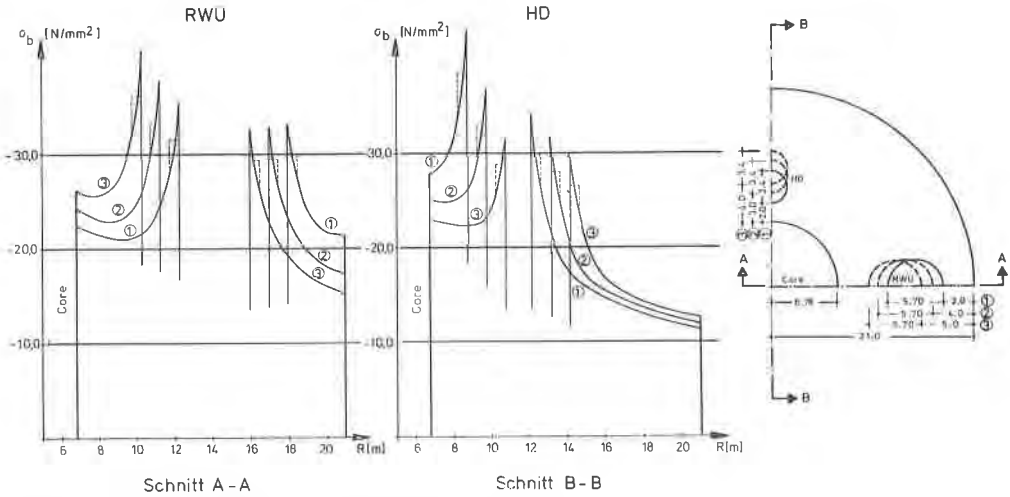

Bild 2 Maximale Druckspannungen in Ligamenten

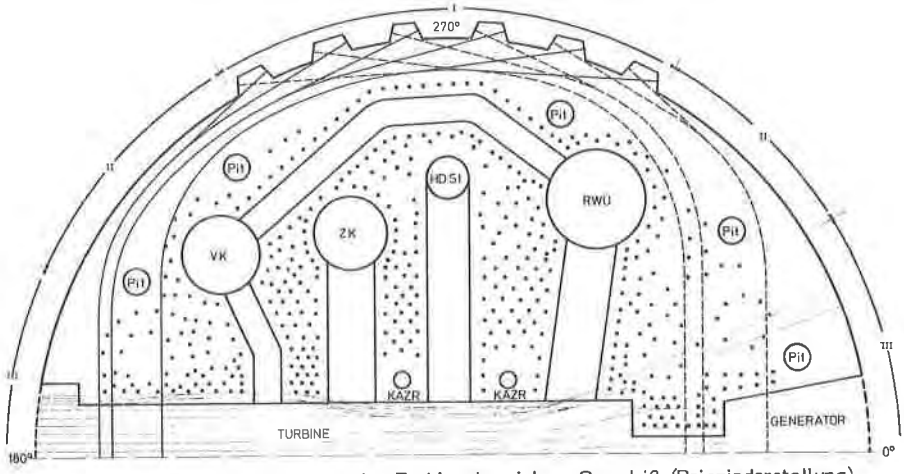

Bild 3 Lisenenverankerte Vorspannung des Turbinenbereiches, Grundriß (Prinzipdarstellung)

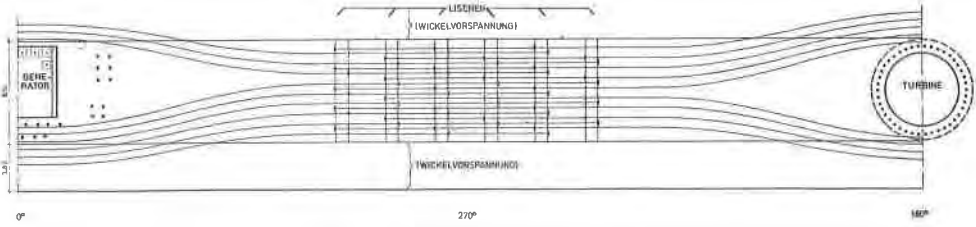

Bild 4 Lisenenverankerte Vorspannung des Turbinenbereiches, Abwicklung (Prinzipdarstellung)