

Verstärkung von durchbrochenen Brettschichtbindern

T 1541

T 1541

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

VERSTÄRKUNG VON DURCHBROCHENEN
BRETTSCHICHTBINDERN

FORSCHUNGSVORHABEN

I.4-34810

DURCHGEFÜHRT IM AUFTRAGE DER ENTWICKLUNGSGEMEINSCHAFT
HOLZBAU (EGH) IN DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR HOLZ-
FORSCHUNG E.V. (DGFH) UND DES INSTITUTS
FÜR BAUTECHNIK (IFBT)

VON

HANS KOLB UND ALBRECHT EPPLE

FORSCHUNGS- UND MATERIALPRÜFUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG
REFERAT I.4-HOLZ
STUTT GART
1985

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturübersicht	2
3	Zusammenstellung der Versuchsergebnisse von durchbrochenen Brettschichtbindern	5
3.1	Ohne Verstärkung	5
3.2	Mit Verstärkung	6
4	Theoretische Berechnungen mit der Finite-Element-Methode	6
4.1	Allgemeines	6
4.2	Rechteckdurchbruch in Längsmittle	8
4.3	Rechteckdurchbruch im Viertelpunkt	9
4.4	Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich	12
4.5	Kreisdurchbruch an einem Kragarmträger	15
5	Entwicklung eines einfachen Berechnungsverfahrens	17
5.1	Berücksichtigung der Querkraft	17
5.2	Berücksichtigung des Momenteneinflusses	21
5.3	Berücksichtigung von Kerbwirkungen	22
5.4	Ansätze für Spannungsinteraktionen	23
5.5	Computeroptimierung	24
5.6	Berechnungsbeispiele	26
6	Vorversuche zur Verstärkung von Durchbrüchen	29
6.1	Probenmaterial	30
6.2	Versuchsdurchführung	31
6.3	Versuchsergebnisse	32

7	Hauptversuche zur Verstärkung von Trägerdurchbrüchen und Vergleich mit dem Berechnungsverfahren	34
7.1	Probenmaterial	35
7.2	Probenumfang, Versuchsdurchführung	36
7.3	Versuchsergebnisse und Vergleich mit dem Berechnungsverfahren	38
7.3.1	Rechteckige Durchbrüche mit gleichen Randabständen	38
7.3.2	Rechteckige Durchbrüche mit ungleichen Randabständen	41
7.3.3	Runde Durchbrüche	44
7.3.4	Vergleich von Rechteck- und Kreisdurchbruch	44
7.3.5	Vergleich der Dimensionierung nach dem Berechnungsverfahren, nach der Richtlinie und nach dem Entwurf E DIN 1052	46
8	Zusammenfassung	49
9	Literatur	52

Beilagen 1 bis 65

1 Einleitung

Für die Praxis ergibt sich bei Brettschichtholzkonstruktionen oft die Notwendigkeit, Versorgungs- und Entsorgungsleitungen, Lüftungskanäle u.ä. in Dachebene zu verlegen. Nicht selten werden dazu Öffnungen in die Brettschichtbinder, sog. Durchbrüche, erforderlich. Anfänglich wurden solche Durchbrüche oftmals gedankenlos an neuen Traggliedern und auch nachträglich an bestehenden Brettschichtbindern unverstärkt ausgeführt. Folgeschäden konnten nicht ausbleiben. Unverstärkte Durchbrüche sind deswegen so kritisch zu beurteilen, weil dadurch stets die Standsicherheit gefährdet wurde bzw. noch wird und weil man rückblickend meist feststellen kann, daß die folgenreichen Schäden mit ganz geringem Aufwand vermeidbar gewesen wären. Aus der Dimensionierung von Stahlbetonteilen ist bekannt, daß über Umlenkkräfte bei Ausklinkungen und Durchbrüchen Querspannungen auftreten, und daß diese durch eine entsprechende Armierung aufzunehmen sind. Diese Erkenntnis, die auch für Bauteile aus Holz gilt, hat sich im Holzbau erst spät durchgesetzt. Meist wurde argumentiert: die DIN 1052 mache hierzu keine Angaben, folglich seien auch keine Verstärkungsmaßnahmen erforderlich.

Schadensfälle sowie die Unsicherheit der Holzbaustatiker und Holzleimbaubetriebe waren der Anlaß zu umfangreichen Forschungsarbeiten an durchbrochenen Brettschichtbindern in unserem Institut. Die Ergebnisse wurden im Jahre 1976 in einer Verstärkungsrichtlinie von Trägerdurchbrüchen zusammengefaßt. Bei der praktischen Anwendung dieser Richtlinie hat sich jedoch bald herausgestellt, daß sie in bestimmten Fällen sehr auf der sicheren Seite liegt, nur für rechteckige, symmetrisch angeordnete Durchbrüche gilt, sich auf die Verstärkung mit Baufurnierplatten festlegt und zudem keine Hinweise auf die Kräfte gibt, die durch Verstärkungen aufzunehmen sind.

Die Neubearbeitung von DIN 1052 war eine Gelegenheit, den Komplex "Durchbrüche" eingehender zu untersuchen und allgemein gültige Verstärkungsmaßnahmen anzugeben.

2 Literaturübersicht

Abgesehen von materialspezifischen Eigenschaften sind die Grundprobleme der Kraftumlenkung unabhängig davon, ob es sich um ausgeklinkte Trägerenden oder durchbrochene Träger von Stahl-, Stahlbeton- bzw. Holztragwerken handelt. Aus diesem Grund werden auch einige Veröffentlichungen aus diesen Grenzbereichen besprochen.

Stahlbetonbau

Hiltscher und Florin [10] untersuchten spannungsoptisch die Zugspannungen in der Umgebung einer belasteten Aussparung. Sie stellten Zugkraftdiagramme auf, nach denen die Bewehrungsstähle gewählt werden können. Wie diese angeordnet werden sollen, ergibt sich aus der Arbeit von Mann [22]. Er diskutiert zwei verschiedene Fachwerkanalogien zur Einleitung der Auflagerkraft bei ausgeklinkten Stahlbetonbalken. Dasselbe Problem hinsichtlich des Tragverhaltens ausgeklinkter Trägerenden untersuchten Steinle und Rostásy [31]. Als besonders vorteilhaft schlugen sie Anordnungen von Armierungsstählen vor, bei denen die ohnehin vorhandene Zugbewehrung des Stahlbetonbalkens zur Aufnahme der Umlenkkraft herausgezogen wurde.

Stahlbau

Bower [3] berichtet über die Spannungsverteilung am Rand von kreisförmigen und elliptischen Durchbrüchen bei I-Trägern. Eine Gegenüberstellung der Höchstlasten aus Versuch und Rechnung für rechteckige Durchbrüche an I-Trägern wurde ebenfalls von Bower [4] durchgeführt.

Congdon und Redwood [5] untersuchten die Plastizitätsvorgänge in den Ecken von Durchbrüchen, die durch aufgeschweißte Stege verstärkt waren. Sahmel [29] gibt für geschweißte Stegträger mit großen Stegausehnehmungen

konstruktive Hinweise und eine Näherungsberechnung an. Redwood und Chan [27] geben Bemessungshilfen für Stahlträger mit Kreisdurchbrüchen an, die bezüglich der halben Trägerhöhe unsymmetrisch angeordnet waren.

Die nachfolgend behandelten Arbeiten befassen sich ausschließlich mit Traggliedern aus dem Holzbau.

Ausklinkungen

Das Problem des an der Oberseite am Auflager ausgeklinkten Holzbal-kens wurde mit Hilfe der finiten Elemente von Eichstaedt [6] unter-sucht. Hempel [7] gibt unter Hinweis auf entsprechende amerikanische Festlegungen Kräfte an, die von Sicherungsbolzen aufzunehmen sind, wenn die Balkenunterseite am Auflager ausgeklinkt ist. Henrici [8] untersuchte das Problem des unverstärkten rechtwinklig ausgeklinkten Auflagers und eines hochbelasteten Trägers mit Hilfe der Spannungs-optik.

Möhler und Mistler [24] haben ausgedehnte Untersuchungen über den Ein-fluß von Ausklinkungen im Auflagerbereich an Holzbiegeträgern auf die Tragfestigkeit durchgeführt. Dabei wurde auch die Wirksamkeit ver-schiedener Verstärkungsarten untersucht. Eine erweiterte Form dieser Arbeit fand ihren Niederschlag in der Dissertation von Mistler [23]. Während bei diesen Veröffentlichungen die Ergebnisse aus Versuchen ab-geleitet wurden, behandelt Henrici [9] die Spannungsermittlung bei ausgeklinkten Biegeträgern rein theoretisch. Er kommt bezüglich der durch die Verstärkung aufzunehmenden Zugkraft zu etwas höheren Werten, als sie von Möhler und Mistler [24] angegeben werden.

Die konstruktiven Möglichkeiten zur Aufnahme von Schub- und Querkug-spannungen bei Brettschichträgern mit Ausklinkungen am Auflager wur-den von Möhler und Rathfelder [25] untersucht. Maßnahmen zur Er-höhung der Querkugfestigkeit in gefährdeten Bereichen wurden von Möhler und Siebert [26] vorgeschlagen.

Durchbrüche - unverstärkt

Der Einfluß auf die Festigkeit von Brettschichtträgern mit auflager-nahen Durchbrüchen wurde in einer Examensarbeit von Bengtsson und Dahl [2] untersucht. In einem Forschungsbericht von Kolb und Frech [15] wird neben Versuchen an unverstärkten, durchbrochenen Brettschichtträ-gern auch über Versuche an verstärkten, durchbrochenen Brettschicht-trägern berichtet. Spannungstheoretische Untersuchungen an hohen, durchbrochenen Brettschichtträgern wurden von Krabbe und Schowe [21] durchgeführt. Johannesson untersuchte in mehreren Arbeiten [11, 12, 13] unverstärkte, durchbrochene Brettschichtträger, sowohl im Versuch als auch durch Rechnung. Er prüfte hierzu verschiedene Versagenskriterien und Berechnungsmöglichkeiten für die Bruchlasten. Unter anderem be-nutzte er eine analytische Methode, die Finite-Element-Methode (FEM), die Boundary-Element-Methode (BEM), eine "Navier-beam"-Methode und eine Scherspannungsmethode. Die besten Übereinstimmungen mit den Ver-suchen erzielte er mit der Boundary-Element-Methode, die jedoch auf-wendige Computer-Berechnungen für jeden Einzelfall voraussetzt.

Penttala [28] verwendete für den Vergleich seiner Versuchsergebnisse analytische spannungstheoretische Ansätze, wie sie u.a. auch von Sawin [30] zur Berechnung von Spannungserhöhungen am Rande von Löchern vorgeschlagen wurden.

Aus den aufgeführten Arbeiten ergibt sich, daß in ganz bestimmten Be-reichen der Durchbrüche in Abhängigkeit der Belastungsrichtung und der Geometrie des Durchbruchs Spannungsspitzen auftreten. Für das Tragver-halten sind zudem die Gesetzmäßigkeiten von Holz mit Kerben zu berück-sichtigen, wie sie z.B. von Kollmann [20] beschrieben wurden.

Alle Ergebnisse der oben zitierten Arbeiten, die unverstärkte Brett-schichtträger behandeln, sind im späteren Abschnitt 3.1 zusammenge-stellt.

Durchbrüche - verstärkt

Das verhältnismäßig geringe Tragvermögen von unverstärkten Trägerdurchbrüchen führte zur Suche nach geeigneten Verstärkungsmöglichkeiten. In der schon angeführten Arbeit von Kolb und Frech [15] wurden hierfür aufgeleimte Wolff-Stegplatten verwendet. Bei Ergänzungsuntersuchungen wurden zur Verstärkung Baufurnierplatten eingesetzt [16, 17]. Die Versuche ergaben, daß durch Aufleimen von Baufurnierplatten durchbrochene Brettschichtträger wirkungsvoll verstärkt werden können. Eine Zusammenstellung dieser Arbeiten ist in der Veröffentlichung von Kolb und Frech [18] enthalten. Darin wurden auch die Richtlinien zur Verstärkung von Durchbrüchen in Brettschichtträgern [1] formuliert. In einer weiteren Arbeit wurde von Kolb und Rohlfing [19] untersucht, inwieweit die empfohlenen Verstärkungsdicken der Baufurnierplatten reduziert werden können.

In Fortführung der Arbeit von Penttala [28] berichten Kavaja und Penttala [14] über Versuche an kreisförmig durchbrochenen Brettschichtträgern, die mit vorgebohrten Sechskantholzschrauben und mit über die Trägerhöhe durchgehenden, unverleimten Gewindestangen verstärkt waren.

Die Ergebnisse der Versuche an verstärkten Brettschichtträgern sind im nachfolgenden Abschnitt 3.2 zusammengestellt.

3 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse von durchbrochenen Brettschichtbindern

3.1 Ohne Verstärkung

Die aus der Literatur zugänglichen Versuchswerte von durchbrochenen Brettschichtbindern ohne Verstärkung sind in den Tabellen 1 a bis 1 c, Beilagen 1 bis 3, zusammengestellt.

Die maximale Biegerandspannung bei diesen Versuchsträgern variiert in sehr weiten Grenzen und reicht von $13,4 \text{ N/mm}^2$ bei Träger P/4 (Tabelle 1 b) bis zu $43,6 \text{ N/mm}^2$ bei Träger L5/M (Tabelle 1 c). In erster Näherung kann festgestellt werden, daß die niedrigen Werte überwiegend bei Durchbrüchen im Auflagerbereich, die höheren Werte bei Durchbrüchen in Feldmitte auftraten.

3.2 Mit Verstärkung

Versuchsergebnisse aus der Literatur von durchbrochenen Brettschichtbindern mit Verstärkungen sind in den Tabellen 2 a und 2 b, Beilagen 4 und 5, zusammengestellt. Die Verstärkungsmaßnahmen reichen von aufgeleimten Wolff-Stegplatten über aufgeleimte Baufurnierplatten bis zu eingeschraubten Sechskantholzschrauben und durchgehenden Gewindestangen. Über Lochverstärkungen mit eingeleimten Stahlstangen (Gewindestangen) liegen in der Literatur keine Angaben vor. Erwartungsgemäß sind die maximalen Biegerandspannungen bei den Bindern mit verstärkten Durchbrüchen höher als bei den unverstärkten. Sie liegen bei den Bindern mit aufgeleimten Verstärkungen zwischen $28,8 \text{ N/mm}^2$ und $41,0 \text{ N/mm}^2$. Bei den Bindern mit Lochverstärkungen durch Schrauben betragen sie $24,4 \text{ N/mm}^2$ bis $42,3 \text{ N/mm}^2$.

4 Theoretische Berechnungen mit der Finite-Element-Methode

4.1 Allgemeines

Die experimentellen Ergebnisse legten es nahe, daß zunächst geklärt werden sollte, welche Spannungen im Bereich von Durchbrüchen auftreten und welche Gesetzmäßigkeiten bei den zu erwartenden Spannungsumlagerungen im Hinblick auf eine Dimensionierung zu erwarten sind. Dazu wurden vier verschiedene Grundfälle von durchbrochenen Trägern, die aus den Abbildungen 1 bis 4, Beilage 6, ersichtlich sind, mit Hilfe der

Finite-Element-Methode (FEM) ohne und mit Verstärkung durch aufgeleimte Beplankungen berechnet. Diese Grundfälle wurden deshalb gewählt, weil dafür Versuchsergebnisse und Erfahrungen aus der Praxis vorlagen.

Die Berechnungen wurden mit dem FEM-Programmpaket ICES-STRUDL durchgeführt^{x)}. Zur Anwendung kamen isoparametrische Elemente mit quadratischem Verschiebungsansatz und 8 Elementknoten.

Bei der Berechnung wurde für die Träger Brettschichtholz aus Fichte und für die Verstärkungen Baufurnierplatten aus Buche (BFU-BU) angenommen. Die elastischen Konstanten wurden für die anisotrope, aber linearelastische Berechnung in Anlehnung an DIN 1052 und Mistler [23] angesetzt.

Die Lastannahmen bei den obigen Trägern (Abbildungen 1 bis 4) wurden so gewählt, daß die Biegerandspannung in Feldmitte nach der ingenieurmäßigen Berechnungsmethode 14 N/mm^2 betrug. Die Belastung des Kragarmträgers mit Kreisdurchbruch (Abb. 4, Beilage 6) ergab eine Biegerandspannung über dem Auflager A von $12,6 \text{ N/mm}^2$. Für jeden Träger wurden 5 getrennte Berechnungen durchgeführt:

- Träger als Vollwandträger ohne Durchbruch
- Träger mit Durchbruch ohne Verstärkung
- Träger mit Durchbruch und unterschiedlich dicken seitlichen Verstärkungen (3 Dicken)

Zur Ersparnis von Rechenkosten wurde die Symmetrie bezüglich der Trägerlängsachse und der Trägerlängsmittle ausgenutzt.

x) Die Computerrechenzeit wurde von der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg, zur Verfügung gestellt. Hierfür danken wir Herrn Prof. Dr. Noack. Für die Dateneingabe und die Überwachung der Berechnung danken wir besonders FrI. Heinrichs und Herrn Dr.-Ing. von Roth

4.2 Rechteckdurchbruch in Längsmittle

Die Elemententeilung des Brettschichtträgers von Abb. 1, Beilage 6, mit rechteckigem Durchbruch in Längsmittle ist aus der ersten Darstellung in Abb. 5, Beilage 7, ersichtlich. Die Einzellasten $F/4$ betragen 57,6 kN. Das mittlere Diagramm zeigt den Verlauf der Biegerandspannung an der Unterkante des Trägers. Bedingt durch die relativ grobe Elemententeilung außerhalb des Durchbruchs und der punktförmigen Lasteinleitung am Auflager, ist die Übereinstimmung zwischen FE-Rechnung und technischer Biegelehre (TB) dort nicht besonders gut. Im weiteren Verlauf zur Trägerlängsmittle hin ergibt die FE-Rechnung durchweg geringfügig höhere Randspannungen als die TB-Lösung. Bemerkenswert ist, daß die größte Biegerandspannung nicht in dem Durchbruchsbereich liegt, wo es nach der technischen Biegelehre zu erwarten war, sondern rd. 35 cm außerhalb des Lochbereichs. Die senkrechten Schnitte II-II und I-I geben die Längsspannungsverteilung nach der FE-Rechnung wieder.

Die Störung des Kraftflusses im Durchbruchsbereich zeigt sich in den Darstellungen der Abb. 6, Beilage 8, bei denen ein Ausschnitt entlang der Linie a-a (Oberkante des Durchbruchs) ausgewertet wurde. Die Längsspannung, die Schubspannung und die Querspannung - allerdings nur beim Träger ohne Verstärkung - zeigen deutliche Spannungsgradienten beim Übergang zum Durchbruch. Durch die Verstärkung mit Baufurnierplatten (BFU) werden die Spannungsgradienten unterschiedlich beeinflusst. Die geringste Spannungsreduzierung ist erwartungsgemäß bei der Längsspannung aufgetreten, gefolgt von der Schubspannung. Eine Aufdopplung mit BFU brachte die größte Veränderung bei der Querspannung. Die Spannungen lassen sich dadurch gegenüber dem unverstärkten Träger grob gerechnet halbieren. Im Hinblick auf das Versagen von unverstärkten Trägern dieser Art ist es wichtig festzustellen, daß nach der Rechnung nur Querdruck- und keine Querspannungen auftreten.

In Abb. 7, Beilage 9, wurde - in gleicher Weise wie oben beschrieben - entlang der Linie b-b (Unterkante des Durchbruchs) ausgewertet. Bis auf die Tatsache, daß sich bei der Längsspannung das Vorzeichen vertauscht, sind keine größeren Änderungen in den Spannungen gegenüber der Linie a-a festzustellen.

Zusammenfassend läßt sich zum Trägerdurchbruch in Längsmittle sagen:

- a) Die maximale Biegeandspannung liegt geringfügig außerhalb des Durchbruchs.
- b) Die Spannungen haben beim Übergang zum Durchbruch sowohl am unteren als auch am oberen Lochrand Spannungsmaxima.
- c) Bei der untersuchten Belastung treten nur Querdruck- aber keine Querkzugspannungen auf.
- d) Die Querspannungen werden durch Aufdoppeln mit BFU am stärksten verändert, gefolgt von den Schubspannungen (Schnitt a-a) und den Längsspannungen (Schnitt b-b).

4.3 Rechteckdurchbruch im Viertelpunkt

Für den Brettschichtträger mit rechteckigem Durchbruch im Viertelpunkt wurde die in der ersten Darstellung von Abb. 8, Beilage 10, eingezeichnete Elemententeilung gewählt. Entsprechend der gewählten Lastanordnung betragen die Einzellasten $F/8 = 21,8$ kN.

In der zweiten Darstellung derselben Beilage ist der Verlauf der Biegeandspannung entlang der Trägerunterkante eingezeichnet. Die Störung im Auflagerbereich, die bei der Berechnung des Trägers mit Rechteckdurchbruch in Längsmittle auftrat, wurde diesmal durch eine wirklichkeitsnahe, flächige Auflagerung ausgeschaltet. Im Auflagerbereich ist daher kein Unterschied zwischen der FE-Berechnung und der TB-Lösung festzustellen.

Interessant ist aber die rechnerische Spannungsreduzierung - vom Auflager kommend - vor dem Durchbruch, die deckungsgleiche Biegerandspannung in Längsmittle des Durchbruchs und die Spannungserhöhung zum Lochende hin und darüber hinaus. Die Störung der Biegerandspannung ist erst nach einer Länge von rd. 1,5 x Trägerhöhe vom Lochrand entfernt abgeklungen. In Feldmitte - bei max M - ist praktisch kein Unterschied zwischen FE- und TB-Lösung feststellbar.

Die Längsspannung im Schnitt II (Beilage 10) ist nahezu trapezförmig, sowohl im Zug- als auch im Druckbereich. Einen fast parabolischen Verlauf weisen die Schubspannungen im senkrechten Schnitt in Lochlängsmittle (Schnitt II) auf.

Entlang des linken, senkrechten Durchbruchendes (Schnitt I) und des rechten Durchbruchendes (Schnitt III) wurden die Querspannungen ebenfalls in Beilage 10 eingezeichnet. In den Ecken der Durchbrüche treten Spannungsspitzen auf. Ecke 2 und 4 haben Querdruck, Ecke 1 und 3 hingegen Querzug. Im Hinblick auf die Tragfähigkeit ist besonderes Augenmerk auf die Quersugbelastung zu legen. Betrachtet man die Ecke 1, so beträgt sie dort rd. $0,8 \text{ N/mm}^2$ und in Ecke 3 sogar $1,0 \text{ N/mm}^2$. Obwohl die zulässige Biegerandspannung mit 14 N/mm^2 für Gkl I nicht überschritten wurde, erzeugt der Durchbruch nicht vernachlässigbare Quersugspannungen. Die zulässigen Werte nach der gültigen DIN 1052 werden um 300 %, nach der im Gelbdruck vorliegenden Fassung E DIN 1052 gar um 400 % überschritten.

In Abb. 9, Beilage 11, ist das Phänomen der Änderung der Biegerandspannung zufolge Durchbruch als reine Differenz aus den FE-Berechnungen des Vollwandträgers und des Trägers mit Durchbruch ohne Verstärkung in %, bezogen auf die FE-Lösung des Vollwandträgers, aufgetragen. Man erkennt daraus, daß sich sowohl am Ober- als auch am Untergurt die maximale rel. Spannungsentlastung - vom Auflager aus betrachtet - vor dem Durchbruch und die maximale rel. Spannungserhöhung nach dem Durchbruch befindet. Die Maxima liegen rd. 12 cm von den Enden entfernt. Der Störbereich reicht auf eine Länge von 2 x Trägerhöhe von den Lochrändern aus nach beiden Seiten des Durchbruchs.

Die Spannungen entlang der Durchbruchoberkante (Linie a-a) sind in Abb. 10, Beilage 12, eingezeichnet. Die schon vertraute Spannungsverteilung ist auch hier anzutreffen. Der höchste Vergütungsgrad läßt sich mit aufgeleimten BFU-Platten bei den Querspannungen erreichen. Die Querspannungen im Brettschichtholz reduzieren sich durch Aufleimen von 2 x 25 mm BFU-Platten ($d \approx 0,34 \cdot B$) von $1,05 \text{ N/mm}^2$ auf $0,45 \text{ N/mm}^2$. Bei den anderen Spannungen ist der rechnerische Vergütungsgrad geringer.

In Abb. 11, Beilage 13, sind für die Ecke 3 die Dehnungen aus den FE-Berechnungen und aus Versuchen [16, 17, 19] dargestellt. Die Dehnung direkt am Lochrand (Entfernung 0) reduziert sich von $3,3 \text{ ‰}$ (unverstärkt) auf rd. $1,5 \text{ ‰}$ bei beidseitiger Aufdopplung mit 12 mm-BFU-Platten ($d = 0,17 \cdot B$). Sowohl die Rechnung als auch die Versuche zeigen, daß durch dickere Aufdopplungen die Dehnungen zwar abnehmen, der Nutzen jedoch nur unterproportional mit der Dicke zunimmt. Die Entfernungen vom Lochrand, bis zu der die Querdehnungen noch positiv sind, betrug beim unverstärkten Träger rd. 22 cm, bei den verstärkten Trägern nach Rechnung und Versuch rd. 17 cm. Dieser Sachverhalt, daß die Dehnungen sich auf unterschiedliche Längen erstrecken, je nachdem ob aufgedoppelt wird oder nicht, wird bei der Bemessung von Verstärkungen zu berücksichtigen sein.

Zusammenfassend ergibt sich für den Rechteckdurchbruch im Viertelpunkt:

- a) Trägerdurchbrüche erzeugen nicht vernachlässigbare Änderungen der Längsspannungen. Diese liegen in der Größenordnung bis zu $\pm 35 \%$ gegenüber dem Vollwandträger ohne Durchbruch, wobei die Spannungszunahmen immer im Bereich des Durchbruchendes mit dem höheren Biegemoment auftreten.
- b) Die Schubspannungsverteilung in Längsmittle des Durchbruchs kann näherungsweise als parabelförmig verteilt angenommen werden. Dabei ist der obere und untere Restquerschnitt für sich getrennt zu betrachten.

- c) Die Querspannungen sind an den Ecken antimetrisch verteilt. Bei der untersuchten Trägerbelastung waren die Ecken 1 und 3 auf Querzug, die Ecken 2 und 4 auf Querdruck beansprucht.
- d) Die aufgeleimten Baufurnierplatten reduzieren vorwiegend die Querspannungen (bis um 75 %). Die Spannungsreduzierung bei den Längsspannungen beträgt rd. 10 %, bei den Schubspannungen maximal 20 %.

4.4 Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich

Die Elemententeilung und Lastanordnung des Trägers mit Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich geht aus der ersten Darstellung von Abb. 12, Beilage 14, hervor. Die Belastung für eine Biegeandspannung von 14 N/mm^2 in Feldmitte betrug bei dieser Lastanordnung $F/6 = 23,2 \text{ kN}$.

In den beiden mittleren Diagrammen dieser Abbildung sind die Schubspannungen, bezogen auf die senkrechten Schnitte II bzw. I, eingezeichnet. In Durchbruchmitte (Schnitt II) ergibt sich näherungsweise ein parabelförmiger Schubspannungsverlauf, wobei durch den unteren Restquerschnitt am Durchbruch mehr Querkraft aufgenommen werden muß als durch den oberen. Wird vereinfacht unterstellt, daß wegen der symmetrischen Anordnung des Durchbruchs beide Restquerschnitte gleiche Querkraft erhalten, ergibt sich nach der ingenieurmäßigen Berechnung für eine parabelförmige Schubspannungsverteilung $\tau = 1,5 \cdot 0,5 \cdot 3 \cdot 23232 \text{ N} / 140 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} = 1,24 \text{ N/mm}^2$, was recht gut mit der FE-Lösung von $\max \tau = 1,2 \text{ N/mm}^2$ in Durchbruchmitte übereinstimmt. Im Schnitt I kommen Spannungsumlagerungen zum Zuge, die ausgeprägte Spannungsspitzen in den Ecken 1 und 2 erzeugen. Die Querspannungsverteilung ist nahezu antimetrisch; Ecke 2 entspricht Ecke 4 und Ecke 1 entspricht bis auf die Störung im Auflagerbereich der Ecke 3.

Entlang der Durchbruchoberkante (Schnitt a) ergeben sich die in Abb. 13, Beilage 15, eingezeichneten Spannungsverteilungen. Gegenüber den Durchbruchanordnungen in Längsmittle und in den Viertelpunkten ist für die

Querspannung eine wesentliche Änderung festzustellen. Die Querspannung ist erwartungsgemäß in Ecke 2 negativ (Druck), klingt aber - vom Durchbruchsende aus gemessen - nach rd. 50 cm auf Null ab und wird zum Trägerende hin positiv (Querzug). Dieser Spannungsverlauf ist eine Erklärung für das Auftreten von Querzugrissen am Trägerende in Höhe des Schnitts a bei 2 Brandversuchen, die an durchbrochenen Brettschichtbindern durchgeführt wurden. Die Querschnittsabmessungen waren mit dem rechnerisch untersuchten Träger vergleichbar.

Werden die Spannungen entlang der Durchbruchunterkante (Schnitt b) betrachtet, die in Abb. 14, Beilage 16, gezeigt sind, so ist bei der Querspannung am Trägerende dieselbe Spannungsumlagerung wie bei Schnitt a zu beobachten, wobei anstelle von Querzug hier Querdruck auftritt. Die beiden anderen Spannungsarten unterscheiden sich unwesentlich von denjenigen des Schnitts a.

Bei den Dehnungen stellt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und FE-Berechnung heraus, wie aus Abb. 15, Beilage 17, für die Ecke 2 ersichtlich ist. In Richtung des Trägerendes hat die Aufdopplung kaum noch einen versteifenden Einfluß, die Kurven der FE-Rechnung weichen daher auch nur wenig voneinander ab. Für die Ecke 3 sind die Dehnungen in Abb. 16, Beilage 18, dargestellt. Interessant ist dort zum einen, daß die Stauchung außerhalb der BFU-Aufdopplung im Versuch geringer ausfiel als es die Rechnung ergab und zum andern, daß die gemessenen positiven Dehnungen ($\hat{=}$ Querzug) am Lochrand höhere Werte ergaben als die FE-Rechnung bei den vergleichbaren Aufdopplungsdicken. Der Unterschied kann möglicherweise 2 Ursachen haben.

- Der E-Modul in Plattenebene für die BFU-Platten wurden evtl. zu hoch angesetzt, oder
- die Annahmen der Kontinuumsmechanik treffen nicht voll zu.

Der erste Punkt dürfte als entscheidende Ursache ausscheiden, da bei den anderen Trägertypen die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Dehnungen recht gut war. Der E-Modul wurde zudem in Anlehnung an DIN 68 705 Teil 5 ermittelt. Vielmehr ist zu vermuten, daß die schon bei der gewählten Laststufe vorhandenen Anrisse im Brettschichtholz in der Ecke 3 für die insgesamt höheren Meßwerte verantwortlich sind, da rechnerisch von verbundenen Elementen ausgegangen wird. Ein Abbau der Spannungsspitzen im Brettschichtholz konnte bei den Kurzzeitversuchen nur über Ribbildung erfolgen, was damit zu scheinbar höheren Dehnungen führte. Dieses Materialverhalten war durch das linear-elastische FE-Modell nicht nachzuvollziehen.

Zusammenfassend läßt sich für den Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich folgendes feststellen.

- a) Die Biegebeanspruchung des Holzes rund um den Durchbruchbereich tritt gegenüber der Schubbeanspruchung und der Querbeanspruchung in den Hintergrund.
- b) Die Schubspannungsverteilung für den oberen und unteren Restquerschnitt kann näherungsweise nach der technischen Biegelehre ermittelt werden.
- c) Die Querspannungen sind in den Ecken antimetrisch verteilt. Bei der untersuchten Trägerbelastung waren die Ecken 1 und 3 auf Querzug und die Ecken 2 und 4 auf Querdruck beansprucht.
- d) Am Trägerende treten in Höhe der Ecke 2 Querzugspannungen auf, obwohl die Ecke 2 selber auf Querdruck belastet ist (siehe Abb. 13).
- e) Die aufgeleimten Baufurnierplatten reduzieren vorwiegend die Querspannungen (bis um 70 %). Die Spannungsreduzierung bei den Längs- und Schubspannungen ist dagegen deutlich geringer (15 % bzw. 25 %).

4.5 Kreisdurchbruch an einem Kragarmträger

Die Abmessungen und die Belastung des Kragarmträgers mit Kreisdurchbruch sind aus der ersten Darstellung von Abb. 17, Beilage 19, ersichtlich, vgl. auch Abb. 4, Beilage 6. Mit der gewählten Belastung, die über dem Auflager A eine Biegeandspannung von $|12,6| \text{ N/mm}^2$ verursachte, ergibt sich nach der FE-Rechnung für den senkrechten Schnitt in Durchbruchmitte die in dem oberen Diagramm hinterlegte Längsspannungsverteilung. Direkt am Lochrand sind Störungen erkennbar, da die Elementaufteilung am gekrümmten Innenrand nicht fein genug war und die gewählten Randelemente zur Spannungsabbildung am Kreisrand offenbar überfordert waren, was sich jedoch nur bei den Längsspannungen negativ auswirkte. In demselben Diagramm ist zusätzlich die Längsspannungsverteilung nach der technischen Biegelehre eingezeichnet. Aus dem Vergleich beider Linien erkennt man im Druckbereich (= unterer Trägerbereich) für die FE-Lösung geringere und für den Zugbereich (= oberer Trägerbereich) höhere rechnerische Längsspannungen, als sie sich nach der technischen Biegelehre ergeben. Zur Klarstellung: etwaige Plastifizierungsvorgänge konnten durch die FE-Berechnung nicht berücksichtigt werden. Die Abweichung von der Geraden beruht einzig auf Spannungsumlagerungen im linear-elastischen Bereich.

Während die bisherigen Durchbrüche in grober Näherung parabelförmige Schubspannungsverteilungen in den Trägerrestquerschnitten ergaben, paßt beim Kreisdurchbruch eine solche Verteilung nicht, wie aus dem unteren Diagramm von Abb. 17, Beilage 19, hervorgeht. Dies zeigen die beiden zusätzlich eingezeichneten Kurven. Die strich-punktierte Linie ergibt eine theoretische Schubspannungsverteilung, wenn die Schwächung durch das Loch nicht berücksichtigt wird. Bezieht man dieses mit ein, so erhält man den Schubspannungsverlauf für den unteren und oberen Restquerschnitt entsprechend den gestrichelten Linien.

Wie die Schubspannungen in einiger Entfernung vom Durchbruch aussehen, ist aus Abb. 18, Beilage 20, zu sehen. Das obere Diagramm zeigt den Verlauf im Schnitt II (49 cm von der Lochmitte entfernt). Der gewohnte

parabelförmige Spannungsverlauf ist noch nicht erreicht. Die Störung durch den Durchbruch wirkte sich noch bis zu einer Entfernung von 129 cm ($\hat{=}$ Trägerhöhe) ab der Lochmitte aus, wie aus dem unteren Diagramm der Abb. 18 für den Schnitt III zu sehen ist.

Für das Versagen der durchbrochenen Brettschichtträger sind die Spannungen direkt am Lochrand wichtiger als die davon weiter entfernten.

Abb. 19, Beilage 21, zeigt die Schubspannungsverteilung am Lochrand in Polarkoordinatendarstellung. Daraus ist ersichtlich, daß die Maxima bei 90° und rd. 245° auftreten, und daß in halber Trägerhöhe (bei 0° und 180°) die Schubspannungen Null sind.

Für die Querspannungsverteilung am Lochrand, die ebenfalls in Polarkoordinaten in Abb. 20, Beilage 22, dargestellt ist, ergeben sich bei 45° und 225° Maxima für Querdruck und bei 135° und 315° Maxima für Querzug. Die größte Querzugspannung ist mit rd. $1,06 \text{ N/mm}^2$ rd. 4mal höher als derzeit nach Norm zugelassen. Die gegenüberliegende Anordnung der Maxima in den 45° -Sektoren ist charakteristisch für kreisförmige Durchbrüche. In welchen Quadranten allerdings die antimetrischen Druck- bzw. Zugspannungen auftreten, hängt von der Richtung der äußeren Belastung ab.

Für den Kreisdurchbruch an einem Kragarmträger ergeben sich nachstehende Feststellungen.

- a) Die Schubspannungsverteilung in den Restquerschnitten ist nicht mehr parabelförmig verteilt. Das Maximum befindet sich an der oberen und unteren Tangente des Durchbruchs. Direkt am Lochrand ist in halber Trägerhöhe die Schubspannung Null.
- b) Die Querspannungen haben ihre Maxima in den ungeradzähligen 45° -Sektoren des Kreises, wenn die Trägerlängsachse als Abszisse betrachtet wird.

5 Entwicklung eines einfachen Berechnungsverfahrens

Die Auswertung der FE-Berechnungen im Kapitel 4 hat gezeigt, daß neben dem allgemein bekannten Querkrafteinfluß auch ein Momenten- und Kerbeinfluß zu berücksichtigen ist, wenn ein einfaches Berechnungsverfahren zu befriedigenden Lösungen führen soll. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden folgende Überlegungen angestellt.

- Die Durchbrüche induzieren Querspannungen in den entsprechenden Ecken bzw. Sektoren, die sich additiv aus einem Querkraftanteil und einem Momentenanteil zusammensetzen.
- Die Form des Durchbruchs spielt eine Rolle und soll durch einen Kerbfaktor berücksichtigt werden. Es wird unterstellt, daß dieser sich sowohl für Querkzug- als auch Schub- und Biegespannungen anwenden läßt.

Es werden verhältnismäßig einfache Ansätze für die Einflußparameter angenommen, die allerdings unbekannte Größen enthalten. Diese werden in Form einer Optimierungsrechnung aus allen zugänglichen Versuchswerten von unverstärkten Brettschichtträgern unter Berücksichtigung der Belastung, der Höchstlast sowie der Geometrie des Trägers und des Durchbruchs so ermittelt, daß ein vertretbarer Sicherheitsbeiwert gegen Versagen entsteht.

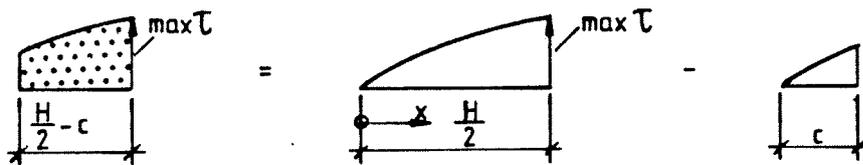
5.1 Berücksichtigung der Querkraft

Durch den Durchbruch wird der Kraftfluß gestört. In ähnlicher Weise wie beim ausgeklinkten Balken (Möhler und Mistler [23], Henrici [9]) kann der Anteil der Zugkraft quer zur Faser im Durchbruch nach dem Satz über zugeordnete Schubspannungen errechnet werden.

Der Einfachheit halber wird zunächst unterstellt, daß der Durchbruch rechteckig ist und gleiche Randabstände von oben und unten vorhanden sind. Wie aus Abb. 21, Beilage 23, ersichtlich ist, verteilt sich die

Querkraft aus geometrischen Gründen hälftig auf die beiden Restquerschnitte, was nachfolgende Berechnungen vereinfacht. Die im Schnitt I-I eingezeichnete parabelförmige Schubspannungsverteilung gilt für den ungeschwächten Querschnitt. Durch Schraffur wurde die Fläche gekennzeichnet, die dem Schubspannungsanteil entspricht, der in der unteren Trägerhälfte wegen des Durchbruchs nicht in ungestörter Form übertragen werden kann. Da die Schubspannungen rechtwinklig zueinander stehende Spannungskomponenten aufweisen, fehlt beim Durchbruch die rechtwinklig zur Trägerachse stehende Komponente, die bei der gewählten Lastrichtung bei der Ecke 1 zu Querkzug und bei der Ecke 2 zu Querdruck führt. Dies stimmt qualitativ mit den FE-Berechnungen überein.

Die schraffierte Fläche läßt sich aus den Flächen der Schubspannung τ bzw. des Kraftflusses T wie folgt als Differenz ermitteln



Die Schubspannung in Abhängigkeit von x lautet

$$\tau(x) = \frac{4 \cdot \max \tau}{H^2} x (H - x) \quad (1)$$

Nach Integration und einigen Umformungen erhält man schließlich für die Zugkraft Z

$$Z = Q \left[\frac{1}{2} - 3 \left(\frac{c}{H} \right)^2 + 2 \left(\frac{c}{H} \right)^3 \right] \quad (2)$$

Die Nebenrechnungen hierzu sind in Beilage 24 zusammengestellt. Der Klammerausdruck von Gleichung (2) läßt sich tabellieren, so daß noch weiter vereinfacht werden kann zu

$$Z = k \cdot Q \quad (3)$$

Bei der asymmetrischen Anordnung des Durchbruchs ist zunächst zu klären, wie sich die Querkraft Q auf die unterschiedlich hohen Restquerschnitte aufteilt. Davon abhängig ist dann auch der Anteil der zu schraffierenden Schubspannungsfläche, die der gesuchten Zugkraft Z proportional ist. Zwei Aufteilungsarten wurden untersucht.

- a) Aufteilung im Verhältnis der Flächenmomente 2. Ordnung (Trägheitsmomente)
- b) Aufteilung im Verhältnis der Einzelhöhen.

Die Lage der "neutralen Achse" vom oberen Rand, d.h. ab der der eine Schubspannungsanteil Querkraft und der andere Querkraft erzeugt, ergibt für den ersten Fall

$$x_1 = \frac{I_o}{I_o + I_u} \quad (4)$$

und für den zweiten Fall

$$x_1 = \frac{c_o}{c_o + c_u} \cdot H \quad (5)$$

Die Indizes kennzeichnen den unteren bzw. oberen Restquerschnitt, wobei I das Flächenmoment 2. Ordnung, H die gesamte Trägerhöhe und c die Höhe des oberen bzw. unteren Randabstandes darstellt.

Für das Verhältnis $c_o/c_u = 0,5$ liefert Gleichung 4) für den oberen Abstand $x_1 = 0,11 \cdot H$ und Gleichung 5) $x_1 = 0,33 \cdot H$. Da hier sehr große Unterschiede auftreten, waren weitere Betrachtungen notwendig. Vergleichende Berechnungen des Durchbruchs als Vierendeel-Träger ergaben, daß im Bereich der infrage kommenden Ausmittigkeiten die Methode b) eine ausreichend genaue Aufteilung der Querkräfte liefert. Dabei wurde berücksichtigt, daß das Verhältnis E-Modul zu Schub-Modul rd. 20 beträgt und die Durchbruchlänge nicht größer als die Trägerhöhe sein soll.

Mit der nach Gleichung 5) ermittelten Lage der "neutralen Achse" bezüglich der Schubspannungen in Höhe x_1 sind in Abb. 22, Beilage 23, die Verhältnisse beim asymmetrischen Durchbruch aufgezeigt. Wegen der unterschiedlichen Höhen c_u und c_o ergeben sich in den Ecken 1 und 3 auch unterschiedlich große Zugkräfte.

Für den Fall, daß das Verhältnis $c_o/c_u = 0,5$ beträgt (d.h. unterer Randabstand $c_u = 0,5 H$; oberer Randabstand $c_o = 0,25 H$), ergibt sich für Ecke 3

$$Z_r = Q \left[\frac{7}{27} - 3 \left(\frac{c_o}{H} \right)^2 + 2 \left(\frac{c_o}{H} \right)^3 \right] \quad (6)$$

und für die Zugkraft in Ecke 1

$$Z_\ell = Q \left[\frac{20}{27} - 3 \left(\frac{c_u}{H} \right)^2 + 2 \left(\frac{c_u}{H} \right)^3 \right] \quad (7)$$

Die Nebenrechnungen, um zu den Gl. 6) und 7) zu gelangen, sind in Beilage 25 enthalten. Die größere Zugkraft wird mit Gleichung 7) für die Ecke 3 erhalten. In obigen Gleichungen wurde bewußt $c_u = 0,25 H$ bzw. $c_o = 0,5 H$ nicht eingesetzt, um eine direkte Vergleichbarkeit mit Gl. 2) zu haben. Die Gleichungen unterscheiden sich nur im 1. Term des Klammersausdrucks.

Ein zahlenmäßiger Vergleich von Gl. 6) und Gl. 7) mit Gl. 2) liefert für $c_o/c_u = 0,5$ wobei in Gleichung 2) für c jetzt der obere, kleinere Randabstand $c_o = 0,25 H$ eingesetzt wird:

$$\text{mit Gl. 2)} \quad Z = 0,3438 \cdot Q \quad (8)$$

$$\text{mit Gl. 6)} \quad Z_r = 0,1030 \cdot Q \quad (9)$$

$$\text{mit Gl. 7)} \quad Z_\ell = 0,2407 \cdot Q \quad (10)$$

In erster Annäherung läßt sich Gleichung 2) auch auf den unsymmetrischen Durchbruch anwenden, wenn der kleinere der beiden Randabstände für c eingesetzt wird, da der Wert nach Gl. 2) auf der sicheren Seite liegt.

Nach den angestellten Überlegungen wird bei einem asymmetrischen Durchbruch mit breiterem unteren Randabstand ein Versagen in Ecke 1 zu erwarten sein. Wird bei gleichem Asymmetrieverhältnis der Träger umgedreht, so wird das Versagen in Ecke 3 eintreten, wobei sich die maximale rechnerische Zugkraft bei gleicher Querkraft nicht ändert und der Momenteneinfluß vergleichsweise klein ist.

Bei Kreisdurchbrüchen kann für die Ermittlung der Zugkraft Z in gleicher Weise wie beim symmetrischen bzw. asymmetrischen Rechteckdurchbruch vorgegangen werden. Zu beachten ist allerdings, daß die Größen c_o bzw. c_u nicht die Abstände von Lochrand zur Ober- bzw. Unterkante des Trägers darstellen, sondern hier die Abstände vom Schnittpunkt der 45° -Sektoren am Lochrand bis zur Ober- bzw. Unterkante des Trägers eingesetzt werden müssen. Dies entspricht den Abständen, bei denen die größten Querkzugspannungen auftreten (vgl. Abschnitt 4.5 und die Skizzen auf Seite 27).

5.2 Berücksichtigung des Momenteneinflusses

Aus den Versuchen ergab sich, daß durchbrochene Brettschichtbinder auch in querkraftfreien Bereichen zufolge Querkzug versagen können [13, S. 48]. Obwohl in den FE-Berechnungen in diesen Bereichen keine Querkzugspannungen nachgewiesen wurden, wird für die Dimensionierungsmethode ein empirischer Momentenanteil für die Querkzugkraft unterstellt und in Form

$$Z_M = \xi \cdot \frac{M_{II}}{c} \quad (11)$$

angesetzt. Dabei bedeutet M_{II} das an der maßgebenden Stelle vorhandene Biegemoment, c ist analog zum vorigen Kapitel der Randabstand bis zur Stelle, wo die maximale Querkzugspannung bei Querkraftbeanspruchung auftritt.

Der Faktor ξ ist dimensionslos und wurde iterativ aus den Versuchen bestimmt. Er beträgt einheitlich für rechteckige und kreisförmige Durchbrüche

$$\xi = 0,008 \quad (12)$$

5.3 Berücksichtigung von Kerbwirkungen

Die Auswirkung von Kerben bei Holz ist von vielen Faktoren abhängig und ist letztlich noch nicht vollständig geklärt. Bei den Trägerdurchbrüchen liegen Kerbwirkungen vor, die nicht unbedingt auf andere Verhältnisse übertragen werden können. Aus den FE-Berechnungen lassen sich zwei Feststellungen ableiten.

- a) Bei kreisförmigen Durchbrüchen ist keine Kerbwirkung zu erwarten; d.h. die Kerbzahl kann mit $\beta_K = 1$ angesetzt werden.
- b) Bei rechteckigen Durchbrüchen sind besonders bei den Biegespannungen große Spannungserhöhungen am Durchbruchsende mit der größeren Momentbelastung festgestellt worden, die nicht vernachlässigt werden können. Der Faktor, der dies berücksichtigt, hängt in starkem Maß auch vom Verhältnis von Durchbruchlänge zur Durchbruchhöhe (a/b) ab.

In der nachfolgend beschriebenen Computeriteration wurden verschiedene Ansätze für die Kerbzahl β_K durchgerechnet. Die beste Lösung wird für den rechteckigen Durchbruch durch Gleichung 13) beschrieben

$$\beta_K = 0,88 + 0,17 \frac{a}{b} \quad (13)$$

Dabei bedeutet a die Durchbruchslänge und b die Höhe des Durchbruchs. Für verschiedene Verhältnisse a/b ist Gl.13) in nachstehender Tabelle 3 ausgewertet.

$\frac{a}{b}$	Kerbzahl $\beta_K [-]$
$\leq 1,0$	1,05
1,2	1,08
1,4	1,12
1,6	1,15
1,8	1,19
2,0	1,22
2,2	1,25
2,4	1,29
2,6	1,32
2,8	1,36
3,0	1,39

Tabelle 3 Kerbzahlen für rechteckige Trägerdurchbrüche

5.4 Ansätze für Spannungsinteraktionen

An den gefährdeten Ecken der rechteckigen Trägerdurchbrüche haben sowohl die Schubspannungen als auch die Querkzugspannungen ihre Maxima. Es liegt nahe, das gleichzeitige Zusammentreffen dieser Spannungen durch einen geeigneten Ansatz für die Spannungsinteraktion zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden 3 verschiedene Ansätze untersucht.

a) NORRIS-Kriterium - einfach

$$\left(\frac{\sigma_B}{\text{zul } \sigma_B} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z\perp}}{\text{zul } \sigma_{z\perp}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\text{zul } \tau_{\parallel}} \right)^2 \leq 1 \quad (14)$$

b) NORRIS-Kriterium - erweitert

$$\left(\frac{\sigma_B}{\text{zul } \sigma_B} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_B \cdot \sigma_{z\perp}}{\text{zul } \sigma_B \cdot \text{zul } \sigma_{z\perp}} \right) + \left(\frac{\sigma_{z\perp}}{\text{zul } \sigma_{z\perp}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\parallel}}{\text{zul } \tau_{\parallel}} \right)^2 \leq 1 \quad (15)$$

c) Spannungsbedingung nach DIN 1052

Im Vorgriff auf die erwartete Festlegung für die zul. Querspannung in der Neufassung von DIN 1052 wird folgender Ansatz verwendet

$$\text{vorh. } \sigma_{z\perp} \leq \text{zul } \sigma_{z\perp} \quad (16)$$

wobei für die Berechnungen $\text{zul } \sigma_{z\perp} = 0,2 \text{ N/mm}^2$ angesetzt wurde.

5.5 Computeroptimierung

Die in den obigen Abschnitten beschriebenen Ansätze enthalten mehrere Unbekannte. Das Ziel der Computeroptimierung war es, diese Größen an Hand der Versuchsergebnisse aus der Literatur (unverstärkte Träger, vgl. Abschnitt 3.1) so zu bestimmen, daß für die daraus abgeleitete Berechnungsmethode folgende Forderungen erfüllt werden

- gleiche Sicherheitsbeiwerte für Kreis- und Rechteckdurchbrüche
- keine Abhängigkeit der Sicherheitsbeiwerte von der Lage der Durchbrüche
- der 5 %-Fraktilenwert der Sicherheitsbeiwerte aus allen Versuchen soll zwischen 2,5 und 2,75 liegen.

Das Ergebnis der Optimierung ist in Tabelle 4, Beilage 26, enthalten. Die wichtigsten Zahlen daraus sind in nachfolgender Zusammenstellung 1 aufgeführt.

Zusammenstellung 1
Ergebnisse der Computeroptimierung

1	2	3	4	5
Bezeichnung	Verhältnis max F/zul F			Abweichung von 4 gegenüber 3 %
	NORRIS einfach	NORRIS erweitert	nur zul σ_z	
○ - Durchbruch (n = 20) v	3,58	3,49	3,45	- 1,1
□ - Durchbruch (n = 21) v	3,54	3,42	3,39	- 0,9
Gesamtmittelwert (n = 41) \bar{v}	3,56	3,45	3,42	- 1
Standardabweichung $\pm s$	0,47	0,44	0,48	-
5 %-Fraktile $v_{5\%}$	2,76	2,72	2,62	- 3.7

Das Verhältnis max F/zul F ergibt sich als Quotient aus der Höchstlast, die bei den Versuchen erreicht wurden, und der als zulässig erachteten Last, die mit dem jeweiligen Ansatz für die Spannungsinteraktionen ermittelt wurde.

Beim Vergleich der Werte für den Kreisdurchbruch mit denjenigen für den Rechteckdurchbruch sind bei allen Spannungsansätzen keine großen Unterschiede festzustellen. Beim Gesamtmittelwert ergibt sich aus 41 Versuchswerten für das Interaktionskriterium "NORRIS-einfach" $v = 3,56$, für "NORRIS-erweitert" $v = 3,45$ und für die einfache Forderung $\text{vorh } \sigma_{z1} \leq \text{zul } \sigma_{z1}$ nach Gleichung 16) $v = 3,42$. Die unterschiedliche

Durchbruchform und -größe ist mit den unter Abschnitt 5.3 vorgestellten Kerbzahlen, die Lage des Durchbruchs ist mit dem unter Abschnitt 5.2 beschriebenen ξ -Faktor in obigen Berechnungen enthalten. Bei der 5 %-Fraktile der Sicherheitsbeiwerte ergibt die Optimierung für "NORRIS-einfach" $v_{5\%} = 2,76$, für "NORRIS-erweitert" $v_{5\%} = 2,72$ und für den einfachen Nachweis mit $\sigma_{z\perp} = 0,20 \text{ N/mm}^2$ $v_{5\%} = 2,62$.

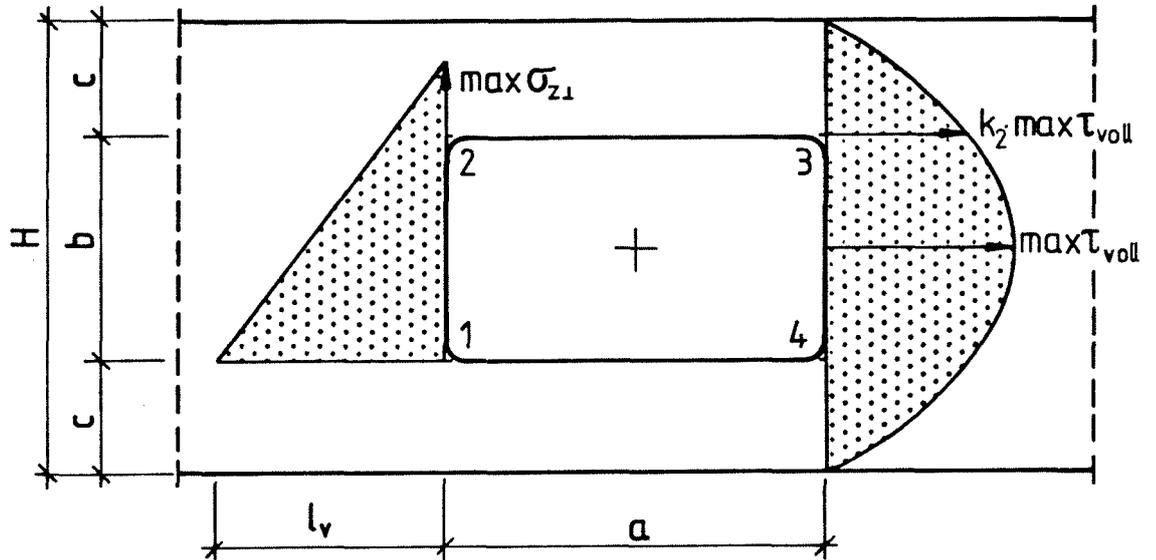
Damit sind die drei obigen Forderungen erfüllt. Der geringe Unterschied sowohl bei den Gesamtmittelwerten als auch bei den 5 %-Fraktile rechtfertigt den viel höheren Rechenaufwand für die NORRIS-Kriterien nicht, so daß bei allen weiteren Untersuchungen keine Spannungsinteraktion, sondern nur noch Nachweise der Einzelspannungen nach DIN 1052 berücksichtigt werden.

In Abb. 23, Beilage 27, sind die so ermittelten Sicherheitsbeiwerte über dem Verhältnis Höhe des Durchbruchs zur Trägerhöhe (b/H bzw. d/H) aufgetragen. Man erkennt daraus, daß das gewählte Berechnungsverfahren auch die Höhe des Durchbruchs in angemessener Weise berücksichtigt. Mit zunehmendem Verhältnis b/H bzw. d/H gibt es einen geringfügigen Anstieg der Sicherheitsbeiwerte, was im Hinblick auf das größere Sicherheitsrisiko bei größeren Durchbrüchen nicht unverwünscht ist. Die beiden niedrigen Werte bei $d/H = 0,25$ stammen aus Versuchen, bei denen offenbar Probleme mit der Verleimung bestanden hatten. Da ähnliche Fälle in der Praxis nicht völlig auszuschließen sind, wurden diese Werte nicht eliminiert. Sie bilden anschaulich die beiden Ausreißer, die theoretisch den 5 %-Fraktilewert unterschreiten können.

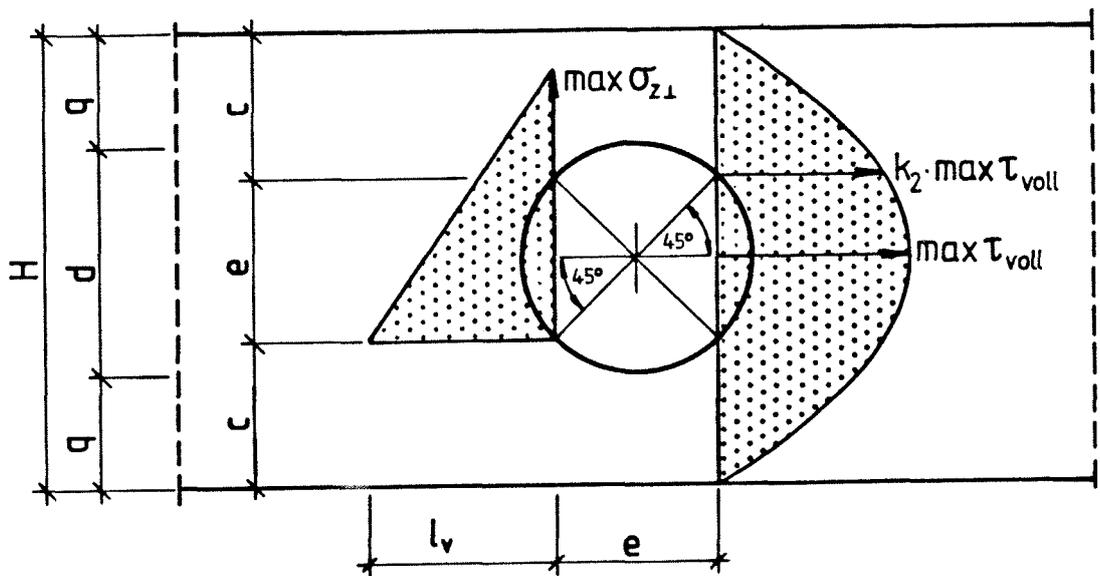
5.6 Berechnungsbeispiele

Für die praktische Berechnung von Brettschichtbindern mit symmetrischen Durchbrüchen wurde eine einfach anzuwendende Tabelle entwickelt, die in Beilage 28 enthalten ist. Die Tabelle enthält Hilfsgrößen und ist sowohl für den Rechteckdurchbruch als auch für den Kreisdurchbruch anwendbar, wobei als Eingangsgröße das Verhältnis von Durchbruchhöhe zu Trägerhöhe (b/H bzw. d/H) bekannt sein muß. Die anderen Hilfsgrößen zur Ermittlung der Schub- und Querkzugspannungen sind in den beiden folgenden Zeichnungen erläutert.

Rechteck-Durchbruch



Kreis-Durchbruch



Darin bedeutet l_v die Länge, auf die sich rechnerisch die Querkzugspannung verteilt, wenn ein dreieckförmiger Spannungsverlauf angenommen wird. Wird beachtet, daß c beim Rechteckdurchbruch der Randabstand des Durchbruchs und beim Kreisdurchbruch der Abstand des maßgebenden 45° -Sektors am Lochrand bis zur Ober- bzw. Unterkante des Trägers ist, ergibt sich für beide Durchbruchformen der Faktor k_1 als Klammerausdruck von Gleichung 2. Die Hilfsgröße k_2 ist ein Faktor, mit dem die maximale Schubspannung des Vollquerschnitts zu multiplizieren ist, um die Schubspannung im Abstand c vom Trägerrand zu erhalten. Die formelmäßige Auflösung für k_2 lautet

$$k_2 = \frac{4}{H^2} c (H-c) \quad (17)$$

Mit den Hilfwerten der Tabelle 5, Beilage 28, lassen sich die notwendigen statischen Nachweise für Brettschichtträger mit symmetrisch angeordneten Durchbrüchen auf 2 Formblättern, getrennt nach Rechteck- und Kreisdurchbruch, durchführen. An Hand von 3 Beispielen ist dies in den Beilagen 29 bis 31 gezeigt. Bei den Berechnungen wurde zunächst davon ausgegangen, daß die zulässige Biege- und Querkzugspannung für Brettschichtholz von 14 N/mm^2 voll ausgenutzt werden sollte. Die Berechnungen ergaben dann in der Regel Spannungsüberschreitungen. Werden keine Verstärkungen angeordnet, so ist diese im ersten Rechenschritt angenommene Gesamtlast F_{ges} im Verhältnis zur relativ größten Spannungsüberschreitung abzumindern.

In Beilage 29 ist die Berechnung für einen Brettschichtträger mit rechteckigem Durchbruch im Viertelpunkt gezeigt. Wenn die zulässige Biege- und Querkzugspannung in Feldmitte ausgenutzt wird, ergibt die Rechnung für die Biege- und Querkzugspannung im Lochbereich $\sigma_{II,a} = 17,9 \text{ N/mm}^2$ und für die Querkzugspannung im Lochbereich $\sigma_{z\perp} = 0,54 \text{ N/mm}^2$. Ohne Verstärkungsmaßnahmen ist für die Abminderung die Querkzugspannung maßgebend. Die zulässige Gesamtlast errechnet sich dann zu

$$F_{\text{ges}} = 49 \text{ kN} \frac{0,20 \text{ N/mm}^2}{0,54 \text{ N/mm}^2} = 18,1 \text{ kN}$$

Das bedeutet, durch den Durchbruch sinkt die zulässige Belastung auf rd. 37 % des ungeschwächten Trägers.

In dem in Beilage 30 gezeigten Berechnungsverfahren für einen Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich wird die Schubspannung in den Restquerschnitten $\tau_{\text{Gurt}} = 2,33 \text{ N/mm}^2$ und die Querkzugspannung im Durchbruch ergibt $0,81 \text{ N/mm}^2$. Die daraus errechnete zulässige Belastung von 12 kN beträgt nur noch rd. 1/4 derjenigen des ungeschwächten Trägers.

Für einen Kreisdurchbruch im Viertelpunkt ist in Beilage 31 das Berechnungsschema angegeben. Nur die Querkzugspannung überschreitet den zulässigen Wert. Die zulässige Gesamtbelastung errechnet sich daraus zu

$$49 \text{ kN} \cdot \frac{0,2 \text{ N/mm}^2}{0,5 \text{ N/mm}^2} = 19,5 \text{ N/mm}^2$$

Sie ist damit um 8 % höher als beim vergleichbaren Rechteckdurchbruch (vgl. Beilage 29).

6 Vorversuche zur Verstärkung von Durchbrüchen

Zu Beginn des Forschungsvorhabens war ursprünglich geplant, zur Verstärkung von runden Durchbrüchen auch eingeleimte innenliegende Verstärkungsringe aus Furnierschichtholz zu untersuchen. Die Berechnungen von Kapitel 4 zeigten jedoch, daß diese Art der Verstärkung nicht zum Erfolg führen kann, da dort, wo die Querkzugspannung am größten ist, eine Verleimung des Schichtholzringes mit dem Träger unter rd. 45° erfolgen würde. Dabei kann aber keine optimale Verleimung und damit auch keine optimale Trägerverstärkung gewährleistet werden. Hinzu kommt, daß der Schichtholzring die lichte Öffnung verringert. Oder anders ausgedrückt, wenn das Öffnungsmaß vorgegeben ist, muß bei der Herstellung des Durchbruchs die doppelte Dicke des Schichtholzringes zusätzlich berücksichtigt werden, was eine erhöhte Schwächung darstellt.

Im Hinblick auf die Verstärkung mit eingeleimten Gewindestangen liegen Vorschläge für die Dimensionierung vor¹⁾, die jedoch auf die vorgesehenen Durchbrüche nicht ohne weiteres angewendet werden können. In einigen wesentlichen Punkten unterscheiden sich die Annahmen dieses Dimensionierungsvorschlags von der geplanten Ausführung in dem Forschungsvorhaben:

- Es sollen keine Gewindestangen sondern Betonrippenstähle verwendet werden.
- Die Verklebung zwischen Stahl und Holz sollte nicht mit Resorcinharzleim sondern fugenfüllend mit Epoxidharz erfolgen.

Dadurch sollte eine einfache Herstellung der Verstärkung und eine definierte Verklebung von Stahl mit Holz und damit eine höhere Tragfähigkeit erzielt werden. Frühere Untersuchungen in unserem Institut haben gezeigt, daß die vorgesehene Verstärkungsart den herkömmlich mit Resorcinharzleim eingedrehten Gewindestählen überlegen ist. Um sicherzustellen, daß bei den Hauptversuchen die Querkräfte an den Stellen mit maximaler Querkraftbeanspruchung sicher von den eingeleimten Betonrippenstählen aufgenommen werden, wurden hierzu Vorversuche durchgeführt.

6.1 Probenmaterial

Für die Versuche wurde das Furnierschichtholz "Kertopuu" verwendet, das homogener als normales Brettschichtholz ist und damit geringere Streuungen in den Versuchswerten erwarten ließ.

1) Möhler, K.; Siebert, W.: Eingeleimte Gewindestangen. Statik Aktuell Folge 6 Mai 1981

Die Betonrippenstähe für die Querkzugverstärkung hatten die Kennzeichnung BSt 420/500 RU, d.h. die Mindeststreckgrenze beträgt 420 N/mm^2 und die Mindestzugfestigkeit 500 N/mm^2 . Die Bohrlöcher wurden 2 mm größer als der Kerndurchmesser d_e der Rippenstähe gebohrt, was in etwa dem Außendurchmesser der Rippenstähe entsprach, so daß die Stähle ohne Zwängung in die Bohrlöcher paßten. Der Verguß zwischen dem Stahlprofil und dem Bohrloch erfolgte mit dem Epoxidharz "WEVO-Spezialharz EP 20" mit Härter "WEVO-Härter B 20". Es wurden je 6 Probekörper mit der Größe (B x H x L) 63 mm x 125 mm x 300 mm hergestellt, wobei die Leimschichten der Furniere parallel zur Außenfläche (125 mm x 300 mm) verliefen. Sowohl hinsichtlich der geometrischen Verhältnisse als auch des Faserverlaufs lagen somit ähnliche Verhältnisse wie bei den geplanten Hauptversuchen vor. Folgende Kennzeichnung wurde verwendet.

Typ I : 2 eingeleimte BSt, $d_e = 8 \text{ mm}$

Typ II : 2 eingeleimte BSt, $d_e = 10 \text{ mm}$

Typ III: 1 eingeleimter BSt, $d_e = 20 \text{ mm}$

Einzelheiten zu den Probekörpern gehen aus Abb. 24, Beilage 32, hervor.

6.2 Versuchsdurchführung

Die Tragfähigkeit der eingeleimten Betonrippenstähe wurde im Ausziehversuch ermittelt. Durch entsprechende Niederhalter, die das Holz an den eingeleimten Stählen auf eine Länge von 100 mm frei ließen, konnte eine passende Einspannungsform für die Zugprüfmaschine gefunden werden. Die Versuche wurden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min zügig bis zum Versagen durchgeführt.

6.3 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Vorversuche sind in nachfolgender Zusammenstellung 2 aufgeführt.

Zusammenstellung 2
Ergebnisse aus den Vorversuchen

Probekörper	Stahl	max F kN	Versagen
I.1	2 BSt $d_e = 8 \text{ mm}$	62,0	1. Stab Scherbruch Holz-, 2. Stab Stahlbruch
I.2		61,5	
I.3		61,0	
I.4		61,5	
I.5		61,0	
I.6		62,0	
Mittelwert \bar{x}_I		61,5	
II.1	2 BSt $d_e = 10 \text{ mm}$	77,5	Scherversagen im Holz
II.2		79,2	
II.3		76,5	
II.4		75,0	
II.5		69,8	
II.6		77,0	
Mittelwert \bar{x}_{II}		75,8	
III.1	BSt $d_e = 20 \text{ mm}$	59,3	Scherversagen im Holz
III.2		59,0	
III.3		61,5	
III.4		61,5	
III.5		60,0	
III.6		63,1	
Mittelwert \bar{x}_{III}		60,7	

Bei den Probekörpern mit $d_e = 8 \text{ mm}$ war überwiegend der Stahl für das Versagen maßgebend. Die mittlere Bruchspannung in den Betonrippenstählen war rd. 610 N/mm^2 und lag damit über der zugesicherten Mindestfestigkeit von 500 N/mm^2 . Bei den anderen Probekörpern trat ausschließlich ein Scherversagen im Holz auf.

In Abb. 25, Beilage 33, ist Probekörper II.5 mit $d_e = 10$ mm nach Erreichen der Höchstlast von 69,8 kN dargestellt. Darauf ist deutlich zu sehen, daß das Holz parallel zu den Leimfugen v-förmig abgeschernt wurde. Die Zugkraft konnte vom eingeleimten Betonstahl sicher auf das Holz übertragen werden. Nicht die Verleimung sondern das Holz hat versagt.

Im Hinblick auf die Forschungsarbeit wurden die Versuchsergebnisse nach der übertragbaren Haftspannung in der Einleimung und nach der Höchstlast pro Stab jeweils in Abhängigkeit vom Durchmesser ausgewertet.

Haftspannung

Trotz der geriffelten Mantelfläche der Betonrippenstähle wird entsprechend DIN 488 T2 nur mit dem Nenndurchmesser gerechnet.

Probekörper I: mittlere Höchstlast für 2 Stähle: 61,5 kN
Mantelfläche für 1 Stahl: $125 \cdot 25,1 = 3148 \text{ mm}^2$
maximale Haftspannung:

$$\max \tau = \frac{61\,500}{2 \cdot 3148} = 9,8 \text{ N/mm}^2$$

Probekörper II: mittlere Höchstlast für 2 Stähle: 75,8 kN
Mantelfläche für 1 Stahl: $125 \cdot 31,4 = 3925 \text{ mm}^2$
maximale Haftspannung

$$\max \tau = \frac{75\,800}{2 \cdot 3925} = 9,6 \text{ N/mm}^2$$

Probekörper III: mittlere Höchstlast für 1 Stahl: 60,7 kN
Mantelfläche: $125 \cdot 62,8 = 7850 \text{ mm}^2$
maximale Haftspannung

$$\max \tau = \frac{60\,700}{7850} = 7,7 \text{ N/mm}^2$$

Diese Zusammenhänge sind in Abb. 26, Beilage 34, graphisch dargestellt. Die Haftspannung sinkt nahezu linear mit Zunahme des Nenndurchmessers.

Höchstlast pro Einzelstab

Das vorgeschlagene Dimensionierungsverfahren verwendet die Querkraft Z , errechnet aus der Summe der resultierenden Querkzugspannungen, so daß die Kenntnis der übertragbaren Querkraft pro Betonrippenstahl wichtig ist. Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 27, Beilage 34, aufgetragen. Daraus ist zu sehen, daß die Höchstlast pro Einzelstab in erster Näherung linear mit dem Nenndurchmesser steigt. Unter Berücksichtigung der Eckpunkte ergibt sich in den Grenzen $8 \text{ mm} \leq d_e \leq 20 \text{ mm}$ folgende lineare Gleichung

$$\gamma = 10,75 + 2,5 d_e$$

Die Höchstlast γ pro Stab wird in kN erhalten, wenn der Nenndurchmesser d_e in mm eingesetzt wird. Es ist zu beachten: obige Gleichung gilt nur für die untersuchte Einleimlänge von 125 mm.

7 Hauptversuche zur Verstärkung von Trägerdurchbrüchen und Vergleich mit dem Berechnungsverfahren

Das vorgeschlagene Berechnungsverfahren war aus Versuchsergebnissen an Trägern mit unverstärkten Durchbrüchen entwickelt worden. Es war jetzt zu untersuchen, ob damit auch Verstärkungsmaßnahmen wirklichkeitsnah dimensioniert werden können. Damit der Gültigkeitsbereich des Berechnungsverfahrens nicht verlassen wird, sind für die Praxis gewisse geometrische Randbedingungen der Trägerdurchbrüche festzulegen. Im Vorgriff auf diese Festlegungen wurden die Hauptversuche mit solchen Durchbrüchen durchgeführt, die gerade noch zulässig sein sollen.

Im einzelnen wurden festgelegt:

- Abstand von Trägerende bis Beginn des Durchbruchs : $l_v = H$
- Randabstand von Binderober- bzw. Binderunterkante bis Beginn des Durchbruchs : $c = 0,25 H$
- Länge der rechteckigen Durchbrüche : $a = H$

Gegenüber den Richtlinien [1] wurde hier der Abstand vom Trägerende bis zum Beginn des Durchbruchs festgelegt und der Randabstand von $0,3 H$ auf $0,25 H$ verringert. Die erste Maßnahme ergibt sich aus den Querkzugspannungen am Trägerende (vgl. Abschnitt 4). Die zweite Maßnahme, die einem Verhältnis b/H von $0,5$ entspricht, erschien folgerichtig, da in das Berechnungsverfahren aus unverstärkten Durchbrüchen sogar Versuchswerte mit noch kleineren Randabständen ($0,225 \cdot H$) eingeflossen sind.

7.1 Probenmaterial

Träger

Wie bei den Vorversuchen wurde für die Versuchsträger "Kertopuu"-Furnierschichtholz verwendet. Die Abmessungen ($B \times H \times L$) betragen $63 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 5500 \text{ mm}$, wobei die Holzfaserrichtung des Furnierschichtholzes in Trägerlängsachse verlief. Die Leimflächen und damit die einzelnen Furnierschichten waren bei den Versuchsträgern stehend angeordnet.

Baufurnierplatten - Verstärkung

Für einen Teil der Verstärkungen wurden Bauurnierplatten aus Buche (BFU-BU) der Holzwerkstoffklasse 100 mit 10 mm bzw. 12 mm Dicke, je nach der rechnerischen Beanspruchung, verwendet. Die Platten wurden mit einem geprüften Resorcinharzleim aufgeleimt (zweiseitige Leimangabe), wobei der Preßdruck mit Hilfe von Nägeln (Nagel-Preßleimung) aufgebracht wurde.

Betonrippenstahl - Verstärkung

Zur Aufnahme der Querkraftkräfte in den gefährdeten Bereichen der Durchbrüche wurden bei der Hälfte der Versuche eingeleimte Betonrippenstäbe (BSt 420/500 RU) verwendet. Da es nur darum ging, die maximal auftretenden Querkraftkräfte sicher aufzunehmen und nicht darum, die "Armierung" hinsichtlich der Einleimlänge zu optimieren, wurde für die auf Querkraft beanspruchten Ecken der Durchbrüche konstruktiv je 1 Betonrippenstahl mit einem Nenndurchmesser von $d_e = 16$ mm gewählt. Nach den Vorversuchen war für diese Nenndicke eine Höchstlast von rd. 51,5 kN zu erwarten. Nach dem Berechnungsverfahren tritt bei der Gebrauchslast eine maximale Zugkraft von rd. 10 kN auf (vgl. Beispiele in Abschnitt 5.6), so daß für die Verstärkung mit den eingeleimten Rippenstäben eine ausreichende Sicherheit gegen Versagen vorhanden ist. Der Bohrlochdurchmesser für die Betonrippenstäbe betrug 18 mm und war damit wie bei den Vorversuchen 2 mm größer als der Nenndurchmesser. Die Bohrung wurde bis auf eine Tiefe von $2/3 H$ ausgeführt, jeweils rechtwinklig von der Trägerkante aus gemessen. Da diese Verstärkungen sowohl rechtwinklig zur Trägerachse als auch unter 60° angeordnet wurden, bedeutet dies im ersten Fall eine Bohrlänge von rd. 320 mm und im zweiten Fall von 370 mm. Für das Einleimen der Stäbe wurde Epoxidharz "WEVO-Spezialharz EP 20" mit Härter "WEVO-Härter B 20" verwendet. Die Stahlteile wurden vorher mit Trichloräthylen entfettet.

7.2 Probenumfang, Versuchsdurchführung

Es standen 20 Träger wie oben beschrieben zur Verfügung. Da keine Untersuchungen an Trägerdurchbrüchen in Längsmitteln vorgesehen waren, konnten die Symmetrie ausgenutzt und mit jedem Träger 2 Versuche durchgeführt werden, wodurch sich 40 Einzelversuche ergaben. Durch die weiter unten beschriebenen Maßnahmen war gewährleistet, daß eine gegenseitige Beeinflussung der zwei Versuche am selben Träger nicht gegeben war.

In der obersten Darstellung von Abb. 28, Beilage 35, sind die Maße sowie die einzelnen Laststellen schematisch eingezeichnet, mit denen alle Versuche durchgeführt wurden. Die 4 Einzellaststellen ergaben sich aus den Forderungen

- Die Durchbrüche sollten im Auflagerbereich und in den Viertelpunkten angeordnet werden.
- Im Bereich der Durchbrüche sollten keine Lasteinleitungsstellen liegen.

Aus den anderen Darstellungen dieser Abbildung ist die Größe und Anordnung der Durchbrüche sowie die Art der Verstärkung zu ersehen. Von jedem Typ standen 2 Träger zur Verfügung. Auf der rechten Seite dieser Abbildung sind bei den Typen 1 bis 8 die Durchbrüche mit eingeleimten Betonrippenstählen dargestellt. Auf der linken Seite ist die Lage und Größe der einzelnen BFU-Verstärkungen vermaßt. Bei den gleichartig erscheinenden Aufdopplungen wurden an je 2 Probekörpern die BFU-Platten mit der Hauptfurnierrichtung in Trägerlängsachse und an je 2 Probekörpern quer dazu aufgeleimt. Im Verlauf der Versuche ergab sich kein nennenswerter Festigkeitsunterschied bei unterschiedlicher Furnierlage, so daß für die Typen 9 und 10 auf die achsparallele Aufdopplung verzichtet wurde und dafür die Hälfte der Träger ohne Verstärkung geprüft wurde. Dadurch konnte das Berechnungsverfahren für unsymmetrische unverstärkte Durchbrüche überprüft werden.

Nachfolgende Maßnahmen gewährleisteten, daß an einem Träger 2 Versuche unbeeinflusst durchgeführt werden konnten.

- Die unverstärkten bzw. mit Betonrippenstählen verstärkten Durchbrüche wurden zuerst geprüft. Die geplanten Durchbrüche an der anderen Trägerhälfte wurden hierbei vollflächig mit BFU-Platten verklebt, d.h. der eigentliche Durchbruch wurde sowohl im Sperrholz als auch im Träger erst nach Abschluß der Versuche an der rechten Trägerhälfte durchgeführt.

- Die Belastung dieser Versuche wurde nicht bis zum vollständigen Versagen der Träger gesteigert sondern nach Erreichen einer Rißweite von rd. 2 mm abgebrochen.
- Nach Abschluß der Prüfungen wurden die geprüften Trägerenden vollflächig mit BFU-Platten beplankt. Erst dann wurden die Durchbrüche an der anderen Binderhälfte herausgefräst.

Bei den Versuchen wurden die einzelnen Laststufen so gewählt, daß die erste Laststufe der halben zulässigen Last aus dem Berechnungsverfahren entsprach. Nach der 2. Laststufe wurde vollständig entlastet, um bleibende Verformungen festzuhalten. Danach wurde zügig auf das Lastniveau der 2. Laststufe belastet und weiter in den jeweiligen Lastintervallen bis zum Erreichen der vorgegebenen Rißweite bzw. bis zum Bruch belastet. Jeweils 2 Minuten nach Erreichen einer Laststufe wurden die Durchbiegung in Längsmitte sowie die Querdehnungen am Rande der Durchbrüche gemessen. Aus Abb. 29, Beilage 36, ist die Anordnung der Meßmarken für die Setzdehnungsmessung eingezeichnet. Zusätzlich sind aus dem linken Teil der Abbildung die Maße für den eingeleimten Rippenstahl unter 60° und aus dem rechten Teil diejenigen für den rechtwinklig angeordneten Stahl ersichtlich. Die entsprechenden Angaben für den Kreisdurchbruch sind aus Abb. 30, Beilage 37, ersichtlich.

7.3 Versuchsergebnisse und Vergleich mit dem Berechnungsverfahren nach Abschnitt 5

7.3.1 Rechteckige Durchbrüche mit gleichen Randabständen (symmetrische Anordnung)

Durchbruch im Viertelpunkt (Trägertypen 2 und 4)

Die Versuchsergebnisse mit dem Vergleich zur Rechnung und den Bruchbeschreibungen sind in Tabelle 6, Beilage 38, zusammengestellt. Bei den BFU-Verstärkungen wurde die Biegerandspannung von 14 N/mm^2 in Feldmitte als maßgebend angesehen. Die höhere Biegerandspannung im Lochbereich, $\sigma_{II a} = 17,9 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Beilage 29), wird durch die Beplankung mit den BFU-Platten rechnerisch kompensiert.

In Abb. 31, Beilage 39, ist der Träger K 4/1 nach Erreichen der Höchstlast $F_{\text{ges}} = 133 \text{ kN}$ dargestellt. Der Biegezugbruch im Lochbereich (Ecke 4) des Trägers K 4/4 nach Erreichen der Höchstlast $F_{\text{ges}} = 120 \text{ kN}$ ist in Abb. 32, Beilage 40, dargestellt.

Die Beanspruchung in der Baufurnierplatte bzw. in der Leimfuge ergibt sich mit den Werten aus Beilage 29 und den geometrischen Daten aus Beilage 35 und 38, die nochmals aufgeführt sind:

größte Zugkraft

$$Z = 6368 \text{ N}$$

Gesamtdicke der Verstärkung

$$t = 2 \cdot 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$$

Breite der Verstärkung im Querschnittsbereich

$$a_1 = 200 \text{ mm}$$

Höhe der Leimfläche, die die Zugkraft übertragen muß

$$0,5 \cdot b = 125 \text{ mm} = \text{unterer Randabstand}$$

Zug in Plattenebene

$$\sigma_z = \frac{Z}{t \cdot a_1} = \frac{6368}{20 \cdot 200} = 1,6 \text{ N/mm}^2 < 2,0 \text{ N/mm}^2$$

Scherspannung in der Leimfläche

$$\tau_a = \frac{Z}{2 \cdot a_1 \cdot 0,5 \cdot b} = \frac{6368}{2 \cdot 200 \cdot 125} = 0,13 \text{ N/mm}^2 < 1,5 \text{ N/mm}^2$$

Die als zulässig angesehenen Werte wurden in Anlehnung an [25] gewählt, wobei insbesondere bei $\sigma_z = 2,0 \text{ N/mm}^2$ der im Normentwurf E DIN 1052 vom August 1984 angegebene Wert $\sigma_{zx} = 4 \text{ N/mm}^2$ wegen der ungleichen

Spannungsverteilung entlang der Länge a_1 halbiert wurde. In den Fällen, in denen die Zugkraft Z parallel zur Furnierrichtung läuft, wurden die höheren zulässigen Normwerte nicht angesetzt, da die Versuche bei Furnierlagen rechtwinklig zur Trägerlängsachse keine wesentliche Laststeigerung brachten und dadurch höhere zulässige Werte in diesen Fällen nicht gerechtfertigt erscheinen.

Für die Durchbrüche mit eingeleimten Rippenstählen muß jedoch die hohe Biegerandspannung im Lochbereich berücksichtigt werden. Bei dieser Verstärkungsart kann keine Entlastung der Biegerandspannung erwartet werden. Im ungünstigsten Fall ist eher die Verschwächung durch die Bohrung zu berücksichtigen. Da davon ausgegangen werden kann, daß die Querkraft durch die Einleimung aufgenommen wird, errechnet sich die zulässige Belastung (vgl. Beilage 29) zu

$$49 \text{ kN} \cdot \frac{14,0}{17,9} = 38,3 \text{ kN}$$

Die Sicherheitsbeiwerte in Tabelle 6 wurden bei dieser Verstärkungsart mit $zul F = 38,3 \text{ kN}$ berechnet.

Die zugehörigen Dehnungen für diese Versuchsserie sind für die einzelnen Laststufen in Tabelle 7 und 8, Beilage 41 und 42, zusammengestellt. Eine graphische Auswertung dieser Werte findet sich - getrennt nach den Ecken 1 bis 4 - in den Darstellungen der Abb. 33, Beilage 43. Für den direkten Vergleich zwischen den Verstärkungsmaßnahmen eignet sich Ecke 1 und 2. Bei den unterschiedlichen Furnierrichtungen sind nur geringe Unterschiede festzustellen. Die gemessenen Dehnungen bei den eingeleimten Rippenstählen erlauben eine eindeutige Differenzierung: die Einleimung unter 90° zur Trägerkante ist weicher als diejenige unter 60° .

Durchbruch im Auflagerbereich (Trägertyp 1 und 3)

Die Versuchsergebnisse für die Rechteckdurchbrüche im auflagnahen Bereich mit gleichen Randabständen sind in Tabelle 9, Beilage 44, aufgeführt. Die zulässigen Beanspruchungen ergeben sich aus den Berechnungen aus Beilage 30, wobei die Schubspannung in den Gurten, $\tau_{\text{Gurt}} = 2,33 \text{ N/mm}^2$, von der Sperrholzaufdopplung aufgenommen werden kann und deshalb wegen der Schubspannung keine Abminderung vorzunehmen ist. Es wird dabei unterstellt, daß sich die Schubspannungen im Verhältnis der zulässigen Spannungen auf den Träger und auf die BFU-Aufdopplungen verteilen.

Bei den eingeleimten Stählen kann eine nennenswerte Schubkraftaufnahme hingegen nicht unterstellt werden. Die zulässige Gesamtlast reduziert sich daher auf

$$49 \text{ kN} \cdot \frac{1,2}{2,33} = 25,2 \text{ kN}$$

In Abb. 34, Beilage 45, ist Träger K 3/1 mit Sperrholzaufdopplung nach Erreichen der Höchstlast $F_{\text{ges}} = 147 \text{ kN}$ dargestellt. Träger K 3/4 mit rechtwinklig eingeleimten Rippenstählen ist aus Abb. 35, Beilage 46, nach Erreichen der Last $F_{\text{ges}} = 75 \text{ kN}$ zu sehen.

Die gemessenen Dehnungen sind in den Tabellen 10 und 11, Beilage 47 und 48, aufgeführt. Die graphische Darstellung der Dehnungen ist aus Abb. 36, Beilage 49, ersichtlich. Bei den Dehnungen ergeben sich gegenüber den Durchbrüchen im Viertelpunkt keine neuen Erkenntnisse.

7.3.2 Rechteckige Durchbrüche mit ungleichen Randabständen

Die Auswertung der Gleichungen 6) und 7) aus Abschnitt 5.1 liefert für die Trägertypen 9 und 10 die in nachfolgender Zusammenstellung 3 aufgeführten Werte, wobei auch hier zunächst von $F_{\text{ges}} = 49 \text{ kN}$ ausgegangen wurde.

Zusammenstellung 3

Ergebnisse bei ungleichen Randabständen

Bezeichnung	obenliegender Durchbruch	untenliegender Durchbruch
Zugkraft in Ecke 1 in Ecke 3	6093 N 3700 N	2720 N 6485 N
Schubspannung in Durchbruchmitte	1,56 N/mm ²	1,56 N/mm ²

Die größte Zugkraft, die bei dem Durchbruch unterhalb der Nulllinie auftritt, kommt aus dem Momentenzuwachs von Ecke 1 zu Ecke 3. Nach diesen Zahlen ist für den obenliegenden gegenüber dem untenliegenden Durchbruch - bei sonst gleichen geometrischen Abmessungen - rechnerisch eine rd. 6 % höhere Tragfähigkeit zu erwarten. Für den obenliegenden Durchbruch errechnet sich eine Querkzugspannung von $0,52 \text{ N/mm}^2$, was für den unverstärkten Träger zu einer zulässigen Gesamtlast von $49 \text{ kN} \cdot \frac{0,2}{0,52} = 18,8 \text{ kN}$ führt. Dabei wurde unterstellt, daß die Länge l , auf der die Querkzugspannung auftritt, 375 mm beträgt. Diese läßt sich aus der Tabelle 5 für den rechteckigen symmetrischen Durchbruch ablesen, wenn man bei demjenigen b/H -Verhältnis abliest, das denselben Randabstand ergibt. Im vorliegenden Fall bei $b/H = 0,5$; $l = l_v \cdot H = 0,75 \cdot 500 = 375 \text{ mm}$. Diese zulässige Last von $18,8 \text{ kN}$ wurde einheitlich für alle Träger mit

asymmetrischen, unverstärkten Durchbrüchen angesetzt. Da die Querkraft im Verhältnis der Höhen auf den unteren und oberen Restquerschnitt verteilt wurde, ist auch die Schubspannung im unteren und oberen Gurt gleich hoch.

Die Versuchsergebnisse zu dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 12, Beilage 50, zusammengestellt. Das Berechnungsverfahren liefert Sicherheitsbeiwerte, die größer als 3,3 waren, wobei bei Probekörper K 10/1 ein Biegezugbruch in Feldmitte auftrat, was die volle Wirksamkeit der Verstärkung unterstreicht.

In Abb. 37, Beilage 51, ist Träger K 9/1 mit rechteckigem untenliegenden Durchbruch im auflagernahen Bereich nach Erreichen der Höchstlast $F_{ges} = 171,5 \text{ kN}$ dargestellt. Der Bruch erfolgte als Querkzugbruch in Ecke 3.

Die gemessenen Dehnungen sind in den Tabellen 13 und 14, Beilagen 52 und 53, aufgeführt. Die zugehörige graphische Darstellung des Dehnungsverlaufs in den Ecken der Durchbrüche ist aus Abb. 38, Beilage 54, zu sehen.

Bei der Verstärkung der unsymmetrischen Durchbrüche mit BFU-Platten ist eine Besonderheit zu beachten, die sich aus der unterstellten parabelförmigen Schubspannungsverteilung in den Restquerschnitten ergibt. Es ist nicht nur sicherzustellen, daß die maximale Schubspannung anteilig durch die BFU aufgenommen wird, sondern auch, daß auch im nicht durch BFU abgedeckten Bereich die zulässige Schubspannung nicht überschritten wird. Aus diesem Grunde mußte der obere bzw. untere Überstand der BFU-Platten vergrößert werden (vgl. Beilage 35).

7.3.3 Runde Durchbrüche

Durchbruch im Viertelpunkt (Trägertyp 6 und 8)

Die Versuchsergebnisse bei dieser Durchbruchsart sind in Tabelle 15, Beilage 55, aufgeführt. Aus Abb. 39, Beilage 56, ist der Träger K 6/2 mit Sperrholzaufdopplung nach Erreichen der Höchstlast $F_{ges} = 171,5 \text{ kN}$ zu sehen. Die gemessenen Dehnungen sind in Tabelle 16 und 17, Beilage 57 und 58, zusammengestellt. In Abb. 40, Beilage 59, sind die Dehnungen graphisch ausgewertet. Wie bei den anderen Durchbrüchen zeigen sich auch hier gegenüber Ecke 1 und Ecke 3 deutlich höhere Dehnungen, die auf das größere Moment an dieser Stelle zurückgeführt werden.

Durchbruch im Auflagerbereich (Trägertyp 5 und 7)

Die Höchstlasten aus den Versuchen, die Vergleichszahlen zu den Berechnungen und die Bruchbeschreibungen für die Träger mit Durchbrüchen im auflagnahen Bereich sind in Tabelle 18, Beilage 60, enthalten. Die gemessenen Dehnungen ergeben sich aus den Tabellen 19 und 20, Beilagen 61 und 62. Die graphische Auswertung des Dehnungsverlaufs ist aus Abb. 41, Beilage 63, zu sehen. Betrachtet man Ecke 1 und 3, so sind die Dehnungen bei den rechtwinklig eingeleimten Betonrippenstählen bedeutend größer als bei den unter 60° eingeleimten Stählen bzw. wie bei den aufgeleimten Baufurnierplatten.

7.3.4 Vergleich von Rechteck- und Kreisdurchbruch

Bei der Gegenüberstellung geht es nur um die Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahmen bei den unterschiedlichen Durchbruchsformen. Das Verhältnis von Durchbruchhöhe zu Trägerhöhe (b/H bzw. d/H) ist in beiden Fällen 0,5. Im Vergleich zum Kreisdurchbruch ist die Fehlfläche im Träger beim Rechteckdurchbruch umso größer, je größer die Durchbruchlänge ist.

Viertelspunkt

Der Vergleich von Rechteck- und Kreisdurchbruch im Viertelspunkt ist aus dem Balkendiagramm in Abb. 42, Beilage 64, zu sehen. Bei den eingeleimten Betonrippenstählen ist zu beachten, daß hier evtl. noch höhere Lasten zu erreichen sind, wenn größere Rißweiten und damit auch größere Durchbiegungen toleriert werden können. Bei dieser Verstärkungsart sind keine Unterschiede zwischen Rechteck- und Kreisdurchbrüche festzustellen. Etwas anders verhält es sich bei den aufgeleimten Bau-furnierplatten. Hier trägt der verstärkte Kreisdurchbruch rd. 28 % mehr als der verstärkte Rechteckdurchbruch. Bei den Rechteckdurchbrüchen war immer noch ein Faktor von 2,7 gegenüber der Höchstlast vorhanden, der für die Tragsicherheit als ausreichend angesehen werden kann.

Auflagnaher Bereich

Bei den auflagnahen Durchbrüchen galten obige Feststellungen ebenfalls, wie aus Abb. 43, Beilage 65, ersichtlich ist. Während bei den eingeleimten Rippenstählen keine Differenzierung möglich ist, bringt der verstärkte Kreisdurchbruch eine rd. 22 % größere Höchstlast als der verstärkte Rechteckdurchbruch. Die Sicherheit gegen Versagen beträgt beim Rechteckdurchbruch noch 3,0, was ebenfalls ausreichend ist.

Bei den unverstärkten Trägerdurchbrüchen war zwischen den Rechteck- und Kreisdurchbrüchen praktisch kein Unterschied festgestellt worden. Die Sicherheit gegen Versagen bei verstärkten Rechteckdurchbrüchen mit BFU entspricht voll den Erwartungen, die bei der Herleitung des Berechnungsverfahrens unterstellt wurden. Bei den mit BFU verstärkten Kreisdurchbrüchen wurden noch höhere Sicherheitsbeiwerte erhalten. Eine mögliche Erklärung dafür dürfte in den Spannungsumlagerungen durch die BFU-Auf-leimung zu suchen sein, da dadurch sowohl die Querdruck- als auch die Querspannungen behindert werden. Was den eigentlichen Unterschied bei

den beplankten Durchbruchsformen ausmacht, ergibt sich aus dem Unterschied des Verhältnisses der Nettoverstärkungsfläche $A_{\text{BFU}\square} / A_{\text{BFU}\circ} = 1,85$ zum Verhältnis der Lochflächen $A_{\square} / A_{\circ} = 2,55$. Das heißt, obwohl die Lochfläche des Rechteckdurchbruchs 2,55mal größer ist als diejenige des Kreisdurchbruchs, ist die verstärkte Fläche nur 1,85mal so groß.

Die Sicherheiten gegen Versagen bei den mit BFU verstärkten Rechteckdurchbrüchen sind ausreichend. Eine Modifizierung des Berechnungsverfahrens ist daher nicht erforderlich.

7.3.5 Vergleich der Dimensionierung nach dem Berechnungsverfahren, nach der Richtlinie und nach dem Entwurf E DIN 1052

Das Berechnungsverfahren liefert Kräfte und Spannungen, mit denen nach den üblichen Verfahren der Festigkeitslehre dimensioniert werden kann. Es beschränkt sich also nicht auf die Verstärkung mit Baufurnierplatten wie die Richtlinie und E DIN 1052. Auch lassen sich damit unsymmetrisch angeordnete Durchbrüche berechnen, sofern der kleinste Randabstand $\geq 0,25 \cdot H$ ist.

Gegenüber den Festlegungen in der Richtlinie und E DIN 1052 wurde bei den Untersuchungen und für das Berechnungsverfahren das Verhältnis Durchbruchhöhe zu Trägerhöhe von 0,4 auf 0,5 vergrößert. Das heißt, daß die mit BFU verstärkten Durchbrüche, mit denen die Versuche durchgeführt wurden, nach der Richtlinie gar nicht zulässig sind. Um dennoch die erforderlichen Verstärkungsdicken für die Baufurnierplatten bei beiden Dimensionierungsverfahren vergleichen zu können, wird dies außer acht gelassen und auf die Ausführungen am Schluß dieses Abschnitts verwiesen.

Der seitliche Überstand a_1 der Baufurnierplatten, der in der Richtlinie mit $\geq 0,25 \cdot a$ angegeben wird, kann bis auf $0,6 \cdot (l_v/H) \cdot H$ verlängert werden, um die Aufdopplungsdicke zu reduzieren. Die Größe l_v/H findet sich in Tabelle 5, Beilage 28, l_v ist die Länge, auf die sich die Querspannungen bei unverstärkten Trägerdurchbrüchen dreiecksförmig erstrecken. Bei aufgeleimten Baufurnierplatten verteilen sich die Querspannungen wegen der dadurch bedingten Versteifung auf eine geringere Länge (s. Seite 11).

Die oberen und unteren Überstände b_1 der Baufurnierplatten brauchen in der Regel nicht größer als $0,25 \cdot a$ gewählt werden, sofern dies nicht zur Abdeckung der kerbelasteten Biege- und Schubspannung oder zur Aufnahme der Schubbeanspruchung erforderlich ist.

Während die Gesamtverstärkungsdicke in der Richtlinie tabellarisch in Abhängigkeit von der Schubspannung in Durchbruchsmitte bezogen auf den Vollquerschnitt angegeben wird, ist in E DIN 1052 die erforderliche Gesamtverstärkungsdicke formelmäßig in Abhängigkeit von der Schubspannung in Durchbruchsmitte bezogen auf den Nettoquerschnitt angegeben. Dies führt zwangsläufig bei großen Durchbrüchen zu Unterschieden.

In Zusammenstellung 4 sind für die untersuchten Trägertypen einige Vergleichsgrößen zusammengestellt.

Zusammenstellung 4

Vergleich einiger Größen, wie sie sich nach dem Berechnungsverfahren, nach der Richtlinie [1] und nach E DIN 1052 ergeben

Lage des Durchbruchs	Form des Durchbruchs	Überstand a_1		Gesamtverstärkungsdicke t			rechn. Zugspannung in Plattenebene σ_z		
		[mm]		[mm]			[N/mm ²]		
		BV	RL, E	BV	RL	E	BV	RL	E
Viertelspunkt	□	200	125	20	27 (30)	30	1,6	1,7	1,7
	○	100	125	20	27 (30)	30	2,0	1,1	1,1
Auflagerbereich	□	200	125	24	41 (40)	52 (50)	2,0	1,9	1,5
	○	140	125	20	41 (40)	52 (50)	2,0	1,1	0,9

BV = Berechnungsverfahren; RL = Richtlinie [1]; E = E DIN 1052

Die in Klammern angegebenen Zahlen ergeben sich durch Auf- bzw. Abrunden auf handelsübliche Plattendicken. Der Vergleich der Werte zeigt, daß die Richtlinie und E DIN 1052 durchweg größere Verstärkungsdicken als das Berechnungsverfahren liefert, bei allerdings teilweise geringeren seitlichen Überständen. Die zulässige rechnerische Zugspannung in Plattenebene, also rechtwinklig zur Trägerlängsachse, ist bei den rechteckigen Durchbrüchen nahezu gleich, wohingegen die kreisförmigen Durchbrüche nach der Richtlinie und nach E DIN 1052 überdimensioniert sind.

Die Angaben im Normenentwurf E DIN 1052 zur Gesamtverstärkungsdicke t führen zu unwirtschaftlichen Konstruktionen. Sie sollten zumindest auf die Werte der Richtlinie zurückgeführt werden. Es wird folgende einfache Formel vorgeschlagen

$$t \geq (0,15 + 0,4 \cdot \tau_Q) \cdot b$$

Im Vergleich zur Richtlinie liefert obige Gleichung bei voller Ausnutzung der zulässigen Schubspannung von $1,2 \text{ N/mm}^2$ eine Gesamtdicke der Verstärkung von 63 % der Trägerbreite gegenüber 65 % nach der Richtlinie.

Wenn kein genauere Nachweis der Verstärkungsmaßnahmen geführt wird, kann die Trägerverstärkung nach den Angaben der Richtlinie durchgeführt werden, wobei folgende Punkte zu beachten sind.

1. Das Verhältnis b/H darf den Wert 0,4 nicht überschreiten, um die kerbbelastete Biegerandspannung zu begrenzen.
2. Der Abstand vom Trägerende bis zum Beginn des Durchbruchs muß mindestens H betragen, um unverwünschte Querspannungen am Trägerende zu begrenzen.
3. Die Baufurnierplatten sind in gleichen Dicken beidseitig auf die Träger aufzuleimen, um Zusatzspannungen zu vermeiden.

4. Die kleinste Plattendicke muß bei mindestens 5lagigem Aufbau 10 mm betragen. Es ist nur Bau-Furniersperrholz nach DIN 68 705 Teil 3 der Holzwerkstoffklasse AW 100 aus Buchenholz oder Laubholz gleicher Festigkeit (z.B. Birke) zu verwenden.
5. Die Faserrichtung der Deckfurniere muß parallel zur Trägerlängsachse verlaufen. Obwohl die Festigkeit der Platte bei mindestens 5lagigem Aufbau keine größeren Unterschiede in Plattenebene parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung der Deckfurniere aufweist, ist das Langzeitverhalten der Verleimung bei achsparalleler Furnierlage günstiger, da die Spannungsspitzen am Plattenrand rheologisch besser abgebaut werden können.

Bei einem genaueren Nachweis nach dem Berechnungsverfahren und Verstärkung mit Baufurnierplatten kann das Verhältnis b/H bis auf den Wert 0,5 vergrößert werden. Die Punkte 2 bis 5 sind auch hier zu beachten.

8 Zusammenfassung

Für die Verstärkung von Durchbrüchen in Brettschichtträgern besteht eine Richtlinie, die allerdings nur Verstärkungen mit Baufurnierplatten erlaubt. Im Zusammenhang mit der Neufassung von DIN 1052 wurde angestrebt, ein einfaches Berechnungsverfahren zu entwickeln. Es sollte allgemein gültig sein und Kräfte bzw. Spannungen liefern, mit denen nach den Regeln der Festigkeitslehre die durchbrochenen Träger bzw. die Verstärkungsmaßnahmen dimensioniert werden können.

Die Literaturübersicht ergab, daß zwar viele Versuche an unverstärkten und verstärkten, durchbrochenen Brettschichtträgern durchgeführt wurden, aber bis jetzt noch kein einfaches Berechnungsverfahren für die Praxis existierte.

Mit Hilfe der Finite-Element-Methode wurde der Spannungsverlauf bei ausgesuchten Durchbruchsformen untersucht. Dabei war festzustellen, wo Spannungsmaxima auftreten und welche Spannungsarten für ein einfaches Berechnungsverfahren relevant sind. Für folgende Trägertypen wurden 5 Berechnungen vergleichend durchgeführt: Vollwandträger ohne Durchbruch, mit Durchbruch und durchbrochene Träger mit 3 unterschiedlich dicken seitlichen Beplankungen. Die Berechnungen ergaben für den Rechteckdurchbruch in den Ecken bei allen Spannungsarten Spannungsspitzen. Bei dem Kreisdurchbruch wurden Konzentrationen der Schubspannungen an der oberen und unteren Tangente des Durchbruchs und Querspannungskonzentrationen in den Winkelhalbierenden der Quadranten festgestellt. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt dabei im Mittelpunkt des Kreisdurchbruchs. Bei rechteckigen Durchbrüchen im Viertelpunkt der Träger ergaben sich am Trägerrand Änderungen der Längsspannungen bis zu $\pm 35\%$ gegenüber dem Vollwandträger ohne Durchbruch.

Durch aufgeleimte Baufurnierplatten reduzieren sich vorwiegend die Spannungen rechtwinklig zur Trägerlängsachse (bis um 75 %). Die Spannungsreduzierung bei den Längsspannungen beträgt rd. 10 %, die der Schubspannungen maximal 20 %. Mit zunehmender Baufurnierplattendicke steigt die Spannungsreduzierung im Brettschichtholz nur unterproportional.

Aus der Kenntnis der theoretischen Spannungsverteilungen heraus wurden einfache Ansätze für die Berechnungsverfahren aufgestellt, deren Parameter mit Hilfe der Versuchsergebnisse aus der Literatur so bestimmt wurden, daß der 5 %-Fraktilenwert der Sicherheitsbeiwerte gegen Versagen aus allen Versuchen zwischen 2,5 und 2,75 lag. An Hand von Beispielen wurde die Anwendung des Berechnungsverfahrens für unverstärkte Trägerdurchbrüche vorgeführt.

Die Überprüfung der Brauchbarkeit des Berechnungsverfahrens zur Dimensionierung von Verstärkungen wurde an Hand von 40 Versuchen durchgeführt. Der Vergleich der nach dem Berechnungsverfahren als zulässig

angesehenen Belastungen mit den erreichten Höchstlasten in den Versuchen bestätigen die Brauchbarkeit des Berechnungsverfahrens. Bei dem ausgesuchten Probenmaterial aus Furnierschichtholz für die Versuchsträger wurden mit wenigen Ausnahmen Sicherheitsbeiwerte > 3 erzielt. Da dieses Furnierschichtholz im Hinblick auf die hier maßgebliche Querkzug- und Scherfestigkeit nicht besser als Brettschichtholz aus Nadelholz ist, können die Ergebnisse ohne Bedenken auf Brettschichtholz übertragen werden.

Die Dimensionierung der aufgeleimten Baufurnierplatten nach dem Berechnungsverfahren ergibt durchweg geringere Verstärkungsdicken als die Richtlinie und E DIN 1052. Die Richtlinie liefert also Verstärkungen, die auf der sicheren Seite liegen. Sie kann nach den durchgeführten Untersuchungen mit einigen Erweiterungen weiterhin angewendet werden, wenn kein genauere Nachweis geführt wird. Die Angaben im Normenentwurf E DIN 1052 führen zu unwirtschaftlichen Konstruktionen. Sie sollten daher zumindest auf die Werte der Richtlinie zurückgeführt werden.

9 Literatur

- [1] ANONYM 1976: Richtlinien zur Verstärkung von Durchbrüchen in Brettschichtträgern. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 1 Mai 1976
- [2] BENGTTSSON, S.; DAHL, G. 1971: Inverkan av hål nära upplag på hållfastheten hos limträbalkar. Lunds Tekniska Högskola, Byggnadsteknik II, Examensarbete in schwedisch, zitiert bei [11]
- [3] BOWER, J.E. 1966: Elastic Stresses Around Holes in Wide-Flange Beams
J.Str. Div. 92, 85 - 101
- [4] BOWER, J.E. 1968: Ultimate Strength of Beams with Rectangular Holes
J.Str. Div. 94, 1315 - 1337
- [5] GONGDON J.G.; REDWOOD, R.G. 1970: Plastic Behavior of Beams with Reinforced Holes
J.Str. Div. 96, 1933 - 1956
- [6] EICHSTAEDT, H.J. 1970: Spannungsbilder für einen ausgeklinkten Balken unter Berücksichtigung der Anisotropie des Holzes
Bauen mit Holz 72, 600 - 601
- [7] HEMPEL, G. 1970: Der ausgeklinkte Balken
Bauen mit Holz 72, 394 - 395
- [8] HENRICI, D. 1976: Spannungsoptische Untersuchung rechtwinklig ausgeklinkter sowie lochbelasteter Biegeträger
Holz Roh- Werkstoff 34, 91 - 100
- [9] HENRICI, D. 1984: Beitrag zur Spannungsermittlung in ausgeklinkten Biegeträgern aus Holz
Dissertation TU München

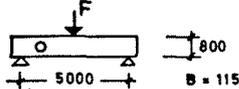
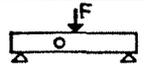
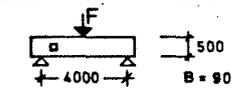
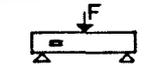
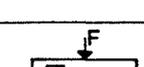
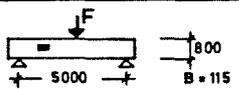
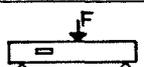
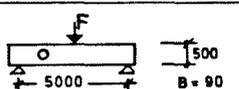
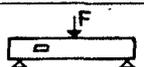
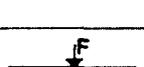
- [10] HILTSCHER, R.; FLORIN, G. 1965: Zugspannungen in der Umgebung einer belasteten Aussparung bzw. eines belasteten treppenförmigen Absatzes an einer Scheibe
Die Bautechnik 42, 202 - 209
- [11] JOHANNESSON, B. 1977: Holes in Plywood Beams and Glued Laminated Timber Beams. Stress Concentrations and Crack Loads.
Chalmers University of Technology Göteborg
- [12] JOHANNESSON, B. 1978: On the Design of Glued Laminated Timber Beams with Holes
Chalmers University of Technology Göteborg
- [13] JOHANNESSON, B. 1983: Design Problems For Glulam Beams with Holes. Dissertation Chalmers University of Technology Göteborg
- [14] KAVAJA, J.; PENTTALA, V. 1983: Reiällisen Liimapuupalkin Vahvistaminen Ruuveilla
Helsinki University of Technology
Division of Structural Engineering Heft Nr. 55
- [15] KOLB, H.; FRECH, P. 1974: Untersuchungen mit durchbrochenen Bindern aus Brettschichtholz. Forschungsbericht H 30721, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Stuttgart
- [16] KOLB, H.; FRECH, P. 1975: Untersuchungen mit durchbrochenen Leimbindern in Brettschichtbauweise. Forschungsbericht H 31993, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Stuttgart
- [17] KOLB, H.; FRECH, P. 1976: Untersuchungen mit durchbrochenen Leimbindern in Brettschichtbauweise. Forschungsbericht H 31993/1, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Stuttgart

- [18] KOLB, H.; FRECH, P. 1977: Untersuchungen an durchbrochenen Bindern aus Brettschichtholz
Holz Roh- Werkstoff 35, 125 - 134
- [19] KOLB, H.; ROHLFING, H. 1980: Durchbrochene Leimbinder in Brettschichtbauweise, Forschungsbericht I.4-33596, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Stuttgart
- [20] KOLLMANN, F. 1952: Über die Abhängigkeit einiger mechanischer Eigenschaften von der Zeit, von Kerben und von der Temperatur. Zweite Mitteilung: Die Bedeutung von Kerben für die Holzfestigkeit
Holz Roh- Werkstoff 10, 239 - 244
- [21] KRABBE, E.; SCHOWE, W. 1977: Spannungstheoretische Untersuchungen an hohen, durchbrochenen Brettschichtträgern.
Forschungsbericht, Ruhr-Universität Bochum, Arbeitsgruppe Ing.-Holzbau und Baukonstruktionen
- [22] MANN, W. 1975: Über die Ausbildung von Balkenauflagern und Auflagerkonsolen aus Stahlbeton
Beton- und Stahlbetonbau 70, 1 - 4
- [23] MISTLER, H.-L. 1979: Die Tragfähigkeit des am Endauflager unten rechtwinklig ausgeklinkten Brettschichtträgers.
Dissertation Universität Karlsruhe (TH)
- [24] MÖHLER, K.; MISTLER, H.-J. 1978: Untersuchungen über den Einfluß von Ausklinkungen im Auflagerbereich von Holzbiegeträgern auf die Tragfestigkeit.
Forschungsbericht, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
- [25] MÖHLER, K.; RATHFELDER, M. 1979: Konstruktive Möglichkeiten zur Aufnahme von Schub- und Querkzugspannungen bei Brettschichtträgern
Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 4 Mai 1979

- [26] MÖHLER, K.; SIEBERT, W. 1983: Erhöhung der Querkzugfestigkeit in gefährdeten Bereichen.
Forschungsbericht, Universität Karlsruhe (TH),
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
- [27] REDWOOD, R.G.; CHAN, P.W. 1974: Design Aids For Beams With Circular Eccentric Web Holes
J.Str. Div. 100, 297 - 303
- [28] PENTTALA, V. 1980: Reiällinen Liimapuupalkki
Helsinki University of Technology, Division of
Structural Engineering Heft Nr. 33
- [29] SAHMEL, P. 1969: Konstruktive Ausbildung und Näherungsberechnung geschweißter Biegeträger und Torsionstäbe mit großen Stegausehnehmungen
Schweissen und Schneiden 21, 116 - 122
- [30] SAWIN, G.N. 1956: Spannungserhöhungen am Rande von Löchern (Übersetzung aus dem Russischen von H. Neuber)
VEB Verlag Technik, Berlin
- [31] STEINLE, A.; ROSTÁSY, F.S. 1975: Zum Tragverhalten ausgeklinkter Trägerenden
Beton + Fertigteil-Technik 41, 270 - 277; 337 - 341

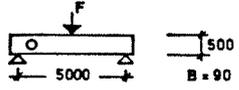
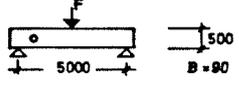
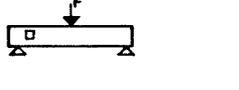
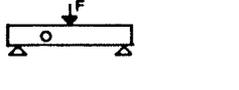
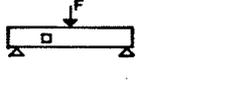
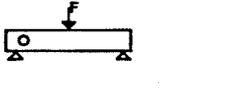
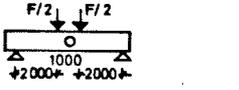
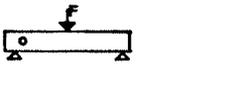
Quelle	Bezeichnung	Skizze	Holz GKL	Durchbruch		Verhältnis		Höchstlast max F [kN]	Feldmitte max σ_B [N/mm ²]	Auflager max τ_A [N/mm ²]	Bruchbeschreibung
				$a \times b$ [mm x mm] ϕ	d [mm]	b/H bzw. d/H	a/b				
[15]	D/II		I	ϕ 250 x 250	0,45	1,00	62,4 68,4	15,5 17,0	1,1 1,2	Querzugbruch in den Ecken und Schubbruch bis zum Auflager	
	G/II		I	ϕ 250 x 150	0,27	1,67	84,0 92,0	20,8 22,8	1,4 1,6	Querzugbruch in den Ecken und Schubbruch bis zum Auflager	
	E/II		I	ϕ 250 x 250	0,45	1,00	66,0 69,2	16,4 17,1	1,1 1,2	Querzugbruch in den Ecken	
	H/II		I	ϕ 250 x 150	0,27	1,67	76,4 65,2	19,0 16,2	1,3 1,1	Querzugbruch in den Ecken	
	C/III		I	ϕ 300 x 300	0,55	1,00	140,0 140,0	41,4 41,4	2,4 2,4	Biegebruch in Trägerlängsmitte und Querzugbruch an den oberen Ecken	
	B/III		I	ϕ 300	0,55	-	133,6 140,0	39,5 41,4	2,3 2,4	Biegebruch in Trägerlängsmitte	
	J/III		I	ϕ 300	0,55	-	75,2 68,0	22,3 20,1	1,3 1,2	Querzugbruch in den Mittelstücken zwischen den Laststellen	
[28]	P/1		L 40 D (I)	ϕ 255	0,51	-	67,6	18,0	1,1	Querzugbruch im Lochbereich	
	P/2		L 40 D (I)	ϕ 252	0,50	-	63,1	16,8	1,1	Querzugbruch im Lochbereich	
	P/3		L 40 D (I)	ϕ 152	0,30	-	102,6	27,4	1,7	Querzugbruch im Lochbereich	

Tabelle 1 a Versuchsergebnisse aus der Literatur von durchbrochenen Brettschichtbindern ohne Verstärkung

Quelle	Bezeichnung	Skizze	Holz GKl.	Durchbruch		Verhältnis		Höchstlast max F. [kN]	Feldmitte max σ_B [N/mm ²]	Auflager max T_A [N/mm ²]	Bruchbeschreibung
				\varnothing a x b [mm x mm] \varnothing d [mm]	b/H bzw. d/H	a/b					
[28]	P/4		L 40 D (I)	\varnothing 401	0,5	-	131,8	13,4	1,1	Querzugbruch am Lochrand in der Leimfuge bei schlechter Verleimung	
	P/5		L 40 D (I)	\varnothing 303	0,38	-	178,9	18,2	1,5	Querzugbruch im Lochbereich	
	P/6		L 40 D (I)	\varnothing 202 x 202	0,40	1,00	67,6	18,0	1,1	Querzugbruch im Lochbereich	
	P/7		L 40 D (I)	\varnothing 400 x 201	0,40	2,00	62,5	16,7	1,0	Querzugbruch in den Ecken und Schubbruch bis zum Auflager	
	P/8		L 40 D (I)	\varnothing 601 x 201	0,40	3,00	60,0	16,0	1,0	Querzugbruch in den Ecken und Schubbruch bis zum Auflager	
	P/9		L 40 D (I)	\varnothing 403 x 204	0,25	2,00	138,2	14,1	1,1	Querzugbruch in den Ecken	
	P/10		L 40 D (I)	\varnothing 601 x 203	0,25	3,00	168,8	17,2	1,4	Querzugbruch in den Ecken und Schubbruch bis zum Auflager	
[2]	A1		*	\varnothing 250	0,50	-	78,4	26,1	1,3	Querzugbruch am Lochrand	
	B1		*	\varnothing 300 x 150	0,3	2,00	78,4	26,1	1,3	Querzugbruch in den Ecken	
	D		*	\varnothing 200 x 100	0,2	2,00	100,6	33,5	1,7	Querzugbruch in den Ecken	

*) keine Angaben

Tabelle 1 b 1. Fortsetzung. Versuchsergebnisse aus der Literatur von durchbrochenen Brettschichtbindern ohne Verstärkung

Quelle	Bezeichnung	Skizze	Holz GKL	Durchbruch		Verhältnis		Höchstlast max F. [kN]	Feldmitte max σ_B [N/mm ²]	Auflager max τ_A [N/mm ²]	Bruchbeschreibung
				\square a x b [mm x mm] ϕ d [mm]	b/H bzw. d/H	a/b					
[2]	C		*	ϕ 150	0,30	-	105,0	35,0	1,8	Biegezugbruch in Feldmitte	
[11]	L1		L 40 (I)	ϕ 125	0,25	-	79,0 66,8	26,3 22,3	1,3 1,1	Querzugbruch im Lochbereich	
	L2		L 40 (I)	\square 250 x 250	0,50	1,00	61,0 52,9	20,3 17,6	1,0 0,9	Querzugbruch in den Ecken	
	L3		L 40 (I)	ϕ 250	0,50	-	70,0 79,7	23,3 26,6	1,2 1,3	Querzugbruch im Lochbereich	
	L4		L 40 (I)	\square 250 x 250	0,50	1,00	51,9 50,4	17,3 16,8	0,9 0,8	Querzugbruch in den Ecken	
	L5		L 40 (I)	ϕ 250	0,50	-	89,8 77,6	29,9 25,9	1,5 1,3	Querzugbruch im Lochbereich	
	L5/M		L 40 (I)	ϕ 250	0,50	-	163,6	43,6	2,7	Querzugriß am oberen Rand des Durchbruchs	
	L6		L 40 (I)	ϕ 125	0,25	-	80,3 80,0	26,8 26,7	1,3 1,3	Kein Versagen im Lochbereich (Biegezugbruch in Feldmitte)	

*) keine Angaben

Tabelle 1 c 2. Fortsetzung. Versuchsergebnisse aus der Literatur von durchbrochenen Brettschichtbindern ohne Verstärkung

Quelle	Bezeichnung	Skizze	Holz GKL.	Durchbruch		Verhältnis		Verstärkung	Höchstlast max F [kN]	Feldmitte max σ_B [N/mm ²]	Auflager max τ_A [N/mm ²]	Bruchbeschreibung
				\square ϕ	a x b [mm x mm] d [mm]	b/H bzw. d/H	a/b					
[15]	F/I		I	\square 250 x 250	0,45	1,00	beidseitig mit 30 mm Wolff-Stegplatten. Faserrichtung achs- parallel $a_1 = 150, b_1 = 150$	140,0 124,8	34,7 31,0	2,4 2,1	Querzugbruch und Schubbruch Biegezugbruch	
	K/I		I	\square 250 x 250	0,45	1,00	beidseitig mit 30 mm Wolff-Stegplatten. Faserrichtung unter 45° $a_1 = 150, b_1 = 150$	165,2 150,8	41,0 37,4	2,8 2,6	Biegezugbruch in Feldmitte	
[16]	I		I	\square 1000 x 400	0,40	2,5	beidseitig mit 35 mm BFU. Faserrichtung achsparallel $a_1 = 330, b_1 = 200$	360,0 371,2	28,9 29,8	1,9 2,0	Biegezugbruch in Feldmitte	
	II		I	\square 1000 x 400	0,40	2,5	beidseitig mit BFU; links je Seite 25 mm rechts je Seite 35 mm $a_1 = 250, b_1 = 160$	288,0 379,0	28,8 37,9	1,5 2,0	Biegezugbruch in Feldmitte	
[17]	III		I	\square 1000 x 400	0,40	2,5	beidseitig mit BFU; links je Seite 15 mm rechts je Seite 25 mm $a_1 = 250, b_1 = 160$	359,0 360,0	36,1 36,2	1,9 1,9	Biegezugbruch in Feldmitte	
	IV		I	\square 1000 x 400	0,40	2,5	beidseitig mit BFU; links je Seite 15 mm rechts je Seite 25 mm $a_1 = 250, b_1 = 160$	359,0 360,0	36,1 36,2	1,9 1,9	Biegezugbruch in Feldmitte	
[18]	V		I	\square 1000 x 400	0,40	2,5	beidseitig mit BFU; links je Seite 15 mm rechts je Seite 25 mm $a_1 = 250, b_1 = 160$	359,0 360,0	36,1 36,2	1,9 1,9	Biegezugbruch in Feldmitte	
	VI		I	\square 1000 x 400	0,40	2,5	beidseitig mit BFU; links je Seite 15 mm rechts je Seite 25 mm $a_1 = 250, b_1 = 160$	359,0 360,0	36,1 36,2	1,9 1,9	Biegezugbruch in Feldmitte	
[14]	K/1		L 40 (I)	ϕ 250	0,50	-	vorgebohrte Sechskantholzschrauben (16 mm) unter 60°	138,0	36,8	2,3	Biegezugbruch in Feldmitte	
	K/2		L 40 (I)	ϕ 250	0,50	-	vorgebohrte Sechskantholzschrauben (16mm) unter 60°	130,0	34,7	2,2	Biegezugbruch unterhalb dem Durchbruch	
	K/3		L 40 (I)	ϕ 160	0,30	-	vorgebohrte Sechskantholzschrauben (16 mm) unter 60°	176,0 ¹⁾	-	-	Biegezugbruch in Feldmitte	

1) Höchstlast geschätzt!

Tabelle 2 a Versuchsergebnisse aus der Literatur von durchbrochenen Brettschichtträgern mit Verstärkung

Quelle	Bezeichnung	Skizze	Holz GKl.	Durchbruch		Verhältnis		Verstärkung	Höchstlast max F [kN]	Feldmitte max σ_B [N/mm ²]	Auflager max τ_A [N/mm ²]	Bruchbeschreibung
				ϕ	a x b [mm x mm] d [mm]	b/H bzw. d/H	a/b					
[14]	K/4		L 40 (I)	ϕ	400	0,50	-	vorgebohrte Sechskantholzschrauben (16 mm) unter 60°	280,2	26,0	2,3	Schubbruch an Unterkante Durchbruch mit sekundärem Biegebruch
	K/5		L 40 (I)	ϕ	300	0,38	-	vorgebohrte Sechskantholzschrauben (16 mm) unter 60°	280,9	26,0	2,3	Biegezugbruch im Viertelpunkt in der Nähe des Durchbruchs
	K/6		L 40 (I)	ϕ	250	0,50	-	vorgebohrte Sechskantholzschrauben (16 mm) unter 90°	139,5	37,1	2,3	Biegezugbruch in Feldmitte
	K/7		L 40 (I)	ϕ	155	0,31	-	vorgebohrte Sechskantholzschrauben (16 mm) unter 90°	162,3	42,3	2,7	Biegezugbruch im Drittelspunkt
	K/8		L 40 (I)	ϕ	300	0,38	-	vorgebohrte Sechskantholzschrauben (16 mm) unter 90°	312,1	28,9	2,5	Schubbruch bis zum Auflager
	K/9		L 40 (I)	ϕ	250	0,50	-	durchgehende Gewindestangen (19 mm) ohne Leim unter 60°	148,1	39,5	2,5	Biegezugbruch rd. 50 cm außerhalb der Feldmitte
	K/10		L 40 (I)	ϕ	300	0,38	-	durchgehende Gewindestangen (19 mm) ohne Leim unter 60°	261,9	24,3	2,1	Biegezugbruch unterhalb des Durchbruchs

Tabelle 2 b Fortsetzung. Versuchsergebnisse aus der Literatur von durchbrochenen Brettschichträgern mit Verstärkung

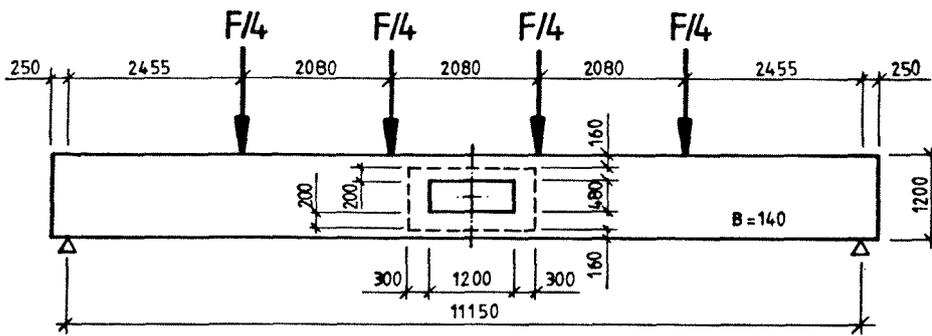


Abb.1 Brettschichtträger mit Durchbruch in Längsmittle

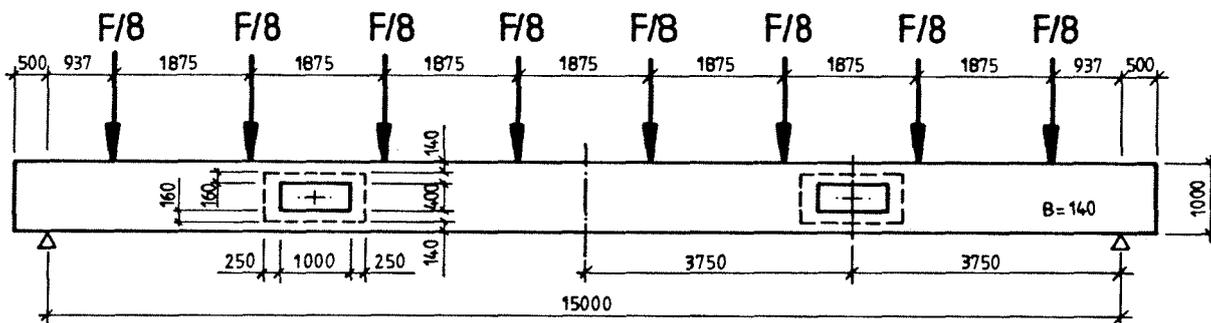


Abb.2 Brettschichtträger mit Durchbruch in den Viertelpunkten

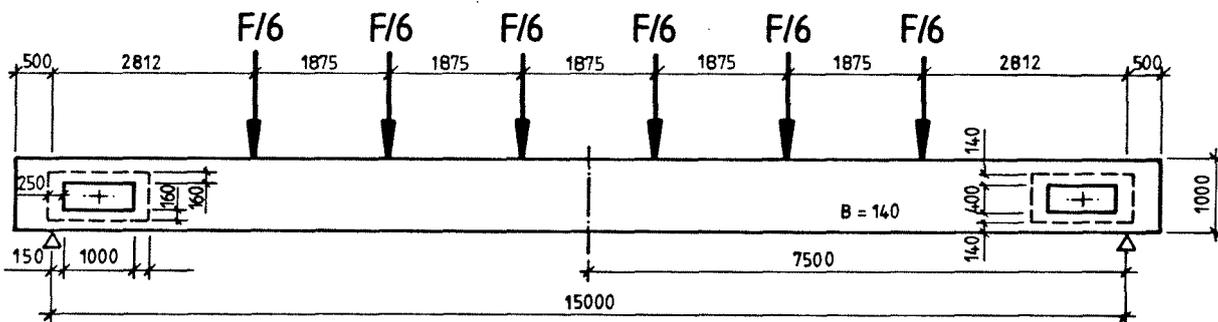


Abb.3 Brettschichtträger mit Durchbruch in den Auflagerbereichen

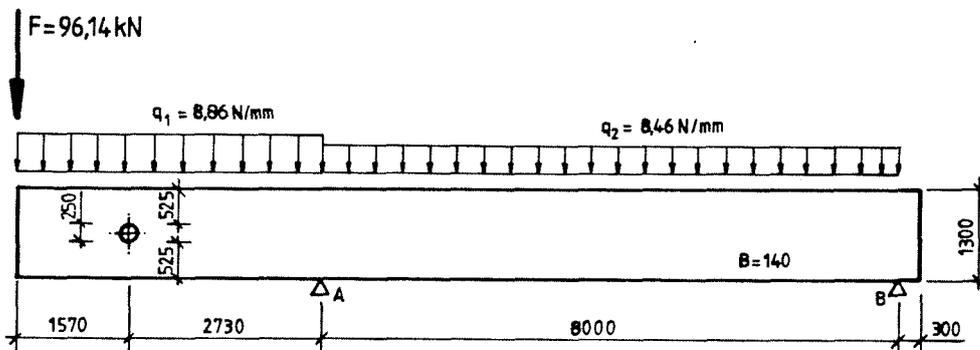
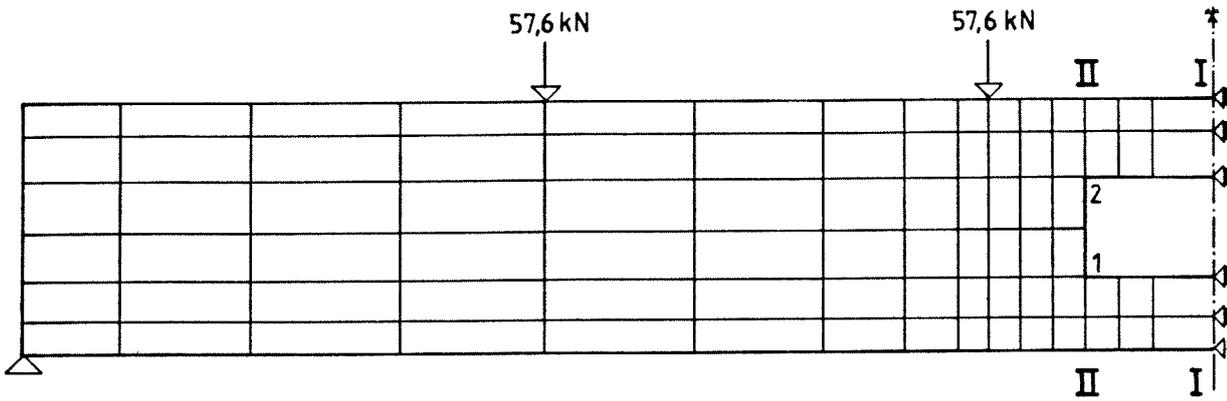
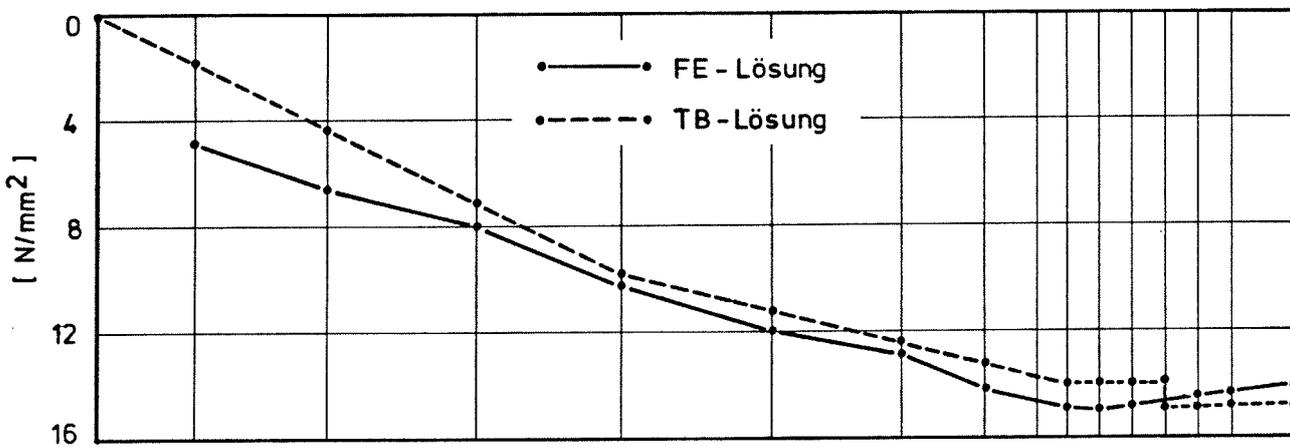


Abb.4 Kragarmträger aus Brettschichtholz mit kreisförmigem Trägerdurchbruch



Biegerandspannung Unterkante Träger



Schnitt II - II

Schnitt I - I

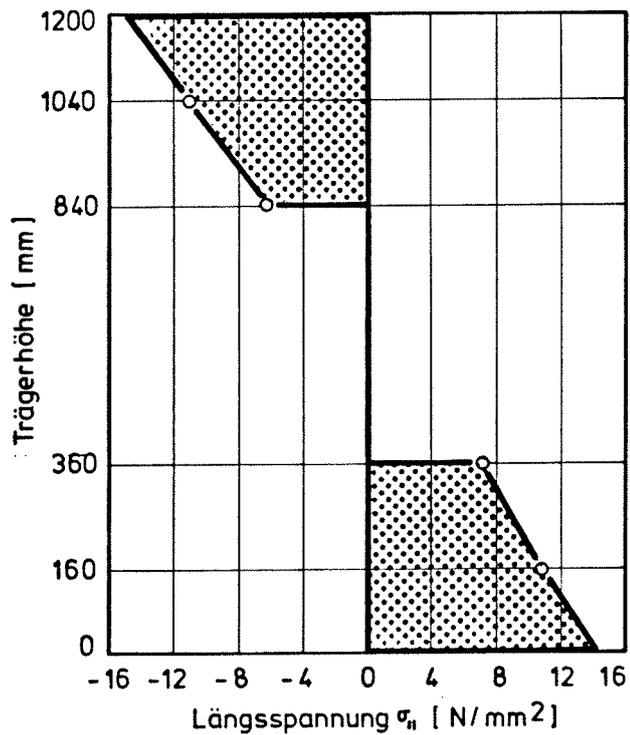
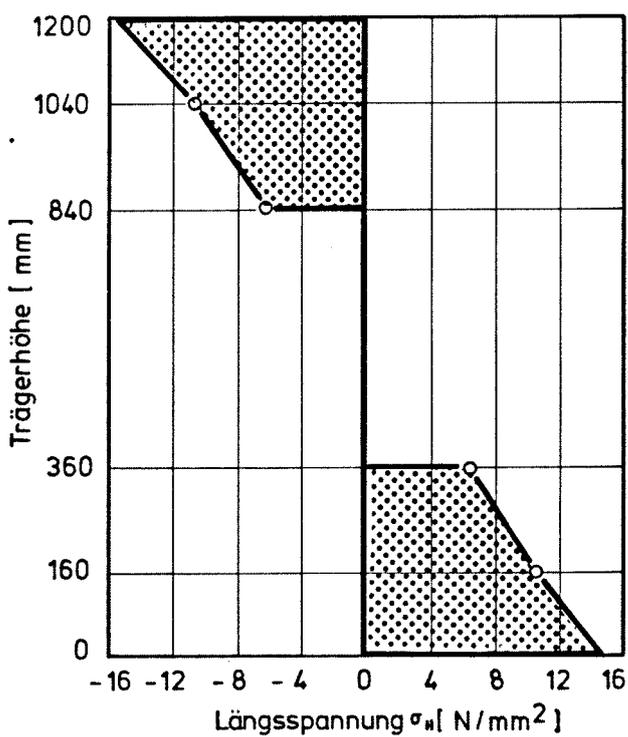


Abb.5 Rechteckdurchbruch in Längsmittle. Längsspannungen

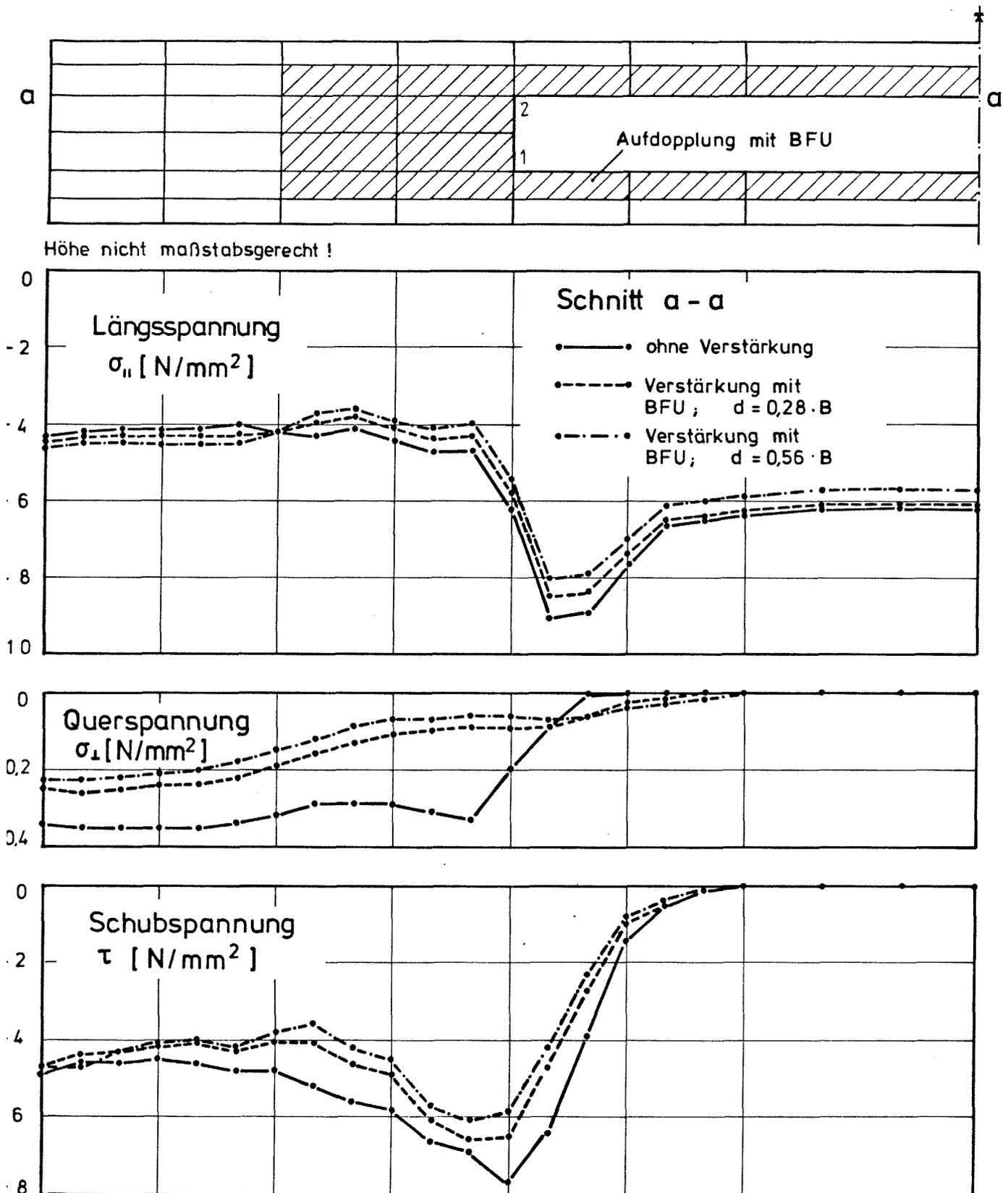


Abb.6 Rechteckdurchbruch in Längsmittle
Spannungen entlang der Durchbruchoberkante, Schnitt a-a

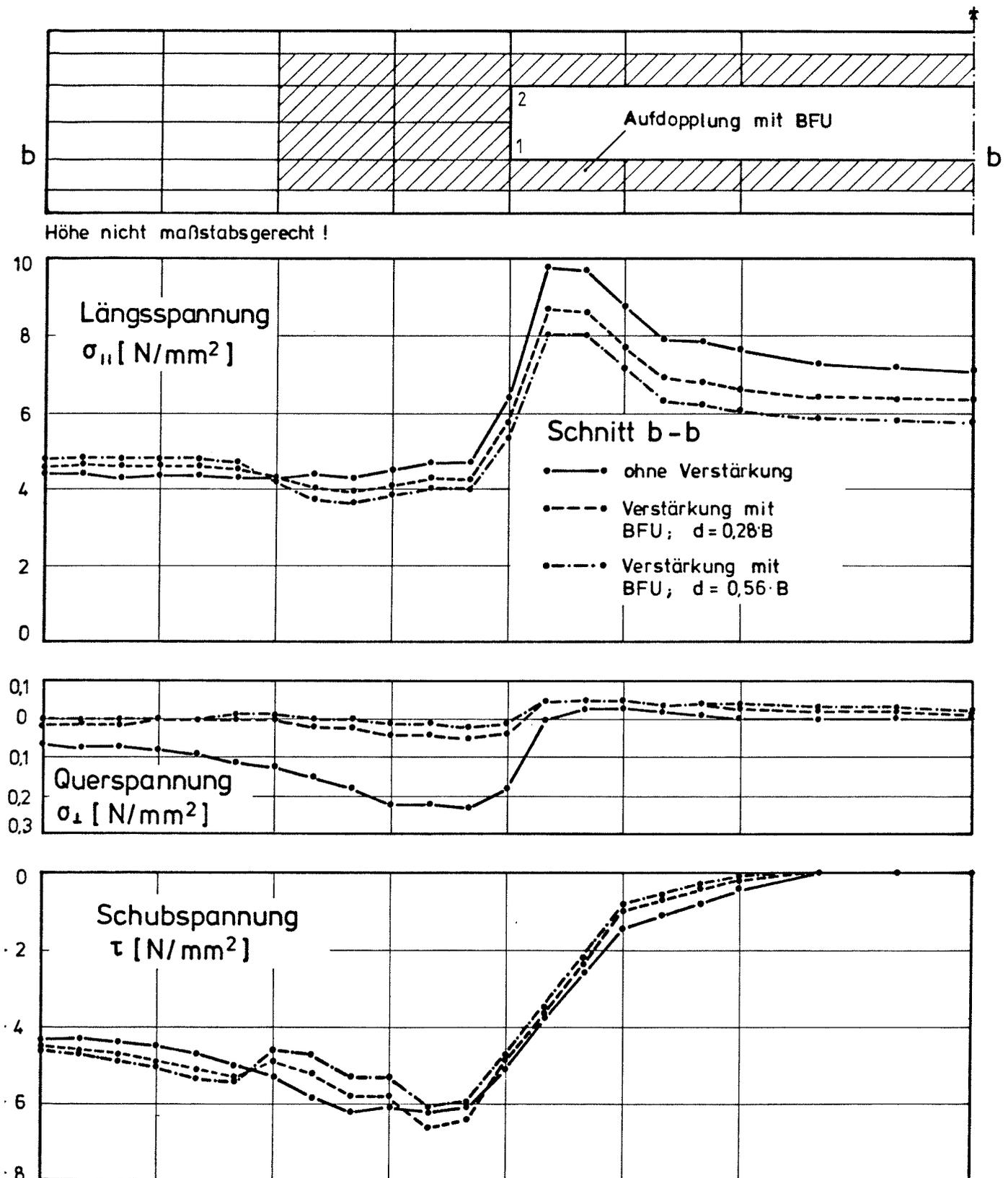
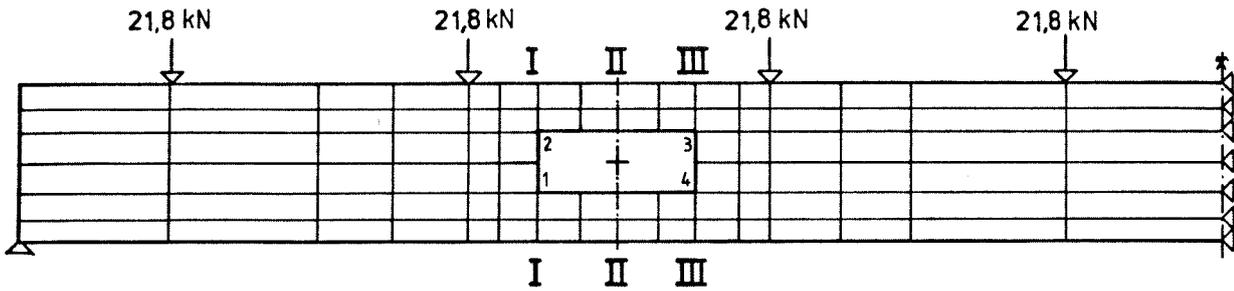
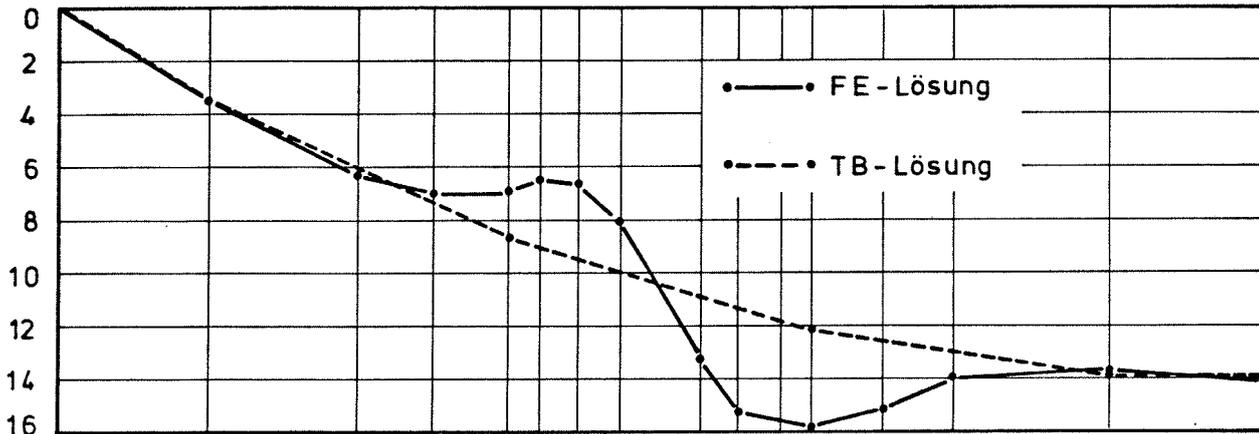


Abb.7 Rechteckdurchbruch in Längsmittle
Spannungen entlang der Durchbruchunterkante, Schnitt b-b

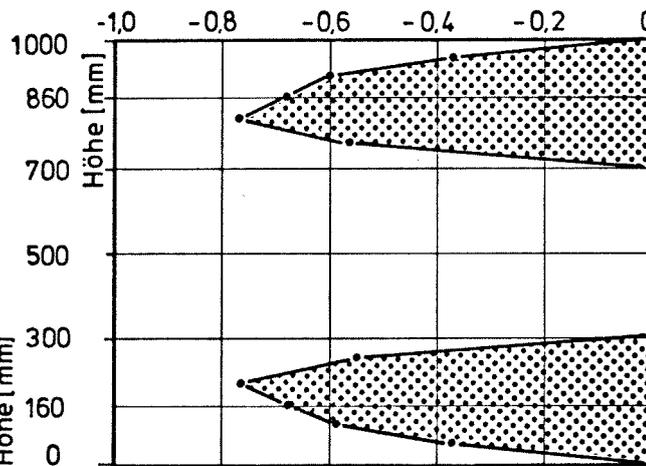
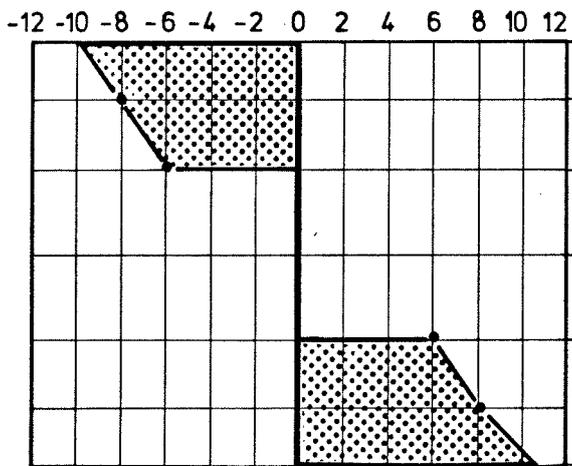


Unterkante Brettschichtträger Biegerandspannung [N/mm²]



Schnitt II: Längsspannung σ_x [N/mm²]

Schnitt II: Schubspannung τ [N/mm²]



Schnitt I: Querspannungen σ_z [N/mm²]

Schnitt III: Querspannungen σ_z [N/mm²]

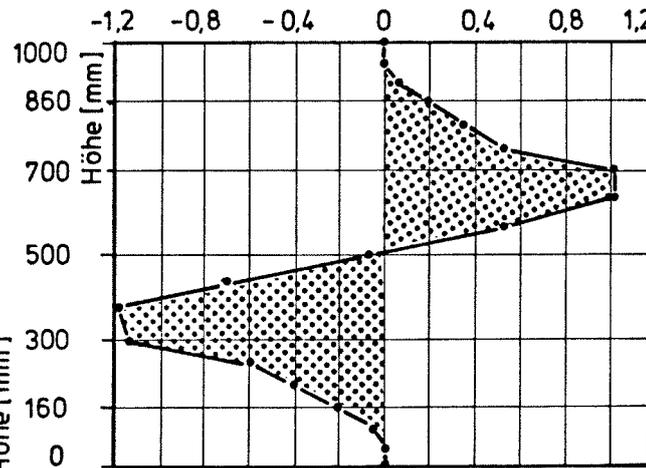
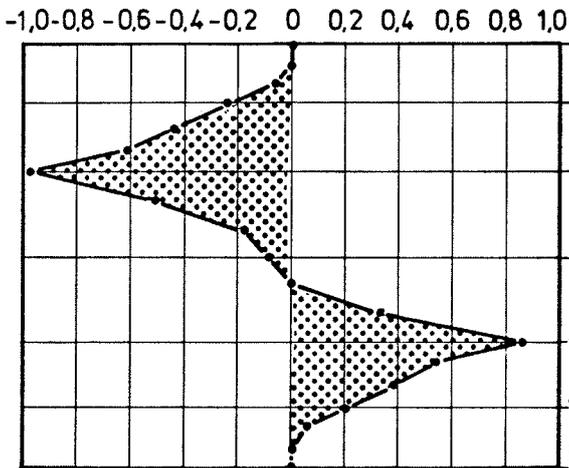
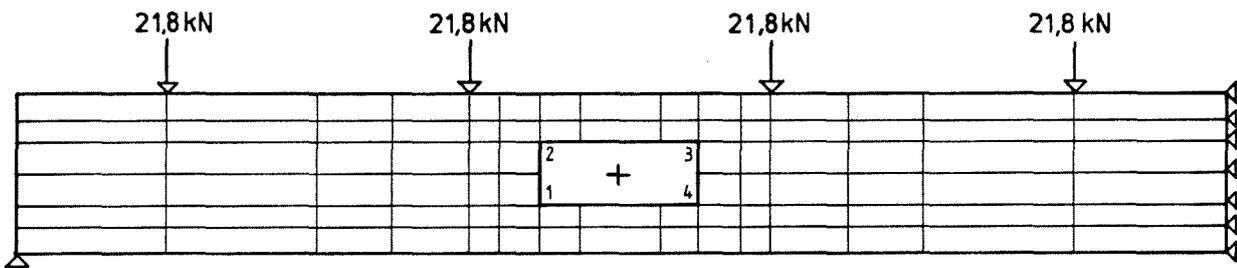
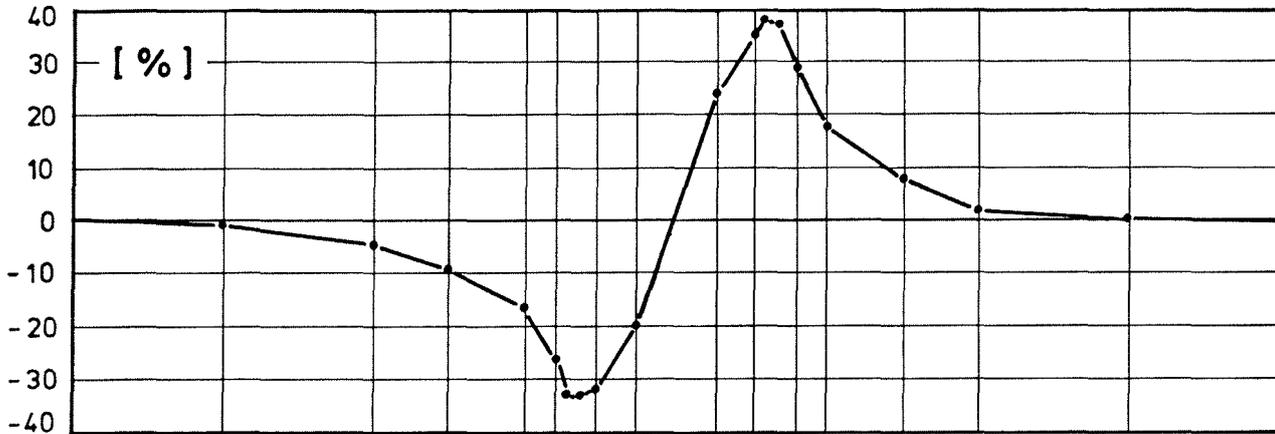


Abb. 8 Rechteckdurchbruch im Viertelpunkt

Änderung der Biegerandspannung am Obergurt zufolge Durchbruch



Änderung der Biegerandspannung am Untergurt zufolge Durchbruch

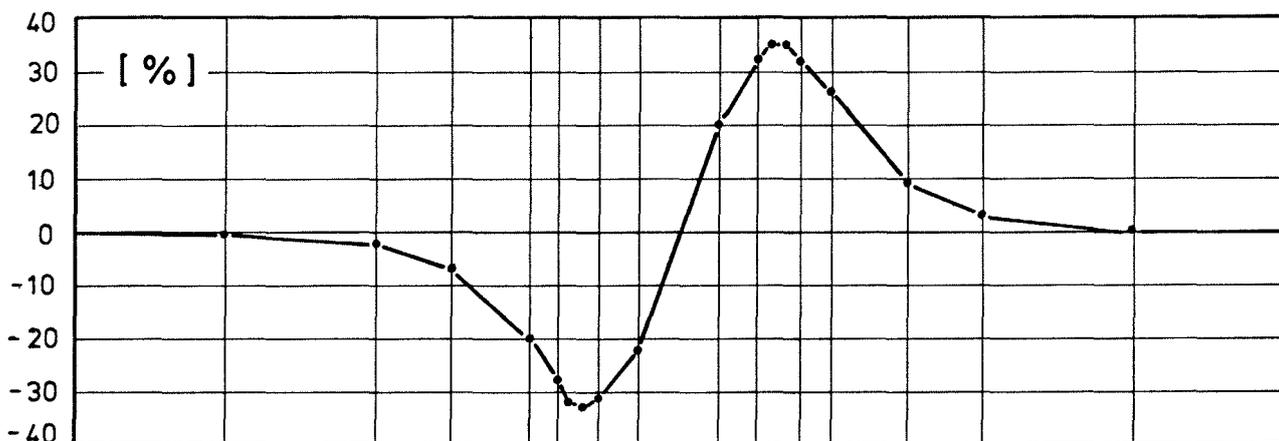


Abb. 9 Rechteckdurchbruch im Viertelpunkt. Prozentuale Änderung der Biegerandspannung zufolge Durchbruch

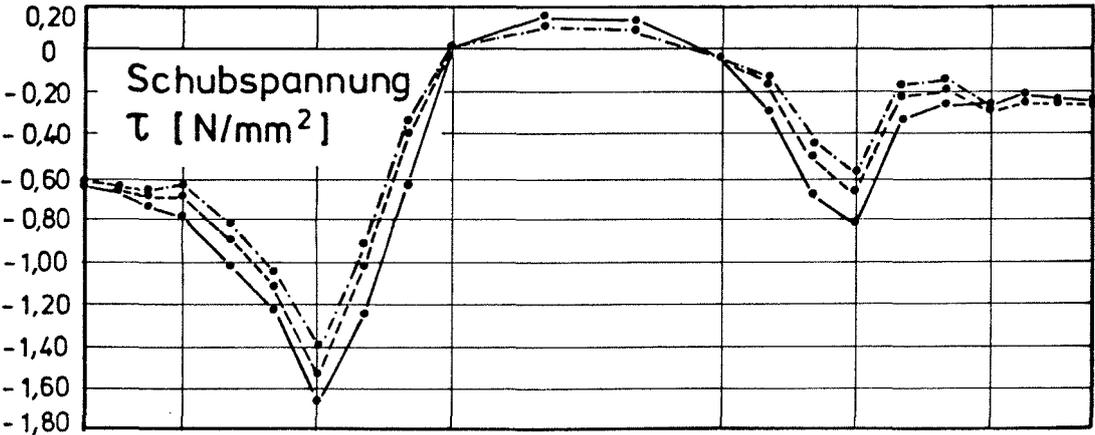
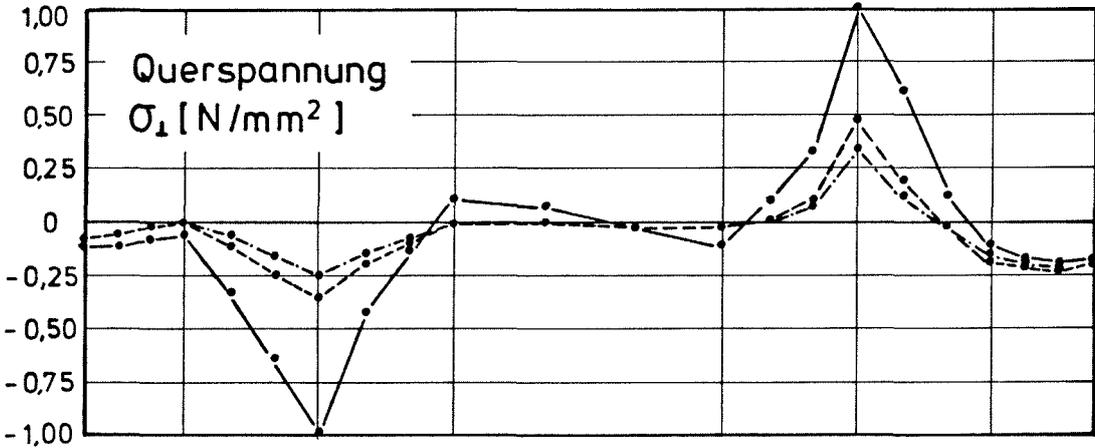
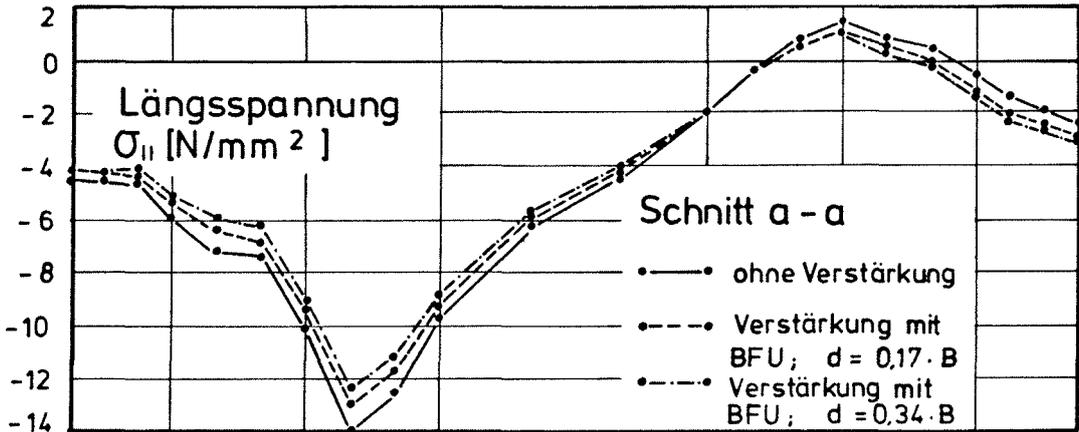
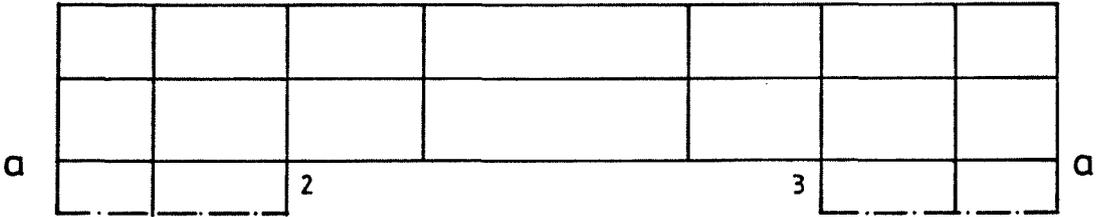


Abb. 10 Rechteckdurchbruch im Viertelpunkt. Spannungen entlang der Durchbruchoberkante, Schnitt a-a

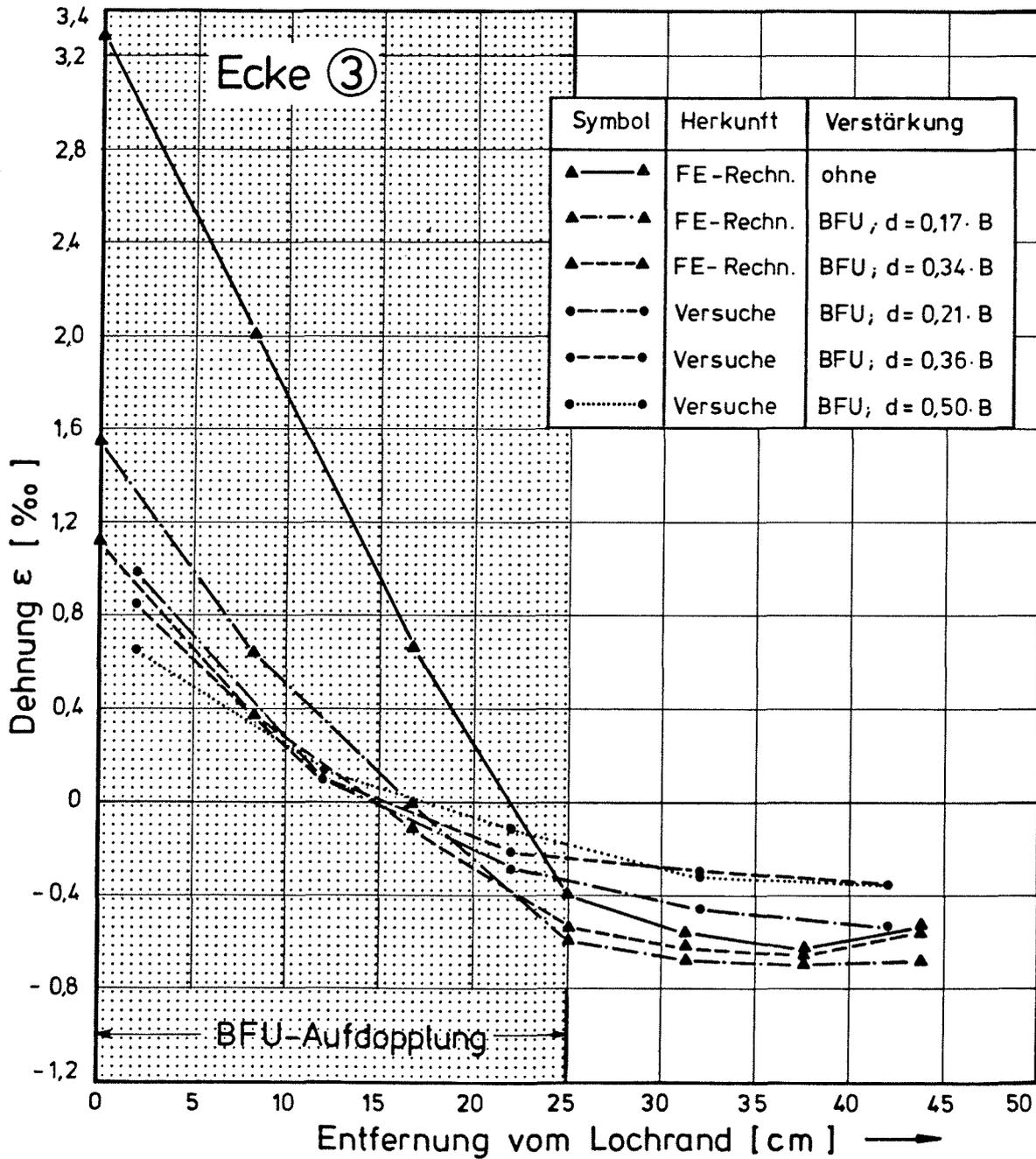
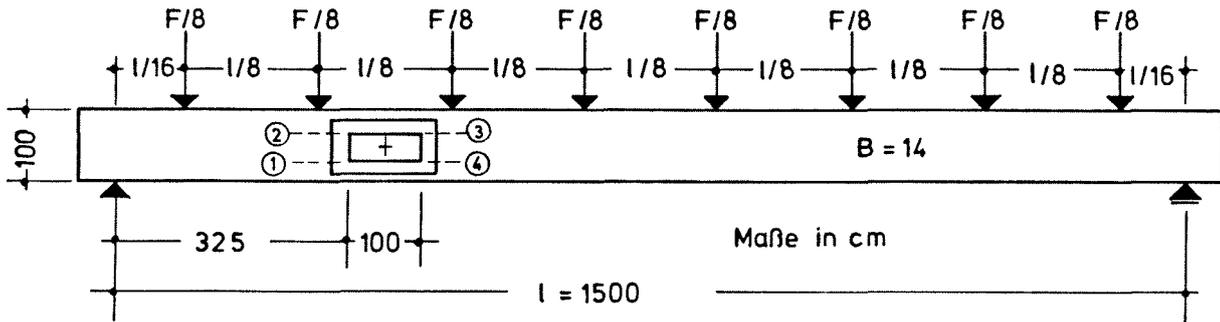
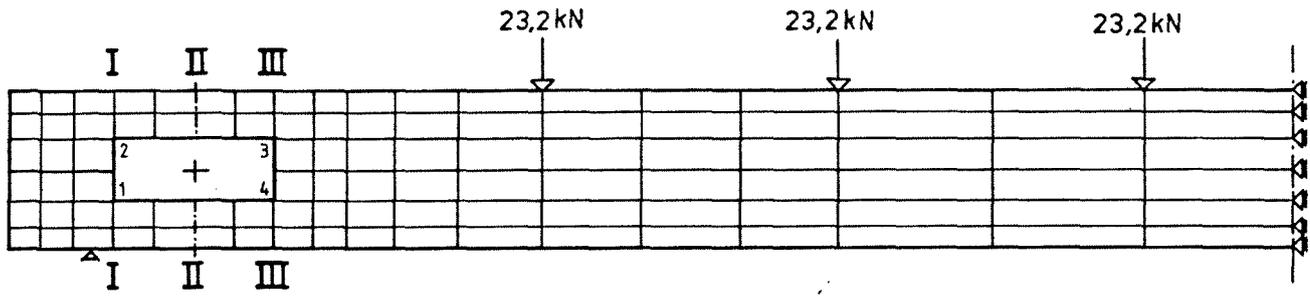
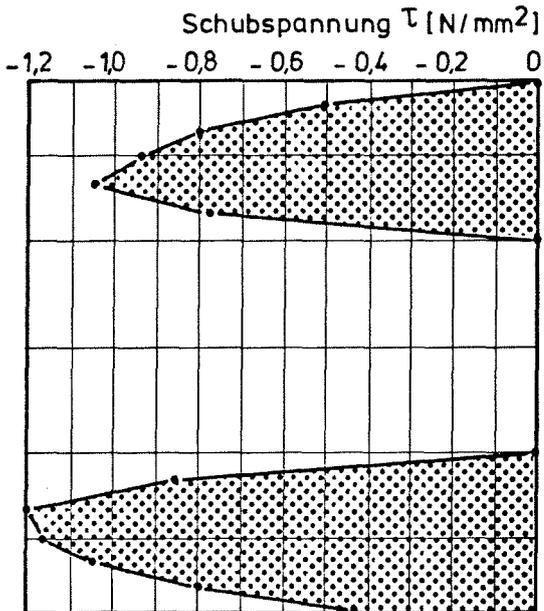


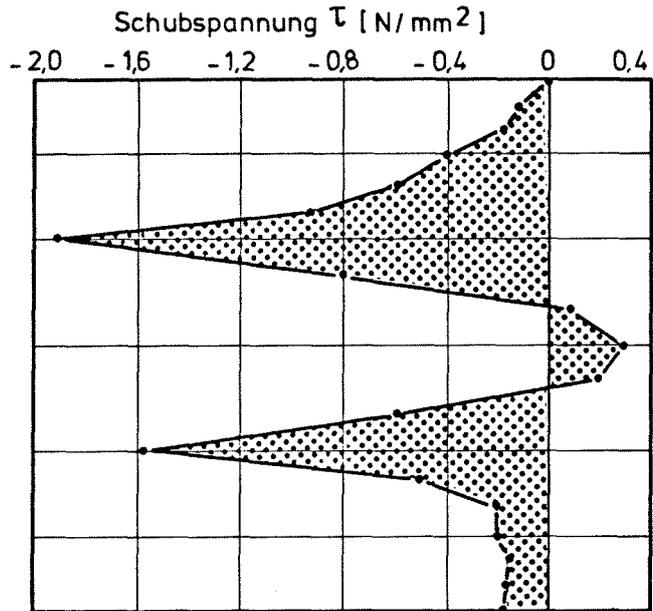
Abb. 11 Rechteckdurchbruch im Viertelpunkt. Dehnungen in Ecke 3 aus Rechnung und Versuch



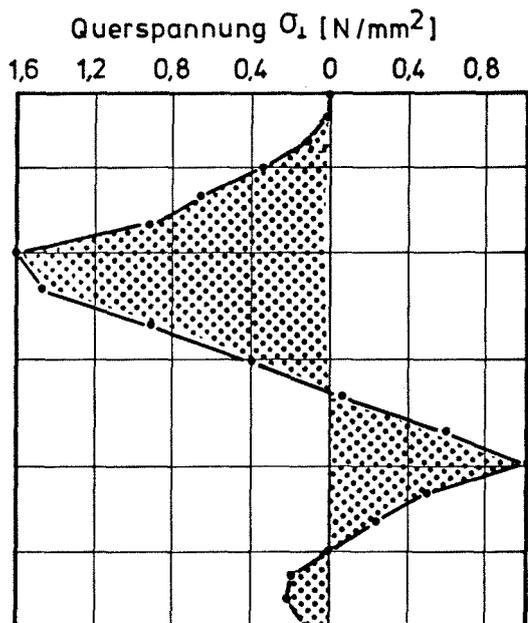
Schnitt II:



Schnitt I:



Schnitt I:



Schnitt III:

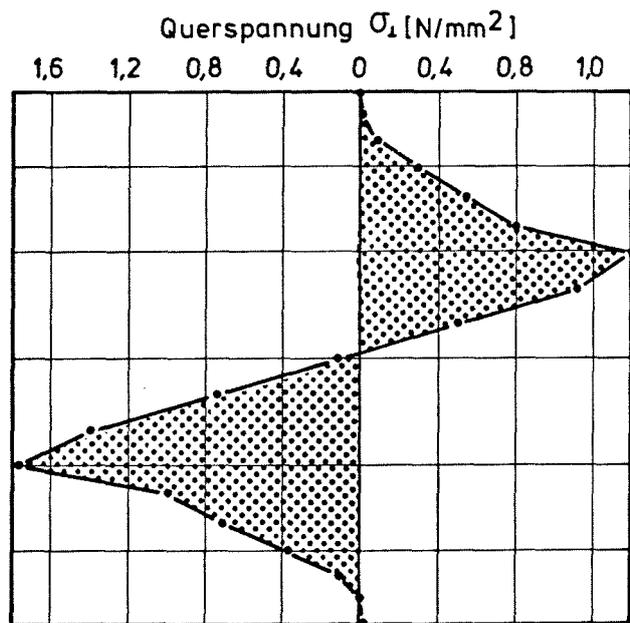


Abb. 12 Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich

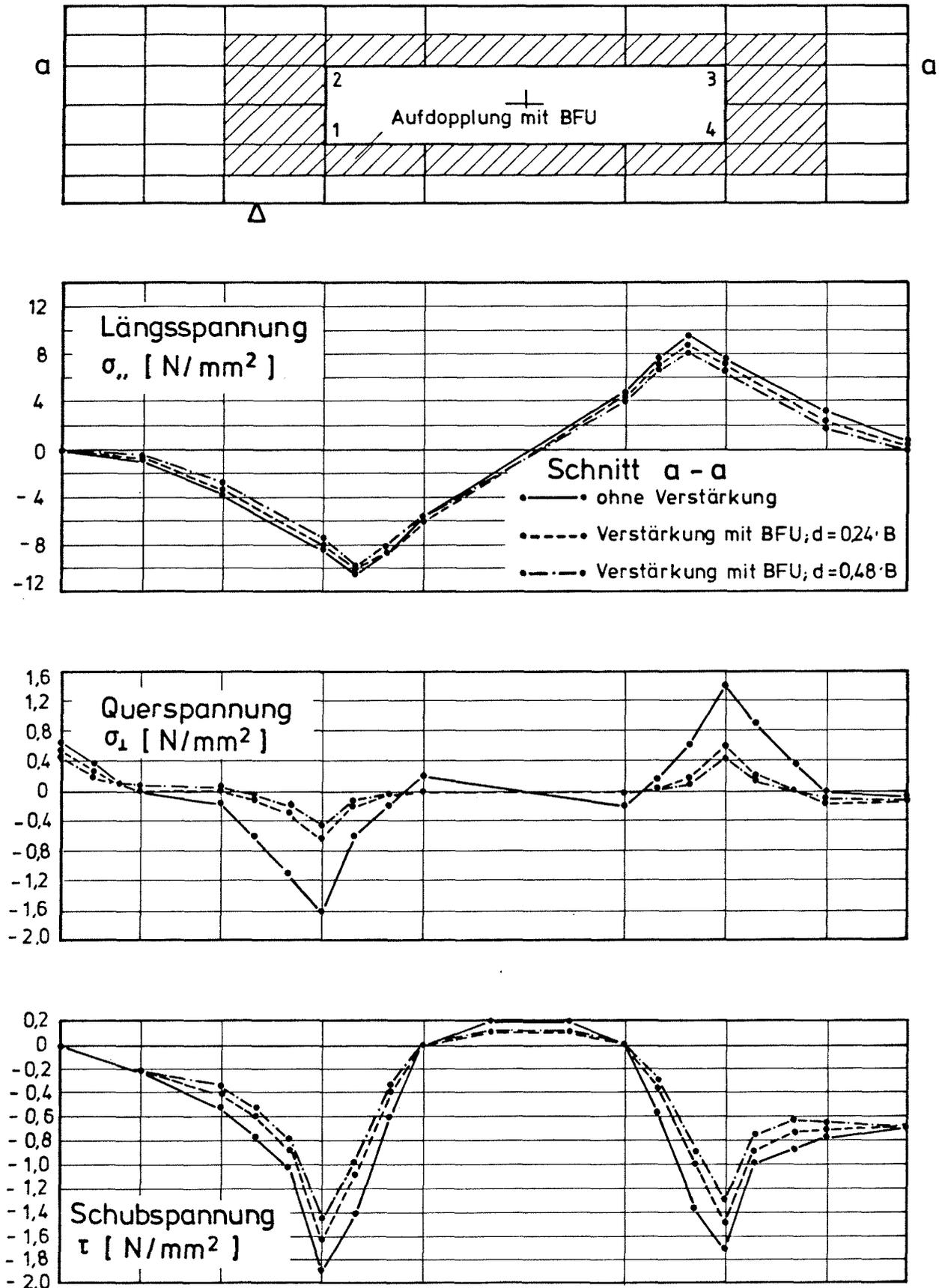


Abb. 13 Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich. Spannungen entlang der Durchbruchoberkante, Schnitt a-a

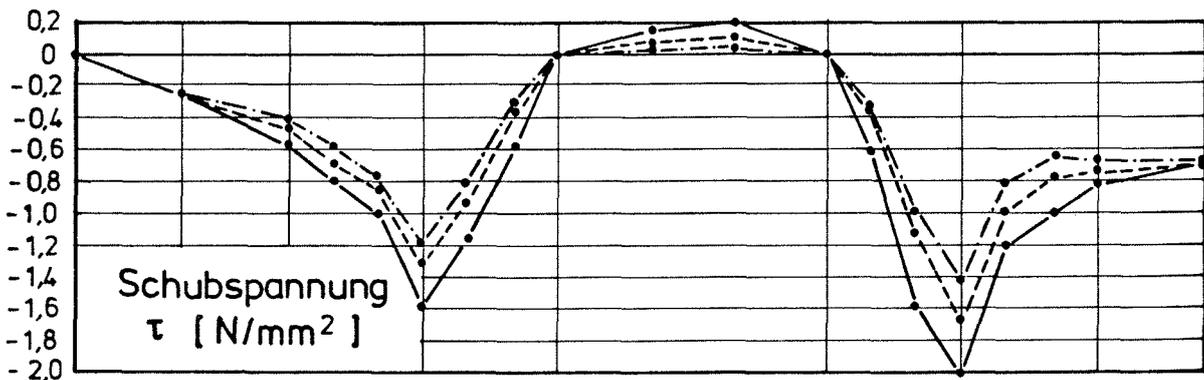
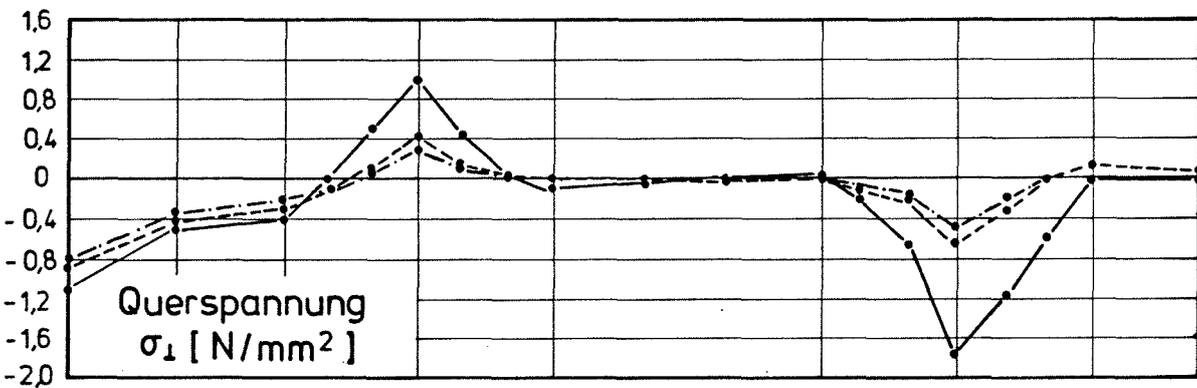
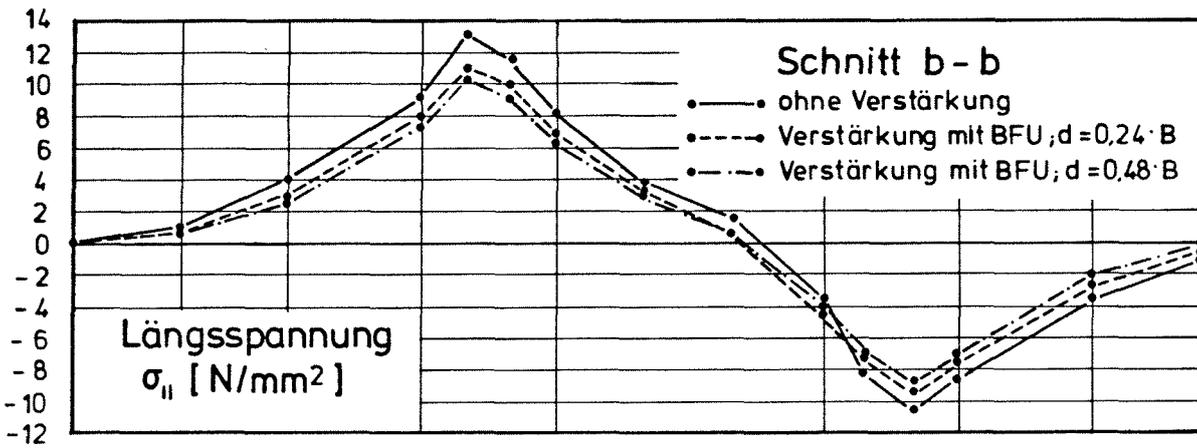
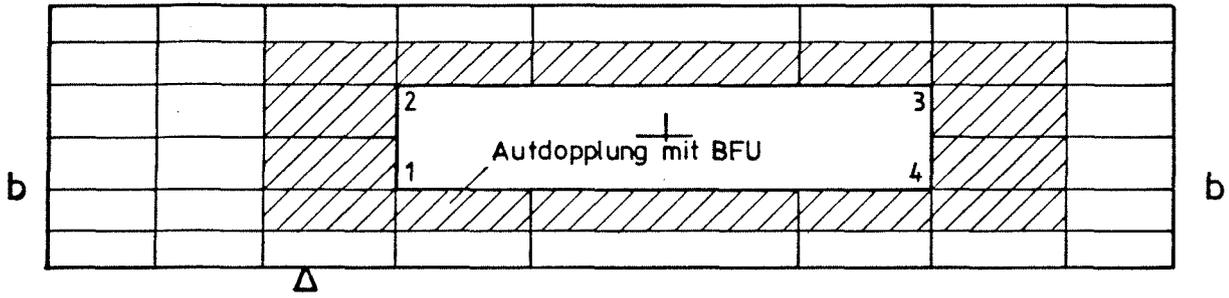


Abb. 14 Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich. Spannungen entlang der Durchbruchunterkante, Schnitt b-b

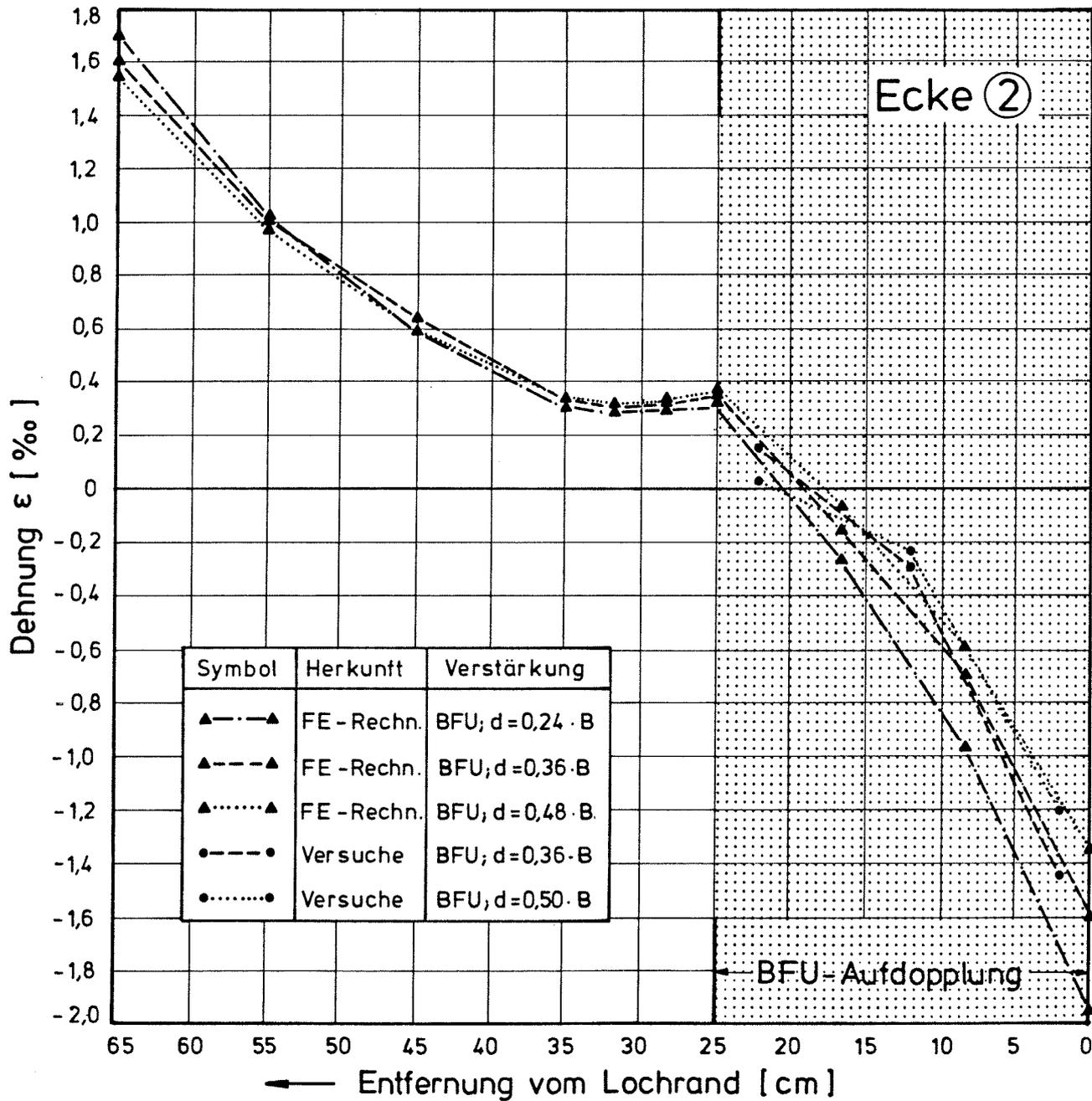
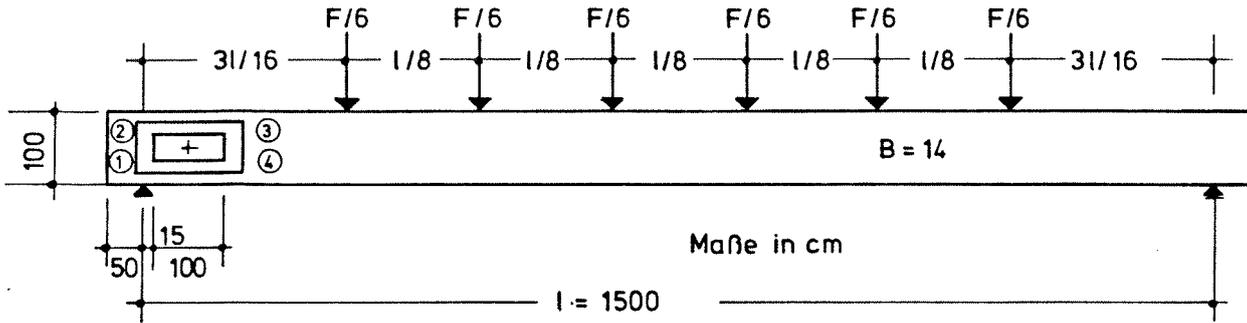


Abb. 15 Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich. Dehnungen in Ecke 2 aus Rechnung und Versuch

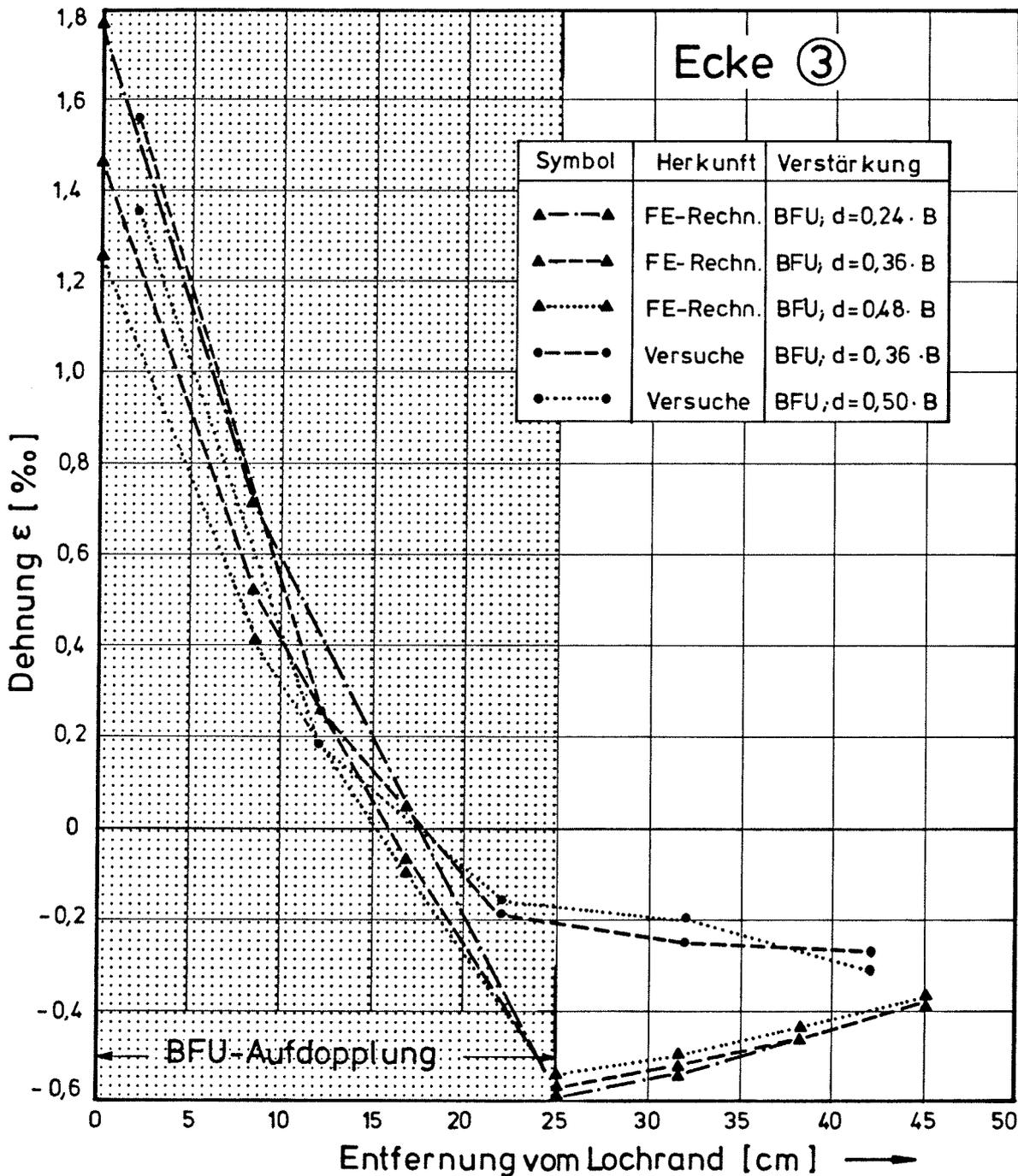
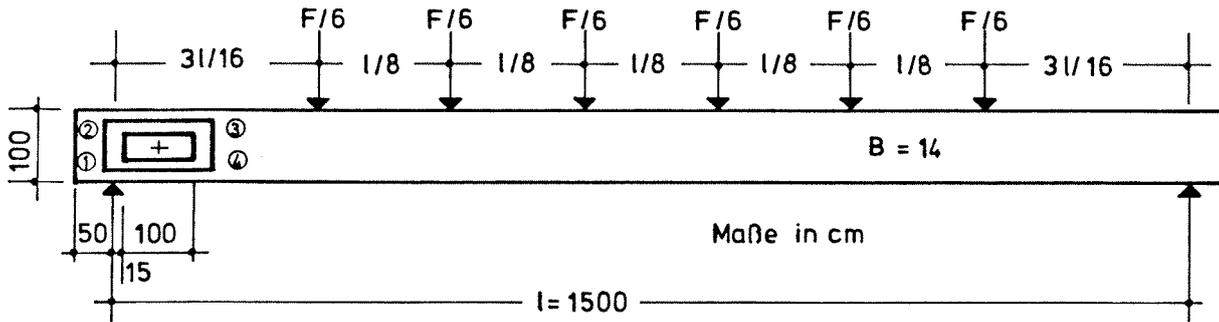


Abb. 16 Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich. Dehnungen in Ecke 3 aus Rechnung und Versuch

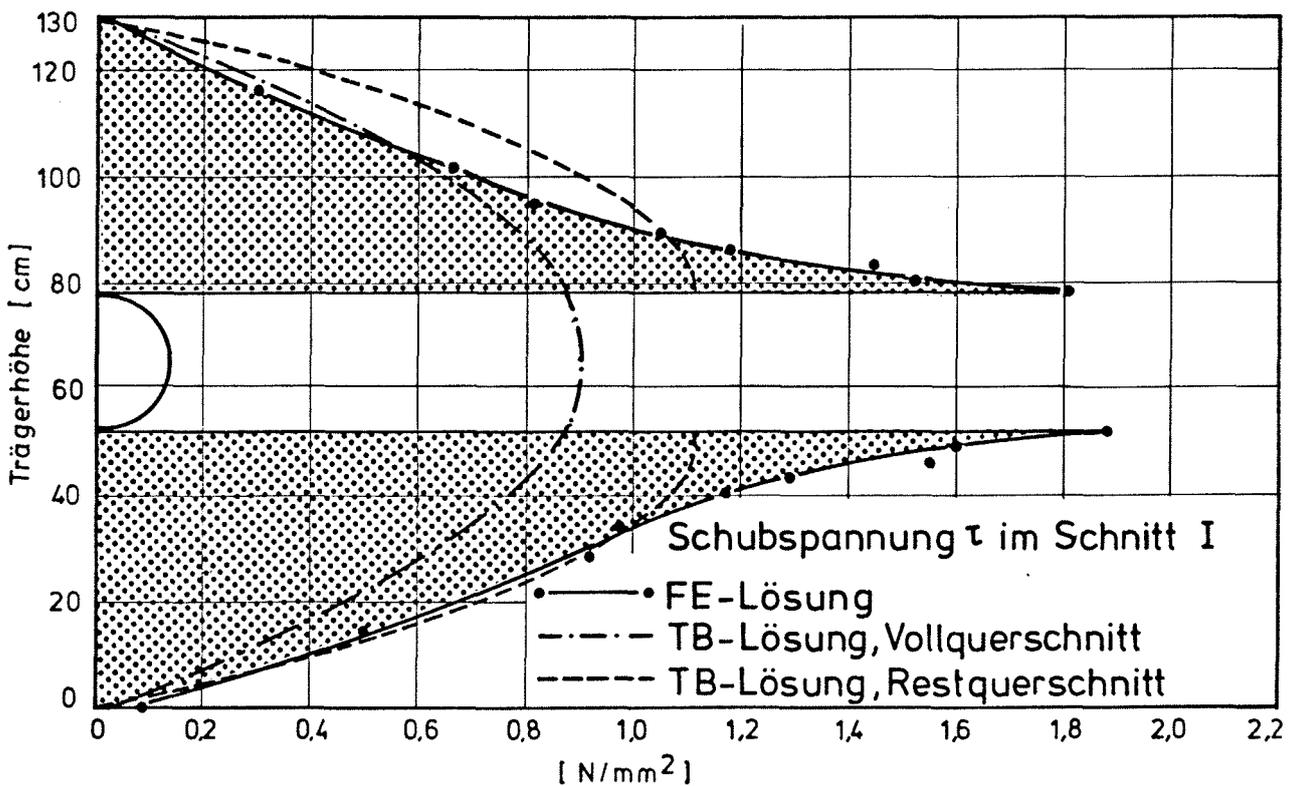
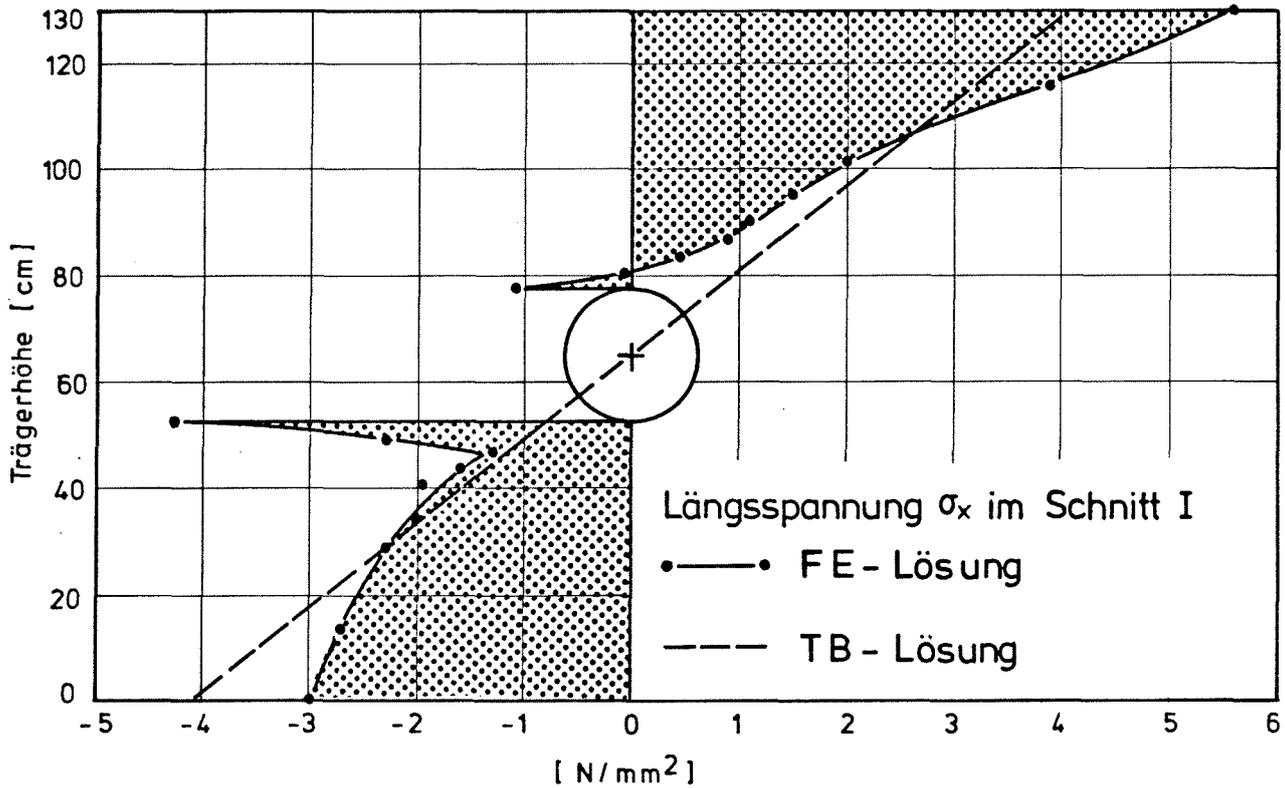
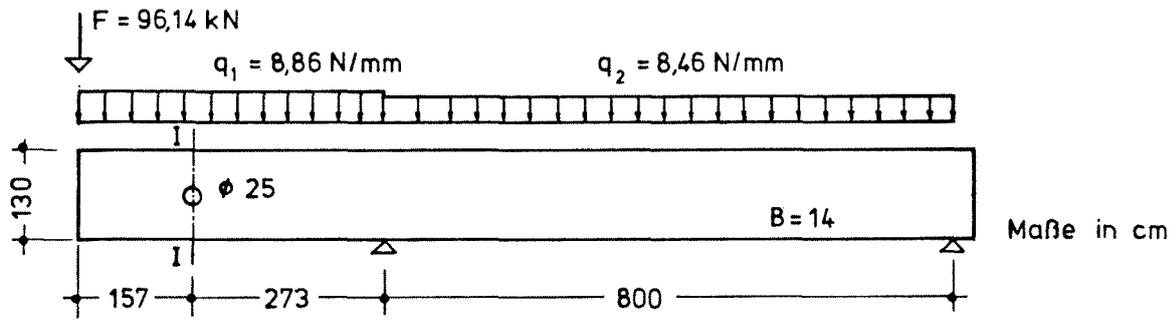


Abb. 17 Kragarmträger mit Kreisdurchbruch (Schnitt I)

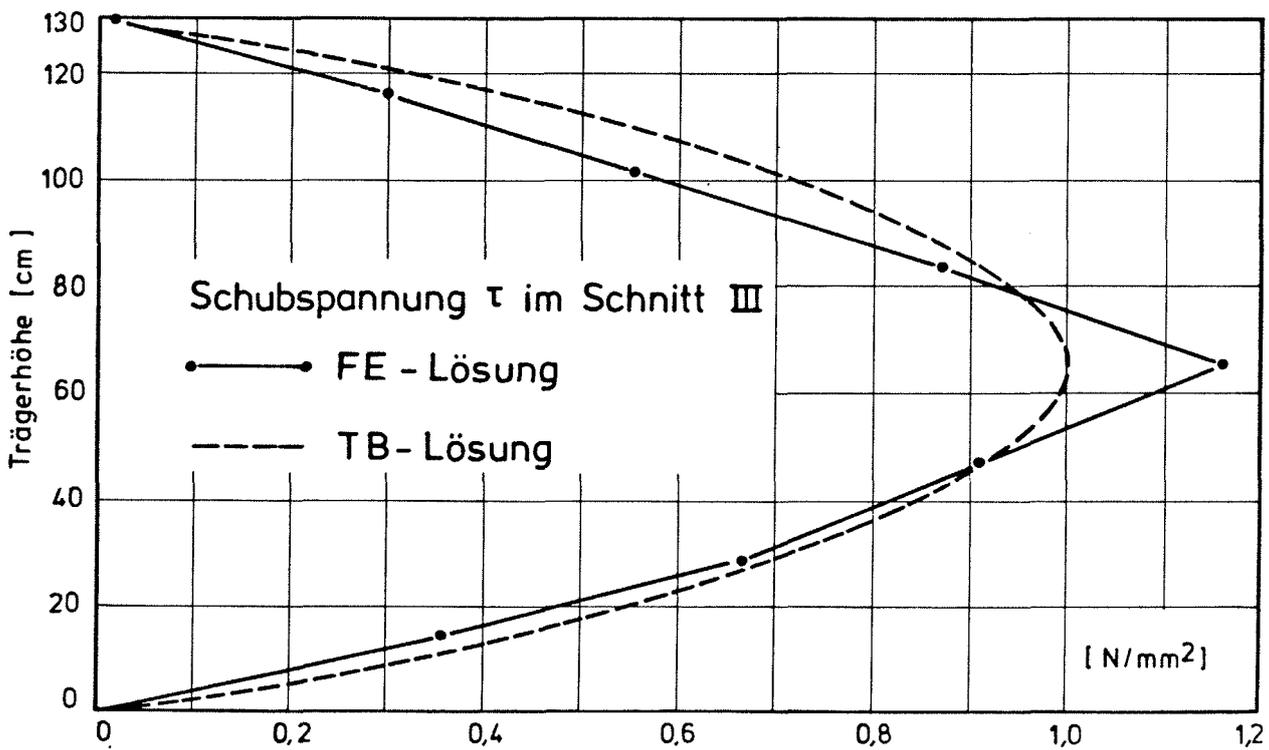
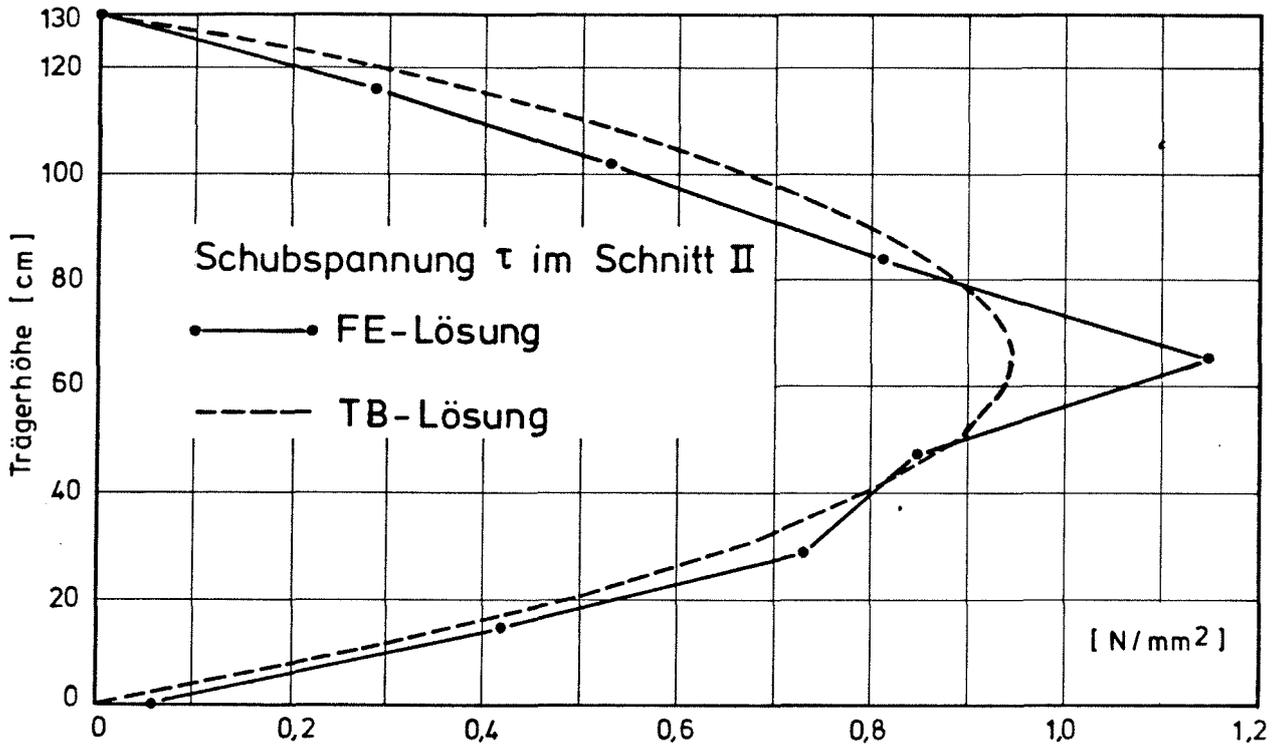
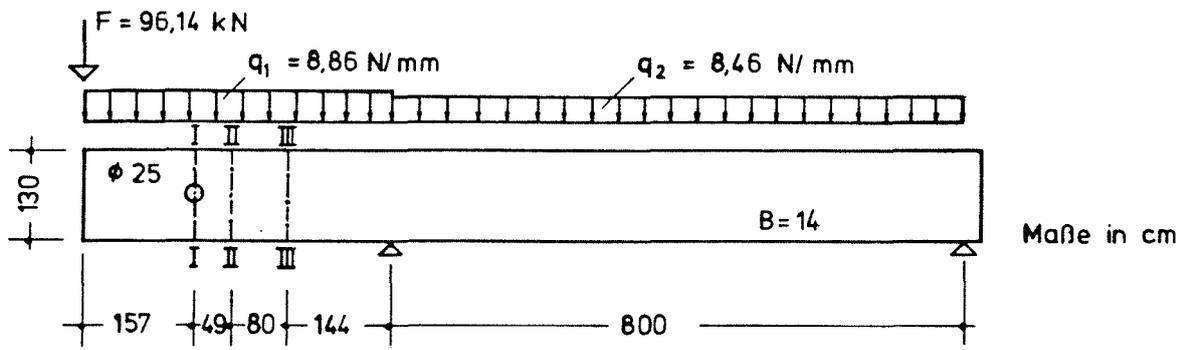


Abb.18 Kragarmträger mit Kreisdurchbruch (Schnitt II und III)

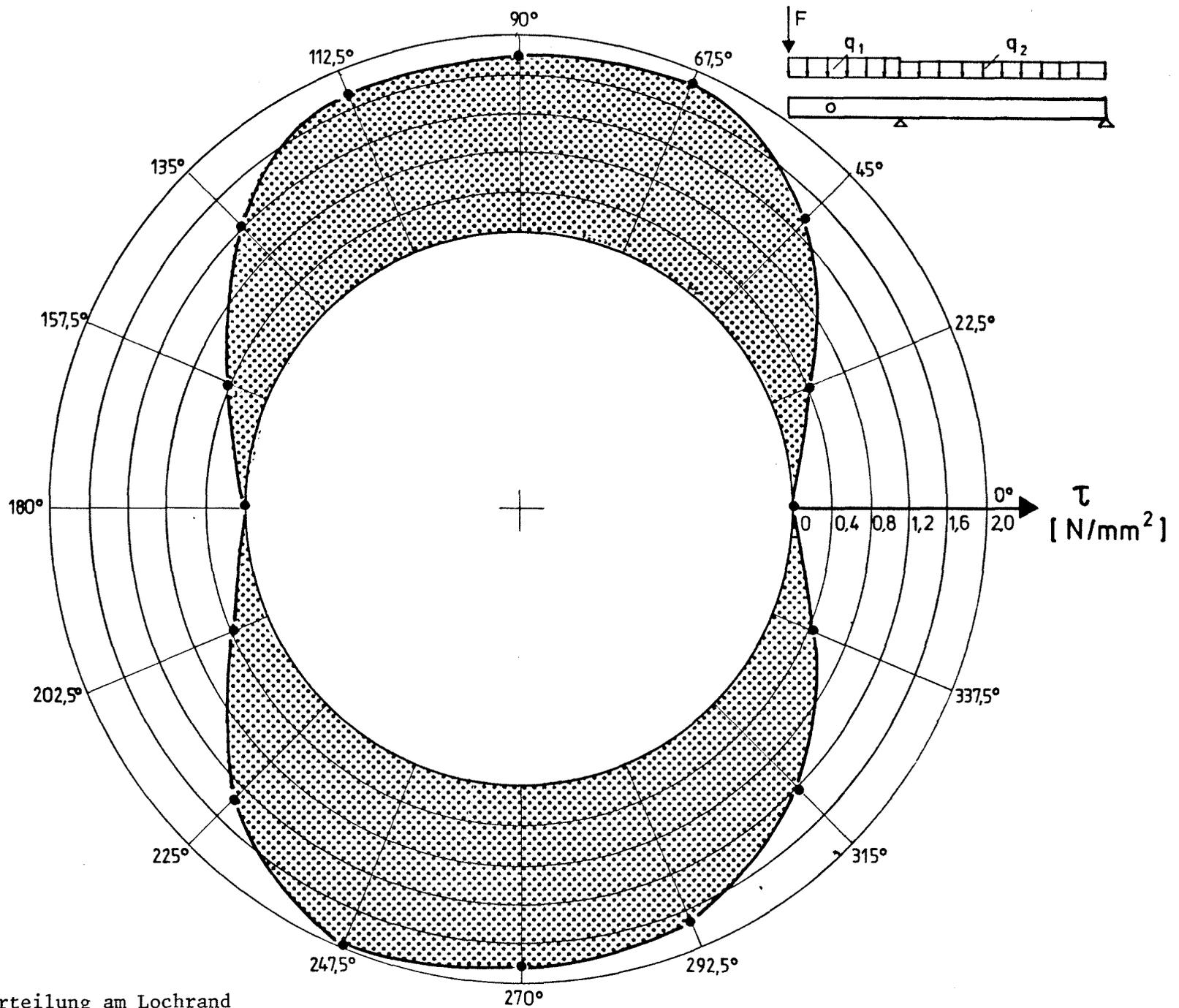


Abb.19
Schubspannungsverteilung am Lochrand

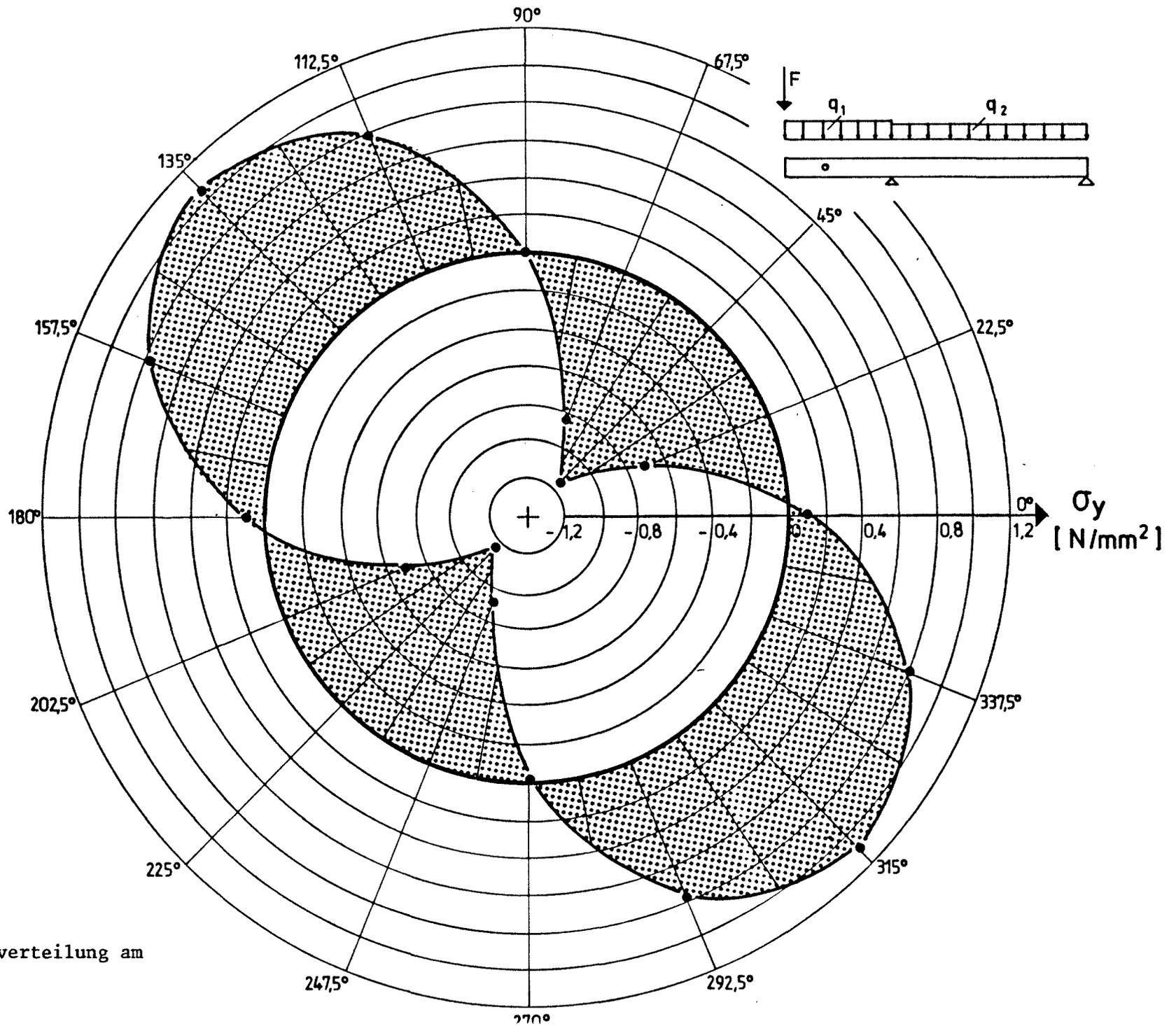


Abb. 20
 Querspannungsverteilung am
 Lochrand

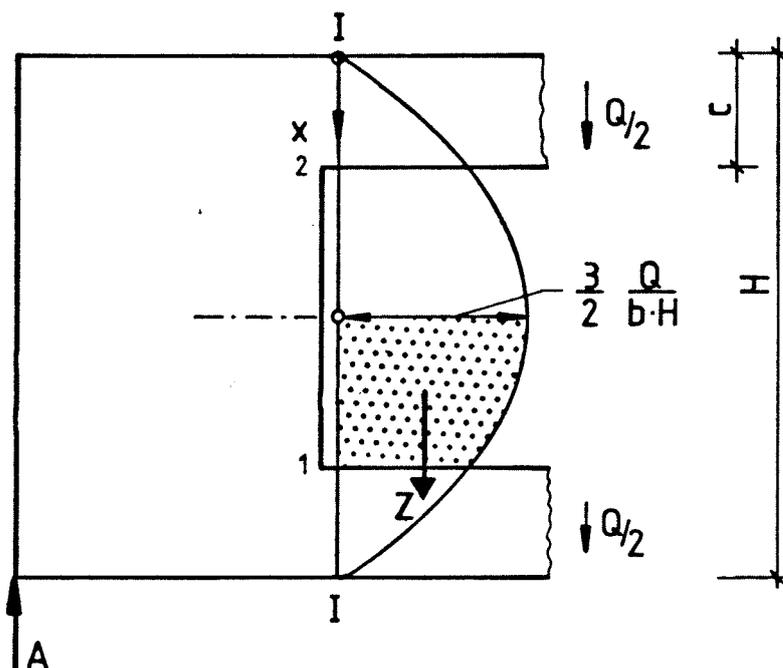
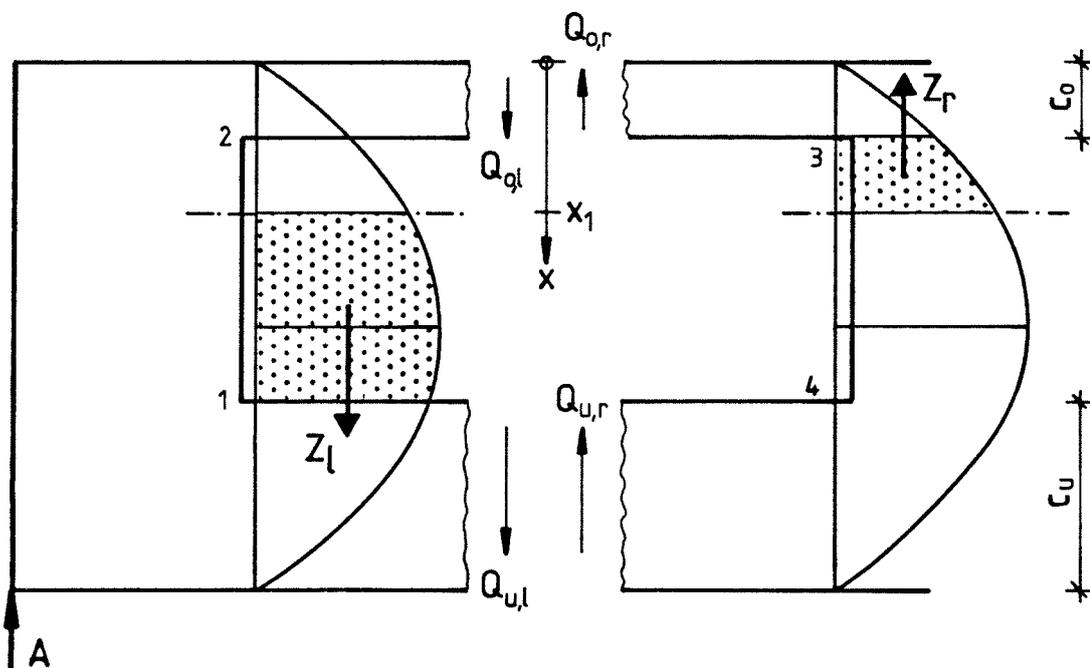


Abb.21 Zugkraft in Ecke 1 zufolge Querkraft bei symmetrischer Anordnung des Trägerdurchbruchs

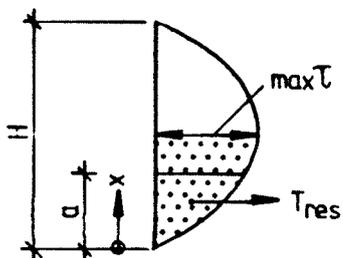


$$x_1 = \frac{c_0}{c_0 + c_u} \cdot H$$

Abb.22 Zugkraft in den Ecken 1 und 3 zufolge Querkraft bei asymmetrischer Anordnung des Trägerdurchbruchs

a) symmetrischer Trägerdurchbruch,

Geg. parabelförmige Schubspannungsverteilung



$$\max \tau = \frac{3}{2} \frac{Q}{b \cdot H} \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau(x) = \frac{4 \cdot \max \tau}{H^2} x (H - x) \dots\dots\dots (2)$$

Die resultierende Schubkraft der Fläche  ergibt sich zu

$$\begin{aligned} T_{res} &= b \cdot \int_0^a \tau(x) dx \dots\dots\dots (3) \\ &= b \cdot \int_0^a \frac{4 \max \tau}{H^2} (xH - x^2) dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{b \cdot 4 \max \tau}{H^2} \left(\frac{x^2}{2} H - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_0^a \\ &= \frac{b \cdot 4 \max \tau}{H^2} \left(\frac{a^2}{2} H - \frac{a^3}{3} \right) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

(1) in (4) eingesetzt

$$\begin{aligned} T_{res} &= \frac{b \cdot 4 \cdot 3 \cdot Q}{H^2 \cdot 2 \cdot b \cdot H} \left(\frac{H}{2} a^2 - \frac{1}{3} a^3 \right) \\ &= \frac{6 Q}{H^3} \left[\frac{1}{6} (3 H a^2 - 2 a^3) \right] \\ &= \frac{Q}{H^3} (3 H a^2 - 2 a^3) \\ &= Q \left[3 \left(\frac{a}{H} \right)^2 - 2 \left(\frac{a}{H} \right)^3 \right] \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

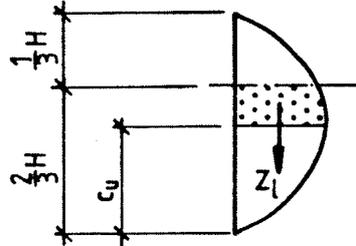
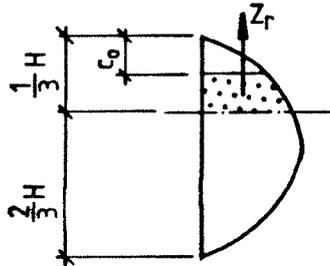
Die Zugkraft Z ergibt sich aus $Q/2$ - Gleichung 5

$$\begin{aligned} Z &= \frac{Q}{2} - Q \left[3 \left(\frac{a}{H} \right)^2 - 2 \left(\frac{a}{H} \right)^3 \right] \\ &= Q \left[\frac{1}{2} - 3 \left(\frac{a}{H} \right)^2 + 2 \left(\frac{a}{H} \right)^3 \right] \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

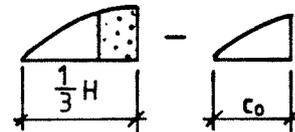
b) unsymmetrischer Trägerdurchbruch,

rechte obere Ecke (Ecke 3)

linke untere Ecke (Ecke 1)



Zugkraft Z_r errechnet sich aus



mit der zweimaligen Verwendung von Gleichung 5 und aus Nebenrechnung 1 erhält man :

$$\begin{aligned}
 Z_r &= Q \left[3 \left(\frac{1/3 H}{H} \right)^2 - 2 \left(\frac{1/3 H}{H} \right)^3 \right] - Q \left[3 \left(\frac{c_0}{H} \right)^2 - 2 \left(\frac{c_0}{H} \right)^3 \right] \\
 &= Q \left[3 \frac{1}{9} - 2 \frac{1}{27} \right] - Q \left[3 \left(\frac{c_0}{H} \right)^2 - 2 \left(\frac{c_0}{H} \right)^3 \right] \\
 &= Q \left[\frac{7}{27} - 3 \left(\frac{c_0}{H} \right)^2 + 2 \left(\frac{c_0}{H} \right)^3 \right] \dots \dots \dots (7)
 \end{aligned}$$

analog erhält man für die Zugkraft Z_l

$$\begin{aligned}
 Z_l &= Q \left[3 \left(\frac{2/3 H}{H} \right)^2 - 2 \left(\frac{2/3 H}{H} \right)^3 \right] - Q \left[3 \left(\frac{c_u}{H} \right)^2 - 2 \left(\frac{c_u}{H} \right)^3 \right] \\
 &= Q \left[\frac{20}{27} - 3 \left(\frac{c_u}{H} \right)^2 + 2 \left(\frac{c_u}{H} \right)^3 \right] \dots \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

Quelle	Probekörper	Form des Durchbruchs		b/H bzw. d/H	Verhältnis max F/zul F			Abweichung von 3 gegenüber 2 in %	
					NORRIS einfach 1	NORRIS erweit. 2	nur zul σ_z 3		
[15]	D/II - 1	x		0,45	3,57	3,47	3,49	6	
	- 2	x		0,45	3,92	3,80	3,83	0,8	
	G/II - 1	x		0,27	3,68	3,60	3,45	- 4,2	
	- 2	x		0,27	4,03	3,94	3,77	- 4,3	
	E/II - 1	x		0,45	4,06	3,87	3,97	2,6	
	- 2	x		0,45	4,26	4,06	4,16	2,5	
	H/II - 1	x		0,27	3,61	3,48	3,41	- 2	
	- 2	x		0,27	3,08	2,97	2,91	- 2	
	C/III- 1	x		0,55	3,14	3,11	3,11	0	
	- 2	x		0,55	3,14	3,11	3,11	0	
	B/III- 1			x	0,55	2,89	2,89	2,89	0
	- 2			x	0,55	2,96	2,96	2,96	0
J/III- 1			x	0,55	4,54	4,30	4,42	2,8	
- 2			x	0,55	4,10	3,89	4,00	2,8	
[28]	P/1		x	0,51	3,30	3,22	3,20	- 0,6	
	P/2		x	0,50	3,30	3,17	3,20	0,9	
	P/3		x	0,30	3,72	3,65	3,44	- 5,9	
	P/4		x	0,50	3,13	3,05	3,02	- 1	
	P/5		x	0,38	3,96	3,83	3,78	- 1,3	
	P/6	x		0,40	3,63	3,50	3,52	0,6	
	P/7	x		0,40	3,42	3,27	3,29	0,6	
	P/8	x		0,40	3,33	3,16	3,17	0,3	
	P/9	x		0,25	2,96	2,88	2,74	- 4,9	
	P/10	x		0,25	3,65	3,54	3,32	- 6,2	
[11]	L 1 - 1		x	0,25	3,92	3,82	3,80	- 0,5	
	- 2		x	0,25	3,32	3,23	3,21	- 0,6	
	L 2 - 1	x		0,50	3,63	3,50	3,56	1,7	
	- 2	x		0,50	3,15	3,03	3,09	2	
	L 3 - 1		x	0,50	3,91	3,72	3,79	1,9	
	- 2		x	0,50	4,45	4,23	4,32	0	
	L 4 - 1	x		0,50	3,48	3,25	3,40	4,6	
	- 2	x		0,50	3,37	3,15	3,30	4,8	
	L 5 - 1		x	0,50	4,21	4,14	4,06	- 1,9	
	- 2		x	0,50	3,64	3,58	3,51	- 2	
	L 5/M		x	0,50	3,56	3,56	3,56	0	
	L 6 - 1		x	0,25	2,48	2,46	2,23	- 9,3	
- 2		x	0,25	2,47	2,45	2,23	- 9		
[2]	A 1		x	0,50	3,89	3,79	3,77	- 0,5	
	B 1	x		0,30	3,60	3,50	3,39	- 3	
	C		x	0,20	3,82	3,75	3,55	- 5,3	
	D	x		0,30	3,67	3,60	3,28	- 8,9	
Mittelwert	○ - Durchbruch; n = 20 v_o				3,58	3,49	3,45	- 1,1	
	□ - Durchbruch; n = 21 v_{\square}				3,54	3,42	3,39	- 0,9	
Gesamtmittelwert	n = 41 \bar{v}				3,56	3,45	3,42	- 1	
	Standardabweichung $\pm s$				0,47	0,44	0,48	-	
	5 % Fraktile $v_{5\%}$				2,76	2,72	2,62	- 3,7	

Tabelle 4 Ergebnisse der Computeroptimierung aus den Versuchen an unverstärkten Trägerdurchbrüchen

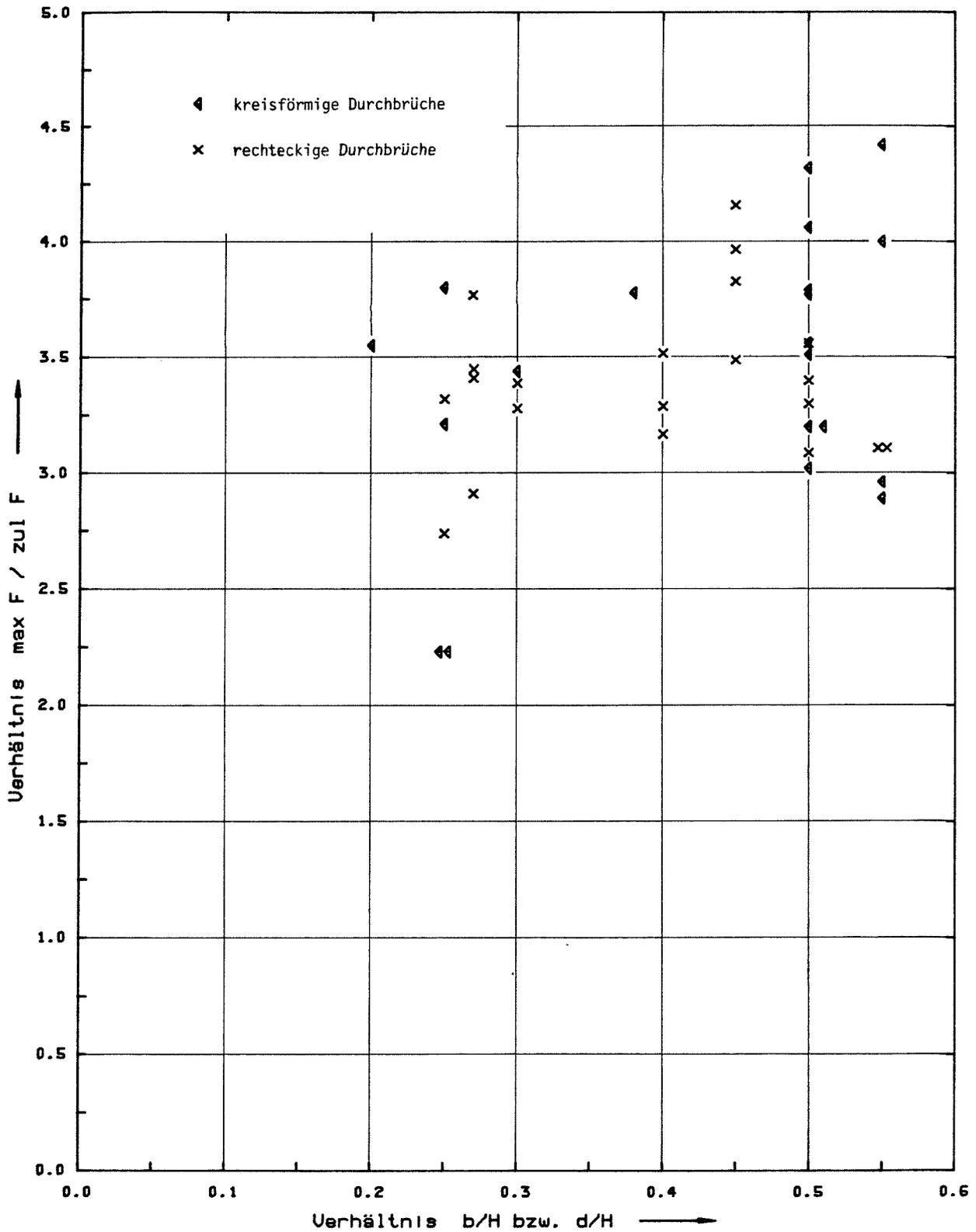
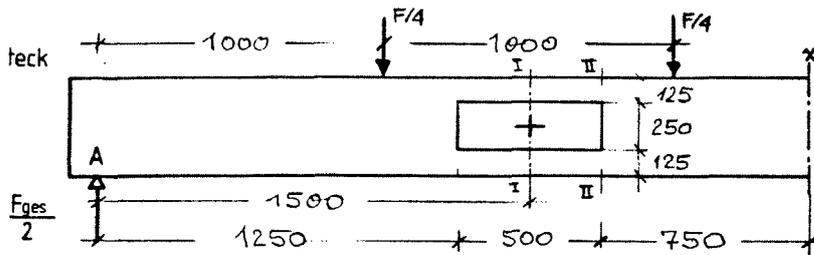


Abb.23 Sicherheitsbeiwerte aus den Versuchen bei Verwendung des vorgeschlagenen Dimensionierungsverfahrens

d/H b/H	symmetrischer Rechteck-Durchbruch				symmetrischer Kreis-Durchbruch				
	c/H	lv/H	k1	k2	c/H	lv/H	e/H	k1	k2
0.60	0.200	0.8000	0.3960	0.6400	0.2879	0.7121	0.4243	0.2991	0.8200
0.59	0.205	0.7950	0.3912	0.6519	0.2914	0.7086	0.4172	0.2947	0.8260
0.58	0.210	0.7900	0.3862	0.6636	0.2949	0.7051	0.4101	0.2903	0.8318
0.57	0.215	0.7850	0.3812	0.6751	0.2985	0.7015	0.4031	0.2859	0.8376
0.56	0.220	0.7800	0.3761	0.6864	0.3020	0.6980	0.3960	0.2815	0.8432
0.55	0.225	0.7750	0.3709	0.6975	0.3055	0.6945	0.3889	0.2770	0.8487
0.54	0.230	0.7700	0.3656	0.7084	0.3091	0.6909	0.3818	0.2725	0.8542
0.53	0.235	0.7650	0.3603	0.7191	0.3126	0.6874	0.3748	0.2679	0.8595
0.52	0.240	0.7600	0.3548	0.7296	0.3162	0.6838	0.3677	0.2633	0.8648
0.51	0.245	0.7550	0.3493	0.7399	0.3197	0.6803	0.3606	0.2587	0.8699
0.50	0.250	0.7500	0.3438	0.7500	0.3232	0.6768	0.3536	0.2541	0.8750
0.49	0.255	0.7450	0.3381	0.7599	0.3268	0.6732	0.3465	0.2495	0.8800
0.48	0.260	0.7400	0.3324	0.7696	0.3303	0.6697	0.3394	0.2448	0.8848
0.47	0.265	0.7350	0.3265	0.7791	0.3338	0.6662	0.3323	0.2401	0.8895
0.46	0.270	0.7300	0.3207	0.7884	0.3374	0.6626	0.3253	0.2353	0.8942
0.45	0.275	0.7250	0.3147	0.7975	0.3409	0.6591	0.3182	0.2306	0.8988
0.44	0.280	0.7200	0.3087	0.8064	0.3444	0.6556	0.3111	0.2258	0.9032
0.43	0.285	0.7150	0.3026	0.8151	0.3480	0.6520	0.3041	0.2210	0.9075
0.42	0.290	0.7100	0.2965	0.8236	0.3515	0.6485	0.2970	0.2162	0.9118
0.41	0.295	0.7050	0.2903	0.8319	0.3550	0.6450	0.2899	0.2113	0.9159
0.40	0.300	0.7000	0.2840	0.8400	0.3586	0.6414	0.2828	0.2065	0.9200
0.39	0.305	0.6950	0.2777	0.8479	0.3621	0.6379	0.2758	0.2016	0.9239
0.38	0.310	0.6900	0.2713	0.8556	0.3656	0.6344	0.2687	0.1967	0.9278
0.37	0.315	0.6850	0.2648	0.8631	0.3692	0.6308	0.2616	0.1917	0.9315
0.36	0.320	0.6800	0.2583	0.8704	0.3727	0.6273	0.2546	0.1868	0.9352
0.35	0.325	0.6750	0.2518	0.8775	0.3763	0.6237	0.2475	0.1818	0.9387
0.34	0.330	0.6700	0.2452	0.8844	0.3798	0.6202	0.2404	0.1768	0.9422
0.33	0.335	0.6650	0.2385	0.8911	0.3833	0.6167	0.2333	0.1718	0.9455
0.32	0.340	0.6600	0.2318	0.8976	0.3869	0.6131	0.2263	0.1668	0.9488
0.31	0.345	0.6550	0.2251	0.9039	0.3904	0.6096	0.2192	0.1618	0.9519
0.30	0.350	0.6500	0.2183	0.9100	0.3939	0.6061	0.2121	0.1567	0.9550
0.29	0.355	0.6450	0.2114	0.9159	0.3975	0.6025	0.2051	0.1516	0.9579
0.28	0.360	0.6400	0.2045	0.9216	0.4010	0.5990	0.1980	0.1466	0.9608
0.27	0.365	0.6350	0.1976	0.9271	0.4045	0.5955	0.1909	0.1414	0.9635
0.26	0.370	0.6300	0.1906	0.9324	0.4081	0.5919	0.1838	0.1363	0.9662
0.25	0.375	0.6250	0.1836	0.9375	0.4116	0.5884	0.1768	0.1312	0.9687
0.24	0.380	0.6200	0.1765	0.9424	0.4151	0.5849	0.1697	0.1261	0.9712
0.23	0.385	0.6150	0.1695	0.9471	0.4187	0.5813	0.1626	0.1209	0.9735
0.22	0.390	0.6100	0.1623	0.9516	0.4222	0.5778	0.1556	0.1157	0.9758
0.21	0.395	0.6050	0.1552	0.9559	0.4258	0.5742	0.1485	0.1106	0.9779
0.20	0.400	0.6000	0.1480	0.9600	0.4293	0.5707	0.1414	0.1054	0.9800
0.19	0.405	0.5950	0.1408	0.9639	0.4328	0.5672	0.1344	0.1002	0.9819
0.18	0.410	0.5900	0.1335	0.9676	0.4364	0.5636	0.1273	0.0949	0.9838
0.17	0.415	0.5850	0.1263	0.9711	0.4399	0.5601	0.1202	0.0897	0.9855
0.16	0.420	0.5800	0.1190	0.9744	0.4434	0.5566	0.1131	0.0845	0.9872
0.15	0.425	0.5750	0.1117	0.9775	0.4470	0.5530	0.1061	0.0793	0.9887
0.14	0.430	0.5700	0.1043	0.9804	0.4505	0.5495	0.0990	0.0740	0.9902
0.13	0.435	0.5650	0.0970	0.9831	0.4540	0.5460	0.0919	0.0687	0.9915
0.12	0.440	0.5600	0.0896	0.9856	0.4576	0.5424	0.0849	0.0635	0.9928
0.11	0.445	0.5550	0.0822	0.9879	0.4611	0.5389	0.0778	0.0582	0.9939
0.10	0.450	0.5500	0.0748	0.9900	0.4646	0.5354	0.0707	0.0529	0.9950
0.09	0.455	0.5450	0.0673	0.9919	0.4682	0.5318	0.0636	0.0477	0.9960
0.08	0.460	0.5400	0.0599	0.9936	0.4717	0.5283	0.0566	0.0424	0.9968
0.07	0.465	0.5350	0.0524	0.9951	0.4753	0.5247	0.0495	0.0371	0.9976
0.06	0.470	0.5300	0.0449	0.9964	0.4788	0.5212	0.0424	0.0318	0.9982
0.05	0.475	0.5250	0.0375	0.9975	0.4823	0.5177	0.0354	0.0265	0.9987

Tabelle 5 Hilfwerte zur Spannungsberechnung bei Durchbrüchen



$H = 500 \text{ mm}$	$B = 63 \text{ mm}$
$a = 500 \text{ mm}$	$b = 250 \text{ mm}$
$c = 125 \text{ mm}$	$k_1 = 0,3438$
$\frac{b}{H} = \frac{250}{500} = 0,5$	$k_2 = 0,75$
$\frac{a}{b} = \frac{500}{250} = 2$	$I_V = 0,75 \cdot 500 = 375 \text{ mm}$
	$\beta = 1,22$

VOLLQUERSCHNITT: $I_V = \frac{B \cdot H^3}{12} = \frac{63}{12} \cdot (500)^3 = 656,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

SCHNITT I: $I_I = \frac{B}{12} (H^3 - b^3) = \frac{63}{12} (500^3 - 250^3) = 574,22 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

SCHNITT II \cong SCHNITT I

BEMESSUNG

AUFLAGER A

$F_{ges} = 49,0 \text{ kN}$
 $Q = 0,5 F_{ges} = 0,5 \cdot 49,0 = 24,5 \text{ kN}$
 $\tau = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot B \cdot H} = \frac{3 \cdot 24500}{2 \cdot 63 \cdot 500} = 1,17 \text{ N/mm}^2$

FELDMITTE

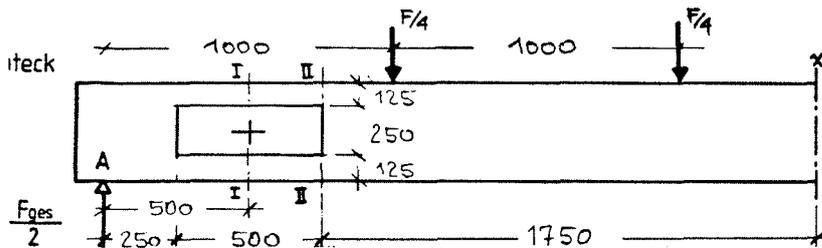
$\max M = 0,6 \frac{F}{4} \cdot l = \frac{0,6}{4} \cdot 49000 \cdot 5000 = 36,75 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$
 $\max \sigma_{Voll} = \frac{\max M \cdot H}{2 \cdot I_V} = \frac{36,75 \cdot 10^6 \cdot 500}{2 \cdot 656,25 \cdot 10^6} = 14,0 \text{ N/mm}^2$

SCHNITT I

$M_I = \frac{49000}{2} \cdot 1500 - \frac{49000}{4} \cdot 500 = 30,625 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$
 $\sigma_{I,a} = \frac{M_I \cdot H}{2 \cdot I_I} = \frac{30,625 \cdot 10^6 \cdot 500}{2 \cdot 574,22 \cdot 10^6} = 13,33 \text{ N/mm}^2$
 $Q_I = \frac{49000}{4} = 12,25 \text{ kN}$
 $\tau_{Gurt} = \frac{3 \cdot 0,5 Q_I}{2 \cdot B \cdot c} = \frac{3 \cdot 12250}{4 \cdot 63 \cdot 125} = 1,17 \text{ N/mm}^2$

SCHNITT II

$M_{II} = \frac{49000}{2} \cdot 1750 - \frac{49000}{4} \cdot 750 = 33,688 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$
 $Q_{II} = Q_I = 12,25 \text{ kN}$
 $\sigma_{II,a}^* = \frac{M_{II} \cdot H}{2 \cdot I_{II}} \cdot \beta = \frac{33,688 \cdot 10^6 \cdot 500}{2 \cdot 574,22 \cdot 10^6} \cdot 1,22 = 17,89 \text{ N/mm}^2$
 $\sigma_{II,i}^* = \frac{M_{II} \cdot b}{2 \cdot I_{II}} \cdot \beta = \frac{33,688 \cdot 10^6 \cdot 250}{2 \cdot 574,22 \cdot 10^6} \cdot 1,22 = 8,95 \text{ N/mm}^2$
 $\tau_V = \frac{3 \cdot Q_{II}}{2 \cdot B \cdot H} = \frac{3 \cdot 12250}{2 \cdot 63 \cdot 500} = 0,58 \text{ N/mm}^2$
 $\tau^* = \tau_V \cdot k_2 \cdot \beta = 0,58 \cdot 0,75 \cdot 1,22 = 0,53 \text{ N/mm}^2$
 $Z_Q = Q_{II} \cdot k_1 = 12250 \cdot 0,3438 = 4212 \text{ N}$
 $Z_M = 0,008 \frac{M_{II}}{c} = 0,008 \frac{33,688 \cdot 10^6}{125} = 2156 \text{ N}$
 $Z = Z_Q + Z_M = 4212 + 2156 = 6368 \text{ N}$
 $\sigma_{ZL} = \frac{Z}{B \cdot 0,5 \cdot I_V} = \frac{6368}{63 \cdot 0,5 \cdot 375} = 0,54 \text{ N/mm}^2$



$H = 500$ mm	$B = 63$ mm
$a = 500$ mm	$b = 250$ mm
$c = 125$ mm	$k_1 = 0,3438$
$\frac{b}{H} = \frac{250}{500} = 0,5$	$k_2 = 0,75$
$\frac{a}{b} = \frac{500}{250} = 2$	$I_V = 0,75 \cdot 500 = 375$ mm
	$\beta = 1,22$

$$\text{VOLLQUERSCHNITT: } I_V = \frac{B \cdot H^3}{12} = \frac{63}{12} \cdot 500^3 = 656,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\text{SCHNITT I: } I_I = \frac{B}{12} (H^3 - b^3) = \frac{63}{12} (500^3 - 250^3) = 574,22 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

SCHNITT II \cong SCHNITT I

BEMESSUNG

$$F_{ges} = 49,0 \text{ kN}$$

AUFLAGER A

$$Q = 0,5 F_{ges} = 0,5 \cdot 49,0 = 24,5 \text{ kN}$$

$$\tau = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot B \cdot H} = \frac{3 \cdot 24500}{2 \cdot 63 \cdot 500} = 1,17 \text{ N/mm}^2$$

FELDMITTE

$$\max M = 0,6 \frac{F}{4} \cdot l = \frac{0,6}{4} \cdot 49000 \cdot 5000 = 36,75 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\max \sigma_{Voll} = \frac{\max M \cdot H}{2 \cdot I_V} = \frac{36,75 \cdot 10^6 \cdot 500}{2 \cdot 656,25 \cdot 10^6} = 14,0 \text{ N/mm}^2$$

SCHNITT I

$$M_I = \frac{49000}{2} \cdot 500 = 12,25 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{Ia} = \frac{M_I \cdot H}{2 \cdot I_I} = \frac{12,25 \cdot 10^6 \cdot 500}{2 \cdot 574,22 \cdot 10^6} = 5,33 \text{ N/mm}^2$$

$$Q_I = \frac{49000}{2} = 24,5 \text{ kN}$$

$$\tau_{Schnitt} = \frac{3 \cdot 0,5 Q_I}{2 \cdot B \cdot c} = \frac{3 \cdot 24500}{4 \cdot 63 \cdot 125} = 2,33 \text{ N/mm}^2$$

SCHNITT II

$$M_{II} = \frac{49000}{2} \cdot 750 = 18,375 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$Q_{II} = Q_I = 24,5 \text{ kN}$$

$$\sigma_{IIa}^* = \frac{M_{II} \cdot H}{2 \cdot I_{II}} \cdot \beta = \frac{18,375 \cdot 10^6 \cdot 500}{2 \cdot 574,22 \cdot 10^6} \cdot 1,22 = 8,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{IIi}^* = \frac{M_{II} \cdot b}{2 \cdot I_{II}} \cdot \beta = \frac{18,375 \cdot 10^6 \cdot 250}{2 \cdot 574,22 \cdot 10^6} \cdot 1,22 = 4,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_V = \frac{3 \cdot Q_{II}}{2 \cdot B \cdot H} = \frac{3 \cdot 24500}{2 \cdot 63 \cdot 500} = 1,17 \text{ N/mm}^2$$

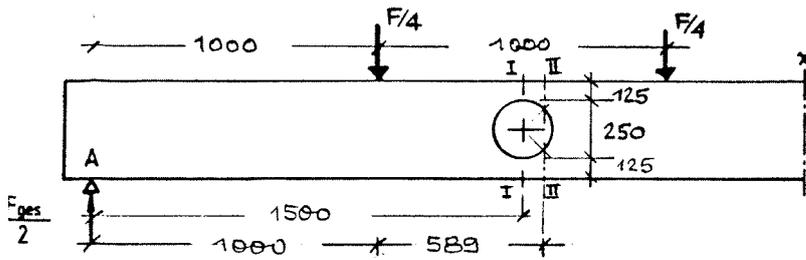
$$\tau^* = \tau_V \cdot k_2 \cdot \beta = 1,17 \cdot 0,75 \cdot 1,22 = 1,10 \text{ N/mm}^2$$

$$Z_a = Q_{II} \cdot k_1 = 24500 \cdot 0,3438 = 8423 \text{ N}$$

$$Z_M = 0,008 \frac{M_{II}}{c} = 0,008 \frac{18,375 \cdot 10^6}{125} = 1176 \text{ N}$$

$$Z = Z_a + Z_M = 8423 + 1176 = 9599 \text{ N}$$

$$\sigma_{ZL} = \frac{Z}{B \cdot 0,5 \cdot I_V} = \frac{9599}{63 \cdot 0,5 \cdot 375} = 0,81 \text{ N/mm}^2$$



$H = 500 \text{ mm}$	$B = 63 \text{ mm}$
$d = 250 \text{ mm}$	
$q = 125 \text{ mm}$	
$\frac{d}{H} = \frac{250}{500} = 0,5$	$k_1 = 0,2541$
	$k_2 = 0,875$
	$I_y = 0,6768 \cdot 500 = 338 \text{ mm}$
	$e = 0,3536 \cdot 500 = 177 \text{ mm}$

VOLLQUERSCHNITT: $I_v = \frac{B \cdot H^3}{12} = \frac{63}{12} \cdot 500^3 = 656,25 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

SCHNITT I: $I_I = \frac{B}{12} (H^3 - d^3) = \frac{63}{12} (500^3 - 250^3) = 574,22 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

SCHNITT II: $I_{II} = \frac{B}{12} (H^3 - e^3) = \frac{63}{12} (500^3 - 177^3) = 627,14 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$

BEMESSUNG

AUFLAGER A

$F_{ges} = 49,0 \text{ kN}$

$Q = 0,5 F_{ges} = 0,5 \cdot 49,0 = 24,5 \text{ kN}$

$\tau = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot B \cdot H} = \frac{3 \cdot 24500}{2 \cdot 63 \cdot 500} = 1,17 \text{ N/mm}^2$

FELDMITTE

$\max M = 0,6 \frac{F}{4} \cdot l = \frac{0,6}{4} \cdot 49000 \cdot 5000 = 36,75 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

$\max \sigma_{\text{Zug}} = \frac{\max M \cdot H}{2 \cdot I_v} = \frac{36,75 \cdot 10^6 \cdot 500}{2 \cdot 656,25 \cdot 10^6} = 14,0 \text{ N/mm}^2$

SCHNITT I

$M_I = \frac{49000}{2} \cdot 1500 - \frac{49000}{4} \cdot 500 = 30,625 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

$\sigma_{I,a} = \frac{M_I \cdot H}{2 \cdot I_I} = \frac{30,625 \cdot 10^6 \cdot 500}{2 \cdot 574,22 \cdot 10^6} = 13,33 \text{ N/mm}^2$

$Q_I = \frac{49000}{4} = 12,25 \text{ kN}$

$\tau_{\text{Quer}} = \frac{3 \cdot 0,5 Q_I}{2 \cdot B \cdot q} = \frac{3 \cdot 12250}{4 \cdot 63 \cdot 125} = 1,17 \text{ N/mm}^2$

SCHNITT II

$M_{II} = \frac{49000}{2} \cdot 1589 - \frac{49000}{2} \cdot 589 = 31,715 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

$Q_{II} = Q_I = 12,25 \text{ kN}$

$\sigma_{II,a}^* = \frac{M_{II} \cdot H}{2 \cdot I_{II}} = \frac{31,715 \cdot 10^6 \cdot 500}{2 \cdot 627,14 \cdot 10^6} = 12,64 \text{ N/mm}^2$

$\tau_v = \frac{3 \cdot Q_{II}}{2 \cdot B \cdot H} = \frac{3 \cdot 12500}{2 \cdot 63 \cdot 500} = 0,58 \text{ N/mm}^2$

$\tau^* = \tau_v \cdot k_2 = 0,58 \cdot 0,875 = 0,51 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{II,i}^* = \frac{M_{II} \cdot e}{2 \cdot I_{II}} = \frac{31,715 \cdot 10^6 \cdot 177}{2 \cdot 627,14 \cdot 10^6} = 4,48 \text{ N/mm}^2$

$Z_a = Q_{II} \cdot k_1 = 12250 \cdot 0,2541 = 3113 \text{ N}$

$Z_H = 0,008 \frac{M_{II}}{q} = 0,008 \frac{31,715 \cdot 10^6}{125} = 2030 \text{ N}$

$Z = Z_a + Z_H = 3113 + 2030 = 5343 \text{ N}$

$\sigma_{ZI} = \frac{Z}{B \cdot 0,5 I_v} = \frac{5343}{63 \cdot 0,5 \cdot 338} = 0,50 \text{ N/mm}^2$

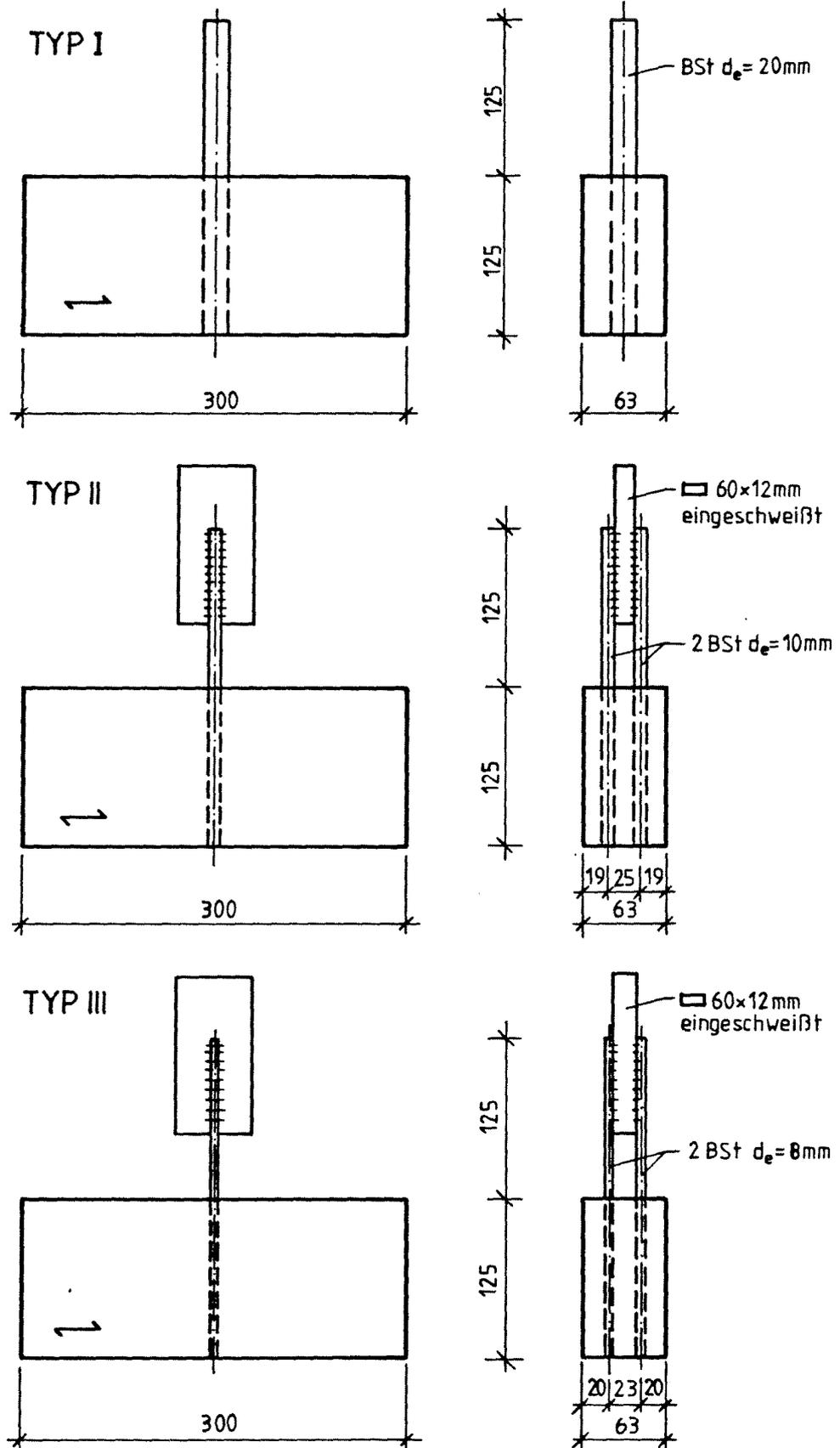


Abb. 24 Abmessungen der Probekörper für die Vorversuche zur Verstärkung von Durchbrüchen mit eingeleimten Betonrippenstählen

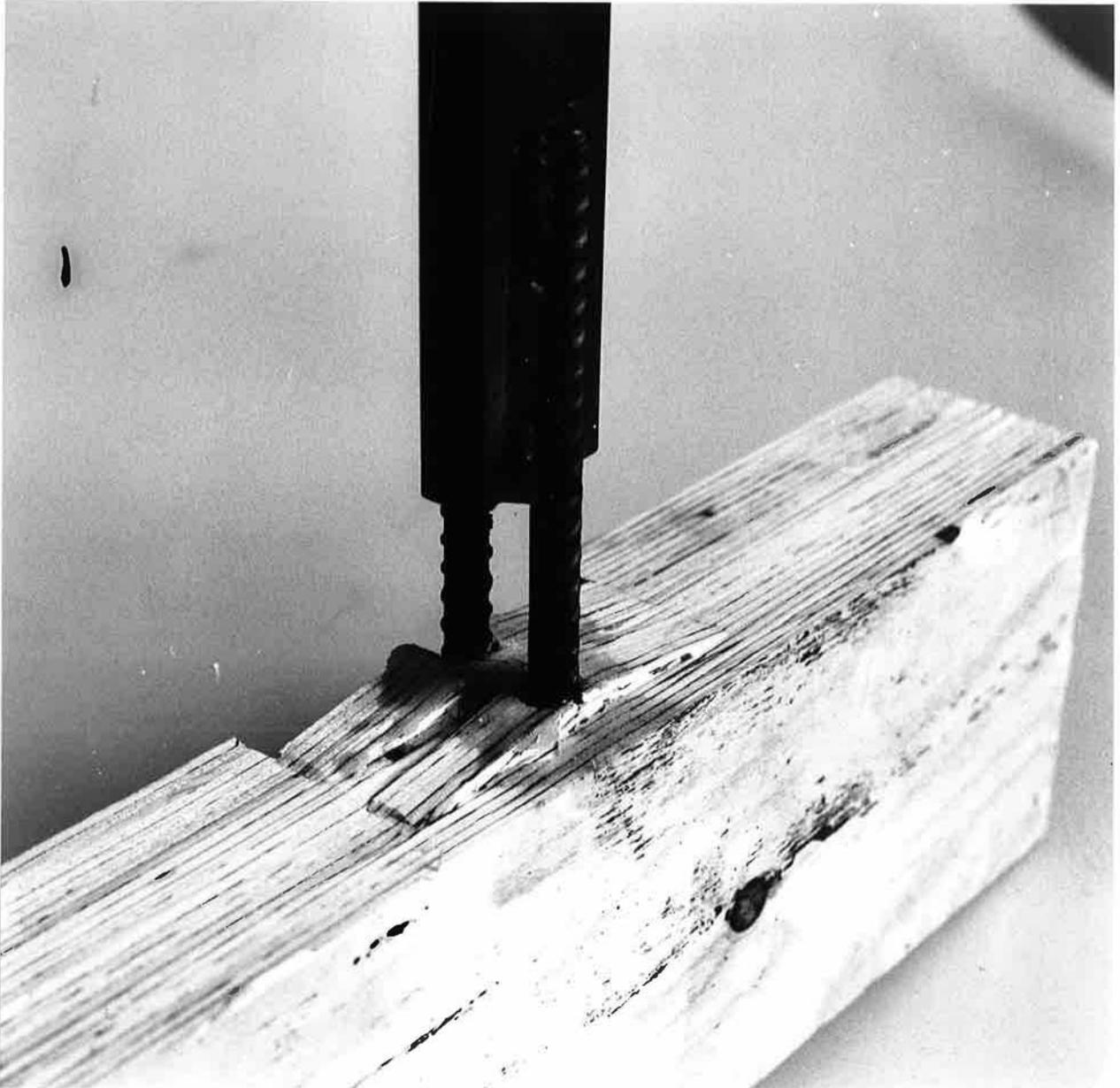


Abb.25 Probekörper II.5 nach Erreichen der Höchstlast von 69,8 kN

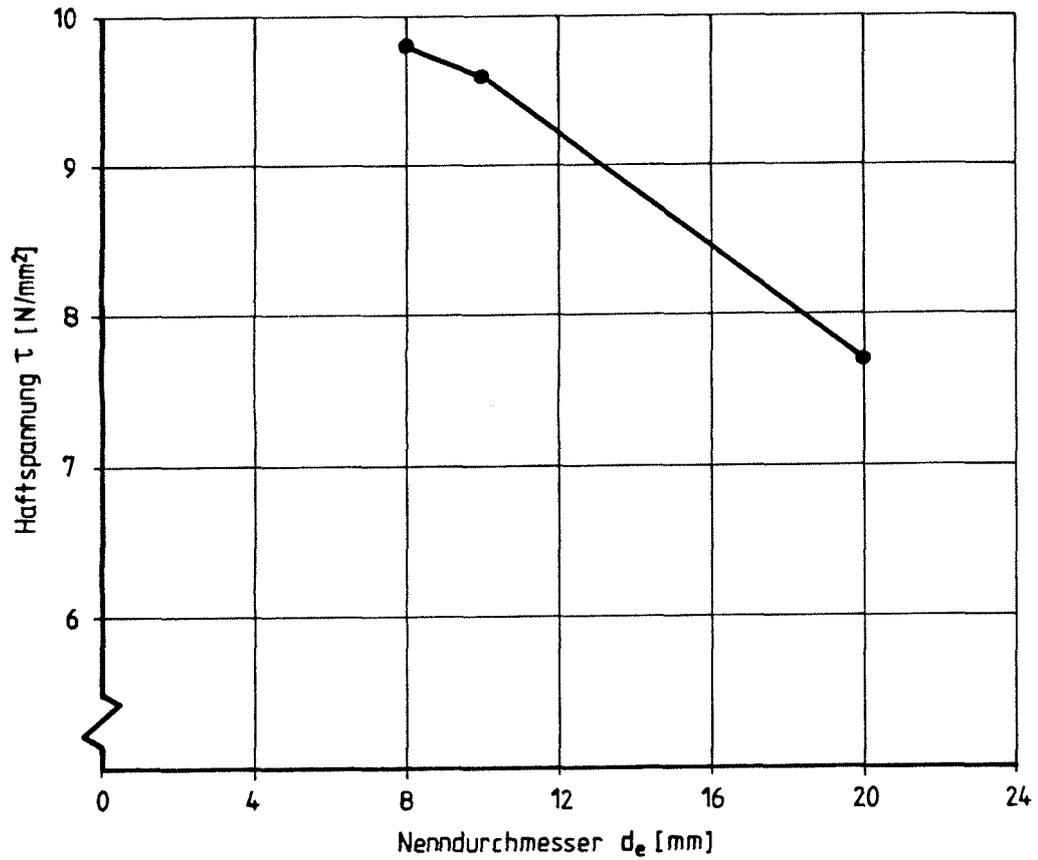


Abb.26 Haftspannung τ in Abhängigkeit vom Nenn Durchmesser bei einer Einleimlänge von 125 mm

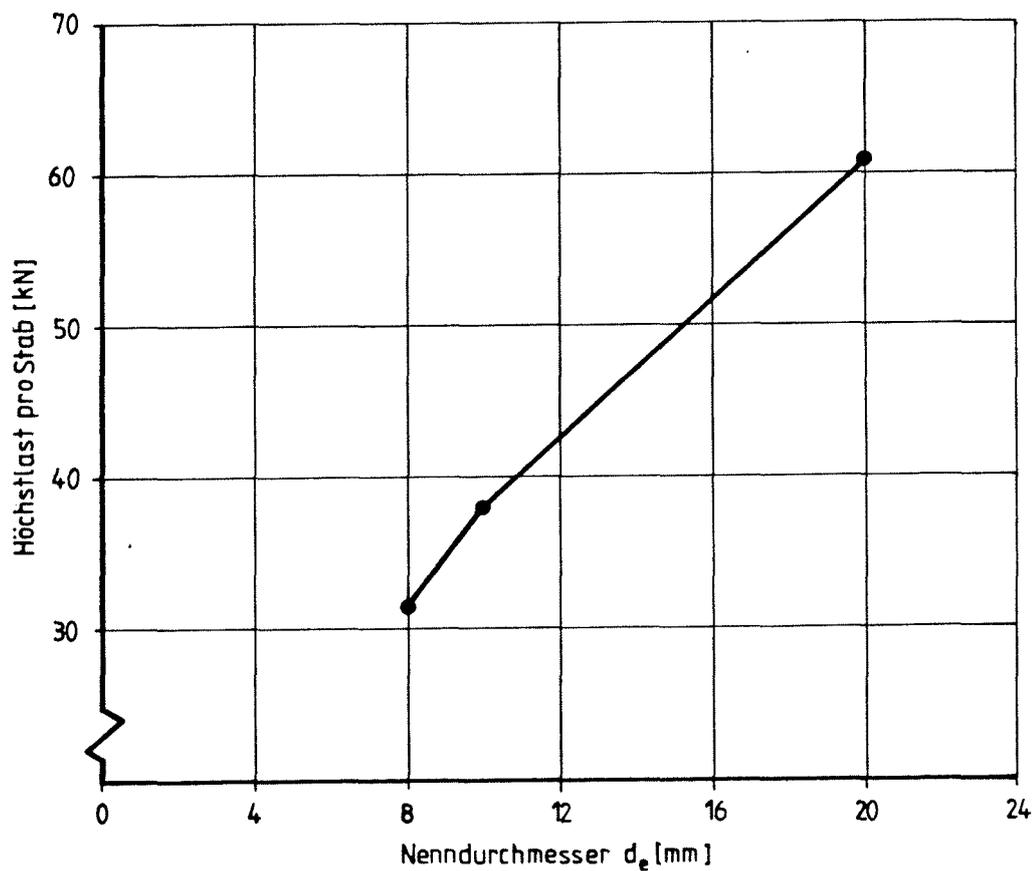


Abb.27 Höchstlast pro Stab in Abhängigkeit vom Nenn Durchmesser bei einer Einleimlänge von 125 mm

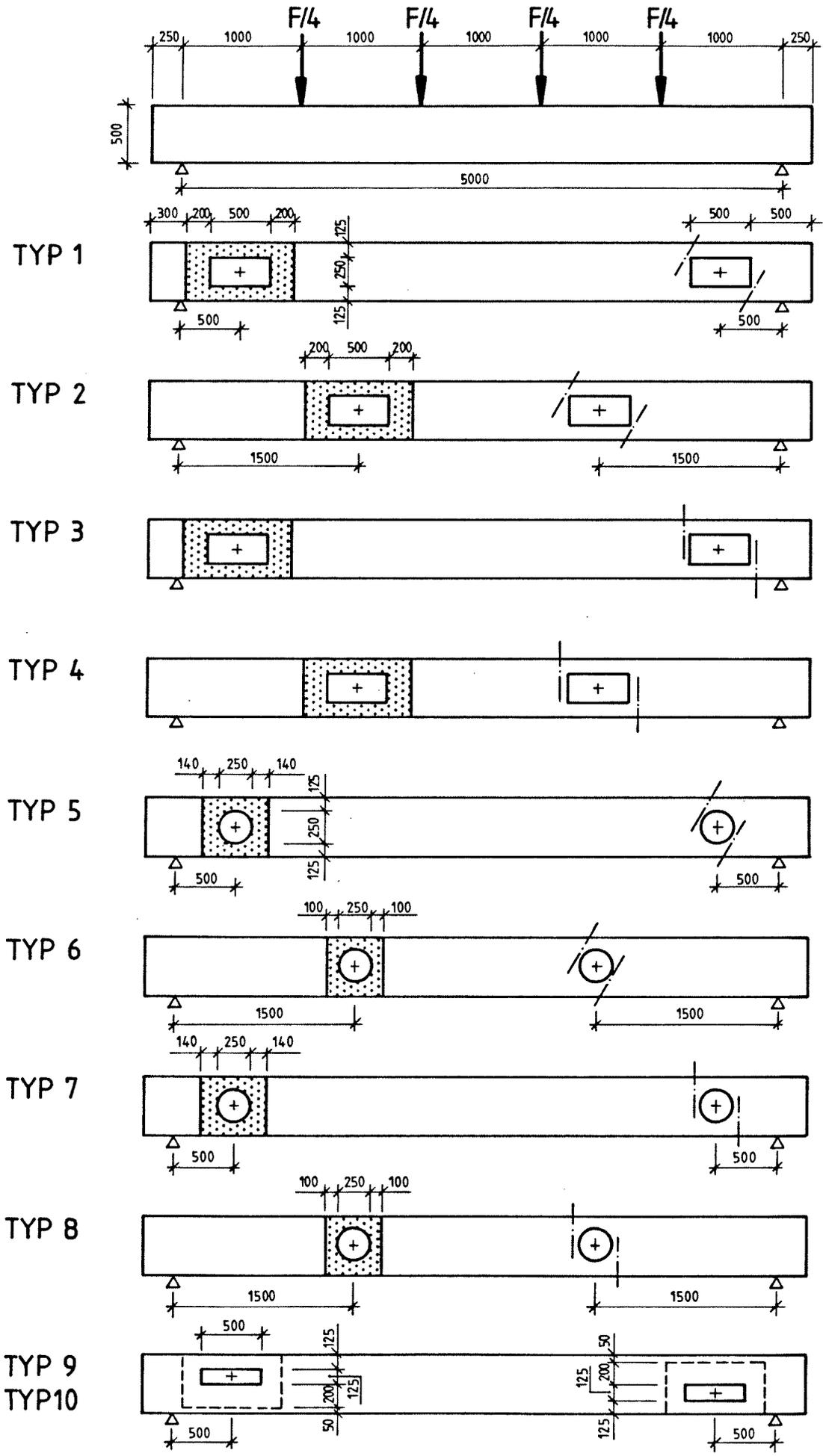
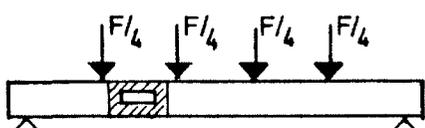
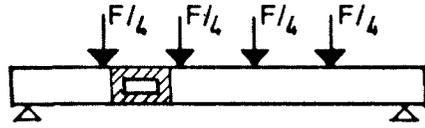
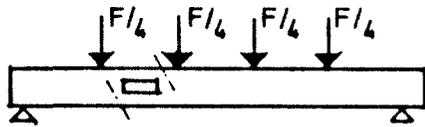
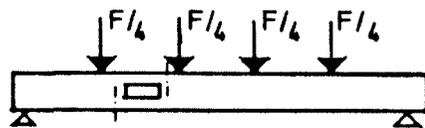


Abb. 28 Belastungsanordnung, Lage und Verstärkung der Versuchsträger

Nr.	Skizze der Belastung und Lage des Durchbruchs	Art der Verstärkung	Probekörper	Höchstlast max F kN	Verhältnis $\frac{\max F}{\text{zul } F}$	Bruchbeschreibung
1		BFU 10 mm	K 2/1	147,6	3,0	Biegezugbruch am Ende der Aufdopplung zur Feldmitte hin. BFU nicht beschädigt
		d = 0,32 B	K 4/1	133,0	2,7	Biegezugbruch wie bei Probekörper K 2/1. Folgebruch in der BFU in Ecke 4
2		BFU 10 mm	K 2/2	133,0	2,7	wie bei Probekörper K 2/1
		d = 0,32 B	K 4/2	133,0	2,7	wie bei Probekörper K 2/1
3		BSt	K 2/3	100,0*	> 2,6	Risse bei Abbruch der Belastung Ecke 1 und 3: w ~ 0,5 mm l ~ 125 mm
		d _e = 16 mm 60°	K 2/4	100,0	2,6 ¹⁾	Biegezugbruch, ausgehend von der unteren Bohrung
4		BSt	K 4/3	100,0*	> 2,6	Risse bei Abbruch der Belastung Ecke 1: w ~ 1 mm; l ~ 135 mm Ecke 3: w ~ 1 mm; l ~ 70 mm
		d _e = 16 mm 90°	K 4/4	120,0	3,2	Biegezugbruch im Lochbereich rd. 19 cm zur Längsmittle versetzt

* Last, bei der der Versuch abgebrochen wurde

1) Schwächung durch Bohrung nicht berücksichtigt

Tabelle 6 Rechteckiger Durchbruch im Viertelspunkt mit gleichen Randabständen
Höchstlasten und Bruchbeschreibung

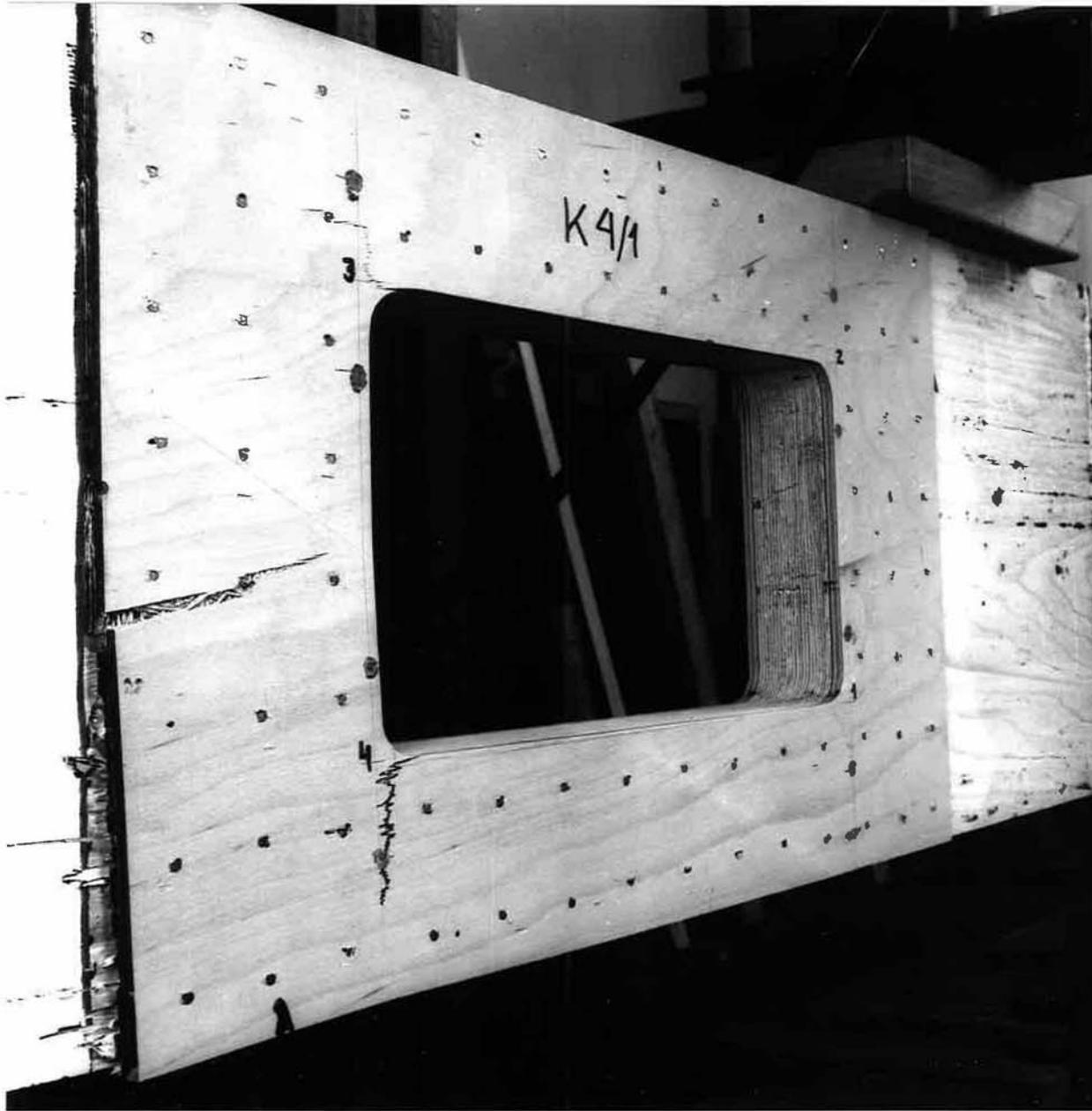


Abb.31 Träger K 4/1 mit Sperrholzaufdopplung nach Erreichen der Höchstlast $F_{ges} = 133 \text{ kN}$

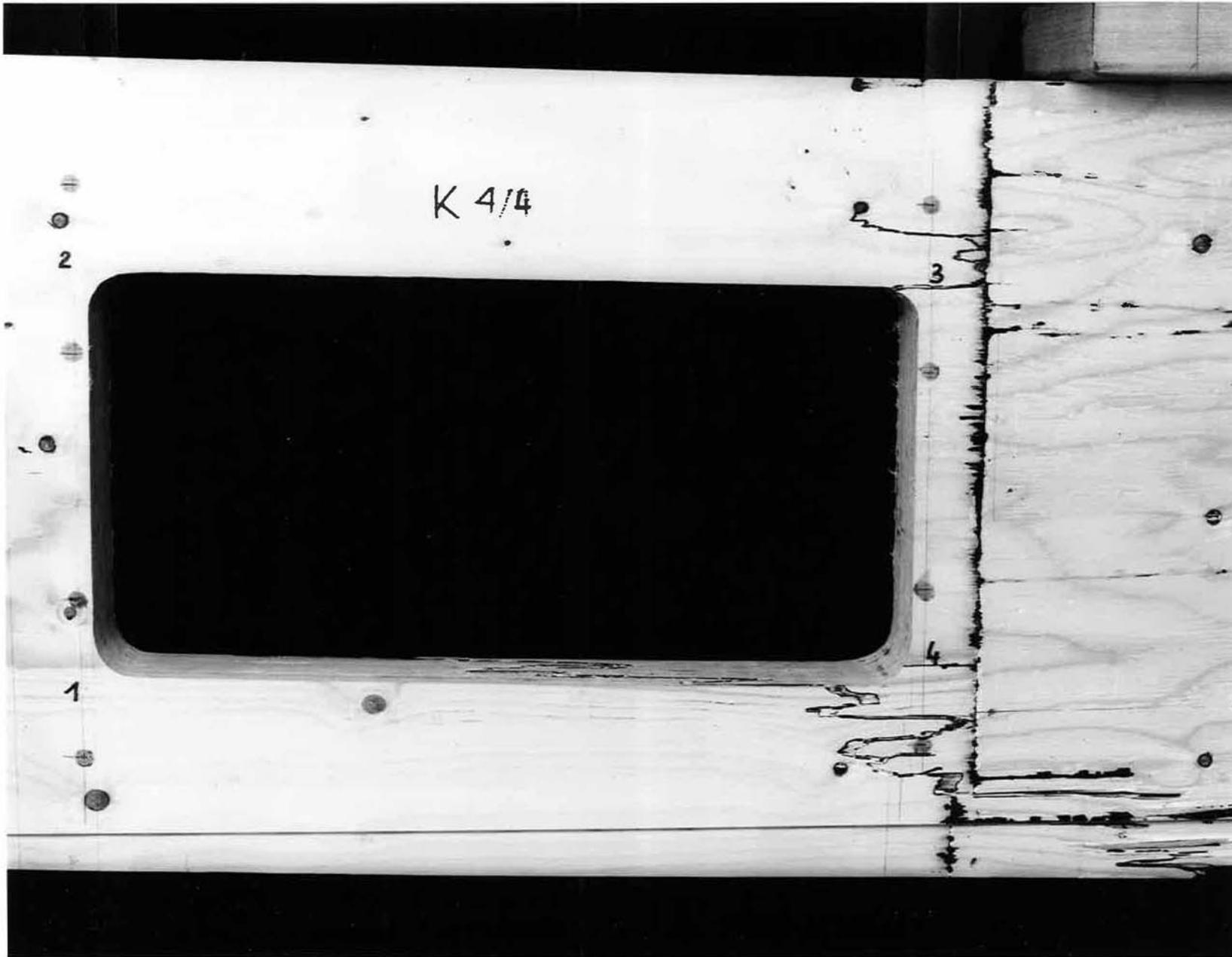


Abb.32 Träger mit rechtwinklig eingeleimten Rippenstählen nach Erreichen der Höchstlast $F_{ges} = 120 \text{ kN}$

A $\hat{=}$ K 2/1	B $\hat{=}$ K 4/1	C $\hat{=}$ K 2/2	D $\hat{=}$ K 4/2
-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [‰]											
		f [mm]			Ecke 1			Ecke 2			Ecke 3			Ecke 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	19	4,65	4,15	4,4	0,10	0,11	0,21	-0,17	-0,18	-0,35	0,27	0,22	0,49	-0,29	-0,31	-0,60
2	38	8,90	8,75	8,8	0,24	0,27	0,51	-0,31	-0,37	-0,68	0,58	0,45	1,03	-0,58	-0,63	-1,22
3	0	0,15	0,05	0,1	0	0,02	0,02	-0,03	-0,04	-0,07	0,03	0,01	0,04	-0,01	-0,02	-0,03
4	38	9,00	8,75	8,9	0,23	0,26	0,49	-0,30	-0,38	-0,68	0,59	0,45	1,04	-0,59	-0,63	-1,22
5	57	13,65	13,05	13,4	0,42	0,47	0,89	-0,44	-0,56	-1,00	0,89	0,73	1,62	-0,93	-0,96	-1,89
6	76	18,25	17,80	18,0	0,57	0,70	1,27	-0,61	-0,73	-1,34	1,19	1,02	2,21	-1,25	-1,29	-2,54
7	95	23,20	22,45	22,8	0,82	0,92	1,74	-0,77	-0,93	-1,70	1,54	1,30	2,84	-1,67	-1,66	-3,33
8	114	28,25	27,25	27,8	1,04	1,22	2,26	-0,93	-1,02	-1,95	1,89	1,61	3,50	-2,18	-2,12	-4,30
		C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	19	4,40	4,10	4,3	0,09	0,13	0,22	-0,14	-0,14	-0,28	0,31	0,28	0,59	-0,35	-0,32	-0,67
2	38	9,10	8,70	8,9	0,21	0,30	0,51	-0,33	-0,25	-0,58	0,61	0,61	1,22	-0,73	-0,67	-1,40
3	0	0,10	0,10	0,1	0,03	0,01	0,04	0,02	0	0,02	0	-0,02	-0,02	-0,02	0	-0,02
4	38	9,10	8,80	9,0	0,22	0,24	0,46	-0,23	-0,29	-0,52	0,60	0,58	1,18	-0,78	-0,69	-1,47
5	57	13,95	13,10	13,5	0,37	0,45	0,82	-0,51	-0,44	-0,95	0,92	0,91	1,83	-1,16	-1,04	-2,20
6	76	18,95	17,95	18,5	0,54	0,73	1,27	-0,70	-0,61	-1,31	1,29	1,26	2,55	-1,63	-1,41	-3,04
7	95	23,90	22,75	23,3	0,73	1,04	1,77	-0,90	-0,79	-1,69	1,66	1,60	3,26	-2,13	-1,84	-3,97
8	114	29,70	27,80	28,8	0,99	1,43	2,42	-1,11	-0,99	-2,10	2,03	2,01	4,04	-2,81	-2,56	-5,37

* jeweils Werte aus 2 Messungen

Tabelle 7 Durchbiegung und Dehnung beim rechteckigen Durchbruch im Viertelpunkt
Verstärkung mit aufgeleimten Baufurnierplatten

A $\hat{=}$ K 2/3	B $\hat{=}$ K 2/4	C $\hat{=}$ K 4/3	D $\hat{=}$ K 4/4
-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [°/∞]											
		f [mm]			Ecke 1			Ecke 2			Ecke 3			Ecke 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	20	6,10	6,05	6,08	0,15	0,17	0,16	-0,79	-0,91	-0,85	0,68	0,66	0,67	-1,38	-1,48	-1,43
2	40	12,20	12,20	12,20	0,44	0,38	0,41	-1,60	-1,50	-1,55	1,41	1,38	1,40	-3,00	-3,15	-3,08
3	0	0,10	0,05	0,08	0,10	0	0,05	-0,06	-0,11	-0,09	0,06	0,02	0,04	-0,09	-0,18	-0,14
4	40	12,30	12,25	12,28	0,42	0,38	0,40	-1,63	-1,54	-1,59	1,42	1,42	1,42	-3,01	-3,16	-3,09
5	60	18,85	18,65	18,75	1,07	0,78	0,93	-2,67	-2,47	-2,57	2,21	2,27	2,24	-4,80	-4,96	-4,88
6	80	25,40	25,50	25,45	1,97	1,54	1,76	-3,81	-3,61	-3,71	3,33	3,52	3,43	-6,72	-6,88	-6,80
7	100	32,60	-	32,60	2,81	-	2,81	-5,11	-	-5,11	4,77	-	4,77	-9,20	-	-9,20
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	20	5,65	5,65	5,65	0,45	0,50	0,48	-0,65	-0,67	-0,66	0,84	0,86	0,85	-1,20	-1,25	-1,23
2	40	11,30	11,35	11,33	1,06	1,07	1,07	-1,37	-1,45	-1,41	1,84	1,92	1,88	-2,54	-2,72	-2,63
3	0	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	-0,05	-0,09	-0,07	0,08	0,06	0,07	-0,10	-0,10	-0,10
4	40	11,45	11,35	11,40	1,05	1,18	1,12	-1,41	-1,42	-1,42	1,84	1,94	1,89	-2,52	-2,73	-2,63
5	60	17,60	17,50	17,55	2,86	3,20	3,03	-2,33	-2,41	-2,37	3,17	3,48	3,33	-3,98	-4,28	-4,13
6	80	23,95	23,85	23,90	5,18	5,43	5,31	-3,36	-3,46	-3,41	5,46	5,80	5,63	-5,59	-6,01	-5,80
7	100	30,90	30,65	30,78	7,86	7,61	7,74	-4,67	-4,67	-4,67	7,86	8,01	7,94	-7,48	-8,06	-7,77
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* jeweils Werte aus 2 Messungen

Tabelle 8 Durchbiegung und Dehnung beim rechteckigen Durchbruch im Viertelpunkt
Verstärkung mit eingeleimten Betonrippenstählen

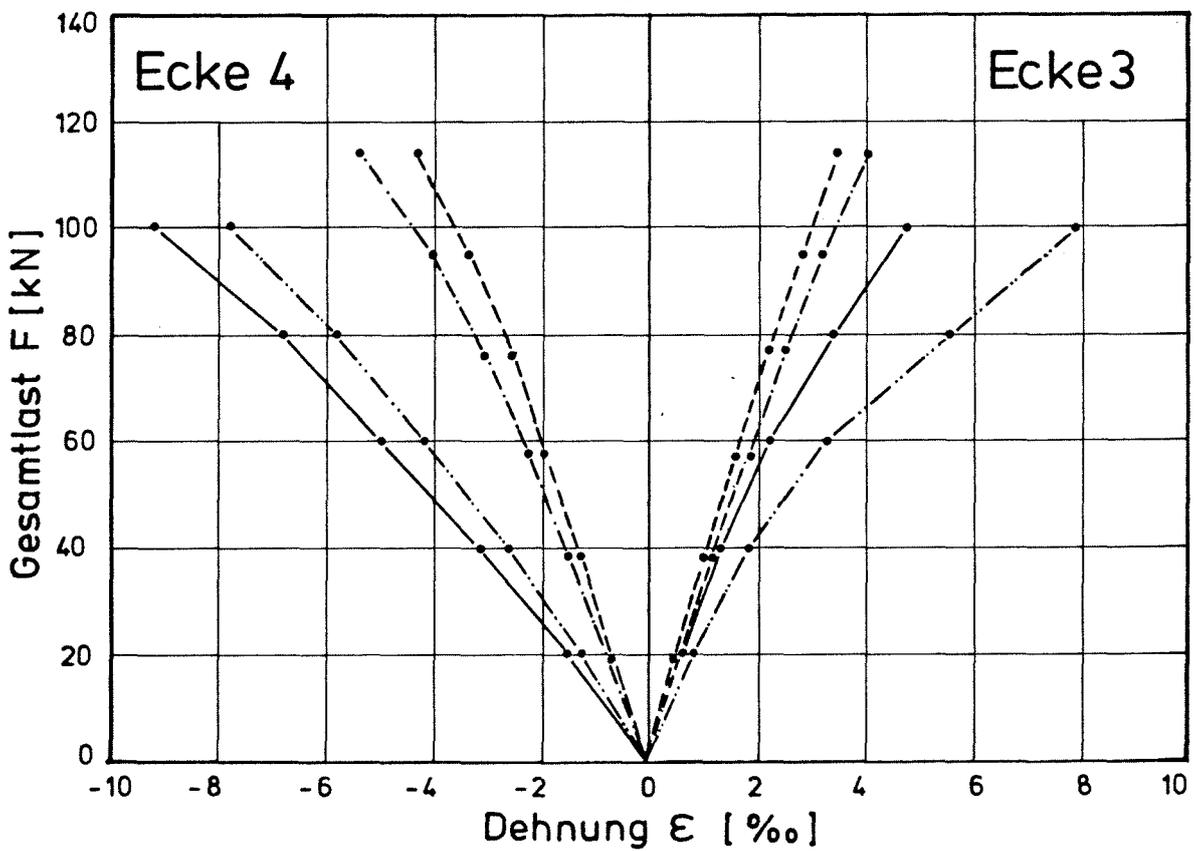
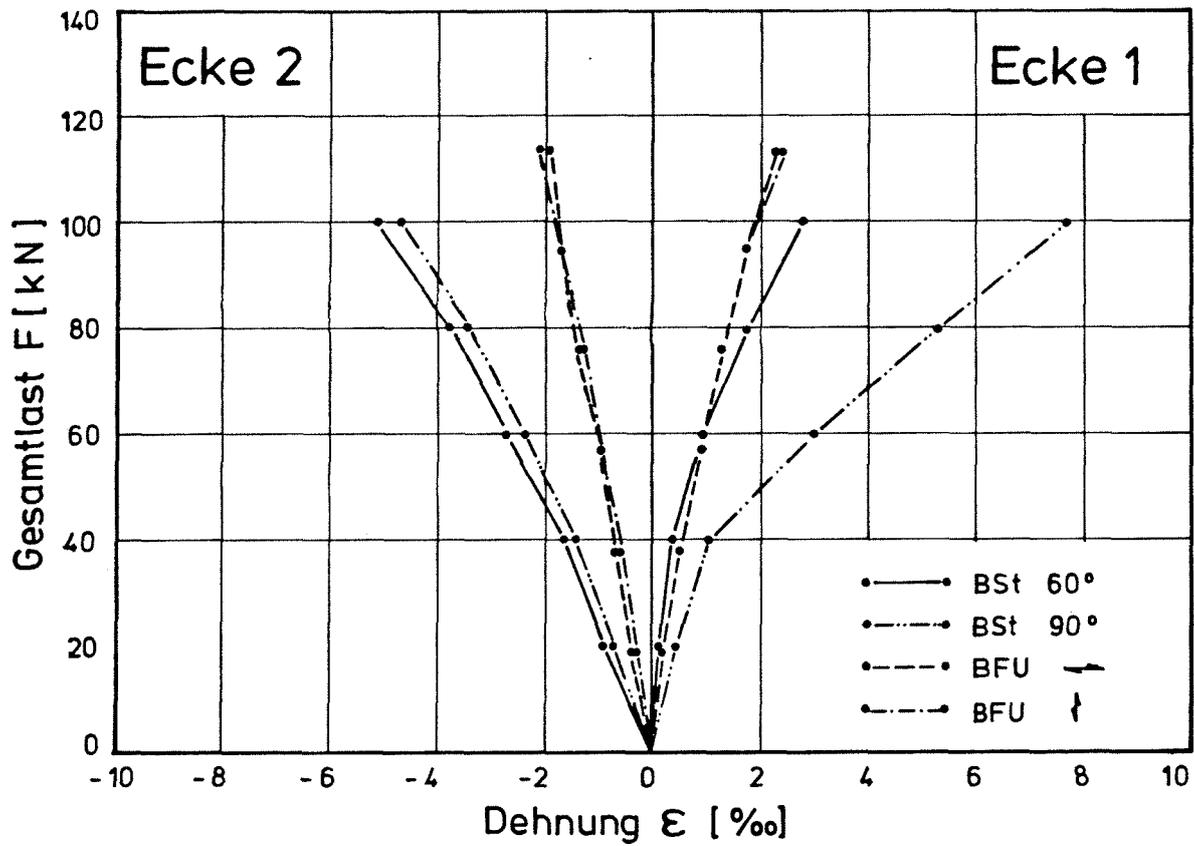
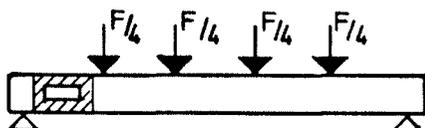
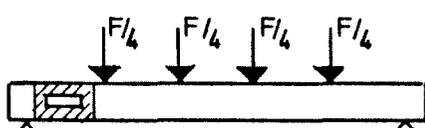
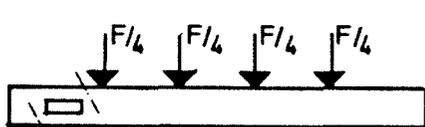
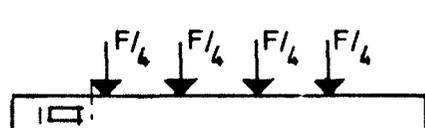


Abb.33 Rechteckiger Durchbruch im Viertelpunkt
Querdehnungen aus Versuch

Nr.	Skizze der Belastung und Lage des Durchbruchs	Art der Verstärkung	Probekörper	Höchstlast max F kN	Verhältnis $\frac{\max F}{\text{zul } F}$	Bruchbeschreibung
1		BFU 12 mm	K 1/1	-	-	Probekörper durch Defekt an der Prüfmaschine zerstört
		d = 0,38 B	K 3/1	147,0	3,0	Horizontaler Querzugriß durch die BFU in Ecke 3. Folgebruch in Ecke 1
2		BFU 12 mm	K 1/2	146,6	3,0	Horizontaler Querzugriß durch die BFU in Ecke 3. Anschließend Biegezugbruch am Lochrand Ecke 4
		d = 0,38 B	K 3/2	156,4	3,2	wie Probekörper K 1/2
3		BSt	K 1/3	75,0*	> 3,0	Risse bei Abbruch der Belastung Ecke 1: w ~ 1 mm; l ~ 85 mm Ecke 3: w ~ 0,8 mm; l ~ 65 mm
		d _e = 16 mm 60°	K 1/4	75,0*	> 3,0	Risse bei Abbruch der Belastung Ecke 1: w ~ 1 mm; l ~ 70 mm Ecke 3: w ~ 0,7 mm; l ~ 65 mm
4		BSt	K 3/3	75,0*	> 3,0	Risse bei Abbruch der Belastung Ecke 1: w ~ 1,9 mm; l ~ 90 mm Ecke 3: w ~ 1,8 mm; l ~ 130 mm
		d _e = 16 mm 90°	K 3/4	75,0*	> 3,0	Risse bei Abbruch der Belastung Ecke 1: w ~ 1,8 mm; l ~ 100 mm Ecke 3: w ~ 1,8 mm; l ~ 85 mm

* Last, bei der der Versuch abgebrochen wurde

Tabelle 9 Rechteckiger Durchbruch im Auflagerbereich mit gleichen Randabständen
Höchstlasten und Bruchbeschreibung

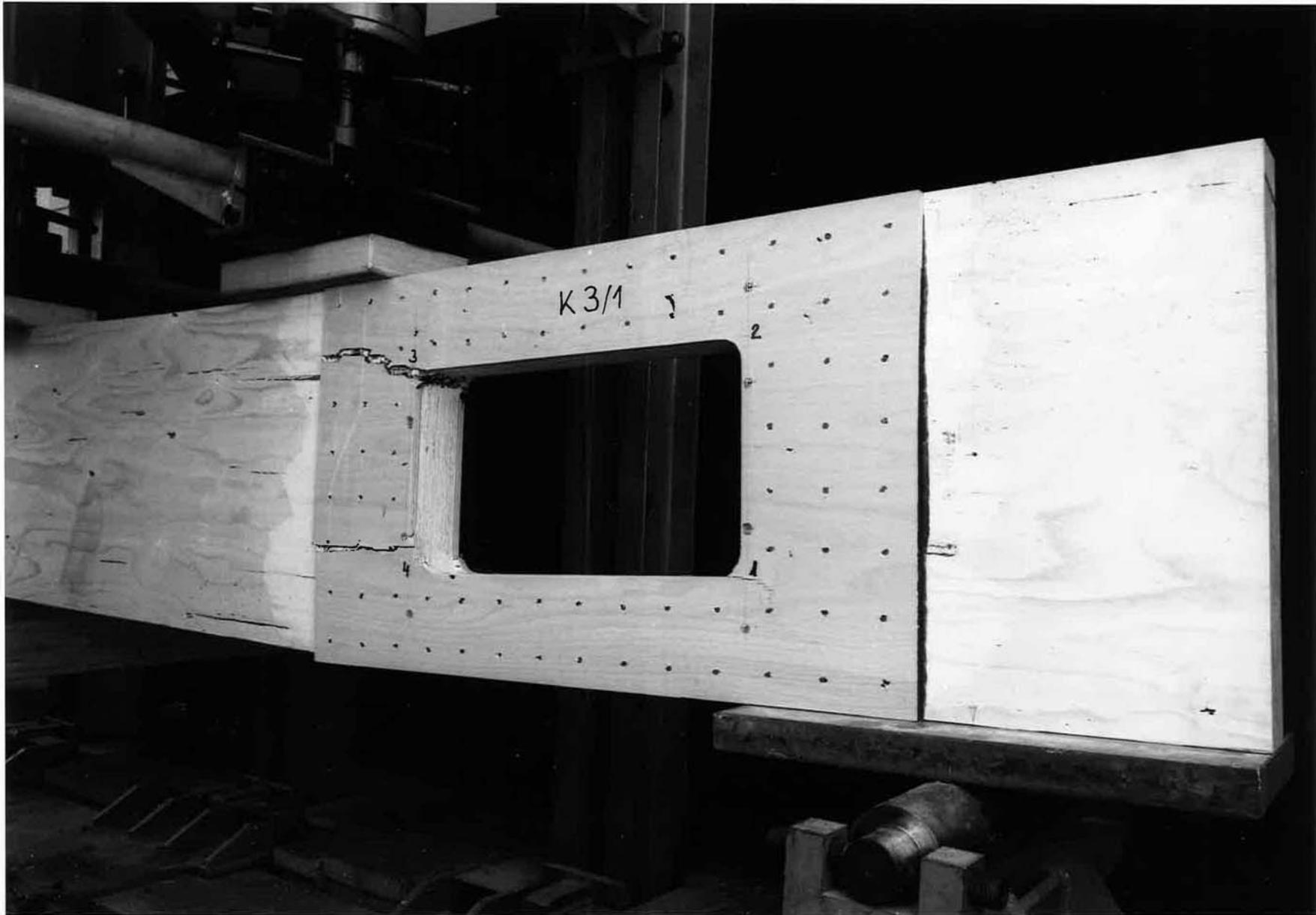


Abb.34 Träger K 3/1 mit Sperrholzaufdopplung nach Erreichen der Höchstlast $F_{\text{ges}} = 147 \text{ kN}$



Abb.35 Träger K 3/4 mit rechtwinklig eingeleimten Rippenstählen nach Erreichen der Last $F_{\text{ges}} = 75 \text{ kN}$

A $\hat{=}$ K 1/1 ¹⁾	B $\hat{=}$ K 3/1	C $\hat{=}$ K 1/2	D $\hat{=}$ K 3/2
---------------------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [°/∞∞]											
		f [mm]			Ecke 1			Ecke 2			Ecke 3			Ecke 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	24,5		6,65			0,50			-0,51			0,61			-0,62	
2	49		13,60			1,01			-1,06			1,30			-1,24	
3	0		0,05			0,10			-0,05			0,10			-0,07	
4	49		13,60			1,02			-1,06			1,32			-1,28	
5	73,5		20,70			1,72			-1,68			2,14			-2,03	
6	98		27,90			2,61			-2,47			3,19			-3,03	
7	122,5		35,70			3,84			-3,40			4,55			-4,39	
8	147		45,45			-			-			-			-	
		C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	24,5	6,95	6,80	6,88	0,38	0,48	0,43	-0,37	-0,32	-0,35	0,50	0,52	0,51	-0,40	-0,41	-0,41
2	49	14,50	13,65	14,08	0,92	0,97	0,95	-0,78	-0,70	-0,74	1,10	1,05	1,08	-0,88	-0,90	-0,89
3	0	0,05	0,10	0,08	0,11	0,08	0,10	-0,02	0	-0,01	0,09	0,04	0,07	-0,02	-0,01	-0,02
4	49	14,55	13,60	14,08	0,98	1,03	1,01	-0,79	-0,69	-0,74	1,10	1,07	1,09	-0,88	-0,90	-0,89
5	73,5	22,10	20,80	21,45	1,57	1,68	1,63	-1,22	-1,12	-1,17	1,88	1,79	1,84	-1,43	-1,44	-1,44
6	98	30,20	28,25	29,23	2,40	2,61	2,51	-1,77	-1,65	-1,71	2,84	2,68	2,76	-2,16	-2,11	-2,14
7	122,5	38,65	36,00	37,30	3,19	4,10	3,65	-2,48	-2,35	-2,42	4,09	3,77	3,93	-3,14	-3,00	-3,07
8	147	-	44,75	-	-	9,94	-	-	-3,43	-	-	8,78	-	-	-4,42	-

* jeweils Werte aus 2 Messungen

1) Probe zufolge Defekt an der Prüfmaschine gebrochen

Tabelle 10 Durchbiegung und Dehnung beim rechteckigen Durchbruch im Auflagerbereich
Verstärkung mit aufgeleimten Baufurnierplatten

A $\hat{=}$ K 1/3	B $\hat{=}$ K 1/4	C $\hat{=}$ K 3/3	D $\hat{=}$ K 3/4
-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [°/∞]											
		f [mm]			Ecke 1			Ecke 2			Ecke 3			Ecke 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	12,5	3,15	3,85	3,50	0,40	0,34	0,37	-1,01	-1,07	-1,04	0,56	0,57	0,57	-0,98	-1,11	-1,05
2	25	6,80	7,65	7,23	0,90	0,82	0,86	-2,22	-2,21	-2,22	1,15	1,28	1,22	-2,18	-2,30	-2,24
3	0	0	0,1	0,05	0,09	0,05	0,07	-0,08	-0,09	-0,09	0,07	0,11	0,09	-0,03	-0,03	-0,03
4	25	6,85	7,75	7,30	0,94	0,80	0,87	-2,25	-2,23	-2,24	1,22	1,28	1,25	-2,20	-2,33	-2,27
5	37,5	10,45	11,55	11,00	1,70	1,64	1,67	-3,62	-3,50	-3,56	1,99	2,50	2,25	-3,51	-3,65	-3,58
6	50	14,05	15,55	14,80	2,75	2,49	2,62	-5,04	-4,85	-4,95	3,24	3,59	3,42	-4,86	-5,10	-4,98
7	62,5	17,90	19,60	18,75	3,93	3,66	3,80	-6,59	-6,37	-6,48	4,46	4,75	4,61	-6,50	-6,72	-6,61
8	75	21,75	23,75	22,75	4,97	4,82	4,90	-8,32	-8,08	-8,20	5,75	5,95	5,85	-8,15	-8,35	-8,25
		C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	12,5	3,50	3,60	3,55	0,72	0,64	0,68	-0,93	-1,01	-0,97	0,78	0,80	0,79	-1,00	-1,08	-1,04
2	25	7,00	7,05	7,03	1,64	1,45	1,55	-2,04	-2,08	-2,06	1,74	1,83	1,79	-2,15	-2,25	-2,20
3	0	0	0,05	0,03	0,16	0,09	0,13	-0,10	-0,13	-0,12	0,09	0,12	0,11	-0,10	-0,14	-0,12
4	25	7,00	7,40	7,20	1,77	1,43	1,60	-2,10	-2,09	-2,10	1,84	1,85	1,85	-2,24	-2,28	-2,26
5	37,5	10,80	10,95	10,88	3,60	2,99	3,30	-3,20	-3,33	-3,27	3,72	3,50	3,61	-3,43	-3,62	-3,53
6	50	14,70	14,75	14,73	5,62	4,66	5,14	-4,49	-4,66	-4,58	6,00	5,58	5,79	-4,83	-5,17	-5,00
7	62,5	18,70	18,55	18,63	7,74	6,98	7,36	-5,89	-6,18	-6,04	8,06	7,80	7,93	-6,33	-6,71	-6,52
8	75	22,75	22,70	22,73	9,84	8,94	9,39	-7,37	-7,80	-7,59	10,34	10,04	10,19	-8,02	-8,57	-8,30

* jeweils Werte aus 2 Messungen

Tabelle 11 Durchbiegung und Dehnung beim rechteckigen Durchbruch im Auflagerbereich
Verstärkung mit eingelegten Betonrippenstählen

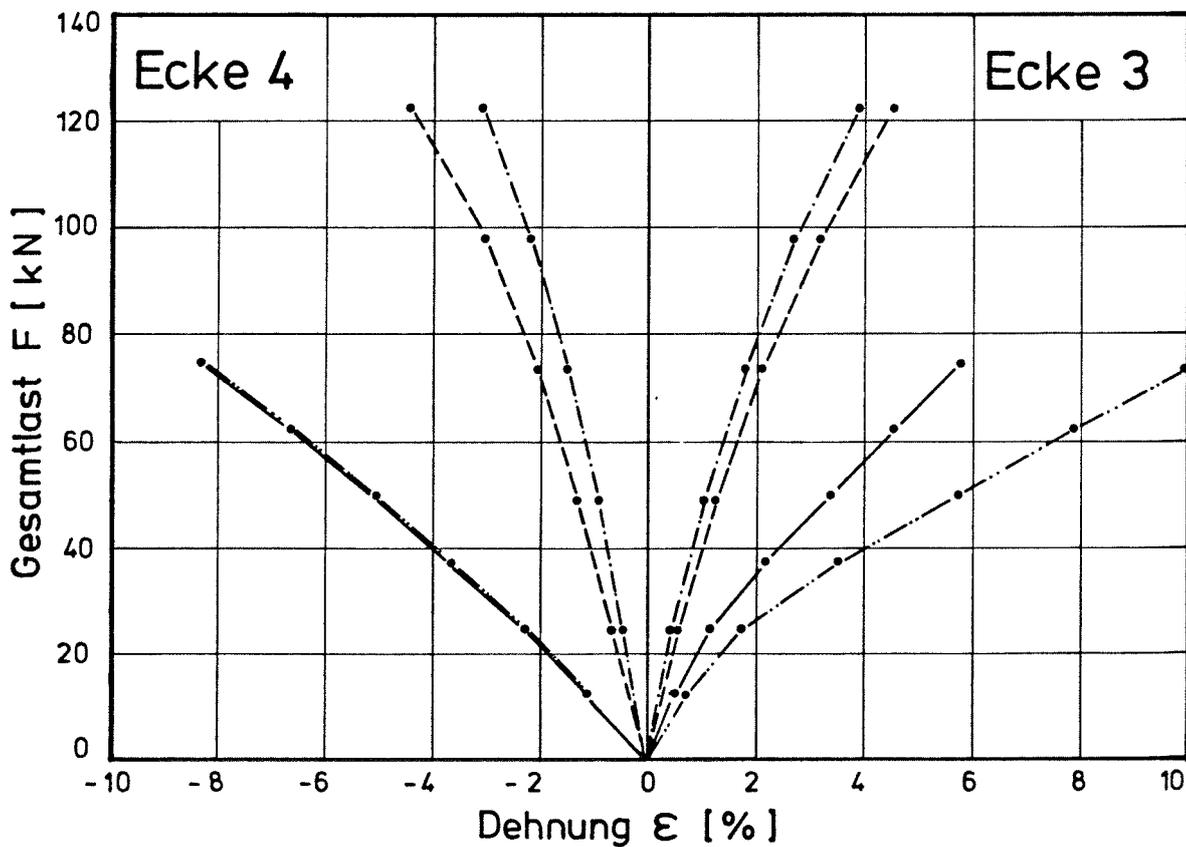
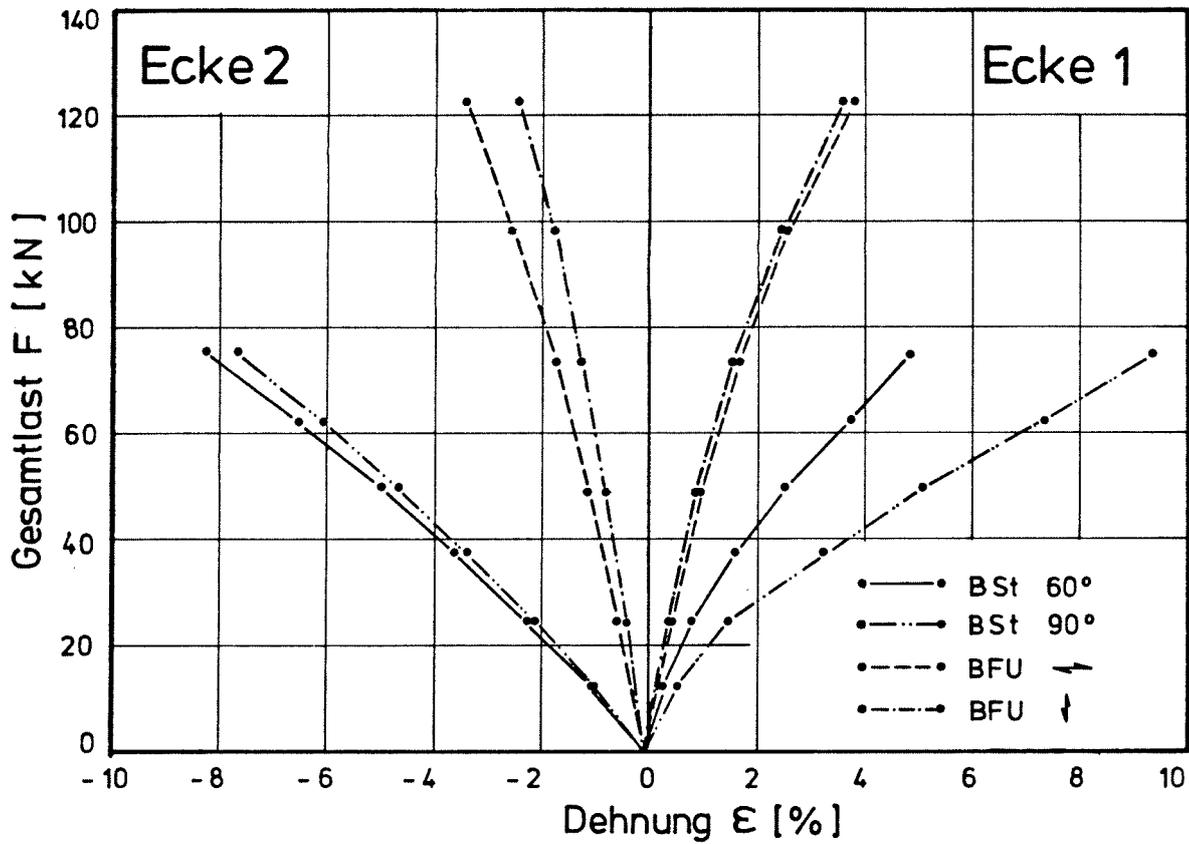


Abb.36 Rechteckiger Durchbruch im Auflagerbereich
Querdehnungen aus Versuch

Nr.	Skizze der Belastung und Lage des Durchbruchs	Art der Verstärkung	Probekörper	Höchstlast max F kN	Verhältnis $\frac{\max F}{\text{zul } F}$	Bruchbeschreibung
1		ohne; Durchbruch unten	K 9/3	70,0*	> 3,7	Beginnendes Versagen durch Querkzug in Ecke 3; Rißweite ~ 1 mm, Rißlänge ~ 55 mm
			K 9/4	70,0*	> 3,7	Beginnendes Versagen durch Querkzug in Ecke 3; Rißweite ~ 1 mm, Rißlänge vorn 120, hinten 30 mm" Ecke 1 : W = 0,4 mm, l ~ 3,5 cm
2		ohne; Durchbruch oben	K 10/3	60,0*	> 3,2	Beginnendes Versagen durch Querkzug in Ecke 1; Rißweite ~ 1 mm, Rißlänge ~ 50 mm
			K 10/4	70,0**	> 3,7	Beginnendes Versagen durch Querkzug in Ecke 1; Rißweite ~ 1 mm, Rißlänge ~ 95 mm
3		BFU 10 mm ↔ d = 0,32 B	K 9/1	171,5	3,5	Horizontaler Querkzugbruch durch BFU in Ecke 3. Anschl. Biegezugbruch im Untergurt bei Ecke 1
			K 9/2	171,5	3,5	wie Probekörper K 9/1
4		BFU 10 mm ↓ d = 0,32 B	K 10/1	160,8	3,3	Biegezugbruch in Feldmitte bei max M; außerhalb der Verstärkung
			K 10/2	170,8	3,5	wie Probekörper K 10/1

* Last, bei der der Versuch abgebrochen wurde

Tabelle 12 Rechteckiger Durchbruch im Auflagerbereich mit ungleichen Randabständen
Höchstlasten und Bruchbeschreibung

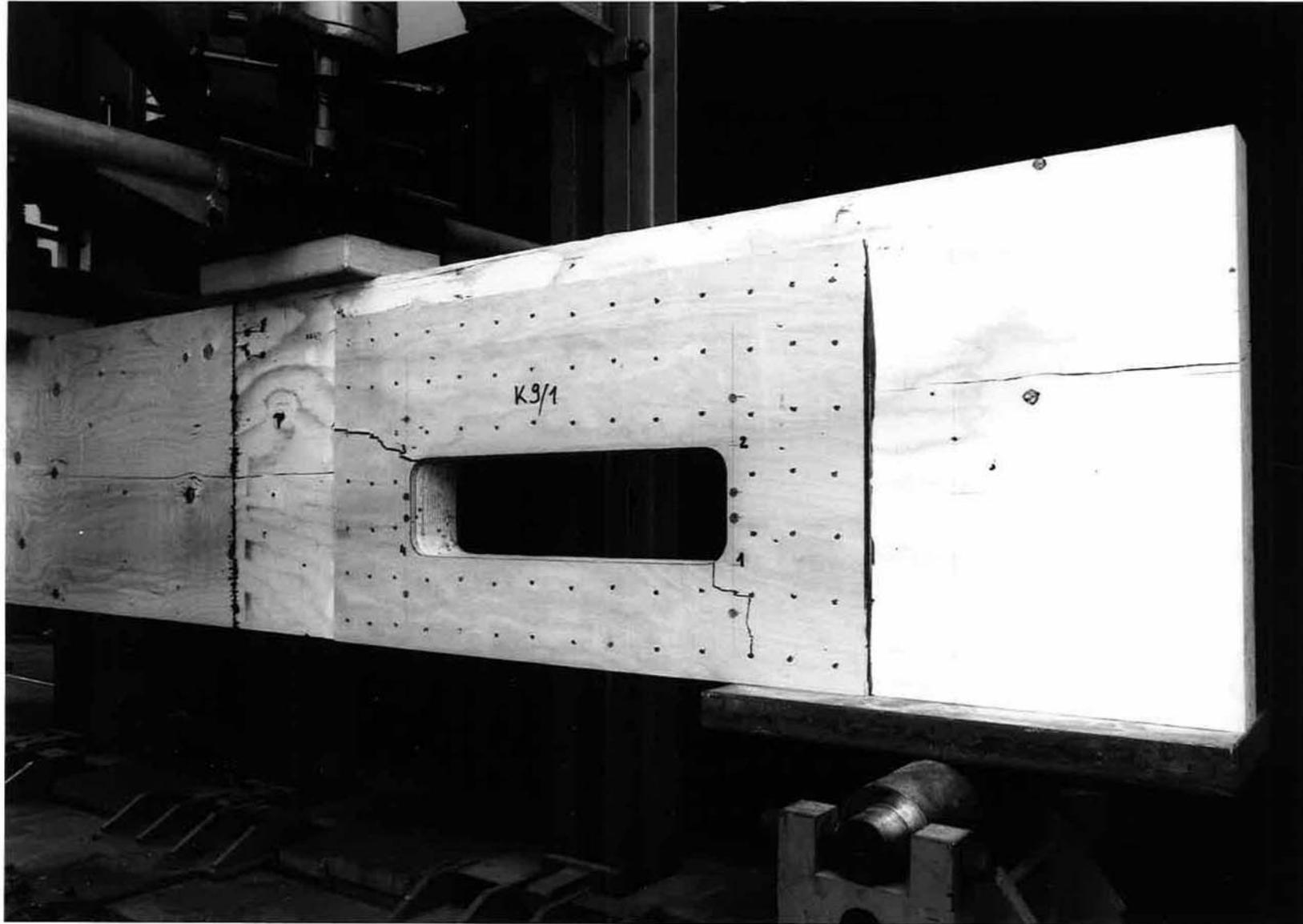


Abb.37 Träger K 9/1 mit rechteckigem Durchbruch im Auflagerbereich und ungleichen Randabständen nach Erreichen der Höchstlast $F_{\text{ges}} = 171,5 \text{ kN}$

A $\hat{=}$ K 9/3	B $\hat{=}$ K 9/4	C $\hat{=}$ K 10/3 ¹⁾	D $\hat{=}$ K 10/4 ¹⁾
-------------------	-------------------	----------------------------------	----------------------------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [°/∞]											
		f [mm]			Ecke 1			Ecke 2			Ecke 3			Ecke 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	10	2,35	2,50	2,43	-0,07	0,10	0,02	-0,68	-0,77	-0,73	0,35	0,36	0,36	-0,44	-0,44	-0,44
2	20	4,80	5,00	4,90	-0,07	0,20	0,07	-1,40	-1,50	-1,45	0,70	0,74	0,72	-0,88	-1,05	-0,97
3	0	0	0,10	0,05	-0,02	-0,07	-0,05	-0,02	-0,11	-0,07	0,04	-0,07	-0,02	-0,04	-0,08	-0,06
4	20	4,80	5,10	4,95	0,09	0,14	0,12	-1,36	-1,58	-1,47	0,72	0,76	0,74	-0,89	-1,06	-0,98
5	30	7,65	7,70	7,68	0,10	0,26	0,18	-2,14	-2,33	-2,24	1,17	1,28	1,23	-1,34	-1,43	-1,39
6	40	10,20	10,40	10,30	0,20	0,43	0,32	-2,84	-3,18	-3,01	1,64	1,89	1,77	-1,83	-1,95	-1,89
7	50	13,00	13,10	13,05	0,35	0,74	0,55	-3,74	-3,10	-3,42	2,63	3,03	2,83	-2,58	-2,78	-2,68
8	60	15,80	15,80	15,80	0,80	1,29	1,05	-4,79	-5,00	-4,90	3,75	4,74	4,25	-3,14	-3,49	-3,32
		C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	10	3,00	2,80	2,90												
2	20	5,80	5,00	5,40												
3	0	0	0,10	0,05												
4	20	5,90	5,00	5,45												
5	30	8,80	7,90	8,35												
6	40	11,95	10,20	11,08												
7	50	15,05	13,10	14,08												
8	60	18,10	15,95	17,03												

* jeweils Werte aus 2 Messungen

1) Bei diesen Proben wurden keine Dehnungen gemessen

Tabelle 13 Durchbiegung und Dehnung beim unverstärkten Durchbruch im Auflagerbereich mit ungleichen Randabständen

A $\hat{=}$ K 9/1	B $\hat{=}$ K 9/2	C $\hat{=}$ K 10/1	D $\hat{=}$ K 10/2
-------------------	-------------------	--------------------	--------------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [°/∞]											
		f [mm]			Ecke 1			Ecke 2			Ecke 3			Ecke 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	24,5	5,95	5,90	5,9	0	-0,01	-0,01	-0,38	-0,38	-0,38	0,20	0,22	0,21	-0,22	-0,20	-0,21
2	49	12,40	12,20	12,3	0	0,05	0,03	-0,81	-0,81	-0,81	0,38	0,48	0,43	-0,49	-0,42	-0,46
3	0	0,05	0	0	0,02	-0,01	0,01	-0,02	0	-0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,03
4	49	12,40	12,30	12,4	0,10	0,07	0,09	-0,82	-0,78	-0,80	0,40	0,48	0,44	-0,47	-0,40	-0,44
5	73,5	18,95	18,85	18,9	0,06	0,14	0,10	-1,28	-1,25	-1,27	0,62	0,76	0,69	-0,69	-0,65	-0,67
6	98	25,35	25,25	25,3	0,12	0,25	0,19	-1,81	-1,78	-1,80	0,93	1,19	1,06	-1,00	-0,88	-0,94
7	122,5	32,10	32,00	32,1	0,23	0,41	0,32	-2,40	-2,38	-2,39	1,31	1,59	1,45	-1,27	-1,11	-1,19
8	147	39,15	38,95	39,1	0,43	0,55	0,49	-3,13	-3,06	-3,10	1,73	2,09	1,91	-1,54	-1,34	-1,44
		C	D	MW	D	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	24,5	6,90	6,05	6,5	0,30	0,29	0,30	-0,10	-0,10	-0,10	0,16	0,19	0,18	-0,24	-0,26	-0,25
2	49	13,95	12,35	13,2	0,57	0,58	0,58	-0,21	-0,20	-0,21	0,32	0,34	0,31	-0,55	-0,56	-0,56
3	0	0,15	0,05	0,1	0,03	0,02	0,03	-0,02	0,01	-0,01	0	0,02	0,01	0,01	0,04	-0,03
4	49	14,05	12,45	13,3	0,60	0,62	0,61	-0,23	-0,19	-0,21	0,35	0,35	0,35	-0,56	-0,56	-0,56
5	73,5	21,45	18,95	20,2	0,93	0,96	0,95	-0,32	-0,32	-0,32	0,52	0,54	0,53	-0,88	-0,89	-0,89
6	98	28,70	25,55	27,1	1,43	1,38	1,41	-0,45	-0,44	-0,45	0,73	0,77	0,75	-1,29	-1,17	-1,23
7	122,5	36,20	32,40	34,3	1,80	1,81	1,81	-0,58	-0,59	-0,59	1,04	1,04	1,04	-1,61	-1,59	-1,60
8	147	44,25	39,75	42,0	2,32	2,45	2,39	-0,70	-0,74	-0,72	1,34	1,32	1,33	-1,99	-2,04	-2,02

* jeweils Werte aus 2 Messungen

Tabelle 14 Durchbiegung und Dehnung beim rechteckigen Durchbruch im Auflagerbereich mit ungleichen Randabständen
Verstärkung mit aufgeleimten Baufurnierplatten

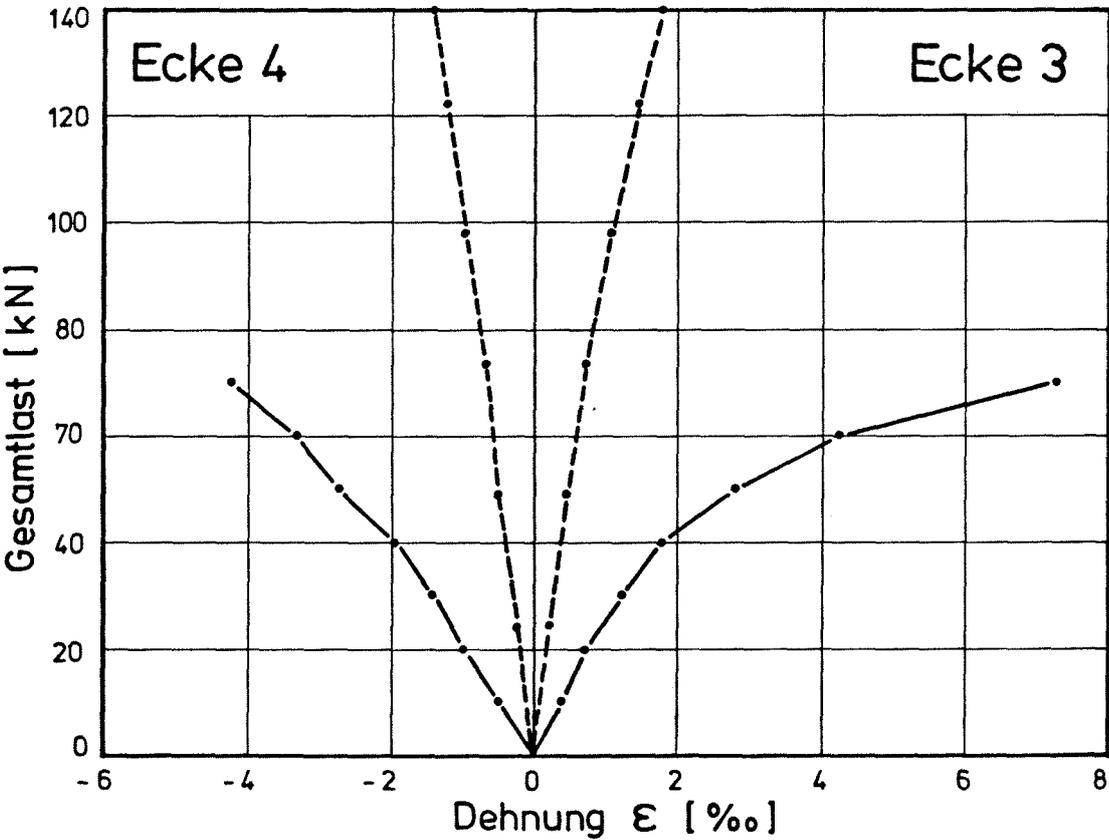
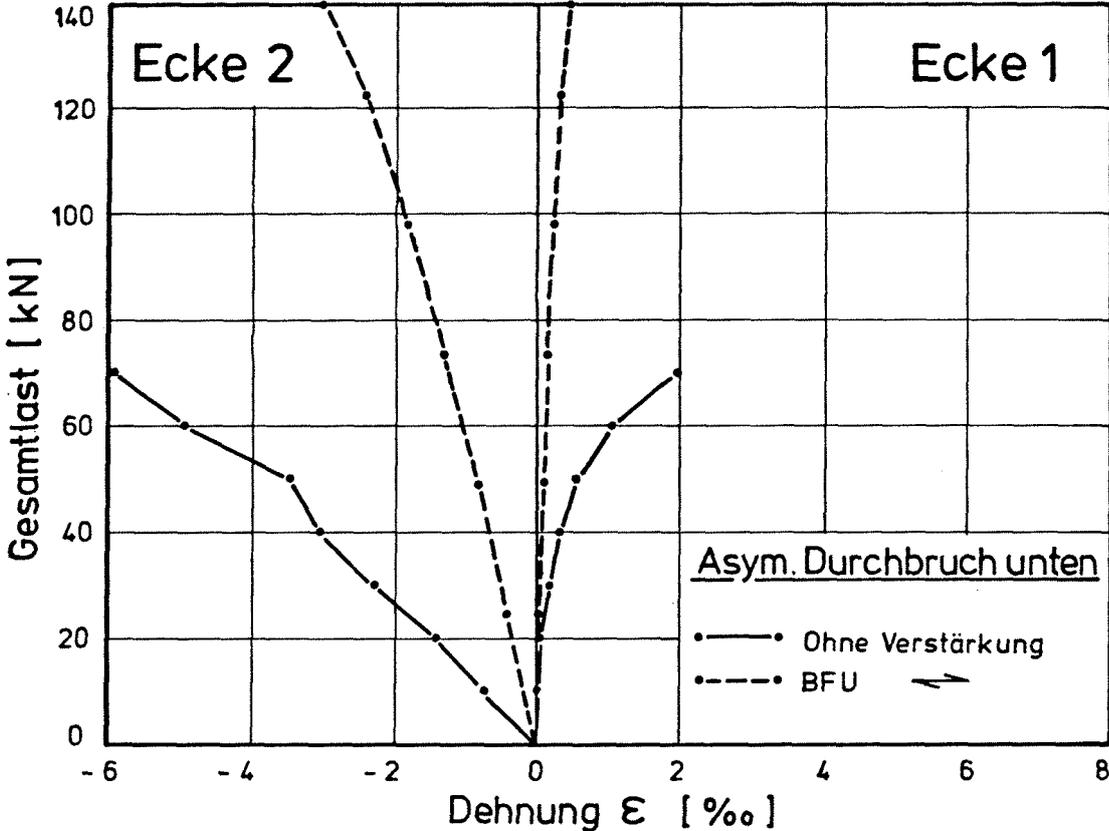
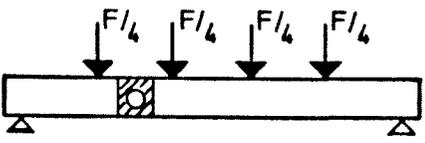
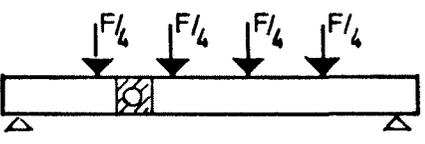
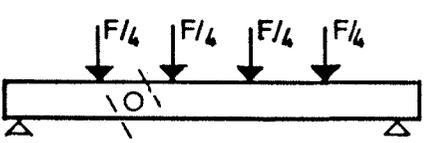
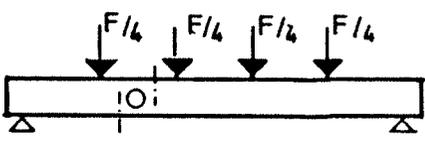


Abb.38 Gemessene Querdehnungen beim Rechteckdurchbruch im Auflagerbereich mit ungleichen Randabständen

Nr.	Skizze der Belastung und Lage des Durchbruchs	Art der Verstärkung	Probekörper	Höchstlast max F kN	Verhältnis $\frac{\text{max F}}{\text{zul F}}$	Bruchbeschreibung
1		BFU 10 mm	K 6/1	162,0	3,3	Biegezugbruch im Lochbereich, Abscheren der BFU unter 45°
		$d = 0,32 B$	K 8/1	177,6	3,6	Biegezugbruch in Feldmitte bei max M. BFU nicht zerstört
2		BFU 10 mm	K 6/2	171,5	3,5	Biegezugbruch im Lochbereich zur Feldmitte hin. Scherbruch zwischen Kertopuu und BFU
		$d = 0,32 B$	K 8/2	190,8	3,9	Biegezugbruch am Ende der Aufdopplung zur Feldmitte hin
3		BSt	K 6/3	120*	> 3,1	Beginnendes Versagen durch Querschnittsbruch an Unterkante Durchbruch, Rißweite ~ 0,8 mm, Rißlänge ~ 55 mm
		$d_e = 16 \text{ mm}$ 60°	K 6/4	120*	> 3,1	wie bei Probekörper K 6/3
4		BSt	K 8/3	120*	> 3,1	Risse bei Abbruch der Belastung 'Ecke' 1: w ~ 1 mm; l ~ 130 mm 'Ecke' 3: w ~ 1 mm; l ~ 45 mm
		$d_e = 16 \text{ mm}$ 90°	K 8/4	120*	> 3,1	wie bei Probekörper K 8/3 Rißlängen in 'Ecke' 1: l ~ 105 mm und in 'Ecke' 3: l ~ 80 mm

* Last, bei der der Versuch abgebrochen wurde

Tabelle 15 Runder Trägerdurchbruch im Viertelpunkt
Höchstlasten und Bruchbeschreibung

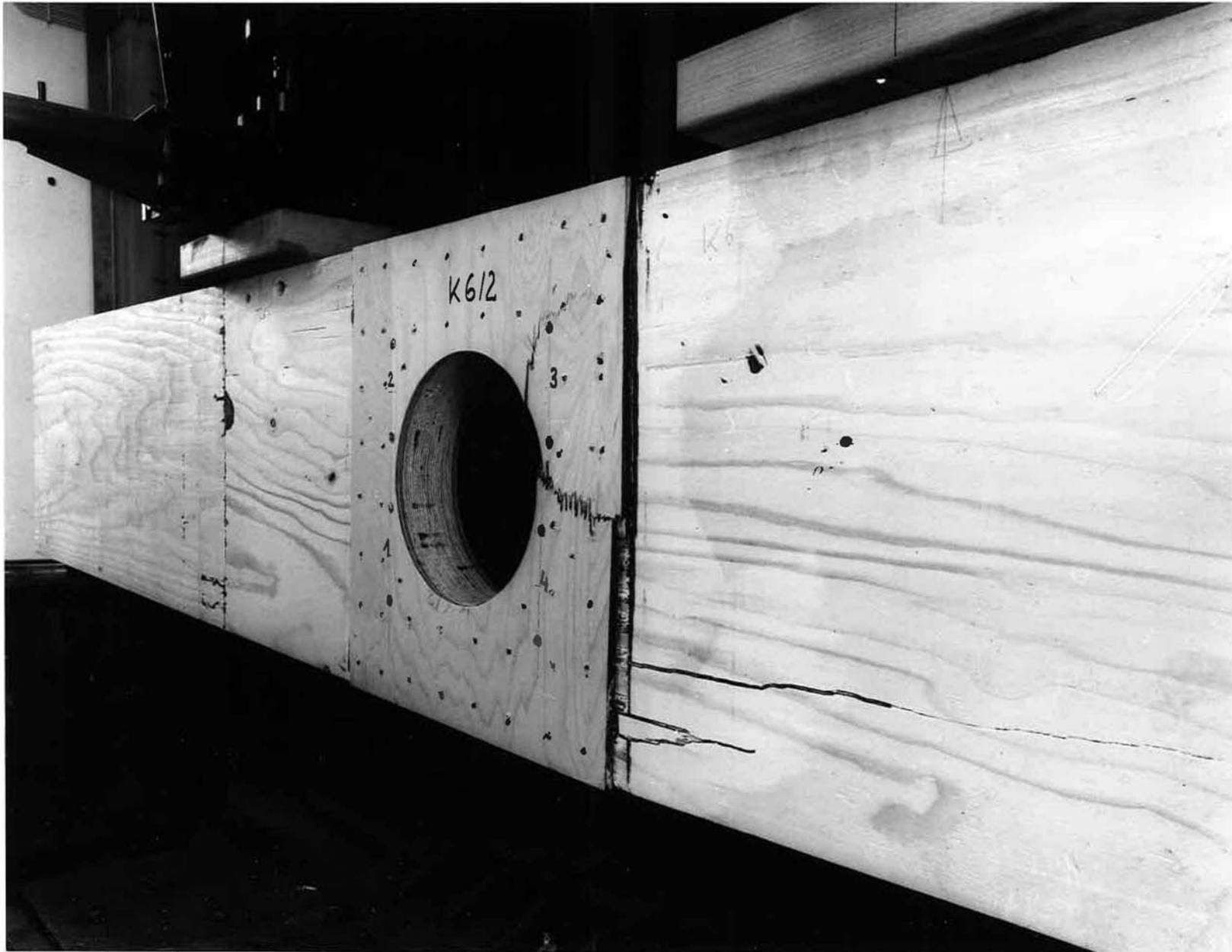


Abb.38 Träger K 6/2 mit Sperrholzaufdopplung nach Erreichen der Höchstlast $F_{\text{ges}} = 171,5 \text{ kN}$

A $\hat{=}$ K 6/1	B $\hat{=}$ K 8/1	C $\hat{=}$ K 6/2	D $\hat{=}$ K 8/2
-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [$^{\circ}/\infty$]											
		f [mm]			'Ecke' 1			'Ecke' 2			'Ecke' 3			'Ecke' 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	24,5	6,15	5,90	6,0	-0,03	-0,03	-0,03	-0,05	-0,06	-0,06	0,12	0,10	0,11	-0,15	-0,18	-0,17
2	49	12,55	11,90	12,2	0	-0,01	0	-0,09	-0,10	-0,10	0,24	0,23	0,24	-0,35	-0,34	-0,35
3	0	0,15	0,10	0,1	-0,04	-0,02	-0,03	-0,02	-0,01	-0,20	-0,01	0,01	0	0,04	0	0,02
4	49	12,65	11,90	12,3	-0,01	-0,01	-0,01	-0,08	-0,06	-0,07	0,28	0,25	0,27	-0,30	-0,32	-0,31
5	73,5	19,15	18,15	18,7	0,02	0,03	0,03	-0,10	-0,09	-0,10	0,39	0,36	0,38	-0,39	-0,48	-0,44
6	98	25,85	24,30	25,1	0,02	0,07	0,05	-0,15	-0,14	-0,15	0,50	0,48	0,49	-0,73	-0,62	-0,68
7	122,5	32,70	29,75	31,2	0,04	0,13	0,09	-0,20	-0,14	-0,17	0,67	0,66	0,67	-0,90	-0,78	-0,84
8	147	39,75	37,50	38,6	0,07	0,15	0,12	-0,25	-0,20	-0,23	0,87	0,87	0,87	-1,12	-1,00	-1,06
		C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	24,5	5,90	5,85	5,9	0,01	0,01	0,01	-0,01	-0,06	-0,04	0,13	0,13	0,13	-0,15	-0,13	-0,14
2	49	11,90	11,95	11,9	0,04	-0,01	0,02	-0,08	-0,10	-0,09	0,26	0,22	0,24	-0,32	-0,26	-0,29
3	0	0,10	0,10	0,1	0,05	0	0,03	0	0	0	0,01	-0,02	-0,01	0,04	-0,02	0,01
4	49	11,90	12,05	12,0	0,07	-0,01	0,03	-0,05	-0,08	-0,07	0,24	0,20	0,22	-0,30	-0,28	-0,29
5	73,5	18,15	18,25	18,2	0,10	0,02	0,06	-0,09	-0,16	-0,13	0,36	0,35	0,36	-0,48	-0,43	-0,46
6	98	24,45	24,50	24,5	0,13	0,02	0,08	-0,11	-0,22	-0,17	0,49	0,48	0,49	-0,65	-0,51	-0,58
7	122,5	30,85	30,90	30,9	0,16	0,03	0,10	-0,14	-0,27	-0,21	0,65	0,60	0,63	-0,83	-0,75	-0,79
8	147	37,60	37,95	37,8	0,24	0,06	0,15	-0,16	-0,37	-0,27	0,86	0,89	0,88	-1,00	-0,95	-0,98

* jeweils Werte aus 2 Messungen

Tabelle 16 Durchbiegung und Dehnung beim runden Trägerdurchbruch im Viertelpunkt
Verstärkung mit aufgeleimten Baufurnierplatten

A $\hat{=}$ K 6/3	B $\hat{=}$ K 6/4	C $\hat{=}$ K 8/3	D $\hat{=}$ K 8/4
-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [°/∞]											
		f [mm]			'Ecke' 1			'Ecke' 2			'Ecke' 3			'Ecke' 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	20	5,25	5,05	5,15	-0,08	-0,06	-0,07	-0,28	-0,24	-0,26	0,25	0,23	0,24	-0,59	-0,52	-0,56
2	40	10,75	10,15	10,45	-0,14	-0,09	-0,12	-0,55	-0,45	-0,50	0,48	0,50	0,49	-1,28	-1,12	-1,20
3	0	0,10	0,10	0,10	-0,01	0,01	0	-0,03	-0,05	-0,04	0,02	0	0,01	-1,01	0,01	0
4	40	10,75	10,20	10,48	-0,16	-0,09	-0,12	-0,55	-0,51	-0,53	0,49	0,49	0,49	-1,26	-1,15	-1,21
5	60	16,30	15,30	15,80	-0,23	-0,15	-0,19	-0,87	-0,75	-0,81	0,74	0,74	0,74	-2,02	-1,79	-1,91
6	80	21,85	20,65	21,25	-0,29	-0,23	-0,26	-1,22	-1,04	-1,13	1,03	1,00	1,02	-2,82	-2,52	-2,67
7	100	27,35	25,85	26,60	-0,37	-0,27	-0,32	-1,56	-1,38	-1,47	1,30	1,31	1,31	-3,65	-3,24	-3,45
8	120	33,20	31,35	32,28	-0,47	-0,31	-0,39	-1,99	-1,76	-1,88	1,63	1,70	1,67	-4,48	-3,97	-4,23
		C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	20	4,90	4,95	4,93	0,14	0,14	0,14	-0,14	-0,21	-0,18	0,37	0,45	0,41	-0,51	-0,56	-0,54
2	40	10,05	10,05	10,05	0,29	0,31	0,30	-0,40	-0,42	-0,41	0,84	0,99	0,92	-1,08	-1,13	-1,11
3	0	0,05	0,10	0,08	0,03	0,01	0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,01	0,08	0,05	0,01	0	0,01
4	40	10,10	10,10	10,10	0,28	0,32	0,30	-0,38	-0,41	-0,40	0,88	0,98	0,93	-1,10	-1,12	-1,11
5	60	15,25	15,40	15,33	0,43	0,51	0,47	-0,62	-0,62	-0,62	1,42	1,55	1,49	-1,74	-1,76	-1,75
6	80	20,60	20,85	20,73	0,58	0,72	0,65	-0,86	-0,83	-0,85	2,07	2,27	2,17	-2,49	-2,47	-2,48
7	100	26,05	26,10	26,08	1,35	1,44	1,40	-1,26	-1,20	-1,23	3,06	3,77	3,42	-3,15	-3,24	-3,20
8	120	31,70	31,65	31,68	3,32	2,71	3,02	-1,72	-1,53	-1,63	4,20	5,17	4,69	-3,88	-3,98	-3,93

* jeweils Werte aus 2 Messungen

Tabelle 17 Durchbiegung und Dehnung beim runden Trägerdurchbruch im Viertelpunkt
Verstärkung mit eingeleimten Betonrippenstählen

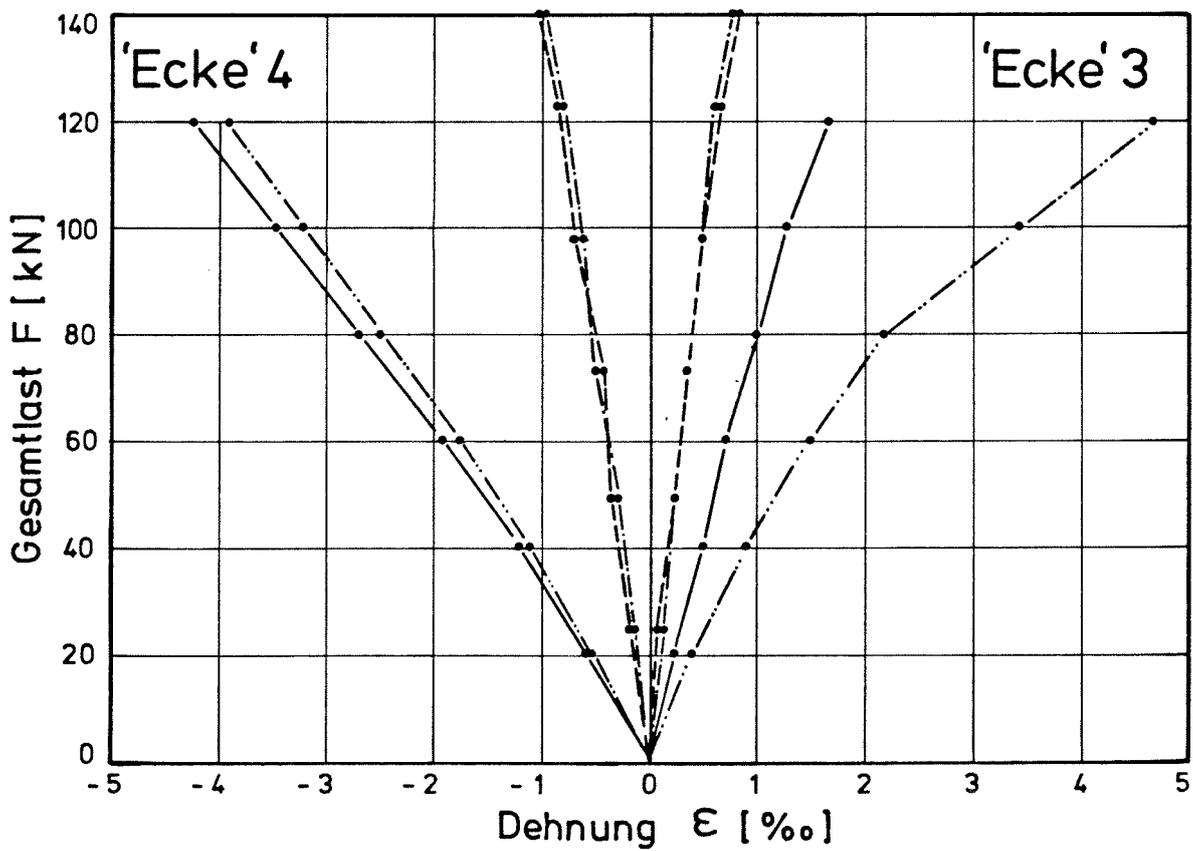
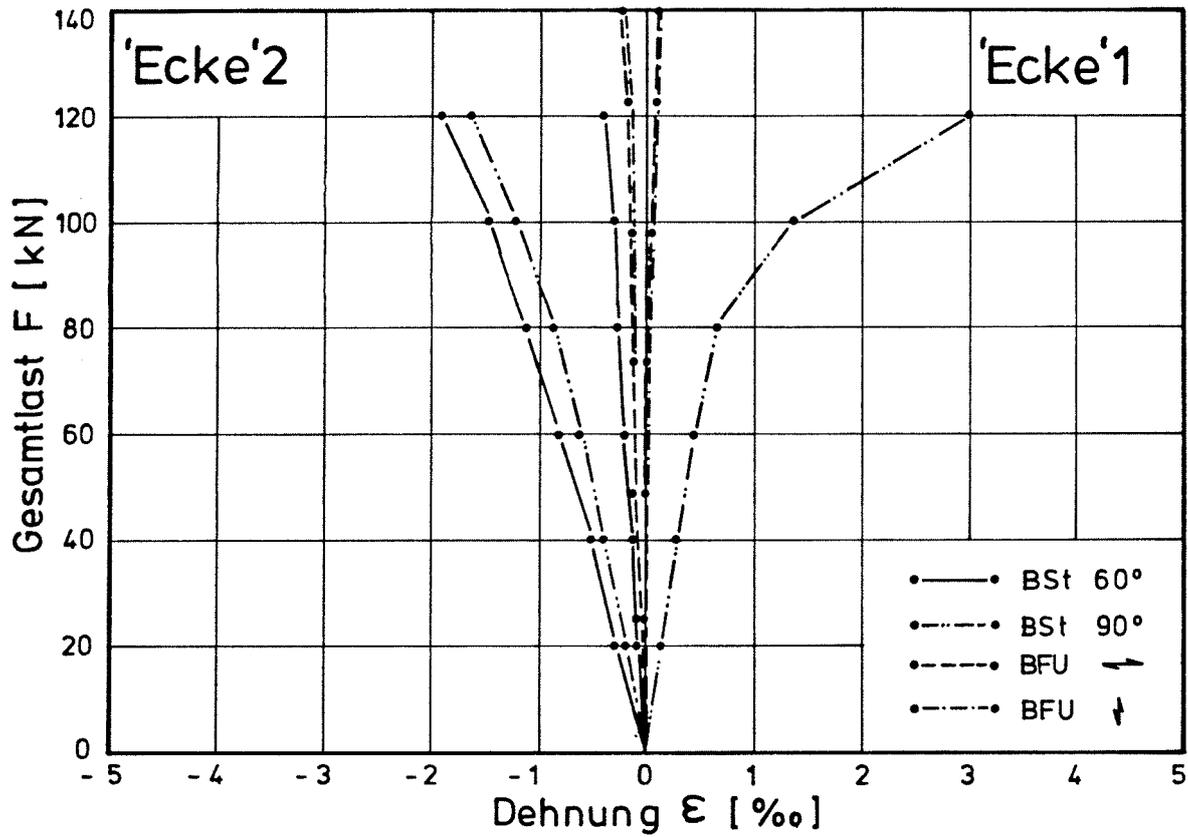
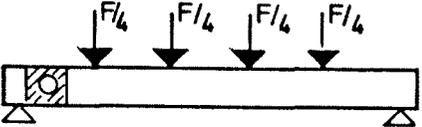
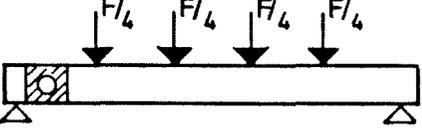
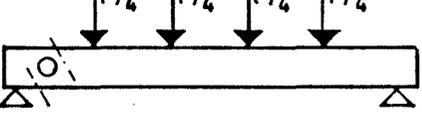
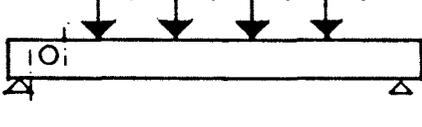


Abb.40 Runder Trägerdurchbruch im Viertelpunkt
 Querdehnungen aus Versuch

Nr.	Skizze der Belastung und Lage des Durchbruchs	Art der Verstärkung	Probekörper	Höchstlast max F kN	Verhältnis $\frac{\text{max F}}{\text{zul F}}$	Bruchbeschreibung
1		BFU 10 mm	K 5/1	172,8	3,5	Biegezugbruch in Feldmitte bei max M. BFU nicht zerstört
		\longleftrightarrow d = 0,32 B	K 7/1	196,0	4,0	Biegezugbruch unterhalb der 2. Laststelle
2		BFU 10 mm	K 5/2	171,5	3,5	Schubbruch auf halber Trägerhöhe im Bereich der Aufdopplung zur Feldmitte hin
		\updownarrow d = 0,32 B	K 7/2	189,2	3,9	Biegezugbruch in Feldmitte
3		BSt	K 5/3	100,0*	> 4,0	Risse bei Abbruch der Belastung 'Ecke' 1: w ~ 0,5 mm; l ~ 30 mm 'Ecke' 3: w ~ 0,5 mm; l ~ 40 mm
		d _e = 16 mm 60°	K 5/4	100,0*	> 4,0	Risse bei Abbruch der Belastung 'Ecke' 1: w ~ 0,7 mm; l ~ 60 mm 'Ecke' 3: w ~ 0,5 mm; l ~ 40 mm
4		BSt	K 7/3	75,0*	> 3,0	Risse bei Abbruch der Belastung 'Ecke' 1: w ~ 1,6 mm; l ~ 150 mm 'Ecke' 3: w ~ 1,2 mm; l ~ 72 mm
		d _e = 16 mm 90°	K 7/4	75,0*	> 3,0	Risse bei Abbruch der Belastung 'Ecke' 1: w ~ 1,5 mm; l ~ 120 mm 'Ecke' 3: w ~ 1,2 mm; l ~ 95 mm

* Last, bei der der Versuch abgebrochen wurde

Tabelle 18 Runder Trägerdurchbruch im Auflagerbereich
Höchstlasten und Bruchbeschreibung

A $\hat{=}$ K 5/1	B $\hat{=}$ K 7/1	C $\hat{=}$ K 5/2	D $\hat{=}$ K 7/2
-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [°/∞]											
		f [mm]			'Ecke' 1			'Ecke' 2			'Ecke' 3			'Ecke' 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	24,5	6,50	6,25	6,4	0,11	0,06	0,09	-0,22	-0,16	-0,19	0,20	0,22	0,21	-0,21	-0,16	-0,19
2	49	13,45	12,85	13,2	0,26	0,11	0,19	-0,42	-0,35	-0,39	0,40	0,43	0,42	-0,43	-0,34	-0,39
3	0	0,10	0,10	0,1	0,02	0,04	0,03	-0,05	0,01	-0,02	-0,01	0,05	0,02	-0,03	0,04	0,01
4	49	13,50	12,80	13,2	0,25	0,12	0,19	-0,43	-0,40	-0,42	0,38	0,41	0,40	-0,43	-0,33	-0,38
5	73,5	20,50	19,55	20,0	0,40	0,23	0,32	-0,61	-0,55	-0,58	0,62	0,65	0,64	-0,66	-0,50	-0,58
6	98	27,65	26,15	26,9	0,60	0,33	0,47	-0,86	-0,78	-0,82	0,89	0,93	0,91	-0,86	-0,72	-0,79
7	122,5	34,90	33,10	34,0	0,86	0,46	0,66	-1,07	-0,98	-1,03	1,15	1,29	1,22	-1,10	-0,90	-1,00
8	147	42,65	40,35	41,5	1,13	0,66	0,90	-1,33	-1,22	-1,28	1,50	1,60	1,55	-1,39	-1,12	-1,26
		C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	24,5	6,75	6,20	6,8	0,06	0,14	0,10	-0,18	-0,18	-0,18	0,25	0,14	0,20	-0,20	-0,17	-0,19
2	49	13,30	12,85	13,1	0,13	0,26	0,20	-0,40	-0,37	-0,39	0,47	0,39	0,43	-0,47	-0,36	-0,42
3	0	0,10	0	0,1	-0,01	0,05	0,02	0	0	0	0,02	0,07	0,05	0	0,01	0,01
4	49	13,40	12,90	13,2	0,14	0,25	0,20	-0,39	-0,37	-0,38	0,50	0,42	0,46	-0,45	-0,40	-0,43
5	73,5	20,45	19,70	20,1	0,27	0,40	0,34	-0,57	-0,56	-0,57	0,73	0,66	0,70	-0,70	-0,52	-0,61
6	98	27,60	26,65	27,1	0,44	0,55	0,50	-0,77	-0,76	-0,77	1,06	0,93	1,00	-0,97	-0,77	-0,87
7	122,5	34,90	33,65	34,3	0,61	0,77	0,69	-0,96	-0,95	-0,96	1,44	1,27	1,36	-1,19	-0,95	-1,07
8	147	42,60	41,0	41,8	0,85	1,08	0,97	-1,20	-1,22	-1,21	1,87	1,65	1,76	-1,50	-1,20	-1,35

* jeweils Werte aus 2 Messungen

Tabelle 19 Durchbiegung und Dehnung beim runden Trägerdurchbruch im Auflagerbereich Verstärkung mit aufgeleimten Baufurnierplatten

A \cong K 5/3	B \cong K 5/4	C \cong K 7/3	D \cong K 7/4
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

Last- stufe	Gesamt- last F kN	Durchbiegung*			Dehnung* ϵ [°/∞]											
		f [mm]			'Ecke' 1			'Ecke' 2			'Ecke' 3			'Ecke' 4		
		A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW	A	B	MW
1	12,5	3,10	3,15	3,13	-0,03	-0,02	-0,03	-0,49	-0,50	-0,50	0,13	0,13	0,13	-0,52	-0,53	-0,43
2	25	6,75	6,70	6,73	-0,05	-0,05	-0,05	-1,01	-1,01	-1,01	0,30	0,26	0,28	-1,03	-1,04	-1,04
3	0	0	0,05	0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,05	-0,06	-0,06	0,07	0	0,04	-0,01	-0,05	-0,03
4	25	6,75	6,75	6,75	-0,06	-0,05	-0,06	-1,04	-1,03	-1,04	0,32	0,24	0,28	-1,03	-1,05	-1,04
5	37,5	10,05	10,10	10,08	-0,05	-0,07	-0,06	-1,60	-1,64	-1,62	0,46	0,36	0,41	-1,61	-1,65	-1,63
6	50	13,85	13,80	13,83	-0,09	-0,06	-0,08	-2,28	-2,25	-2,27	0,59	0,49	0,54	-2,25	-2,28	-2,27
7	62,5	17,35	17,25	17,30	-0,10	-0,03	-0,07	-2,90	-2,85	-2,88	0,74	0,67	0,71	-2,89	-2,88	-2,89
8	75	20,95	20,90	20,93	-0,12	-0,03	-0,08	-3,53	-3,54	-3,54	0,91	0,80	0,85	-3,51	-3,54	-3,53
		C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW	C	D	MW
1	12,5	3,10	3,00	3,05	0,29	0,28	0,29	-0,43	-0,46	-0,45	0,43	0,31	0,37	-0,44	-0,42	-0,43
2	25	6,30	6,45	6,38	0,62	0,60	0,61	-0,88	-0,91	-0,90	0,92	0,68	0,80	-0,90	-0,91	-0,91
3	0	0,05	0,05	0,05	-0,01	0,05	0,02	-0,03	-0,05	-0,04	0,06	0,01	0,04	-0,03	-0,01	-0,02
4	25	6,65	6,45	6,55	0,67	0,64	0,66	-0,87	-0,88	-0,88	0,91	0,71	0,81	-0,93	-0,93	-0,93
5	37,5	9,90	9,95	9,93	1,00	1,02	1,01	-1,34	-1,35	-1,35	1,43	1,18	1,31	-1,40	-1,39	-1,40
6	50	13,20	13,45	13,28	1,52	1,47	1,50	-1,87	-1,85	-1,86	2,08	1,77	1,93	-1,95	-1,97	-1,96
7	62,5	16,80	17,05	16,93	2,94	3,68	3,31	-2,56	-2,61	-2,59	4,17	3,57	3,87	-2,63	-2,61	-2,62
8	75	20,55	20,75	20,65	5,23	4,90	5,07	-3,33	-3,25	-3,29	5,89	5,04	5,47	-3,27	-3,32	-3,30

* jeweils Werte aus 2 Messungen

Tabelle 20 Durchbiegung und Dehnung beim runden Trägerdurchbruch im Auflagerbereich
Verstärkung mit eingeleimten Betonrippenstählen

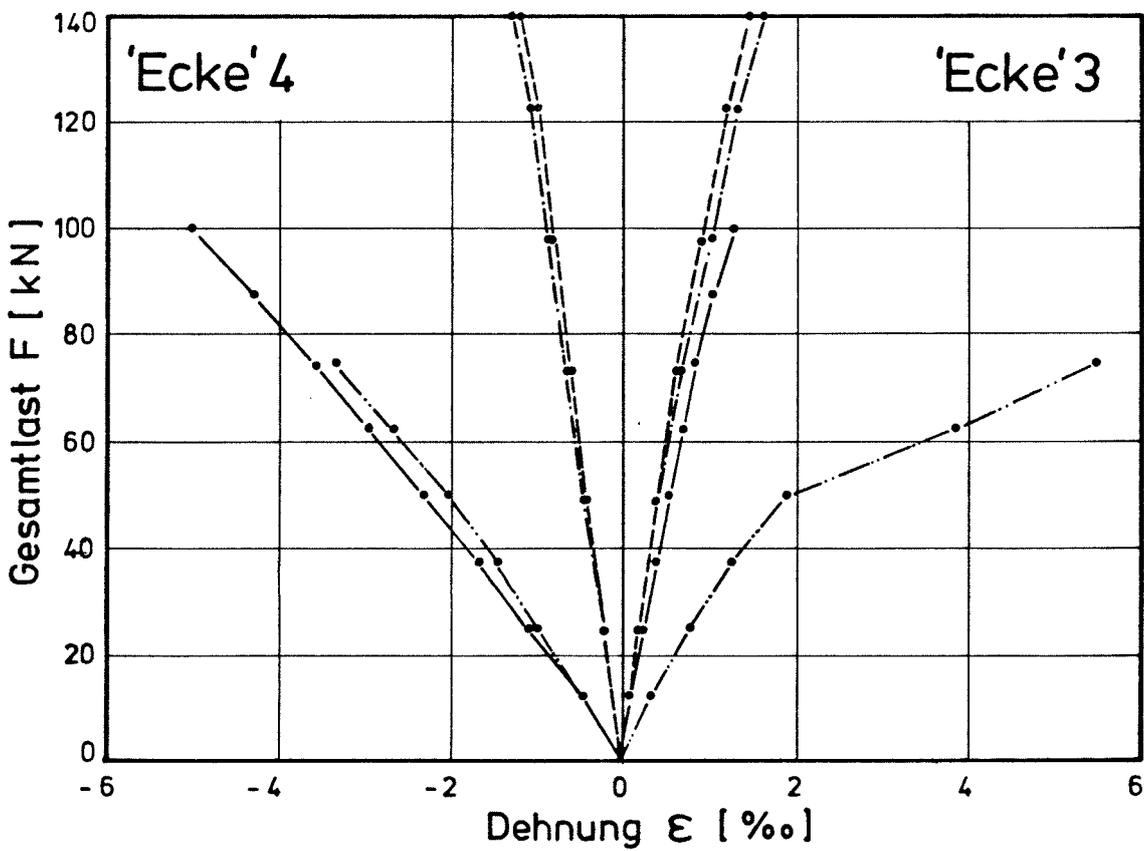
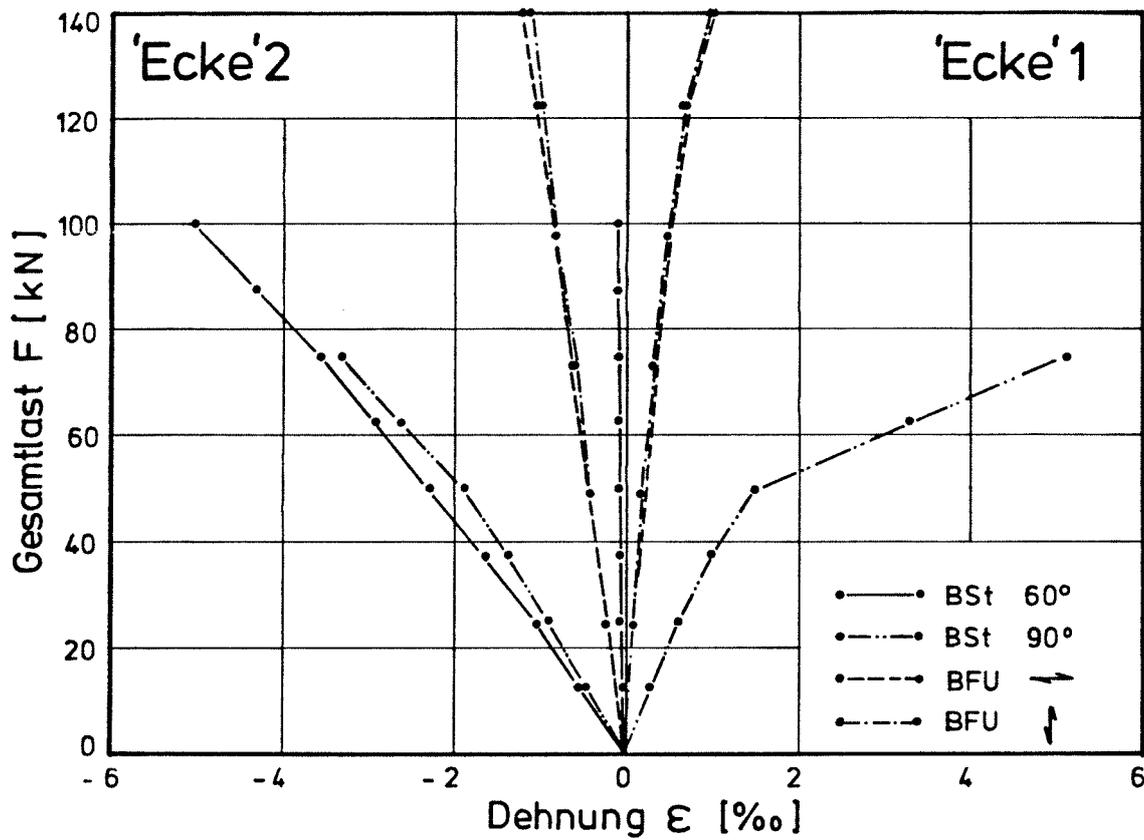


Abb.41 Runder Trägerdurchbruch im Auflagerbereich
 Querdehnungen aus Versuch

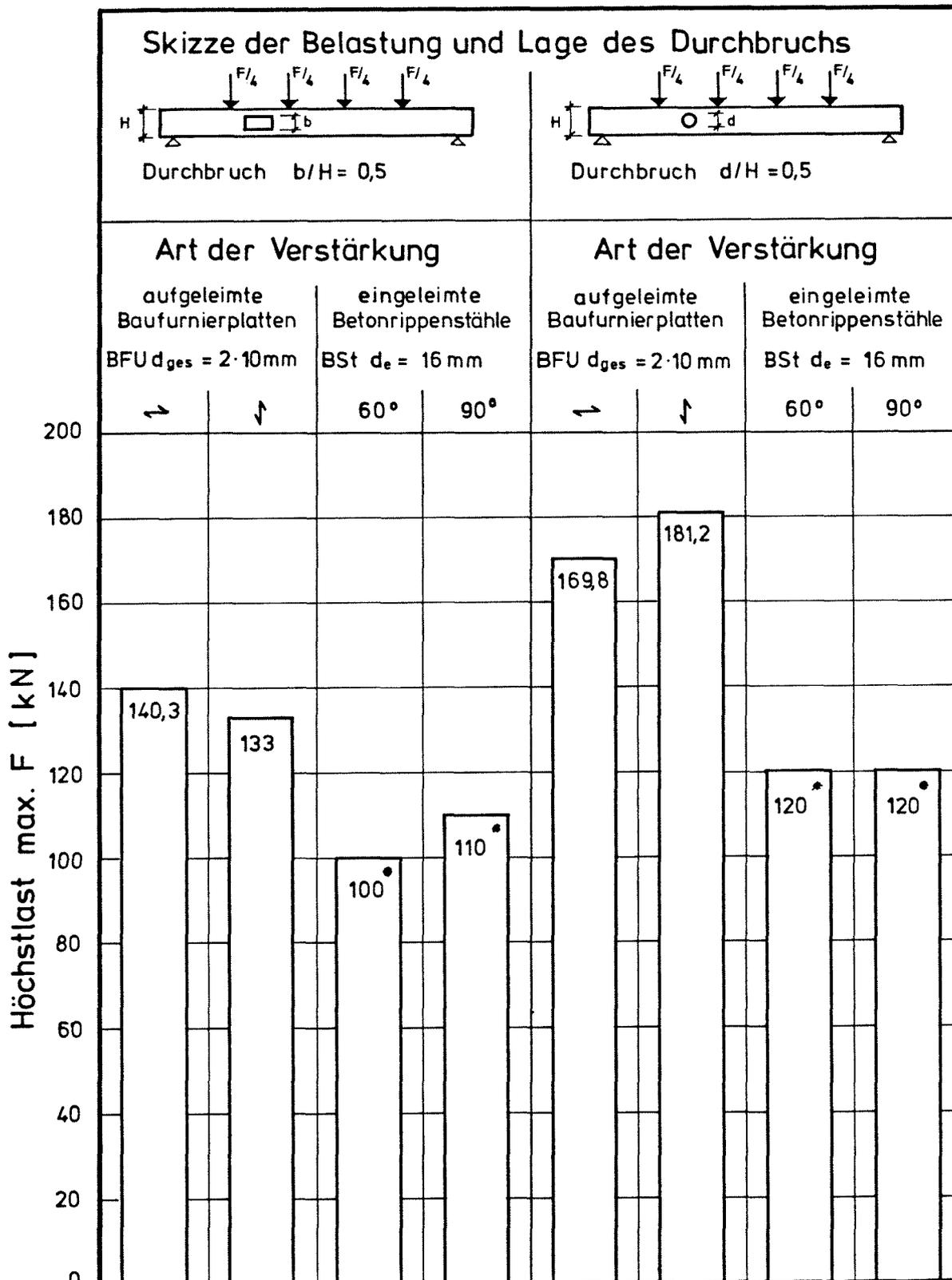
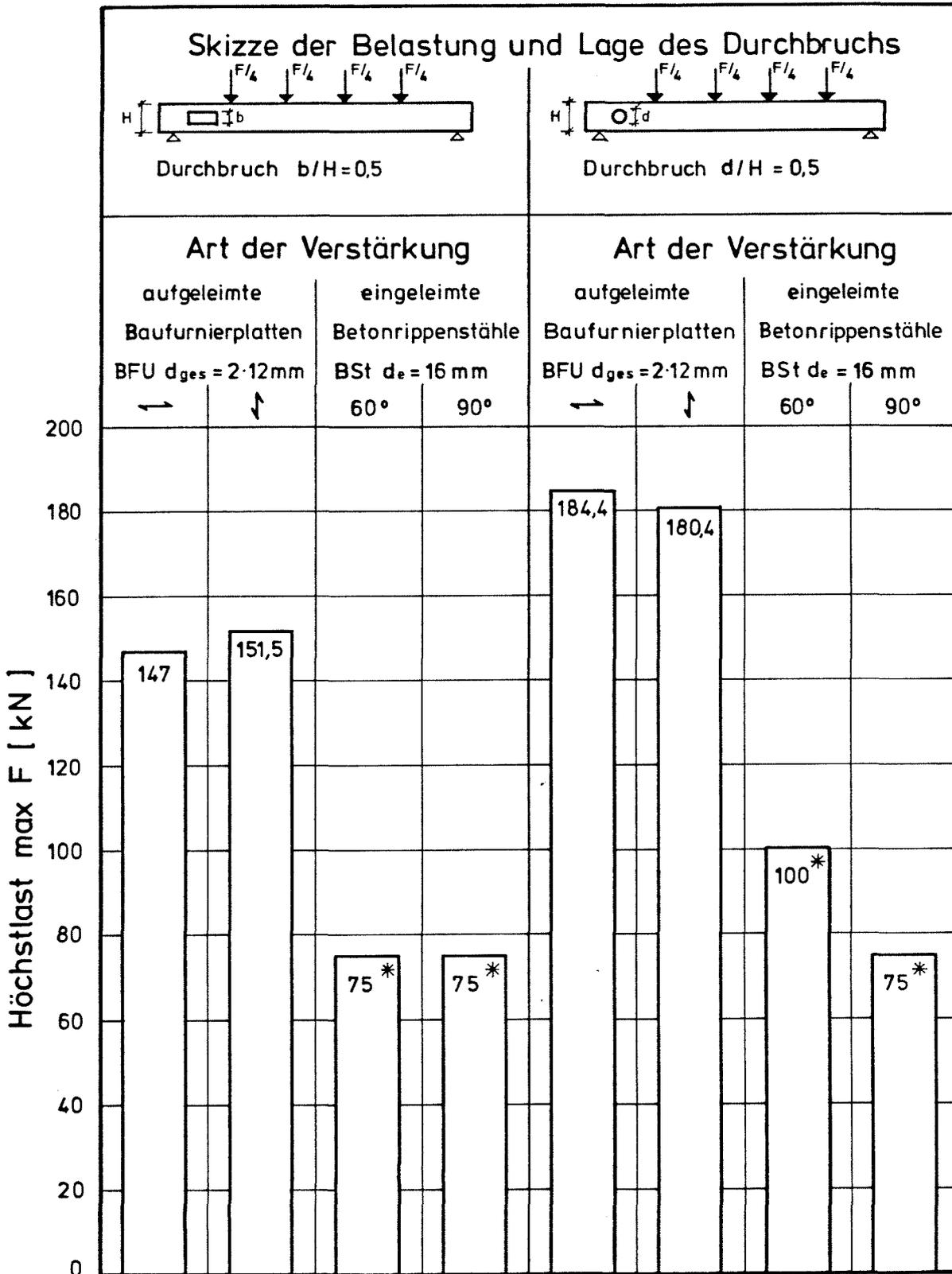


Tabelle 42 Verstärkte Trägerdurchbrüche im Viertelpunkt
Höchstlasten



* Last, bei der die Versuche abgebrochen wurden

Abb.43 Verstärkte Trägerdurchbrüche im Auflagerbereich
Höchstlasten