

Erhöhung der Querdruckfestigkeit der Auflagerungen
von Vollholz- und Brettschichtholzbauteilen durch
zusätzliche Konstruktionsmaßnahmen

Untersuchungen
durchgeführt im Auftrage der Entwicklungsgemeinschaft
Holzbau in der DGfH

von
Karl Möhler und Reinhold Freiseis
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe (TH)
1982/83

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

	Seite
1. Ziel der Untersuchungen.	1
2. Auswertung des einschlägigen Schrifttums.	2
3. Ergänzungsversuche mit Gewindestangen.	4
3.1 Einfluß des Bohrlochdurchmessers auf die Haftverbundfestigkeit von eingeleimten (bzw. eingedrehten) Gewindestangen.	5
3.2 Kraftanteil der eingeleimten Gewindestange an der Gesamtauflegerkraft.	7
3.3 Versuche an BSH-Trägern mit durch eingeleimte Gewindestangen verstärkten Lastangriffsflächen.	9
4. Hauptversuche mit anderen Verstärkungsmaßnahmen.	14
4.1 Versuche mit Sondernägeln.	14
4.2 Verstärkung mit Buchenstabdübeln.	17
4.3 Versuche mit Nagelplatten.	22
4.4 Versuche mit Sperrholzverstärkung.	23
4.5 Materialeigenschaften des Brettschichtholzes.	23
5. Schlußfolgerungen und Bemessungsvorschlag.	25
5.1 Verstärkung von Auflager- und Lasteinleitungsbereichen mittels eingeleimter Gewindestangen.	26
5.2 Verstärkung mittels eingeleimter Buchendübel \varnothing 12 bis 25 mm.	27
5.3 Verstärkung mit Schraubnägeln und Rillennägeln.	28
5.4 Verstärkung durch Baufurnierplatten aus Buchenholz.	28
5.5 Verstärkungen bei Vollholz	28
6. Schlußbemerkungen	29
Schrifttum	30
Anlagen 1 bis 35	
Anhang: Fotos	

V O R W O R T

Über die Erhöhung der Querdruckfestigkeit der Auflagerungen von Vollholz- und Brettschichtholzbauteilen durch zusätzliche Konstruktionsmaßnahmen wurden in den Jahren 1980 - 1982 im Auftrage der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH) mit finanzieller Unterstützung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Geschäftszeichen B I 5 - 80 01 80 - 46) unter Berücksichtigung bereits durchgeführter Anwendungen mit verschiedenen Verstärkungselementen und einschlägiger Arbeiten Dritter praxisnahe Versuche und theoretische Untersuchungen am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe durchgeführt.

An der Durchführung und Auswertung der Versuche sowie vergleichenden theoretischen Berechnungen waren die Herren Dipl.-Ing. R. Freiseis und Dipl.-Ing. R. Müller maßgeblich beteiligt. Bei der Auswertung und zeichnerischen Darstellung der Ergebnisse half Herr cand.-ing. J.M. Bichler. Die Herstellung und Prüfung der Versuchskörper sowie das Entwickeln einer Sondermeßeinrichtung oblag den Herren G. Kranz, J. Lafferthorn und G. Rüd.

Karl Möhler

1. Ziel der Untersuchungen

Im Gegensatz zu den übrigen Festigkeiten des Holzes, deren Größe durch die auf den Probenquerschnitt bezogene Bruch-Schnittkraft bestimmt ist, ist die Querdruckfestigkeit eine Beanspruchungsgrenze bei Belastung senkrecht zur Faserrichtung, bei der eine bestimmte Zusammendrückung des Probekörpers auftritt oder die in Höhe der Proportionalitätsgrenze der Lastzusammendrückungslinie angesetzt wird. Darüber tritt eine deutliche Zusammendrückung des Holzes auf, wobei aber in der Regel keine Brucherscheinungen die Probe derart schwächen, daß die Belastung nicht noch beliebig gesteigert werden könnte (1). Im Hinblick auf die bei Beanspruchungen über der Proportionalitätsgrenze bzw. über der 1 oder 2%-Stauchgrenze auftretenden verhältnismäßig großen Zusammendrückungen beim Würfelversuch oder Eindrückungen beim Schwellenversuch, wie es noch in DIN 52 185, Blatt 2, Druckversuch quer zur Faser, Ausgabe Dezember 1954, festgelegt war, sind bei Bauteilen geringe zulässige Querdruckspannungen einzuhalten, die verhältnismäßig große Auflagerflächen bedingen. Während bei einteiligen Schnitthölzern die erforderlichen Flächen sich im allgemeinen leicht einhalten lassen, treten bei der Auflagerung von mehrteiligen Biegebalken und insbesondere von Brettschichträgern oft Schwierigkeiten auf, da die erforderlichen Druckflächen zusätzliche konstruktive Maßnahmen wie Auflagerteile aus Hartholz oder Stahl oder größere Unterstützungsteile aus Beton oder Mauerwerk erforderlich machen. Dies führt oft nicht nur zu höheren Kosten sondern auch zu Lösungen, die konstruktiv und architektonisch unbefriedigend sind.

Wie frühere eigene Versuche und neuerdings systematische Untersuchungen von Lackner/Wassipaul (2,3) gezeigt haben, läßt sich das Querdruckverhalten von Voll- und Brettschichtholz mehr oder weniger durch Anordnung von mehreren gleichmäßig oder einzeln in der Auflagerfläche eingebrachten stabförmigen Konstruktionsteilen verbessern. Dadurch wird das Zusammendrücken der Holzzellen im unmittelbaren Auflagerbereich behindert, so daß höhere Druckkräfte bei gleichen oder sogar geringeren Verformungen als im unbewehrten Holz aufgenommen werden können. Das Ziel der Forschungsaufgabe war es, unter Auswertung der zugänglichen Literatur und der bereits in Einzeluntersuchungen vorliegenden Ergebnisse die als Verstärkungsmittel geeigneten Bau- und Konstruktionsarten zu untersuchen und Vorschläge für die Ausbildung und Bemessung auszuarbeiten.

2. Auswertung des einschlägigen Schrifttums

Gaber (1) hat 1940 Untersuchungen über das Querdruckverhalten von Nadelholz, hauptsächlich Fichte, und Laubholz (Eiche und Buche) veröffentlicht, aus denen hervorging, daß die geringsten Werte beim Würfelversuch auftreten, wobei die Lage der Jahrringe zur Beanspruchungsrichtung einen wesentlichen Einfluß hat. Die anhand der Last-Zusammendrückungs-Linien ermittelte Quetschgrenze, d.h. diejenige Querdruckspannung, bei der eine deutliche Erhöhung der Zusammendrückung eintrat, ergab für die einzelnen Holzarten die in Tabelle 1 zusammengestellten Werte.

Tabelle 1: Quetschgrenze für einzelne Holzarten in N/mm²

Winkel zwischen Krafrichtung und Jahrringlage	0°	22,5°	45°	67,5°	90°
Fichte	3,4	3,1	1,3	2,0	2,3
Weißtanne	5,0	4,0	3,5	3,8	4,5
Kiefer	5,8	4,9	3,7	3,6	4,9
Eiche	7,6	7,2	6,9	7,5	8,2
Weißbuche	7,9	7,2	6,5	10,2	12,1
Rotbuche	9,3	9,2	9,7	11,5	13,8

(Probekörper: Würfel 5/5/5 cm, Holzfeuchtigkeit ca. 13 %)

Beim Schwellenversuch mit einem beidseitigen Überstand von mindestens 75 mm wurde etwa der doppelte Wert der Würfel Festigkeit erhalten. Da normalerweise in den konstruktiven Ausführungen stets eine Schwellenbeanspruchung vorliegt, wurden die bereits 1938 für DIN 1052 vorgesehenen zulässigen Querdruckspannungen von 2,0 und 3,0 N/mm² als ausreichend sicher angesehen. Es ist in diesem Zusammenhang beachtenswert, daß nach der Formulierung der Norm bei Nadelholz sogar ein Wert von 3,0 dort zugelassen werden konnte, wo geringfügige Eindrückungen unbedenklich sind. Auch aus den in (4) mitgeteilten Ergebnissen wurde auf das wesentlich günstigere Verformungsverhalten bei Schwellendruck unter Kurzzeit- und Langzeitbelastung hingewiesen.

Die im Verhältnis zu den zulässigen Längsspannungen geringen Werte führten dazu, daß bei größeren Stützweiten der Erhöhung der aufnehmbaren Auflagerkräfte besondere Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Bereits in den 40iger Jahren hat G a b e r bei genagelten Brückenträgern zur Verringerung der Auflagereindrückungen Drahtnägel senkrecht zur Auflagerfläche vorgesehen, die eine gewisse Erhöhung der Auflagerdrücke zuließen.

Hoppe (5) hat Ergebnisse von Querdruckversuchen mit Kiefernholz mitgeteilt, bei denen Kanthölzer von 18 bis 20 cm Höhe und 20 cm Breite im Druckbereich durch 8 cm lange Nägel verstärkt waren. Während bei ungenagelten Kiefernholzern bei $\sigma_{D\perp} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ Eindrückungen von 1,0 bis 1,6 mm auftraten, waren bei allseitig genagelten Proben diese Eindrückungen erst bei $3,5 \text{ N/mm}^2$ festzustellen und die Elastizitätsgrenze lag erst bei ca. $5,0 \text{ N/mm}^2$.

Bei den weitgespannten Brettschichträgern des Messe-Zentrums Nürnberg, bei dem 12 Träger mit einer Auflagerkraft von je 140 kN auf einer Betonstütze aufgelagert werden mußten, wurden eingeleimte Gewindestangen angewendet, wodurch die erforderliche Auflagerfläche von 700 cm^2 auf 35 cm^2 je Träger verringert werden konnte. Über die konstruktive Ausbildung und die einschlägigen Großversuche zum Nachweis der Standsicherheit hat Möhler (6) 1972 berichtet. Im Anschluß an diese Ausführung einer wirkungsvollen Verstärkung durch eingeleimte Gewindestähle wurden in den Jahren nach 1975 mehrere einschlägige Arbeiten durchgeführt, wobei sich die Untersuchungen von Lackner (3) in erster Linie systematisch mit der Auflagerverstärkung von Brettschichtholz-Trägern befaßten. Sie erstreckten sich nicht nur auf eingeleimte Gewindestähle sondern auch auf Verstärkungsmaßnahmen mittels Draht- und Sondernägeln und eingeleimten Buchenrundstäben. Dabei wurde die erzielbare Spannungserhöhung auf die beim unverstärkten Auflager unter $\sigma_{D\perp} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ auftretende Einpressungsverformung bezogen. Auf dieser Grundlage wurden mögliche Spannungserhöhungen für die einzelnen Verstärkungsarten von 10 bis 100 % nachgewiesen, wobei die eingeleimten Buchendübel und Gewindestähle die höchsten Werte ergaben. Hierfür wurden maximale Einleimlängen und Mindestabstände längs, quer und vom Trägerrand angegeben, bei deren Einhaltung auch in Dauerstand-Großversuchen die Ergebnisse der statischen Kurzzeitversuche bestätigt wurden.

Hinweise auf die Anwendbarkeit eingeleimter Gewindestangen konnten auch den Arbeiten von Edlund (7), Riberholt (8) und Möhler/Hemmer (9) entnommen werden.

3. Ergänzungsversuche mit Gewindestangen

In (10) sind neben Druckversuchen an eingeleimten Einzelschrauben M 12 und M 16, die auf eine Tiefe von ca. $8 d$ (d = Schraubennendurchmesser) in Brettschichtholz von 110 mm Breite eingeleimt waren und Haftfestigkeiten von mindestens 6 N/mm^2 ergaben, die Ergebnisse von Großversuchen mit durch eingeleimte Schrauben verstärkten Auflagerbereichen von Brettschichträgern mitgeteilt. Dabei wurden jeweils Schrauben von 36 mm Durchmesser getestet, die bei der Versuchsreihe 1 in Bohrungen von 38 mm Durchmesser mittels Epoxydharz auf 600 mm Tiefe eingeleimt waren, während bei Versuchsreihe 2 bei einem Bohrlochdurchmesser von nur 34 mm die 36 mm-Schrauben in die mit Resorcinkleber gefüllten Bohrungen auf 800 mm und 1000 mm Tiefe eingeleimt waren.

Die Versuche ergaben übereinstimmend, daß auch bei dieser Schraubengröße eine zuverlässige Haftung zwischen Schraube und Kleber bzw. Holzbohrfläche bei beiden Einbringungsarten vorliegt, wobei bei einer Einleimlänge von ca. $16 \cdot d$ eine Haftspannung von mindestens 6 N/mm^2 erreicht wurde. Dabei und insbesondere bei noch größerer Einleimlänge wird aber die Belastbarkeit der Schraube durch die im Schraubenquerschnitt auftretende Quetschspannung begrenzt, so daß größere Einleimlängen als 15 bis $20 \cdot d$ bei den normalen Schraubenstahlgüten nicht zu höheren Lastaufnahmen führen. Dabei wird ein Ausknicken der Schraube durch ausmittige Krafteinleitung begünstigt.

In (11) sind als Ergebnis der verschiedenen Untersuchungen die Einbau- und Bemessungsregeln für eingeleimte Gewindestangen mit Einleimlängen bis ca. $20 \cdot d$ auch für axiale Zug- und Druckbelastungen angegeben. Da umfassende Versuche nur für zugbeanspruchte Stäbe gemacht wurden, wurde darauf hingewiesen, daß für druckbeanspruchte eingeleimte Gewindestähle ergänzende Untersuchungen vorgesehen seien um zu klären, ob bei dieser Belastungsart u.U. höhere zulässige Haftspannungen auch bei reduzierten Abständen vom Rand und untereinander angewendet werden können. Außerdem sollte der Einfluß des Bohrlochdurchmessers auf die Haftfestigkeit ermittelt und Untersuchungen zur Abschätzung des Kraftanteiles der Gewindestange an der auf eine verstärkte Fläche einwirkenden Gesamtlast durchgeführt werden. Schließlich

sollten Versuche mit durch eingeleimte Gewindestangen verstärkten Last-einleitungsflächen durchgeführt werden, um für derartige Ausführungen die erforderlichen Bemessungsregeln angeben zu können.

3.1 Einfluß des Bohrlochdurchmessers auf die Haftverbundfestigkeit von eingeleimten (bzw. eingedrehten) Gewindestangen

In Brettschichtholz 100/160 mm wurden senkrecht zur Faser Gewindestangen M 16 (Kerndurchmesser $d_k = 13,4$ mm) eingeleimt bzw. eingedreht, wobei die Bohr-löcher für die Gewindestangen mit Bohrlochdurchmessern von 14 mm bis 18 mm (in Stufung von 1 mm) gebohrt waren. Die Einleimlänge l_E betrug 16 cm ($l_E = 10 \cdot d$) und entsprach somit der Höhe des Brettschichtholzes (Bild 1 und Bild 2, Anlage 1 und 2). Insgesamt wurden 5 Versuchsträger nach Bild 1 hergestellt und geprüft. Die eingeleimten Gewindestangen waren entsprechend der Empfehlung in (11) mit einer rechteckförmigen Längsnut von ca. 3,5 mm Breite und 7 mm² Querschnitt versehen. Als Leim wurde ein Phenol-Resorcin-Formaldehydharzleim der Fa. BASF verwendet.

Die Belastung wurde auf einer Universalprüfmaschine direkt in die Gewinde-stange eingeleitet und bis zum Versagen des Haftverbundes zwischen Ge-windestange und umgebendem Holz gesteigert. Gemessen wurden die Eindrückungen des Gewindestabes gegen die Oberkante des Trägers im Abstand von 3,75 cm beidseits der Stabachse mit induktiven Wegaufnehmern. Gleichzeitig wurde mittels x-y-Schreiber das Last-Eindrückungsdiagramm aufgezeichnet. Die Prüfung der Versuchskörper erfolgte i.d.R. 5 Tage nach deren Herstellung. Die Versuchsdauer bis zum Erreichen der Höchstlast betrug ca. 2 - 2,5 min. bei einer maximal auftretenden Eindrückung von ca. 0,5 bis 1 mm. Nach dem Erreichen der Höchstlast war der Haftverbund zwischen dem Gewindestab und dem Holz in der Mantelfläche zerstört, so daß sich der Stab durch das Bohrloch durchdrücken ließ (Bild 3, Anlage 2). Die Ergebnisse aus je 5 bzw. an der Stelle 7 aus 4 Versuchen (Mittelwerte $\overline{max F}$, zugehörige Bruchhaftspannung mit Streuung und Variationskoeffizient sowie die 5 % Fraktilwerte der Bruchhaftspannung) sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

.//.

Tabelle 2: Haftfestigkeiten bei verschiedenem Bohrlochdurchmesser d_B .

Stelle	1	2	3	4	5	6	7
d_B (mm)	14	15	16	17	18	14	15
max \bar{F} (kN)	45,92	47,98	50,40	47,06	34,36	36,66	18,58
$\bar{\tau}_u$ (N/mm ²)	5,71	5,97	6,27	5,85	4,27	4,56	2,31
S (N/mm ²)	0,71	0,25	0,45	0,80	0,81	1,10	0,66
V (%)	12,46	4,22	7,22	13,70	18,98	24,12	28,79
$\bar{\tau}_{u5\%}$ (N/mm ²)	4,19	5,43	5,30	4,14	2,54	2,22	0,89

In Bild 4 (Anlage 3) sind die τ_u -Werte (Mittel $\bar{\tau}_u$ und 5 % Fraktilen) über den jeweiligen Trägerstellen aufgetragen. Bezieht man die Bruchhaftspannungen auf die Werte für Bohrloch \emptyset 15 mm (Stelle 2) und trägt die Ergebnisse als Verhältnismerte über den zugehörigen Bohrlochdurchmessern auf, so ergeben sich die in Bild 5, Anlage 4 dargestellten Linien für die Mittelwerte und 5 % Fraktilewerte. Der Verlauf der Linien zeigt, daß beim Einleimen einer Gewindestange M 16 ein Bohrlochdurchmesser etwas kleiner als der Nenndurchmesser d die größten Kraftübertragungswerte und somit die größten Haftverbundspannungen ergibt. Für einen Bohrlochdurchmesser kleiner als 15 mm, fällt die Haftfestigkeit ebenso rasch ab wie bei Bohrlochdurchmessern größer als 16 mm, wobei insbesondere der starke Abfall der 5 % Fraktilen zu beachten ist. Zusätzlich wurden die Versuche auch dahingehend ausgewertet, daß aus den Last-Verschiebungsdiagrammen eine Verschiebungssteifigkeit $C = \frac{\tau}{\delta}$ aus den infolge einer Last F bzw. der daraus in der Mantelfläche errechneten Haftspannung τ auftretenden Eindrückungen δ ermittelt wurde. Die Ergebnisse hierzu sind in Bild 6 (Anlage 5) dargestellt. Man erkennt, daß die größten Steifigkeitswerte bei den eingeleimten Stäben bei einer Bohrung etwas kleiner als 16 mm auftreten, während wesentlich kleinere Werte bei Bohrungen < 15 mm und > 16 mm festgestellt wurden. Auch bei den ohne Leim eingedrehten Stäben waren wesentlich kleinere Werte gemessen worden. Die

Ergänzungsversuche haben gezeigt, daß das in (11) vorgeschlagene Einleimverfahren für die genutete Gewindestange die günstigsten Haftbruchwerte ergibt und daher auch für axialdruckbeanspruchte Gewindestangen angewendet werden sollte. Ein Eindrehen ohne Verleimung erscheint im Hinblick auf die festgestellten wesentlich geringeren Fraktilwerte nicht ratsam.

3.2 Kraftanteil der eingeleimten Gewindestange an der Gesamtauflagerkraft

Zur Klärung dieser Frage wurden weitere theoretische Untersuchungen mittels eines SAP IV Programmes angestellt. Zur Überprüfung des Rechenergebnisses wurde zur Feststellung der Kraftaufnahme einer in einer zu verstärkenden Auflagerfläche eingeleimten Gewindestange eine geeignete Meßeinrichtung entwickelt, wobei die in der Gewindestange auftretende Kraft mittels DMS gemessen wurde.

3.2.1 Berechnung mit Programm SAP IV

Zur Lösung des Problems der Kraftaufnahme einer Gewindestange an einem verstärkten Auflager wurde ein zylindrischer Körper mit $h = 25 \text{ cm}$ und $D = 20 \text{ cm } \emptyset$ als Modellversuchskörper mit FE - Einteilung berechnet. Als Verstärkung war in der Mitte des Querschnitts ein runder Gewindestab mit $d = 10 \text{ mm}$ angenommen, wobei für die Berechnung Einleimlängen von $10 \cdot d$ bis $20 \cdot d$ (in Stufen von $2 \cdot d$) untersucht wurden. Wegen der von SAP IV angewandten ebenen Betrachtung und der Anisotropie des Holzes wurden 2 voneinander verschiedene Fälle zur Berechnung einer herausgeschnittenen Scheibe angenommen. VAR 1 bezeichnet den Fall, bei welchem die Scheibe in Richtung der Faser bzw. der Längsachse des Trägers betrachtet wird, während bei VAR 2 die senkrecht zur Faser und Balkenachse verlaufende Richtung zugrunde gelegt wurde. Teilt man die herausgeschnittene Scheibe einmal in Richtung VAR 1 und zum anderen in Richtung VAR 2 in finite Elemente ein und berücksichtigt jeweils die entsprechenden E-Moduln bzw. die Querdehnzahlen für die Lastausbreitung in Querrichtung (senkrecht zur aufgebrachten Last), so ergeben sich theoretische Werte für die Lastausbreitung im Auflagerbereich bei Querdruckbeanspruchung. Die Berechnung wurde für jede der beiden Richtungen mit den verschiedenen Einleimlängen von $10 \cdot d$ bis $20 \cdot d$ durchgeführt. In Bild 7 (Anlage 6) ist das Verhältnis F_g/F_{ges} in Abhängigkeit von der Einleimlänge für die 2 betrachteten Fälle VAR 1 und VAR 2 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das Ansteigen der Werte mit zunehmender Einleimlänge, was darauf zurückzuführen ist, daß eine Gewindestange mit größerer Einleimlänge eine größere Kraft aufnehmen kann als mit kleinerer

Einleimlänge, solange nur die Einleimlänge kleiner als die Grenzlänge l_{gr} ist, die sich aus der Bedingung: Kraft infolge Verbundspannungen in der Mantelfläche gleich Kraft infolge der Druckfestigkeit im Kernquerschnitt der Gewindestange ergibt. Bei größeren Einleimlängen als l_{gr} , die sich für Stahl der Qualität 4 D etwa zu $l_{gr} = 20 \cdot d$ ergibt, kann das Verhältnis F_g/F_{ges} auch nicht mehr wesentlich zunehmen, was durch das Abflachen der Linien in dem Bereich $l_E > 20 \cdot d$ bei dieser Berechnung deutlich sichtbar wurde. Die Linie VAR 2 hat geringere Werte F_g/F_{ges} als VAR 1, da die Lastverteilung in Richtung \perp zur Faser wesentlich geringer ist als bei Lastausbreitung \parallel zur Faser. Aus der Berechnung ergibt sich, daß praktisch beide Linien sich asymptotisch einem Grenzwert von ca. 0,7 für größere Einleimlängen nähern.

Als weiteres Ergebnis der Berechnung konnte für die verschiedenen Einleimlängen näherungsweise der Verlauf der Gewindestangenkraft und die Verteilung der infolge der Kraftübertragung von der Gewindestange auf das umgebende Holz auftretenden Haftspannungen entlang der Einleimlänge erhalten werden. In Bild 8a (Anlage 7) ist für die beiden untersuchten Fälle (VAR 1, VAR 2) und eine Einleimlänge von $l_E = 10 \cdot d$ der Verlauf der rechnerisch auf die Gewindestange entfallenden Kraft über die gesamte Länge der Gewindestange bei einer Gesamtlast von $F = 250 \text{ N}$ entsprechend einer Flächenpressung von $1,0 \text{ N/mm}^2$ dargestellt. Danach ist die Kraft in der Gewindestange in der Auflagerfläche am größten (für VAR 1 ergibt sich, daß F_g 48 % der Gesamtkraft F_{ges} beträgt) und nimmt dann entlang der eingeleimten Länge parabelförmig auf den Wert $F_g = 0$ am Ende der Gewindestange ab, entsprechend dem Kraftanteil, der auf der jeweiligen Länge von der Gewindestange auf das Holz übergeht. Dementsprechend ist in Bild 8b (Anlage 7) der Verlauf der Haftspannungen τ in einer der Gewindestange benachbarten Elementreihe (Holz) dargestellt. Man erkennt, daß am Bohrlochgrund, wo die Gewindestangenkraft von $F_g = 0$ an sehr rasch ansteigt (Bild 8a), die Haftspannung τ in der benachbarten Holzreihe den größten Wert besitzt und gemäß einer Parabel mit einer zur Gewindestange parallelen Achse abnimmt, um an der Auflagerfläche, wo keine Relativverschiebungen zwischen Holz und Stahl auftreten, den Wert $\tau = 0$ anzunehmen.

.//.

3.2.2 Messung der Kraft in der Gewindestange

Zur Messung der Kraftaufnahme einer Gewindestange bei gleichmäßiger Pressung der verstärkten Fläche wurde ein 30 cm hoher prismatischer Probekörper aus BSH mit einem Querschnitt von 10 x 10 cm und einer Gewindestange M 16, die in der Achse des Querschnittes auf eine Länge von 16 cm ($l_E = 10 \cdot d$) eingeleimt war, durch axialen Druck belastet. Dabei wurde die Kraft F_g in der Gewindestange in Abhängigkeit von der aufgebrachten Gesamtlast laufend gemessen. Wenn man den Anteil der Gewindestange an der Gesamtauflagerkraft in Abhängigkeit von der aufgebrachten Querdruckspannung $\sigma_{D\perp}$ aufzeichnet, erhält man den in Bild 9 (Anlage 8) dargestellten Verlauf. Aufgrund der um ein Vielfaches größeren Steifigkeit der Gewindestange gegenüber dem senkrecht zur Faser beanspruchten Holz wird zu Beginn der Belastung nahezu die volle Kraft von der Gewindestange übernommen, jedoch fällt das Verhältnis F_g/F_{ges} mit steigendem $\sigma_{D\perp}$ entgegen dem theoretisch erwarteten konstanten Wert ab. Der Anteil der Gewindestangenkraft an der Gesamtflächenkraft nimmt also mit zunehmender Querdruckspannung infolge einer Versteifung des Holzes durch das Zusammendrücken der Fasern mit steigender Belastung noch etwas ab und das Verhältnis F_g/F_{ges} erreicht bei $\sigma_{D\perp} = 4,0 \text{ N/mm}^2$ einen Wert von 0,667. Das Versagen des Probekörpers trat bei $F_{ges} = 42 \text{ kN}$ ($\sigma_{D\perp} = 4,2 \text{ N/mm}^2$) infolge Erreichens der Querdruckfestigkeit im Bereich oberhalb der Einleimlänge ein. Die in Bild 9 gestrichelt eingetragene Linie mit dem Wert von $F_g/F_{ges} = 0,951$ würde sich als theoretischer Verhältniswert des Kraftanteils der Gewindestange zur Gesamtkraft bei auf die ganze Probenhöhe durchgehender Gewindestange ergeben, wobei entsprechend den Messungen E_{\perp} zu 220 N/mm^2 eingesetzt wurde.

3.3 Versuche an BSH-Trägern mit durch eingeleimte Gewindestangen verstärkten Lastangriffsflächen

Zur Feststellung der Verstärkungswirkung von eingeleimten Gewindestangen wurden 3 Versuchsträger aus BSH mit je einem verstärkten und unverstärkten Auflager sowie je einer verstärkten und unverstärkten Lasteinleitungsstelle hergestellt und geprüft. Die Trägerhöhe betrug 28 cm und die verwendeten Gewindestangen M 14 wurden aufgrund der Ergebnisse der vorangegangenen Versuche in Bohrlöcher mit 13 mm Durchmesser mit einer Einleimlänge von 14 cm = $10 \cdot d$ eingeleimt. Die Vorbereitung der Gewindestangen, der Leim und das Einbringverfahren entsprach

dem in (11) beschriebenen Vorgehen. An jeder verstärkten Lasteinleitungsfläche waren jeweils 4 Gewindestangen angeordnet. Der Abstand der Stäbe untereinander betrug bei den Versuchskörpern 1 und 2 (vgl. Bild 10, Anlage 9) sowohl längs als auch quer zur Faser $4 \cdot d$, der Randabstand $3 \cdot d$. Beim Versuchskörper 3 (vgl. Bild 11, Anlage 10) war der Abstand der Stäbe untereinander $3 \cdot d$, der Randabstand $2,5 \cdot d$. Die Belastung der Versuchskörper erfolgte symmetrisch zur Trägermitte mit 2 Einzellasten. Die auftretenden Eindrückungen wurden mittels induktiver Wegaufnehmer für jede Lastangriffsstelle in Abhängigkeit von der Last auf beiden Trägerseiten gemessen. Bei den Versuchskörpern 1 und 2 wurden die Zusammendrückungen im Auflagerbereich sowohl am verstärkten als auch am unverstärkten Auflager für jedes Drittel der Gesamtträgerhöhe getrennt ermittelt, während an den Lasteinleitungsstellen an der Oberkante der Versuchsträger die Eindrückung nur im oberen Drittel des Trägers (im Bereich direkt unter der Last) festgestellt wurde. Für Versuch 1 geht das Last-Zusammendrückungsverhalten an den Auflagern aus Bild 12 (Anlage 11) hervor, wo sowohl der Verlauf der Zusammendrückung des unteren Querschnittsdrittels für das verstärkte (Meßstelle U 1) als auch für das unverstärkte Auflager (Meßstelle U $\bar{1}$) bis zu der Versagenslast von $F_U = 110 \text{ kN}$ ($2,8 \cdot \text{zul } F$) aufgezeichnet ist. Bei dieser Laststufe betrugen die Querpressungen am Endauflager das 2,8-fache des als zul $\sigma_{D\perp}$ in DIN 1052 für Brettschichtholz angegebenen Wertes von $\sigma_{D\perp} = 2,0 \text{ N/mm}^2$. Die Last konnte aufgrund des seitlichen Ausweichens des Versuchsträgers nicht bis zum völligen Bruch im Auflagerbereich gesteigert werden, obgleich bei ca. 80 kN durch ein Knistern im Holz sich die ersten Zerstörungen ankündigten.

Für Versuch 2 sind die Zusammendrückungen der unteren Querschnittsdrittels an den Auflagern in Abhängigkeit von der Auflagerkraft in Bild 13 (Anlage 12) dargestellt. Bis ca. $2,8 \cdot \text{zul } F$ zeigten sich ähnliche Werte wie bei Versuchsträger 1, bei weiterer Laststeigerung ist die Belastbarkeit des unverstärkten Auflagers bei 120 kN praktisch erschöpft, während am verstärkten Auflager bei der Höchstlast $F_U = 182,1 \text{ kN}$ noch keine wesentlichen Zerstörungen zu erkennen waren, sondern der Träger über dem Auflager durch einen Schubbruch zerstört wurde.

.//.

Einen Vergleich der beim Versuch 1 und 2 für die einzelnen Drittel der Trägerhöhe des verstärkten und des unverstärkten Auflagers gemessenen Zusammendrückungen ermöglicht Bild 14 (Anlage 13) für die 2 Laststufen $F = 40 \text{ kN}$ und $F = 80 \text{ kN}$. Während die Eindrückungen am u n v e r s t ä r k t e n Auflager bei der Laststufe $F = 40 \text{ kN}$ von ihrem Größtwert im untersten Drittel nach oben hin noch annähernd linear abnehmen, ist dies bei $F = 80 \text{ kN}$ nicht mehr der Fall, weil sich durch die starke Zusammendrückung der unteren Lamellen die Lamellen im mittleren Drittel verstärkt an der Kraftaufnahme beteiligen müssen und damit größere Verformungen erfahren. Am v e r s t ä r k t e n Auflager tritt der Höchstwert der Verformungen ebenfalls im untersten Drittel auf, jedoch bleiben die Zusammendrückungen im 2. Drittel deutlich stärker zurück als beim unverstärkten Auflager. Die Absolutwerte der gemessenen Zusammendrückungen am verstärkten Auflager sind besonders bei $F = 80 \text{ kN}$ wesentlich kleiner als am unverstärkten Auflager. Daraus folgt, daß im Vergleich zum unverstärkten Auflager noch beträchtliche Reserven für Zusammendrückungen im unteren und mittleren Drittel vorhanden sind, und daß, wenn die Tragkraft der Verstärkungsstäbe bzw. die Verbundfestigkeit zwischen Verstärkungsstäben und umgebendem Holz noch nicht erschöpft ist, durch die günstige Lastverteilung auch eine höhere Tragkraft der Auflagerfläche zu erwarten ist. Anhand des Versuchsträgers 2 sind in den Diagrammen Bild 15 - 18 weitere aus den Meßwerten erhaltene charakteristische Last-Zusammendrückungslinien dargestellt, wobei die Zusammendrückung in Abhängigkeit von der Auflagerkraft bzw. der an der Lasteinleitungsstelle angreifenden Last F aufgetragen ist. In Bild 15 (Anlage 14) ist die Zusammendrückung des oberen Querschnittsdrittels an der Lasteinleitungsstelle in Abhängigkeit von der Last F aufgetragen. Auch hier stellen sich bis zu einer Last von ca. $3 \cdot \text{zul } F$ an der verstärkten Lastangriffsstelle gleich große Zusammendrückungen wie am verstärkten Auflager nach Bild 12 und 13 ein. Da sich das unverstärkte Endauflager ohne Überstand über die Auflagerfläche jedoch weicher verhält als die unverstärkte Lasteinleitungsstelle, macht sich der Einfluß der Verstärkung am Auflager deutlicher bemerkbar als an der Lasteinleitungsstelle.

Als Verbesserungsfaktoren für die Verstärkungen mit Gewindestangen M 14 gegenüber den unverstärkten Lasteinleitungen ergaben sich aus den beiden Versuchen im Mittel am Auflager $\chi_A = 2,05$ und an der Lasteinleitungsstelle $\chi_L = 1,60$, wenn man die Zusammendrückungen des untersten Drittel als maßgebend betrachtet.

Der Verbesserungsfaktor α nach (3) errechnet sich dabei aus der Spannung, die am verstärkten Auflager eine Verformung ergibt, welche gleich der bei $\sigma_{D1} = 2,0 \text{ N/mm}^2$ am unverstärkten Auflager auftretenden Verformung ist, und ist definiert als das Verhältnis dieser Spannung zur zulässigen Spannung. Würde man den Verbesserungsfaktor nach dieser Definition dagegen aus den Gesamtzusammendrückungen am Auflager ermitteln, so würde man kleinere Verbesserungsfaktoren erhalten. Dies geht aus Bild 16 (Anlage 15) hervor, wo für das unverstärkte und das verstärkte Auflager, die über den Querschnitt gemessenen Gesamtzusammendrückungen dargestellt sind ($\alpha = 2,04$ statt $2,55$). Die Zusammendrückungen in den einzelnen Querschnittsdritteln des verstärkten und unverstärkten Auflagers sind in Bild 17 (Anlage 16) ebenfalls für Versuch 2 noch einmal getrennt in Abhängigkeit von der Auflagerkraft aufgezeichnet. Daraus und aus Bild 14 kann man folgern, daß bei Messung der Zusammendrückung über die halbe Trägerhöhe der maßgebende Anteil der Auflagerzusammendrückungen erfaßt wird, und infolge der am unverstärkten Auflager bei dieser Meßlänge annähernd konstanten Zusammendrückung sich der Verbesserungsfaktor in zutreffender Weise ermitteln läßt. Daher wurde für die Messung der Zusammendrückung bei den späteren Versuchen eine Meßlänge von $l = \frac{h}{2}$ angewendet.

Beim Versuch 3 (s. Bild 11) mit engerer Anordnung der Verbindungsmittel erfolgte die Belastungs- und Meßanordnung analog, jedoch wurden hier lediglich die Zusammendrückungen im 1. Drittel der Trägerhöhe unter der Last am Auflager ermittelt. Das zugehörige Last-Zusammendrückungsdiagramm für das unverstärkte und das verstärkte Auflager ist in Bild 18 (Anlage 17) dargestellt. Das Versagen trat hier wiederum durch das seitliche Ausweichen des Versuchsträgers bei $F_u = 125 \text{ kN}$ entsprechend einer Auflagerkraft von ca. 120 kN ein. Hierbei zeigte das verstärkte Auflager sowie die verstärkte Lasteinleitungsstelle noch keine wesentlichen Eindrückungen oder Versagenserscheinungen. An den unverstärkten Stellen (Auflager und Lasteinleitung) mußten bei $F = 75,3 \text{ kN}$ ($\approx 3 \cdot \text{zul A}$) größere Auflagerplatten und Lastplatten eingebaut werden. Als Verbesserungsfaktor am Auflager α_A ergab sich bei Versuch 3 ein Wert von $2,85$. Das bei den Versuchen verwendete Brettschichtholz GKL. I hatte einen Feuchtigkeitsgehalt von ca. $12,0 \%$.

Ein Vergleich des verstärkten Auflagers und der verstärkten Lasteinleitung z.B. anhand der Lastzusammendrückungskurven für Versuch 2 zeigt, daß sich für das verstärkte Auflager bis zu einer Last von ca. $3 \cdot z_{ul} F$ keine wesentlich größeren Werte der Zusammendrückung des 1. Querschnittsdrittels unter der eingeleiteten Last ergeben. Ab dieser Last beginnt beim Auflager eine Zunahme der Zusammendrückungen, während bei der Lasteinleitung an der Oberkante des Trägers die Lastzusammendrückungskurve erst später abzuflachen beginnt. Die unverstärkte Lasteinleitungsstelle verhält sich gegenüber dem unverstärkten Auflager in jedem Fall steifer, was auch durch die Ergebnisse des Abschnittes 2 (Schwellenwirkung) schon angesprochen wurde. Die Ergebnisse der Höchstlasten, Verbesserungsfaktoren α_A und α_L , sowie der Zusammendrückungen des 1. Drittels der Trägerhöhe über dem Auflager und unter der Lasteinleitungsstelle sind jeweils für die verstärkten und unverstärkten Flächen für eine Flächenpressung von $\sigma_{D\perp} = 2,0 \text{ N/mm}^2$ und für die verstärkten Auflager bzw. Lasteinleitungsflächen (U 1 bzw. U 4) auch für $\sigma_{D\perp} = 6,0 \text{ N/mm}^2$ in Tabelle 3 für die Versuche zusammengestellt.

Tabelle 3: Höchstlasten, Verbesserungsfaktoren und Zusammendrückungen für Versuche 1 - 3.

Nr.	max A (kN)	$\sigma_{D\perp} = 2,0 \text{ N/mm}^2$				$\sigma_{D\perp} = 6,0 \text{ N/mm}^2$		α_A (mm)	α_L (mm)
		U1 (mm)	$\bar{U1}$ (mm)	U4 (mm)	$\bar{U4}$ (mm)	U1 (mm)	U4 (mm)		
1	110,0 ¹⁾	0,35	0,47	0,22	0,33	0,82 ³⁾	0,60 ³⁾	1,53	1,88
2	169,2 ²⁾	0,28	0,65	0,27	0,35	0,84	0,80	2,55	1,30
3	120,0 ¹⁾	0,21	0,59	- 4)	- 4)	0,64	- 4)	2,85	- 4)

- 1) Seitliches Ausweichen des Versuchsträgers
- 2) Schubbruch am verstärkten Auflager
- 3) Aus Kurve bis $F = 110 \text{ kN}$ wegen 1) extrapoliert
- 4) nicht ermittelt

4. Hauptversuche mit anderen Verstärkungsmaßnahmen

In weiteren Hauptversuchsreihen wurden Verstärkungen von Lastangriffsflächen durch die Anordnung von Sondernägeln bzw. eingeleimten Buchenstabdübeln in Richtung der eingeleiteten Kraft systematisch untersucht. Ebenso wurden Versuche mit Nagelplatten und aufgeleimten Buchensperrholzplatten als Verstärkung von Auflager- bzw. Lasteinleitungsflächen durchgeführt. Bezüglich einer Verstärkung mittels Holzschrauben nach DIN 97 waren aufgrund anderweitiger Untersuchungen keine höheren Verstärkungswirkungen als durch Schraubnägel zu erwarten, so daß auch im Hinblick auf das aufwendigere Einschraubverfahren Holzschrauben als Verstärkungselement von querdruckbeanspruchten Flächen keine Bedeutung in der Praxis haben.

4.1 Versuche mit Sondernägeln

Aufgrund der Ergebnisse in (1), (5) und (12) sowie den Untersuchungen von Lackner / Wassipaul (2,3), wurden Versuche mit reiner Querdruckbelastung an als Schwellen gelagerten Balken durchgeführt, wobei durch Rillen- bzw. Schraubnägel (RN, SN) verstärkte Lastangriffsflächen sowohl am Ende der Balken (verstärktes Endauflager) als auch in der Mitte der Schwelle (verstärkte Lasteinleitungsstelle) belastet wurden. Hierfür wurden Nägel mit 4,0 - 6,0 und 7,5 mm Durchmesser und Längen zwischen $13 \cdot d$ bis $21 \cdot d$ verwendet. Die Anzahl der zur Verstärkung einer Lastangriffsfläche dienenden Nägel betrug zwischen 4 und 20 Stück, wobei die Größe der Lastfläche für die Versuche nach Bild 19 a - c 15×10 cm und für die Versuche nach Bild 20 a, b 10×10 cm betrug. Die Trägerbreite der verwendeten Hölzer war mit $b = 10$ cm für alle Versuche gleich. Die Last wurde mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 1 mm/min stufenweise aufgebracht, wobei bei jeder Laststufe eine Wartezeit von 2 Minuten eingehalten wurde. Gleichzeitig wurden die Zusammendrückungen über die halbe Trägerhöhe auf beiden Trägerseiten in der Kraftwirkungslinie gemessen und mittels x-y-Schreiber die Lastzusammendrückungslinie aufgezeichnet. Die durchgeführten Versuche mit Schraub- und Rillennägeln zur Verstärkung einer Auflagerfläche werden nachstehend näher beschrieben.

.//.

4.1.1 Vergleich Schraubnägel - Rillennägel

In einem ersten Versuchsabschnitt wurden statische Kurzzeitversuche mit vergleichbaren Schraub- und Rillennägeln durchgeführt (Bild 19a und 19b). Die Abstände der Nägel betragen untereinander sowohl in Längs- als auch in Querrichtung $5 \cdot d$, die Anzahl der eingeschlagenen Nägel betrug bei den SN 51/62/90, SN 75/85/160 und bei den RN 60/80 bzw. 60/100 jeweils 4 Stück, während bei den SN 42/50/90 und RN 40/60 8 Nägel in die belastete Fläche eingeschlagen waren. Als Verbesserungen nach der im Abschn. 3.3 gegebenen Definition, mit den bis zur Proportionalitätsgrenze auftretenden Zusammendrückungen als maßgebende Bezugswerte, ergaben sich bei den Schraubnägeln bis zu 29 %, wobei die mit 8 SN 42/50/90 verstärkte Lastfläche nur 7 % Verbesserung ergab. Die mit RN 60/100 bzw. RN 60/80 verstärkten Auflager zeigten keine Verbesserung, obwohl z.B. die RN 60/100 in einem Bereich über der Proportionalitätsgrenze des unverstärkten Holzes ebenso wie die mit Schraubnägeln verstärkten Versuche in diesem Bereich einen deutlich steileren Verlauf als die unverstärkten Lastflächen zeigten, und bei einer Last von 100 kN entsprechend einer Querdruckspannung von $\sigma_{D\perp} = 3,33 \cdot \text{zul } \sigma_{D\perp}$ Eindrückungen von ca. 2 mm gegenüber solchen von mehr als 6 mm am unverstärkten Auflager. Die Verformungswerte und Höchstlasten für das unverstärkte Holz wurden dabei mittels Versuch bei Lasteinleitung an einer in der Trägermitte gelegenen unverstärkten Stelle (V I 0) ermittelt. Die größte Verbesserung im Sinne der Definition ergab sich bei dem mit 8 RN 40/60 verstärkten Auflager mit 51 %, jedoch trat hier wenig oberhalb der Proportionalitätsgrenze der unverstärkten Lasteinleitungsfläche eine starke Zunahme der Verformungen ohne weitere größere Kraftaufnahme (Zerquetschen wie am unverstärkten Auflager oberhalb der Proportionalitätsgrenze) ein, was offenbar durch eine Überschreitung der Haftspannungen und der Tragkraft der kurzen Nägel bewirkt wurde (siehe Bild 21, Linie V I 2).

4.1.2 Versuche mit Variation des Nagelabstandes

Bei diesen Versuchen wurden 3 Versuchsträger gemäß Bild 19c mit einem Querschnitt 10/20 cm und 15 cm großen Lastplatten als Schwellenversuche geprüft. Als Verstärkungselemente kamen hier nur RN 60/100 zur Anwendung, welche in verschiedenen Abständen in Längsrichtung (10 d - 7 d - 5 d) und in Querrichtung (7 d - 5 d) angeordnet waren. Bei den Versuchen war zu erkennen, daß Abstände $< 7 \cdot d$ sowohl in Längs- als auch in Querrichtung keine Verbesserungen, sondern infolge der

im unteren Lastbereich größeren Eindrückungen gegenüber dem unverstärkten Fall, eher einen negativen Einfluß zeigten. Bei Querabständen von $\ell_1 = 5 \cdot d$ waren Verbesserungen nur bei Längsabständen $\ell_1 > 7 d$ zu erreichen.

Bezüglich der Höchstlast waren jedoch bei den Versuchen bei 100 kN die Eindrückungen erst bei 2,5 - 3,5 mm und eine Laststeigerung gegenüber dem unverstärkten Auflager möglich. Die größte Verbesserung wurde beim Versuch mit Anordnung von 6 RN 60/100 im Abstand von $10 \cdot d$ in Längs- und $5 \cdot d$ in Querrichtung mit 50 % erzielt; bei einer Anordnung von 6 RN 60/100 im Abstand von 4 d untereinander sowohl in Längs- als auch in Querrichtung konnten dagegen keine Verbesserungen festgestellt werden.

4.1.3 Versuche mit maximaler Anzahl der Nägel in einer verstärkten Lasteinleitungsfläche

Hier wurden die im Versuchsabschnitt 4.1.1 mit den größten Verbesserungen erhaltenen RN 40/60 dahingehend weiter untersucht, ob die erhaltenen Verbesserungen sowie die Höchstlast z.B. bei versetzter Anordnung oder z.B. durch Anordnung einer im Abstand $5 \cdot d$ (in Längs- und Querrichtung) maximal möglichen Anzahl von Nägeln bestätigt bzw. weiter gesteigert werden könne. Es wurden 8 - 20 RN 40/60 nach Bild 20a und b in einer zu verstärkenden Lastfläche von 10×10 cm angeordnet, wobei sowohl verstärkte Lastflächen in der Mitte wie auch am Auflager geprüft wurden. Zusätzlich wurden hierbei auch je eine unverstärkte Lasteinleitungsstelle am Ende sowie in der Mitte des Trägers geprüft. Die Abstände bei den mit 8 RN 40/60 verstärkten Lastflächen betragen abweichend von den restlichen verstärkten Flächen in Längsrichtung $10 \cdot d$ und in Querrichtung $5 \cdot d$. Es zeigte sich jedoch, daß die im Versuch V I.2 (Bild 19b) bei 8 RN 40/60 erhaltene Verbesserung von 51 % bei diesen Versuchen nicht bestätigt werden konnte. Bei den in der Mitte geprüften Lasteinleitungen konnten lediglich Verbesserungen bis 10 % festgestellt werden, wohingegen bei den am Ende der Versuchsträger verstärkten Lasteinleitungsflächen (VE 1 - 3) Verbesserungen von 28 - 40 % erreicht wurden, was auf das unterschiedliche Verhalten bei Lasteinleitung am Trägerende und im Schwellenbereich zurückzuführen ist. Stellvertretend für die bei allen Versuchen aufgezeichneten Lastzusammendrückungslinien sind in Bild 21 (Anlage 20) diese für je eine mit Rillennägeln und Schraubnägeln verstärkte sowie für eine unverstärkte Lasteinleitungsstelle in Trägermitte dargestellt.

4.2 Verstärkung mit Buchenstabdübeln

4.2.1 Ausbildung der Versuchskörper und Versuchsdurchführung

Die Verstärkungswirkung von eingeleimten Buchenstabdübeln wurde in Anlehnung an (3) in 2 Versuchsreihen untersucht. In der Versuchsreihe 1 wurden 4 Brett-schichtträger 10/50/251 cm an je 2 Lastangriffsflächen (Auflager A und Last-einleitung L 1) für die Versuche 1a bis 4a mit 4 - 6 - 9 und 13 Dübeln $\varnothing d = 12$ mm verstärkt. Die Anordnung der auf eine Tiefe von $5 \cdot d = 60$ mm eingeleimten Buchenstäbe geht aus Bild 22 (Anlage 21) hervor. Unverstärkt blieben die Lasteinleitungsstellen B und L 2, so daß beim Belastungsversuch mit 2 Einzellasten F die Verformung der verstärkten und unverstärkten Last-angriffsbereiche ermittelt werden konnte. Für die Versuche 1b bis 4b wurden die nach Bild 23 (Anlage 22) verstärkten Stellen belastet. An jeder Last-einleitungsstelle war eine Stahlplatte von $10 \times 11 = 110$ cm² Lasteinleitungs-fläche angeordnet. Zur Ermittlung der Höchstlast für die verstärkten Lastangriffs-stellen wurden die Lasteinleitungsflächen der unverstärkten Stellen auf $10 \times 33 = 330$ cm² vergrößert. Die Zusammendrückungen des Trägers an den Last-angriffsstellen wurden bei einer Meßlänge von $h/2 = 25$ cm mittels Wegaufnehmern bei stufenweiser Laststeigerung gemessen.

Für die Versuchsreihe 2 wurden Träger 16/50/217 cm verwendet, deren Lastein-leitungsflächen nach Bild 24 und 25 (Anlage 23 und 24) mit je 9 Buchenstab-dübeln $d = 12, 20$ und 25 mm mit $5 \cdot d$ Einleimtiefe versehen waren. Die Last-einleitungsflächen betragen $16 \times 17 = 272$ cm².

Bei allen Versuchsträgern wurden die Buchenstäbe mittels Resorcinleim in die Bohrlöcher eingeleimt. Die Bohrungen wiesen eine Tiefe von $5 \cdot d + 1$ cm auf, die Bohrlochdurchmesser wurden jeweils 1 mm größer gewählt als der Nenn-durchmesser des Dübels. Dieses Lochspiel war notwendig, da die im Handel be-zogenen Buchenstäbe oft geringe Unrundheiten aufwiesen, andererseits auch ein geringes Verlaufen der Bohrer nicht völlig auszuschließen war.

Zur Ermittlung der Belastbarkeit des Einzeldübels wurden bei den einzelnen Trägern bei der Herstellung der verstärkten Lasteinleitungsgebiete Einzel-dübel zwischen die Lastangriffsstellen so eingeleimt, daß sie bei einer

Einleimlänge von $5 \cdot d$ noch ca. 2 cm über die Trägoberfläche herausragten. An diesen Dübeln wurde nach Abschluß der Trägerversuche die Belastbarkeit unter axialer Lasteinleitung festgestellt. Diese war bei allen Einzeldübeln durch Erreichen der Druckfestigkeit begrenzt. Um die Haftfestigkeit zu erhalten, wurde daher die Einleimlänge halbiert und die axiale Belastung wiederholt. Dabei trat in der Regel ein Gleiten des Dübels in der Leimfläche auf.

4.2.2 Ergebnis der Versuche

Die Lastzusammendrückungslinien für die Auflagerflächen sind in Bild 27 bis 32 (Anlage 26 bis 31) aufgetragen, woraus jeweils für eine Flächenpressung bis etwa $2 \times \text{zul } \sigma_{D \perp} = 4,0 \text{ N/mm}^2$ bzw. $3,7 \text{ N/mm}^2$ die Zusammendrückungen v für das unverstärkte und verstärkte Auflager hervorgehen. Es zeigt sich, daß mit steigender Flächenpressung die Zusammendrückungen der verstärkten Auflagerflächen weniger zunehmen als die unverstärkten. In Bild 35 u. 36 (Anlagen 34 u. 35) sind entsprechende Zusammendrückungslinien für die Lasteinleitungsstellen L aufgetragen. Hier zeigt sich ein ähnliches Verhalten, wenn auch die Unterschiede geringer ausfallen, was bei Schwellendruck nach den Versuchen in Abschnitt 3.3 zu erwarten war.

In den Tabellen 4 und 5 sind die Zusammendrückungen v bei $\sigma_{D \perp} = 2,0 - 2,5$ und $4,0 \text{ N/mm}^2$ (bzw. $3,7 \text{ N/mm}^2$) und die Versagenslasten für die Versuchsreihe 1 und 2 zusammengestellt.

Außerdem sind auch die aus den Zusammendrückungen bei $\sigma_{D \perp} = 2,0 \text{ N/mm}^2$ sich ergebenden Verbesserungswerte $\alpha_{v2,0}$ und die aus den Höchstlasten berechneten Werte $\alpha_{Au} = A_{u, \text{verstärkt}} : A_{u, \text{unverstärkt}}$ angegeben.

Trägt man die Verbesserungswerte in Abhängigkeit vom prozentualen Anteil der Fläche der Verstärkungsstäbe an der Gesamtlasteinleitungsfläche auf (nach (3) Dübelflächenprozent = DFP genannt), so sieht man, daß die aus der Höchstlast ermittelten Verbesserungswerte α_{Au} im Bereich zwischen ca. 4 und 15 % Dübelfläche leicht ansteigen und im Mittel mit einem Wert von ca. 1,4 angenommen werden können. Geringere Verstärkungsprozente sind praktisch wenig wirksam, wie die mit einem Buchenstabdübel $\varnothing 12$ (1,13 %) durchgeführten Versuche gezeigt haben. Demgegenüber scheinen höhere Prozentsätze noch eine Steigerung des Verbesserungswertes α zu ermöglichen.

Tabelle 4: Ergebnisse der Versuchsreihe 1 für verstärkte und unverstärkte Lasteinleitungsstellen
(Buchenstabdübel \emptyset $d = 12$ mm).

Versuch Nr.	Anzahl n	Endauflager A							Lasteinleitung L			
		A_U (kN)	$\max \sigma_{D \perp}$ (N/mm ²)	$v_{2,0}$ (mm)	$v_{2,5}$ (mm)	$v_{3,7}$ (mm)	$\chi_{v_{2,0}}$	χ_{A_U}	$v_{2,0}$ (mm)	$v_{2,5}$ (mm)	$v_{3,7}$ (mm)	$\chi_{v_{2,0}}$
1 a	4	85,6	7,78	0,66	0,82	1,33	1,36	1,35	0,41	0,49	0,74	$\approx 1,00$
1 b	4	84,2	7,66	0,61	0,76	1,27	1,47	1,28	0,53	0,62	0,90	$< 1,00$
1 a	0	63,5	5,78	0,89	1,10	2,09	-	-	0,40	0,50	0,81	-
2 a	6	89,5	8,13	0,87	1,01	1,58	1,00	1,24	0,37	0,45	0,71	1,19
2 b	6	88,0	8,00	0,71	0,87	1,45	1,25	1,33	0,56	0,64	0,90	$< 1,00$
2 a	0	72,2	6,56	0,87	1,06	1,95	-	-	0,43	0,52	0,83	-
3 a	9	94,3	8,57	0,68	0,84	1,37	1,21	1,43 ¹⁾	0,34	0,41	0,61	1,50
3 b	9	$\approx 95,2$	$\approx 8,66$	0,66	0,80	1,24	1,29	$\approx 1,44$ ¹⁾	0,45	0,52	0,76	1,06
3 a	0	- 2)	- 2)	0,82	1,02	1,85	-	-	0,47	0,56	0,85	-
4 a	13	$\approx 95,2$	$\approx 8,66$	0,68	0,83	1,40	1,13	$\approx 1,44$ ¹⁾	0,44	0,51	0,73	$< 1,00$
4 b	13	$> 89,2$	$> 8,11$	0,82	0,98	1,45	1,08	$> 1,35$ ¹⁾	0,47	0,55	0,82	$< 1,00$
4 a	0	- 2)	- 2)	0,76	1,00	2,71	-	-	0,41	0,48	0,73	-
4 b	1	76,2	6,93	0,69	0,85	1,44	1,11	1,16				

1) ermittelt mit $\bar{A}_U = \frac{63,52 + 72,16}{2} = 67,84$ kN für das unverstärkte Auflager

2) nicht ermittelt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Versuchsreihe 2 für verstärkte und unverstärkte Lasteinleitungsstellen

Versuch Nr.	Anzahl $n \cdot x \cdot d$	Endauflager A						
		A_u (kN)	$\max \sigma_{D \perp}$ (N/mm ²)	$v_{2,0}$ (mm)	$v_{2,5}$ (mm)	$v_{3,7}$ (mm)	$\chi_{v_{2,0}}$	χ_{A_u}
5 a	9 x 20	≈ 177,5	≈ 6,52	1,15	1,39	2,09	1,20	≈ 1,46
5 b	9 x 20	- 1)	- 1)	0,87	1,07	1,61	1,56	- 1)
5 a	0	121,6 ²⁾	4,47 ²⁾	1,34	1,68	2,80	-	-
5 b	9 x 12	- 1)	- 1)	0,94	1,14	1,75	1,47	- 1)
6 a	9 x 25	191,0	7,72	0,86	1,00	1,38	> 2,00	1,73
6 b	9 x 25	≈ 186,6	≈ 6,86	0,68	0,84	1,30	> 2,00	≈ 1,53
6 a	0	121,6 ²⁾	4,47 ²⁾	1,45	1,71	2,54	-	-
6 b	9 x 12	163,2	6,00	0,99	1,22	1,90	1,46	1,34

Versuch Nr.	Anzahl $n \cdot x \cdot d$	Lasteinleitung L						
		F_u (kN)	$\max \sigma_{D \perp}$ (N/mm ²)	$v_{2,0}$ (mm)	$v_{2,5}$ (mm)	$v_{3,7}$ (mm)	$\chi_{v_{2,0}}$	χ_{F_u}
5 a	9 x 20	> 195,0	> 7,17	0,51	0,60	0,84	1,29	> 1,18
5 b	9 x 20	287,4	10,57	0,58	0,69	0,97	1,11	1,74
5 a	0	165,6 ²⁾	6,09 ²⁾	0,63	0,76	1,05	-	-
5 b	9 x 12	239,9	8,82	0,74	0,87	1,22	< 1,00	1,45
6 a	9 x 25	> 209,9 ³⁾	> 7,72 ³⁾	0,44	0,52	0,73	1,65	> 1,27 ³⁾
6 b	9 x 25	> 205,0	> 7,54	0,44	0,51	0,68	1,77	> 1,24
6 a	0	165,6 ²⁾	6,09	0,66	0,81	1,34	-	-
6 b	9 x 12	205,0	7,54	0,66	0,80	1,13	1,00	1,24

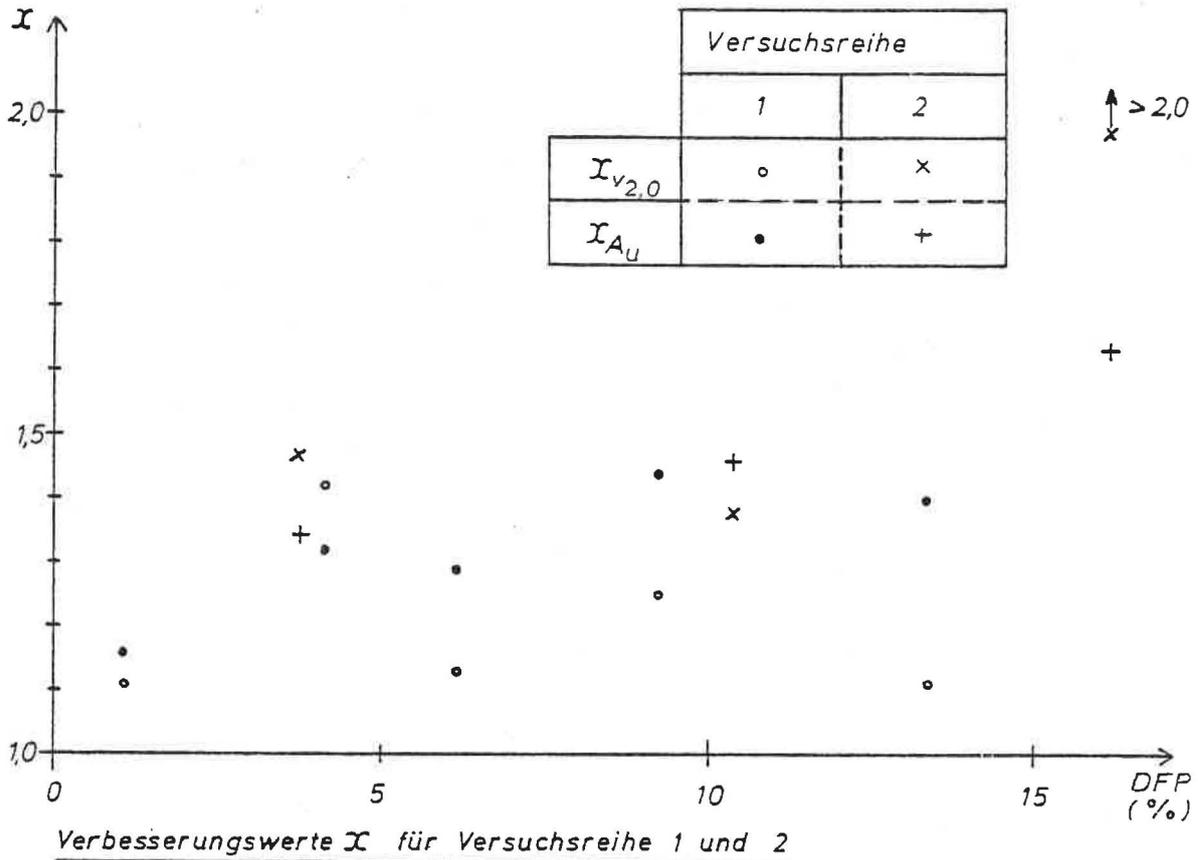
1) konnte nicht ermittelt werden wegen Biegeversagen bei $F = 125$ kN

2) ermittelt aus je 2 Versuchen an einem Vergleichsträger

3) Biegeversagen

././.

Legende:



Aus dem Diagramm ergibt sich eine große Streuung der aus den Zusammendrücken ermittelten Verbesserungswerte $\mathcal{I}_{v_{2,0}}$, so daß die Definition des Verbesserungswertes allein aus den Zusammendrücken ohne Berücksichtigung der Höchstlasten des verstärkten und unverstärkten Auflagers nicht ausreichend erscheint.

Die Ergebnisse der Versuche an den einzelnen eingeleimten Buchenstabdübeln zur Ermittlung der Längsdruckfestigkeit sowie der Haftfestigkeitswerte dieser Verstärkungselemente sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Die erhaltenen mittleren Längsdruckfestigkeiten $\beta_{D \parallel}$ der Buchenstabdübel bestätigen die in (3) gemachten Rechenannahmen, lediglich für die Dübel $d = 12 \text{ mm}$ wurden etwas unter $\beta_{D \parallel} = 60 \text{ N/mm}^2$ liegende Werte festgestellt. Die Durchdruckversuche zur Ermittlung der Haftfestigkeiten, die mit einer Haftlänge von ca. $2,5 \cdot d$ durchgeführt wurden, ergaben im Mittel Werte größer als $5,10 \text{ N/mm}^2$ (bei $d = 12 \text{ mm}$ betrug der 5 %-Fraktilwert noch $5,23 \text{ N/mm}^2$), so daß die in (11) angegebene zulässige Haftspannung zu $\tau = 1,2 \text{ N/mm}^2$ auch hier angesetzt werden kann, was einer mindestens 4,25-fachen Sicherheit entspricht. Ein Abfallen der Haftfestigkeiten unter $5,10 \text{ N/mm}^2$ konnte bei den 25er-Dübeln nicht festgestellt werden.

Tabelle 6: Längsdruckfestigkeit und Haftfestigkeit der eingeleimten Buchendübel.

Buchenstabdübel d (mm)	Längsdruckversuche			Durchdruckversuche			
	Anzahl n	max \bar{F} (kN)	max $\bar{\sigma}_{D II}$ (N/mm ²)	Anzahl n	Haftlänge l_H (cm)	max \bar{F} (kN)	max $\bar{\tau}_U$ (N/mm ²)
12	12	6,0	53,37 ¹⁾ (50,82)	10	3,0	7,2	6,29 ²⁾ (5,23)
20	3	21,7	69,07	3	5,0	16,0	5,10
25	3	32,7	66,68	3	6,0	24,8	5,19

Anmerkungen: ()-Werte sind 5 % - Fraktilwerte

1) $S = 1,42$ (N/mm²), $V = 2,65$ (%)

2) $S = 0,58$ (N/mm²), $V = 9,18$ (%)

4.3 Versuche mit Nagelplatten

Parallel zu den Versuchen mit durch Buchenstabdübel $d = 12$ mm verstärkten Auflagerflächen wurden bei der Versuchsreihe 1 auch 3 Auflagerflächen mit 16×8 cm großen Nagelplatten verstärkt. Die Nagelplatten wurden unterseitig mittels Hammer eingeschlagen. Die Belastung erfolgte nach Abschnitt 4.2.1, die zugehörigen Lastzusammendrückungslinien sind in Bild 27 bis 29 enthalten. Dabei ergaben sich bis zu einer Last, die etwa der Proportionalitätsgrenze des unverstärkten Holzes entspricht, größere Verformungen als am unverstärkten Auflager selbst. Dies läßt sich zum Teil dadurch erklären, daß die Nagelplatten durch das Einschlagen die Auflagerfläche schwächen und bis zum satten Anliegen der gesamten Nagelplatte bei Lastaufnahme ein gewisser Weg (Schlupf) zurückgelegt werden muß, bevor der lineare Teil der Last-Zusammendrückungslinie beginnt. Die Höchstlasten der mit Nagelplatten verstärkten Auflager wurden nicht ermittelt, da die Zusammendrückungen auf keine Verbesserung gegenüber den unverstärkten Auflagern hindeuteten.

././.

4.4 Versuche mit Sperrholzverstärkung

Mit Buchensperrholzplatten BFU - BU 100 (Dicke $d = 19$ mm) nach DIN 68 705, Teil 5 verstärkte Lasteinleitungsflächen, die auf eine Länge von 17 cm (bzw. 25 cm) sowohl am Auflager wie an der Lasteinleitungsstelle (Mitte) seitlich auf einen Träger 16/50/217 cm mittels Nagelpreßleimung aufgeleimt waren (s. Bild 26), wurden Versuche wie im Abschnitt 4.2.1 (Versuchsreihe 2) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 für das Endauflager A und die Lasteinleitung L 1 zusammengestellt, in der für die verstärkten und unverstärkten Lasteinleitungsstellen die Höchstlasten A_u und F_u , die Zusammendrückungen v bei $\sigma_{D \perp} = 2,0 - 2,5$ und $\cong 4,0$ N/mm² sowie die daraus ermittelten Verbesserungsfaktoren $\alpha_{v2,0}$ und α_{Au} und α_{Fu} angegeben sind.

Ebenso sind in Tabelle 7 die Ergebnisse aus 3 an Probekörpern nach Bild 34 durchgeführten Versuchen mit innenliegend eingeleimten Buchensperrholzplatten BFU - BU 100 angegeben. Die Länge l_1 und die Höhe h_1 der eingeleimten Buchenplatten entspricht hierbei dem Versuch 7 a, und die Gesamtbreite war mit 17,7 cm etwas kleiner als beim Versuch 7 mit 19,8 cm. Diese Probekörper wurden angefertigt, um die Wirksamkeit von am Auflager in Schlitze eingeleimte Buchensperrholzplatten zu erkunden.

Die geringe Zusammendrückbarkeit und hohe Belastbarkeit der Probekörper läßt den Schluß zu, daß diese Art der Verstärkung, die allerdings einen größeren Arbeits- und Materialaufwand erfordert, eine hohe Wirksamkeit besitzt, die durch weitere Versuche unter praxisnahen Einbaubedingungen bestimmt werden sollte.

4.5 Materialeigenschaften des Brettschichtholzes

Nach Durchführung der Belastungs-Versuche wurden aus den Trägern der Versuchsreihen 1 und 2 Prismen 4 x 4 x 8 cm zur Feststellung von Rohdichte, Feuchtigkeit und Druckfestigkeit des verwendeten Brettschichtholzes entnommen.

Es ergaben sich folgende Werte:

	Rohdichte $\bar{\rho}$ (g/cm ³)	Feuchtigkeitsgehalt u (%)	Druckfestigkeit $\bar{\beta}_D \parallel$ (N/mm ²)
Versuchsreihe 1:	0,47	11 - 12	43,5
Versuchsreihe 2:	0,42	12,1 - 12,8	41,7

Tabelle 7: Ergebnisse der Versuche mit Buchensperrholzplatten BFU-BU 100

Versuch Nr.	Bild Nr.	BFU-BU 100			Endauflager A						
		Dicke d_1 (mm)	Länge l_1 (mm)	Höhe h_1 (mm)	A_u (kN)	$\max \sigma_{D \perp}$ (N/mm ²)	$v_{2,0}$ (mm)	$v_{2,5}$ (mm)	$v_{3,7}$ (mm)	$x_{v_{2,0}}$	x_{A_u}
7 a	26	19	170	150	163,2	6,00 ¹⁾ (4,85) ²⁾	0,50	0,62	0,94	> 2,0	1,42
7 b	26	19	250	150	207,9	7,64 ¹⁾ (6,18) ²⁾	0,71	0,85	1,21	1,52	1,62
7 a		unverstärkt			114,8	4,22 ¹⁾	1,17	1,47	2,78	-	-
7 b		unverstärkt			128,4	4,72 ¹⁾	1,01	1,32	2,56	-	-

Versuch Nr.	Bild Nr.	BFU-BU 100			Lasteinleitung L						
		Dicke d_1 (mm)	Länge l_1 (mm)	Höhe h_1 (mm)	F_u (kN)	$\max \sigma_{D \perp}$ (N/mm ²)	$v_{2,0}$ (mm)	$v_{2,5}$ (mm)	$v_{3,7}$ (mm)	$x_{v_{2,0}}$	x_{F_u}
7 a	26	19	170	150	- ³⁾	- ³⁾	0,38	0,45	0,62	≈ 2,00	- ³⁾
7 b	26	19	250	150	270,7	9,95 ¹⁾ (8,04) ²⁾	0,42	0,49	0,64	≈ 2,00	1,55
7 a		unverstärkt			156,2	5,74 ¹⁾	0,61	0,75	1,23	-	-
7 b		unverstärkt			175,0	6,43 ¹⁾	0,68	0,83	1,25	-	-

Versuch Nr.	Bild Nr.	BFU-BU 100			Querdruck-Probekörper				
		Dicke d_1 (mm)	Länge l_1 (mm)	Höhe h_1 (mm)	F_u (kN)	$\max \sigma_{D \perp}$ (N/mm ²)	$v_{2,0}$ (mm)	$v_{2,5}$ (mm)	$v_{4,0}$ (mm)
8 a	34	19	170	150	478,0	15,9	0,28	0,32	0,42
8 b	34	19	170	150	496,0	16,5	0,36	0,40	0,52
8 c	34	19	170	150	502,0	16,7	0,43	0,47	0,57

- 1) Auf Fläche 16,0 x 17,0 (cm²) bezogen
- 2) Auf Fläche 19,8 x 17,0 (cm²) bezogen.
- 3) nicht ermittelt.

././.

5. Schlußfolgerungen und Bemessungsvorschlag

Die durchgeführten Untersuchungen und die bei praktischen Anwendungen gesammelten Erfahrungen sowie die Arbeiten von Lackner und Wassipaul (2 und 3) haben gezeigt, daß als Verstärkungselemente für Trägerauflager und Lasteinleitungsstellen in erster Linie eingeleimte Gewindestangen oder eingeleimte Hartholzstäbe (Buchendübel) infrage kommen. Beide Verstärkungselemente können nach den anzuwendenden Einbringungsverfahren mit dem auch für die Verleimung von Brettschichtholz gebräuchlichen Resorcin-Kunstharzkleber eingeleimt werden.

Sondernägel und Nagelplatten, in die Lastangriffsfläche eingeschlagen, haben sich als wenig wirksam erwiesen, so daß sie für die Praxis nur in besonderen Fällen von Bedeutung sein werden. Seitlich aufgeleimte oder in Schlitze eingeleimte Buchensperrholzplatten verringern nicht nur die Zusammendrückungen wesentlich, sondern erhöhen auch die aufnehmbaren Höchstlasten, insbesondere, wenn sie in Schlitzen des Brettschichtholzes eingeleimt werden, was allerdings sehr aufwendig ist.

Zur Ermittlung der Verstärkungswirkung der einzelnen Elemente wurde im Gegensatz zu (2, 3) nicht von der Verbesserungswirkung bezüglich der Einpressung der Auflagerplatten in das Holz ausgegangen, sondern in der Regel die gesamte Zusammendrückung der in der Lastwirkungslinie liegenden halben Trägerhöhe sowie die aufnehmbare Höchstlast der verstärkten Lasteinleitungsfläche im Vergleich zum unverstärkten Zustand soweit als möglich festgestellt. Es hat sich nämlich insbesondere bei den Verstärkungen durch eingeleimte Buchendübel mit verhältnismäßig geringer Länge gezeigt, daß die Zusammendrückungen der über dem verstärkten Trägerbereich liegenden Zonen nicht außer acht gelassen werden können und daß bei weiterer Laststeigerung bis zur Höchstlast meistens die Zerstörung des Trägers in diesen Zonen erfolgt. Dabei bauchen sich die Trägerseitenflächen über dem Verstärkungsbereich beidseitig mehr oder weniger stark aus und die Höchstlast ist meist mit dem Auftreten von Längsrissen über dem Verstärkungsbereich verbunden. Daher wurden in den Tabellen 4, 5 und 7 neben den Verbesserungswerten χ_V der Zusammendrückungen auch Verbesserungswerte χ_{A_u} und χ_{F_u} aus den Höchstlasten A_u und F_u angegeben. Außerdem muß noch darauf hingewiesen werden, daß bei den vorstehenden Untersuchungen der Endauflagerungen im Gegensatz zu den Wiener Untersuchungen die Druckplatten stets

bündig mit dem Trägerende abschlossen. Dies wurde nicht zuletzt im Hinblick auf die in DIN 1052, Teil 1, Abschnitt 9.1.8 getroffene Regelung vorgenommen, wonach am Endauflager geleimter Biegeträger keine 20 %ige Abminderung von zul $\sigma_{D\perp} = 2 \text{ N/mm}^2$ vorgenommen werden muß. Bei Anordnung von genügend großen Überständen in Faserrichtung über die Druckflächen (mindestens 10 cm) liegt das günstigere Verformungs- und Tragverhalten des sog. Schwellendruckes vor, wie sie vorstehend für die Lasteinleitungsstellen erhalten wurden. Aus den Tabellen 4, 5 und 7 läßt sich eindeutig erkennen, daß die Zusammendrückungen bei den Endauflagern bei 2 N/mm² Querpressung teilweise deutlich größer sind als die Werte an den Lasteinleitungsstellen bei 2,5 N/mm² Querpressung. Ebenso deutliche Unterschiede bestehen hinsichtlich der Maximallasten A_u und F_u . Es kann daher bei den unverstärkten Endauflagern mit maximalen Querdruckpressungen von 4,22 bis 6,56 N/mm² von zul $\sigma_{D\perp} = 2 \text{ N/mm}^2$, bei den Lasteinleitungen (Schwellendruck) mit Querdruckpressungen von 5,74 bis 10,57 N/mm² von zul $\sigma_{D\perp} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ ausgegangen werden. Dabei wurden bei den Endauflagern Zusammendrückungen von 0,75 bis 1,50 mm, bei den Schwellen-Flächen von 0,50 bis 0,83 mm gemessen. Hieraus geht hervor, daß die Anwendung von zul $\sigma_{D\perp} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ nicht immer zu größeren Werten führen muß und daß die Absolutbeträge der Verformungen bei den Schwellenflächen verhältnismäßig gering sind. Beim Vergleich der Ergebnisse mit den Feststellungen und Schlußfolgerungen nach (3) muß daher beachtet werden, daß nach den betreffenden Angaben die Belastungsversuche vorwiegend an Auflagerungen von Brettschichtträgern mit einseitigem Überstand von 5 cm und mehr durchgeführt wurden.

Für die einzelnen Verstärkungsmaßnahmen können bei Brettschichtholz (trocken) aufgrund der hier durchgeführten Untersuchungen folgende Ausführungs- und Bemessungsvorschläge gemacht werden, wobei für die unverstärkte Ausführung von zul $\sigma_{D\perp} = 2,0 \text{ N/mm}^2$ bei Druckflächen ohne Überstand und von zul $\sigma_{D\perp} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ bei beidseitig mindestens 10 cm Überstand ausgegangen werden kann.

5.1 Verstärkung von Auflager- und Lasteinleitungsbereichen mittels eingeleimter Gewindestangen

In Fällen, bei denen wegen der geringen zulässigen Querdruckspannungen mit Resorcinformaldehyd-Kunstharzleim nach dem in (11) beschriebenen Verfahren eingeleimte Gewindestangen als Verstärkungsmaßnahme gewählt werden, sind 2 Arten der Ausführung zu unterscheiden:

- a) Über die Trägerfläche vorstehende Gewindestangen mit mittiger Lasteinleitung. Die zulässige Belastung von n Gewindestäben ergibt sich nach den Gleichungen (1) und (2) von (11) zu:

$$\text{zul } F_{St} = n \cdot \pi \cdot d \cdot l_E \cdot \text{zul } \tau \parallel \quad \text{und} \quad (1)$$

$$\text{zul } F_{St} = n \cdot A_k \cdot \text{zul } \sigma_{StD} \quad (2)$$

Der kleinere Wert ist maßgebend.

Die Stäbe müssen hierbei mindestens allseitig einen Randabstand von 4 d und untereinander einen Abstand von 3 d haben.

- b) Bündig mit der Trägerfläche abschließende Gewindestangen. Die Einleimlängen l_E sollten mindestens 15 bis 20 d betragen, aber nicht mehr als die halbe Trägerhöhe. Die zulässige Gesamtbelastung der verstärkten Auflager- bzw. Lasteinleitungsfläche kann wie folgt berechnet werden:

$$\text{zul } F_{\text{gesamt}} = \text{zul } F_{St} + A_n \cdot \text{zul } \sigma_D \perp \quad (3)$$

zul F_{St} nach Gl. (1) oder (2),

$$A_n = \text{Nettoholzdruckfläche} = \text{Auflagerfläche} - n \cdot \pi d^2 / 4.$$

Die Stäbe können hierbei einen allseitigen Mindestrandabstand von 2,5 d und untereinander einen Abstand von 3 d haben.

5.2 Verstärkung mittels eingeleimter Buchendübel \emptyset 12 bis 25 mm.

Die Dübel sind nach Abschnitt 4.2.1 in die Lasteinleitungsfläche $A = b \cdot l$ auf eine Länge von $5 \cdot d$ bündig mit der Trägeroberfläche einzuleimen. Der Dübelflächenteil DFP in % von A soll mindestens 4 % höchstens aber 16 % betragen. Aufgrund der Versuchsergebnisse (Verbesserungswerte α_V und α_{Au} bzw. α_{Fu}) kann mit folgenden zulässigen Querdruckspannungen bei Lasteinleitungsflächen ohne Überstand (Endlager) und mit Überstand (Schwellenlager) in Abhängigkeit von DFP gerechnet werden:

DFP in % von A:	zulässige Querdruckspannungen in N/mm ²	
	ohne Überstand	mit Überstand
ca. 4 bis 6	2,5	3,0
<u>≥ 10</u>	3,0	4,0

Zwischenwerte können geradlinig eingeschaltet werden.

Für die Buchendübel muß untereinander parallel und senkrecht zur Faser ein Mindestabstand von $2,5 d$ und allseitig vom Rand von $2,0 d$ eingehalten werden. Bezüglich der Schubspannungsaufnahme kann nach (3) durch das Einleimen von Gewindestangen oder Hartholzstäben nicht mit einer Verbesserung gegenüber unbewehrtem Brettschichtholz gerechnet werden. Die Verstärkungselemente nach 5.1 und 5.2 sollten daher nach Möglichkeit nicht bis an die halbe Trägerhöhe heranreichen, wenn die zulässige Schubspannung voll ausgenützt ist.

5.3 Verstärkung mit Schraubnägeln und Rillennägeln

Da nach (3) bei Drahtnägeln nach DIN 1052 nur Verbesserungen unter 10 % festgestellt wurden, sollte die Verstärkungswirkung praktisch nicht in Rechnung gestellt werden.

Bei Schraubnägeln wurden eindeutige Verbesserungen sowohl der Zusammendrückungen als auch der zu erwartenden Höchstlast nur mit den zugelassenen BIRA Schraubnägeln 75/85/160 erzielt.

Bei Einhaltung der Mindestabstände nach DIN 1052, Teil 1 (Längsabstand $10 d_n$, Querabstand $5 d_n$) kann eine Erhöhung der zulässigen Querpressung von 25 % berücksichtigt werden, also bei Einleitungsflächen ohne Überstand zu $\sigma_{D\perp} = 2,5 \text{ N/mm}^2$, mit Überstand $3,0 \text{ N/mm}^2$, Mindestnagelanzahl 4.

5.4 Verstärkung durch Baufurnierplatten aus Buchenholz

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand wird von der Angabe von Bemessungsregeln abgesehen, da noch weitere umfangreichere Untersuchungen zur Klärung der zweckmäßigen Ausführung und zahlenmäßigen Erfassung erforderlich sind.

5.5 Verstärkungen bei Vollholz

Für Vollholz könnten an und für sich die Verstärkungen nach 5.1 und 5.2 bei gleicher Ausführung und Bemessung zur Anwendung kommen. Da die Einleimung der Verstärkungselemente eine Holzfeuchtigkeit von höchstens 15 % erfordert, können diese Verfahren in der Praxis nur in Ausnahmefällen angewendet werden. Nach (5) und unveröffentlichten Versuchen von Gaber und Möhler und analog den Versuchen nach Abschnitt 4.1 können Balken aus mindestens halbtrockenem Nadelvollholz mit Drahtnägeln und mit Sondernägeln verstärkt werden, wobei die Nagelabstände nach DIN 1052, Teil 1, Tabelle 15 längs und quer zur Faserrichtung einzuhalten sind.

Die Nagellängen sollten 40 bis 50 % der Querschnittshöhe betragen. Bei Einhaltung dieser Bedingungen können die zulässigen Querpressungen wie folgt angenommen werden:

	Druckflächen ohne Überstand	Druckflächen mit Überstand
Drahtnagel:	statt 1,6 → 1,8 N/mm ²	statt 2,0 → 2,3 N/mm ²
Sondernagel:	statt 1,6 → 2,0 N/mm ²	statt 2,0 → 2,5 N/mm ²

6. Schlußbemerkungen

Die Untersuchungen haben ergeben, daß Lasteinleitungsflächen von Brett-schichtträgern vornehmlich durch eingeleimte Gewindestangen oder Buchenrundstäbe, weniger durch Nagelung mit Schraubnägeln so verstärkt werden können, daß gegenüber den zulässigen Querpressungen der unverstärkten Brettschichthölzer bei Lasteinleitung ohne und mit Überstand höhere Kräfte aufgenommen werden können. Bei den Gewindestangen ist in erster Linie Anzahl, Durchmesser und Einleimtiefe maßgebend, wobei nur bei bündigem Abschluß die an der Krafteinleitung beteiligte Holzfläche eine Rolle spielt.

Bei den Buchenrundstäben wird vom Zusammenwirken der verhältnismäßig kurz eingeleimten Dübel und der restlichen Holzfläche ausgegangen, so daß je nach dem Flächenanteil der Dübel bei Krafteinleitung ohne Überstand mit einer Erhöhung der nach DIN 1052 zulässigen Querpressung von 2 N/mm² um 25 % bis 50 %, bei Krafteinleitung mit Überstand, ausgehend von zul $\sigma_{D\perp} = 2,5$ N/mm², von 20 % bis 60 % ohne Beeinträchtigung der Verformungen und der Tragkraft gerechnet werden kann.

Verstärkungen durch normale Drahtnagel in den Druckflächen bringen bei Brett-schichtholz nur eine geringe Verbesserung, was auch bei den verhältnismäßig dünnen und kurzen Sondernägeln der Fall war, bei denen ein großer Streubereich der Verbesserungswerte festgestellt wurde. Hier kann vorerst nur der allgemein zugelassene BIRA-Schraubnagel 75/85/160 zu Verstärkungszwecken verwendet werden, wobei mindestens ein Nagel je 28 cm² Druckfläche anzuordnen ist und eine Mindestanzahl von vier Nägeln vorhanden sein muß. Unter diesen Bedingungen können bei Druckflächen ohne und mit Überstand die zulässigen Querpressungen um 25 % erhöht werden.

Bei Verstärkungen von Druckflächen bei Vollholz sind die Festlegungen in Absatz 5.5 zu beachten.

Schrifttum

1. Gaber, E., Druckversuche quer zur Faser an Nadel- und Laubhölzern. Holz als Roh- und Werkstoff (1940), S. 222/226.
2. Wassipaul, F. und R. Lackner, Erfassung von zusätzlichen, in großen Trägerquerschnitten auftretenden Spannungen. Bericht des Instituts für Holzforschung der Universität für Bodenkultur Wien, 1980.
3. Lackner, R., Auflagerverstärkung an Brettschichträgern aus Brettschichtholz, Dissertationsarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, 1977. (Siehe auch "Holzforschung und Holzverwertung, 32. Jg. (1980), S. 87/90, 33. Jg. (1981), S. 81/87 und 34. Jg. (1982), S. 10/12).
4. Möhler, K. und G. Maier, Kriech- und Relaxations-Verhalten von lufttrockenem und nassem Fichtenholz bei Querdruckbeanspruchung. Holz als Roh- und Werkstoff 28 (1970), S. 14/20.
5. Hoppe, C.J., Erhöhung der Druckfestigkeit von Weichholz quer zur Faser durch Nagelung. Bauingenieur 24 (1949), S. 90/93.
6. Möhler, K., Messezentrum Nürnberg. - Statische und konstruktive Probleme. EGH-Bericht Fachtagung Holzbau, Karlsruhe 1972.
7. Edlund, G., In Brettschichtholz eingeleimte Gewindestangen. Svenska Träförskningsinstitutet, Meddelande Serie B, Nr. 333, TT B: 62, Stockholm 1975.
8. Riberholt, H., Eingeleimte Gewindestangen Rapport Nr. R 99, Danmarks Tekniske Højskole, Avd. for Baerende Konstruktioner Lyngby/DK, 1978.
9. Möhler, K. und Kl. Hemmer, Versuche mit eingeleimten Gewindestangen. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), 1981.
10. Möhler, K. und R. Lautenschläger, Großflächige Queranschlüsse bei Brettschichtholz. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), 1978.
11. Möhler, K. und Kl. Hemmer, Eingeleimte Gewindestangen. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 6, Mai 1981, S. 4/6.
12. Stern, G.E. "Improved Nails for Building Construction" Virginia Polytechnic Institute, Bulletin No. 76.

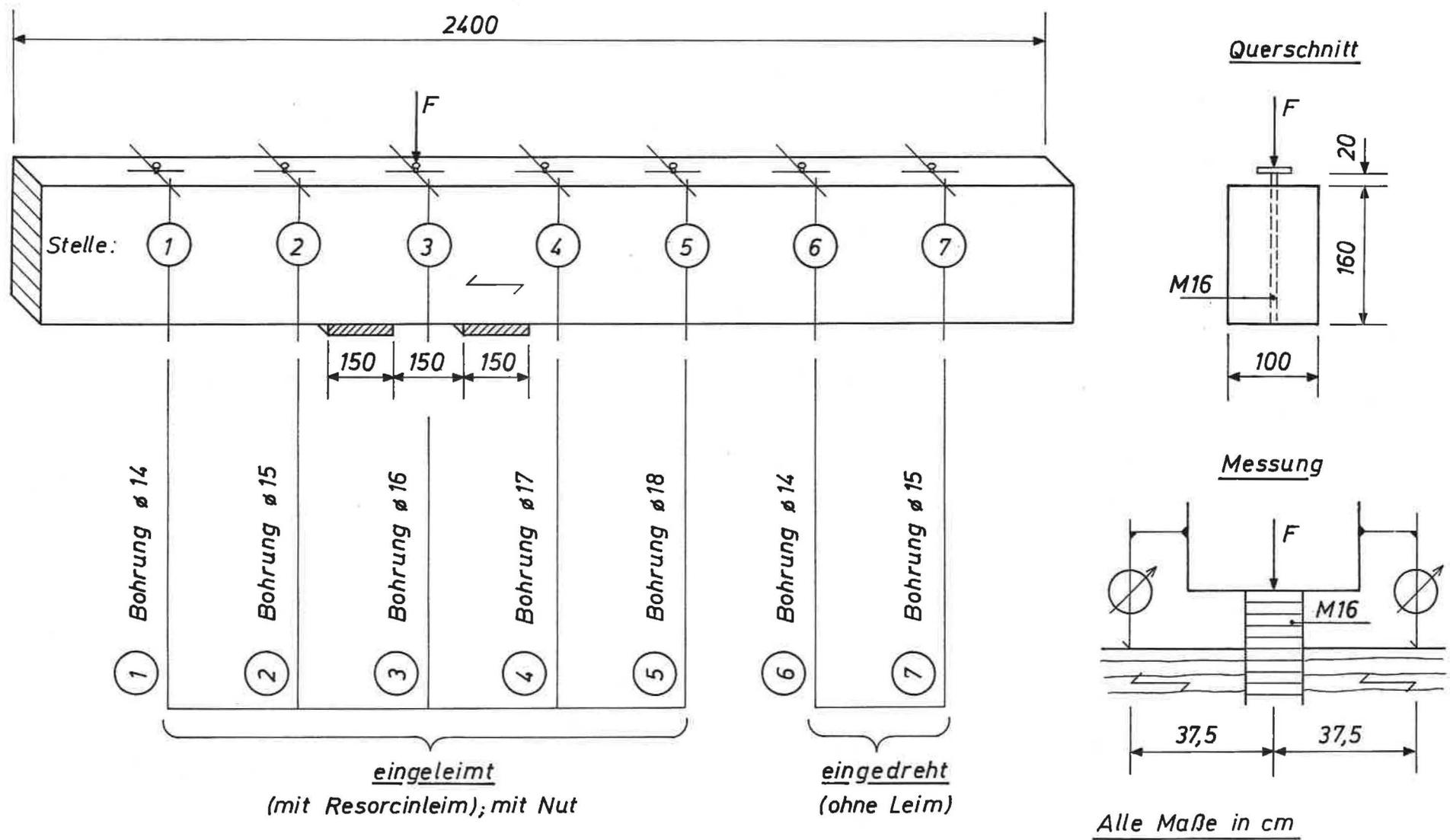


Bild 1: Versuchs- und Meßanordnung zur Ermittlung des Einflusses des Bohrlochdurchmessers

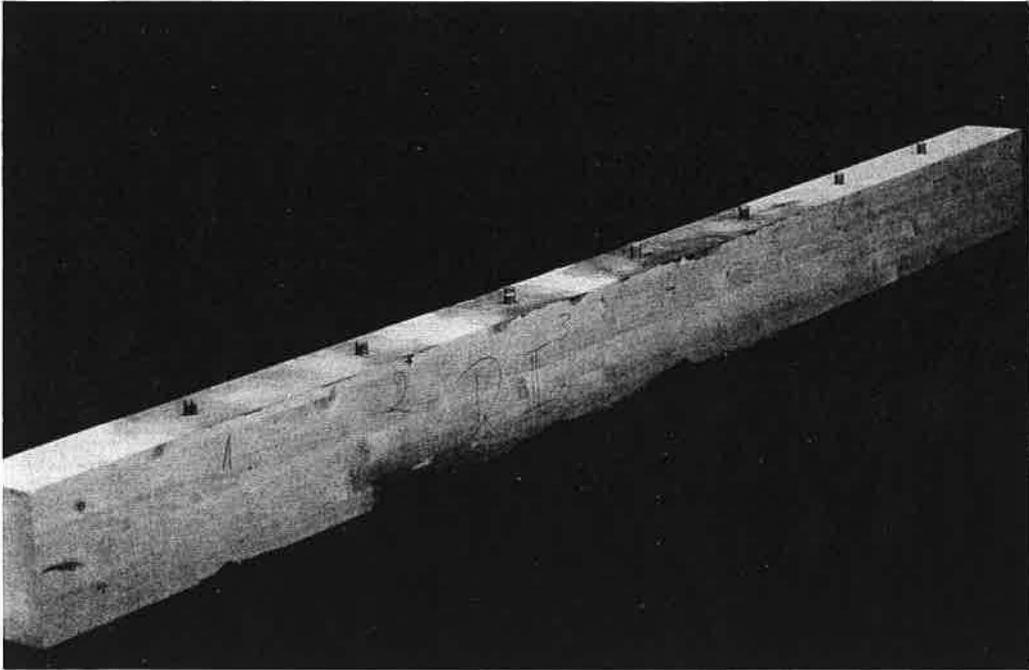


Bild 2:
Versuchsträger 2

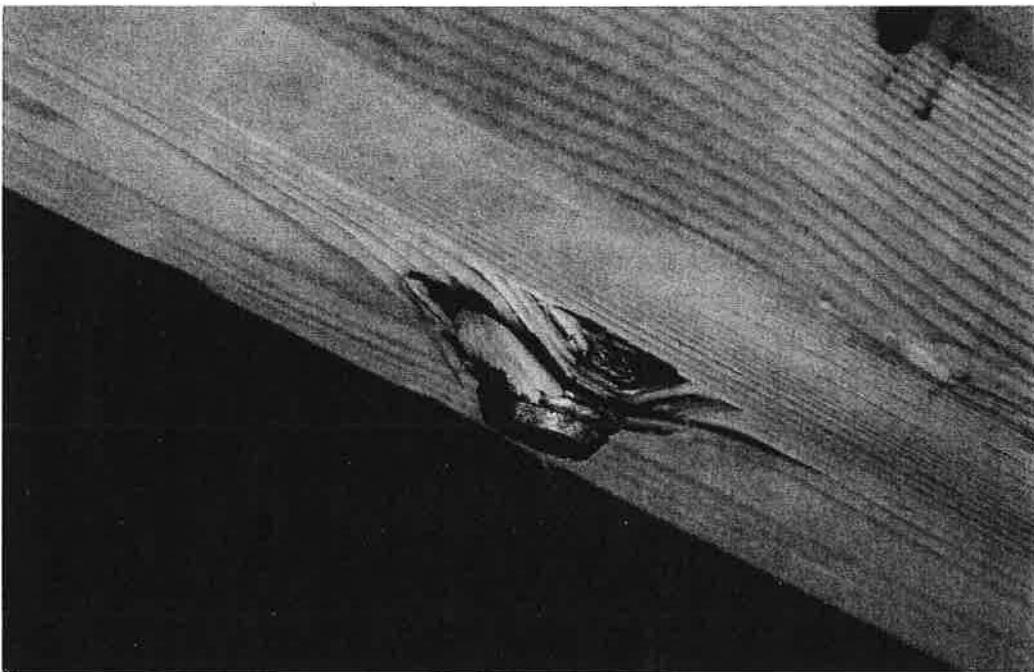


Bild 3:
Durchgedrückter
Gewindestab.

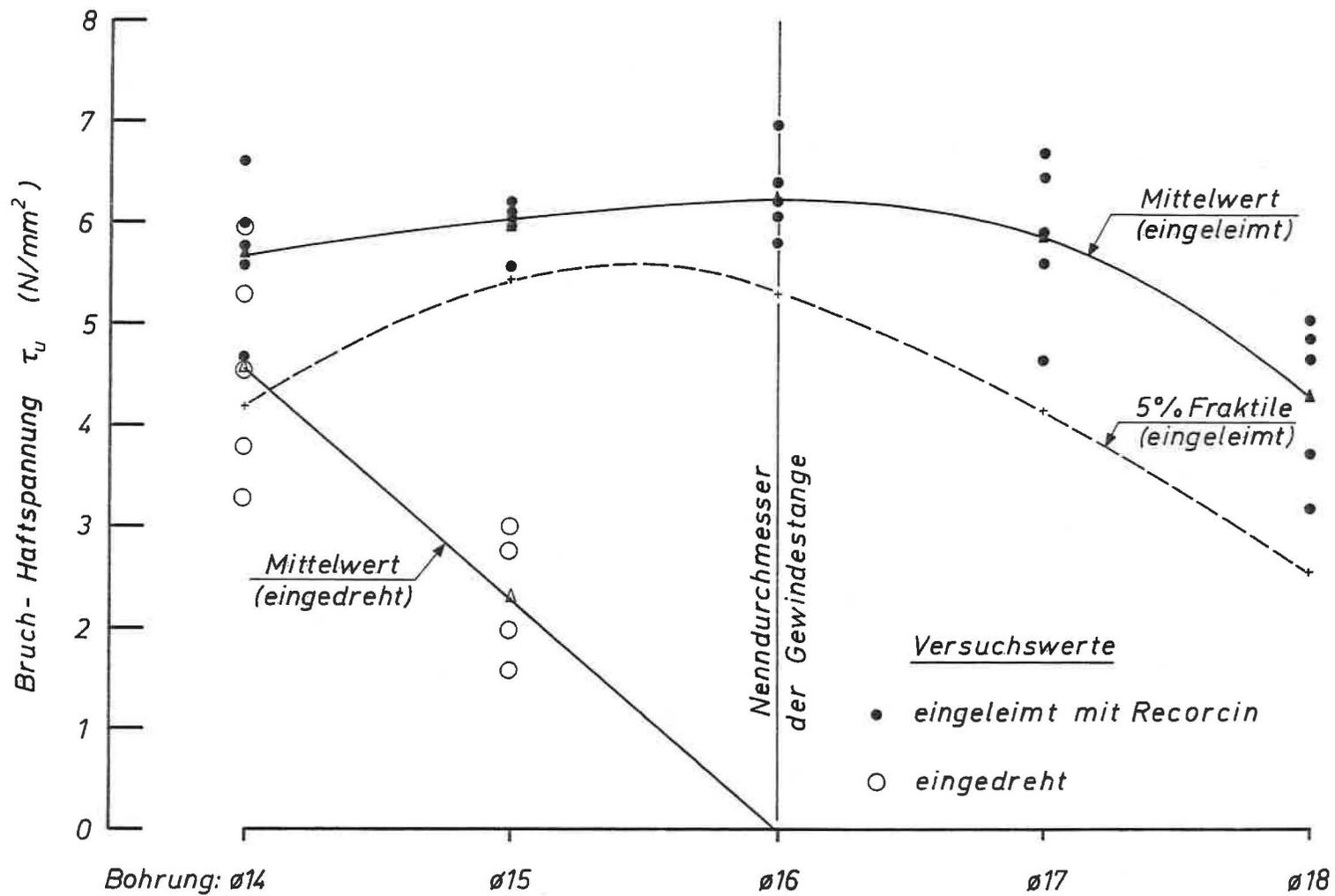


Bild 4: Bruchhaftspannungen τ_u bei verschiedenen Bohrlochdurchmessern

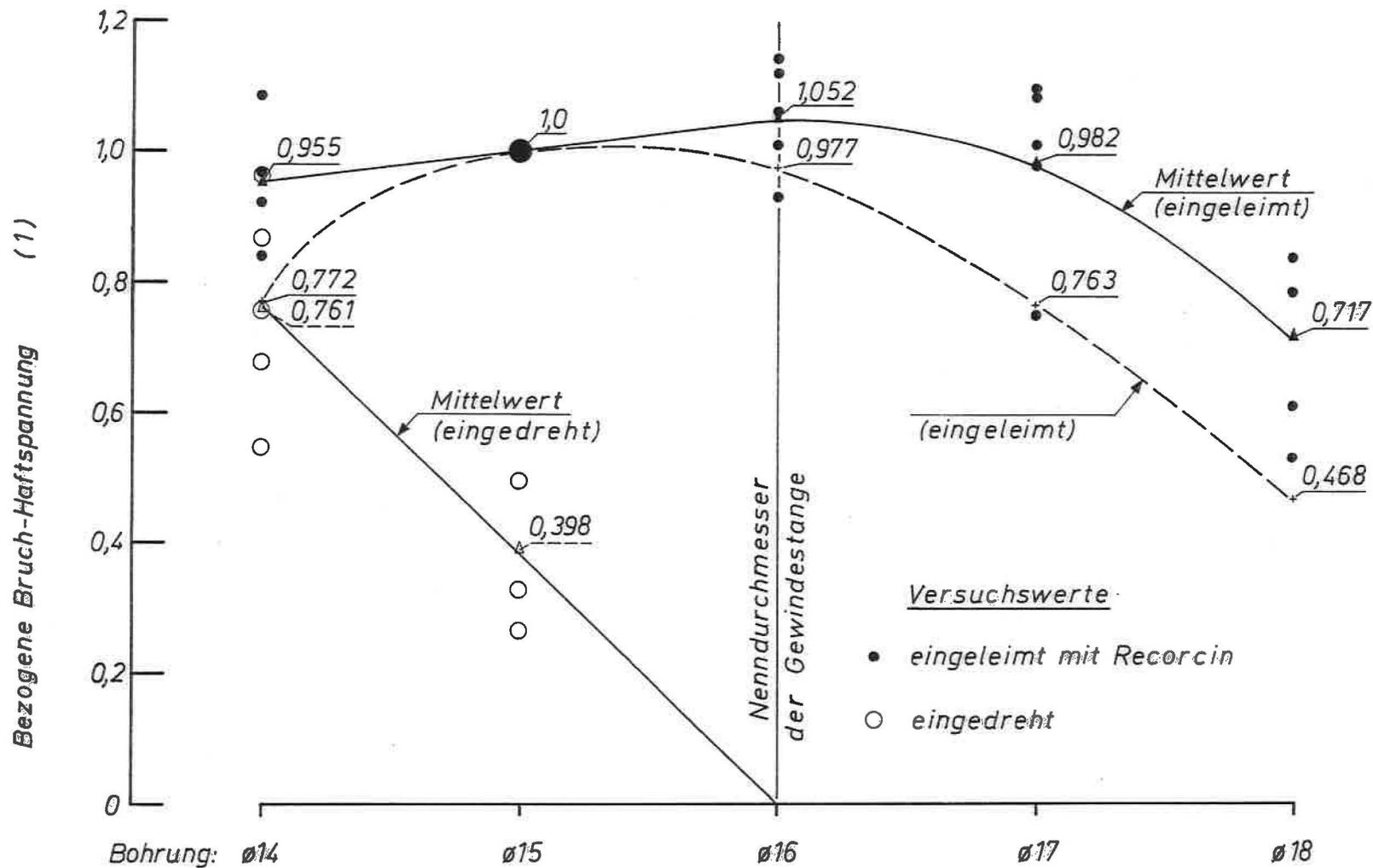


Bild 5: Bruchhaftspannung τ_u bezogen auf Werte an der Stelle 2

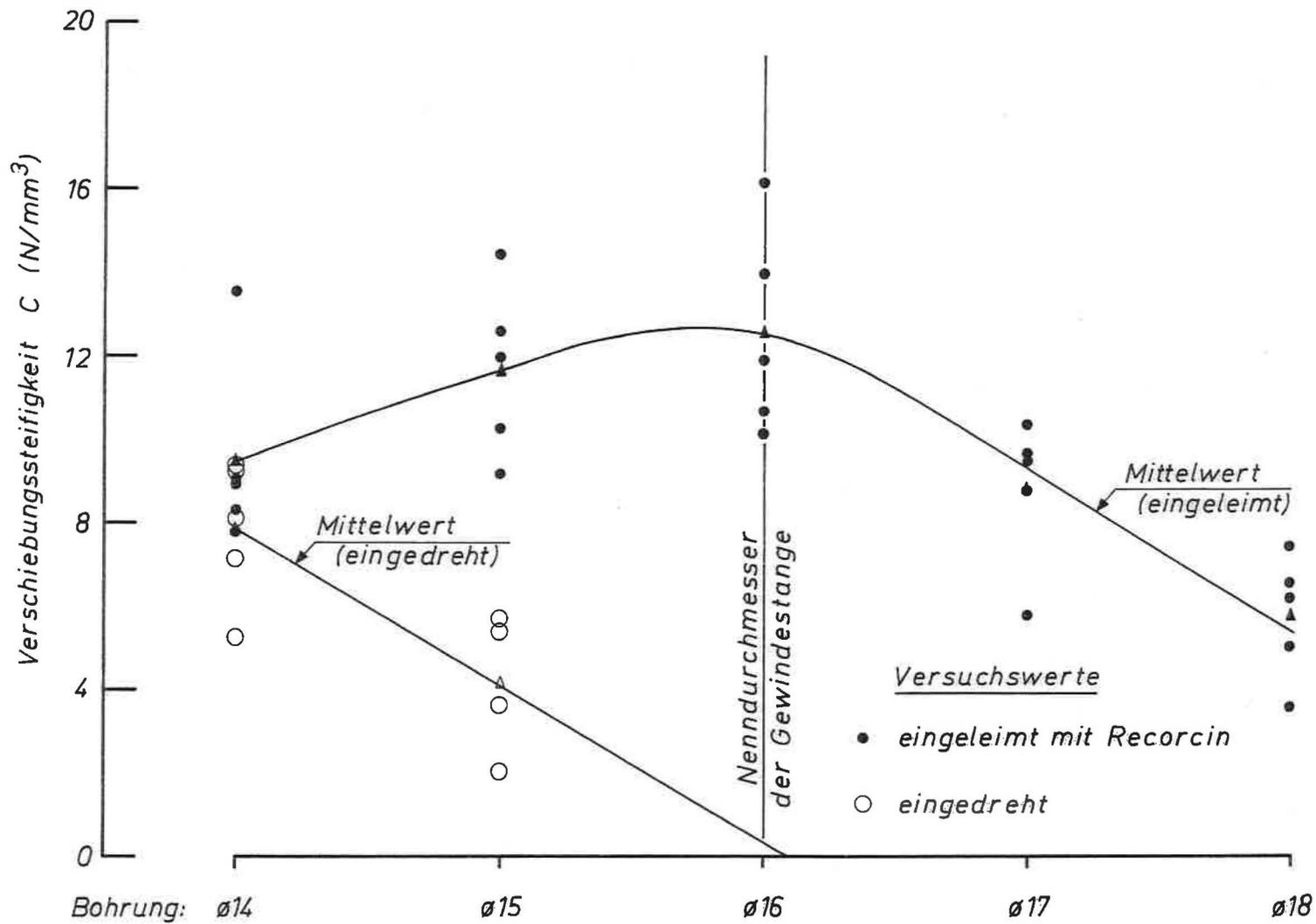


Bild 6: Werte der Verschiebungssteifigkeit $C = \frac{\tau}{\delta}$ für das Eindringen von Gewindestählen

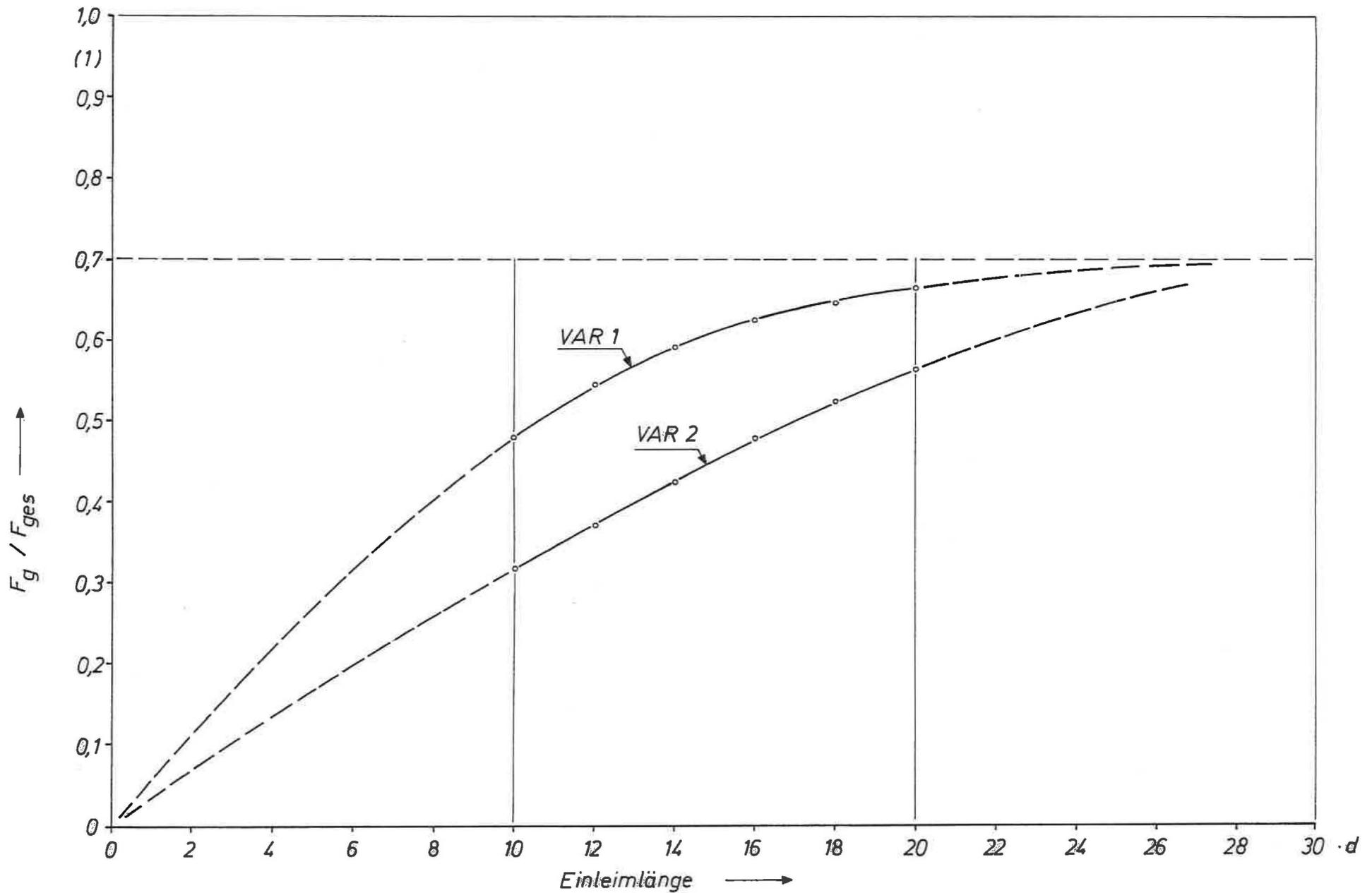


Bild 7: Anteil der Gewindestangenkraft F_g an der Gesamtauflagerkraft F_{ges} bei Rechnung nach SAP IV

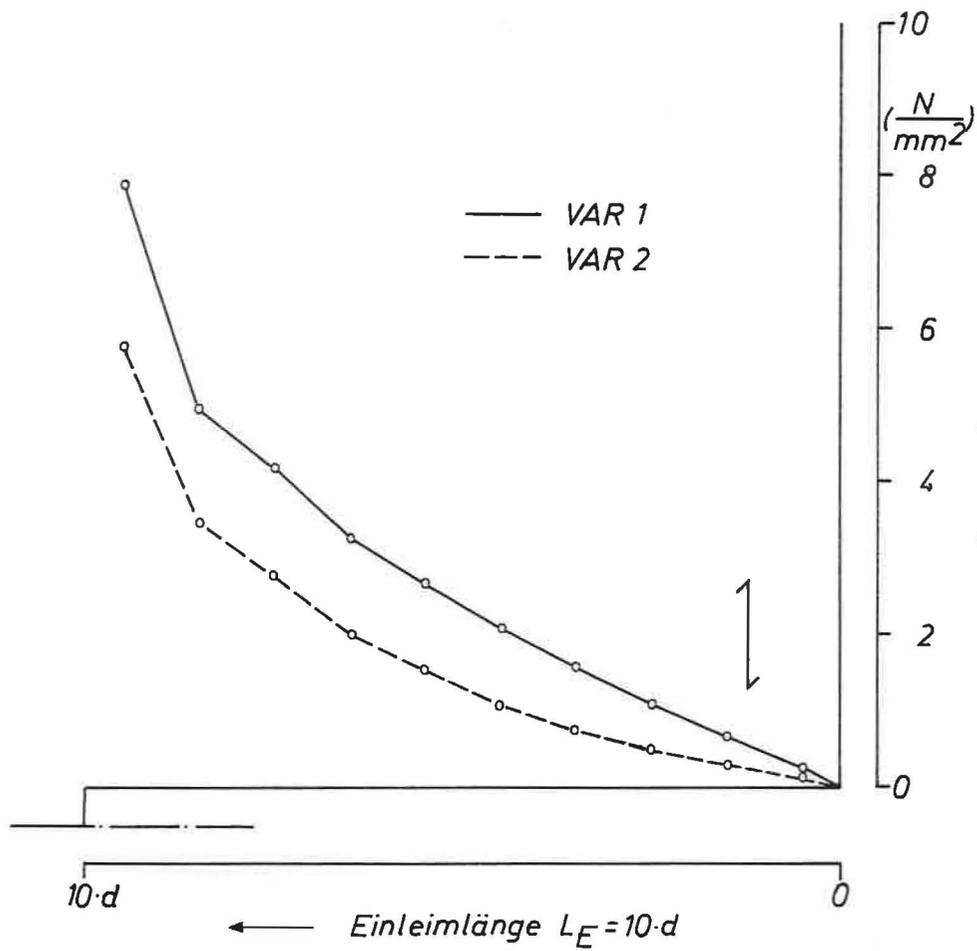


Bild 8b: Verlauf der Haftspannungen τ
 nach SAP IV
 ($\sigma_{d\perp} = 1,0 \text{ N/mm}^2$)

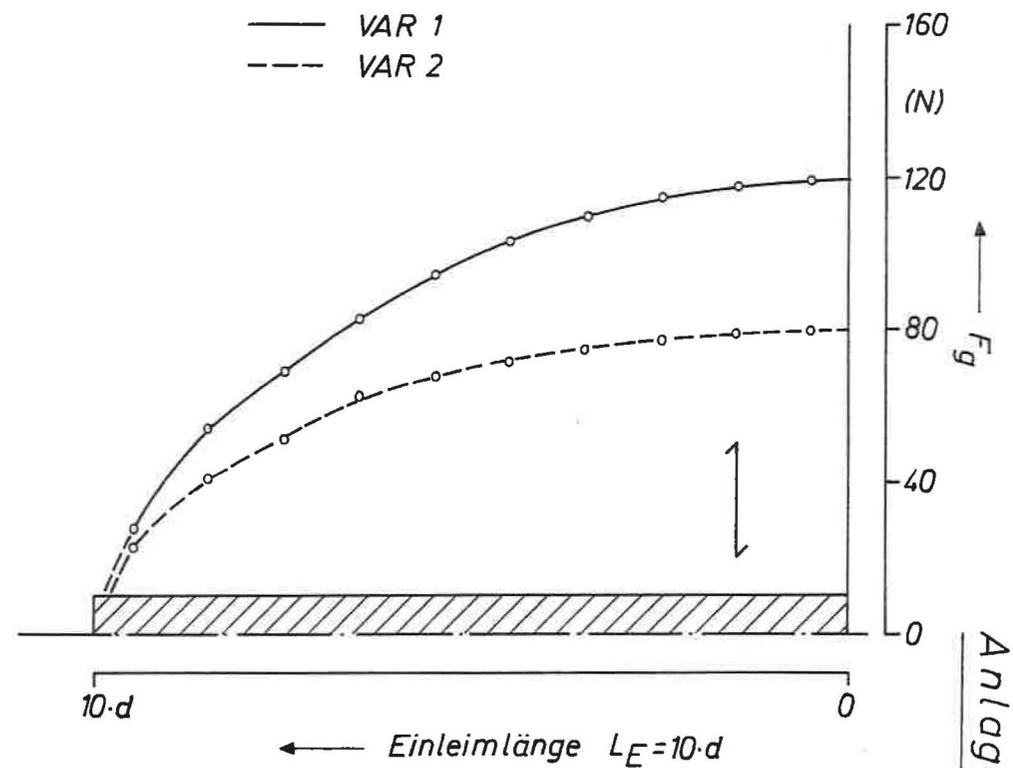


Bild 8a: Gewindestangenkraft F_g nach
 SAP IV
 ($F_{ges} = 25 \text{ kN}$ und $\sigma_{d\perp} = 1,0 \text{ N/mm}^2$)

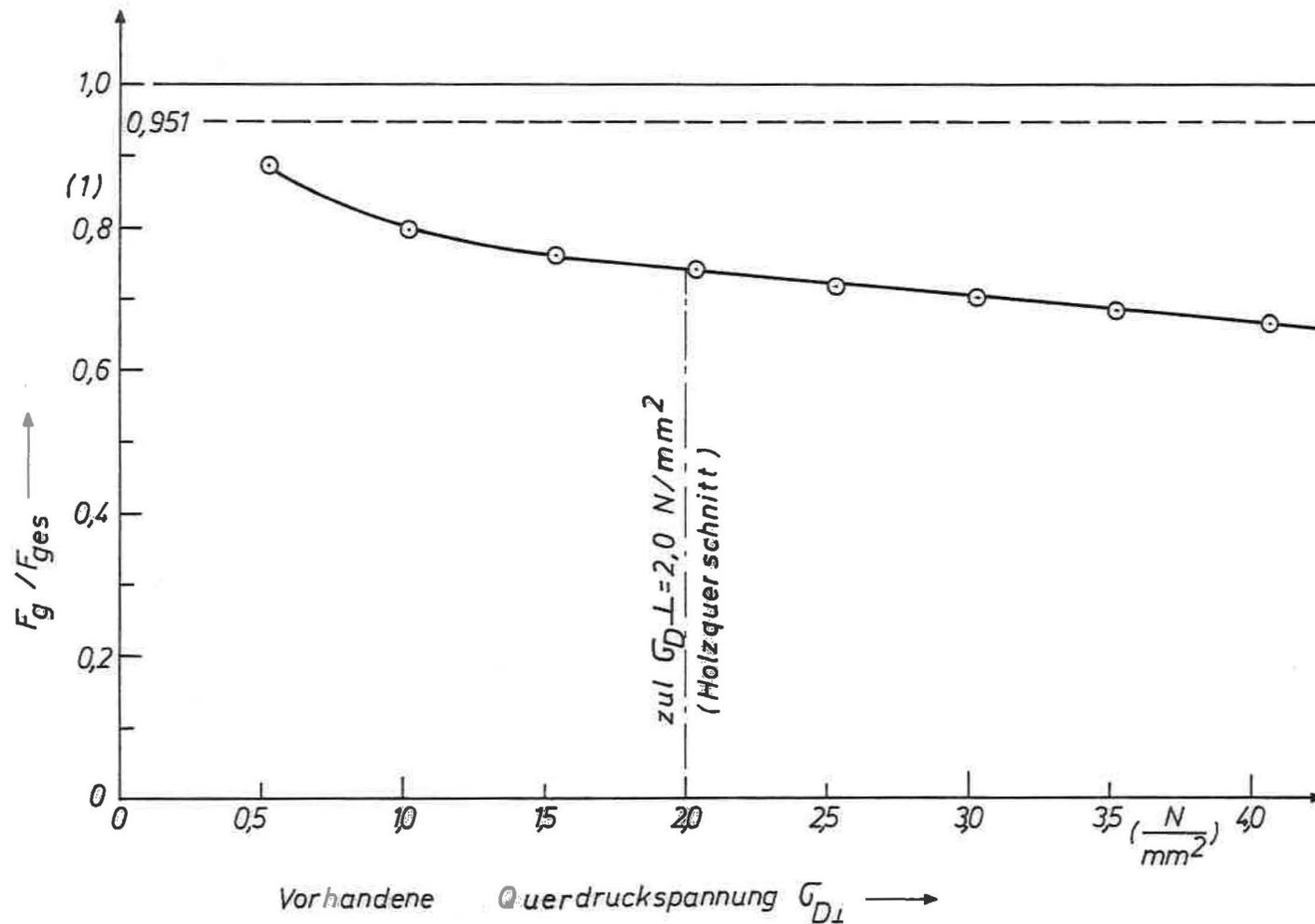
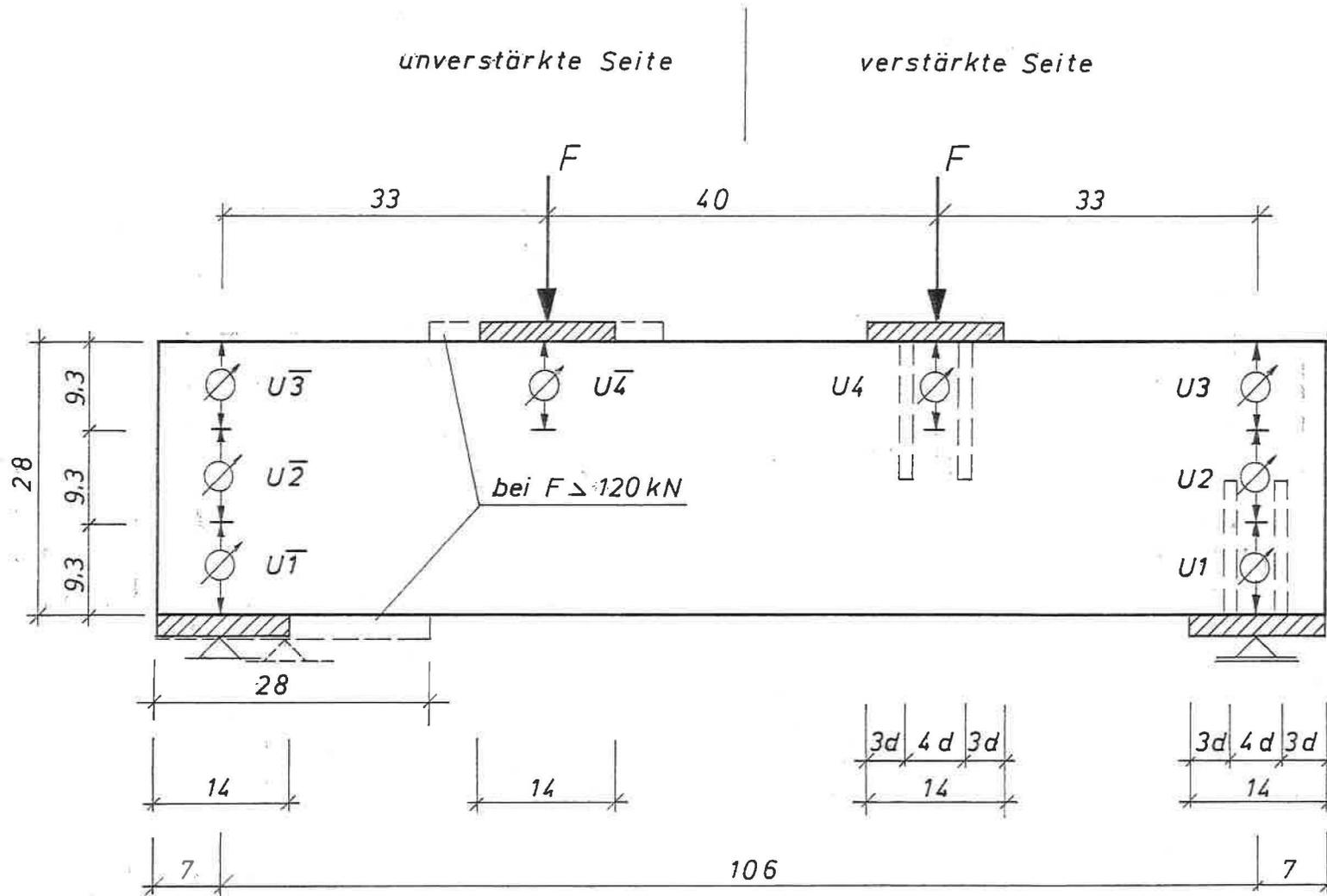


Bild 9: Anteil der Gewindestangenkraft F_g an der Gesamtauflagerkraft F_{ges} in Abhängigkeit von der aufgetragenen Querdruckspannung $\sigma_{D\perp}$

unverstärkte Seite

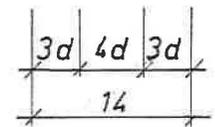
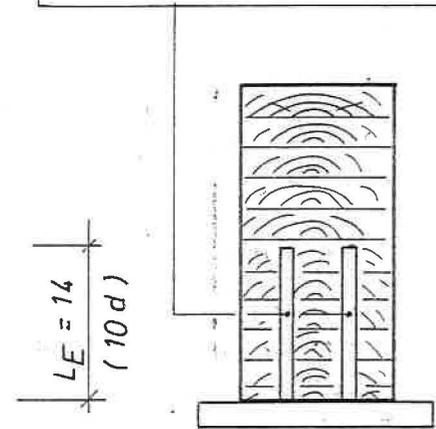
verstärkte Seite



eingeleimte Gewindestangen M14

Einleimlänge $L_E = 140 \text{ mm}$

Bohrung $\phi \quad 13 \text{ mm}$



alle Maße in cm

Anlage 9

Bild 10: Versuchsaufbau und Meßvorrichtung für Versuchskörper 1 und 2

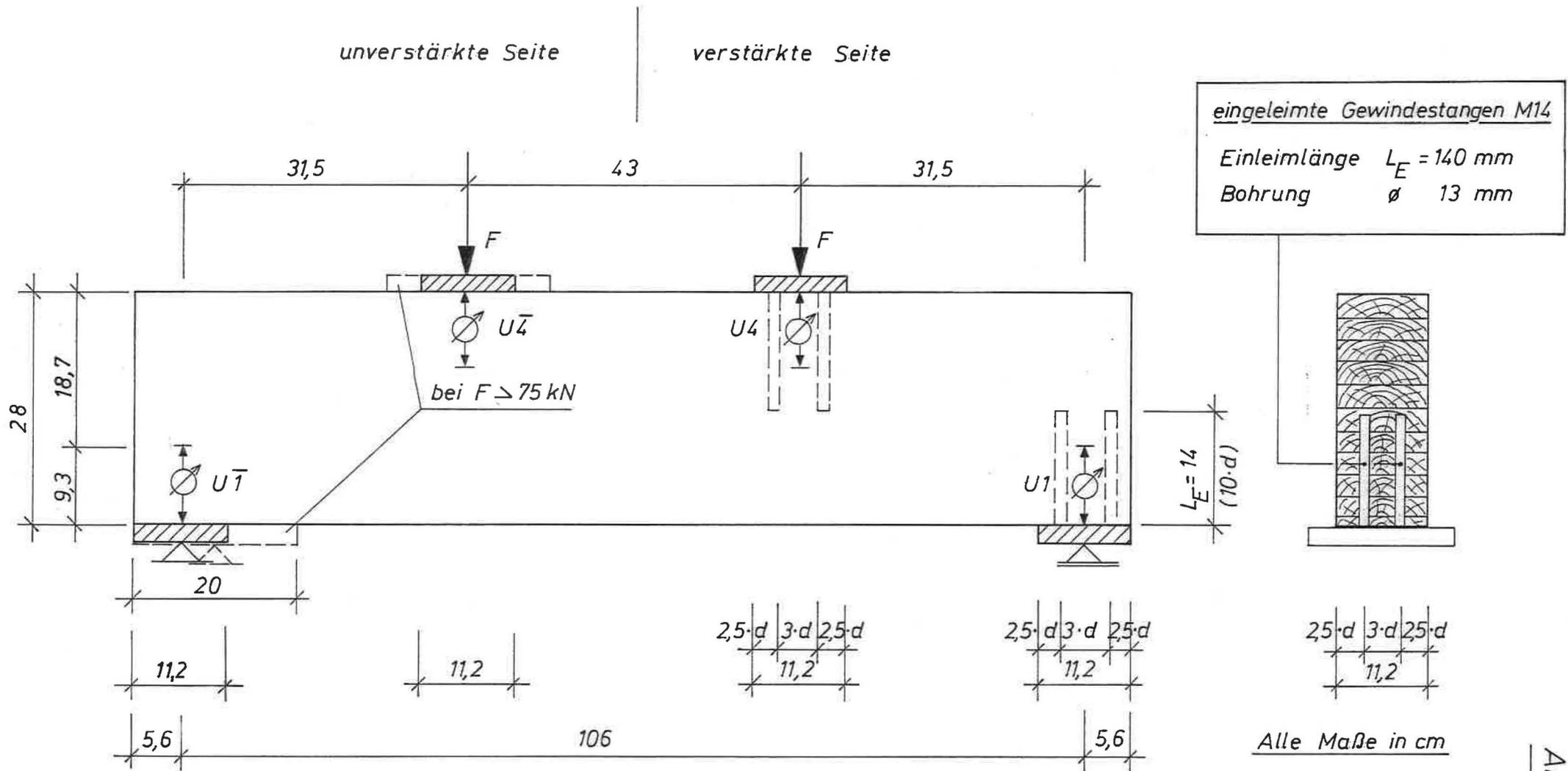


Bild 11: Versuchsaufbau und Meßvorrichtung für Versuchskörper 3

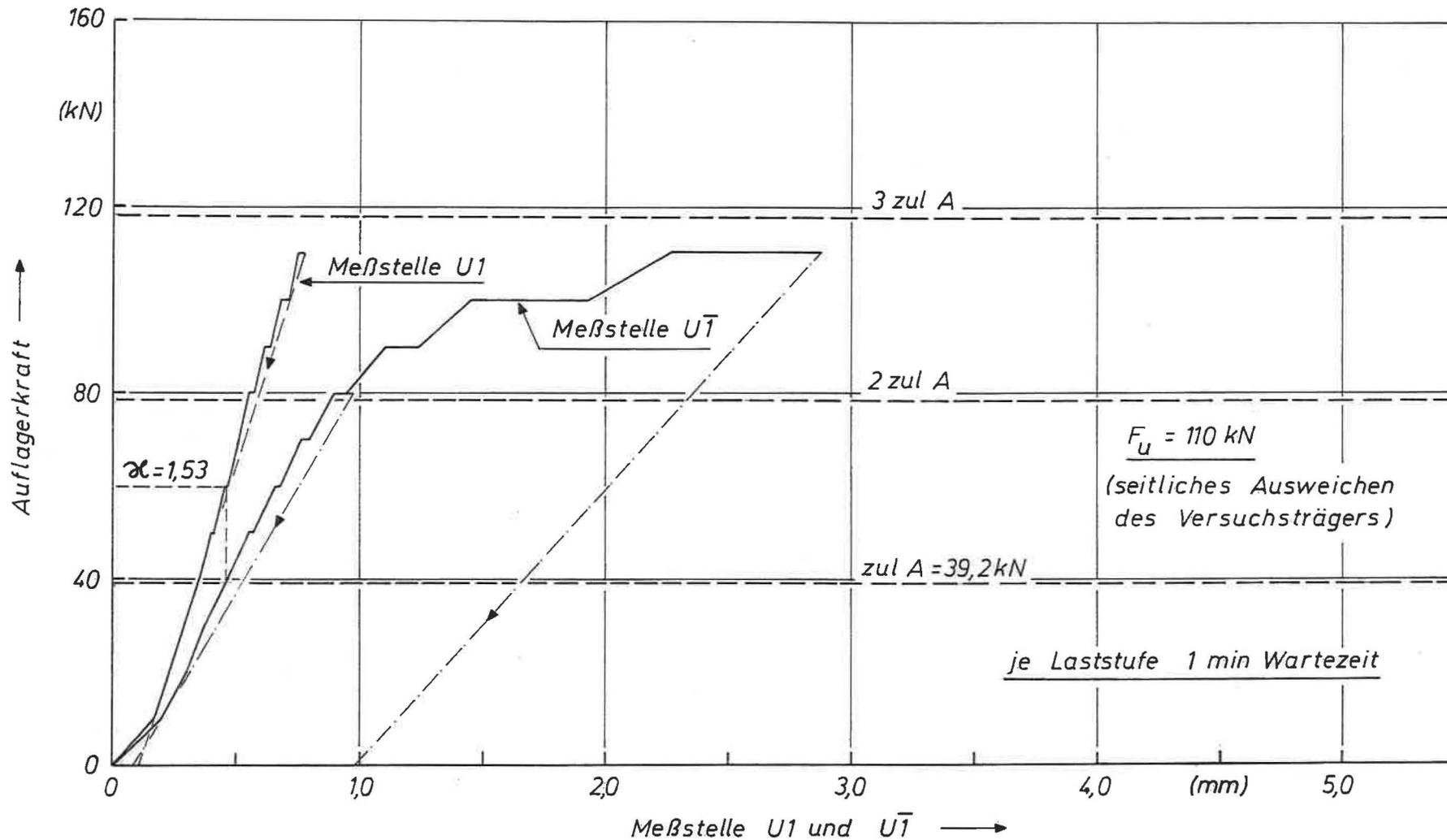


Bild 12: Versuch 1; Zusammendrückung des unteren Querschnittsdrittels am Auflager in Abhängigkeit von der Auflagerkraft

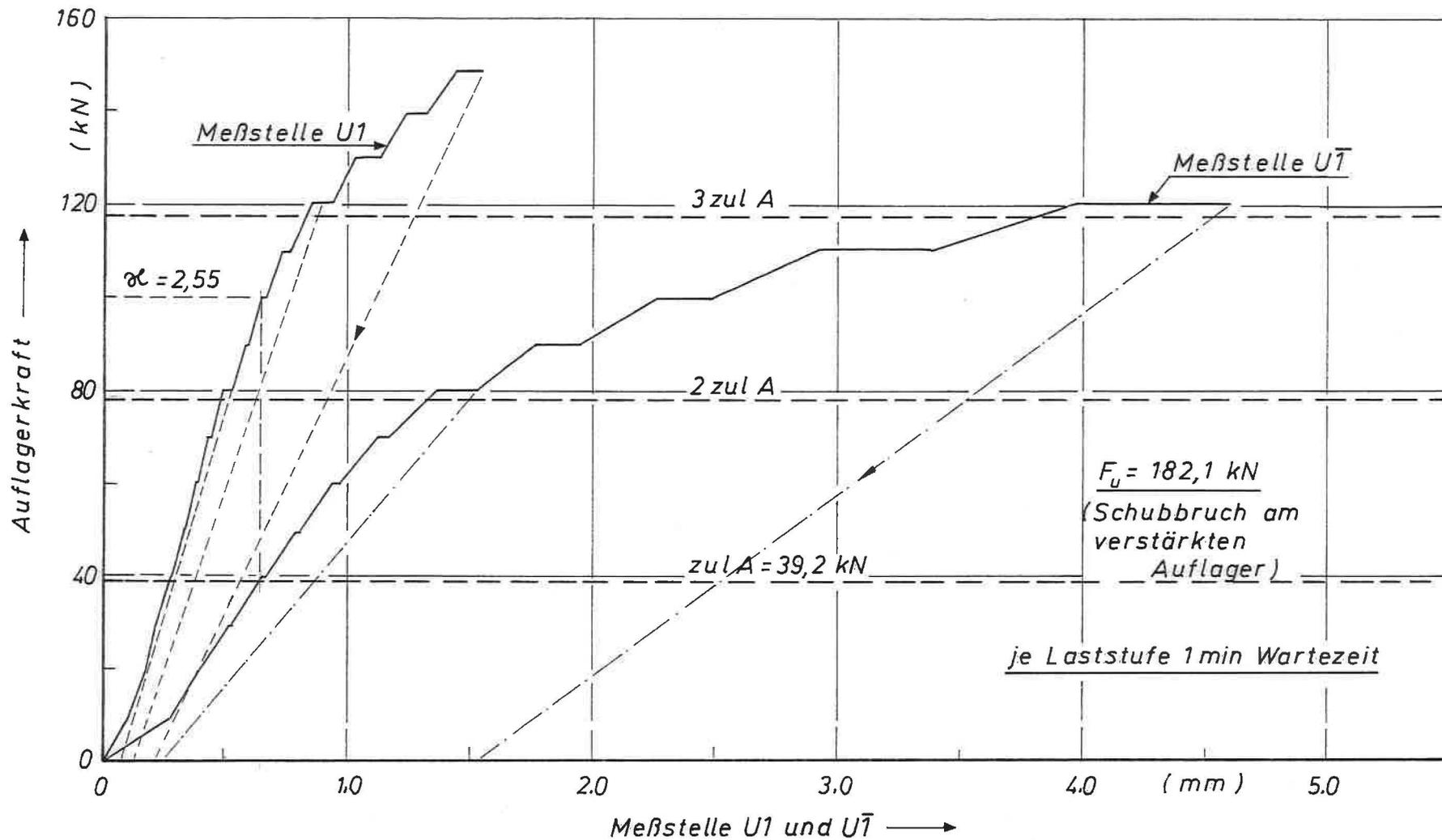


Bild 13: Versuch 2; Zusammendrückung des unteren Querschnittsdrittels am Auflager in Abhängigkeit von der Auflagerkraft

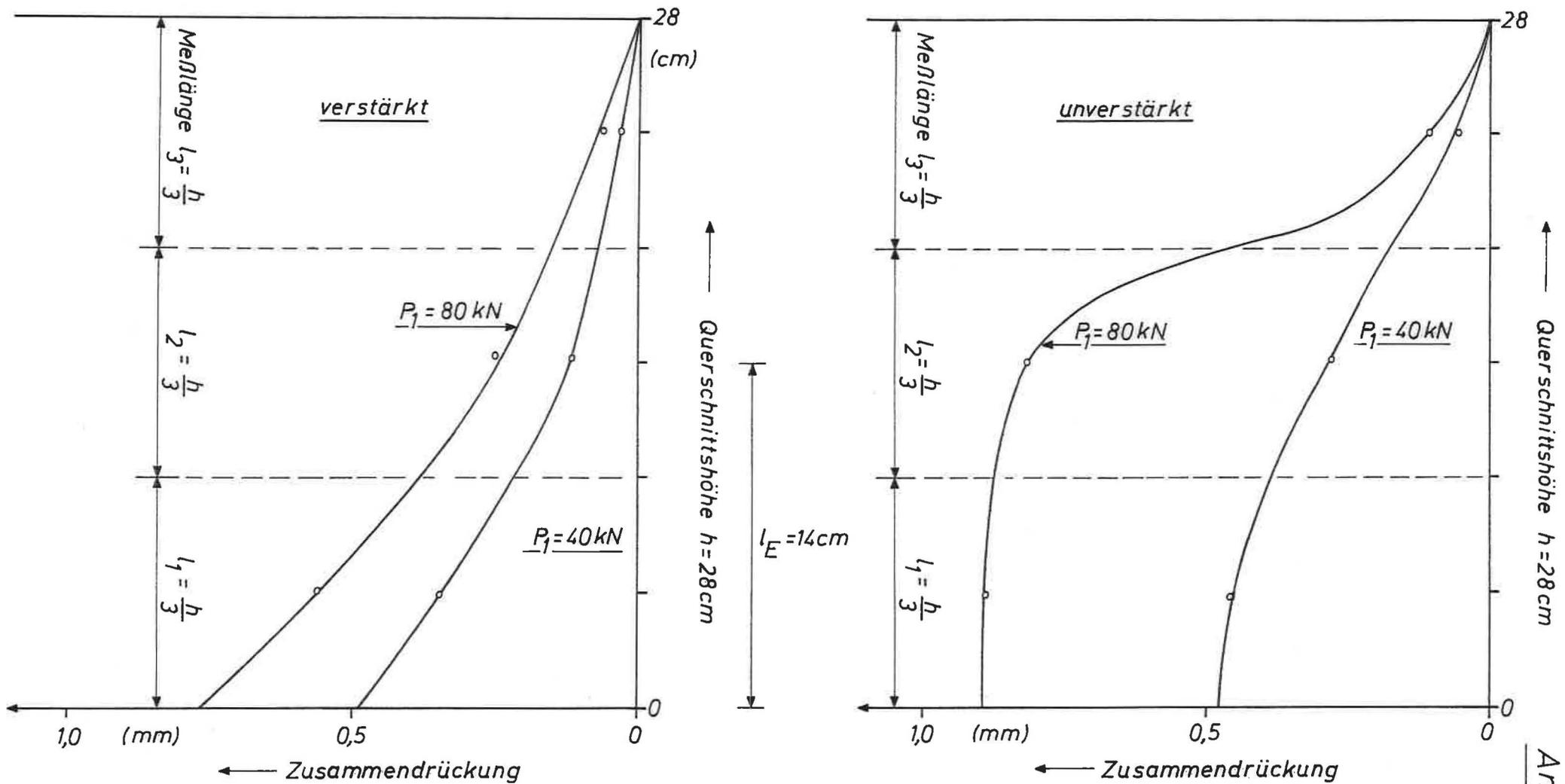


Bild 14: Verlauf der Zusammendrückungen über die Trägerhöhe am verstärkten und unverstärkten Auflager für die 2 Laststufen $P = 40 \text{ kN}$ ($\sigma_{D\perp} = 2,0 \text{ N/mm}^2$) und $P = 80 \text{ kN}$ ($\sigma_{D\perp} = 4,0 \text{ N/mm}^2$) bei Versuch 1 und 2

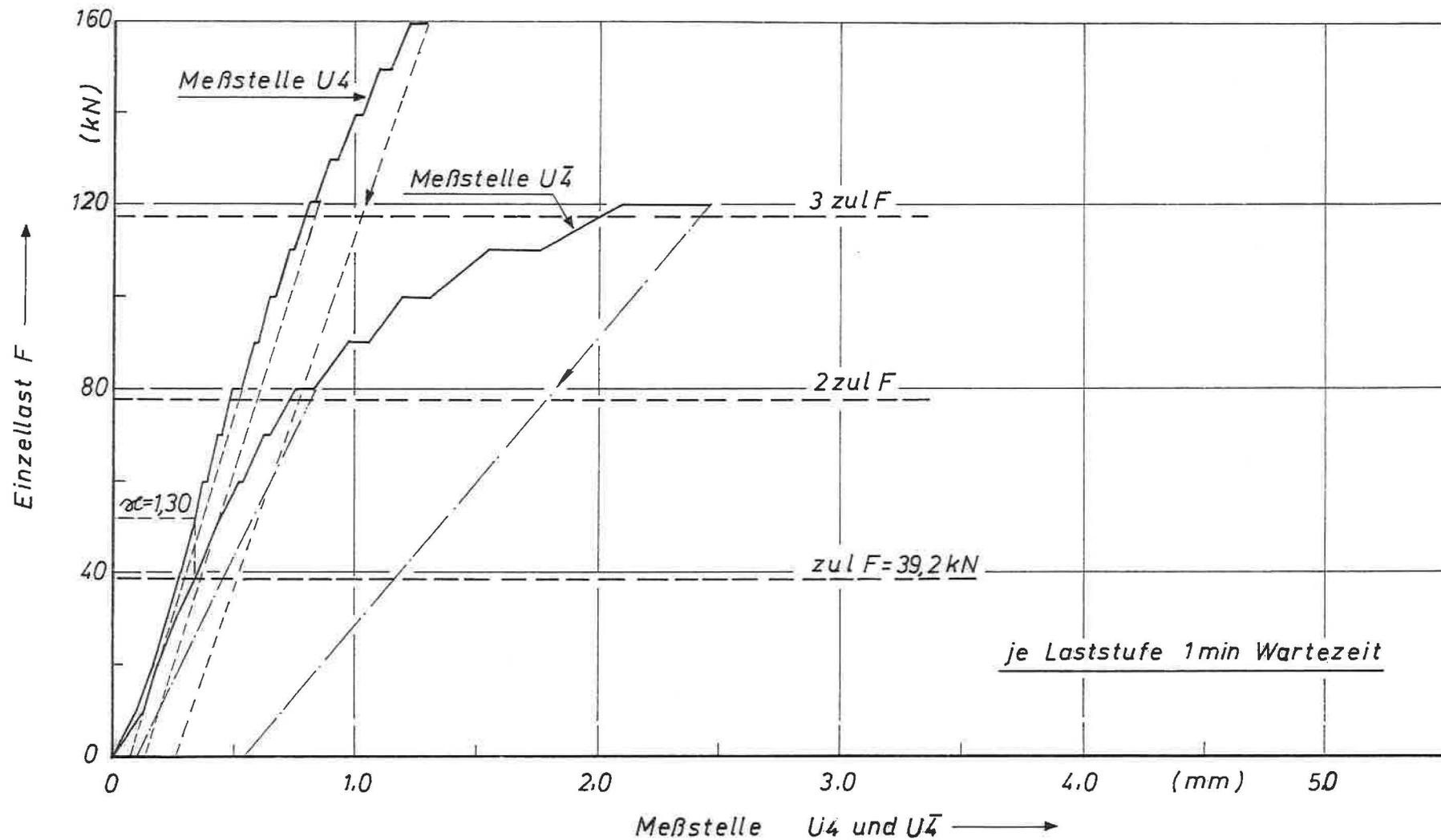


Bild 15: Versuch 2; Zusammendrückung des oberen Querschnittsdrittel an der Lasteinleitungsstelle in Abhängigkeit von der Einzellast F

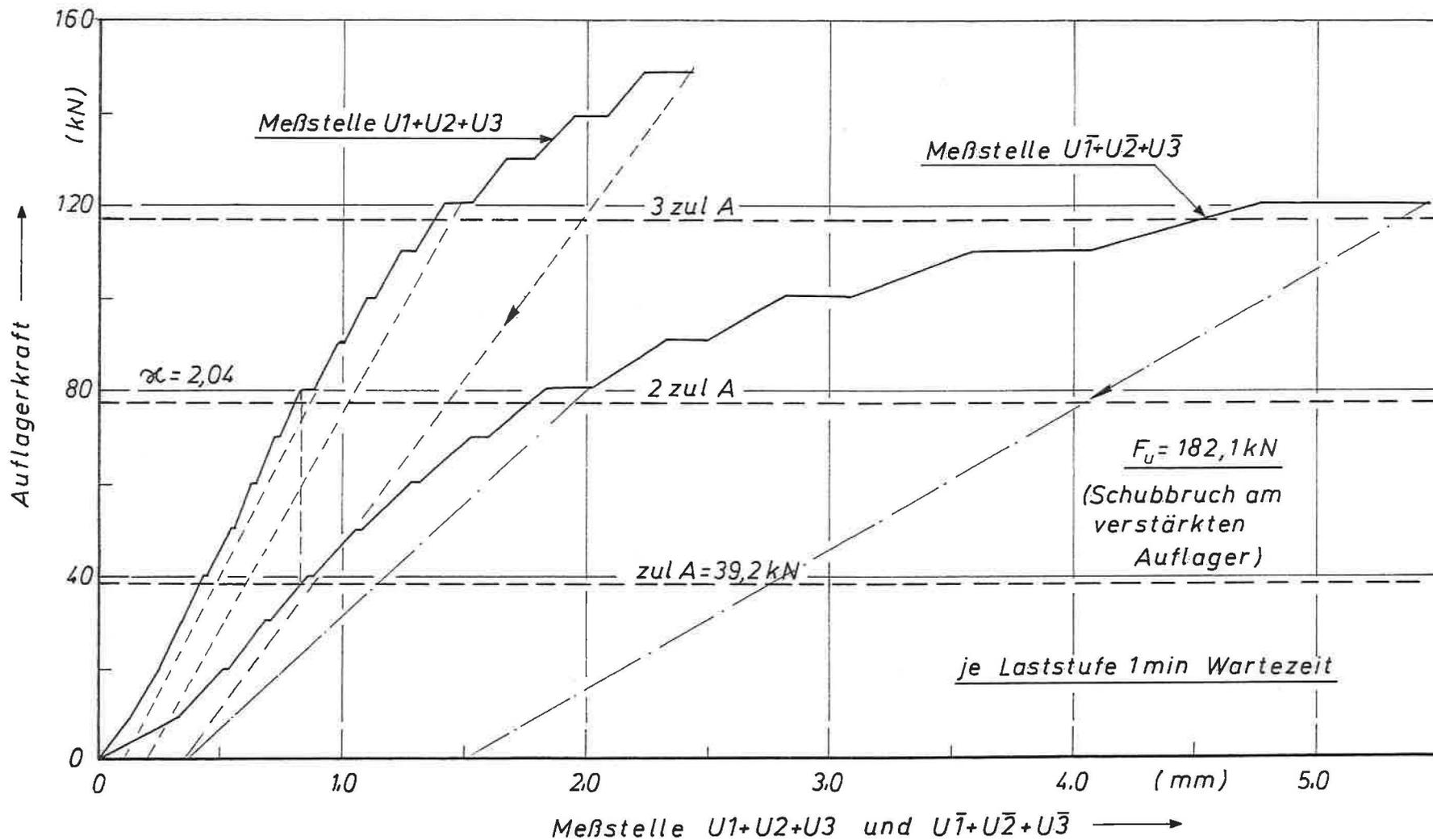


Bild 16: Versuch 2; Zusammendrückung am Auflager in Abhängigkeit von der Auflagerkraft

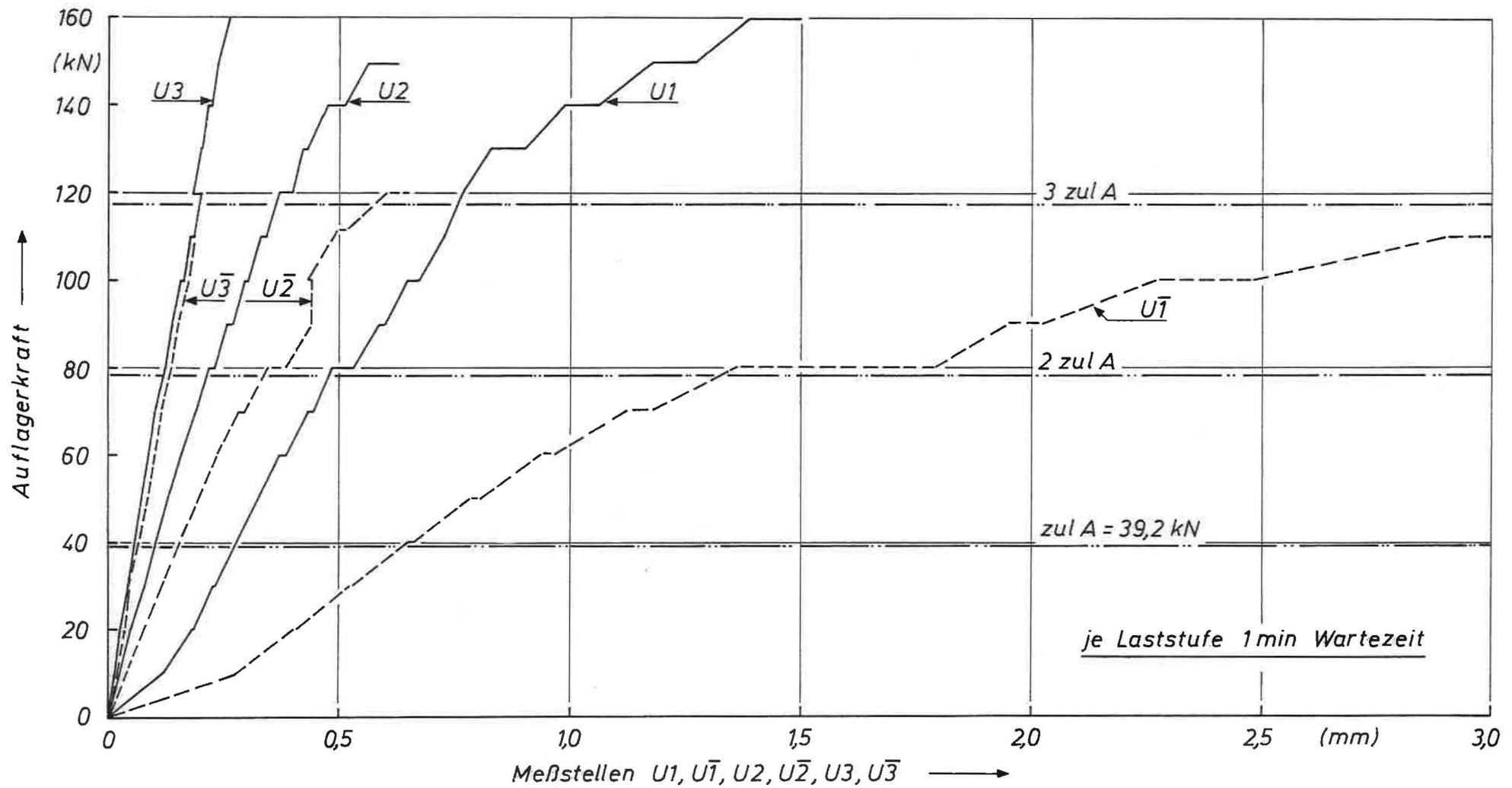


Bild 17: Versuch 2; Zusammendrückungen des unteren, mittleren und oberen Querschnittsdrittel in Abhängigkeit von der Auflagerkraft

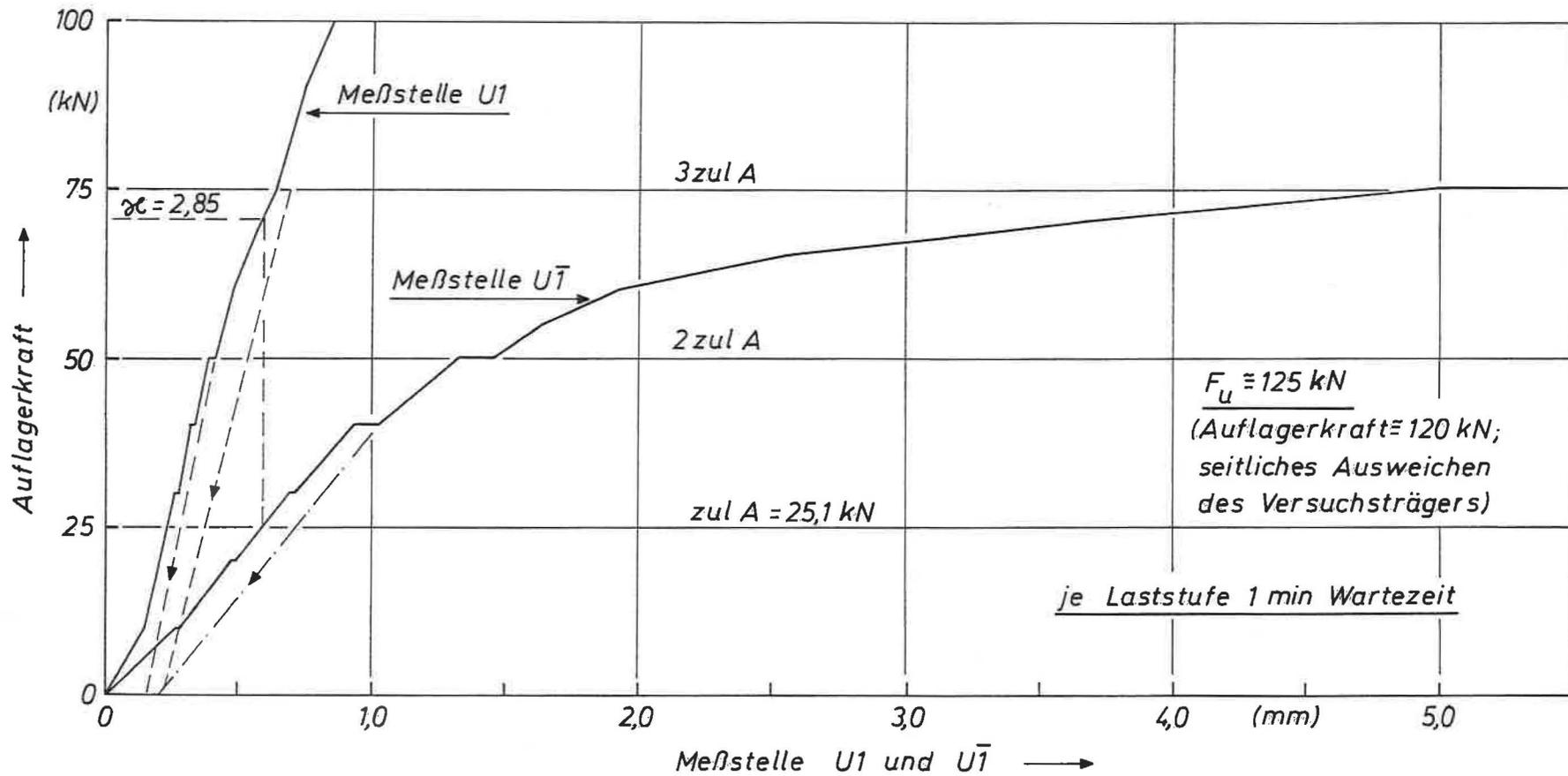


Bild 18: Versuch 3; Zusammendrückung des unteren Querschnittsdrittels

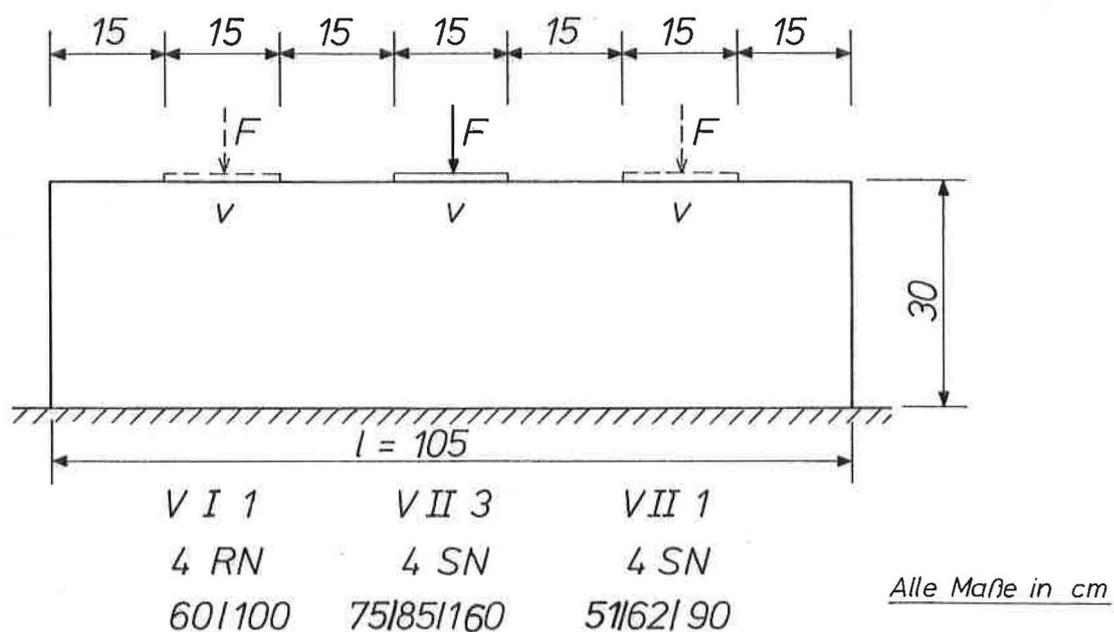


Bild 19a:

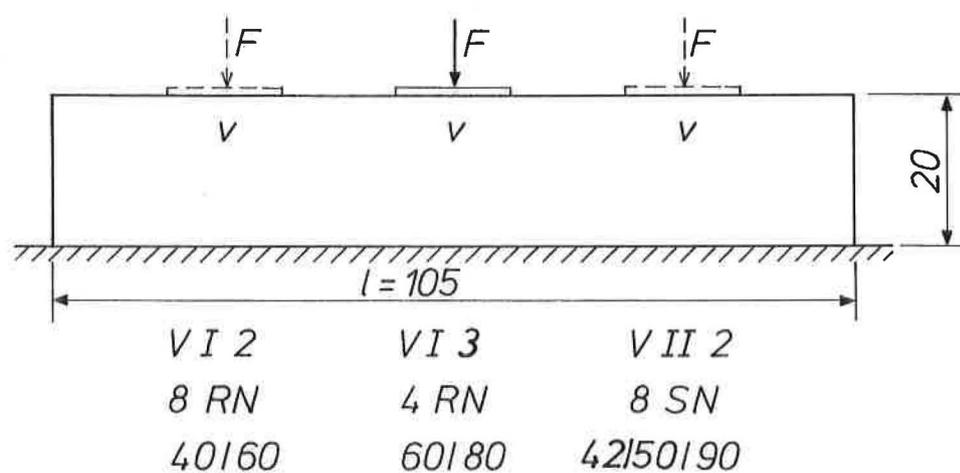


Bild 19b:

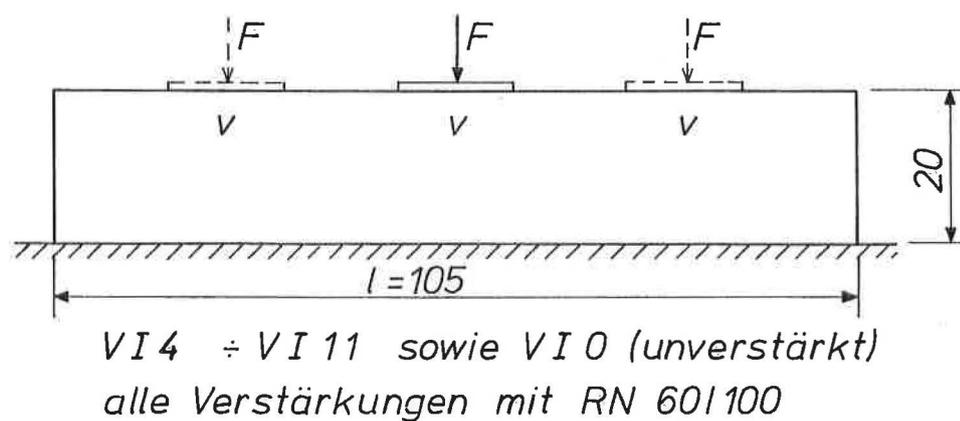
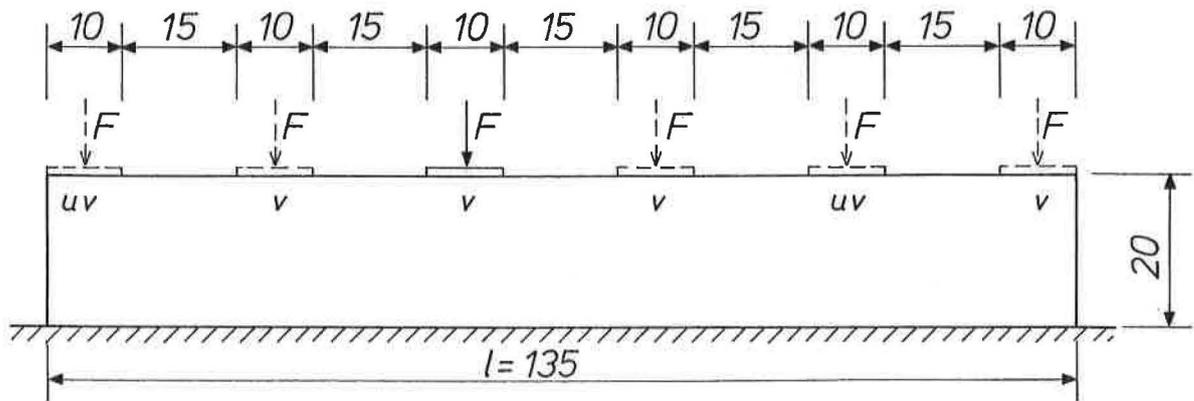


Bild 19c:

Bild 19: Versuche mit nagelverstärkten Lasteinleitungsstellen

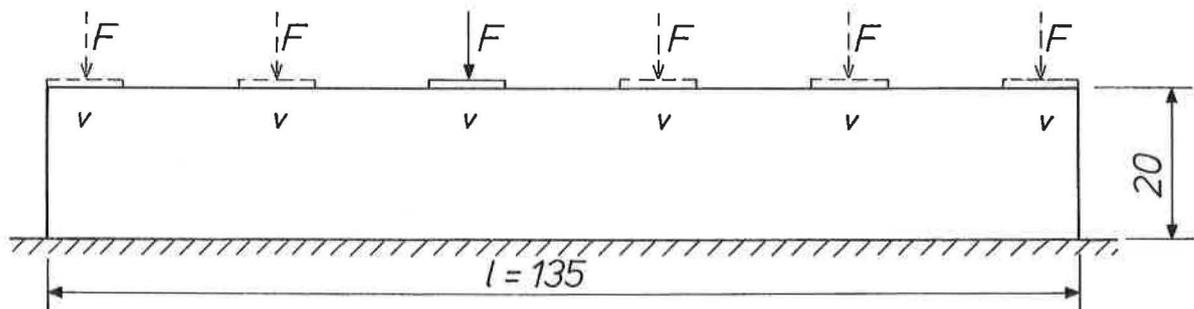
RN=Rillennägel SN=Schraubnägel v=verstärkte Lasteinleitungsstelle

Alle Maße in cm



VE 0	V III 1	V III 2	V III 3	V III 0	VE 1
	8 RN	16 RN	8 RN		16 RN
			versetzt		versetzt

Bild 20a:



VE 2	V III 7	V III 6	V III 5	V III 4	VE 3
16 RN	20 RN	20 RN	16 RN	16 RN	16 RN
	versetzt		versetzt		versetzt

Bild 20b:

alle Verstärkungen mit RN 40/60
 v = verstärkte Lasteinleitungsstelle
 uv = unverstärkte Lasteinleitungsstelle

Bild 20: Nagelverstärkte Lasteinleitungsstellen
 mit Rillennägel 40/60

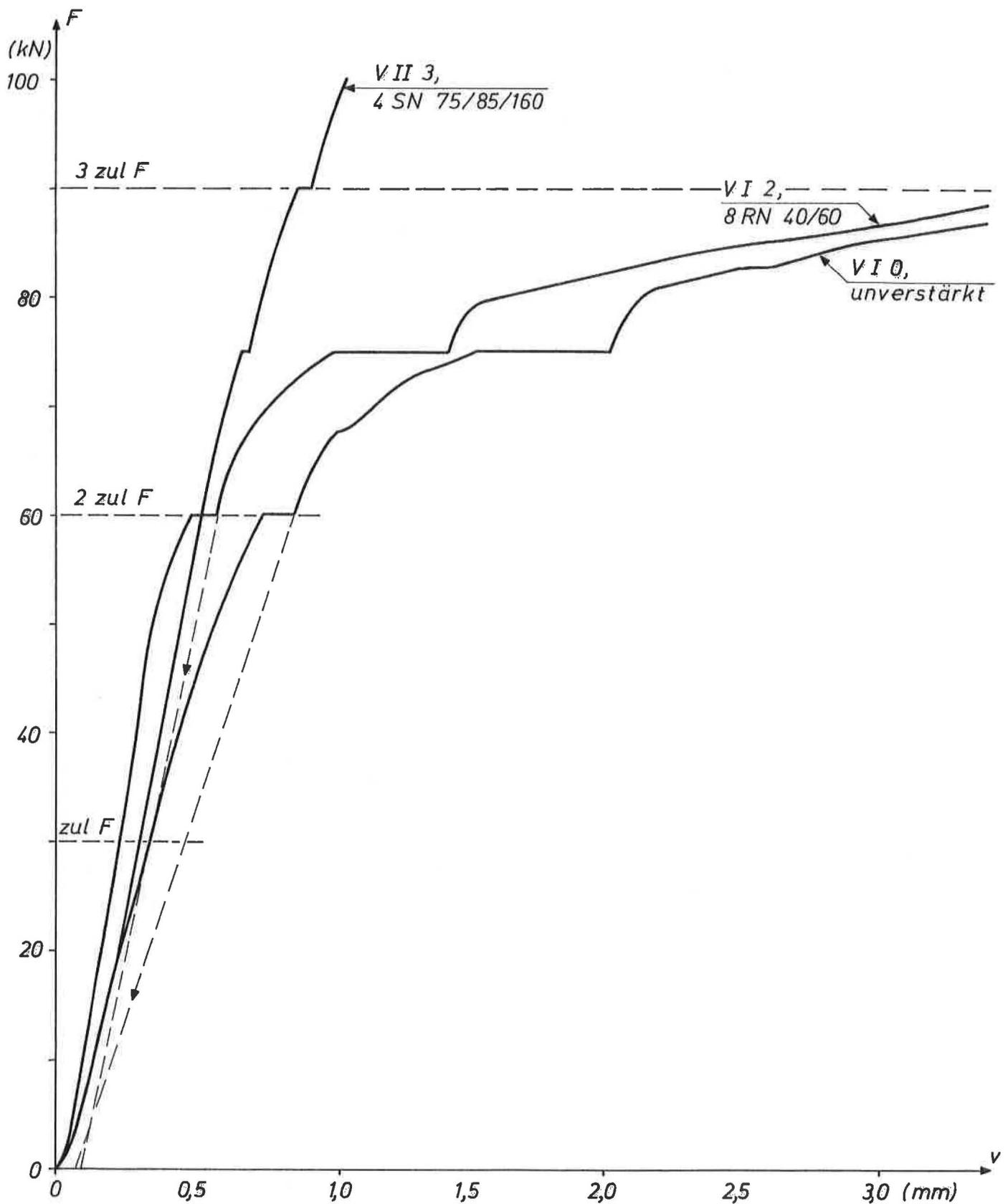
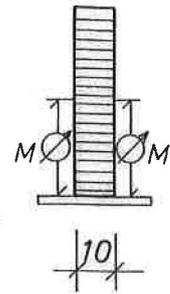
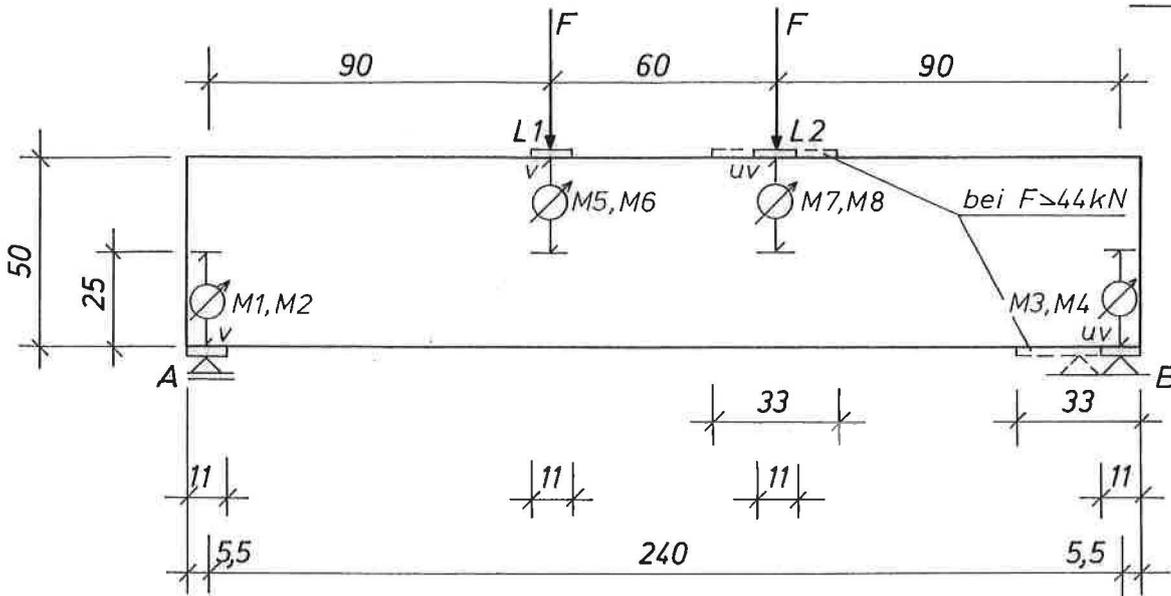


Bild 21: Last-Zusammendrückungslinien bei Verstärkung mit Sondernägeln.

Anlage 21

M 1:20

Alle Maße in cm



v = verstärkt
uv = unverstärkt
M = Wegaufnehmer
W 20

Verstärkung v:

Auflager

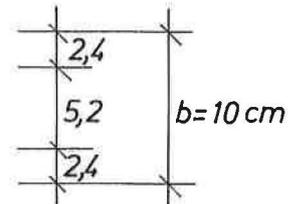
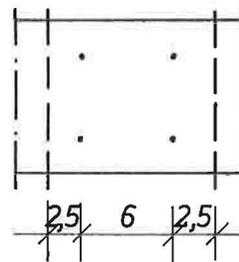
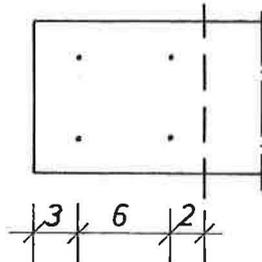
Mitte

M 1:5

Versuch Nr.

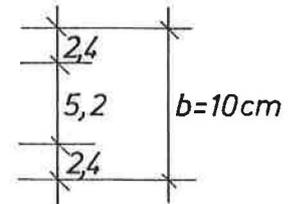
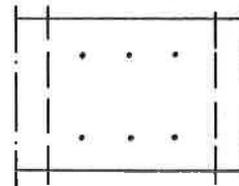
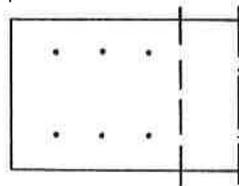
1a

n=4



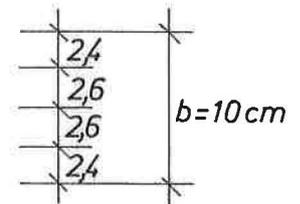
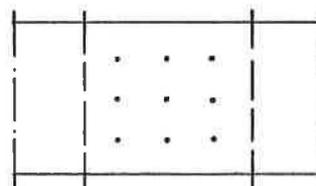
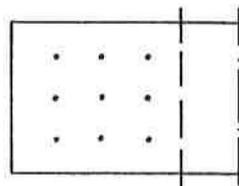
2a

n=6



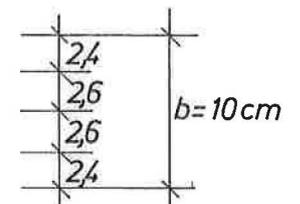
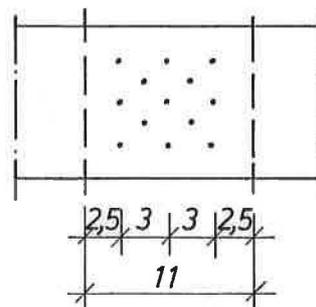
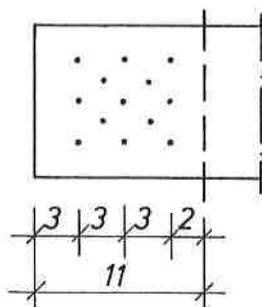
3a

n=9



4a

n=13



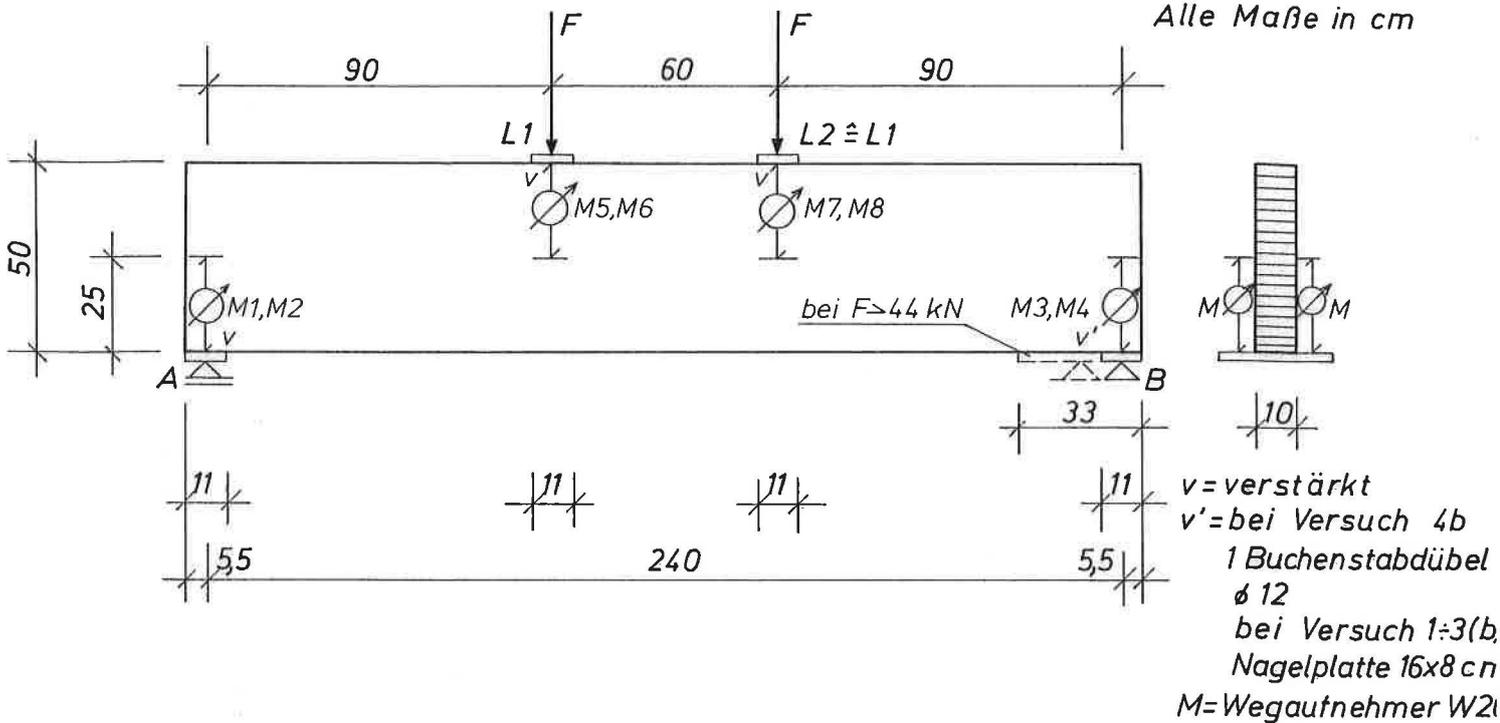
Alle Maße in cm

Bild 22: Versuchsreihe 1; eingeleimte Buchenstabdübel $\phi 12$ ($l_E = 5 \cdot d$). Versuchsanordnung und verstärkte Lasteinleitungsflächen für Versuche 1÷4 (a).

Anlage 22

M 1: 20

Alle Maße in cm



Verstärkung v :

Auflager

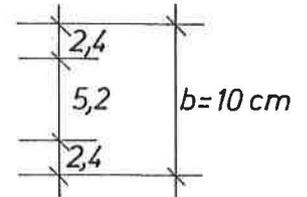
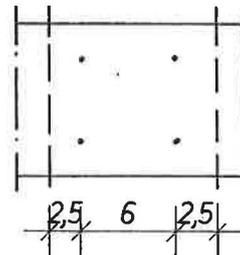
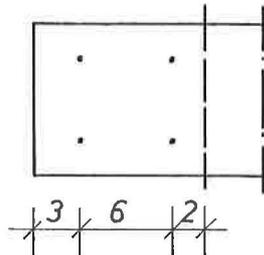
Mitte

M 1:5

Versuch Nr:

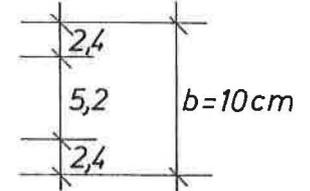
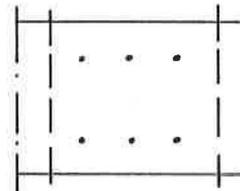
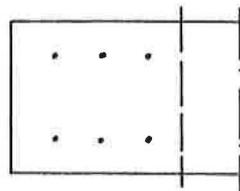
1b

$n=4$



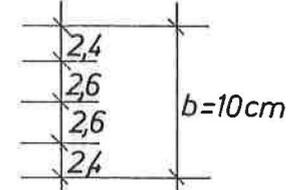
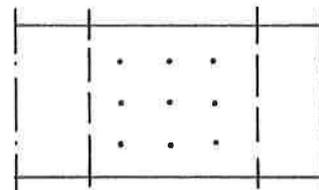
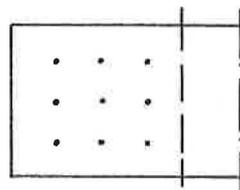
2b

$n=6$



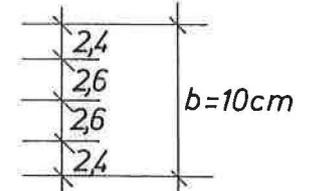
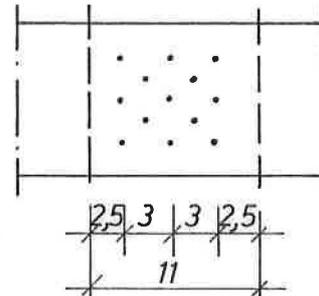
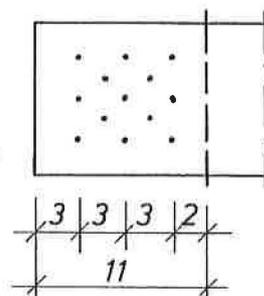
3b

$n=9$



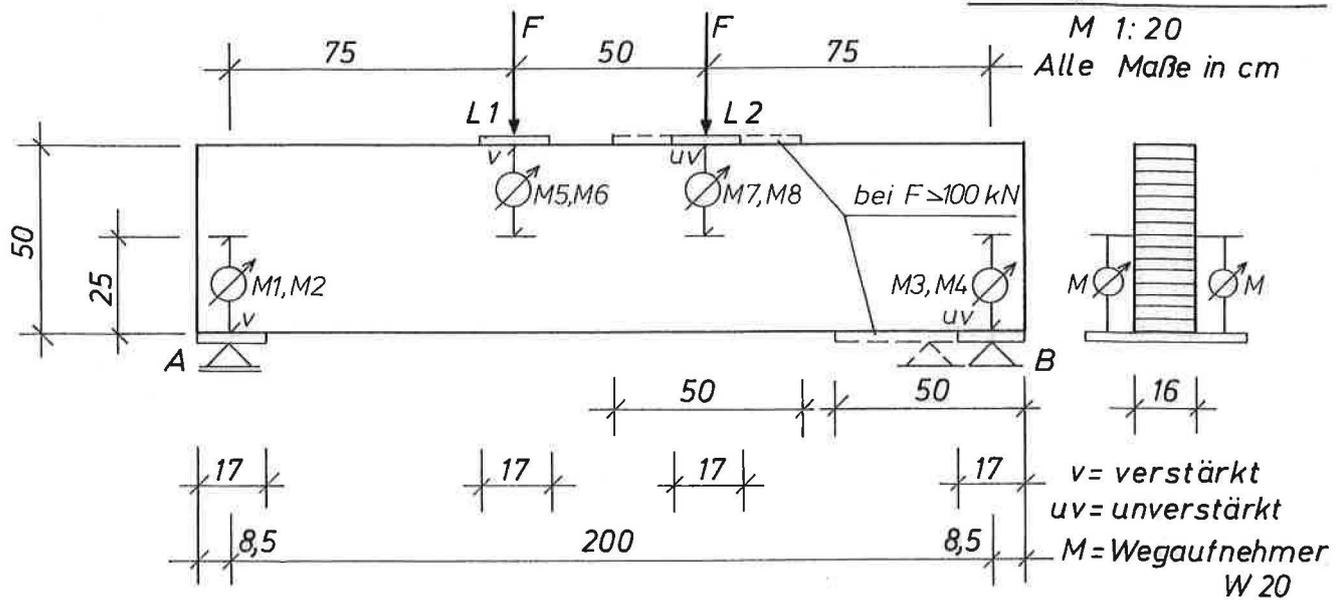
4b

$n=13$



Alle Maße in cm

Bild 23: Versuchsreihe 1; eingeleimte Buchenstabdübel $\phi 12$ ($l_E = 5 \cdot d$). Versuchsanordnung und verstärkte Lasteinleitungsflächen für Versuche 1 ÷ 4 (b).



Verstärkung v:

Auflager

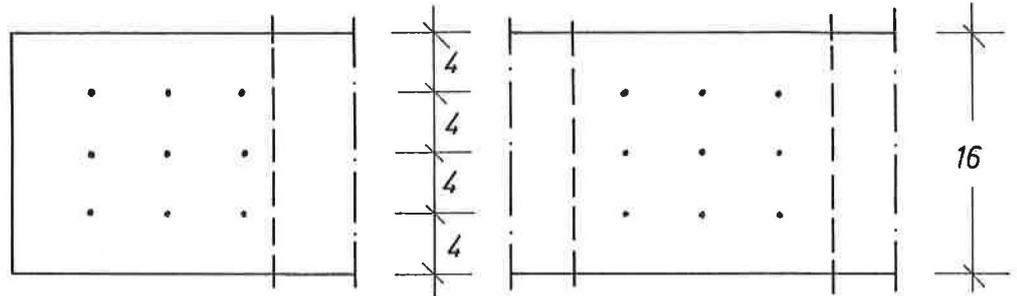
Mitte

M 1:5
Alle Maße in cm

Versuch Nr.

5a

($\phi 20$)



6a

($\phi 25$)

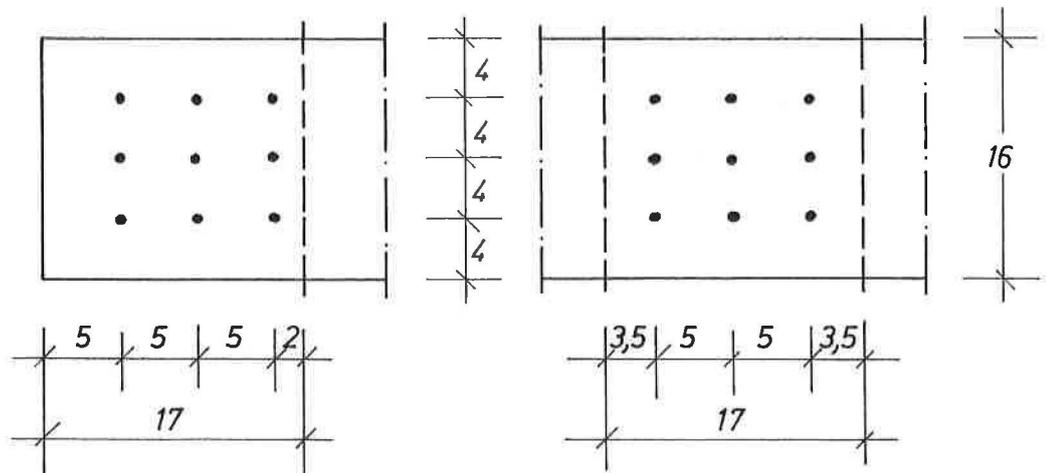
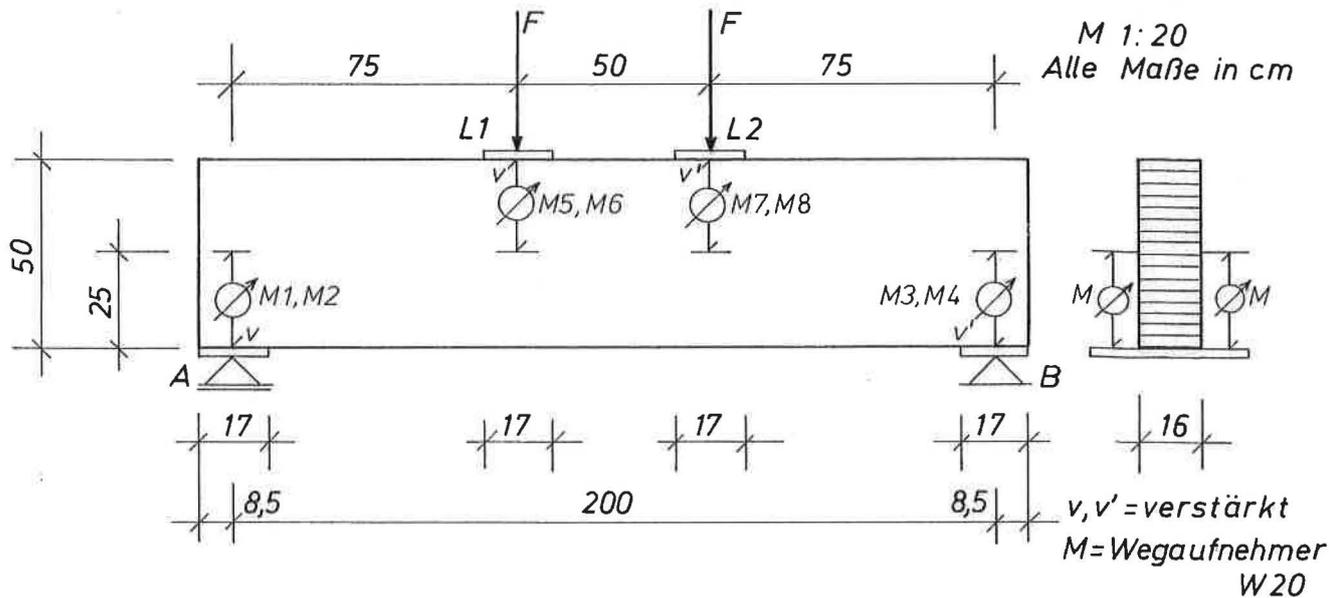


Bild 24: Versuchsreihe 2; eingeleimte Buchenstabdübel ($l_E = 5 \cdot d$) als Verstärkung für die Last-einleitungsflächen für Versuche 5a und 6a.



Verstärkung v:

Auflager

Mitte:

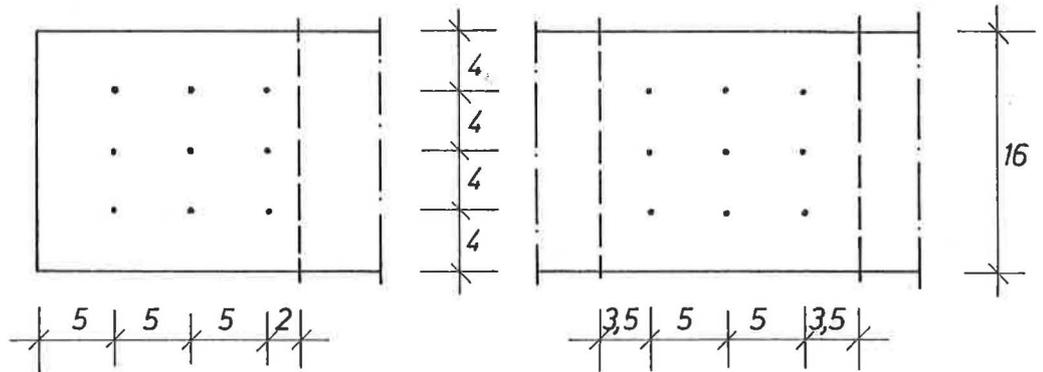
M 1:5

Alle Maße in cm

Versuch Nr.:

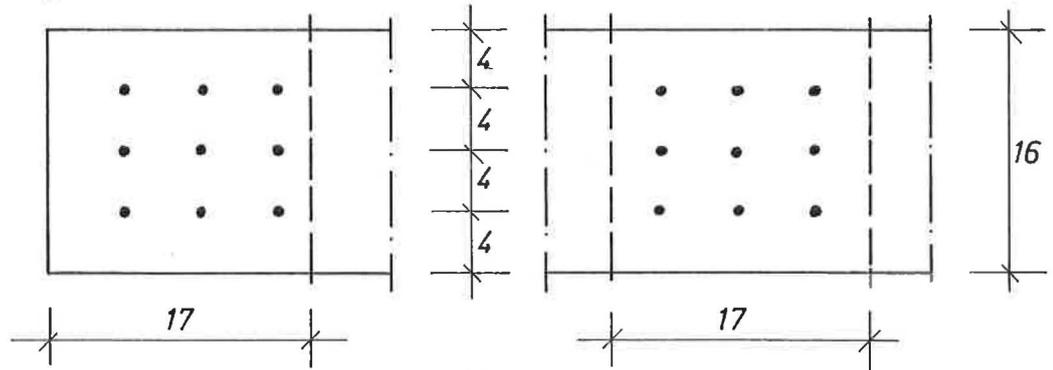
5b

($\phi 20$)



6b

($\phi 25$)



Verstärkung v':

Versuch Nr.:

5b, 6b

($\phi 12$)

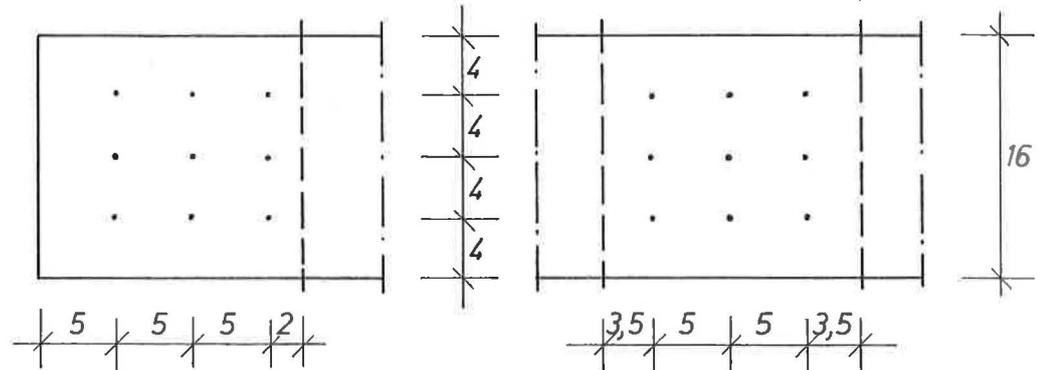
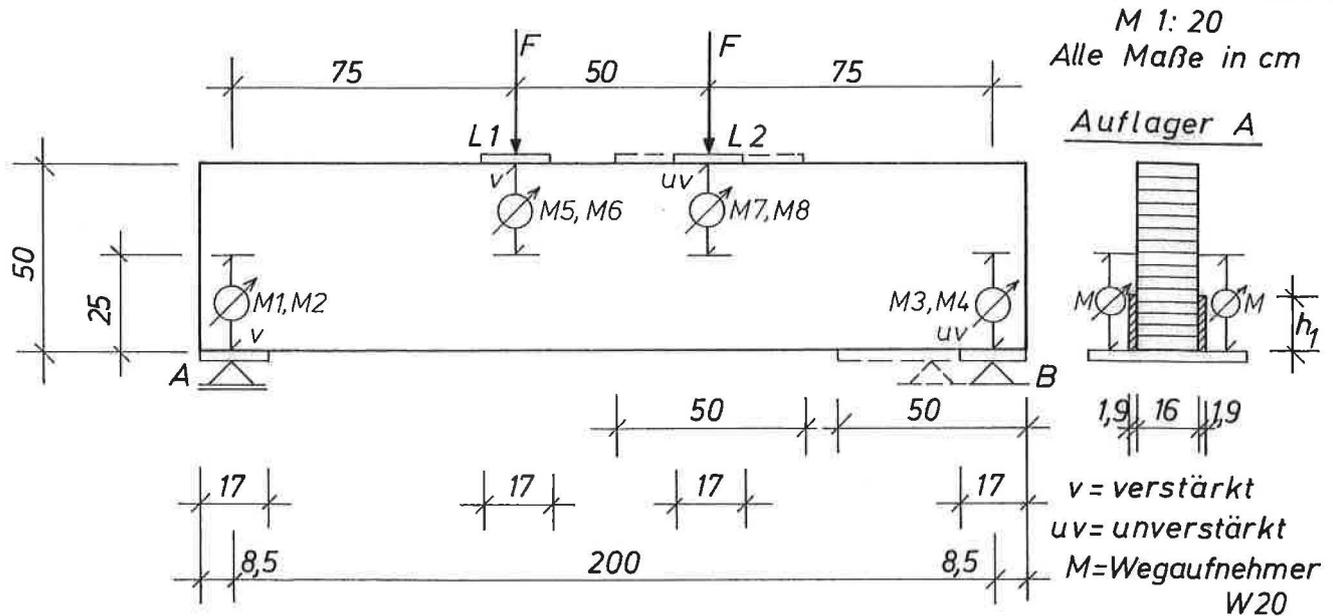


Bild 25: Versuchsreihe 2; eingeleimte Buchenstabdübel $\phi 12$, $\phi 20$ und $\phi 25$ ($l_E = 5 \cdot d$) als Verstärkung für die Lasteinleitungsflächen für Versuche 5b u. 6b



Verstärkung v:

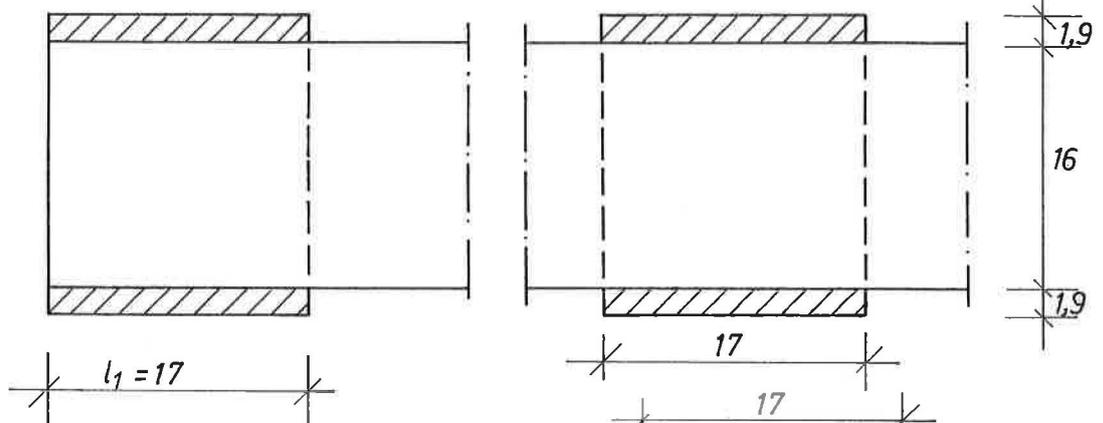
Auflager

Mitte

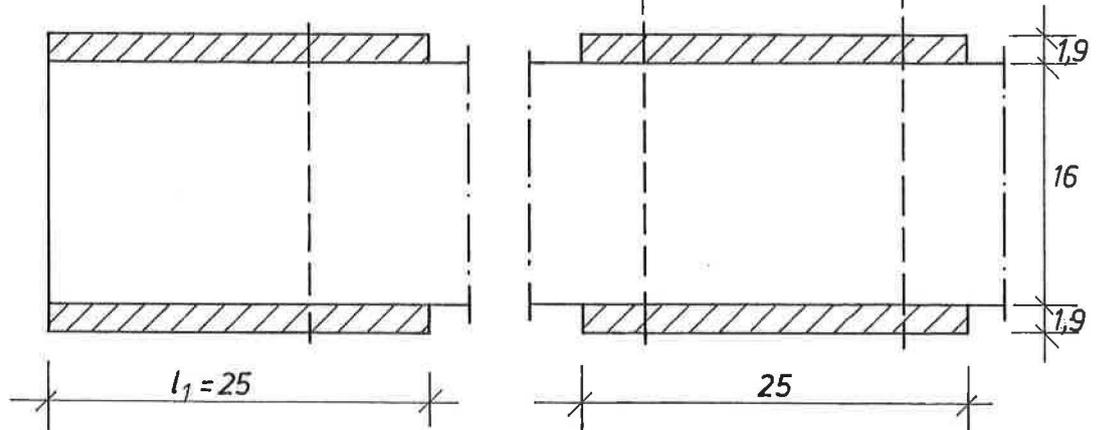
M 1:5
Alle Maße in cm

Versuch Nr.

7a



7b



Höhe der aufgeleimten Sperrholzlaschen $h_1 = 15$ cm

Bild 26: Aufgeleimte Sperrholzplatten BFU-BU 100 als Verstärkung für die Lasteinleitungsflächen für Versuche 7a und 7b.

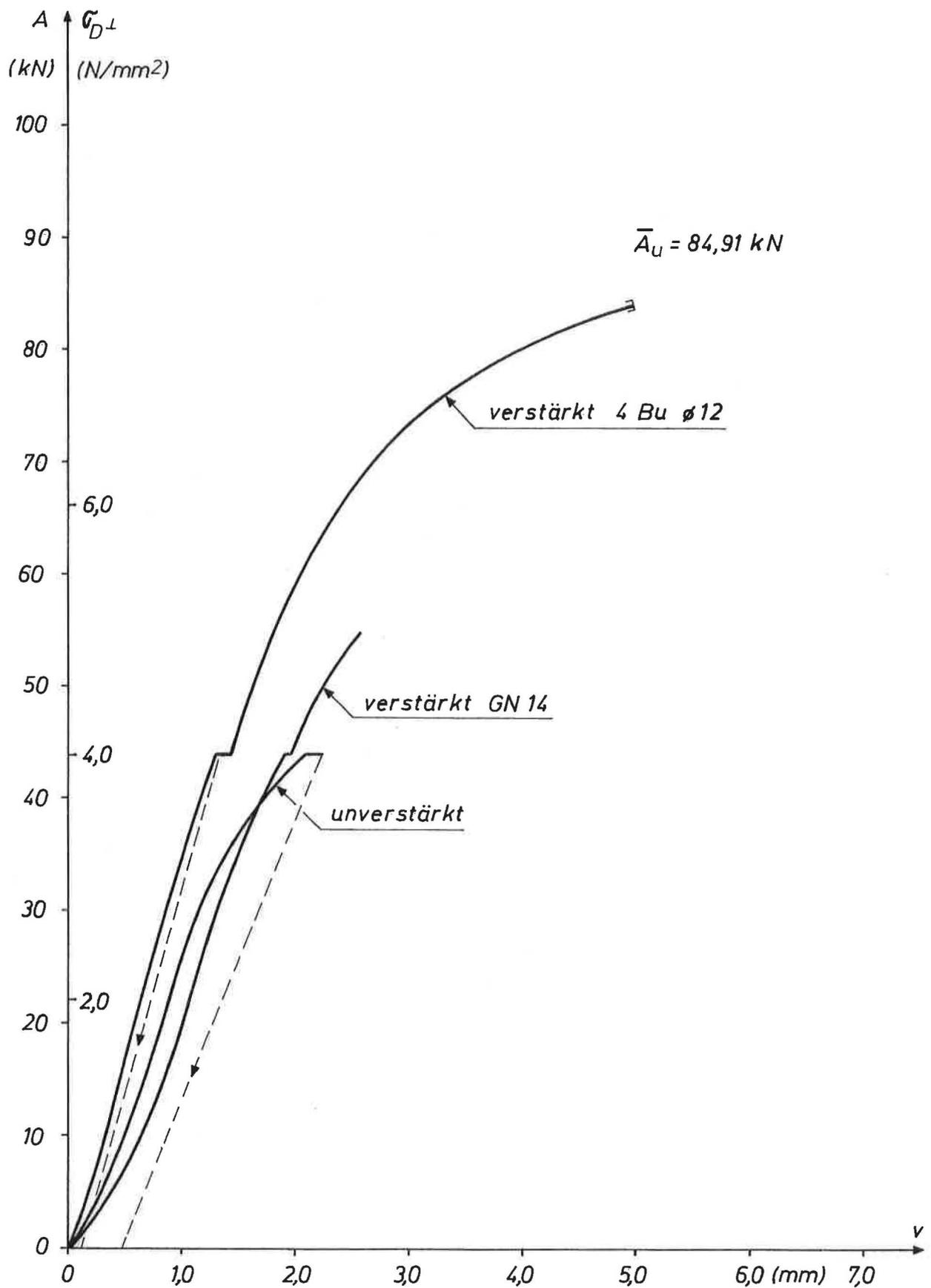


Bild 27: Last-Zusammendrückungslinien am Auflager für Versuche 1a und 1b.
(A =Auflagerkraft; Meßlänge = $h/2$)

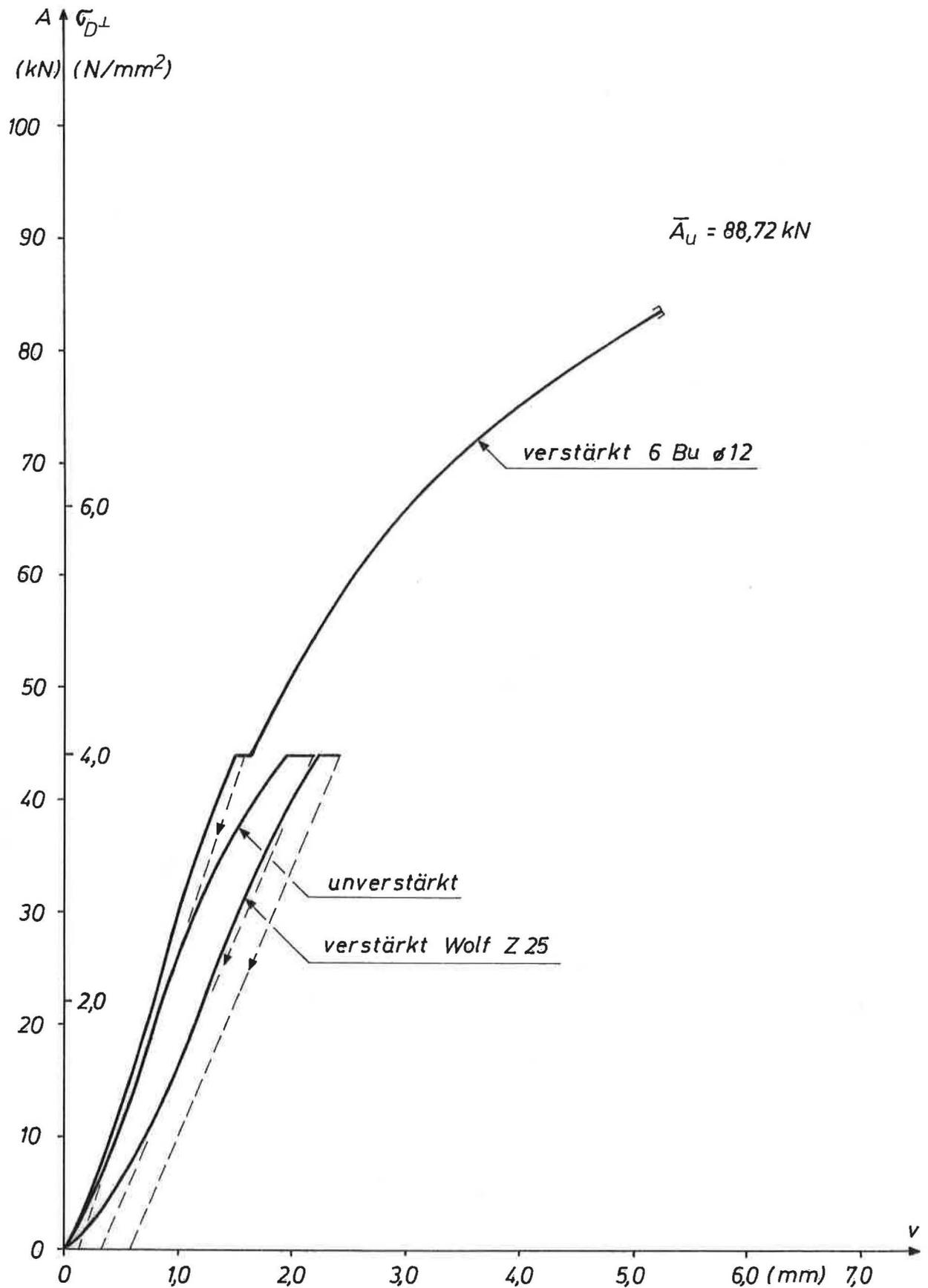


Bild 28: Last-Zusammendrückungslinien am Auflager für Versuche 2a und 2b. (A =Auflagerkraft; Meßlänge = $h/2$)

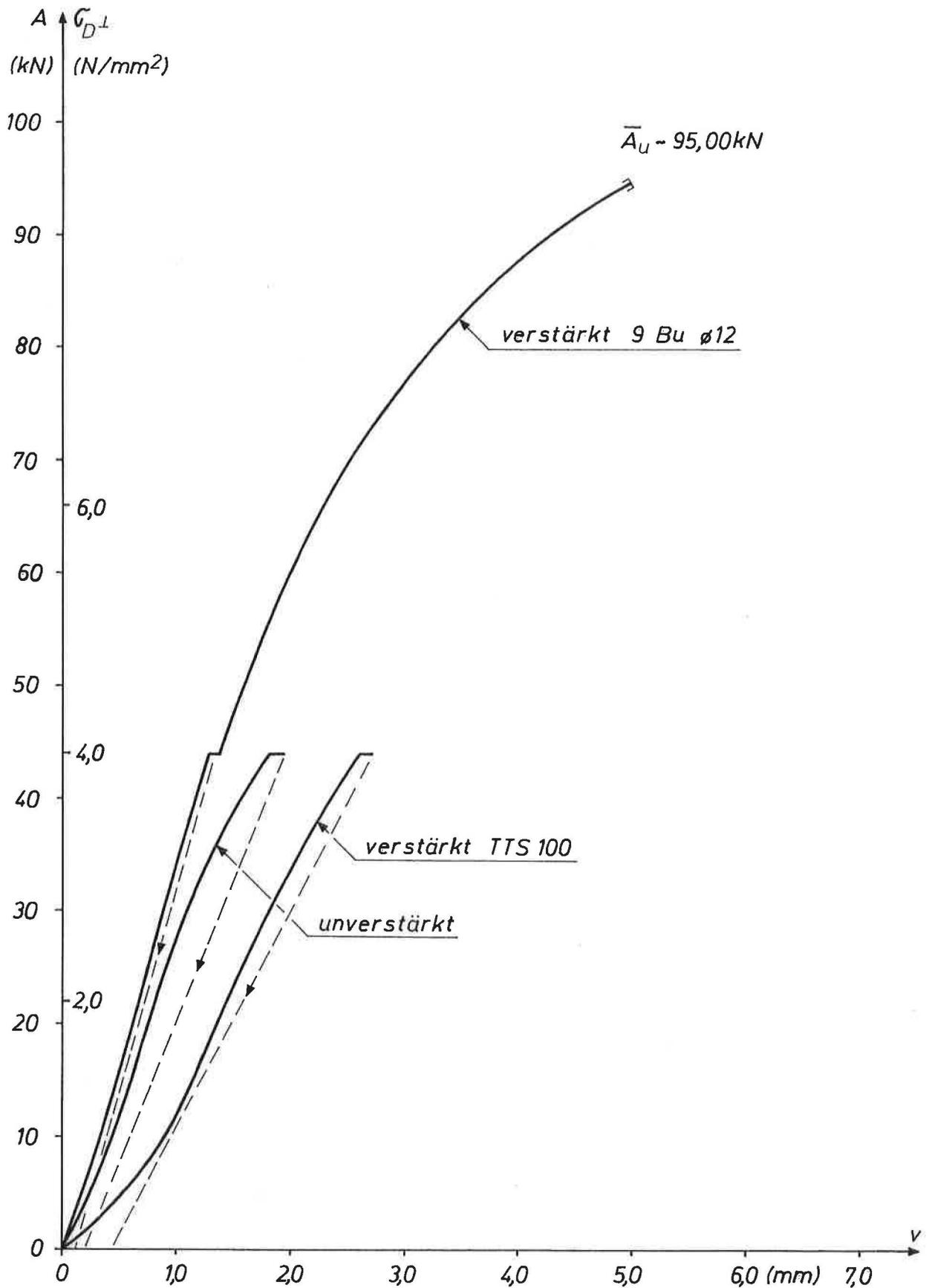


Bild 29: Last-Zusammendrückungslinien am Auflager für Versuche 3a und 3b. (A =Auflagerkraft; Meßlänge = $h/2$)

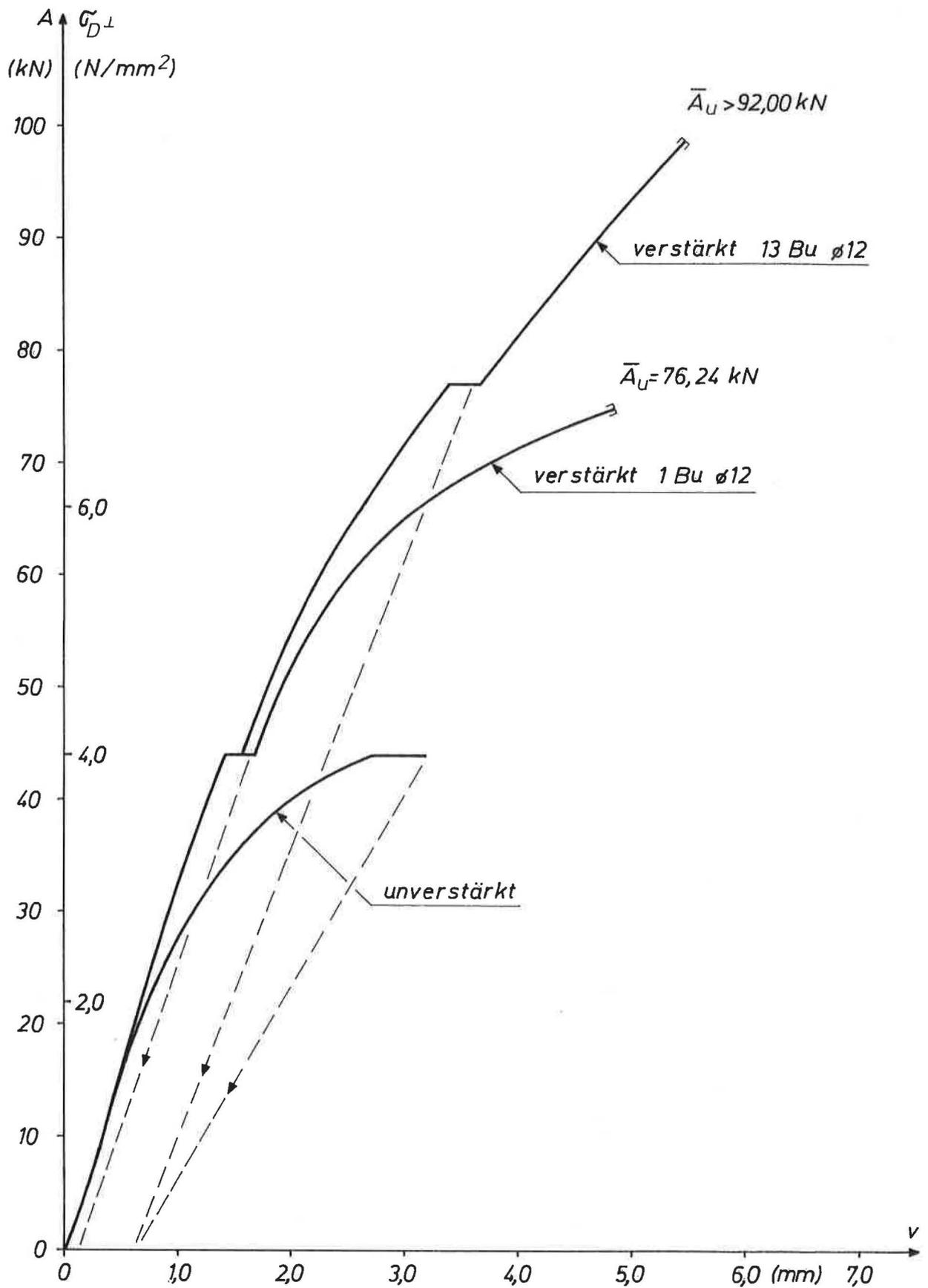


Bild 30: Last-Zusammendrückungslinien am Auflager für Versuche 4a und 4b. (A =Auflagerkraft; Meßlänge = $h/2$)

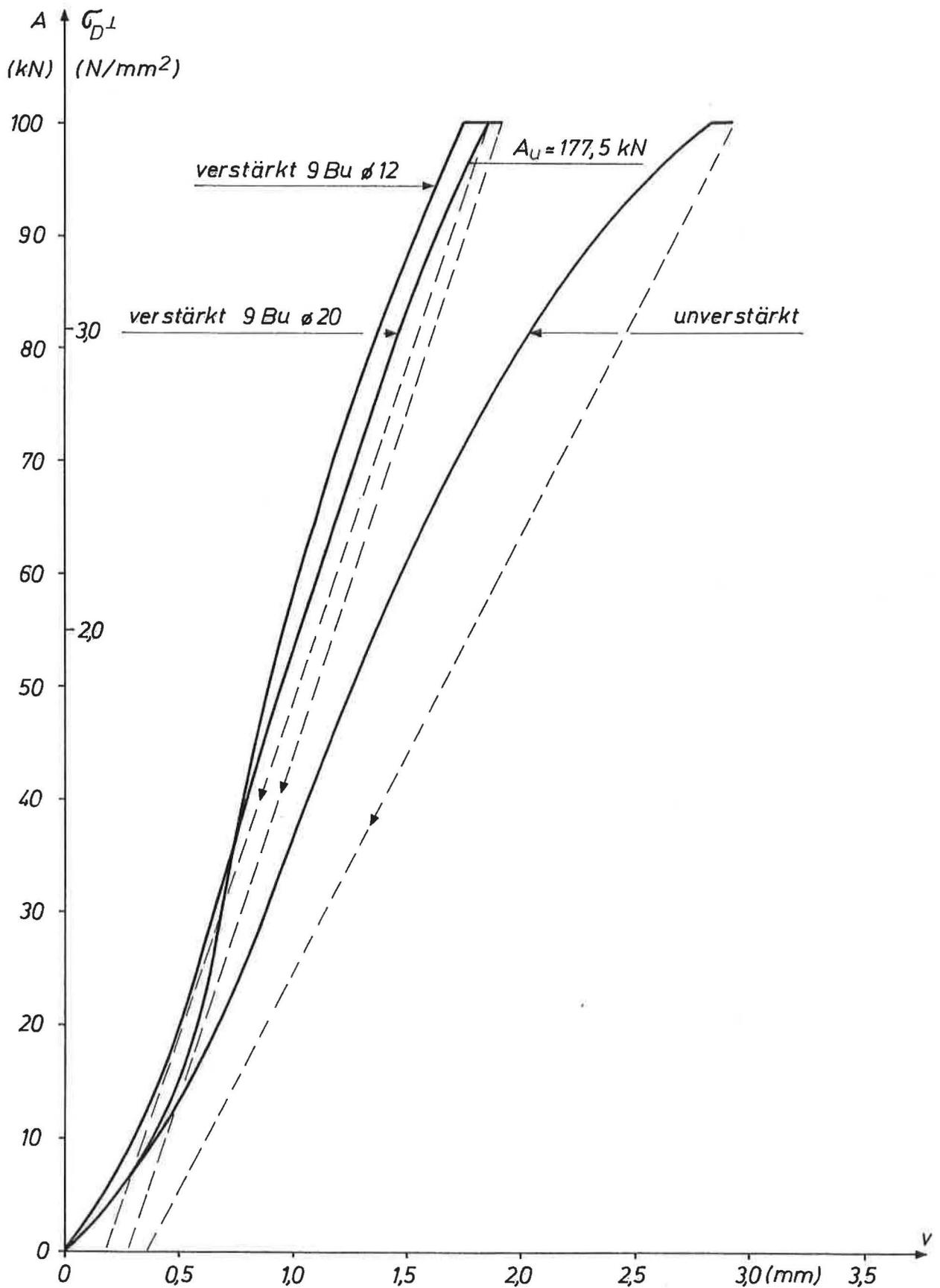


Bild 31: Last-Zusammendrückungslinien am Auflager für Versuche 5a und 5b. (A =Auflagerkraft; Meßlänge = $h/2$)

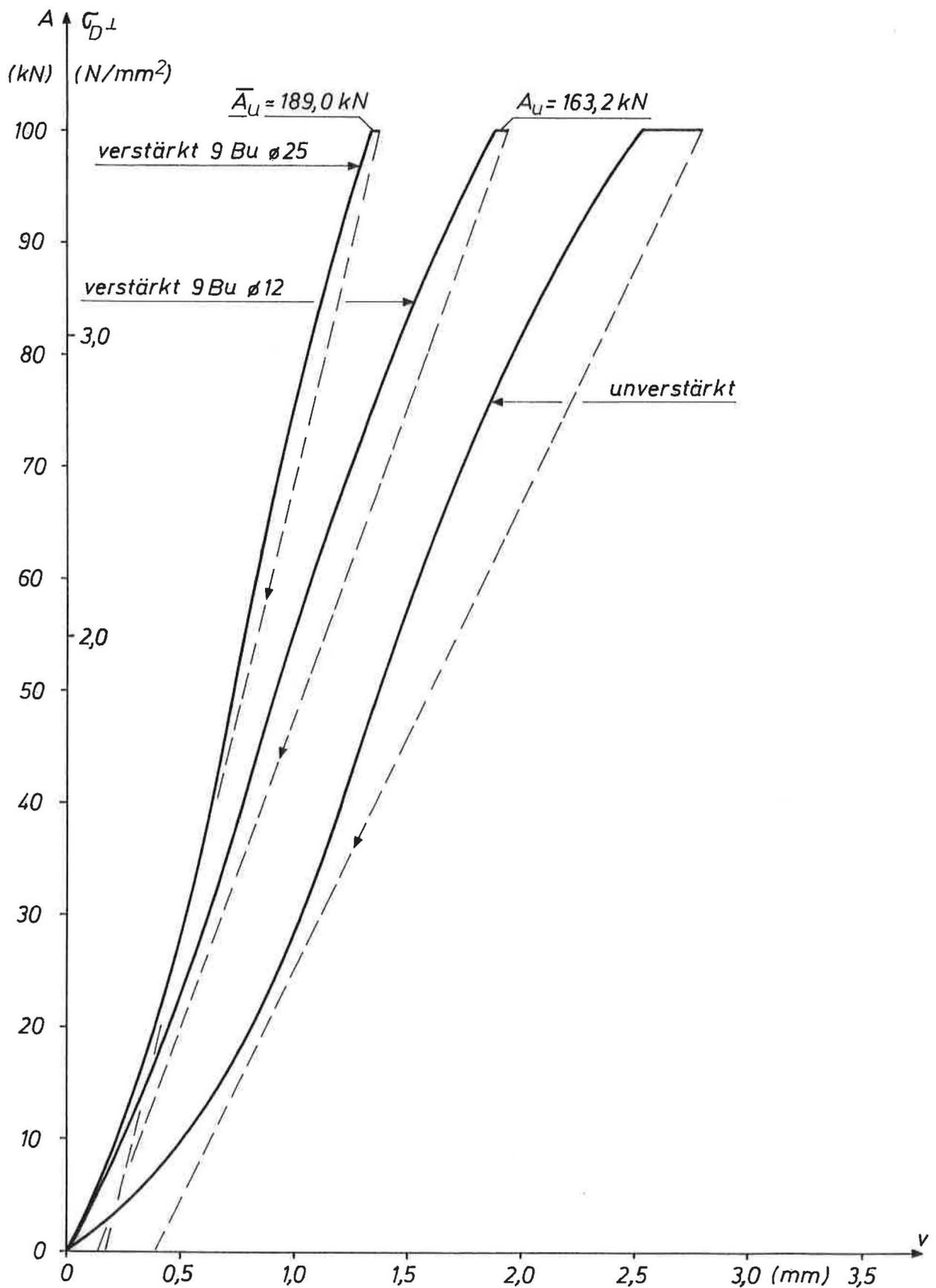


Bild 32: Last-Zusammendrückungslinien am Auflager für Versuche 6a und 6b. (A = Auflagerkraft; Meßlänge = $h/2$)

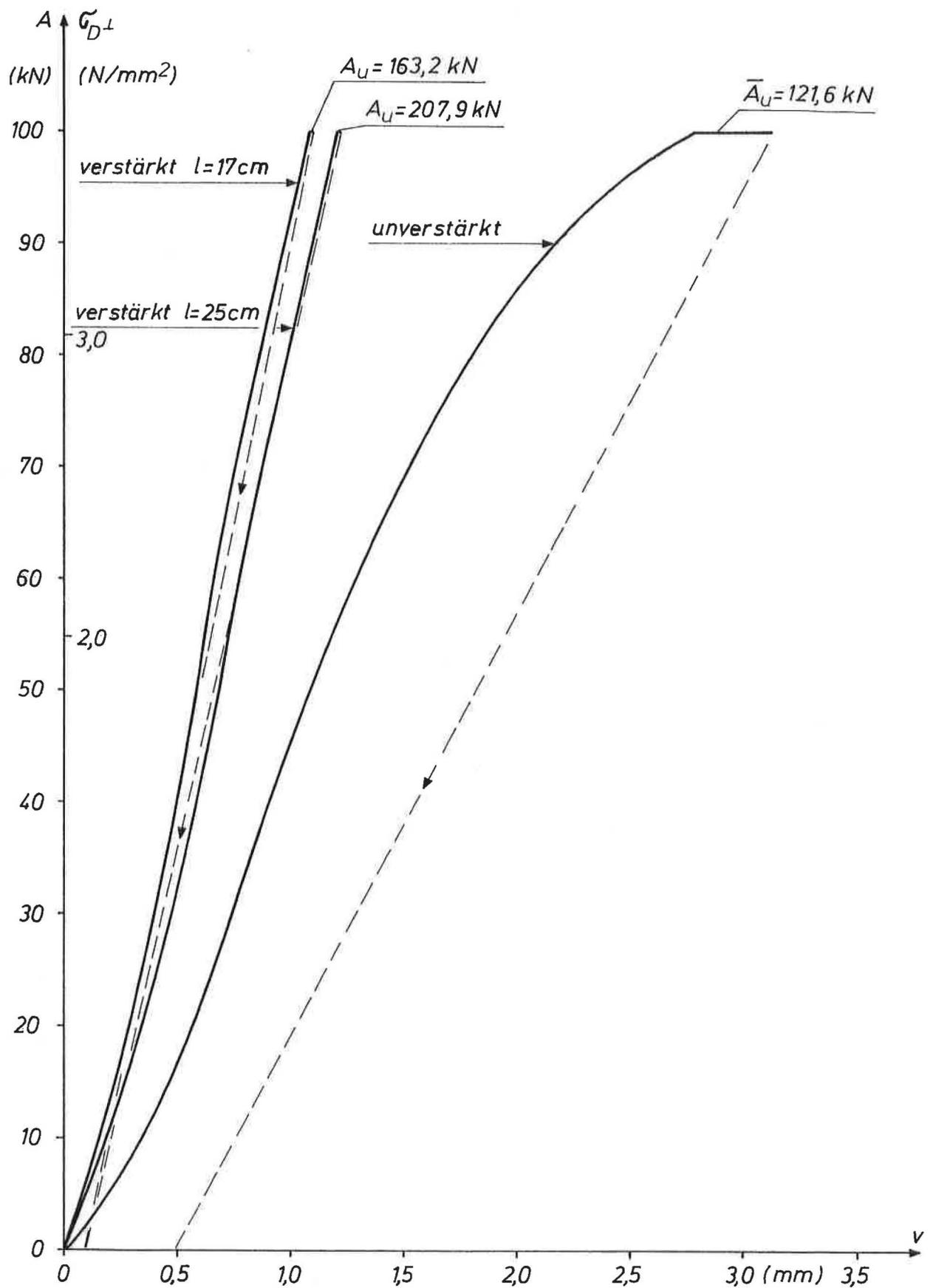


Bild 33: Last-Zusammendrückungslinien am Auflager für Versuche 7a und 7b. (A =Auflagerkraft; Meßlänge = $h/2$)

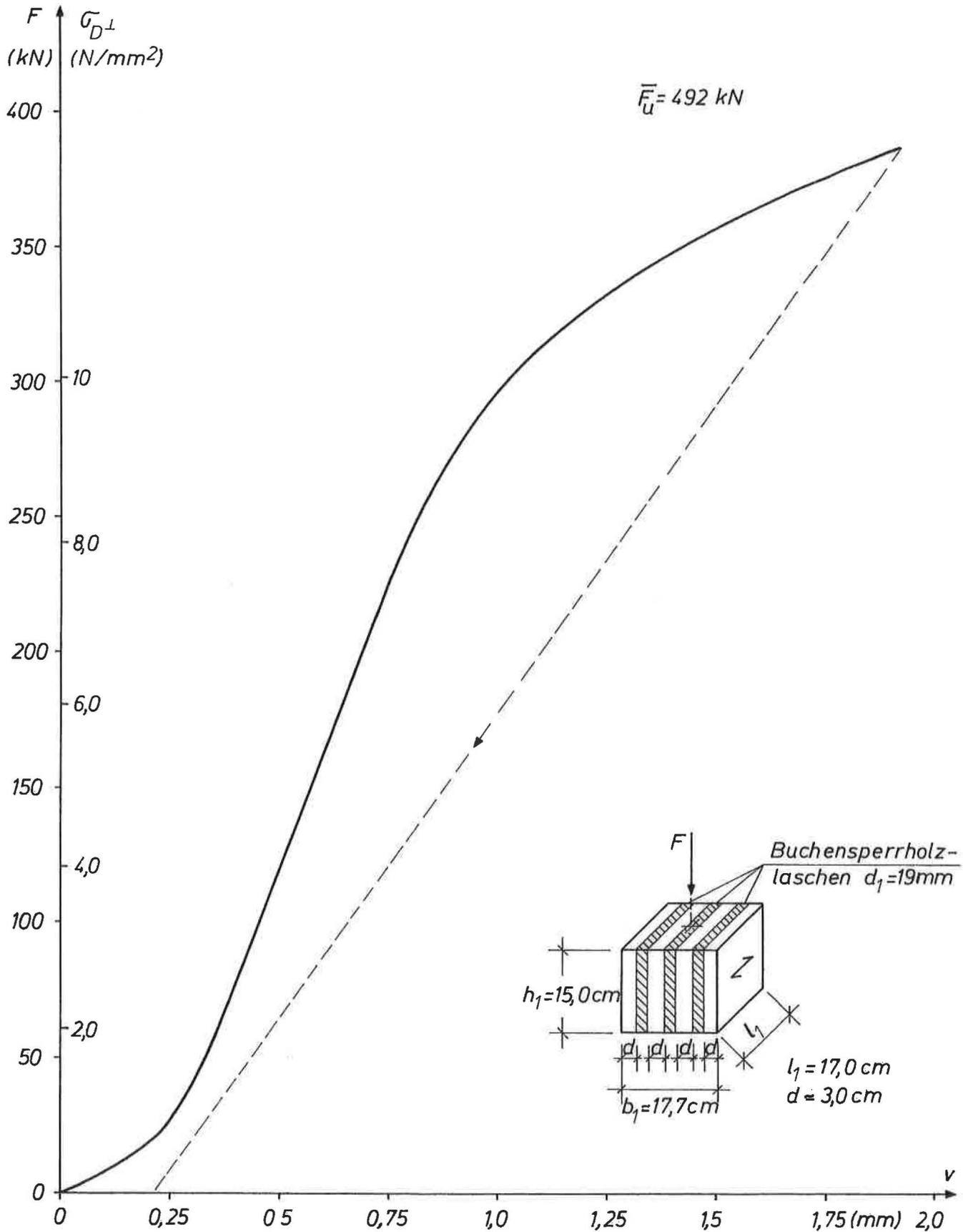


Bild 34: Last-Zusammendrückungskurve für Versuch 8. (Buchensperrholz in gleichen Abständen eingeleimt, Probekörper 8a, 8b und 8c)

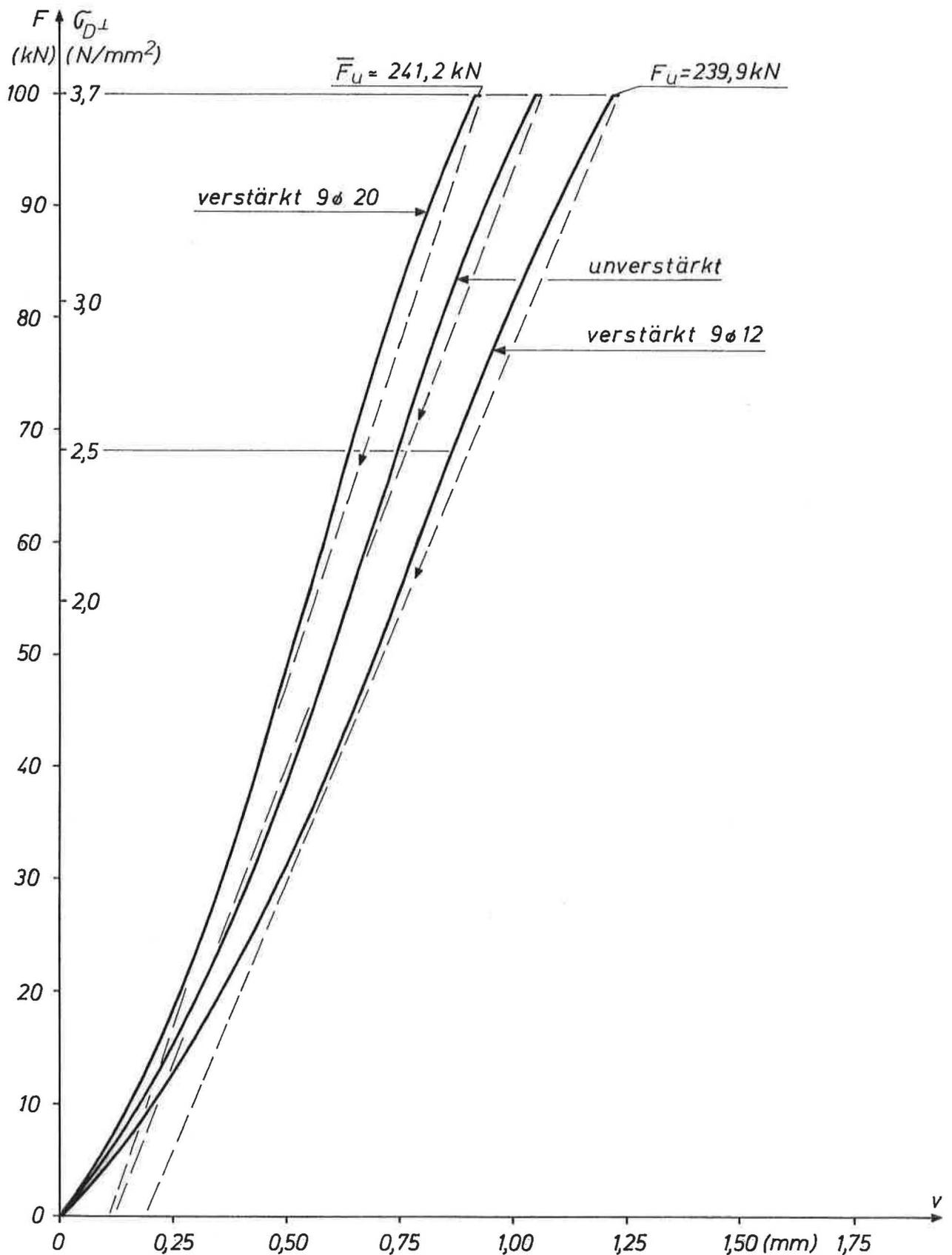


Bild 35: Last-Zusammendrückungslinien an den Lasteinleitungsstellen (Mitte) bei den Versuchen 5a und 5b. (Meßlänge = $h/2$)

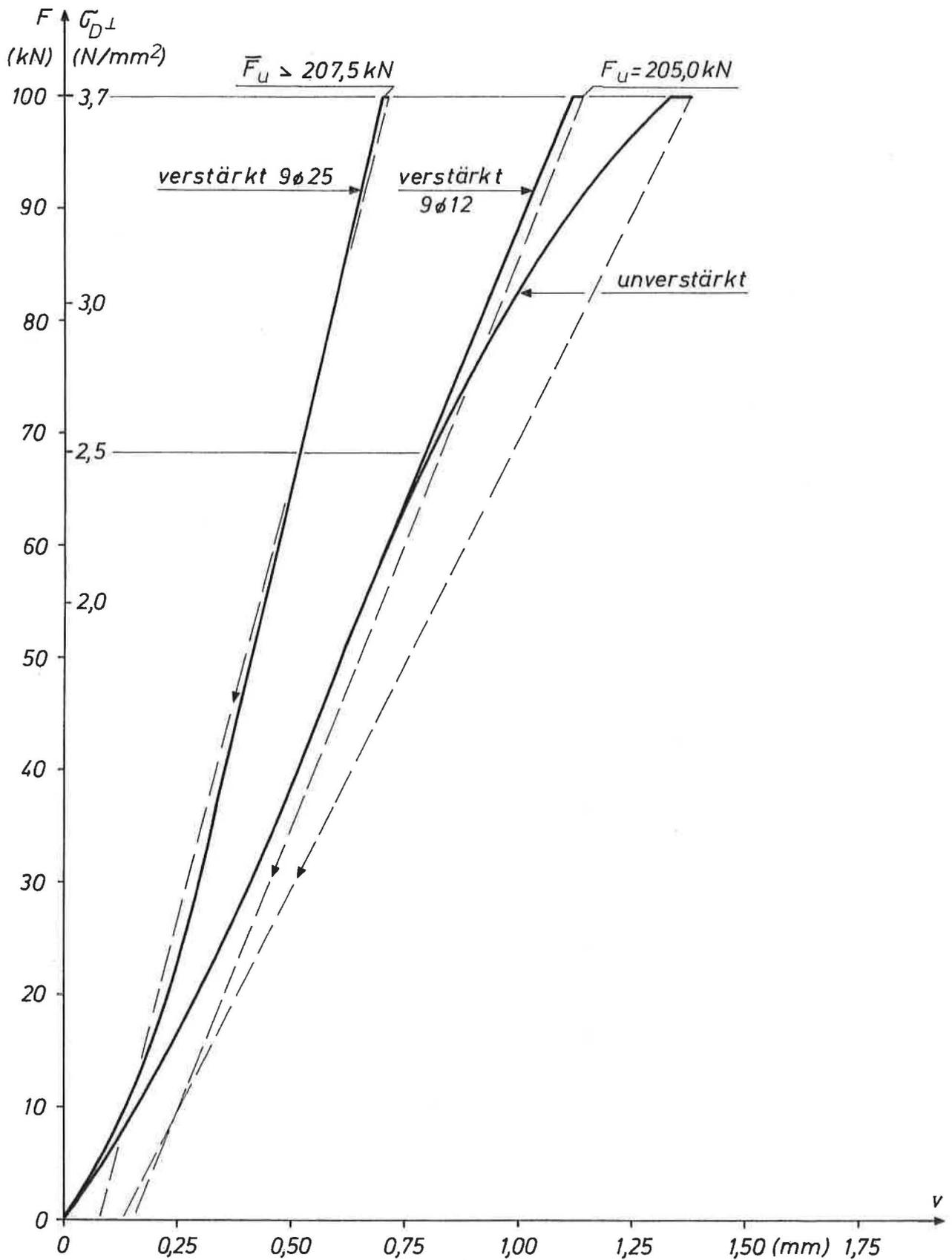


Bild 36: Last-Zusammendrückungslinien an den Lasteinleitungsstellen (Mitte) bei den Versuchen 6a und 6b. (Meßlänge = $h/2$)

Anhang: Fotos

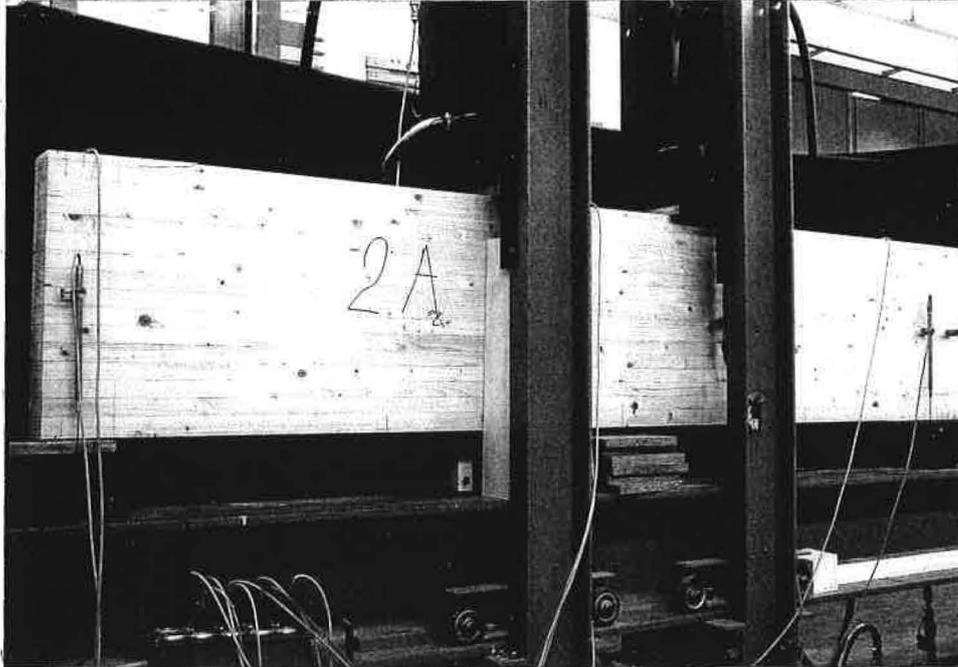


Bild F 1: Belastungs- und Meßanordnung bei den Trägern nach Abschnitt 4.2

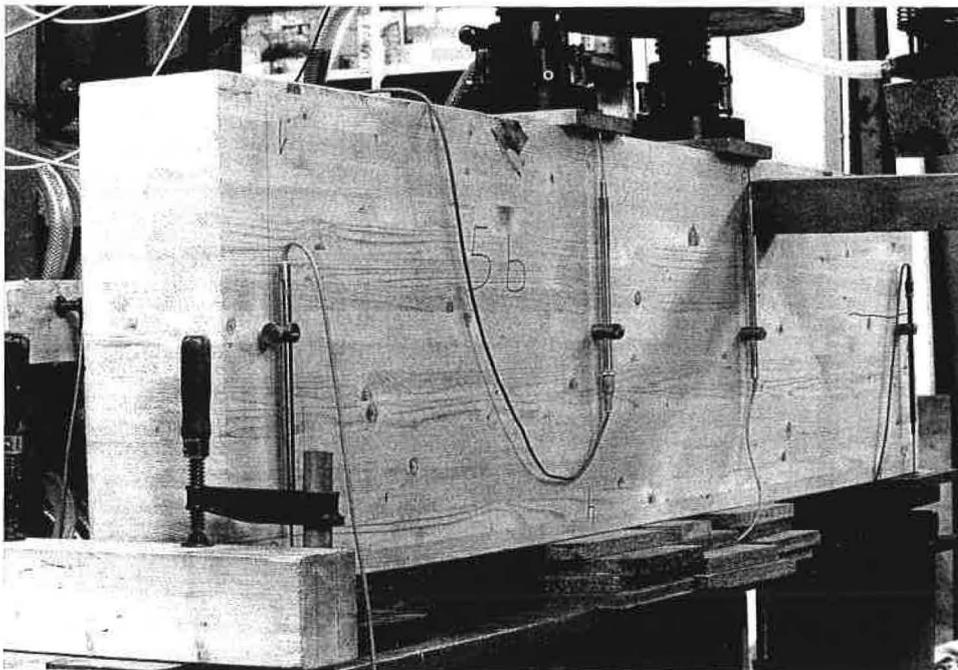


Bild F 2: Lasteinleitung mit Meßanordnung des Trägers 5 b

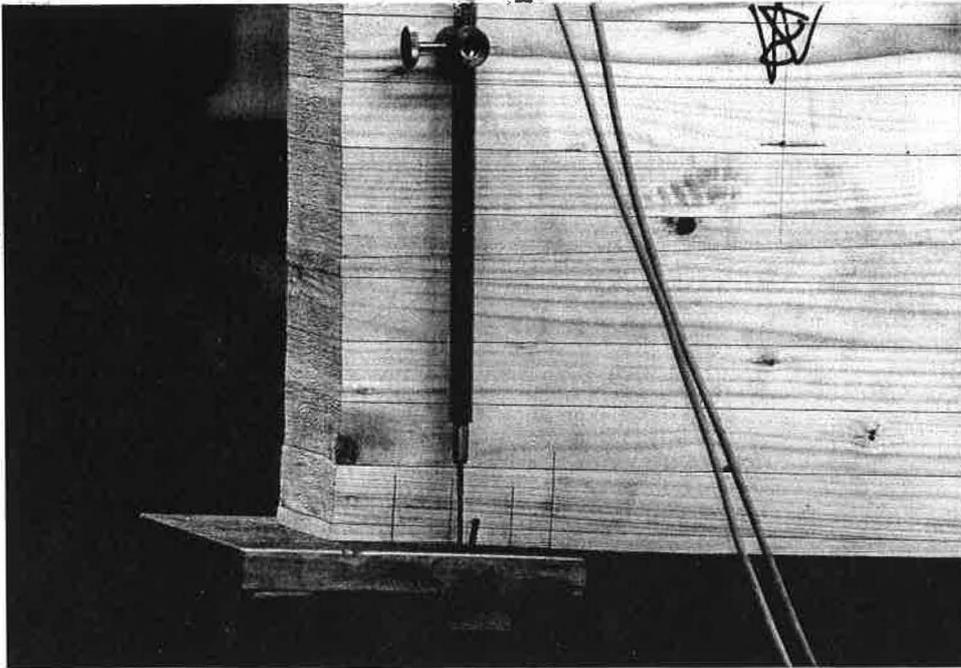
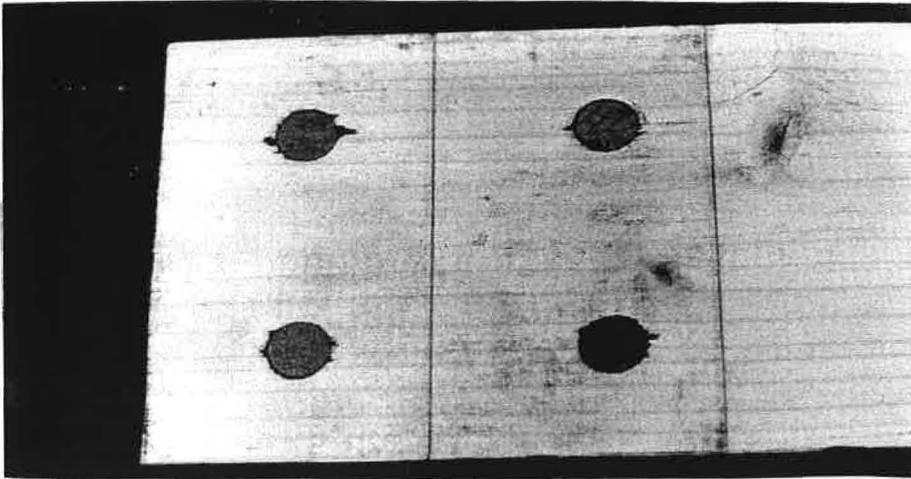


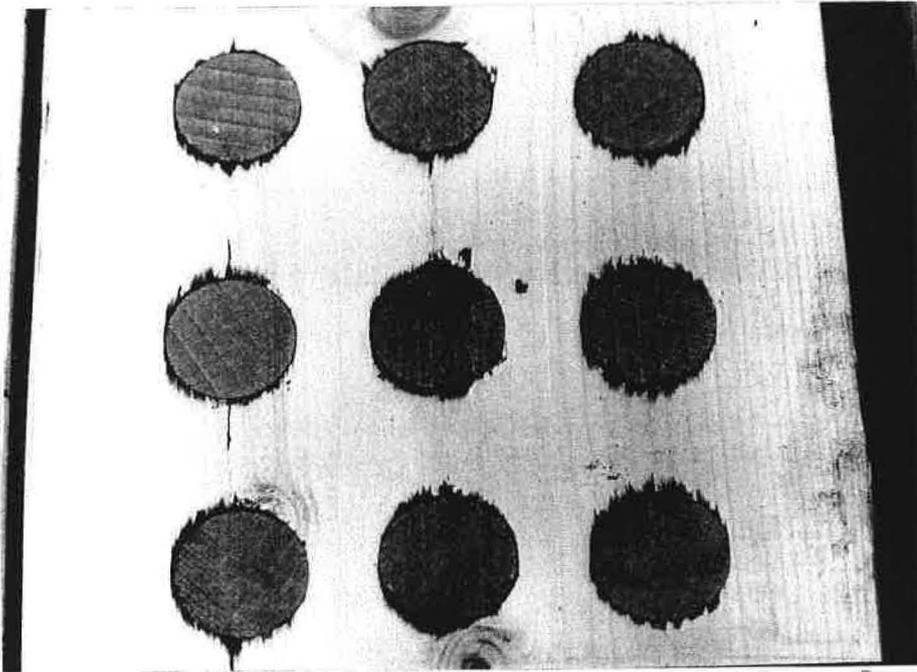
Bild F 3: Endauflager (ohne Überstand) mit Messeinrichtung



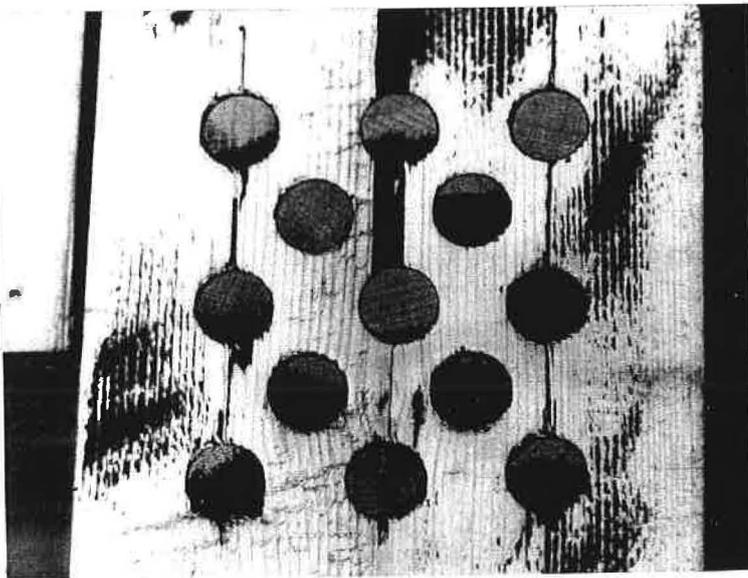
Bild F 4: Ribbildung am mit Buchendübel verstärkten Endauflager
des Trägers 2 b.



4 \varnothing 12 mm



9 \varnothing 25 mm



13 \varnothing 12 mm

Bild F 5 bis F 7: Blick auf die mit Buchendübeln verstärkten Auflagerflächen

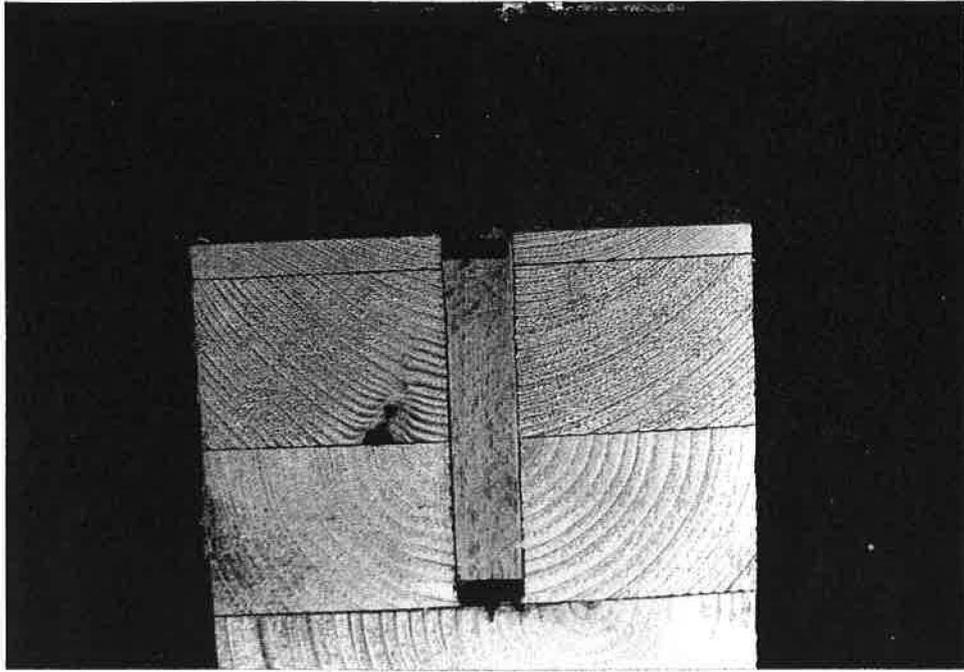


Bild F 8: Längsschnitt durch einen eingeleimten Buchendübel \varnothing 12 mm

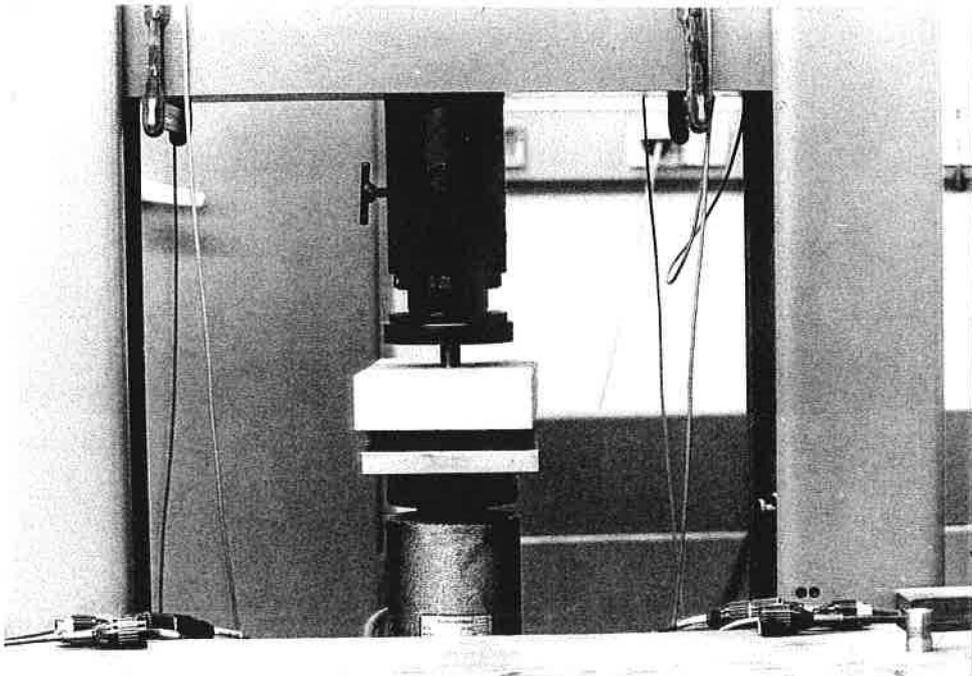


Bild F 9: Durchstanzversuch an gekürzten Buchendübeln

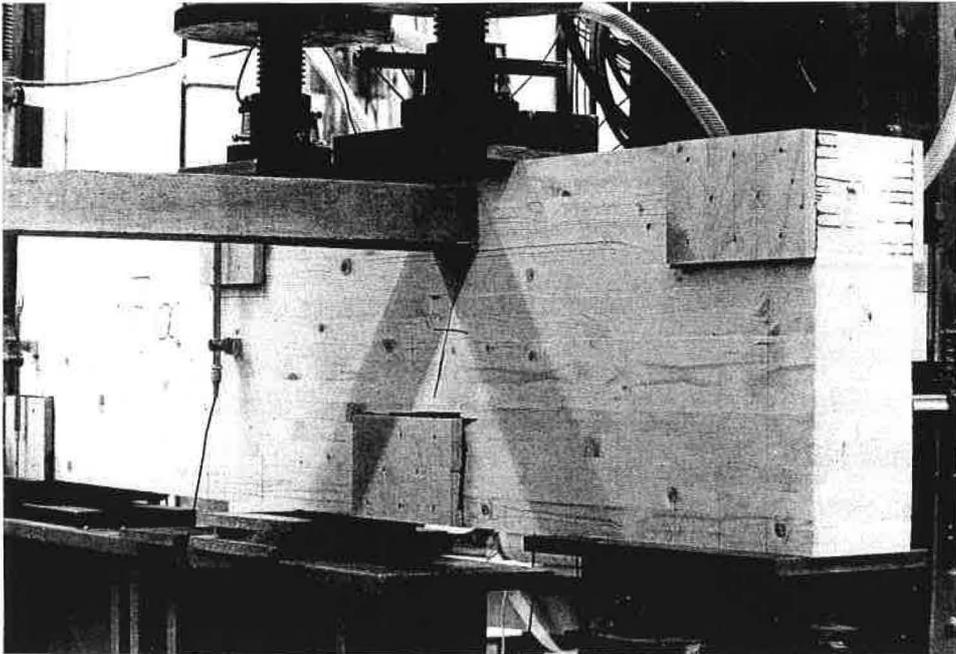


Bild F 10: Träger mit seitlich angeleimten Buchenfurnierplatten unter der Prüfanlage

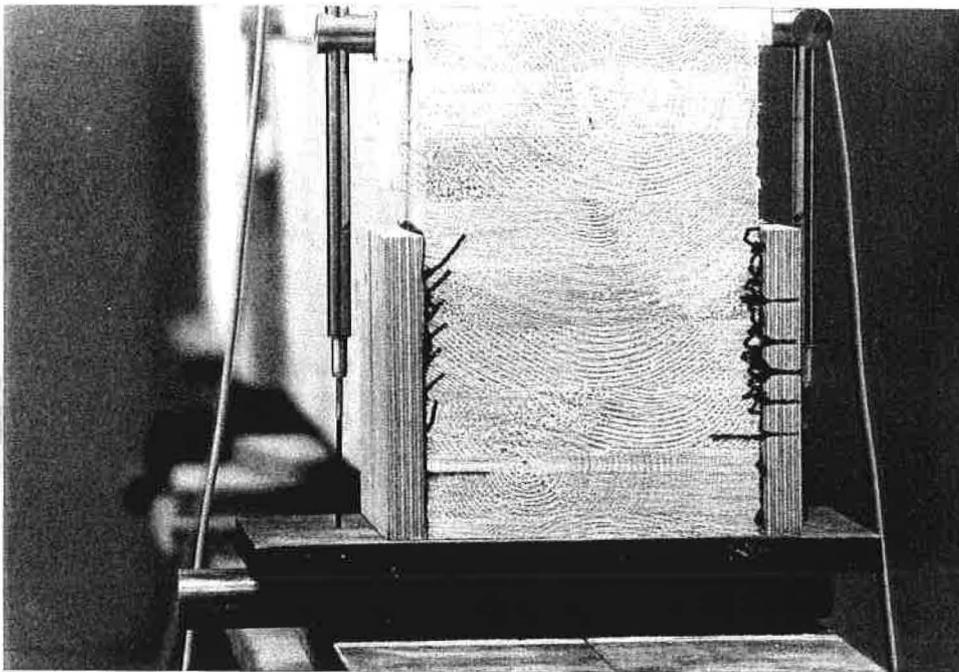


Bild F 11: Blick auf das Endauflager nach Erreichen der Höchstlast.

