STRESS ANALYSIS OF LINERS FOR PRESTRESSED CONCRETE REACTOR PRESSURE VESSELS WITH REGARD TO NON-LINEAR BEHAVIOUR OF LINER MATERIAL AND OF ANCHOR-CHARACTERISTICS

R. OBERPICHLER, G. SCHNELLENBACH

Engineering Society Prof. Zerna—Dr. Schnellenbach, D-463 Bochum, Germany

R. WEBER

L & C. Steinmüller, Gummersbach, Germany

SUMMARY

The thin steel liner attached by anchors like a membrane to the interior wall of a prestressed concrete reactor pressure vessel (PCRV) has to provide the leak-tightness of the vessel. Furthermore the liner may serve as internal shuttering for placing of concrete as well as a support for the cooling system.

Although the liner serves merely as a leak-tight skin it must be strong enough to resist the stresses and strains, imposed on it by deformations of the PCRV, without rupture. The loads are predominantly compressive due to shrinkage and creep of concrete, pretensioning and temperature, so the liner will function in a compressive, biaxially strained state. Essentially there are two modes of failure, buckling failure and shear connector failure. For an economical liner design it appears that the width and length of each panel should be dimensioned small enough in order to make the critical buckling stress of the panel greater than the yield strength of liner material. Initial buckles or other imperfections can cause local buckling due to increasing compressive strains, but it is not a buckling phenomenon in the instability sense.

Under design accident conditions a buckled panel, with the least load carrying capacity, is completely bounded by plane panels, with the highest load carrying capacity, and they are in a position on the liner where the strains and the strain gradients are a maximum. Then the strains could accumulate in the buckled panel so that buckling could give rise to the premature failure of the anchors and could jeopardize the leak-tight integrity. Therefore, the design of the liner for buckling actually becomes a problem determining the right type, size and spacing of shear-connectors.

In actual calculations the liner is locally represented by one-dimensional models which yield displacements and extreme shear forces of the anchors. The basis of design are non-linear anchor-characteristics and non-linear stress-strain diagrams for panels.

The purpose of this paper is to investigate the two-dimensional behaviour of the liner with regard to non-linear anchor-characteristics and non-linear material behaviour of the liner. The analysis is based on a plane stress model under the assumption of a membrane state of the liner. Calculations are performed by the dynamic relaxation method. With the aid of available non-linear stress-strain diagrams, describing the post-buckling behaviour, individual panels are considered as buckled ones. The adjacent unbuckled panels are calculated on other non-linear diagrams. Strains and stresses in the liner and additional shear loads in the anchors can be calculated with arbitrary sizing and spacing of the anchors. With respect to the parameters they are easily controlled. Since actual loads on the liner are defined by the PCRV-behaviour, an economical and safe design is possible. Finally an extreme case is calculated to assess the maximum value of the shear-forces assuming zero post-buckling capacity for the buckled panel.

1. Einführung

Über theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Berechnung von Linern ist in "Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels", London, 1968, und den Preprints bzw. Proceedings zur "1. und 2. International Conference on Struct. Mechn. in Reactor Techn.", Berlin, 1971 bzw. 1973, berichtet worden. Dabei geht es vor allem um die Einführung von Rechenmodellen, die experimentell begründet sind, um zu möglichst einfachen, wirtschaftlichen und sicheren Lösungen zu gelangen. Der Aspekt der Wirtschaftlichkeit muß zunächst noch hinter die Sicherheit zurücktreten, da der Liner durch seine besondere Stellung im Bauwerk ein recht komplexes Verhalten zeigt und die notwendigen Grundlagen zu einer exakteren Beurteilung weitgehend fehlen.

Der folgende Beitrag enthält einige theoretische Untersuchungen zum Linerverhalten. Hierzu wurden parametrische Studien zu verschiedenen Einflüssen gemacht, die sich u. a. aus der Wahl der Ankerkennlinien, der Nachbeultragfähigkeit sowie der Beulfigur ergeben. In die Betrachtung sind zweidimensionales Tragverhalten an einem ebenen Rechenmodell unter Berücksichtigung von nichtlinearem Werkstoffverhalten und nichtlinearen Ankerkennlinien einbezogen.

Es soll zunächst die bisherige Vorgehensweise mit ihren Grundlagen erläutert werden.

1.1 Aufgaben des Liners

Der Liner dient hauptsächlich als Dichtung gegen Gas- bzw. Flüssigkeitsdurchtritt. Es ist daher eine hohe Anforderung an seine Integrität zu stellen, die im Versagensfall zu beträchtlichen Schäden führen kann. Mögliches Versagen geht sowohl vom Linerwerkstoff selbst aus infolge unzulässig hoher Dehnungen als auch von den Verbindungen und Anschlüssen, z. B. Schweißnähte. Weiterhin dient der Liner als Träger des Kühlsystems und gegebenenfalls der Isolierung. Außerdem wird er beim Einbringen des Betons als Schalung verwendet.

1.2 Wirkungsweise des Liners und seine Belastung

Der Liner ist kein "selbständiges" Tragwerk. Er ist wie eine Membran auf der Innenseite des Spannbeton-Reaktor-Druckbehälters (SBB) zug- und schubfest durch eine entsprechende Verankerung aus Bolzen, Rippen und Kühlrohren befestigt. Infolge der unausweichlichen Verbindung mit dem SBB muß der Liner dessen sämtliche Verformungen aufnehmen. Die Dehnungsverteilung auf der Behälterinnenseite ist also für die Belastung des Liners maßgebend. Damit liegt eine formschlüssige Beanspruchung vor, die auf den Liner über dessen Verankerung übertragen wird und durch die Größe der aufgezwungenen Dehnungen begrenzt ist. Eine Rückwirkung des Liners auf den SBB sei wegen der großen Steifigkeitsunterschiede vernachlässigt. Liner und Verankerung verhalten sich elastisch bzw. elastoplastisch. Mögliche Reibungskräfte zwischen Beton und Liner werden vorerst nicht angenommen.

1.3 Konstruktive Probleme bei der Dimensionierung

Zur Konstruktion wird ein duktiler Stahl mit entsprechender Schweißeignung und guten Fließeigenschaften bevorzugt. Örtliches Fließen soll möglichst ohne Schaden ertragen werden können. Die Linerdicke ist daher so klein wie möglich zu wählen, wodurch auch die Kräfte an Umlenkstellen und im Ankersystem klein gehalten werden können. Die Wahl der Anker sollte der Linerdicke angepaßt werden, damit ein Ausreißen aus dem Linerblech nicht eintreten kann. Doyle et al. [9] geben hierzu ein Verhältnis von Linerdicke zu Ankerdurch-

messer mit mind. 0,5 an. Weiterhin muß der Liner den oben genannten Aufgaben vor Inbetriebnahme vollauf genügen.

2. Grundlegende Annahmen zur Linerberechnung

In der angegebenen Literatur [2] bis [10] wird nahezu einheitlich von den gleichen Versagensannahmen ausgegangen, von denen die wesentlichen nachfolgend genannt werden sollen. Ihre richtige Einordnung erscheint sehr wichtig bei der Wahl eines geeigneten Rechenmodells.

2.1 Bemessungslastfall

Wegen der überwiegenden Druckbeanspruchung und infolge geringer Lastwechsel sind nur das Beulen des Liners und der Ankerscherbruch als Versagensmöglichkeiten von Bedeutung. Beulen und Ankerversagen sind eng miteinander verknüpft. Als Ursachen werden u. a. angegeben:

Anfangsverformungen des Liners,
unterschiedliche Fließgrenzen,
unterschiedliche Ankerkennlinien,
Unterschiede in den Blechdicken,
unterschiedliche Ankerabstände,
Betonversagen in der Ankerzone, etc.

Damit ist eine Bestimmung des Versagensortes nicht möglich, es muß also ein hypothetischer Bemessungslastfall aufgestellt werden, der auf einen Linerausschnitt anzuwenden ist.

Als erstes wird angenommen, daß bei ausgeprägter Proportionalitätsgrenze elastisches Beulen durch eine geeignete Wahl des Schlankheitsgrades, d. h. des Länge-Dicke-Verhältnisses, ausgeschlossen ist (s. [1], [11], [12]). Die Ankerabstände sind nach oben begrenzt und werden so bestimmt, daß die kritische Beulspannung über der Fließgrenze liegt. Das Beulen ist damit nicht mehr als Stabilitätsproblem zu behandeln. Der Liner kann deshalb weitgehend plastisch beansprucht werden. Wollte man den Liner im elastischen Tragbereich annehmen, könnte man nur geringe Verformungen zulassen, was gerade bei einer formschlüssigen Belastung zu recht unwirtschaftlichen Konstruktionen führen würde. Die größere Verformbarkeit führt jedoch an Stellen mit Vorverformungen, die senkrecht zum Liner auftreten, zu einer erhöhten Beanspruchung der Anker, die die Verformungsunterschiede des Liners aus der größeren Nachgiebigkeit des Beulfeldes aufzunehmen und somit für das Gleichgewicht zu sorgen haben.

Zur Berechnung wird daher das ungünstigste Zusammenwirken der Versagensursachen angenommen, wobei man von einer vorhandenen Vorbeule an beliebiger Stelle ausgeht. Sie wird so gewählt, und das erscheint sinnvoll, daß ein Linerfeld zwischen zwei Ankern die größte Schwächung erfährt, die übrigen benachbarten Felder dagegen ungeschwächt bleiben sollen.

Plastisches Beulen und Ankerversagen bestimmen also die gesamte Berechnung. Da plastische Verformungen des Liners zugelassen sind und den elastischen Anteil weitüberwiegen können, reduziert sich die Berechnung auf die richtige Wahl von Ankertyp, -größe und -abstand (s. Tan [6]).

Der Bemessungslastfall kann vereinfacht so dargestellt werden:

Ankerversagen muß verhindert werden, da es die Ankerabstände vergrößert und das

für das Stabilitätsverhalten zugrundegelegte Länge-Dicke-Verhältnis ungültig macht. Als Folge tritt eine Ausweitung der Beule, d. h. vermindertes Nachbeultragvermögen, und eine erheblich größere Anker- und Linerbeanspruchung ein. Es ist leicht einzusehen, daß sich eine Kettenreaktion anschließen muß, die die Integrität des Liners und gegebenenfalls die Funktionsfähigkeit der Isolierung gefährdet.

2.2 Liner-Charakteristiken

Besonders in den Beiträgen [2] bis [5] ist eine große Zahl experimenteller Ergebnisse dargestellt. Hierzu wurden einachsiale Druckversuche an Streifen gemacht und nach verschiedenen Parametern untersucht. Eine große Rolle spielen dabei das Länge-Dicke-Verhältnis, die Anfangsbeulhöhe und die Fließgrenze. Die gewonnenen Spannungs-Dehnungs-Diagramme zeigen sehr deutlich das Abfallen der aufnehmbaren Kraft nach Erreichen der Fließgrenze und damit den stark verformungsabhängigen Teil des Nachbeulverhaltens. In Einzelfällen sind für die ausgeführten Objekte zweiachsiale Versuche gemacht worden, wodurch die einachsialen Ergebnisse recht gut bestätigt werden konnten. Dadurch war es möglich, die sowohl theoretisch als auch experimentell ermittelten Diagramme für die Berechnung zu verwenden. Eine systematische Untersuchung des zweidimensionalen Verhaltens ist bisher nicht erschienen.

2.3 Anker-Charakteristiken

Zur Erfassung des Ankertragverhaltens sind zahlreiche Versuche an einbetonierten Werkstücken gemacht worden, die sich jeweils auf die speziell verwendeten Ankertypen und -größen beziehen. Sie sind von der Betongüte abhängig. Der Verlauf ist nicht-linear und kann den Beiträgen [2] bis [10] entnommen werden. Ebenso fehlen auch hier grundsätzliche Untersuchungen über das Zusammenwirken verschiedener Ankertypen.

2.4 Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse

Ankerverschiebungen und Linerdehnungen wurden bisher mit einem eindimensionalen Berechnungsmodell ermittelt. In allen Fällen wird von der Annahme ausgegangen, daß elastisches Beulen zu vermeiden ist, somit also plastisches Verhalten des Liners zuzulassen ist.

2.4.1 Berechnung der Ankerscherkräfte

Ausgehend von den parameterbehafteten Liner- und Anker-Charakteristiken, können die Ankerscherkräfte berechnet werden. Hierbei ist das bisherige Vorgehen recht unterschiedlich. Die maximale Differenzkraft zwischen einem ebenen und einem mit vorgegebener Anfangsbeulhöhe verformten benachbarten Feld wird nach dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm bestimmt. Sie wird dann über ein Streifenmodell auf die angrenzenden Anker (bis ca. 10 Stück) verteilt und ergibt so die endgültige relative Ankerverschiebung, die zusammen mit der aufgezwungenen Verformung durch den SBB die mittlere Gesamtdehnung des Beulfeldes ausmacht. Der Einfluß des Beulfeldes wird dabei sehr ungünstig eingesetzt, da in Wirklichkeit Anker- und Beulfeldverhalten gemeinsam die Differenzkraft bestimmen. Die Berechnungsverfahren unterscheiden sich vor allem in der Berücksichtigung der Nichtlinearitäten der Charakteristiken.

Die ersten Berechnungen erfolgten mit linearem Verhalten für Liner und Anker. Die Ergebnisse liegen entsprechend auf der sicheren Seite. Tan [6] berücksichtigt an einem ebenen Modell den Einfluß der Ankerverschweißung und des Betons mit Hilfe eines Finiten-

Element-Verfahrens. Der Liner wird dabei elastisch-plastisch, die Verankerung elastisch gerechnet. In den späteren Beiträgen wird wieder mit einem Streifenmodell gerechnet, wobei für den Liner ideal elastisch-plastisches, für die Anker nicht-lineares Verhalten angenommen werden kann. Die Querverteilung der Belastung wird dabei durch eine äquivalente Dehnung berücksichtigt. Doyle et al. [9] haben festgestellt, daß ein Anwachsen der Fließgrenze bedeutenden Einfluß auf die Ankerverschiebungen hat, dagegen 15 % Änderung der Linerdicke sich kaum auswirken.

2.4.2 Berechnung der Linerdehnungen und zum Beulproblem

Mit der Lösung des "sogenannten Beulproblems" ergeben sich die maximalen Linerdehnungen, die sich im Scheitel der Beule einstellen. Im allgemeinen findet die Beulhöhe wenig Beachtung, da man bei der Auswahl der Spannungs-Dehnungs-Diagramme bereits entsprechende Vorsorge treffen kann. So sollte nach Tan [6] für SBB-Liner ein Verlauf gewählt werden, bei dem der Spannungsabfall nach Überschreiten der Fließgrenze geringer ist und die Beule sich weniger stark entwickelt. Von Bishop et al. [5] werden für Druckstäbe dehnungsabhängige Beulhöhen angegeben. Young et al. [3] beschreiben eine sehr einfache Möglichkeit, wie sie auch bei Timoshenko [13], S. 174 ff, zu finden ist, mit der man bei gegebener mittlerer Gesamtdehnung genähert über einen geometrischen Ansatz die Beulhöhe bestimmen kann. Über einen vereinfachten Ansatz erhält man dann weiter die zusätzliche Biegedehnung. Bishop et al. [5] haben an Druckstäben festgestellt, daß der überwiegende Zuwachs zur Anfangsbeulhöhe erst nach Überschreiten der Fließgrenze eintritt und sich nahezu linear verhält. Damit läßt sich das Beulproblem vereinfacht auf eine geometrische Betrachtung reduzieren.

Das Beulproblem für Liner im elastischen Bereich wurde zuerst von Chan et al. [1] beschrieben. Dort ist für ein Ringmodell eine sehr einfache Beziehung für die Wahl maximaler Ankerabstände angegeben. Kicher et al. [11] und Kicher [12] haben die Betrachtung auf den Zylinder erweitert, und es werden Diagramme für die Wahl der Ankerabstände für beide Richtungen angegeben.

Abschließend ist festzustellen, daß einige wesentliche Fragen offen bleiben:

1. Es fehlen systematische Untersuchungen über das Zusammenwirken der Verankerung mit dem Beulfeld zur Bestimmung der Ankerscherkräfte und Linerdehnungen.
2. Die Randbedingungen des Berechnungsmodells werden sehr vereinfacht angenommen.
3. Das Zusammenwirken verschiedener Ankertypen ist nicht untersucht worden.
4. Durch das Berechnungsmodell bedingt, konnten nur Beulwellen angenommen werden, so daß die Beurteilung von Beulstellen bei zweidimensionaler Betrachtung ganz fehlt.
5. Untersuchungen für Störbereiche, z. B. Durchdringungen fehlen.
6. Schließlich ist das nichtlineare Werkstoffverhalten nicht ausreichend beachtet.

3. Theoretische Untersuchung der Linerdehnungen und Ankerverschiebungen

3.1 Voraussetzungen

Zur theoretischen Untersuchung der Linerdehnungen und Ankerverschiebungen bei nichtlinearen Werkstoffeigenschaften und nichtlinearen Ankerkennlinien sind einige Voraussetzungen zu machen, die insbesondere die Werkstoffeigenschaften und das Berechnungsmodell betreffen.

3.1.1 Berechnungsmodell

Die für die eindimensionale Berechnung getroffene Annahme der überwiegenden Membrankraftwirkung soll vereinfacht auch hier gelten. Daher bietet sich zur Berechnung ein Scheibenmodell an, das auch für den Linermantel mit seiner geringen Krümmung und Dicke in guter Näherung angenommen werden kann. Es erfolgt zur Berechnung stets nur eine Detailbetrachtung, deren Ziel in Abschnitt 2.1 beschrieben ist. Zur Bemessung wird ein Linerausschnitt gerechnet, der genügend groß ist und genügend viele Ankerelemente enthält. Symmetrien sind dabei möglichst zu nutzen. Eine gewisse Schwierigkeit bereiten die Randbedingungen. Die Belastung des Rechenmodells besteht zum einen aus den aufgezwungenen Verformungen, deren Verteilung beliebig sein kann, und den Kräften am Rande, die infolge des Ausschnittes nur im ungestörten Fall mit den Membrankräften übereinstimmen. Je nach Annahme der Werkstoffkennlinien kann man als Randlast die Fließspannung zugrunde legen bzw. eine dem zweiachsialen Spannungszustand äquivalente Spannung. Wird ein Beulfeld berücksichtigt, sind auf jeden Fall genügend viele Anker vorzusehen, damit der Einfluß des Beulfeldes bis zum Rand des Ausschnittes abklingen kann. Andernfalls ist die Randkraft zu groß und kann größere Linerdehnungen und Ankerverschiebungen ergeben, wenn der Einflußbereich des Beulfeldes größer ist als der Ausschnitt.

Doyle et al. [9] haben ca. 10 Anker vorgeschlagen, wobei dort nicht bemerkt ist, daß diese Entscheidung erheblich von der Ankersteifigkeit und der Nachbeultragfähigkeit abhängt. Hierzu werden später noch Ausführungen gemacht.

3.1.2 Kennlinien des Werkstoffes

Als Werkstoff kommt im allgemeinen ein Stahl mit großem Verformungsvermögen zur Anwendung, d. h. ein weicher Stahl mit großer Bruchdehnung. Ein solcher Stahl paßt sich am besten formschlüssigen Belastungen an und läßt sich weitgehend wirtschaftlich nutzen. In der Literatur ist eine große Zahl von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen für Druckstäbe zu finden, die teils theoretisch, teils experimentell begründet sind (s. [2] bis [6]). Es soll daher auch hier von den einachsialen Versuchsergebnissen ausgegangen werden, die für das wirkliche **zweiachsiale** Verhalten auf der sicheren Seite liegende Bemessungswerte liefern. Das Länge-Dicke-Verhältnis wird recht ungünstig angenommen.

Die aus einachsialen Druckversuchen gewonnenen Spannungs-Dehnungs-Diagramme werden zur Ermittlung der Vergleichsspannungen und Vergleichsdehnungen in die Berechnung eingeführt. Vereinfacht soll zunächst von isotropem Werkstoffverhalten ausgegangen werden, wobei im allgemeinen nur eine kurze Verfestigungsphase gegenüber einer ausgeprägten Instabilitätsphase des Werkstoffes vorliegt. Im Zusammenwirken mit der Verankerung und infolge der vorgegebenen Dehnungsbegrenzung aus der SBB-Belastung ergibt sich jedoch nur eine scheinbare Instabilität. Sie kann nicht wirklich auftreten. Insofern sind nur der Spannungsabfall und die damit verbundenen Kräfteumlagerungen von Interesse. Zur Berücksichtigung des Beulfeldes, wie es in Abschnitt 2.1 beschrieben ist, können gemäß den maximal zugelassenen Anfangsverformungen die entsprechenden Spannungs-Dehnungs-Diagramme bereichsweise angenommen werden. Dadurch wird es möglich, die Verschiebungen der angrenzenden Ankerelemente zu bestimmen, die durch das stark verminderte Tragvermögen des Beulfeldes zusätzlich belastet werden. Die maximale Linerdehnung ergibt sich durch eine vereinfachte Zusatzbetrachtung (s. hierzu Abschnitt 2.4.2).

3.1.3 Kennlinien der Verankerung

Der Liner wird durch Bolzen, Rippen und/oder Kühlrohre mit dem Beton schub- und zugfest verbunden. Sie sind auf den Liner geschweißt. Hierzu gibt es Kennlinien für unterschiedliche Ankertypen und -größen in Abhängigkeit der Linerdicke und der Betonqualität, sowie auch teilweise der Ankerabstände. Bei der Annahme einer kombinierten Ankeranordnung wird je Ankertyp die betreffende Kennlinie eingesetzt, um das Zusammenwirken verschiedener Ankertypen erfassen zu können.

3.1.4 Zum Beulproblem

Die Beulfigur und damit das Nachbeulverhalten für den Bemessungslastfall sind weitgehend durch die Konstruktion vorgegeben. Die Anordnung der Verankerung ist für die Beulfigur bestimmend und erzeugt in einem Fall Beulwellen, die sich über mehrere Linerfelder ausbreiten können, im anderen Fall Beulstellen, die lokal zwischen den Ankerelementen in einem Linerfeld entstehen. Wie bereits ausgeführt, kann elastisches Beulen durch geeignete Wahl des Länge-Dicke-Verhältnisses ausgeschlossen werden. Das Beulproblem reduziert sich auf die Bestimmung der größten Dehnung in der Beule und der möglichen Beulhöhe. Die zusätzliche Biegedehnung in der Beule wird bei der Begrenzung der Linerdehnung herangezogen. Die infolge aufgezwungener Dehnung und der weiteren Berechnungsannahmen sich einstellende mittlere Gesamtdehnung im Beulfeld gibt ein Maß dafür, wie stark die Anfangsbeule angewachsen ist. Man kann bei Anfangsverformungen annehmen, daß mit $\sigma_{Kr} \geqq \sigma_F$ zusätzliche plastische Biegung erst eintritt, wenn σ_F infolge Druckbeanspruchung erreicht ist, d. h. nur der plastische Anteil führt zur wesentlichen Vergrößerung der Anfangsbeule (s. Abschn. 2.4.2). Damit setzt sich die größte Dehnung in der Beule vereinfacht aus zwei Anteilen zusammen, nämlich einem kleinen elastischen infolge der Randbelastung und dem plastischen Biegeanteil, der sich aus der Beulhöhe durch einen vereinfachten Krümmungsansatz berechnen läßt (s. Young et al. [3]). Als ungünstigste Näherung kann man von einer dehnungslosen Verformung der Mittelfläche ausgehen, so daß sich sehr leicht aus dem geometrischen Zusammenhang die Beulhöhe bestimmen läßt.

Da auch die Form eines Platten-Beulfeldes durch einen analogen Ansatz beschrieben werden kann, erscheint es gerechtfertigt, zur Bestimmung der Beulhöhe und der zusätzlichen Biegedehnung vom Stabansatz auszugehen. Je nach Festlegung der Beulfigur sind ein bzw. zwei Krümmungsanteile zu berücksichtigen.

3.1.5 Berechnungsverfahren und Möglichkeiten des Rechenprogramms

Zur Berechnung der Linerdehnungen und Ankerverschiebungen wurde ein Rechenprogramm für Scheiben nach dem Verfahren der Dynamischen Relaxation entwickelt. Es handelt sich um ein Differenzenverfahren mit dynamischer Relaxation, das sich besonders bei dreidimensionalen Problemen bewährt hat und auch bei dynamischen Untersuchungen eingesetzt wird (s. [14] bis [16]). Mit diesem Verfahren lassen sich leicht nichtlineare Kennlinien erfassen. Durch Änderungen des Materialgesetzes können bereichsweise unterschiedliche Materialeigenschaften berücksichtigt werden. Zur Lösung mit nichtlinearem Werkstoffverhalten wird zunächst vereinfacht mit den finiten Gesetzen von Hencky gerechnet, da eine Belastungsgeschichte nicht anzunehmen ist. Als weiteres kommen hierfür die Prandtl-Reuss-Gesetze in Betracht, mit denen Nichtlinearitäten über eine stückweise Linearisierung ge-

nauer erfaßt werden können. Als Fließgesetz wird die v. Mises-Fließbedingung benutzt.

Für die speziellen Untersuchungen des Liners sind folgende Möglichkeiten im Programm vorgesehen:

a) Anordnung der Anker ist in beiden Richtungen beliebig und kann Ankertypen mit unterschiedlichen Kennlinien enthalten.

b) Die Ankerkennlinien können beliebig nichtlinear angenommen werden. Mit Hilfe eines Interpolationsprogrammes wird ein entsprechendes Ersatzpolynom bestimmt.

c) Das Werkstoffverhalten kann bereichsweise unterschiedlich angenommen werden. Damit können Beulstellen (Beulen zwischen Einzelankern) und Beulwellen (Beulen zwischen Ankerrippen) betrachtet werden. Als Grenzfall gilt, daß das Tragvermögen des Beulfeldes zu Null wird (Nullfeld).

d) Unterschiedliche Belchdicken können durch Veränderung des Materialgesetzes berücksichtigt werden. Dasgleiche gilt für unterschiedliche Fließgrenzen.

e) Temperaturbelastung mit beliebigen stationären Temperaturfeldern ist möglich.

f) Die Belastungsanordnung am Scheibenrand und im -innern ist beliebig. Sie umfaßt äußere Kräfte und Verformungen.

3.2 Ergebnisse einiger theoretischer Untersuchungen

3.2.1 Vorbemerkung

Zur sicheren und wirtschaftlichen Dimensionierung des Liners mit seinen Verankerungen werden die größten auftretenden Linerdehnungen und Ankerverschiebungen benötigt. Diese sind durch die Werkstoffeigenschaften nach oben begrenzt, woraus sich ein geeigneter Sicherheitsfaktor ableiten läßt.

Die gefundenen Ergebnisse können keinen vollständigen Beitrag zu der recht komplexen Problemstellung leisten. Entsprechend den getroffenen Annahmen gilt es, das bisher übliche Berechnungsmodell auf verschiedene Einflüsse hin kritisch zu untersuchen. Dabei erweist sich der angenäherte Lösungsweg über das Scheibenmodell als zweckmäßig, da hiermit der zweidimensionale Einfluß recht gut beschrieben werden kann. Die oben skizzierten Möglichkeiten des Rechenprogrammes führen zu einigen parametrischen Betrachtungen, die im folgenden mitgeteilt werden sollen. Als Vergleichskriterien werden die Ankerkräfte bzw. -verschiebungen am Beulfeldrand und die mittleren Linerdehnungen des Beulfeldes (ohne zusätzlichen Biegeanteil) herangezogen. (Alle Vergleichskurven sind zunächst für linear elastisches Werkstoffverhalten (s. Bild 1) aufgestellt und sollen die verschiedenen Einflüsse tendenzmäßig aufzeigen. Ebenso sind für die Anker vereinfachte Kurven angenommen. Für die Betondehnungen gilt konstanter Verlauf. Bis zur Tagung gemachte Fortschritte werden besonders mitgeteilt).

3.2.2 Vergleich mit linearen und nichtlinearen Ankerkennlinien

Berechnungsmodell nach Bild 2, Lastfall 1; Ergebnisse s. Bilder 4 und 5.
Es wird eine Bolzenreihe betrachtet, wobei das Beulfeld mit ca. 50 % bzw. 10 % Tragvermögen des Normalbereiches gerechnet wird. Grundsätzlich ergeben sich für nichtlineare Ankerkennlinien zwar kleinere Ankerkräfte am Beulfeldrand, jedoch sind die zugehörigen Ankerverschiebungen und Linerdehnungen teilweise erheblich größer. Das lineare Ankerverhalten bringt einen wesentlich steiferen Anteil in die Berechnung ein. Der Vergleich hängt

natürlich sehr stark davon ab, wie weit die nichtlineare Ankerkennlinie von der Geraden eingeschnitten ist. Es erscheint nicht richtig, von einem überwiegend linearen Ankerverhalten auszugehen und die Gerade angenähert als Anfangssteigung anzunehmen, wie es häufig mit Bettungsziffern gemacht wird. Besonders groß wird der Einfluß bei einem Beulfeld mit stark vermindertem Tragvermögen und sehr steifen Ankern.

3.2.3 Einfluß zunehmender Ankersteifigkeit

Berechnungsmodell nach Bild 3, Lastfall 1; Ergebnisse s. Bild 7.

Es wird mit Ankerrippen und dazwischenliegenden, relativ weichen Bolzen gerechnet. Das Beulfeld wird mit ca. 5 % Tragvermögen des Normalbereiches angenommen, die Ankerkennlinien sind nichtlinear. Mit steifer werdender Verankerung nehmen die Ankerkräfte am Beulfeldrand zu, die zugehörigen Ankerverschiebungen und Linerdehnungen werden dagegen kleiner. Weiterhin ist bei steiferen Verankerungen der Einflußbereich des Beulfeldes wesentlich kleiner, zur Berechnung genügen in solchen Fällen also wenige Ankerfelder. Bei großer Rippensteifigkeit werden die dazwischenliegenden Bolzen kaum belastet.

3.2.4 Vergleich von Beulwellen und Beulstellen

Berechnungsmodell nach Bild 2 und 3, Lastfall 2; Ergebnisse s. Bilder 6, 9 und 11.

Die angenommene Beulfigur bestimmt sehr stark die Größe der Ergebnisse. Für die Berechnung wird sie willkürlich festgelegt und repräsentiert nur die Lage und Größe des geschwächten Bereiches. Untersucht werden beide Rechenmodelle. Durch eine zweidimensionale Berechnung ist der äußerst günstige Einfluß von Beulstellen leicht zu erfassen. Ankerverschiebungen und Linerdehnungen werden bei einer Beulstelle, wie zu erwarten ist, erheblich kleiner und dürften daher bei einer entsprechenden konstruktiven Ausbildung zu einer wesentlich wirtschaftlicheren Lösung beitragen.

3.2.5 Einfluß abnehmender Nachbeultragfähigkeit

Berechnungsmodell nach Bild 3, Lastfall 1; Ergebnisse s. Bild 8.

Das Beulfeld ist in Stufen von ca. 50 % bis ca. 5 % Tragvermögen des Normalbereiches gerechnet worden. Die Ankersteifigkeit der Rippen wird dabei nicht geändert. Es liegt nahe, daß die Ergebnisse bei sonst gleichen äußeren Bedingungen stark voneinander abweichen müssen. Mit dem nahezu auf Null abgeminderten Tragvermögen des Beulfeldes ergeben sich die maximalen Werte, die zur Dimensionierung sicherlich zu ungünstig ausfallen. Es wird daher von entscheidender Bedeutung für die Bemessung sein, in welcher Größe Anfangsverformungen und sonstige Imperfektionen eines Beulfeldes anzunehmen sind, d. h. auch welche Anforderungen an die praktische Ausführung zu stellen sind, um bei dem sehr hohen Sicherheitsbedürfnis noch wirtschaftliche Lösungen zu erhalten.

3.2.6 Verlauf der Linerdehnungen

Allen Bildern 4 bis 9 ist zu entnehmen, daß die Linerdehnungen, ausgehend vom Betrag der aufgeprägten Dehnungen, bis zum Beulfeld leicht abfallend verlaufen und im Beulfeld ihren Größtwert annehmen. Bei guter Erfüllung der Kräfterandbedingungen stimmen die Linerdehnungen und aufgeprägten Dehnungen am Rand des Rechenmodells überein. Gleichzeitig sollen dort auch die Ankerkräfte zu Null werden.

3.2.7 Einfluß der Querbeanspruchung

Ergebnisse s. Bilder 9 und 11.

Die zweiachsige Beanspruchung der Rechenmodelle nach den Bildern 3 und 11 wurde mit einer äquivalenten einachsigen Beanspruchung verglichen, wie praktisch in den meisten Fällen am Streifenmodell gerechnet wird. Dabei zeigten sich nur geringfügige Änderungen der entsprechenden Ergebnisse. Die Größtwerte sind nahezu gleich, jedoch weichen die einzelnen Verläufe innerhalb des Einflußbereichs voneinander ab. Ein unmittelbarer Vergleich mit dem Streifenmodell ist nicht möglich, da lediglich die Belastungswerte umgerechnet wurden, die Scheibenwirkung jedoch beibehalten wurde.

3.3 Diskussion der Ergebnisse

Bei geeigneten Berechnungsgrundlagen, die versuchstechnisch ausreichend begründet sein müssen, ist das Scheibenmodell zur theoretischen Untersuchung von Linerverformungen und Ankerverschiebungen unter besonderer Berücksichtigung der Nichtlinearitäten brauchbar. Ausgehend von einem hypothetischen Bemessungslastfall resultieren die erforderlichen Größtwerte zur Dimensionierung. Gemäß der Aufgabenstellung bleibt die Berechnung parameterbehaftet. Die skizzierten Ergebnisse sollen nur grundsätzliche Einflüsse unter Beachtung der Nichtlinearität von Werkstoff und Ankern aufzeigen.

Unbefriedigend bleibt noch das Ergebnis der Beulhöhenberechnung und damit der maximalen Linerdehnung, da diese Werte zu sehr auf der sicheren Seite bestimmt sind. Hierzu wäre eine besondere Untersuchung notwendig. Es hat sich gezeigt, daß die gegenseitigen Einflüsse von Ankerverhalten, Beulfigur und Nachbeultragvermögen auf die endgültigen Verformungen der Anker und des Liners von vielen Parametern abhängen. Ziel dieses Beitrages war es, hier einige Probleme lösen zu helfen.

Literatur

[1] CHAN, H. C. and McMINN, S. J., "The stabilisation of the steel liner of a prestressed concrete pressure vessel", Nucl. Eng. Design, Vol. 3, Jan. 1966, pp.66 - 73

[2] HARDINGHAM, R. P., PARKER, J. V., SPRUCE, T. W., "Liner design an development for the Oldbury vessels", Prestressed concrete pressure vessels, Inst. of Civ. Eng., London 1968, Paper J 56

[3] YOUNG, A. G., TATE, L. A., "Design of liners for reactor vessels", Prestressed concrete pressure vessels, Inst. of Civ. Eng., London 1968, Paper J 57

[4] CHAPMAN, J. C., CARTER, A., "Interaction between a pressure vessel and its liner", Prestressed concrete pressure vessels, Inst. of Civ. Eng., London 1968, Paper J 58

[5] BISHOP, R. F., HORSEMANN, R. W., WHITE, C. M., "Liner design and construction", Prestressed concrete pressure vessels, Inst. of Civ. Eng., London 1968, Paper J 59

[6] TAN, C. P., "A study of the design and construction practices of prestressed concrete and reinforced concrete containment vessels", Techn. Report NO. TID-25176, August 1969

[7] PARKER, J. V., "Stress analysis of liners for prestressed concrete pressure vessels", Proc. First Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT), Berlin 1971, Paper H 6/1

[8] YANG, T. Y., "A matrix displacement method on pre- and post-buckling analysis of liners for reactor vessels", Proc. First Int. Conf. on SMiRT, Berlin 71, Paper H 6/2

[9] DOYLE, J. M., CHU, S. L., "Liner plate buckling and behaviour of stud and rib type anchors", Proc. First Int. Conf. on SMiRT, Berlin 1971, Paper H 6/3

[10] WHITE, C. M., ALBRECHT, W., "Basis of design of liners for prestressed concrete pressure vessels, and practical examples of the application of the design basis", Proc. First Int. Conf. on SMiRT, Berlin 1971, Paper H 6/8

[11] KICHER, T. P., ESSELMAN, T. C., GRATZINGER, R. J., "Thermal buckling of stud-supported liner shells", Prepr. 2nd Int. Conf. on SMiRT, Berlin 1973, Paper H 5/2*

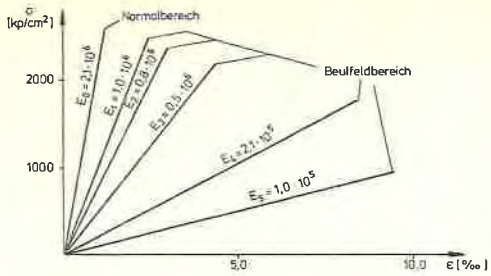
[12] KICHER, T. P., "Buckling of a stud-supported thin cylindrical liner shell encased in concrete", Nucl. Eng. Design, Vol. 26, 1974, pp. 250 - 262

[13] TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. M., "Theory of Elastic Stability", McGraw-Hill Book Comp., Inc., New York, 1961

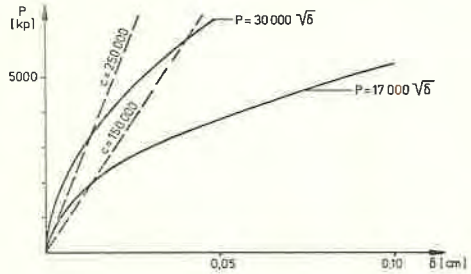
[14] SCHNELLENBACH, G., "Beitrag zur numerischen Berechnung des räumlichen Spannungszustandes in Hohlzylindern mit Ausschnitten", Diss., Bochum 1969

[15] HANSSON, V., "Zur praktischen Berechnung von Scheiben mit beliebiger Geometrie und allgemeinem Materialgesetz", Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Berichte Heft 14

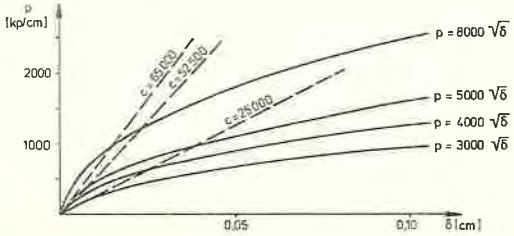
[16] STANGENBERG, F., "Berechnung von Stahlbetonbauteilen für dynamische Beanspruchungen bis zur Tragfähigkeitsgrenze", Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Berichte Heft 16



Spannungs-Dehnungs-Diagramme für den Liner



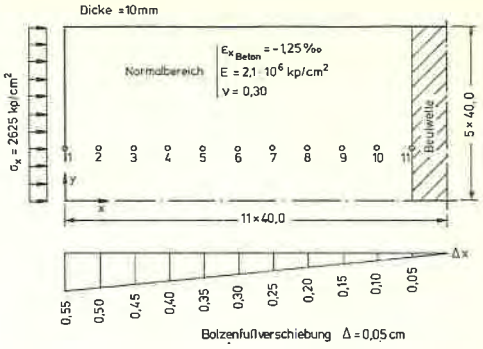
Kraft-Verformungs-Diagramme für Bolzen



Kraft-Verformungs-Diagramme für Rippen

Bild 1 Spannungs-Dehnungs-Diagramme für den Liner Kraft-Verformungs-Diagramme für Bolzen und Rippen

Rechenmodell ①, Lastfall ①



Rechenmodell ①, Lastfall ②

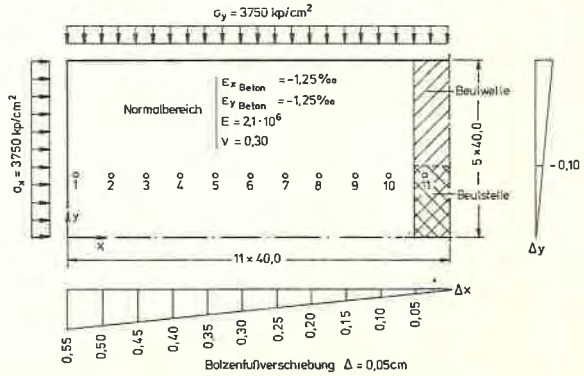


Bild 2 Rechenmodell 1 mit Lastfallangaben

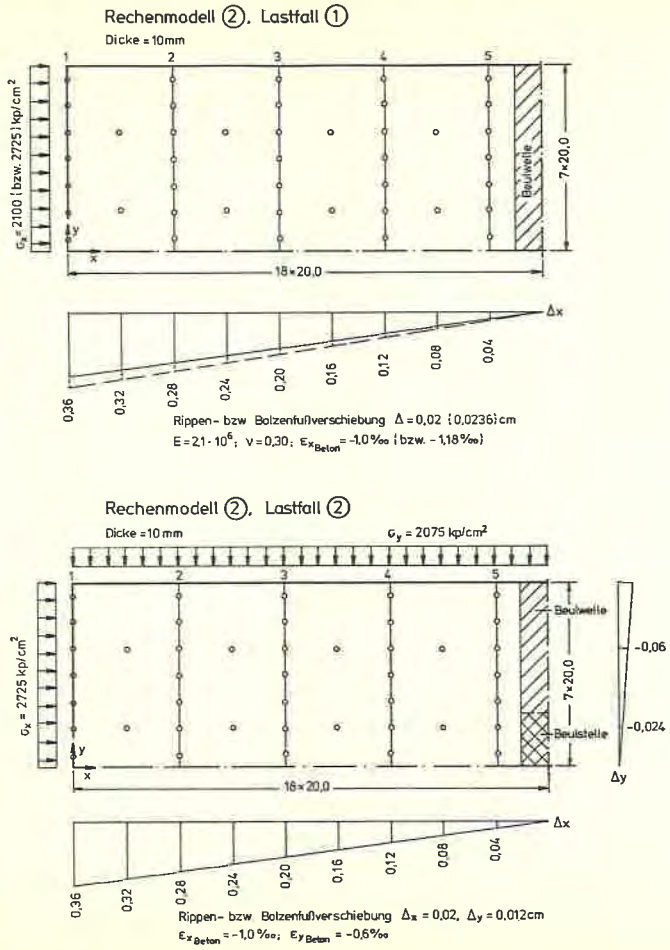
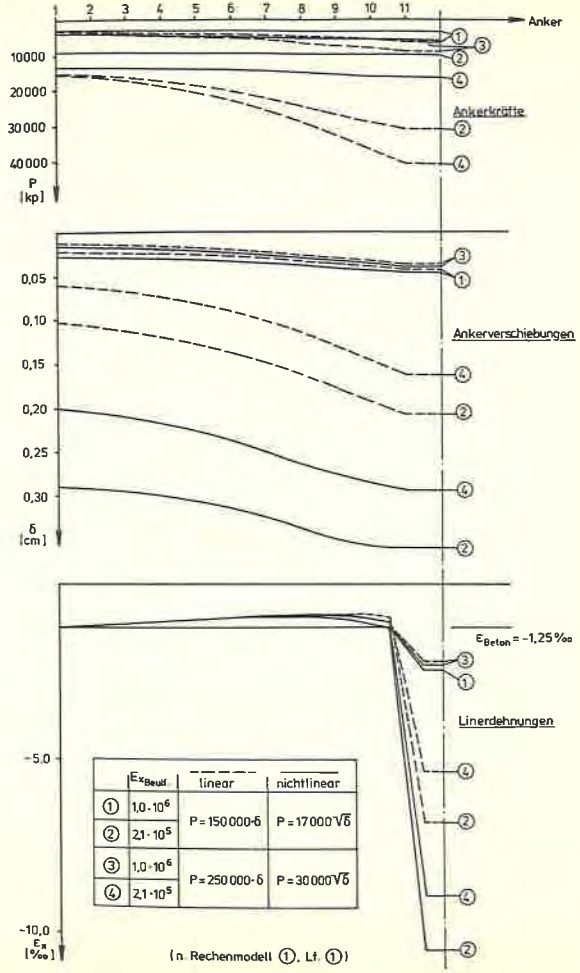


Bild 3 Rechenmodell 2 mit Lastfallangaben



	$E_{x_{Beul.}}$	linear	nichtlinear
①	$1,0 \cdot 10^6$	P = 150000·δ	P = 17000·√δ
②	$2,1 \cdot 10^5$		
③	$1,0 \cdot 10^6$	P = 250000·δ	P = 30000·√δ
④	$2,1 \cdot 10^5$		

Bild 4

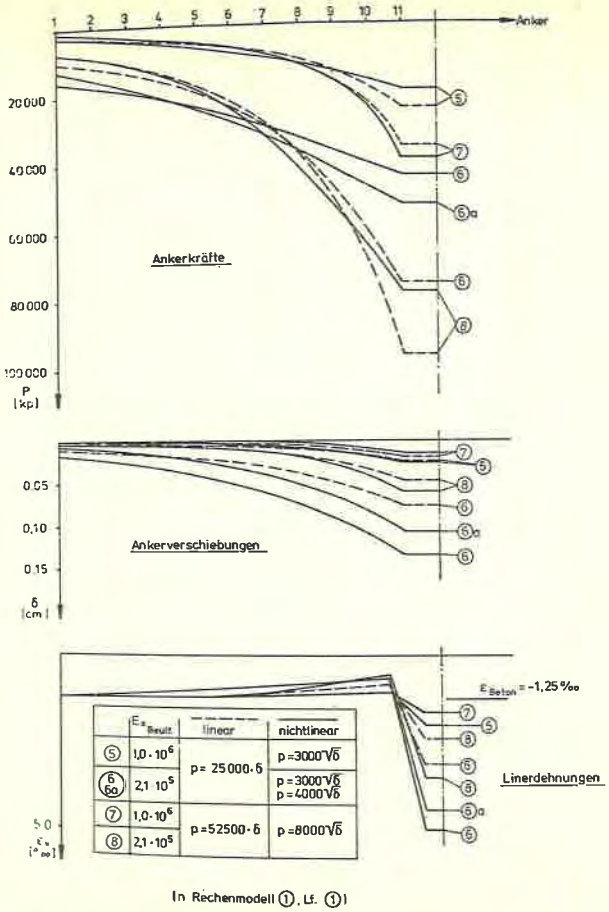


Bild 5 Vergleich mit linearen und nichtlinearen Ankerkennlinien

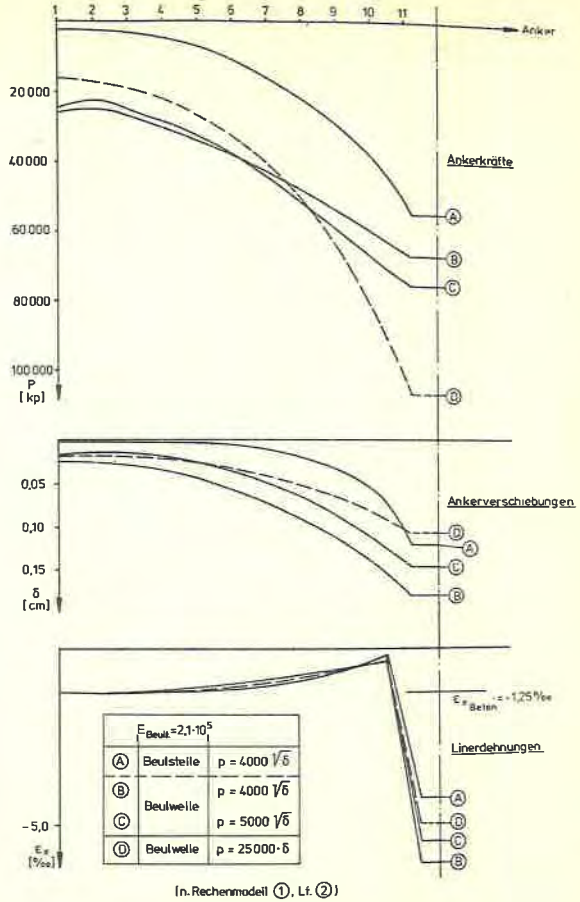


Bild 6 Vergleich Beulstelle/Beulwelle mit linearen/nichtlinearen Ankerkennlinien

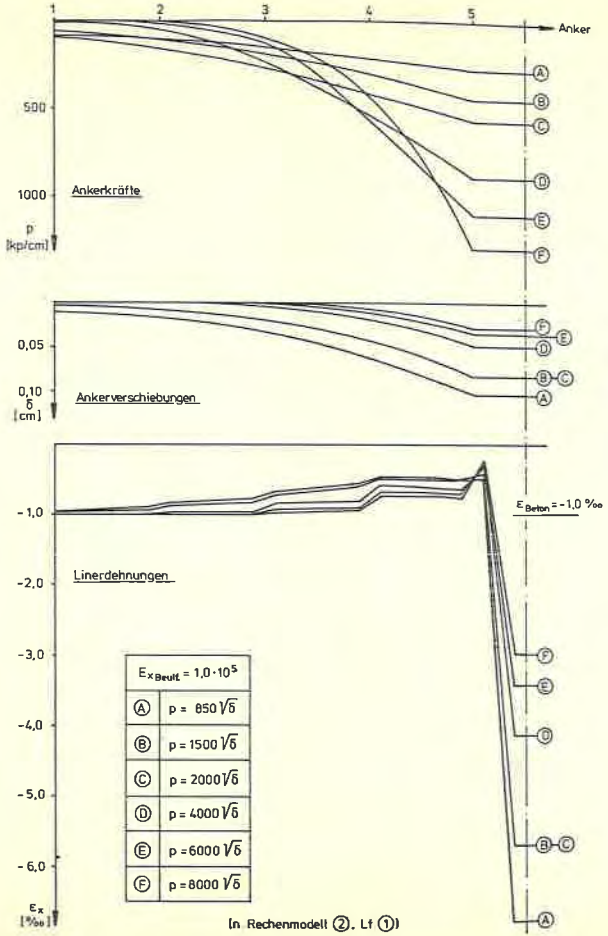


Bild 7 Einfluß zunehmender Ankersteifigkeit

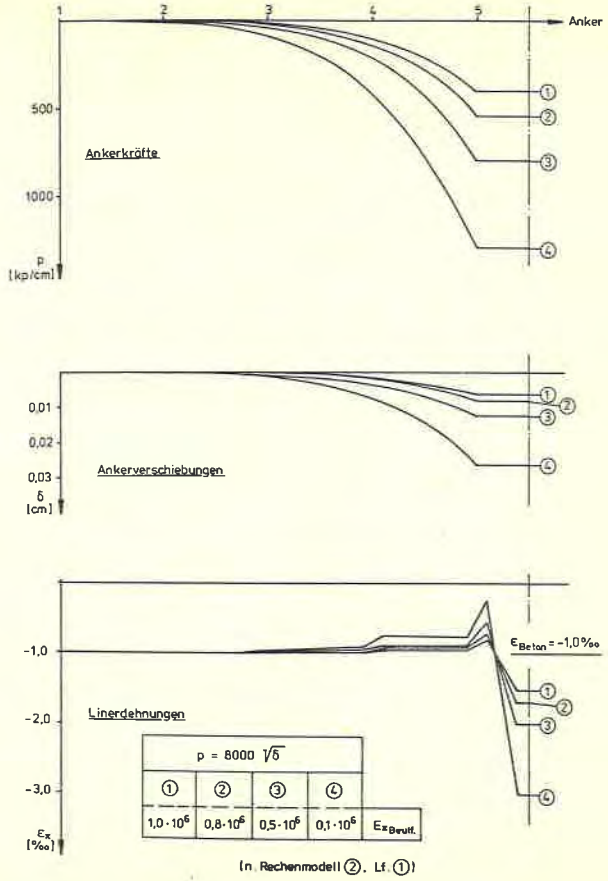


Bild 8 Einfluß abnehmender Nachbeultragfähigkeit

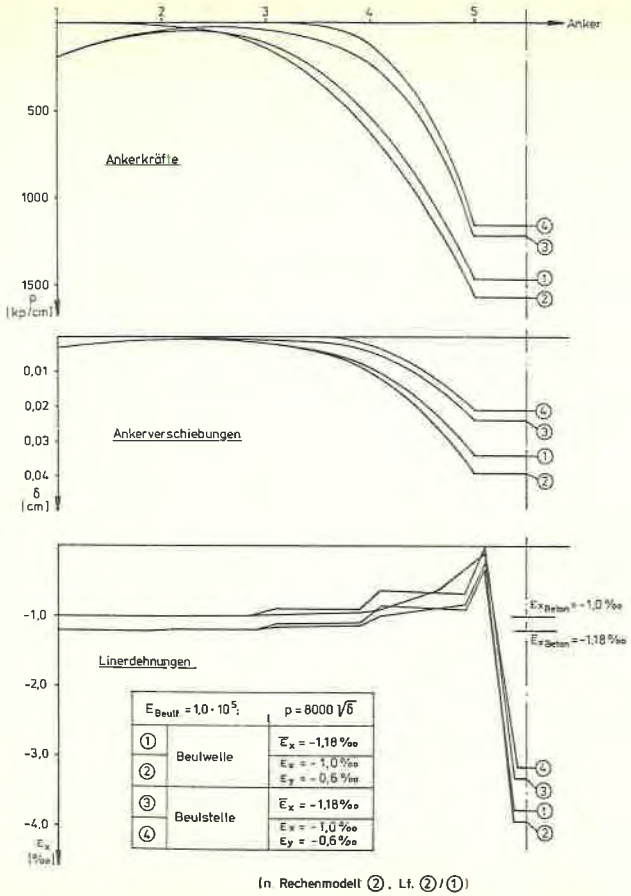


Bild 9 Vergleich Beulstelle/Beulwelle unter dem Einfluß von ein- und zweiachsiger Beanspruchung

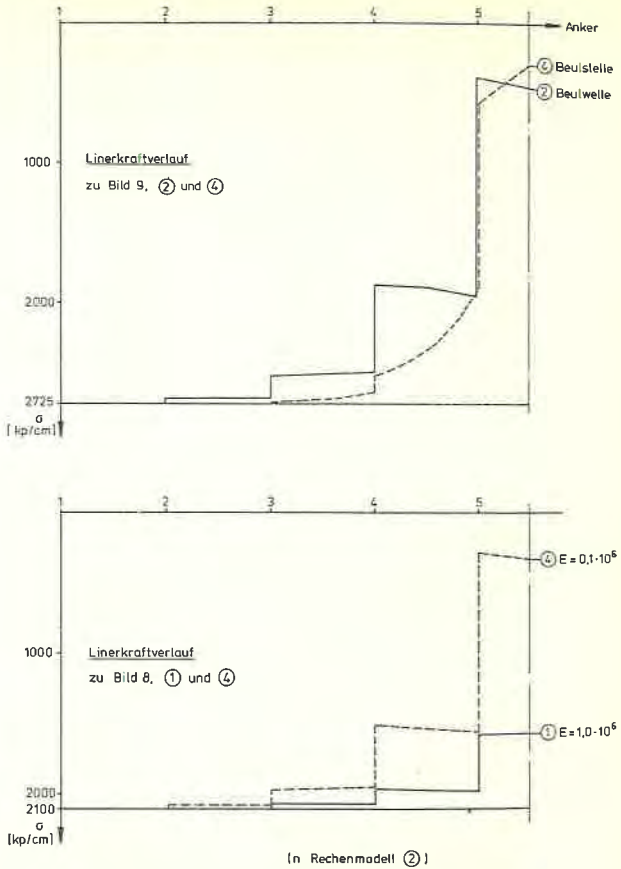
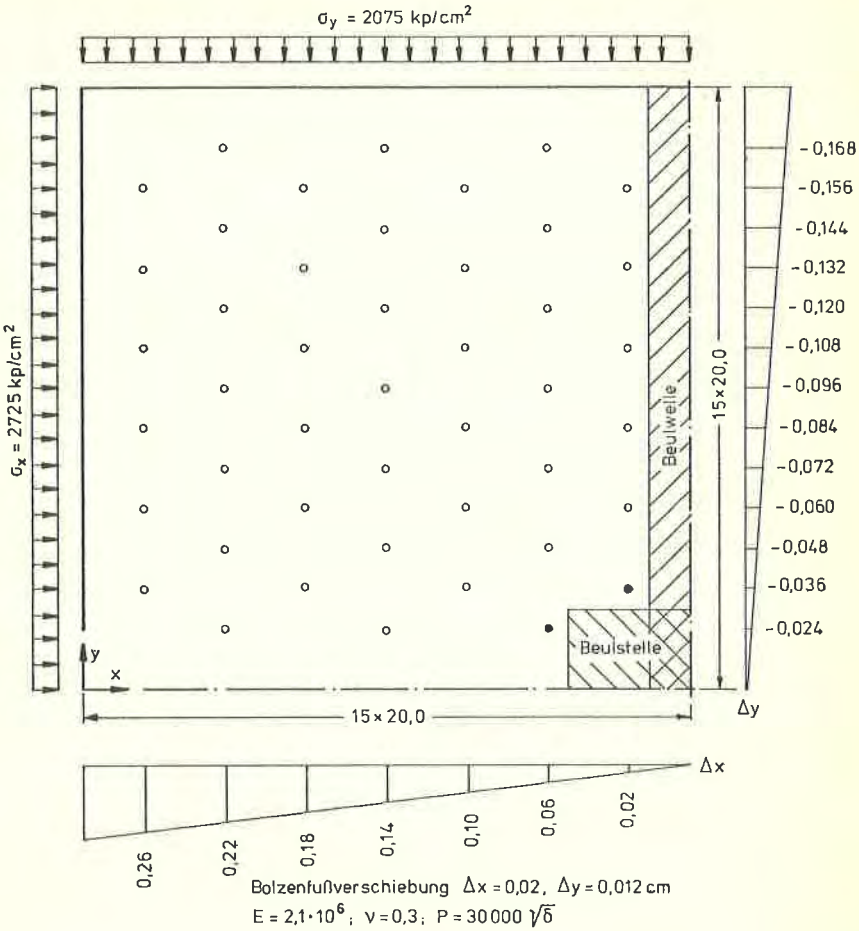


Bild 10 Linerkraftverlauf zu den Bildern 8 und 9

Rechenmodell ③



Bolzenfußverschiebung $\Delta x = 0{,}02$, $\Delta y = 0{,}012$ cm

$E = 2{,}1 \cdot 10^6$; $\nu = 0{,}3$; $P = 30000\sqrt{\delta}$

Lastfall ①: $\varepsilon_{x_{Beton}} = -1{,}0$ ‰; $\varepsilon_{y_{Beton}} = -0{,}6$ ‰; Lastfall ②: $\bar{\varepsilon}_{x_{Beton}} = -1{,}18$ ‰

Lastfall	Beulfeld	max. P	max. δ	max. ε_x / ε_y
①	Beulwelle $E = 2{,}1 \cdot 10^5$	10.009	0,111	-6,97 / -0,42
②		9.973	0,111	-7,14 / -0,68
①	Beulstelle $E = 2{,}1 \cdot 10^5$	7.200	0,060	-2,68 / -2,23
②		7.177	0,060	-2,81 / -1,03

Bild 11 Rechenmodell 3 mit Lastfallangaben
Vergleich Beulstelle/Beulwelle unter dem Einfluß von ein- und zweiachsiger Beanspruchung