

DESIGN OF STEEL-LINERS AND THEIR ANCHORAGE WITH REGARD TO NON-LINEAR BEHAVIOUR OF LINER-MATERIAL AND ANCHORAGE

R. OBERPICHLER

*Ingenieurbüro Prof. Zerna — Dr. Schnellenbach,
Viktoriastrasse 45, D-4630 Bochum 2, Germany*

Summary

The thin steel liner attached by studs or rib-type anchors to the interior wall of a Prestressed Concrete Reactor Pressure Vessel (PCRV) or a Concrete Containment Vessel (PCCV) has to provide the leak-tightness of the vessel. The liner also may serve as internal shuttering for placing concrete as well as a support for the cooling system or thermal isolation. Mainly strained by self-limited loads imposed on the liner by deformations of the vessel-wall or by heatup inside the vessel the liner predominantly will function in a compressive biaxially strained state like a membrane.

The vessel-wall is assumed to be a rigid boundary without reactions caused by the liner-anchor-restraints. Furthermore it is assumed that the liner supported in a close-spaced pattern to the concrete with respect to self-limited loads and all effects of non-linear behaviour of liner-material and non-linear anchor-characteristics will not fail by instability, especially not by an effect of snapthrough. Only one essential mode of failure, the shear connector failure is assumed to be basis for all liner investigations.

Design of the liner and its anchorage therefore is based on the analysis of large deformations with regard to elastic-plastic behaviour of liner-material and non-linear anchor characteristics. By this method both economical and safe sizing and spacing of the anchors can be calculated.

Under design accident conditions initial deformed panels, with the least load carrying capacity, are completely bounded by undeformed panels, with the highest load carrying capacity. Load differences between those panels stress the anchorage according to the non-linear distribution of restraints and to the arrangement of anchorage, e.g. like honeycombed or diamond or rhomb shaped pattern. Dependent on the chosen pattern initial deformed panels as single panels (Beulfelder) or a discontinuous sequence of panels (Beulfeldketten) or a continuous sequence (Beulwelle) need to be investigated in order to design the anchorage.

Because of the membrane state of the liner the analysis is based on a plane stress modell. Initial deformed panels are considered as plane panels with lower flexibility equivalent to nonlinear fictitious behaviour of liner-material. This fact combined with elasticplastic behaviour of liner-material and non-linear anchor-characteristics gives possibility to calculate the complete liner-anchor-system in one run.

Calculations are performed by the dynamic relaxation method using finite differences.

In this paper many parameter-studies are discussed. Effects of various anchor-arrangements, anchor- and liner-stiffnesses, load intensities, especially heatup of the liner are analysed. From all of these parameters initial deformed panels are the most important one. Furthermore it is shown that sometimes anchor-design only depends on the state of plasticity of the liner-material and not on the strainmaximum of the vessel-wall. In many cases crossover from elastic to plastic behaviour of the liner-material results in final anchor-loads. The diamond shaped pattern is one of the most economical and safe solutions for stud supported liners. Failure of one anchor not always includes the failure of further anchors like a chainreaction. Finally the effect of zero-capacity of an initial deformed panel is discussed on liner design.

1. Einleitung

Reaktordruckbehälter oder Sicherheitsumschließungen aus Spann- bzw. Stahlbeton werden mit einem dünnen Stahl-Liner auf ihrer Innenseite abgedichtet. Dadurch können solche Behälter flüssigkeits- und gasdicht hergestellt werden, was aus sicherheitstechnischen Gründen für den Betrieb von Kernkraftwerken sehr bedeutend ist. Der Stahl-Liner muß daher über die gesamte Lebensdauer eines KKW hinweg allen denkbaren Belastungen standhalten, wozu eine sehr sorgfältige, in erster Linie die sichere *Dichtheit* betreffende Auslegung erforderlich ist.

Aufgaben und Tragverhalten des Liners sind bereits an vielen Stellen der Literatur beschrieben (vgl. /1/ bis /11/). Der Liner ist kein selbständiges Bauteil. Er ist wie eine Membran durch elastische Anker mit dem Betonbauwerk schub- und zugfest verbunden. Seine Belastung setzt sich überwiegend aus Zwängungen zusammen, die einmal durch die Betonrandverformungen bestimmt werden, zum anderen wegen der starren Betonumhüllung infolge unterschiedlicher Temperaturzustände im Innern des Behälters entstehen. Sie werden als Formschlußlasten bezeichnet und den Sekundär-lasten zugeordnet. Unterschiedlich große Zwängungen im Linerblech, die infolge vorhandener Imperfektionen wie Anfangsformabweichungen, Toleranzen von Blechdicke und Streckgrenze, sowie Dehnungsgradienten und instationäre Temperaturfelder entstehen, müssen von den Ankern aufgenommen werden können. Zusätzlich sind auch Primär-lasten denkbar, z.B. Drücke hinter dem Liner oder den Liner absaugende Wirkungen durch Evakuieren im Innern des Behälters.

Wegen der elastisch nachgiebigen Verankerung des Stahl-Liners kann im allgemeinen Stabilitätsversagen ausgeschlossen werden. In den ebenen Linerbereichen wie Deckel und Boden können durch geeignete Ankeranordnung mögliche Beulmuster so gewählt werden, daß ihre kritische Dehnung oberhalb der Fließgrenze liegt. Im zylindrischen Teil dagegen ist bei idealer Geometrie jedes Linerfeld unbegrenzt stabil, solange Zwängungen in der Linerebene wirken. Bei zusätzlich auftretenden kraftschlüssigen Querbelastungen sind erweiterte Untersuchungen notwendig. Das in /5/ bis /8/ untersuchte Nachbeulverhalten nach stabilitätstheoretischen Grundsätzen mit dem Ziel, Durchschlageffekte nachzuweisen, geht von Randbedingungen aus, die wegen ihrer kraftabhängigen Nachgiebigkeit allenfalls zu einem behinderten Durchschlagen führen können.

Das Versagen der Liner-Ankerkonstruktion ist daher mehr vom Verformungsverhalten sowie Tragverhalten der Anker abhängig, die zur Aufnahme der o.g. Zwängungsdifferenzen im Linerblech aktiviert werden. Betonversagen im Ankerbereich bzw. Abscheren der Anker selbst sind somit die wesentlichen Versagensmerkmale für die Auslegung der Liner-Ankerkonstruktion. Sie sind daher gegen jede Überbeanspruchung der genannten Art auszulegen, was durch einen entsprechenden Sicherheitsabstand zur Bruchverformung geschieht. Damit Ankerversagen, sollte es dennoch auftreten, nicht gleich unmittelbar den Liner in seiner Funktion als Abdichtung betrifft, ist ein geeignetes Dickenverhältnis von Anker zu Liner zu wählen. In /4/ wird hierfür ein Wert *bis* ca. 2.7 empfohlen.

Zur Ermittlung der maximalen Ankerbeanspruchung geht man davon aus, daß zwischen zwei Linerfeldern größte Zwängungsdifferenzen auftreten. Hierfür sind die Anker zu dimensionieren. Können dabei auch Anfangsformabweichungen im Liner anwachsen, sind für den Liner der maximale Verformungszuwachs sowie die zugehörigen größten Biegedehnungen nachzuweisen.

2. Berechnung der Liner-Ankerkonstruktion

Im Gegensatz zu vielen bisher bekannten Beiträgen zur Berechnung der Liner-Ankerkonstruktion (vgl. /2/ bis /4/), die im allgemeinen von einem eindimensionalen Modell ausgehen und die Einflüsse der Zwängungsdifferenzen nur sehr unvollständig untersuchen, wird nachfolgend ein Verfahren zur Verformungsuntersuchung des Liners als Flächentragwerk vorgestellt. Das Berechnungsmodell ist zweidimensional und wird wegen der überwiegend membranartigen Beanspruchung des Liners für den ebenen Spannungszustand betrachtet. Am zweidimensionalen Modell ist es möglich, viele sonst konservativ betrachtete Einflüsse genauer und differenzierter zu untersuchen. Insbesondere sind wegen der maßgebenden Beanspruchung infolge Zwängungen für den Liner und die Anker große Verformungen zu berücksichtigen, zu deren Ermittlung nachfolgend nichtlineares Liner- und Ankerverhalten erfaßt werden.

2.1 Nichtlineares Linerverhalten

In zweifacher Hinsicht wird das Linerverhalten durch nichtlineare Ansätze berücksichtigt. Für alle nicht vorverformten Linerfelder wird elastisch-idealplastisches Werkstoffverhalten angenommen, so daß Zwängungsumlagerungen insbesondere im überelastischen Werkstoffbereich, der infolge der relativ großen Erwärmung des Liners in den meisten Fällen erreicht wird, dem wirklichen Verhalten entsprechend berechnet werden. Größere Linerdehnungen sind zwangsläufig die Folge, wenn z.B. bei einem Nahtstoß zwei Linerbleche mit unterschiedlichen Werkstoffkennwerten zusammentreffen.

Als weitere Nichtlinearität wird in die Berechnung der Liner-Ankerkonstruktion die Nachgiebigkeit vorverformter Linerfelder eingeführt. Hierzu wird ein fiktives Werkstoffverhalten angenommen, das die Größe der Anfangsformabweichung sowie die Schlankheit des verformten Linerfeldes als Parameter enthält. Es wird als mittleres Verhalten für das gesamte vorverformte Linerfeld zu Grunde gelegt. Der Grundgedanke dieses Vorgehens ist, ein vorverformtes Linerfeld mit seinem geringeren Tragvermögen wie ein nicht vorverformtes, also ebenes Linerfeld mit vermindertem Werkstoffverhalten zu behandeln, mit dem Ziel, den Einfluß des vorverformten Linerfeldes auf die Ankerkräfte und -verschiebungen zu untersuchen. Dieses Vorgehen hat sich als sehr handlich und effektiv erwiesen, da es auf relativ einfache und wirtschaftliche Weise ermöglicht, das komplexe Liner- Ankerverhalten unter Berücksichtigung elasto-plastischer Einflüsse zu betrachten.

Das fiktive Werkstoffverhalten für ein vorverformtes Linerfeld wird vereinfacht am sinusförmig vorverformten Druckstab nach Theorie II. Ordnung ermittelt. Dabei wird auch nach dem Überschreiten des Traglastmaximums ein zur Anfangsformabweichung affiner Verlauf der Verformung angenommen. Lediglich das Gleichgewicht wird dann mit vollplastiziertem Querschnitt berechnet. Vgl. hierzu Prinzipskizze Bild 1. Ein Vergleich mit Versuchsergebnissen aus /2/ zeigt gute Übereinstimmung mit den so gewonnenen Last-Verschiebungskurven vorverformter Linerfelder.

2.2 Nichtlineares Ankerverhalten

Als Anker werden häufig Kopfbolzendübel oder Profilstähle verwendet. Ihr Tragvermögen auf Abscheren im einbetonierten Zustand ist im wesentlichen abhängig vom Typ des Ankers, der Stahl- sowie Betonfestigkeit. Zugehörige Last-Verschiebungsdiagramme sind wegen des komplexen Spannungszustandes nur in Versuchen zu gewinnen. Entsprechende Ergebnisse sind in zahlreichen Literaturstellen (u.a. /11/) zu finden, wobei hier gegenüber dem üblichen Verbundbau

darauf zu achten ist, daß die relativ große Biegnachgiebigkeit des Liners in den Versuchen berücksichtigt wird. (Vgl. hierzu Bild 2).

2.3 Berechnungsmodelle zur Auslegung der Liner-Ankerkonstruktion

Wie bereits oben erwähnt, wird der Berechnung der Liner-Ankerkonstruktion das Scheibenmodell zugrunde gelegt. Die Grundlagen hierfür sind in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschrieben. Die Verwendung des zweidimensionalen Berechnungsmodells ermöglicht beliebige Ankeranordnungen. So ist die Ankeranordnung von Bolzen in Wabenform, als Karo oder Raute denkbar, wobei ggf. Zusatzbolzen zur ergänzenden Aussteifung angeordnet werden können (vgl. Bild 5). Bei den Profilstählen ist man in der Anordnung entsprechend eingeschränkt.

Gemäß einer gewählten Ankeranordnung sind die zur Auslegung notwendigen Annahmen hypothetischer Anfangsformabweichungen in geeigneter Weise in die Berechnung einzuführen. Erst die zweidimensionale Betrachtungsweise ermöglicht hier eine stärkere Differenzierung. Die dem eindimensionalen Berechnungsmodell anhaftende "Beulwelle" als die ungünstigste Form der Anfangsformabweichung gilt auch hier als die ungünstigste Annahme.

Neben der "Beulwelle" sind jedoch noch folgende Auslegungsmodelle denkbar: eine mit "Störbolzen" unterbrochene Beulwelle als "Beulwellkette", eine bei rautenförmiger Ankeranordnung anzunehmende "Beulfeldkette" sowie ein einzelnes "Beulfeld" (vgl. hierzu Bild 3).

Das zweidimensionale Berechnungsmodell kann somit in sehr einfacher Weise die wirtschaftlichen Vorteile einer steiferen Ankeranordnung berücksichtigen, ohne dabei die Anforderungen an eine sichere Lösung zu verletzen.

2.4 Berechnungsverfahren

Als Berechnungsverfahren wird das Verfahren der sogenannten Dynamischen Relaxation mit finiten Differenzen verwendet, das sich als sehr flexibel und effektiv bei der Lösung derartiger komplexer nichtlinearer Probleme erwiesen hat, vor allem auch bei parametrischen Untersuchungen verschiedenartiger Einflüsse.

3. Einige Ergebnisse von parametrischen Untersuchungen

Den nachfolgenden Parameteruntersuchungen sind beispielhaft einige Annahmen zugrunde gelegt, wie sie auch in der Praxis vorkommen können. Das Ankertragverhalten wird hier nach Bild 2 berücksichtigt, Linderdicken werden zwischen $t = 8$ und 12 mm angenommen. Die zugehörigen fiktiven Spannungs-Dehnungslinien sind in Bild 4 dargestellt.

Für die Untersuchung werden 4 Parametergruppen unterschieden. Sie betreffen die Ankeranordnung (vgl. Bild 5), die Werkstoffwahl des Liners (vgl. Bild 6), Imperfektionen (vgl. Bilder 7 + 8) sowie Belastungsannahmen (vgl. Bilder 9 bis 11).

Die Ergebnisse können nur einen Einblick in die Vielzahl der verschiedenartigen Einflüsse geben. Sie zeigen jedoch im Einzelfall Tendenzen auf, deren Bedeutung schon bei der Planung und insbesondere dann bei der Auslegung nach sicherheitstechnischen sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten beachtet werden sollte.

Die Auswirkungen des nichtlinearen Verhaltens von Liner und Verankerung werden in allen Ergebnissen deutlich sichtbar. Ihre Berücksichtigung ermöglicht bei der vorwiegend verformungsbegrenzenden Tragwirkung der Liner-Ankerkonstruktion eine bessere Anpassung an das wirkliche Tragverhalten und somit eine bessere Abschätzung der vorhandenen Sicherheit.

4. Literatur

- /1/ TAN, C.P., "A Study of the Design and Construction Practises of Prestressed Concrete and Reinforced Concrete Containment Vessels", Tech. Report No. TID-25176, Aug. 1969
- /2/ "Prestressed Concrete Pressure Vessels", Pap. J 56 - J 58, Inst. of Civ. Eng., London 1969
- /3/ CHAN, H.C., McMINN, S.J., "The Stabilisation of the Steel Liner of a Prestressed Concrete Pressure Vessel", Nucl. Eng. Design, Vol. 3, 1966, pp. 66 - 73
- /4/ DOYLE, J.M., CHU, S.L., "Liner Plate Buckling and Behaviour of Stud and Rib Type Anchors", Proc. 1st Int. Conf. on Smirt, Berlin 1971, Paper H 6/3
- /5/ KICHER, T.P., et al., "Thermal Buckling of Stud Supported Liner Shells", Preprint 2nd Int. Conf. on Smirt, Berlin 1973, Paper H 5/2*
- /6/ ESSELMAN, T.C., "Buckling of a Point Supported Liner Shell Inside a Concrete Containment", Ph. D. Thesis, Case Western Reserve University, June 1973
- /7/ KICHER, T.P., "Buckling of a Stud Supported Thin Cylindrical Liner Shell Encased in Concrete", Nucl. Eng. Design, Vol. 26, 1974, pp. 250 - 262
- /8/ MOON, Y.I., KICHER, T.P., "The Plastic Buckling of a Steel Liner Encased in a Concrete Cylinder", Nucl. Eng. Design, Vol. 41, 1977, pp. 281 - 291
- /9/ WINSTEAD, T.L., et al., "Liner Anchorage Analysis for Nuclear Containments", J. of the Struct.Div. of the American Soc. of Civ. Eng., Vol. 101, Oct. 1975, pp. 2103-2116
- /10/ OBERPICHLER, R., et al., "Stress Analysis of Liners for Prestressed Concrete Reactor Pressure Vessels with Regard to Nonlinear Behaviour of Liner Material and of Anchor Characteristics", Trans. of the 3rd Int. Conf. on Smirt, London 1975, Paper H 3/8
- /11/ BURDETTE, E.G., "Liner Anchorage Tests", J. of the Struct. Div., Proc. of the American Soc. of Civ. Eng., Vol. 101, July 1975, pp. 1455 - 1468

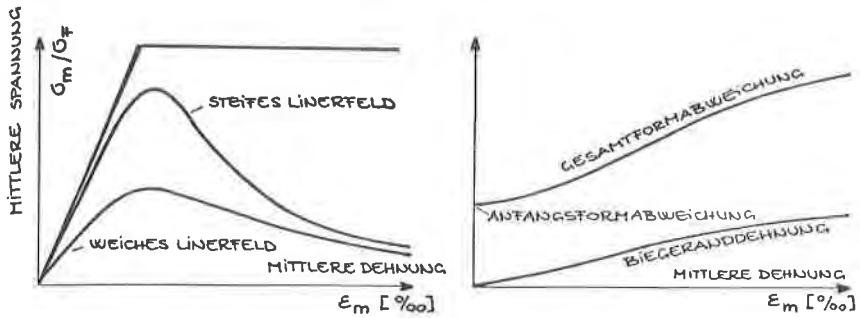


Bild 1: Prinzipieller Verlauf des Trag- und Verformungsverhaltens eines Linerfeldes mit Anfangsformabweichungen (abgeleitet am sinusförmig vorverformten Druckstab)

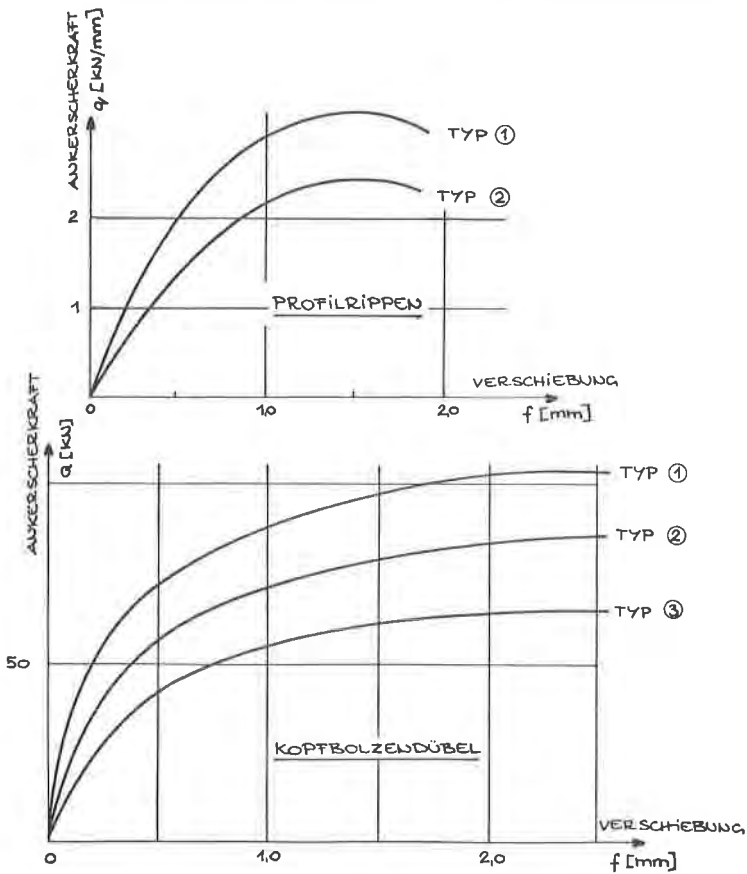


Bild 2: Typische Last- Verschiebungskurven von Kopfbolzendübeln und Profilrippen

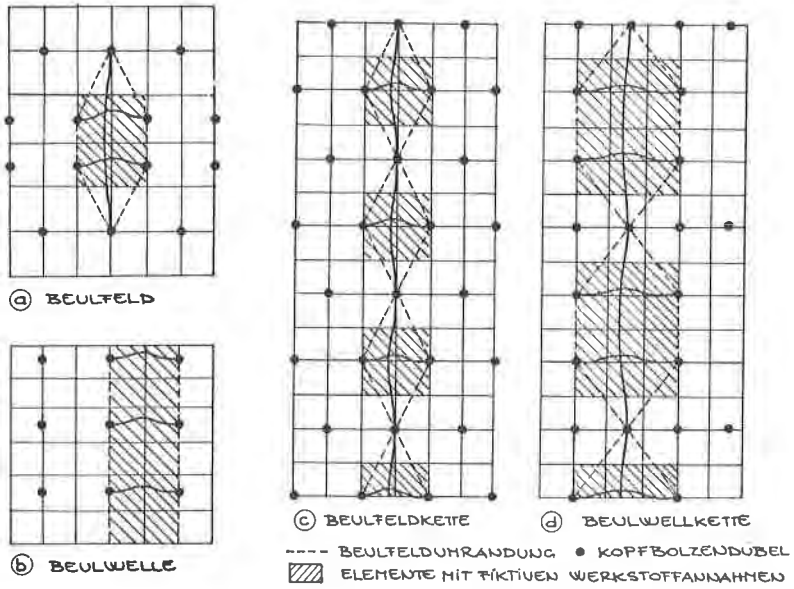


Bild 3: Rechenmodelle von Linerfeldern mit Anfangsformabweichungen

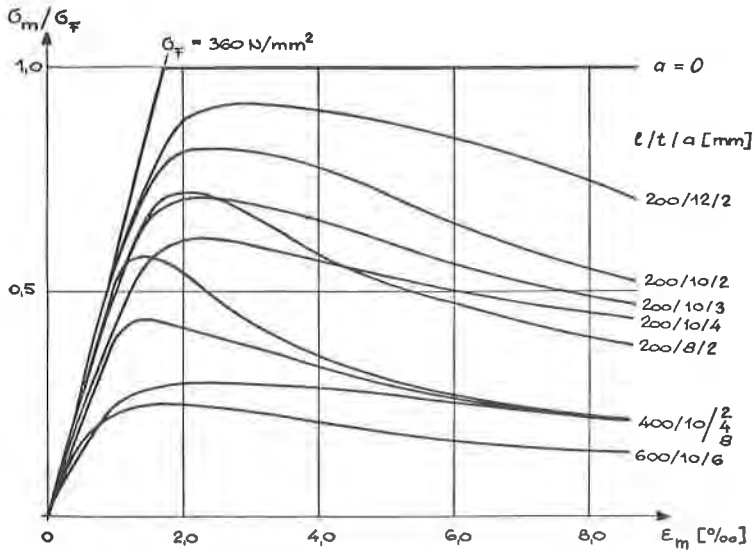


Bild 4: Fiktive Spannungs-Dehnungslinien von, vorverformten Linerfeldern für verschiedene Linerthicken t , Ankerabstände l sowie Anfangsformabweichungen a

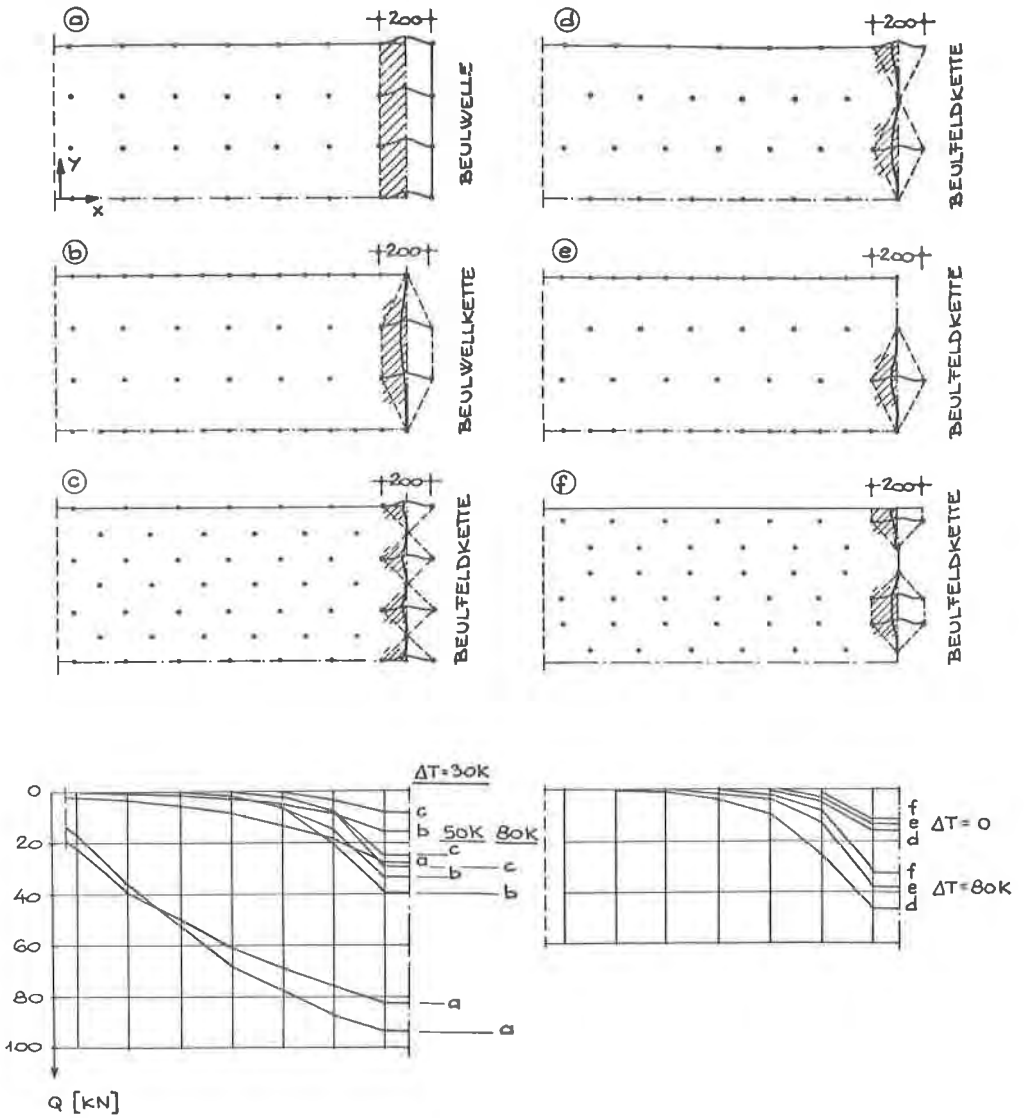


Bild 5: Berechnungsmodelle mit verschiedenen Ankeranordnungen sowie einige typische Ankerkraftverläufe
 ($\sigma_F = 360 \text{ N/mm}^2$, $t = 10 \text{ mm}$, $a = 2 \text{ mm}$, $\varepsilon_x = -1,0 \text{ ‰}$, $\varepsilon_y = -0,5 \text{ ‰}$ sowie Kopfbolzendübel nach Bild 2, Typ ①)

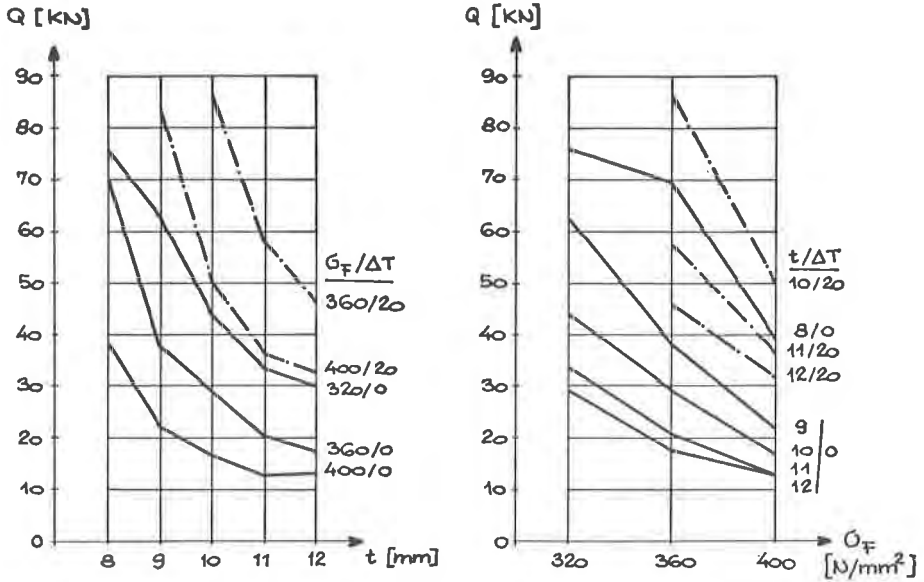


Bild 6.1: Einfluß der Linerdicke t und Streckgrenze σ_F auf die maximalen Ankerscherkräfte Q bei verschiedenen Temperaturdifferenzen ΔT (Belastung und Ankeranordnung nach Bild 5. (a))

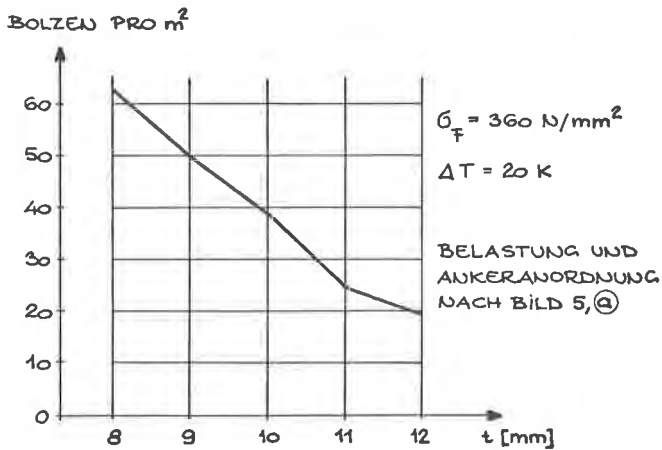


Bild 6.2: Einfluß der Linerdicke t auf den Ankerbedarf pro m^2 Liner bei gleicher maximaler Ankerbeanspruchung

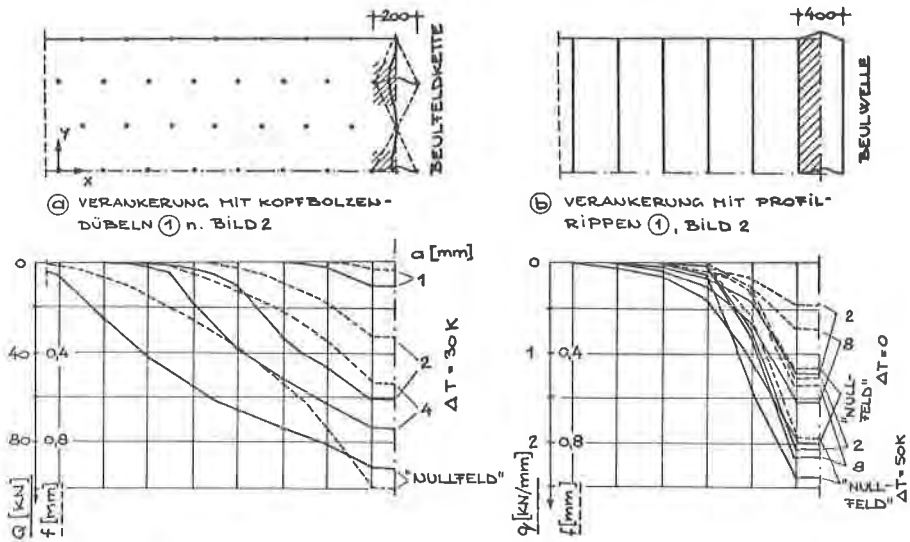


Bild 7: Einfluss der Anfangsformabweichungen auf das Ankerverhalten verschiedener Ankertypen ($\sigma_F = 360 \text{ N/mm}^2$, $t = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_x = -1,5 \text{ ‰}$, $\epsilon_y = -0,5 \text{ ‰}$)

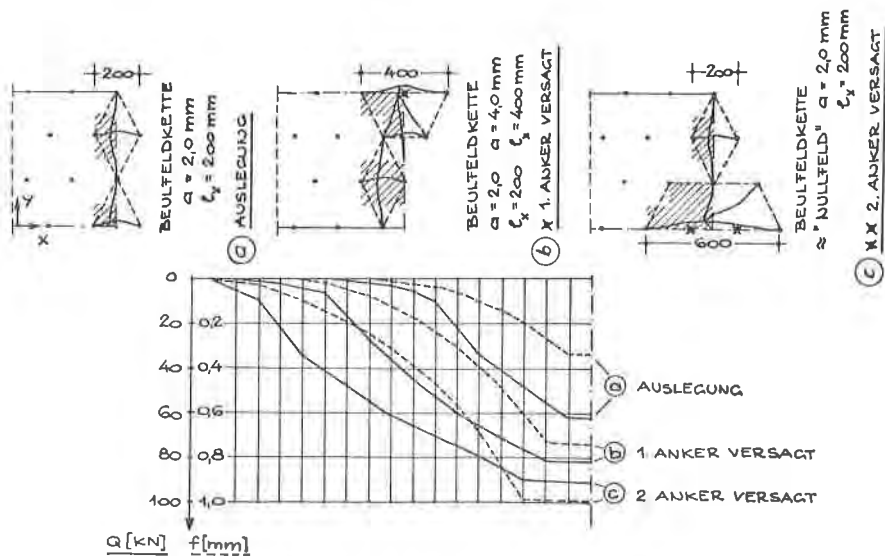


Bild 8: Auswirkungen des Ankerversagens auf den Ankerkraft- und -verschiebungsverlauf ($\sigma_F = 360 \text{ N/mm}^2$, $t = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_x = -1,5 \text{ ‰}$, $\epsilon_y = -0,5 \text{ ‰}$, $\Delta T = 30 \text{ K}$, Kopfbolzendübel nach Bild 2, Typ (1))

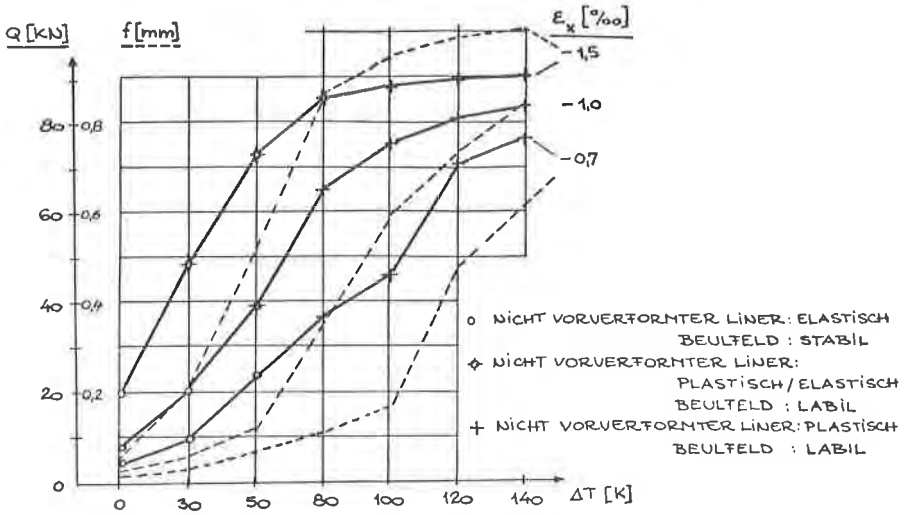


Bild 9: Einfluß verschiedener Betonranddehnungen ϵ_x und Erwärmungsgrade ΔT des Liners auf die maximalen Ankerkräfte und -verschiebungen (Ankeranordnung und Berechnungsmodell nach Bild 5, (a) ; $\sigma_F = 360 \text{ N/mm}^2$, $t = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_y = -0,5 \text{ ‰} = \text{const.}$)

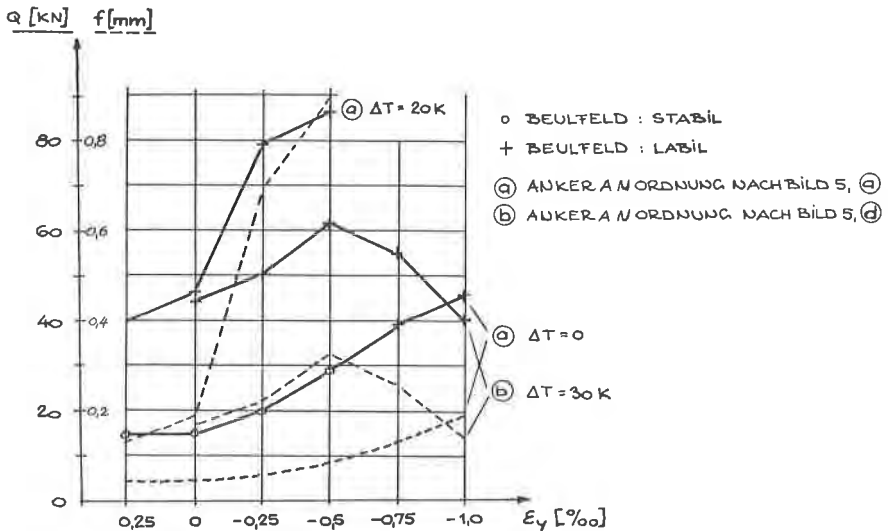


Bild 10: Einfluß verschiedener Betonranddehnungen ϵ_y auf die maximalen Ankerkräfte und -verschiebungen (Ankeranordnung und Berechnungsmodell nach Bild 5, (a) bzw. (b) ; $\sigma_F = 360 \text{ N/mm}^2$, $t = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_x = -1,5 \text{ ‰} = \text{const.}$)

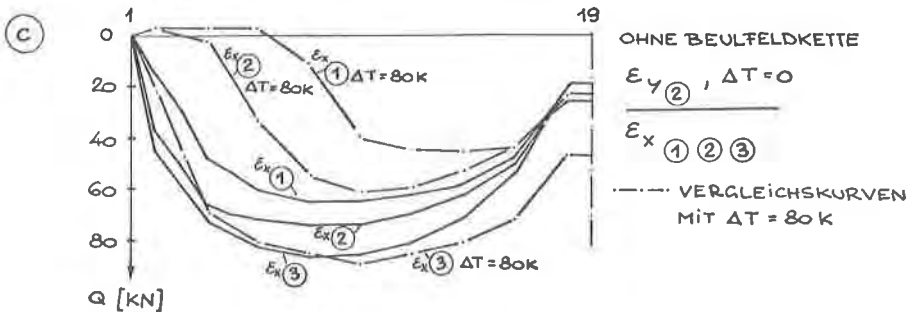
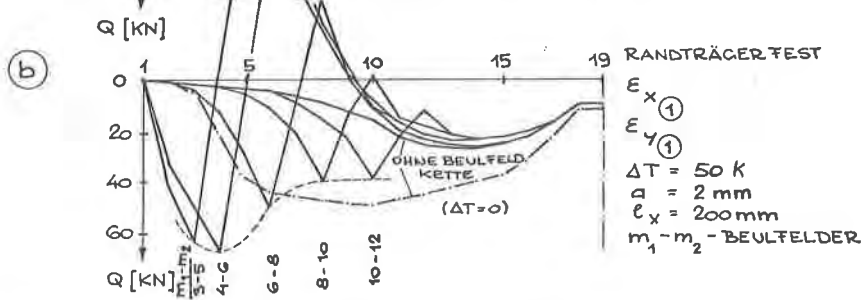
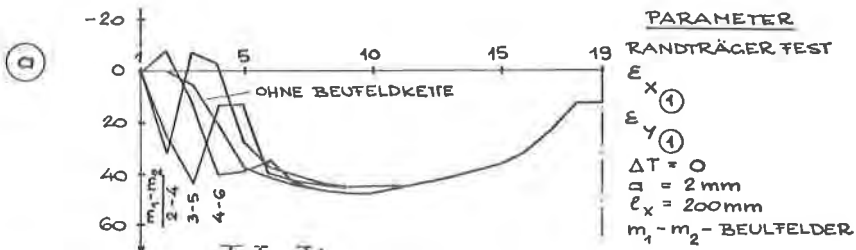
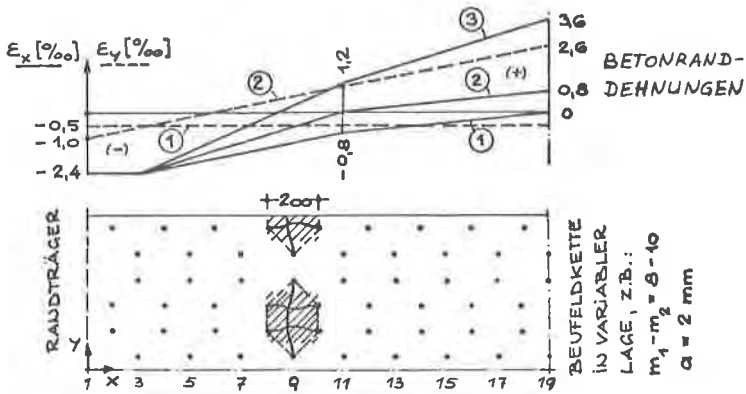


Bild 11: Einfluß von Dehnungsgradienten auf den Ankerkraftverlauf bei verschiedenen Beufeldlagen $m_1 - m_j$ sowie Erwärmungsgraden ΔT des Liners ($\sigma_F = 360$ N/mm², $t = 10$ mm, Kopfbolzendübel nach Bild 2, Typ ①)