E R H Ö H U N G D E R Q U E R Z U G F E S T I G K E I T
I N G E F Ä H R D E T E N B E R E I C H E N

Untersuchungen
durchgeführt im Auftrag des Innenministers
des Landes Nordrhein - Westfalen

von
K. Möhler und W. Siebert
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe (TH)
1983

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

2. Literaturübersicht

3. Vorversuche

3.1 Versuche über die Wirksamkeit verschiedener Verstärkungsmaßnahmen bei prismenförmigen Querzugproben aus Brettschichtholz

3.2 Ausziehfestigkeit eingeleimter Verstärkungsstäbe

3.3 Rechnerische Spannungsermittlung

4. Hauptversuche

4.1 Versuche mit im Auflagerbereich ausgeklinkten Trägern aus Voll- und Brettschichtholz

4.2 Versuche mit Queranschlüssen

4.3 Versuche mit keilgezinkten, geknickten Brettschichtträgern bei positivem Biegemoment

5. Auswertung der Versuche

5.1 Vorversuche

5.2 Versuche mit ausgeklinkten Trägern

5.3 Versuche mit Queranschlüssen

5.4 Versuche mit keilgezinkten Brettschichtträgern

6. Schlußfolgerungen

Literatur

Anlagen

Beilagen 1 und 2

1. Einleitung

Die in den letzten Jahren zunehmende Verwendung von Bauteilen und Konstruktionen aus Brettschichtholz hat zu Konstruktionsformen geführt, bei denen die hohen Längsfestigkeiten des Baustoffes Holz sowie seine leichte Bearbeitbarkeit und Formgebung weitgehend ausgenutzt werden konnten. Beim Entwurf wurden oft die geringen Querfestigkeiten, insbesondere die Querzugfestigkeit, auch des Brettschichtholzes nicht genügend berücksichtigt, so daß es wiederholt zu Schadensfällen gekommen ist. Dabei traten nicht nur unschöne und oft die Durchbiegungen ungünstig beeinflußende Längsrisse auf, nicht selten wurde sogar die Tragfähigkeit der Konstruktion so stark vermindert, daß völliges Versagen von Einzelbauteilen, oft auch der gesamten Tragkonstruktion, die Folge war.

Wie das Studium der einschlägigen Literatur gezeigt hat, hat man bereits Unterlagen über die Querzugfestigkeit des Nadelholzes, ihre Beeinflussung durch Feuchteeinwirkungen, Klimawechsel, Lastwechsel und Lasteinwirkungsdauer erarbeitet, wobei aber ein Teil dieser Einflüsse bisher nur für Douglas Fir, nicht aber für unsere einheimische Fichte untersucht wurde. Die Bemessung auf Querzug macht bei den verschiedenen Ausführungsformen wie Trägerausklinkungen am Auflager, Trägerdurchbrüche, Firstbereich von Satteldachträgern mit gebogenem oder geradem Untergurt und schrägverlaufendem Obergurt, Lasteinleitungen durch Queranschlüsse und dgl. besondere Schwierigkeiten, da für die meisten Fälle nur Näherungslösungen vorliegen. Auch die zusätzliche Wirkung von Schwindspannungen, die in der Praxis oft zu mehr oder minder großen Teilschwächungen des Querschnitts führen, läßt sich in den meisten Fällen rechnerisch kaum erfassen. Alle diese Umstände haben dazu geführt, daß querzugempfindliche Ausführungsformen oft eine nachträgliche Verstärkung des gefährdeten Bereiches erfordern oder bereits beim Entwurf Verstärkungsmaßnahmen vorgesehen werden müssen, die das Auftreten von schädlichen Querzugrissen mit ausreichender Sicherheit verhindern. Ziel des Vorhabens war

.//.

es daher, verschiedene bisher noch nicht oder noch nicht ausreichend untersuchte Verstärkungsmittel für querzugbeanspruchte Bereiche auf ihr Tragverhalten zu untersuchen und die für die Anwendung erforderlichen Bemessungsgrundlagen zur Verfügung zu stellen.

Die diesbezüglichen Untersuchungen umfaßten neben ohne Leim eingeschraubten und eingeleimten Gewindestählen und vergleichsweise untersuchten glatten und gerippten Bewehrungsstählen vor allem eingeleimte Buchenholzrundstäbe und GN-Nagelplatten, die wegen ihrer leichten Verarbeitung und geringen Materialkosten für zahlreiche Zwecke ausreichende Tragfähigkeitssteigerungen erwarten ließen.

Für die Verstärkung von keilgezinkten, abgewinkelten Trägerstößen, bei denen in der einspringenden Ecke hohe Längs- und im gesamten Stoßbereich gefährliche Querzugspannungen auftreten, wurde die Wirksamkeit einer Verstärkung durch beiderseits aufgeleimte Furnierplatten und durch eingeleimte Gewindestangen untersucht.

2. Literaturübersicht

Während sich bis zur umfassenderen Anwendung von Brettschichtkonstruktionen seit ca. 15 Jahren kaum Hinweise in der Literatur auf die Möglichkeiten zur Erhöhung der Querzugfestigkeit des Holzes, insbesondere des Brettschichtholzes, in gefährdeten Bereichen finden, ist dieser Frage in den letzten Jahren besondere Aufmerksamkeit gewidmet worden.

Während DIN 1052, Teil 1 aus dem Jahre 1969 sich noch auf den Hinweis beschränkt, daß rechtwinklig oder schräg zur Faser wirkende Zugspannungen zu vermeiden sind oder durch besondere Vorkehrungen aufgenommen werden müssen und nur für gekrümmte Brettschichtträger konstanter Höhe im Krümmungsbereich die Bemessungsformel und eine zulässige Querzugspannung von 0,25 N/mm² angegeben wird, sind in dem 1974 erschienen US-Holzbau-Manual |2.1| bereits Hinweise für die Verstärkung von gekrümmten Trägerbereichen, vor allem für Satteldachträger mit gerundetem Untergurt, enthalten. Zur Aufnahme der Querzugkräfte werden eingeschraubte Gewindestähle und eingeleimte Stahlstangen empfohlen, die in der Lage sein sollten, die Querzugkräfte voll zu übernehmen.

Die "Richtlinien zur Verstärkung von Durchbrüchen in Brettschichtträgern" |2.2| schreiben aufgrund der Stuttgarter Versuche |2.3| bei runden und rechteckigen Durchbrüchen begrenzter Abmessungen aufgeleimte Buchenfurnierplatten vor, deren gesamte Dicke in Abhängigkeit von der vorhandenen Schubspannung zwischen 10 und 65 % der Trägerbreite zu wählen ist. Nach |2.4| können auch mittels Nagelpreßleimung beidseitig aufgebrachte Buchenfurnierplatten zur vollständigen Sanierung von eingetretenen Schub- und Querzugrissen dienen, während beidseitig aufgenagelte Lochbleche wegen der Nachgiebigkeit der Verbindung nicht die gleiche Wirksamkeit erreichen.

.//.

Ausklinkungen am Endauflager von Biegeträgern sind besonders durch von der Ausklinkungsecke ausgehende Risse gefährdet. Hier wurden in |2.5| verschiedene Verstärkungsmaßnahmen untersucht, wobei sich neben aufgeleimten und aufgenagelten Furnierplatten, auch aufgenagelte Blechstreifen und eingeleimte Gewindestangen als vollwertig erwiesen haben. Die in DIN 1052, Teil 1 nach Bild 14 gezeigte Sicherung durch einen durchgehenden Bolzen kann dagegen, zumindest bei stärker belasteten und höheren Trägern, nicht als ausreichend angesehen werden (siehe auch |2.6|).Die Ergebnisse dieser Arbeit sind für die Neufassung von DIN 1052 vorgesehen.

Die Verstärkung gekrümmter Modell-Brettschichtträger konstanter Höhe mittels vorgespannter Rundstähle, eingeleimter Gewindestangen oder hochfester Kunststoffstäbe wird in |2.7| mitgeteilt. Hiernach ergaben alle 3 Maßnahmen praktisch den gleichen Wirkungsgrad. Auch in |2.8| werden vor allem für Satteldachträger vorgespannte Zugglieder, eingeleimte Gewindestähle und beidseitig aufgeleimte Furnierplatten als Verstärkungs- oder Sanierungsmaßnahmen bezeichnet. In |2.9| werden Versuche an Satteldachträgern von 9,10 m Stützweite mitgeteilt, bei denen 2 Arten der Sanierung von querzuggebrochenen Trägern untersucht wurden. Dabei wurde bei Anordnung von 1" Ø Gewindestählen, eingeschraubt in 13/16" Bohrungen (ohne Leim), eine Steigerung der Bruchlast von 55 % bei in 17/16" Bohrungen eingeleimten 1" Gewindeschrauben eine Steigerung von 65 % festgestellt.

Die Ausführungsbedingungen und Tragfähigkeiten von mittels Resorcinleim eingeleimten Gewindestangen wurden unter Beachtung der dänischen und schwedischen Arbeiten in |2.10| und |2.11| inzwischen bei einheimischem Brettschichtholz untersucht, so daß für die einzelnen konstruktiven Möglichkeiten zulässige Abstände und Bemessungsgleichungen für die aufnehmbare Ausziehlast angegeben werden konnten.

.//.

Die praktische Anwendung einer Quervorspannung im Bereich der querzuggefährdeten Binderkrümmung wird in |2.12| beschrieben. Aus architektonischen Gründen wurde auf seitlich angebrachte und damit sichtbare Platten verzichtet und eingeleimte Gewindestangen wegen der befürchteten Schwindverformungen des Holzes nicht für sicher genug gehalten. Die gewählte Ausführung mittels Tellerfedernvorspannung nimmt die Querzugkräfte und auch ev. Quellverformungen sicher auf, stellt aber einen verhältnismäßig hohen Kostenaufwand dar, der bei dem vorliegenden Hallenbad aber in Kauf genommen wurde.

3. Vorversuche

3.1 Versuche über die Wirksamkeit verschiedener Verstärkungsmaßnahmen bei prismenförmigen Querzugproben aus Brettschichtholz

Um die Wirksamkeit verschiedener Verstärkungsmaßnahmen beurteilen zu können, wurden aus 3 Brettschichtträgern von 10 cm Breite und ca. 120 cm Höhe 20 cm lange Abschnitte herausgeschnitten und die unverstärkten Probekörper mit vier bis fünf unterschiedlichen Höhen und damit unterschiedlichem Volumen dem Querzugversuch unterworfen. Die festgestellten Querzugfestigkeiten sind in Bild 3.1.1 (Anlage 3.1) in Abhängigkeit vom Volumen des querbeanspruchten Probeteils logarithmisch aufgetragen. Die Werte liegen weitgehend im Bereich der bei umfangreicheren Versuchen |3.11, 3.12| festgestellten Querzugfestigkeiten $\beta_{\perp} = 5 \cdot V^{-0,2}$ in N/mm² für V in cm³. Die meist etwas höher liegenden Versuchswerte sind darauf zurückzuführen, daß teilweise nach dem Querzugversuch aus den Teilstücken wieder neue Proben hergestellt wurden, so daß jeweils die 1. Probe von ca. 120 cm Höhe zwangsweise die niedrigste Festigkeit ergeben mußte.

Als Verstärkungsmaßnahmen wurden in Brettschichtprismen 10/20/40 cm Stahlstäbe verschiedener Form ohne und mit Resorcinleim sowie Buchenholzrundstäbe Ø 12 und 25 mm auf die Probenlänge von 40 cm eingebracht. Schließlich wurde auch die Wirksamkeit von auf den beiden 20 cm breiten Seiten eingepreßten Nagelplatten GN 14 von 40 cm Länge und 5,10 und 20 cm Breite untersucht. In Tabelle 1 (Anlage 3.2) sind die Art der Verstärkung, die Riß- und Bruchlasten sowie die erzielte Verbesserung in % gegenüber den rechnerischen Bruchlasten max F_H der unverstärkten Holzquerschnitte zusammengestellt. Für die Versuchskörper VV 2 bis 12 ergibt sich die rechnerische Bruchlast zu max $F_H = A_H \cdot 5 \cdot V^{-0,2} = 100 \cdot 200 \cdot 5 \cdot 4000^{-0,2}/1000 = 19,0$ kN. Bruchbilder einiger Probekörper sind auf den Anlagen 3.3 und 3.4 wiedergegeben.

.//.

Aus Tabelle 1 geht hervor, daß die Verstärkung mittels eingeleimter Buchenholzstäbe sowohl bezüglich der Rißlast F_R als auch der Bruchlast max F die größte Verbesserung erzielte. Von den Stahlstäben scheinen eingedrehte Gewindestäbe und eingeleimte Betonrippenstäbe praktisch gleichwertig zu sein, wenn man von den unterschiedlichen Haft- und Stabbruttoflächen und der bei den ersten 3 Versuchen abweichenden Lasteinleitung absieht. Nagelplatten erhöhten das Auftreten von Rissen wenig, während die erzielte Bruchlast vor allem bei der größten Plattenbreite auf nahezu den 2,5-fachen Betrag gegenüber der unverstärkten Holzprobe gesteigert wurde.

3.2 Ausziehfestigkeit eingeleimter Verstärkungsstäbe

In 11 Versuchsreihen wurden die in 3.1 angewandten Verstärkungsmaßnahmen auf ihren Ausziehwiderstand untersucht. Von jeder Verbindungsart wurden 3 Versuche durchgeführt. Die Ausbildung der Versuchskörper und der Ausziehvorrichtung geht aus Bild 3.2.1 (Anlage 3.5) hervor. Für die Einleimung wurde in der Regel Resorcinharzleim (Kauresin 440 + Härter 444) und bei 2 Versuchsreihen Epoxydharzleim (Krautoxin 1471/70) verwendet. Die Buchenholz- und Stahlstäbe wurden in 1 bis 2 mm größer gebohrte Löcher eingeleimt. Die Bewehrungsstähle wurden vor dem Verleimen sandgestrahlt. Die Ausziehversuche wurden ca. 6 Tage nach dem Einleimen durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 2 (Anlage 3.6) zusammengestellt. Die bei den Buchenstäben erreichten Haftfestigkeiten in der Berührungsfläche Leim-Brettschichtholz lagen bei Beanspruchung senkrecht zur Faserrichtung bei 3,5 bis 4,2 N/mm², parallel der Faser wurden 3,7 und 4,7 N/mm² erreicht. Für die mit Resorcin eingeleimten Bewehrungsstähle wurden mittlere Haftfestigkeiten von 2,6 bis 4,0 N/mm² ermittelt. Wesentlich günstigere Werte wurden bei Verwendung von Epoxydharzleim festgestellt. Bei den Buchenholzstäben war die erreichte Ausziehlast sowohl von der Güte der Stäbe (gerader Faserverlauf) als auch von der Einleimlänge abhängig, da im Hinblick auf die Zugfestigkeit der Buchenstäbe sich Störungen

.//.

im Faserverlauf und in der sonstigen Holzbeschaffenheit durch einen frühzeitigen Bruch des Stabes bemerkbar machten. Wie die Versuchsreihe 11 gezeigt hat, wurden bei den aus dem Handel bezogenen Rundstäben immerhin Zugfestigkeiten von 94 N/mm² und mehr erreicht.

Die Bilder 3.2.2 bis 3.2.6 zeigen bis zur Höchstlast beanspruchte Ausziehkörper. Bei den Körpern mit Buchenstäben 1/2, 11/2 und 11/3 ist zu erkennen, daß der Bruch durch Faserabweichungen in den Buchenstäben verursacht wurde. Bei den resorcin-verleimten Stahlstäben trat der Bruch vorwiegend in der Leimfuge auf, während bei Epoxyd-Verleimung der Bruch nur im Holz erfolgte. (Siehe Bild 3.2.6, Körper 6/1 und 7/1).

3.3 Rechnerische Spannungsermittlung

Zur Beurteilung des Einflusses verschiedener Parameter wie Parallel- und Quereinleimung des Stabes zur Faserrichtung des Holzes, Einleimlänge, Stabdurchmesser und Elastizitätsmodul des Verstärkungsstabes auf die Längs- und Haftspannungsverteilung entlang der Stablänge, wurde für Probenformen nach Bild 3.2.1 mit konstanter Höhe h = 50 mm und Seitenlängen a = b = 150 mm die Spannungsverteilung mit einem Finite-Elemente-Programm berechnet. Die Ergebnisse sind auf den Anlagen 3.9 bis 3.17 dargestellt. Bild 3.3.1 zeigt den Verlauf der Längszugspannungen im Stahlstab von 12 mm Durchmesser bei einer unten angreifenden Zugkraft von 10 kN, wenn die Faserrichtung des Holzes senkrecht oder parallel zur Stabachse verläuft. Der Verlauf der aus der Abnahme der Längszugspannungen sich ergebenden Haftspannungen in der Mantelfläche ist in Bild 3.3.2 dargestellt.

Die Bilder 3.3.3 und 3.3.4 enthalten Größe und Verlauf der Zug- und Haftspannungen für Stahlstäbe Ø 12 mm bei unterschiedlichen Einleimlängen, wobei die angreifenden Zugkräfte F proportional den Einleimlängen ℓ_E angesetzt wurden. Aus der Rechnung ergab sich mit zunehmender Einleimlänge eine

.//.

Verringerung der Haftspannungswerte an der Lasteinleitungsstelle.(Nach|3.31| waren bei praxisnahen Versuchen mit Einleimlängen von 40 - 60 und 80 mm keine eindeutigen Unterschiede der Haftfestigkeiten von M 12 - Gewindestangen, die in 11 mm Bohrlöchern mit Resorcinharz eingeleimt worden waren, festzustellen. Bei 9 Einzelversuchen betrugen die auf den Stabaußendurchmesser bezogenen Haftfestigkeiten 5,8 bis 8,1 N/mm².)

Wie Bild 3.3.5 und 3.3.6 zeigen, werden bei sehr kleinen Stabdurchmessern die Zugspannungen im Stab schneller abgebaut als bei größeren Durchmessern, was eine entsprechende Zunahme der Haftspannungen an der Lasteinleitungsstelle bedeutet.

Auf den Bildern 3.3.7 und 3.3.8 wird der Einfluß eines verschiedenen E-Moduls der Zugstäbe dargestellt. Bei kleinem E-Modul (Nadelholz) erfolgt eine schnelle Kraftabnahme und damit ein entsprechend steiler Verlauf der Haftspannungen, während bei einem Stahlstab die Kraft am Stabanfang wesentlich langsamer abnimmt und nahezu über die ganze Einleimlänge gleichmäßig eingetragen wird.

Ein unterschiedlicher E-Modul des Stabes beeinflußt auch Größe und Verlauf der Querspannungen im Holz, wie aus Bild 3.3.9 hervorgeht. Man erkennt, daß sie in der den Stab Ø 12 mm umgebenden Zylinderfläche mit D = 22 mm Durchmesser bei Stahlstäben am geringsten sind.

.//.

4. Hauptversuche

Für die Hauptversuche wurden aufgrund der Vorversuche verschiedene Verstärkungsmaßnahmen bei ausgeklinkten Brettschicht- und Vollholzträgern sowie bei Queranschlüssen untersucht, wobei statische Bruchversuche kurzfristig nach der Herstellung der Probekörper sowie nach Lagerung im Wechselklima und nach Langzeitbelastung von 6 Monaten bei Lagerung im Freien (unter Dach) vorgesehen waren.
Außerdem wurden an geknickten keilgezinkten Brettschichtträgern, bei denen im Bereich der Knickstelle ein positives Biegemoment aufgebracht wurde, die Wirksamkeit einer Verstärkung durch beidseitig aufgeleimte Furnierplatten und durch eingeleimte Gewindestangen untersucht.

4.1 Versuche mit im Auflagerbereich ausgeklinkten Trägern aus Voll- und Brettschichtholz

Die Wirksamkeit unterschiedlicher Verstärkungsmaßnahmen bei Trägerausklinkungen wurde an Probekörpern nach Bild 4.1.1 (Anlage 4.1) ermittelt, wobei nicht nur der Vergleich der aufgenommenen Bruchlasten im unverstärkten und verstärkten Zustande zur Beurteilung herangezogen werden sollte, sondern auch durch Feststellung der Anrißlasten und der Querdehnungen im Ausklinkungsgrund und in der Achse des Verstärkungsmittels weitere Kriterien verfügbar waren.
Tabelle 3 (Anlage 4.2) enthält die Übersicht über die bei den einzelnen Versuchsreihen vorliegenden Verstärkungsmaßnahmen mit den zugehörenden Maßen und den rechnerischen Werten für die zulässige Querkraft
$\text{zul } Q_k = \frac{2}{3} \cdot b \cdot h_1 \cdot k \cdot \text{zul } \tau_Q$;$(k = 1 - 2{,}8 \frac{a}{h} \geq 0{,}3)$ des Probekörpers ohne Verstärkung und bei voller Wirksamkeit der Verstärkung ($k = 1$). Diese in |2.6| vorgeschlagenen Bemessungsgleichungen sind auch für die Neufassung von DIN 1052 vorgesehen .

Die Versuchskörper bestanden in der Regel aus Brettschichtholz der Güteklasse II, ohne Lammellenstöße.

Der Abstand e des Verstärkungsstabes vom Ausklinkungsgrund wurde bei Reihe I variiert und aufgrund der dabei erhaltenen Ergebnisse bei den folgenden Reihen stets etwa mit $e = 3 \cdot d$ (d = Stabdurchmesser) ausgeführt.

Um eindeutigere Bruchkräfte zu erhalten, wurde das Ausklinkungsverhältnis bis auf die Versuchsreihe II mit $a/h = 0{,}5$ verhältnismäßig groß gewählt.

In Reihe III wurde die Wirksamkeit unterschiedlicher Verstärkungsmittel untersucht, wobei auch Nagelplatten GN 14 neben Stahl- und Buchenholzstäben zur Anwendung kamen.

Für Reihe IV wurden Vollholzquerschnitte verwendet, die praktisch den gleichen Querschnitt wie die Brettschichtkörper aufwiesen.

Die Versuchsträger der Reihe V wurden nach dem Einleimen der Verstärkungsstäbe einer Wechselklimabeanspruchung ausgesetzt, wobei drei Zyklen mit je 2 Wochen bei 20°C und 96 % relativer Luftfeuchtigkeit, entsprechend einer Gleichgewichtsfeuchte von ca. 25 %, und je 1 Woche bei 50°C und 30 %, entsprechend einer Gleichgewichtsfeuchte von ca. 5 %, durchlaufen wurden.

Die Versuchskörper V.4 und V.5 bestanden aus Vollholz.

Die Versuchskörper der Reihe VI wurden ein halbes Jahr lang im Freien gelagert und so belastet, daß die Auflagerkräfte den zulässigen Querkräften von 3 kN und 10 kN entsprachen. Die Last wurde über Hebel eingeleitet. Die Versuchskörper einschließlich Belastungsvorrichtung wurden durch eine Abdeckung gegen Niederschläge geschützt. Bild 4.1.2 und 4.1.3 (Anlage 4.3) zeigen den Versuchsaufbau, wobei auch die Meßmarken zu erkennen sind, die im Abstand von 1 cm vom Ausklinkungsgrund mit 7 bzw. 25 cm Meßlänge angebracht wurden. Die Meßstrecken wurden regelmäßig kontrolliert und die festgestellten Änderungen aufgezeichnet.

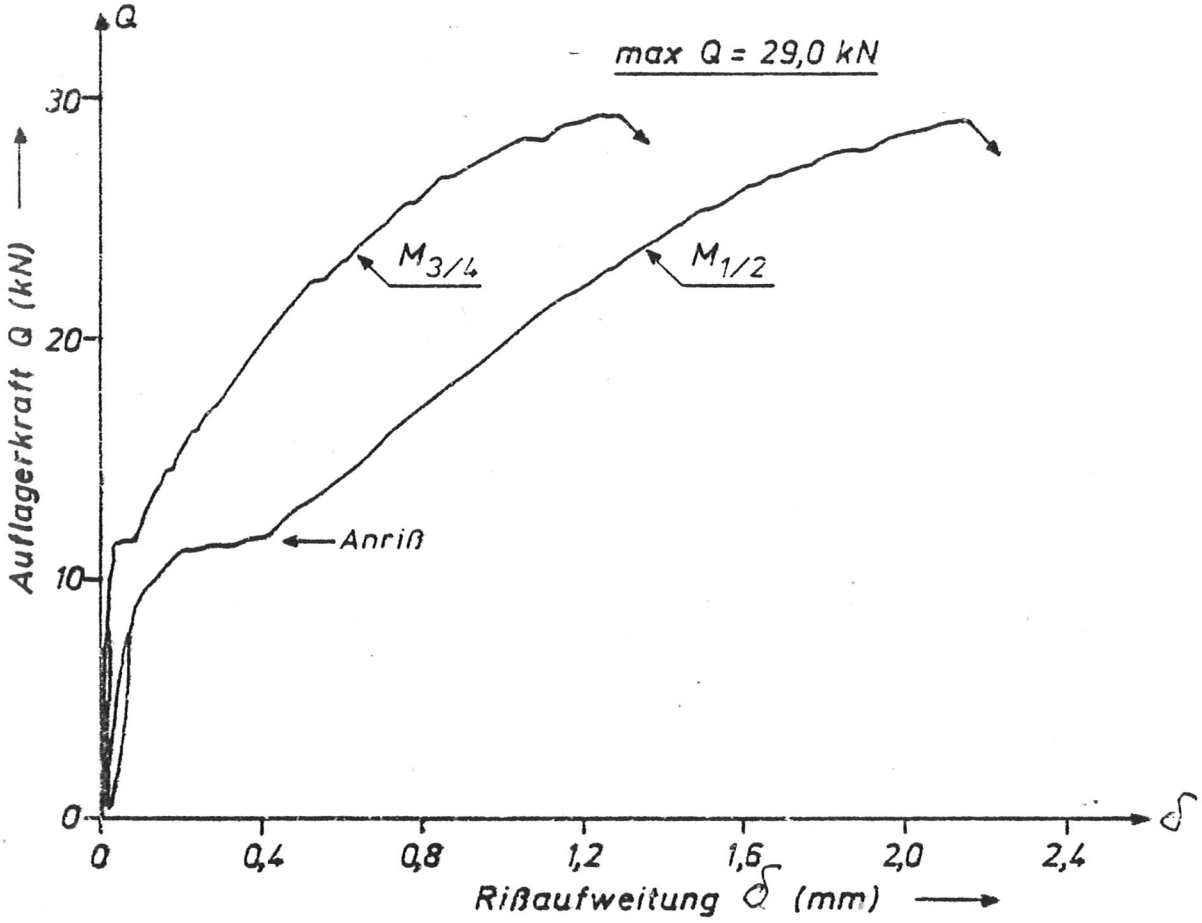
.//.

In Bild 4.1.4 bis 4.1.8 (Anlagen 4.4 bis 4.8) sind die gemessenen Abstandsänderungen vom Beginn der Belastung (09.12.1982) bis zum Ende der Dauerstandsbelastung (22.06.1983) aufgetragen. Anschließend wurden die Probekörper noch ca. 7 Tage im Normalklima (+ 20°C, 65 % rel. Luftfeuchte) gelagert und dann statisch bis zum Bruch belastet. Bild 4.1.9 (Anlage 4.9) zeigt den Verlauf der an einem unbelasteten Probestück durchgeführten Vergleichsmessung, wobei für die Reihen VI.0 bis VI.3 die Meßlänge ℓ_0 = 70 mm und für die Reihe VI.4 wegen der als Verstärkung angebrachten Nagelplatten ℓ_0 = 250 mm zutrifft. Bild 4.1.10 (Anlage 4.10) zeigt den Verlauf der Tageshöchst- und -tiefstwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte, die in dem betreffenden Zeitraum mittels Thermohygrograph aufgezeichnet wurden.

Bei den statischen Belastungsversuchen, die auf einer hydraulischen Prüfanlage mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 5 kN/min durchgeführt wurden, wurde nach Erreichen der "zulässigen" Querkraft nach Tabelle 3 die Last 2 Minuten konstant gehalten und anschließend entlastet. Hiernach wurde die Last bis zum Versagen des Probekörpers gesteigert. Bild 4.1.11 bis 4.1.15 (Anlage 4.11 und 4.12) zeigen Versuchsträger unter der Prüfanlage und Brucherscheinungen in dem zu prüfenden Ausklinkungsbereich. Der Ausklinkungsbereich des anderen Trägerendes wurde anschließend belastet, so daß für jeden Träger 2 Versuche mit praktisch gleicher Holzbeschaffenheit durchgeführt werden konnten. Bild 4.1.19 (Anlage 4.15) zeigt einen aufgesägten Prüfkörper mit 55 mm tief eingeleimten Buchenstäben. Der Bruch erfolgte durch Abreißen des einen und Ausziehen des anderen Stabes. Bild 4.1.20 zeigt einen aufgespaltenen Träger mit eingeleimter Gewindestange. Der im Versuch aufgetretene Querzugriß ist auf dem Bild nicht mehr zu erkennen.

.//.

An den auf Bild 4.1.1 eingezeichneten Meßstellen M_1 bis M_4 wurden die Verlängerungen ("Rißaufweitungen δ") der sich über den zu erwartenden Rißbereich erstreckenden Meßstrecken gemessen und mittels x-y-Schreiber in Abhängigkeit von der Auflagerkraft Q aufgezeichnet. Die bei dem Versuch IV.1.1 aufgenommenen Q/δ-Linien, die bei allen Versuchen meist einen ähnlichen Verlauf zeigten, sind im nachstehenden Diagramm wiedergegeben. Der Beginn der Rißbildung, der meist mit bloßem Auge nicht wahrzunehmen war, zeigt sich deutlich in der für die Meßstellen 1/2 maßgebenden Last-Verformungslinie.



Kraft - Verformungs - Diagramm
(Versuch IV 1.1)

Im vorliegenden Beispiel erfolgte der Anriß bei ca. Q = 11 kN. Bei weiterer Laststeigerung nahmen die "Rißaufweitungen" rasch zu, bis schließlich die Höchstlast durch Versagen der Verstärkungskonstruktion oder Überschreiten der Schubfestigkeit des Restquerschnittes erreicht war. (siehe Bild 4.1.13 bis 15).

Die Ergebnisse der statischen Belastungsversuche mit den ausgeklinkten Trägern sind in Tabelle 4 (Anlage 4.14) zusammengestellt. Sie enthält den Mittelwert der Anrißlast $\overline{Q}_R$, Einzel- und Mittelwerte der Höchstlasten max Q und die Mittelwerte der "Rißaufweitungen" δ bei Q_R und max Q für die beiden Meßquerschnitte M 1/2 und M 3/4.

Außerdem sind die mit max Q berechneten maximalen Schubspannungen im Restquerschnitt $b \cdot h_1$, die zugehörige maximale Zugkraft max Z (siehe |2.6|) und die hieraus resultierenden Zug- und Haftspannungen in den Verstärkungsstäben aufgenommen. (Für die Verstärkungen durch je 2 GN 14 - Nagelplatten wurden die entsprechenden Beanspruchungen in der Plattenbruttofläche bzw. in der Anschlußfläche (Berührungsfläche) nach den Festlegungen der GN-Zulassung ermittelt).

In allen Fällen wurde durch die Verstärkungen eine wesentliche Steigerung der Tragfähigkeit gegenüber der unverstärkten Ausführung erreicht, obwohl bei allen Verstärkungsbauarten die Anrißlasten meist wesentlich unter den Höchstlasten lagen.

Bei den Körpern der Reihe V, die unbelastet dem Wechselklima ausgesetzt worden waren, war am Ende der Klimalagerung besonders stark Trockenrißbildung von den Hirnholzenden ausgehend zu beobachten, wie aus Bild 4.1.16 bis 18 (Anlage 4.14) zu erkennen ist. Bei den abschließenden statischen Bruchversuchen wurden mit Ausnahme der Versuche V.3 (Gewindestab M 12) stark streuende Einzelwerte festgestellt.

Bei den Langzeitversuchen (Reihe VI) waren am Ende der Dauerstandsversuche keine Risse im Ausklinkungsbereich zu erkennen. Bei den abschließenden statischen Bruchversuchen traten aber teilweise stark streuende Werte (Ausnahme: Versuche VI.4, GN 14-Platten) auf, so daß in Einzelfällen eine Beeinflussung durch die vorausgegangene Dauerstandsbelastung nicht ausgeschlossen werden kann.

.//.

4.2 Versuche mit Queranschlüssen

Die Wirksamkeit von Buchenstäben im Kurz- und Langzeitversuch sowie von Nagelplatten bei Queranschlüssen wurden an Probekörpern nach Bild 4.2.1 (Anlage 4.1) ermittelt. Die Kraft wurde über Blechlaschen und Ankernägel 4/50 eingeleitet. Auf Bild 4.2.2 und 4.2.3 (Anlage 4.16) sind der Versuchsaufbau und die Krafteinleitung bei den Langzeitversuchen zu erkennen.

Es wurden folgende Versuchsreihen durchgeführt:

Reihe VII.1: Verstärkung mit 2 Buchenstäben Ø 20 mm, Bohr-Ø 22 mm.

Reihe VII.2: Wie VII.1, Dauerstandversuche im Freien mit der zulässigen Last des Nagelanschlusses zul F = 24 kN; Belastungsdauer 6 Monate.

Reihe VII.3: Verstärkung durch 4 Nagelplatten GN 14, 7,5 cm breit.

Reihe VII.4: Wie Reihe VII.1, jedoch 4 Buchenstäbe Ø 20 mm, wobei jeweils 2 Stäbe nebeneinander mit 4 cm Achsabstand eingeleimt wurden.

Als Vergleichsreihe VII.0 ohne Verstärkung dienten Versuche, die in [4.21] mitgeteilt sind und für die sich eine theoretische Höchstlast $F_u \approx 40$ kN berechnen läßt.

Ebenso wie bei den Langzeitversuchen der Reihe VI wurden die Verformungen im querzugbeanspruchten Bereich gemessen. Auf Bild 4.2.4 und 4.2.5 (Anlage 4.17 und 4.18) ist die zeitabhängige Verformung der Versuchsträger VII.2 aufgetragen.

Die Ergebnisse der Versuche mit Queranschlüssen sind in Tabelle 5 (Anlage 4.19) zusammengestellt. Es zeigte sich, daß die Haftfestigkeit bei Verstärkung mit 2 Buchenstäben rechnerisch bei 2,8 N/mm² erschöpft war. Bei den Versuchen mit Verstärkung durch Nagelplatten

.//.

(Reihe VII.3) traten Brucherscheinungen sowohl in den Verstärkungsplatten als auch im Nagelanschluß der Lasteinleitung auf, während bei der Reihe VII.4 die Belastung wegen Versagens des Anschlusses der Ankernägel nicht mehr weiter gesteigert werden konnte. An den Buchenstäben selbst waren keine Versagenserscheinungen festzustellen.

4.3 Versuche mit keilgezinkten, geknickten Brettschichtträgern bei positivem Biegemoment

Stöße von Brettschichtholzteilen mittels Keilzinkung wurden schon in den 60ger Jahren angewandt. Einschlägige Versuche über die Tragfähigkeit und Untersuchungen über die Spannungsverteilung bei Rahmenecken und Trägerknicken, vornehmlich unter negativem Biegemoment, hat K o l b in den Jahren 1968 bis 1971 veröffentlicht |4.31, 4.32|. In den letzten Jahren wurden wiederholt in Anlehnung an die im Stahlbeton gebräuchlichen Formen geknickter Träger auch keilgezinkte Trägerknicke ausgeführt, bei denen die Zinkungen des Gesamtquerschnittes unter bestimmten Winkeln zu Trägerachse verliefen und die Knick- bzw. Stoßstelle ein positives Biegemoment aufzunehmen hatte. Im Gegensatz zur Rahmenecke werden hierbei die Holzfasern im Trägerknick auf Zug beansprucht, so daß im Anschlußbereich Querzugspannungen auftreten, die die Tragfähigkeit gegenüber derjenigen bei negativem Moment beträchtlich abmindern. Heimeshoff schlägt für die Bemessung bei positivem Biegemoment einen Abminderungsfaktor von 0,2 vor |4.33|, wobei nach dem Vorschlag von K o l b von der zulässigen Druckspannung zul $\sigma_{D\parallel}$ für Nadelvollholz der Güteklasse II ausgegangen wird. Die Unsicherheiten der Bemessungsvorschläge und die Beobachtungen bei Schadensfällen ließen es ratsam erscheinen, die bei dieser Konstruktionsform vorliegenden Verhältnisse näher zu untersuchen und zu ermitteln, ob und bis zu welchem Grade die Tragfähigkeit des geknickten Trägerbereiches durch Maßnahmen zur Erhöhung der Querzugfestigkeit gesteigert werden kann. Da auch die unverstärkte Form unter statischer- und Langzeitbelastung, vor allem auch hinsichtlich der auftretenden Querdehnungen, noch kaum untersucht worden war, wurden zuerst Belastungsversuche mit entsprechenden Dehnungsmessungen mit unverstärkten Trägerknicken durchgeführt. Daran schlossen sich Versuche mit verstärkten Probekörpern an, wobei sowohl mittels Nagelpreßleimung beidseitig angebrachte FU-Platten verschiedener Form als auch eingeleimte Gewindestangen zur Anwendung kamen.

.//.

4.3.1 Probekörper und Durchführung der Versuche

Als Probekörper standen geknickte Brettschichtträger 18/70 cm und 20/70 cm nach Bild 4.3.1 (Anlage 4.20) zur Verfügung, die an der keilgezinkten Stoßstelle einen Knickungswinkel von 117° aufwiesen. Die Körper bestanden aus Brettschichtholz Güteklasse I, resorcinverleimt. Der Keilzinkenstoß wies 50 mm lange Zinken auf und war mit einem Preßdruck von ca. 6 kp/cm², Preßzeit ca. 12 Stunden, hergestellt worden. Jeder Versuchskörper wurde durch 2 symmetrisch zur Stoßstelle angreifende Einzellasten F belastet, so daß im Stoßbereich ein konstantes, positives Biegemoment wirkte. In der Regel wurden bei den einzelnen Belastungsversuchen neben der lotrechten Durchbiegung der Stoßmitte gegenüber den Auflagern die horizontalen Dehnungen in vier verschiedenen Höhen der Stoßmittellinie und jeweils zwei bis drei Querdehnungen im Stoßbereich mittels Wegaufnehmern bei stufenweiser Steigerung der Belastung gemessen. Die Fotos Nr. 4 a und 4 b (Beilage 1) zeigen einen Probekörper unter der Prüfanlage sowie die Meßanordnung im Stoßbereich.

4.3.2 Ergebnis der Versuche

1.statischer Versuch mit Probekörper Nr.I -Querschnitt 18/70 cm (Vorversuch)

Versuchsaufbau und Meßstellenanordnung gehen aus Bild 4.3.2 (Anlage 4.21 hervor. Die horizontalen Dehnungen an den Meßstellen ① bis ④ sind in Bild 4.3.3 (Anlage 4.22) für die drei Laststufen F = 30 - 50 - 70 kN aufgetragen. Bild 4.3.4 (Anlage 4.23) zeigt den Verlauf der maximalen, gemessenen Längsdehnungen der Meßstelle ① in Abhängigkeit von der Last F. Bild 4.3.5 (Anlage 4.24) enthält den Querdehnungsverlauf in Abhängigkeit von der Last F bis kurz vor Erschöpfen der Tragfähigkeit infolge Querzugbruch bei F_u = 76 kN. Gegenüber dem mit den Werten zul $\sigma_{D\parallel}$ = 11 N/mm² und zul $\sigma_{D\perp}$ = 2,0 N/mm² und der zulässigen Druckspannung zul $\sigma_{D\measuredangle}$ = 6,3 N/mm² für α = 31,5° berechneten zulässigen Biegemoment, das um den Faktor zul σ_B : zul $\sigma_{D\parallel}$ = 14:11 erhöht wurde, ergab sich bei Berücksichtigung der in |4.3| vorgeschlagenen Abminderung auf 20 % die zulässige Last von zul F = 14,5 kN entsprechend einer Bruchsicherheit von 5,24.

.//.

2.statischer Versuch mit Probekörper Nr. II - Querschnitt 20/70 cm.

Da die Querzugrisse beim Körper Nr. I hauptsächlich im unteren Querschnittsdrittel neben dem Keilzinkenbereich auftraten, wurden beim Versuch mit Probekörper Nr. II die Querdehnungsmeßstellen in den unteren Querschnittsbereich und möglichst nahe an den Stoß verlegt. Die Quer-Meßlänge wurde auf 25 cm verringert. Lage und Bezeichnung der einzelnen Meßstellen geht aus Bild 4.3.6 (Anlage 4.25) hervor. Der Verlauf der Durchbiegung, der Längsdehnungen im Keilzinkenquerschnitt sowie an der Meßstelle ① und der Querverformungen der Meßstrecken ⑤, ⑥ und ⑦ in Abhängigkeit von der Last F sind in Bild 4.3.7 bis 4.3.10 (Anlagen 4.26 bis 4.29) aufgetragen. Auch bei diesem Versuchskörper war die Tragfähigkeit infolge Querzugbruch erschöpft. Für die festgestellte Höchstlast von F_u = 76,4 kN berechnet sich gegenüber dem wie beim 1. statischen Versuch berechneten Wert von zul F = 16,1 kN eine Bruchsicherheit von 4,75.

3.statischer Versuch, Langzeitversuch und abschließender Bruchversuch mit Probekörper Nr. III - Querschnitt 20/70 cm.

Da bei den vorhergegangenen statischen Versuchen Querzugrisse geringen Umfangs bereits bei ca. 1/3 der Höchstlast auftraten, sollte der Probekörper Nr. III längere Zeit einer Dauerbelastung von ca. 2 x zul F unterworfen werden. Da nach einer Belastungsdauer von 814 Stunden keine eindeutigen Anzeichen einer Beeinträchtigung des Tragverhaltens festzustellen waren, wurde die Dauerstandsbelastung auf 3 x zul F = 48,3 kN erhöht. Während der Belastungsdauer wurde der Verlauf der Durchbiegungen, der maximalen Längsdehnung am inneren Rand der Keilzinkenverbindung und der Querdehnungen in gewissen Zeitintervallen festgestellt und das etwaige Auftreten von Querzugrissen und das zugehörige Rißbild beobachtet.

.//.

Bild 4.3.11 (Anlage 4.30) enthält die Last-Durchbiegungslinie für die 1. statische Belastung bis F = 32,2 kN und den statischen Bruchversuch, der nach Abschluß des Dauerstandsversuches - 814 Stunden mit F = 32,2 kN und 1056 Stunden mit F = 48,3 kN - durchgeführt wurde. Der Verlauf der Meßwerte in Abhängigkeit von der Belastungsdauer geht aus den Bildern 4.3.12 bis 4.3.14 (Anlagen 4.31 bis 4.33) hervor. Die im doppelt-logarithmischen Maßstab aufgetragenen Werte zeigen bei der Längsdehnung und praktisch auch bei der Durchbiegung weitgehend linearen Verlauf der Zunahme, während die Querdehnungen der 250 mm langen Meßstrecken deutlicher anstiegen und am Ende des Dauerstandsversuches unter der Laststufe F = 48,3 kN wesentlich über den Werten zu Beginn des Versuches lagen. Dabei waren die Queraufweitungen in der Achse des Keilzinkenstoßes (Meßstelle 7) am größten und im Keilzinkenbereich waren am Ende des Dauerstandsversuches zwei bis drei längsverlaufende Risse erkennbar, die auf die Wirkung von Querzugspannungen zurückzuführen waren.

Beim Bruchversuch war die Tragfähigkeit des Versuchskörpers Nr. III bei F_u = 71,5 kN infolge Queraufreißen des Brettschichtholzes erschöpft. Im Vergleich zum gleichen Versuchskörper II betrug der Unterschied ca. - 6,5 %, d.h. die Tragfähigkeit hatte durch die vorausgegangene Langzeitbelastung trotz der sichtbar gewordenen Rißbildung noch keine eindeutige Einbuße erlitten.

4.statischer Versuch mit Probekörper Nr. IV mit Verstärkung im Stoßbereich durch BU-Furnierplatten, 19 mm dick.

Bei den Belastungsversuchen mit den unverstärkten Probekörpern waren stets im Bereich des Keilzinkenstoßes bei der 2- bis 3-fachen angenommenen zulässigen Belastung Querzugrisse aufgetreten, die sich bei weiterer Laststeigerung rasch vergrößerten und schließlich zum Versagen des Körpers führten. Es sollte daher untersucht werden, ob durch eine beidseitige Verstärkung des Stoßbereiches

.//.

mittels durch Nagelpreßleimung angebrachter Buchen-Furnierplatten eine merkliche Erhöhung der Tragfähigkeit erreicht werden kann. Für die Bemessung der FU-Platten wurde davon ausgegangen, daß bei einer Nageldichte von 1 Nagel 31/65 pro 65 cm² Anschlußfläche und Verwendung von Resorcinleim aufgrund der in |4.34| getroffenen Feststellungen eine Scherspannung von ca. 6 N/mm² aufgenommen werden könnte. Ausgehend von den Materialfestwerten $\beta_{z}\| \cong 60$ N/mm² und $E_{z}\| \cong 6500$ N/mm² für die FU-Platten und einer unteren Querzugrißfestigkeit des Holzes von $\beta_{z}\perp \cong 0{,}5$ N/mm² und $E_{z}\perp \cong 220$ N/mm² war ein Zusammenwirken von Holz und FU-Platten in Querrichtung nur bei geringen Beanspruchungen wahrscheinlich. Damit ergab sich für das angenommene Bruchmoment von 520 kNm eine Gesamtquerlast von $V = 2 \cdot \sin 31{,}5° \cdot 520/0{,}67 \cdot 0{,}7 = 1115$ kN. Für die gewählten Abmessungen der FU-Platten (2 x 19 · 520 mm) wurden somit die angesetzten Bruchfestigkeiten $\beta_{z}\|$ und τ_{B} eingehalten.

Bild 4.3.15 (Anlage 4.34) zeigt die Ausbildung und Meßstellenanordnung des Probekörpers Nr. IV. Bild 4.3.16 (Anlage 4.35) gibt die Last-Durchbiegungs-Linie wieder, wobei zum Vergleich die Linien des unverstärkten Probekörpers Nr. II und Nr. III eingezeichnet sind. Die Tragfestigkeit war bei $F_{u} = 152{,}5$ kN erreicht, da die FU-Platten von der inneren Ecke aus infolge Überschreitens der Biegezugfestigkeit einrissen. Gegenüber dem unverstärkten Körper Nr. II war somit die Belastbarkeit durch die Verstärkungsmaßnahme um 100 % gesteigert worden.

5.statischer Versuch mit Probekörper Nr. V mit Verstärkung durch eingeleimte Gewindestangen, Durchmesser 16 mm.

Zur Erprobung der Wirksamkeit einer Querzugverstärkung durch eingeleimte Gewindestangen wurden bei Körper Nr. V beidseits des Keilzinkenstoßes je vier Gewindestangen Ø 16 mm mittels Resorcinleim von der inneren Ecke aus auf 50 cm Länge eingeleimt. Außer Durchbiegungs- und Längsdehnungen im Keilzinkenbereich

.//.

wurden die Querdehnungen jeweils zwischen den Gewindestangen auf 250 mm Länge gemessen, so daß ein unmittelbarer Vergleich mit den Werten des unverstärkten Körpers Nr. II möglich war. Die Meßergebnisse sind in Bild 4.3.17 bis 4.3.20 (Anlagen 4.36 bis 4.38) im Vergleich zu den Werten des Körpers Nr. II aufgezeichnet. Während die Durchbiegungslinie nur unwesentlich steiler verläuft, waren die Querdehnungen praktisch nur halb so groß wie beim unverstärkten Träger. Die Längsdehnungen am unteren Querschnittsrand stiegen ab F = 70 kN stark an und bei F_u = 97,7 kN war die Tragfähigkeit erschöpft, da sich sowohl Querrisse im Keilzinkenstoß ausgehend von der inneren Ecke als auch Querzugrisse in Höhe der Gewindestangenenden gebildet hatten. Nach diesen Feststellungen erscheint es ungenügend, wenn bei diesen durch ein positives Biegemoment beanspruchten keilgezinkten Trägerknicken Verstärkungsmittel angewendet werden, die nur örtlich die Querzugfestigkeit des Brettschichtholzes erhöhen, aber nicht in der Lage sind, die Längsfestigkeit des Keilzinkenstoßes zu verbessern.

6.statischer Versuch mit Probekörper III, saniert mit beidseitig aufgeleimten BU-Furnierplatten, 19 mm dick.

Zur Überprüfung, inwieweit bereits bis zum Versagen belastete geknickte Trägerstöße, die starke Querzugrisse aufweisen, durch beidseitig aufgeleimte FU-Platten, ihre Tragfähigkeit wieder erhalten, wurde der nach der Dauerstandsbelastung statisch bis zum Bruch belastete Probekörper Nr. III im Stoßbereich mit Baufurnierplatten aus Buche 19 x 520 mm versehen. Um gegebenenfalls das Einreißen der FU-Platten, wie es beim Körper Nr. IV aufgetreten war, zu vermeiden, wurden die Platten unten und oben gerade begrenzt. Wie Bild 4.3.21 (Anlage 4.39) zeigt, verlief die Last-Durchbiegungslinie nahezu bis zur Erschöpfung der Belastbarkeit bei F_u = 119,2 kN geradlinig. Die Dehnungsmessungen nahe dem unteren Rand der FU-Platten wiesen bereits oberhalb von

F = 40 kN Abweichungen von der Linearität auf, was auf Störungen der Mitwirkung der Platten hindeutete. Kurz vor Erreichen der Höchstlast wurde dann auch ein Lösen der Verleimung in den äußeren, unteren Bereichen sichtbar. Die Bruchlast erreichte somit das 1,67-fache der Tragfähigkeit des unverstärkten, nach dem Dauerstandsversuch leicht rissegeschädigten Probekörpers Nr. III. Der Bruch wurde durch Überschreiten der Scherfestigkeit der Nagelpreßleimfuge ausgelöst. Zusätzliche Risse wurden im Brettschichtholz nicht beobachtet.

Wie aus dem Vergleich der Last-Durchbiegungslinien aufBild 4.3.21 hervorgeht, wurde durch die Sanierung auch die Biegesteifigkeit des durch den Dauerstandsversuch bereits lädierten Probekörpers deutlich verbessert und erreichte sogar noch eine leichte Zunahme gegenüber dem unverstärkten Ausgangszustand.

Der Versuch hat gezeigt, daß auch sehr stark rißbehaftete Keilzinken-Knickstöße, die bereits bis zur Erschöpfung der Tragfestigkeit belastet waren, durch beidseitig nagelpreßgeleimte Buchenfurnierplatten saniert werden können. Es ist sogar zu erwarten, daß dadurch ihre Tragfähigkeit gegenüber dem Ausgangszustand deutlich erhöht werden kann.

Fotos über die Ausführung der Verstärkungen durch FU-Platten und den Zustand nach den Bruchversuchen sind in der Beilage 2 zusammengestellt.

.//.

5. Auswertung der Versuche

5.1 Vorversuche

Zur Erhöhung der verhältnismäßig geringen, volumenabhängigen Festigkeit eines durch Querzugkräfte beanspruchten prismatischen Stabes aus Brettschichtholz können nach Tabelle 1 verschiedene Maßnahmen angewendet werden, durch die eine Erhöhung der Querzugbruchlast um ca. 100 % und mehr zu erreichen ist. Neben mit Resorcinharz eingeleimten Gewindestangen, deren Ausführungs- und Bemessungsbedingungen weitgehend festliegen, haben sich besonders mit Resorcin eingeleimte Buchenholzrundstäbe und seitlich aufgebrachte Nagelplatten festigkeitssteigernd ausgewirkt. Mit Resorcin eingeleimte Bewehrungsstähle verschiedener Form und Festigkeit scheinen gegenüber Gewindestäben keine Vorteile zu besitzen.

Bezüglich der Haftfestigkeiten erreichten Buchenstäbe mittlere Bruchwerte von 3,5 bis 4,7 N/mm²; ähnliche Werte wurden bei den Bewehrungsstählen mit Resorcinleim festgestellt, während mit Epoxydharz eingeleimte, sandgestrahlte Bewehrungsstäbe sogar mehr als die doppelten Werte erreichten.

Die Anwendung von aus dem Fachhandel bezogenen Buchenrundstäben erfordert eine sachverständige, visuelle Auslese, da Stäbe mit gestörtem Faserverlauf oder Ästen wegen der Gefahr eines vorzeitigen Stabzugbruches nicht geeignet erscheinen. Wie aus Tabelle 2 Reihe 10 hervorgeht, trat bereits bei einer Einleimlänge von 6,7·d bei einem Versuch ein Zugbruch im Buchenstab bei einer Stabzugspannung von 64,1 N/mm² ein, während bei Reihe 11 bei einer Einleimlänge von ca. 21·d stets Zugbrüche die aufnehmbare Last begrenzten, wobei die aufgetretenen Zugfestigkeiten 94,2 - 141,9 - 102,1 N/mm² betrugen. Wenn man, ähnlich wie bei den eingeleimten Gewindestangen, eine Haftspannung von 1,2 N/mm² zuläßt, und für die praktisch fehlerfreien Buchenstäbe eine zulässige Zugspannung von 20 N/mm² als vertretbar ansieht, ergibt sich bei

.//.

voller Ausnutzung der zulässigen Haftspannung eine maximale Einleimlänge von $\ell_E = \frac{20}{1,2 \cdot 4} \cdot d \cong 4 \cdot d$.

Die rechnerisch ermittelten Diagramme über Größe und Verteilung der Längs- und Haftspannungen entlang der Einleimlänge, die die Einflüsse der untersuchten Parameter aufzeigen, können in gewissen Fällen eine wertvolle Hilfe bei der Festlegung bestimmter konstruktiver Ausführungen sein, wobei aber die endgültige Beurteilung des Tragverhaltens vorerst nur aufgrund von wirklichkeitsnahen Versuchen möglich ist.

5.2 Versuche mit ausgeklinkten Trägern

Die in Tabelle 4 zusammengestellten Versuchsergebnisse ermöglichen es, die Wirksamkeit der einzelnen Querzugverstärkungsmaßnahmen anhand der Vergleichsversuche mit den unverstärkten Trägern abzuschätzen, aber auch die einzelnen Maßnahmen miteinander zu vergleichen und den Einfluß einer Wechsellagerung und Dauerstandbelastung auf das Verformungs-Rißverhalten und die statische Bruchbelastung zu beurteilen. Schließlich erhält man auch Vergleichswerte für den Unterschied Vollholz / Brettschichtholz, wobei man aufgrund der bei den einzelnen Versuchsreihen aus dem Ausklinkungsbereich entnommenen Holzproben davon ausgehen kann, daß bei dem verwendeten Brettschichtholz eine mittlere Holzfeuchte von ca. 12,5 % und beim Vollholz von ca. 13,2 % vorlag. Die mittlere Rohdichte lag beim BSH bei 0,50 g/cm³, beim VH bei 0,41 g/cm² und die auf u = 15 % umgerechneten Druckfestigkeiten $\beta_{D\parallel}$ wiesen mit 42,7 N/mm² und 31,2 N/mm² einen Unterschied von 37 % zugunsten des BSH auf. Die bei Einzelversuchen festgestellten Abweichungen der Holzeigenschaften von den Mittelwerten ergaben keine feststellbare Beeinflussung der Versuchsriß- und -bruchlasten.

.//.

5.2.1 Vergleich Vollholz-Brettschichtholz

Das Verhältnis der Bruchlasten max $\overline{Q}$ betrug für vergleichbare Versuchsreihen:

		max $\overline{Q}$
Reihe IV.0/I.0	unverstärkt	8,7/15,9 = 0,55
Reihe IV.1/I.2	Buchenstab Ø 20	32,4/37,3 = 0,87
Reihe IV.2/III.3	BSt 220/340 GU	38,8/57,7 = 0,67
Reihe IV.3/III.5	Gewindestange M 12	40,7/46,8 = 0,87

Die höheren Werte für Brettschichtholz wurden besonders bei den unverstärkten Trägern festgestellt, während bei den einzelnen Verstärkungsarten der Unterschied geringer war.

5.2.2 Einfluß der Lagerung im Wechselklima

Das Verhältnis der Bruchlasten der der Wechsellagerung ausgesetzten Körper zu den Werten der normal gelagerten Träger ist nachstehend zusammengestellt.

		max $\overline{Q}$	
Reihe V.0/I.0	unverstärkt	12,1/15,9 = 0,76	(BSH)
Reihe V.5/IV.0	unverstärkt	14,8/ 8,7 = 1,70	(VH)
Reihe V.1/I.2	Buchenstab Ø 20	39,6/37,3 = 1,06	(BSH)
Reihe V.2/III.3	BSt 220/340 Ø 12	45,6/57,7 = 0,79	(BSH)
Reihe V.3/III.5	Gewindestange M 12	47,6/46,8 = 1,02	(BSH)
Reihe V.4/IV.1	Buchenstab Ø 20	38,1/32,4 = 1,18	(VH)

Die Wechselklimalagerung hat sich insbesondere auf die BSH-Körper ohne Verstärkung ungünstiger ausgewirkt als auf die Vollholzträger, bei denen sogar eine Erhöhung der Belastbarkeit festgestellt wurde. Die dürfte in erster Linie von den bei Brettschichtholz im verstärkten Maße aufgetretenen Trockenrissen im Auflagerbereich herrühren.

.//.

5.2.3 Einfluß der Langzeitbelastung

Die Langzeitbelastung, die unter gleichzeitiger Einwirkung des Außenklimas vor sich ging, ergab nach nachstehender Zusammenstellung keine eindeutige negative Auswirkung auf die Bruchbelastung am Ende des Dauerstandversuches verglichen mit dem normalen statischen Bruchversuch.

		$\max \overline{Q}$
Reihe VI.0/I.0	unverstärkt	15,2/15,9 = 0,96
Reihe VI.1/I.2	Buchenstab Ø 20	39,3/37,3 = 1,05
Reihe VI.2/III.3	BSt 220/340 Ø 12	43,6/57,7 = 0,76
Reihe VI.3/III.5	Gewindestange M 12	43,7/46,8 = 0,93
Reihe VI.4/III.6	Nagelplatte GN 14	53,0/42,0 = 1,26

5.2.4 Bruchsicherheiten

Beim Vergleich der festgestellten maximalen Querkräfte max Q beim Bruch mit den zulässigen Werten zul $Q = \frac{2}{3} \cdot b \cdot h_1 \cdot \text{zul } \tau_Q$ mit $k = (1-2{,}8 \frac{a}{h}) \geq 0{,}3$ für die Träger ohne Verstärkung und k = 1,0 mit Verstärkung ergeben sich Bruchsicherheiten, die in beiden Fällen mehr als 2,9 betragen und sowohl für Brettschichtholz als auch für Vollholz die Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahmen unter Beweis stellen. Eine Vergrößerung von Zahl oder Durchmesser der Verstärkungsstäbe (Reihe III.1/III.2 und III.7/III.1) führte zu höheren Bruchsicherheiten, während eine Verringerung der Einleimlängen (III.8/III.7) eine Abnahme der Traglasten zur Folge hatte. Die Anrißlasten dagegen wurden dadurch weniger beeinflußt. Zu erwähnen ist hier, daß sich die Verstärkung mit Nagelplatten GN 14 als besonders günstig erwiesen hat.

.//.

5.3 Versuche mit Queranschlüssen

Durch die angewandten Querzugverstärkungen (Buchenstäbe Ø 20 und GN 14-Nagelplatten) konnten die Traglasten der Träger um 32 bis 69 % gesteigert werden, wobei das Versagen bei GN 14-Platten und 2 x 2 Buchenstäben Ø 20 schließlich durch die hohe Schubbeanspruchung im unverstärkten Bereich eingeleitet wurde. Auch bei den Queranschlüssen ist somit eine Aufnahme der erhöhten Querzugspannungen im Lasteinleitungsbereich durch die angewandten Verstärkungsmaßnahmen möglich.

5.4 Versuche mit keilgezinkten Brettschichtträgern

Die unverstärkten, keilgezinkten Probekörper ergaben Bruchfestigkeiten bezogen auf das Widerstandsmoment des geschwächten Trägerquerschnittes von 70 cm Höhe, die wesentlich unter der Biegebruchfestigkeit β_B des keilgezinkten Gesamtstoßes eines geraden Trägers lagen. β_B kann nach den in |4.3.1| und |4.3.5| mitgeteilten Versuchsergebnissen bei BSH, Güteklasse I mit nicht keilgezinkten Einzellamellen zu etwa 46 N/mm² angenommen werden. Die Versuchswerte lagen an der Knickstelle mit $\alpha = 31{,}5°$ bei 8,4 - 7,7 und 7,1 N/mm² (Mittelwert 7,74 N/mm²), erreichten also nur 16,8 % der Bruchfestigkeit des geraden Trägerstoßes ($\alpha = 0°$).

Setzt man in Anlehnung an den Bemessungsvorschlag in |4.3.5|

$$\beta_B = K_1 \frac{M_B}{W_n} \qquad \text{Gl. (5a)}$$

mit β_B : rechnerische Biegebruchspannung des geraden Trägerstoßes bei Brettschichtholz der Güteklasse I

M_B : Biegebruchmoment bei $\alpha = 31{,}5°$

W_n : Widerstandsmoment des geschwächten Trägerquerschnitts

K_1 : Erhöhungsfaktor

so erhält man für die 3 Versuche folgende K_1-Werte:

Versuch Nr. I: $K_1 = 5{,}48$; Versuch Nr. II: $K_1 = 5{,}97$; Versuch Nr. III: $K_1 = 6{,}47$.

In Bild 22 sind die K_1-Werte für $\alpha = 31{,}5°$ sowie die von K o l b in |4.3.1 und 4.3.5| erhaltenen Werten für $\alpha = 5°$, 10° und 15° aufgetragen. Hiernach erhält man eine praktisch lineare Abhängigkeit, die unter Vernachlässigung des K_1-Wertes für Versuchskörper III, der durch Dauerstandbelastung bereits Querrisse erhalten hatte, durch die Gleichung

$$K_1 = 1 + 0{,}167\ \alpha° \qquad \text{Gl. (5b)}$$

ausgedrückt werden kann. Zum Vergleich ist die von K o l b für $\alpha \leq 20°$ angegebene Beziehung $K_1 = e^{0{,}09\alpha}$ eingezeichnet, die bei Erweiterung des Gültigkeitsbereiches bis $\alpha = 31{,}5°$ einen K_1-Wert von 17,03 ergeben würde.

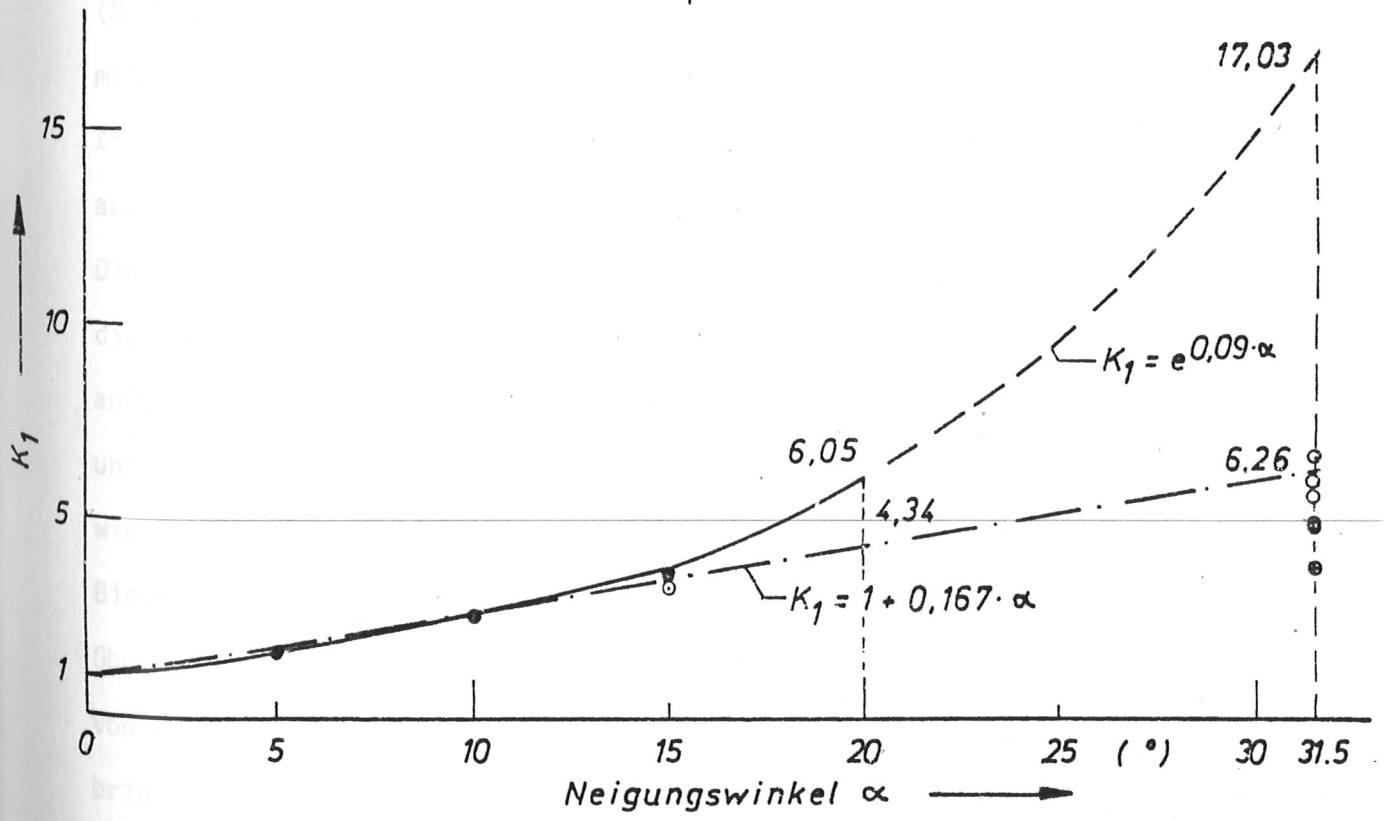


Bild 22: Abhängigkeit der K_1-Werte vom Winkel α

Bei den 3 geprüften, unverstärkten Trägern Nr. I, II und III traten frühzeitig Querzugrisse im Stoßbereich auf. Die durch das Biegebruchmoment hervorgerufenen Querzugspannungen berechnen sich zu:

$$\sigma_{\perp} = \frac{V}{A} = \frac{3\, M_B \cdot \sin \alpha}{h \cdot b \cdot \ell^*}$$

Setzt man aufgrund der bei den Versuchen unmittelbar vor Erschöpfen der Tragfähigkeit beobachteten Rißausbreitung der Querzugkraft gleich der Trägerhöhe ($\ell^* = h$) so erhält man für die 3 Versuche folgende Werte für σ :

Versuchskörper Nr. I : $\sigma_{\perp} = 17{,}56$ N/mm²

Versuchskörper Nr. II : $\sigma_{\perp} = 15{,}39$ N/mm² Mittelwert: 16,11 N/mm²

Versuchskörper Nr. III: $\sigma_{\perp} = 14{,}87$ N/mm²

(Nach der in |4.3.5| vorgeschlagenen Berechnungsweise würde sich eine mittlere Querzugspannung beim Versagen von 13,34 N/mm² ergeben. Die Annahme $\ell^* = h$ liegt demgegenüber mit zul $\sigma_{\perp} = 2{,}5$ bzw. 2,0 auch noch ausreichend auf der sicheren Seite).

Die Versuche mit den v e r s t ä r k t e n Probekörpern haben gezeigt, daß die Tragfähigkeit erheblich gesteigert werden kann, wenn, wie bei beidseitig aufgeleimten FU-Platten, diese in der Lage sind, das auftretende Biegemoment und die dadurch entstehende Vertikalkraft allein aufzunehmen, sie müssen also wie Stoßlaschen für M und V bemessen werden. Die Anschlußflächen müssen das Biegemoment und eine ev. an der Stoßstelle zu übertragende Querkraft ohne Überschreitung der zulässigen Scherspannung aufnehmen. Die alleinige Anordnung von eingeleimten Gewindestählen oder dgl. zur Aufnahme der Vertikalkraft bringt dagegen nur eine Sicherung gegen frühzeitiges Queraufreißen, wodurch aber das aufnehmbare Biegemoment nicht wesentlich gesteigert werden kann, da die Längsspannungen im Stoßquerschnitt nach wie vor vom keilgezinkten Trägerquerschnitt allein aufgenommen werden müssen.

6. Schlußfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß in querzuggefährdeten Bereichen von Bauteilen aus Brettschichtholz, aber auch aus Vollholz, bei verhältnismäßig niedriger Belastung mit dem Auftreten von Querzugrissen und nachfolgendem Versagen zu rechnen ist. Die Belastbarkeit kann durch verschiedene Verstärkungsmaßnahmen des querbeanspruchten Bereiches erheblich gesteigert werden, während in den meisten Fällen das Auftreten von Rissen kaum vermieden werden kann. Geeignete Verstärkungsmaßnahmen verhindern aber das Fortschreiten auch von solchen Anrissen die durch Trockenungsvorgänge entstanden sind, so daß das Versagen der Konstruktion erst bei Überbeanspruchung des Verstärkungselementes eintritt.

Als Verstärkungsmaßnahmen haben sich neben den bereits als geeignet festgestellten eingeleimten Gewindestangen mit Resorcin eingeleimte, zylindrische Buchenstäbe, mittels Nagelpreßleimung beidseitig angebrachte Buchenfurnierplatten und im Querzugbereich eingepreßte Nagelplatten als brauchbar erwiesen. Auch mit Epoxydharz in etwas größere Bohrungen eingeleimte, sandgestrahlte Bewehrungsstäbe können in Einzelfällen zur Anwendung kommen.

Die Verstärkungsteile müssen in der Lage sein, die auftretenden Querzugkräfte mit ausreichender Sicherheit aufzunehmen. Im allgemeinen ist von den jeweils zulässigen Beanspruchungen des Verstärkungsmaterials auszugehen. Für die Einleimflächen kann eine zulässige Haftspannung von 1,2 N/mm² für Stahl- und Buchenholzstäbe zugrunde gelegt werden. Die zulässige Zugspannung der praktisch fehlerfreien Buchenholzstäbe kann mit 20 N/mm² in Rechnung gestellt werden.

Die vornehmlich bei ausgeklinkten Probekörpern und geknickten Brettschichtstößen untersuchten Verstärkungsmaßnahmen können sinngemäß auch auf andere querzuggefährdete Konstruktionsformen übertragen werden.

Literatur

|2.1| American Institute of Timber Construction: Timber Construction Manual, 2. edition. John Wiley and Sons, Inc., New York u.a. 1974.

|2.2| FMPA-Stuttgart: Richtlinien zur Verstärkung von Durchbrüchen in Brettschichtträgern (Empfehlungen nach Versuchen der EGH bei der FMPA Stuttgart). Holzbau-Statik-Aktuell Folge 1, Mai 1976 und "Bauen mit Holz" 78. Jahrgang (1976), Seite 281.

|2.3| Kolb, H. und P. Frech: Untersuchungen an durchbrochenen Bindern aus Brettschichtholz. Holz als Roh- und Werkstoff 35 (1977), Seite 125/134.

|2,4| Möhler, K. und M. Rathfelder: konstruktive Möglichkeiten zur Aufnahme von Schub- und Querzugspannungen bei Brettschichtträgern. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 4, November 1979.

|2.5| Möhler, K. und H.-L. Mistler: Untersuchungen über den Einfluß von Ausklinkungen im Auflagerbereich von Holzbiegeträgern auf die Tragfähigkeit. Forschungsbericht Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe, 1978.

|2.6| Möhler, K. und H.-L. Mistler: Ausklinkungen am Endauflager von Biegeträgern. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 4, November 1979.

|2.7| Krabbe, E. und H. Neuhaus: Entwicklung von konstruktiven Maßnahmen zur Verhinderung von Schadensfällen durch Querzugspannungen bei verleimten Brettschichtträgern. Forschungsbericht Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1979.

|2.8| Blumer, H., E. Gehri und U. Keller: Zur Bemessung von gekrümmten Satteldachträgern aus Brettschichtholz. SAH Bulletin 1979 7/1.

|2.9| Gopu, V.K.A.: Repaired Pitch-Cambered Glulam Beams. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. (ASCE) Vol. 197, No. ST 7, July, 1981.

|2.10| Möhler, K. und K. Hemmer: Versuche mit eingeleimten Gewindestangen. Forschungsbericht Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), 1981.

|2.11| Möhler, K. und K. Hemmer: Eingeleimte Gewindestangen. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 6, Mai 1981.

|2.12| Peter, J. und M. Weber: Aufnahme von Querzugspannungen in gekrümmten Brettschichtträgern. Bauen mit Holz 12/1980, Seite 748/750.

|3.11| Barrett, J.D., R.O. Foschi and S.P. Fox: Perpendicular - to - Grain - Strength of Douglas - Fir. Canadian Jourual of Civil Engineering, Nr. 1, 1975.

|3.12| CIB Working, Group W 18, Timber Structures: Structural Timber Design Code, 4. Draft, June 1979.

|3.31| B. Strasser: Ermittlung der Haftfestigkeit und des - Spannungsverlaufs bei eingeleimten Gewindestangen. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe. 1981, unveröffentlicht.

|4.21| Ehlbeck J. und R. Görlacher: Tragverhalten von Queranschlüssen mittels Stahlformteilen, insbesondere Balkenschuhen, im Holzbau. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1983.

|4.31| Kolb, H.: Versuche an geleimten Rahmenecken und Montagestößen. Bauen mit Holz 70 (1968) S. 266 bis 271, S. 462 bis 470; 72 (1979) S. 121 bis 129, S. 387 bis 392.

|4.32| Kolb, H.: Festigkeitsuntersuchungen an gestoßenen und gekrümmten Teilen aus Brettschichtholz. Bauen mit Holz 71 (1969) S. 323 bis 334.

.//.

|4.33| Heimeshoff, B.: Berechnung von Rahmenecken mit Keilzinkenverbindungen. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 1, Mai 1976, S. 7/8.

|4.34| Möhler, K. und M. Rathfelder: Konstruktive Möglichkeiten zur Aufnahme von Schub- und Querzugspannungen bei Brettschichtträgern. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 4, November 1979, S. 1 bis 4.

|4.35| Kolb, H.: Berechnung geknickter, keilgezinkter Brettschichtträger mit positivem Biegemoment. Vortrag, gehalten in Karlsruhe am 04.06.1982.

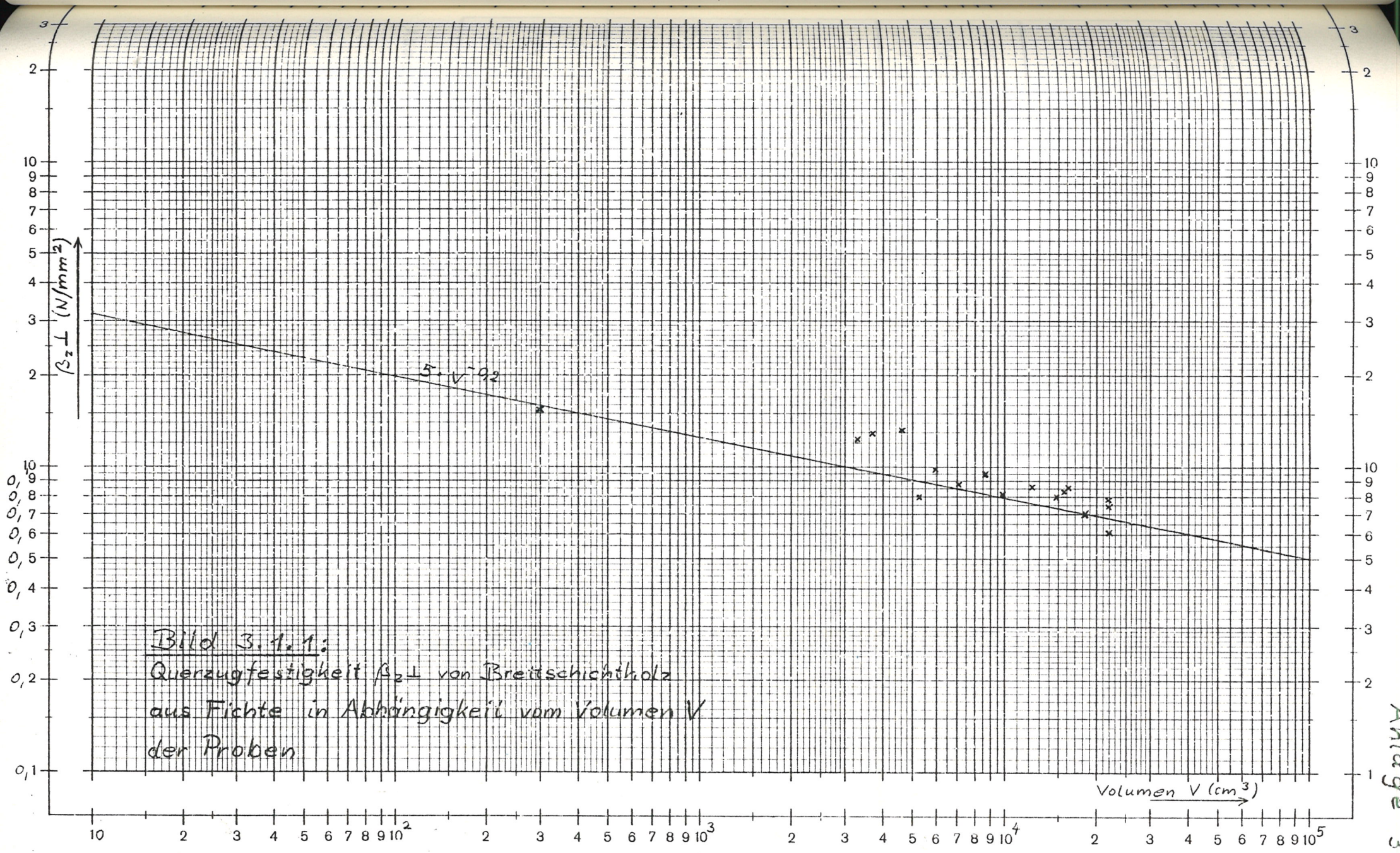


Bild 3.1.1:
Querzugfestigkeit $\beta_{z\perp}$ von Breitschichtholz aus Fichte in Abhängigkeit vom Volumen V der Proben

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHÜLL GMBH, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667152, Nr. 369½:1 MADE IN GERMANY

Beide Achsen logar. geteilt von 1 bis 10000 und 1 bis 300 Einheit 62,5 mm

Tabelle 1: Vorversuche mit verstärkten Brettschichtholz-Proben
- Ergebnisse -

Versuch Nr.	Art der Verstärkung		Bohr-durch-messer (mm)	Riß-last F_R (kN)	Bruch last max F (kN)	Verbesserung gegenüber maxF_H (Rißl./Bruchl.) (%)
VV 1	ohne Leim	1 M 16	14	12,25	12,25	20 / 20
VV 2	eingedrehte	2 M 8	7	22,8	22,8	29 / 29
VV 3	Gewindestangen	1 M 16	14	33,1	33,1	87 / 87
VV 4	Gang - Nail	b = 5cm	-	25,8	37,2	36 / 96
VV 5	Nagelplatten	b =10cm	-	27,5	40,2	45 / 112
VV 6	GN 14	b =20cm	-	22,0	47,0	16 / 147
VV 7	eingeleimte Buchenstäbe	1 Ø 25	26	38,5	45,8	103 / 141
VV 8		2 Ø 12	13	33,9	41,3	78 / 117
VV 9		2 Ø 25	26	68,2	68,2	259 / 259
VV 10	eingeleimte Betonstähle	1BSt440/500RUØ14	16	35,6	45,4	87 / 139
VV 11		4BSt220/340GUØ 8	9	30,2	30,2	59 / 59
VV 12		4BSt440/500RUØ 8	10	35,8	35,8	88 / 88

Abmessungen: VV1: 10 x 10 x 40 cm
alle anderen Versuchskörper: 10 x 20 x 40 cm

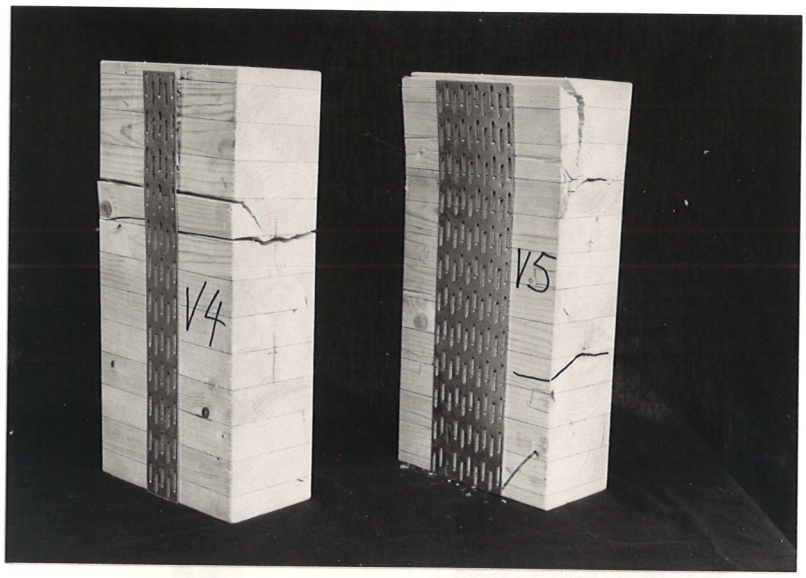


Bild 3.1.2:

Vorversuche
VV 4 und VV 5
Verstärkung:
5 und 10 cm breite
Nagelplatten

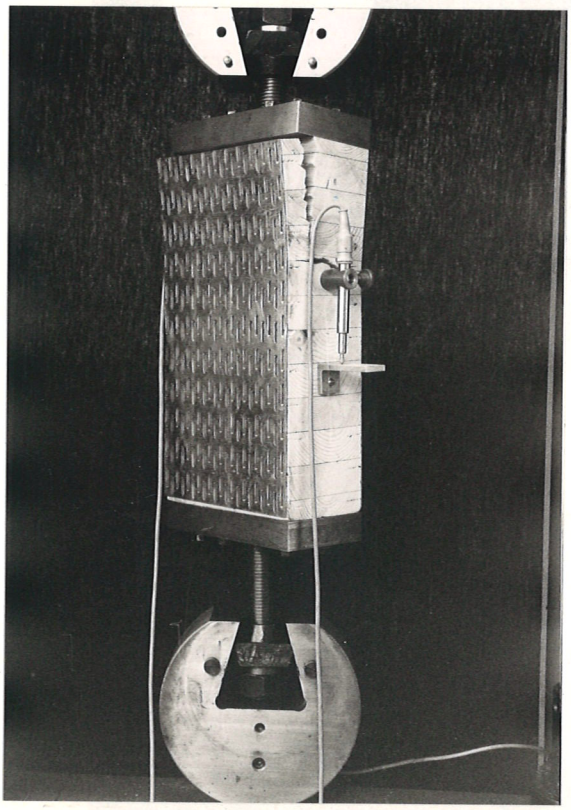


Bild 3.1.3:

Vorversuch VV 6
in der Prüfmaschine

Verstärkung: 20 cm breite
Nagelplatten

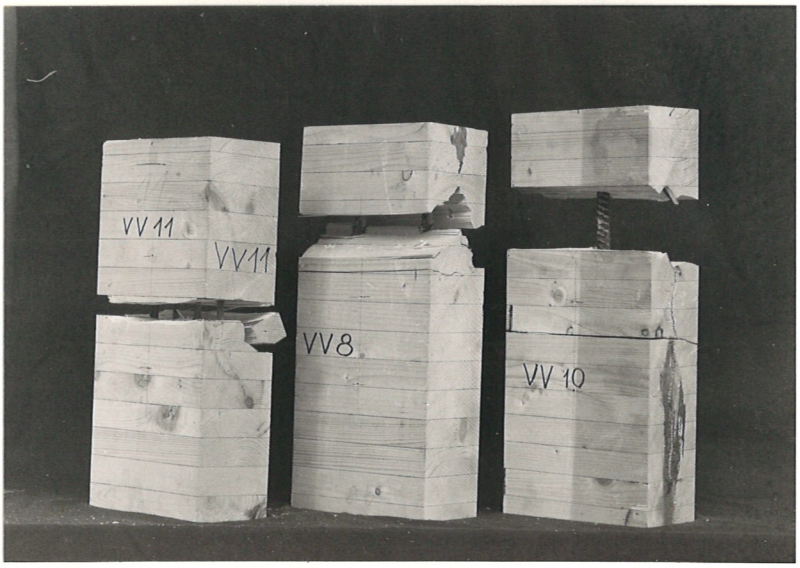


Bild 3.1.4 :

Vorversuche VV 8,
VV 10 und VV 11

Verstärkung:
Buchenstäbe und
Betonstähle

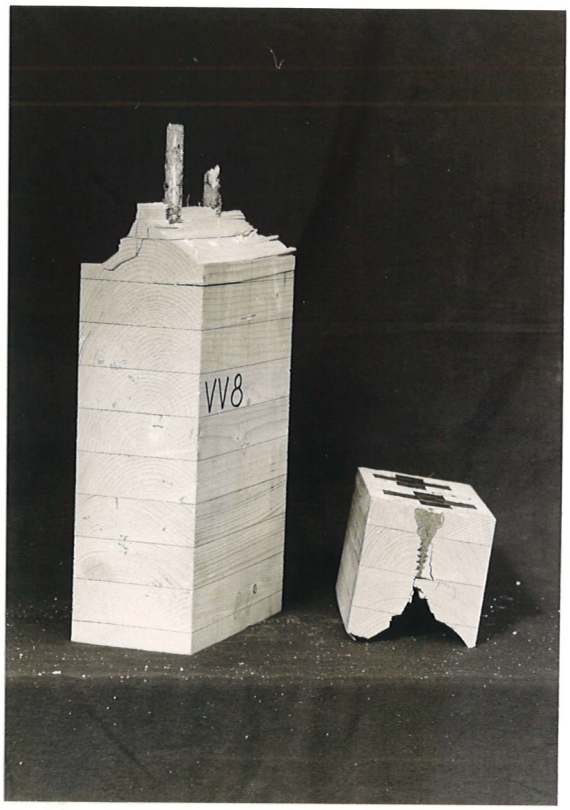


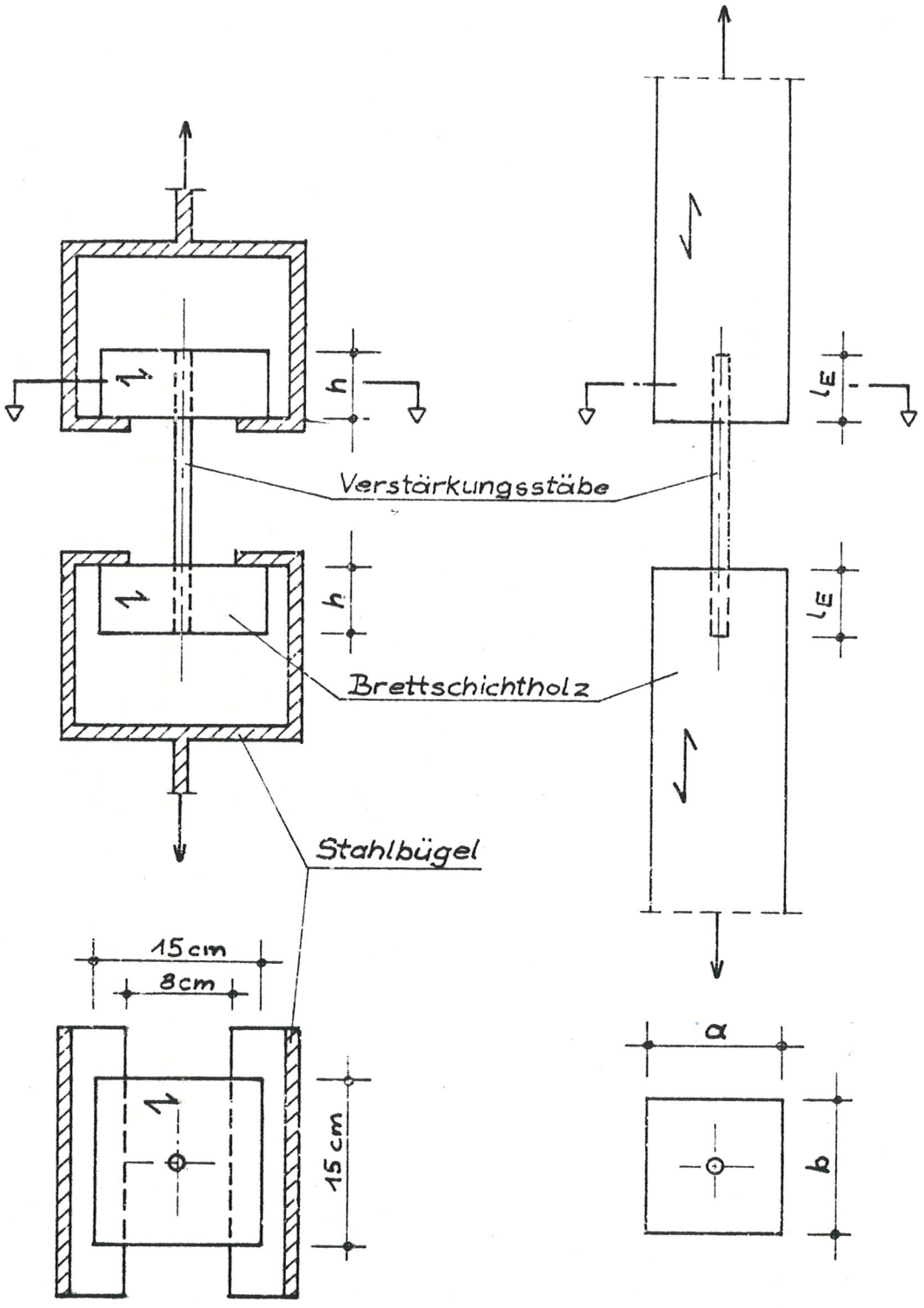
Bild 3.1.5 :

Vorversuch VV 8
Verstärkung:
2 Buchenstäbe Ø 8 mm



Bild 3.1.6 :

Vorversuch VV11
Verstärkung:
4 BSt 240/320 GU
Ø 8 mm



Anordnung senkrecht zur Holzfaserrichtung

Reihe 1 bis 7: h = 5 cm
Reihe 10: h = 8 cm

Anordnung parallel zur Holzfaserrichtung

Reihe 8 und 9: a = b = 12,5 cm
l_E = 5 cm
Reihe 11: a = b = 10 cm
l_E = 25 cm

Bild 3.2.1:

Versuchsanordnung zur Ermittlung der Ausziehwiderstände

Reihe	Verstärkungs-stab	Stab-Ø (mm)	Bohr-Ø (mm)	Richtung Achse-Faser	Einleim-länge l_E (mm)	Leim	max F (kN)			Mittel-wert (kN)	$\bar{\tau}$ [1] (N/mm^2)
1	Buche	12	13	⊥	50	Resorcin	6,55	7,05	7,95	7,2	3,5
9	Buche	12	13	∥	50	Resorcin	8,05	5,95	8,70	7,6	3,7
10	Buche	12	13	⊥	80	Resorcin	(7,25)	14,20	12,95	13,6	4,2
11	Buche	12	13	∥	250	Resorcin	(10,65)	(16,05)	(11,55)	(12,8)	(1,3)
2	Buche	25	26	⊥	50	Resorcin	16,35	17,35	14,95	16,2	4,0
8	Buche	25	26	∥	50	Resorcin	19,25	18,80	18,80	19,0	4,7
3	BSt 420/500 RU	8	10	⊥	50	Resorcin	3,40	4,55	4,25	4,1	2,6
4	BSt 220/340 GU	8	9	⊥	50	Resorcin	5,50	5,45	6,05	5,7	4,0
5	BSt 420/500 RU	14	16	⊥	50	Resorcin	9,40	9,60	10,45	9,8	3,9
6	BSt 420/500 RU	8	10	⊥	50	Epoxyd	14,60	14,25	13,45	14,1	9,0
7	BSt 220/340 GU	8	9	⊥	50	Epoxyd	12,50	12,70	11,35	12,2	8,6

1) auf Bohrlochumfang bezogen

( ) Zugbruch im Buchenstab

Tabelle 2: Ergebnisse der Ausziehversuche
(Prüfkörper nach Anlage 3.5)

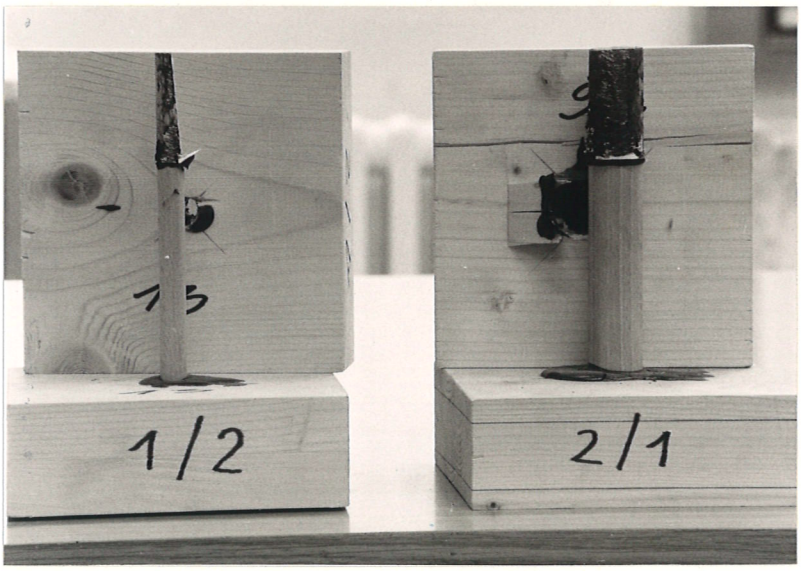


Bild 3.2.2 :

Ausziehversuche
⊥ Faserrichtung
Buchenstäbe
Resorcinharzleim

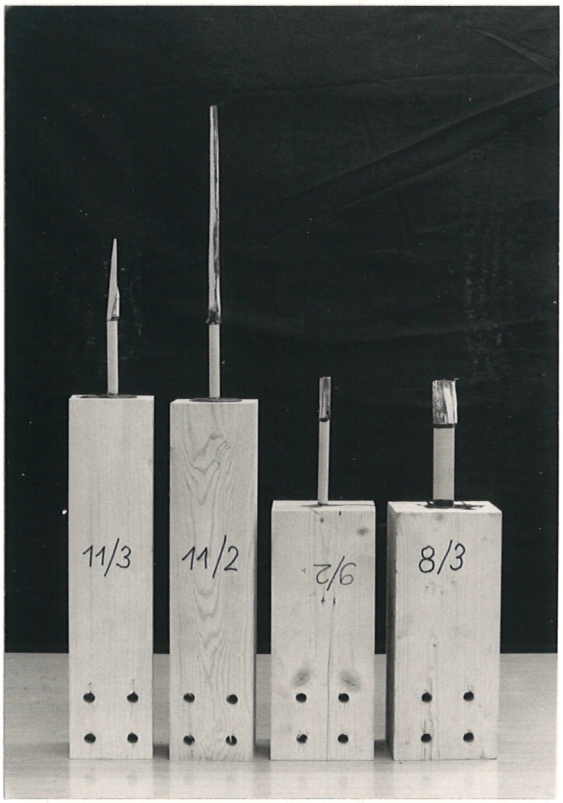


Bild 3.2.3 :

Ausziehversuche
|| Faserrichtung
Buchenstäbe
Resorcinharzleim

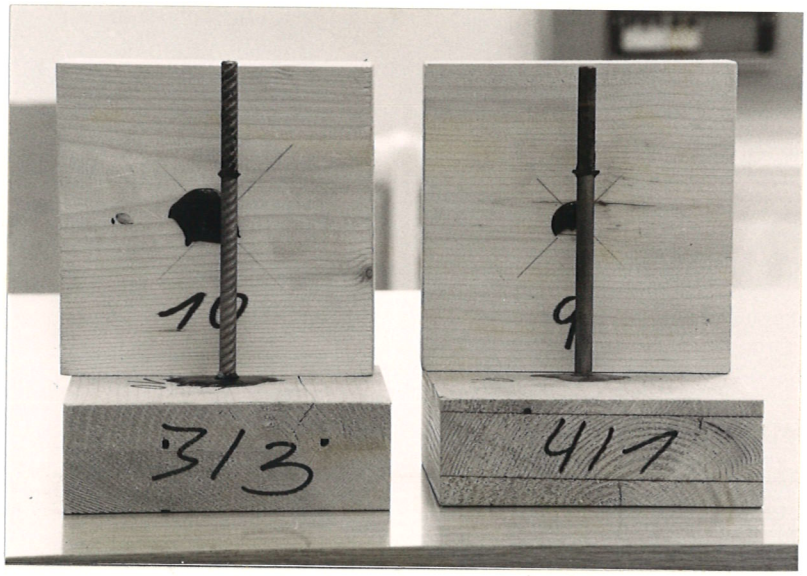


Bild 3.2.4 :

Ausziehversuche
⊥ Faserrichtung
BSt 240/320 GU
BSt 420/500 RU
Resorcinharzleim

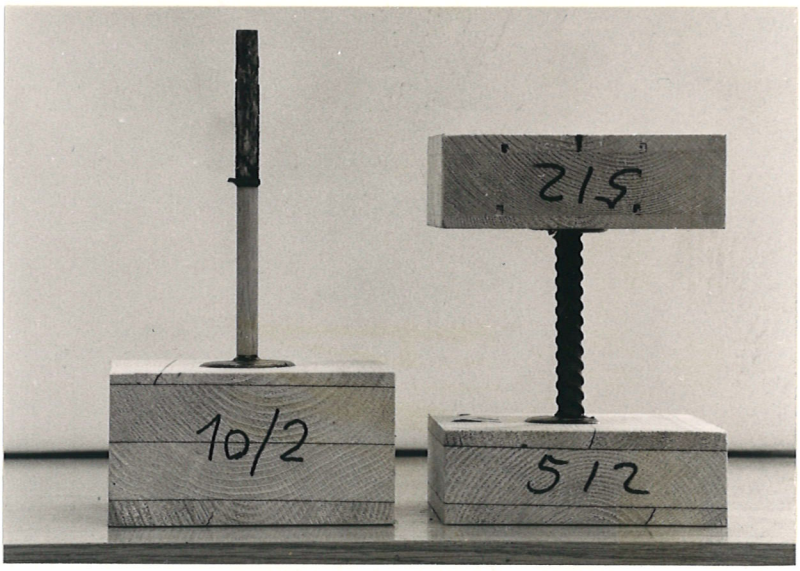


Bild 3.2.5 :

Ausziehversuche
⊥ Faserrichtung
BSt 420/500 RU und
Buchenstab
Resorcinharzleim

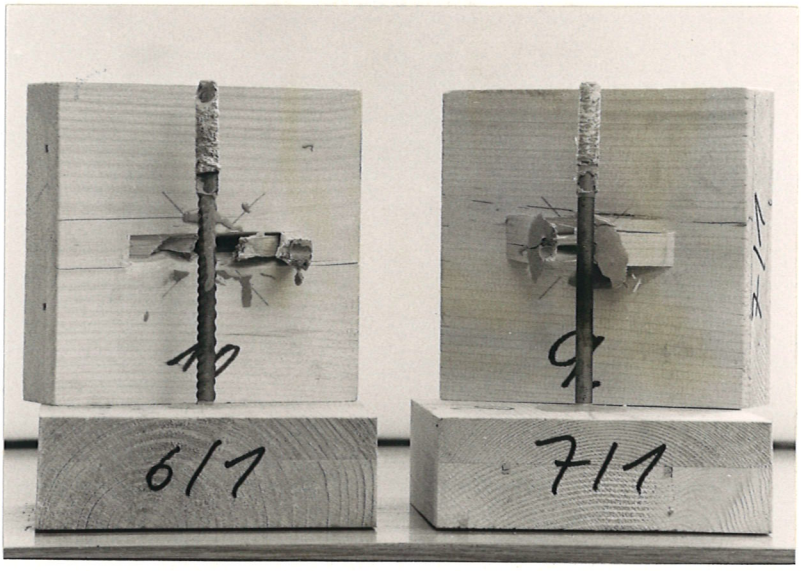


Bild 3.2.6 :

Ausziehversuche
⊥ Faserrichtung
BSt 240/320 GU
BSt 420/500 RU
Epoxydharzkleber

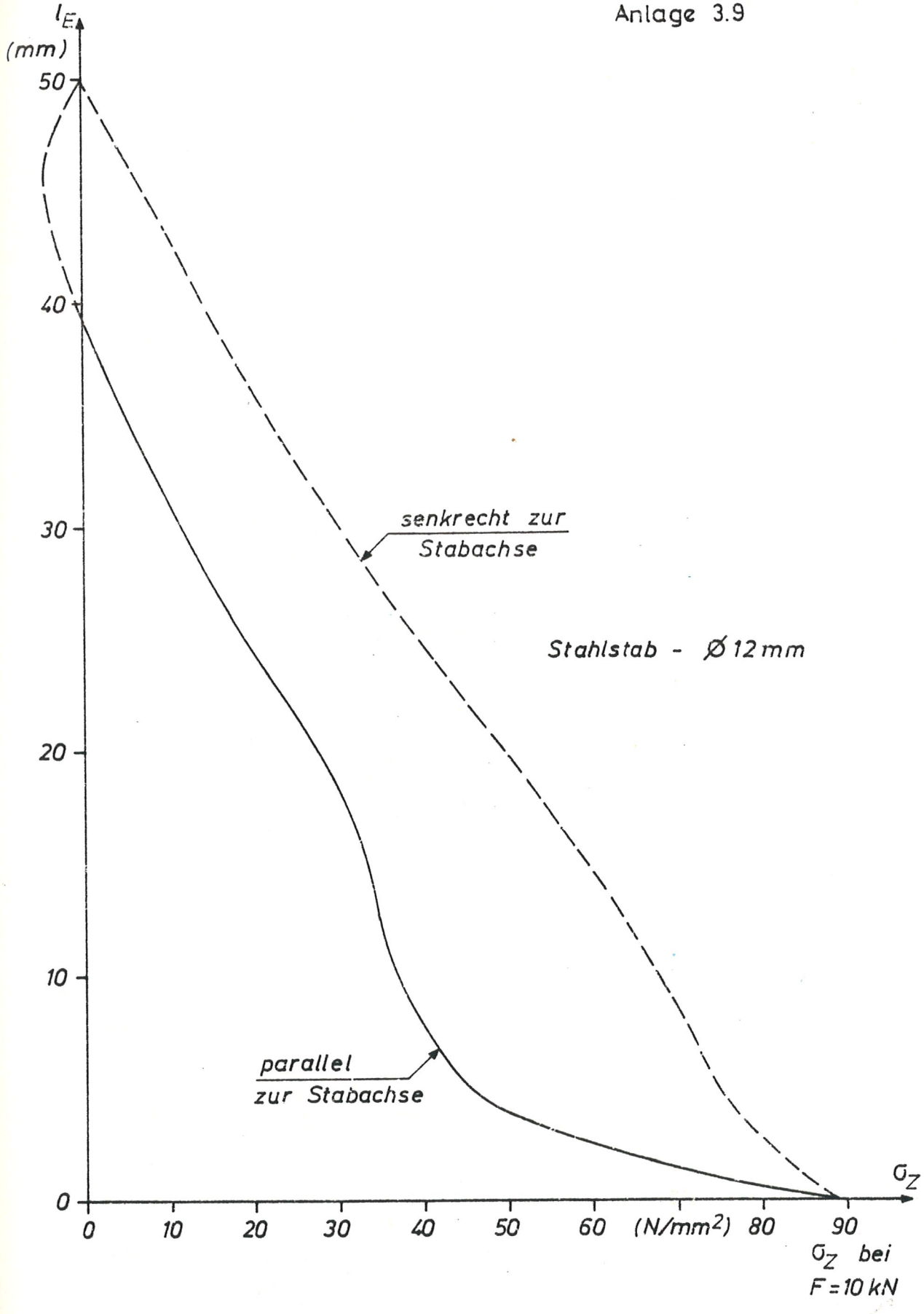


Bild 3.3.1: Stabzugspannungsverlauf bei unterschiedlicher Holzfaserrichtung

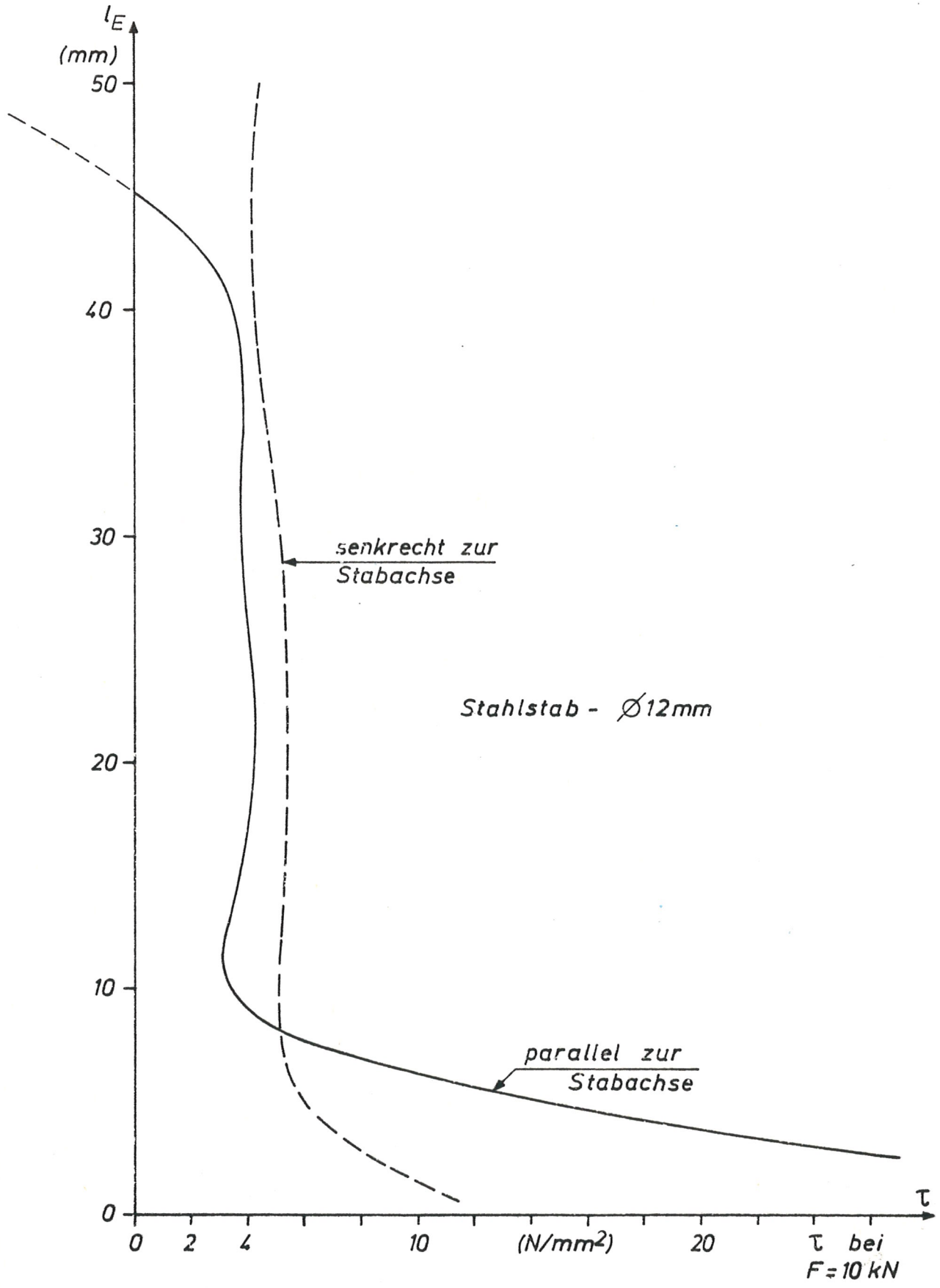


Bild 3.3.2: Haftspannungsverlauf bei unterschiedlicher Holzfaserrichtung

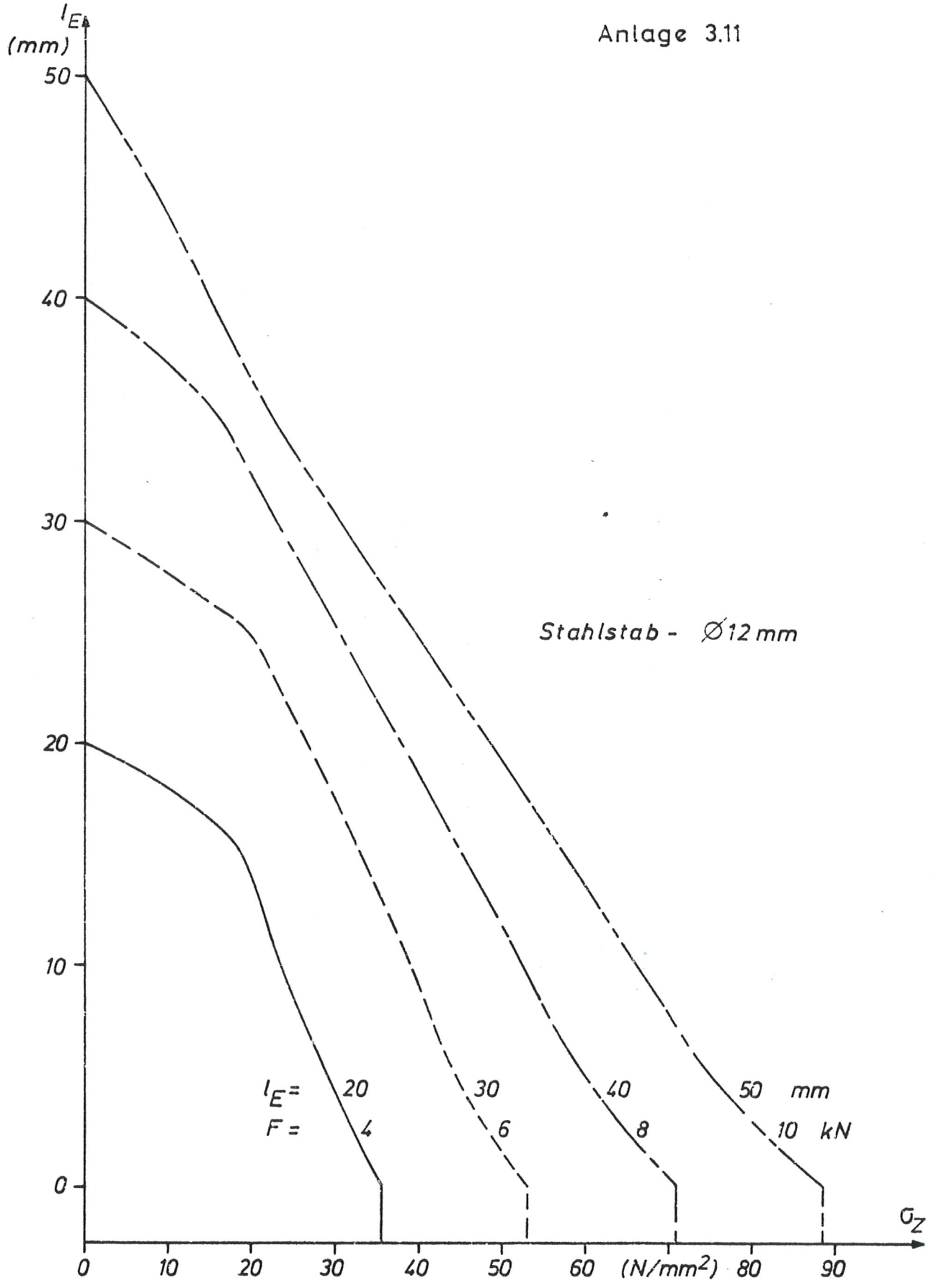


Bild 3.3.3: Stabzugspannungsverlauf bei unterschiedlichen Einleimlängen (Belastung F proportional der Einleimlänge)

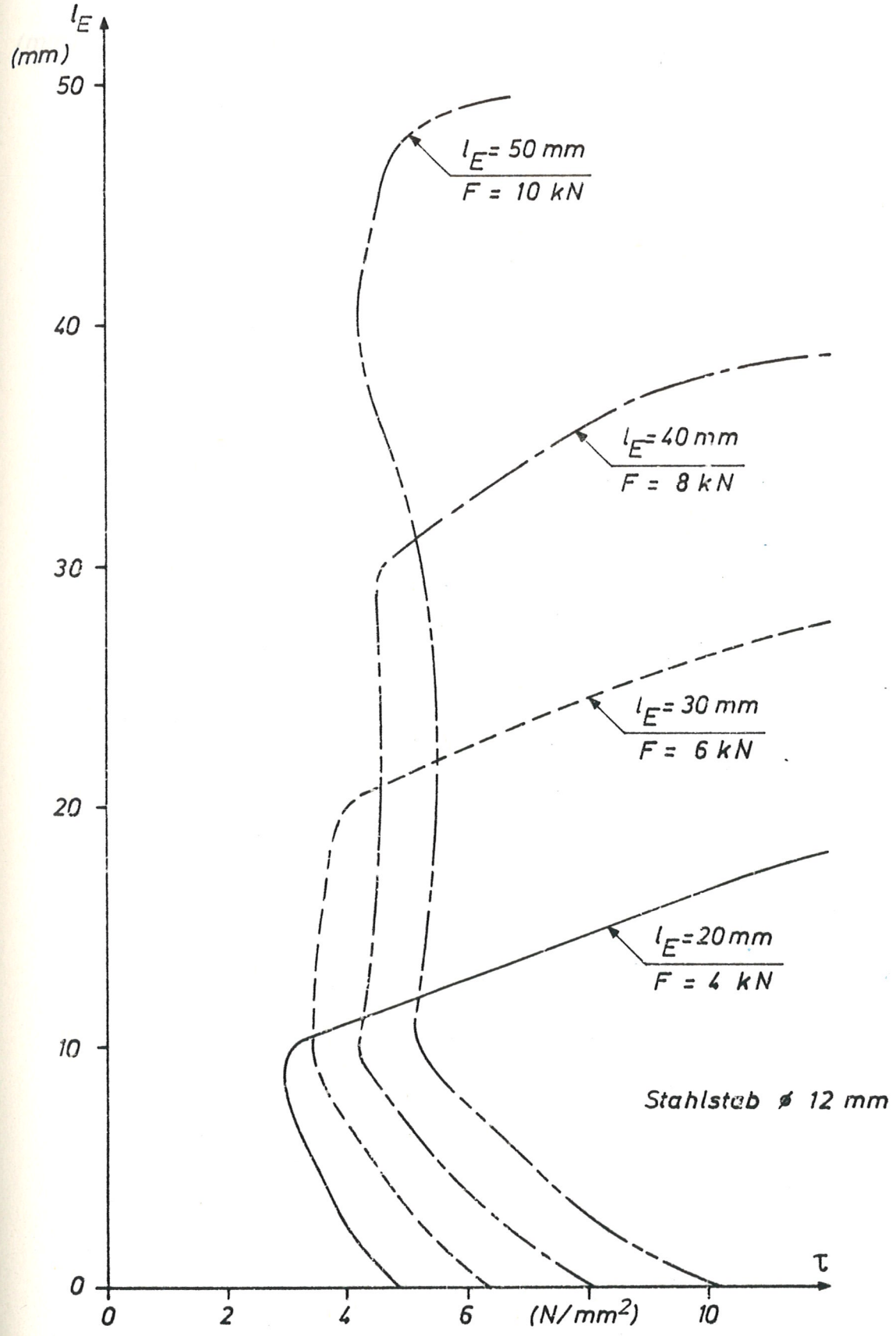


Bild 3.3.4 : Haftspannungsverlauf bei unterschiedlichen Einleimlängen

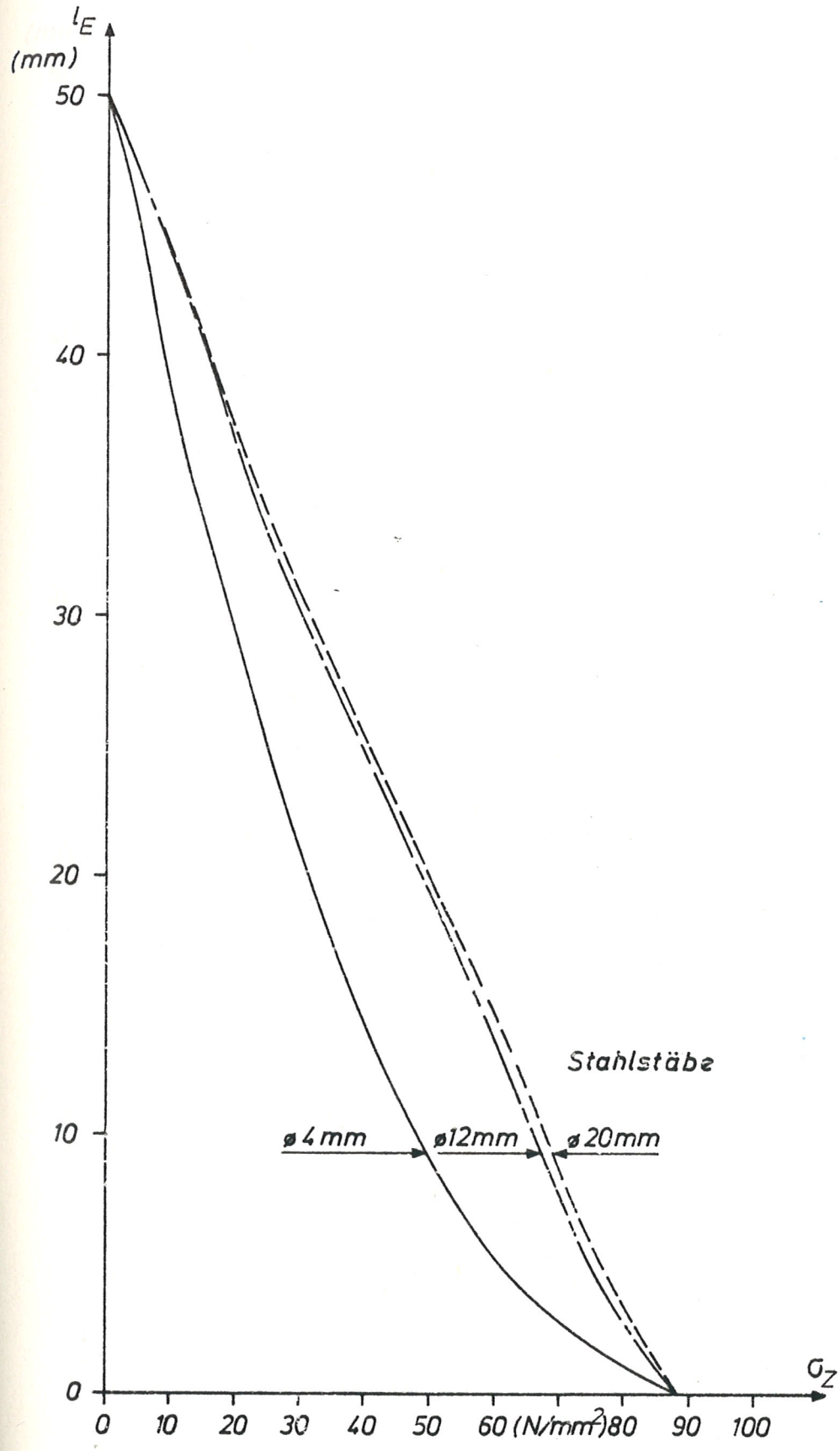


Bild 3.3.5: Stablängsspannungsverlauf bei unterschiedlichen Stabdurchmessern

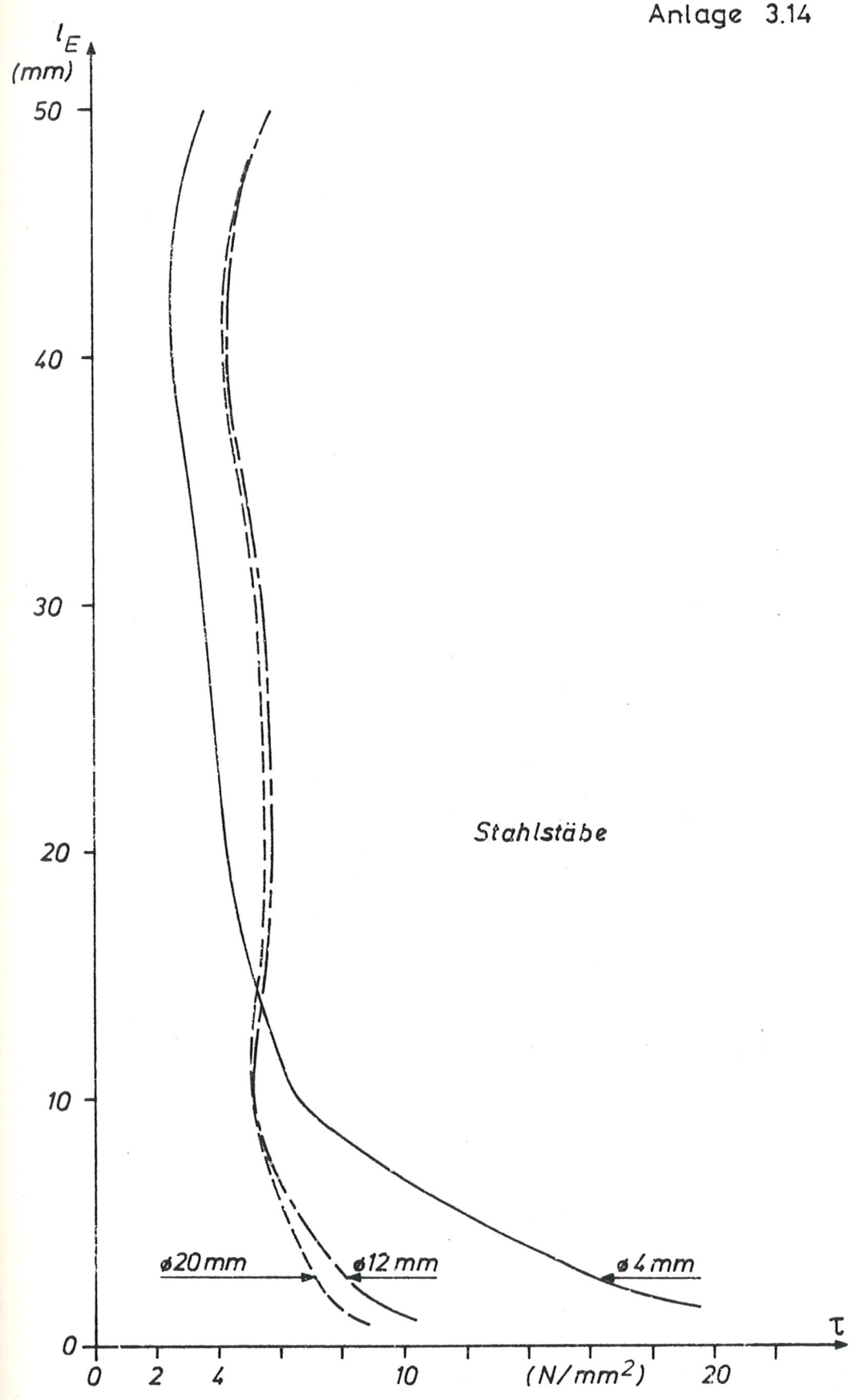


Bild 3.3.6: Haftspannungsverlauf bei unterschiedlichen Stabdurchmessern

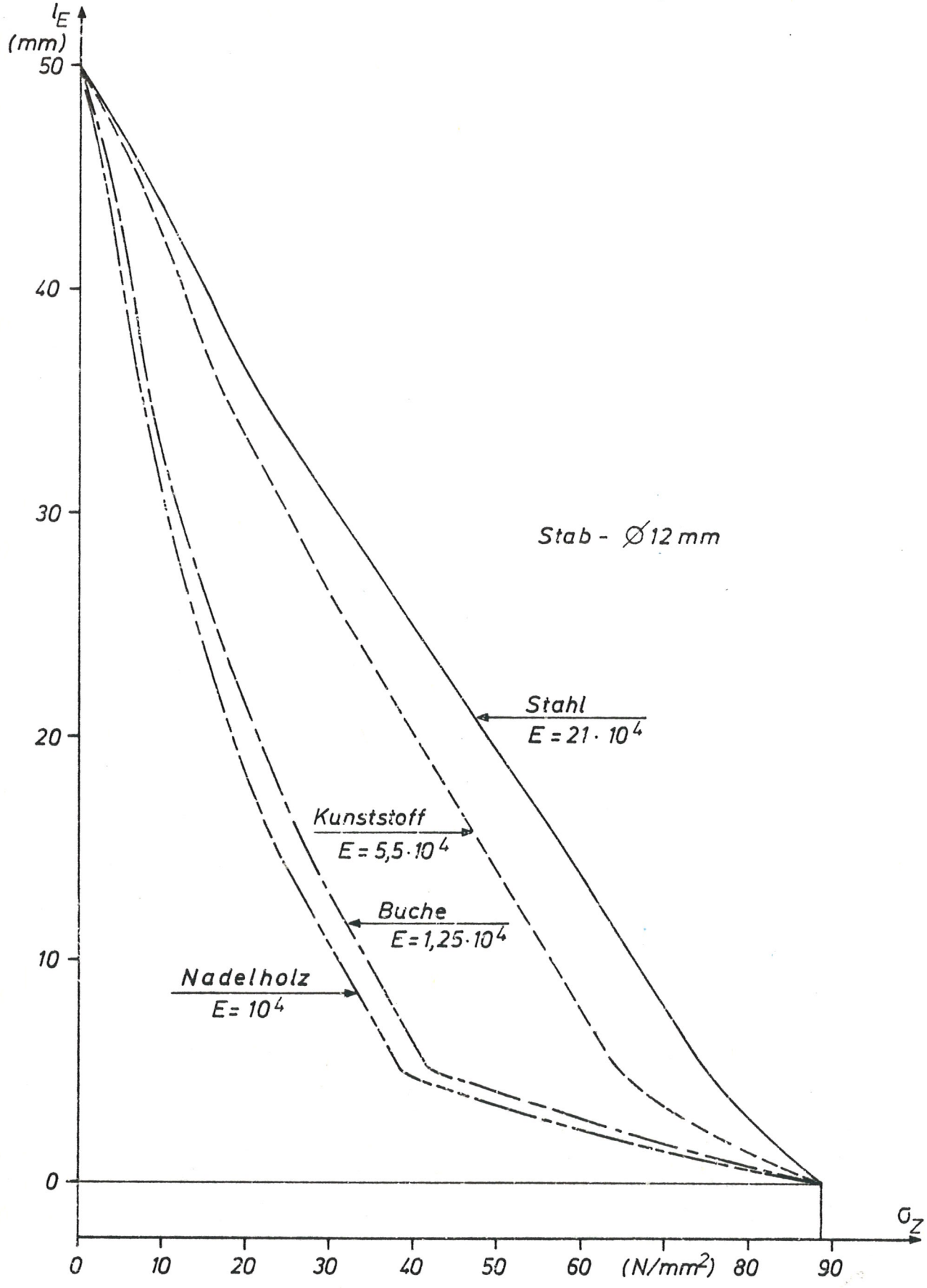


Bild 3.3.7: Stablängsspannungsverlauf bei unterschiedlichem E-Modul

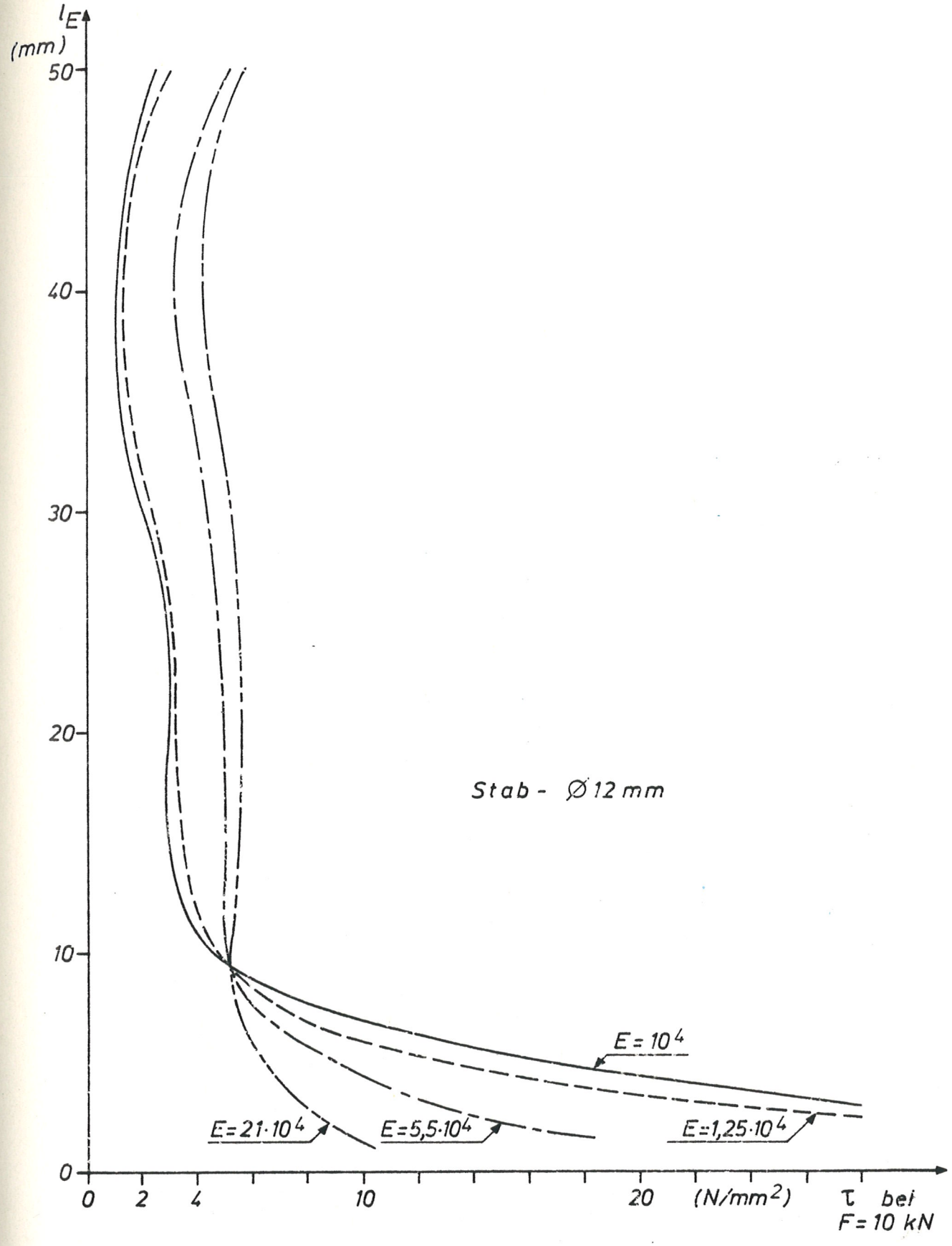


Bild 3.3.8 : Haftspannungsverlauf bei unterschiedlichem E-Modul

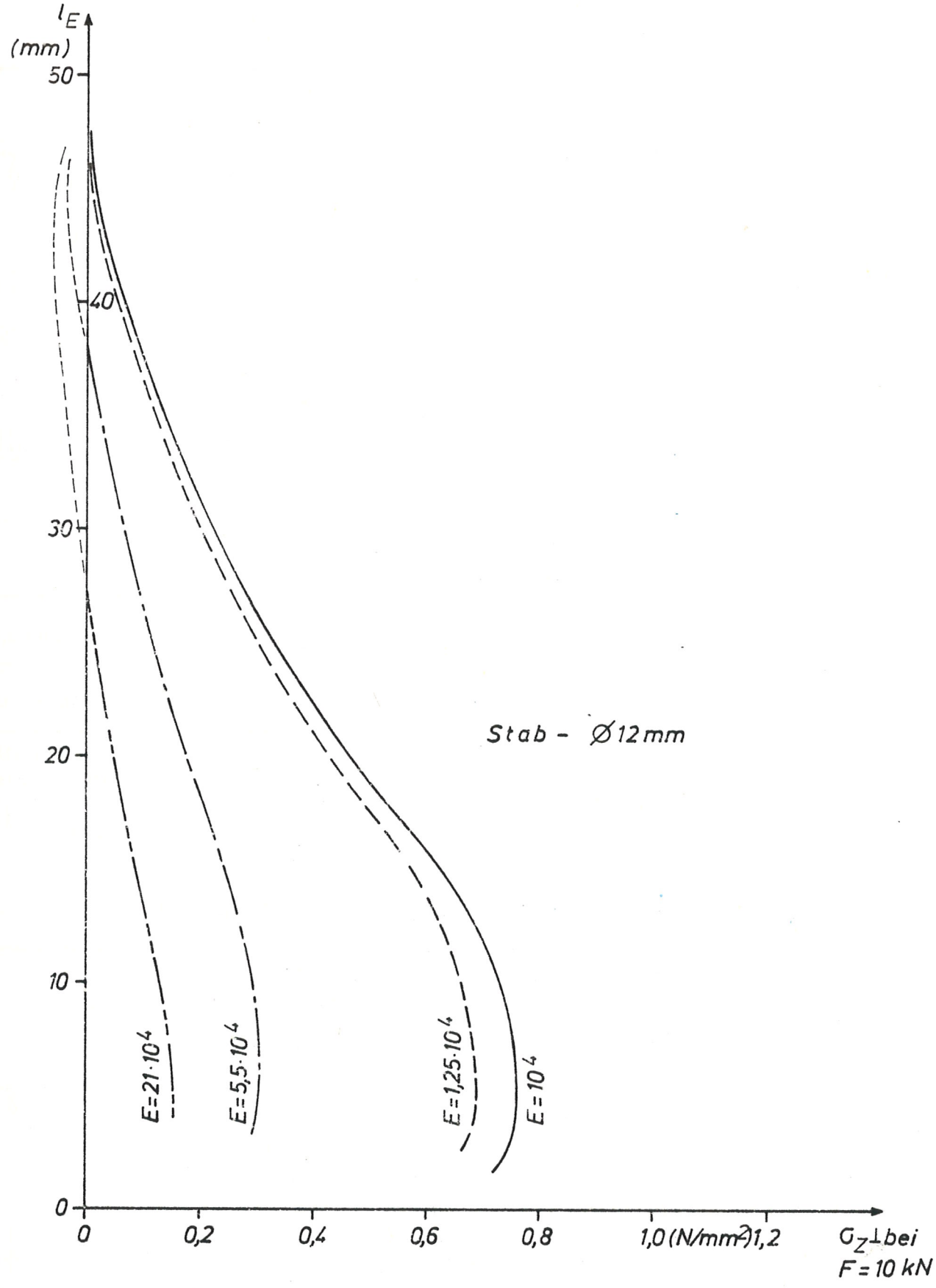


Bild 3.3.9 : Querspannungsverlauf im Holz
(im Abstand von 11 mm von der Stabachse)

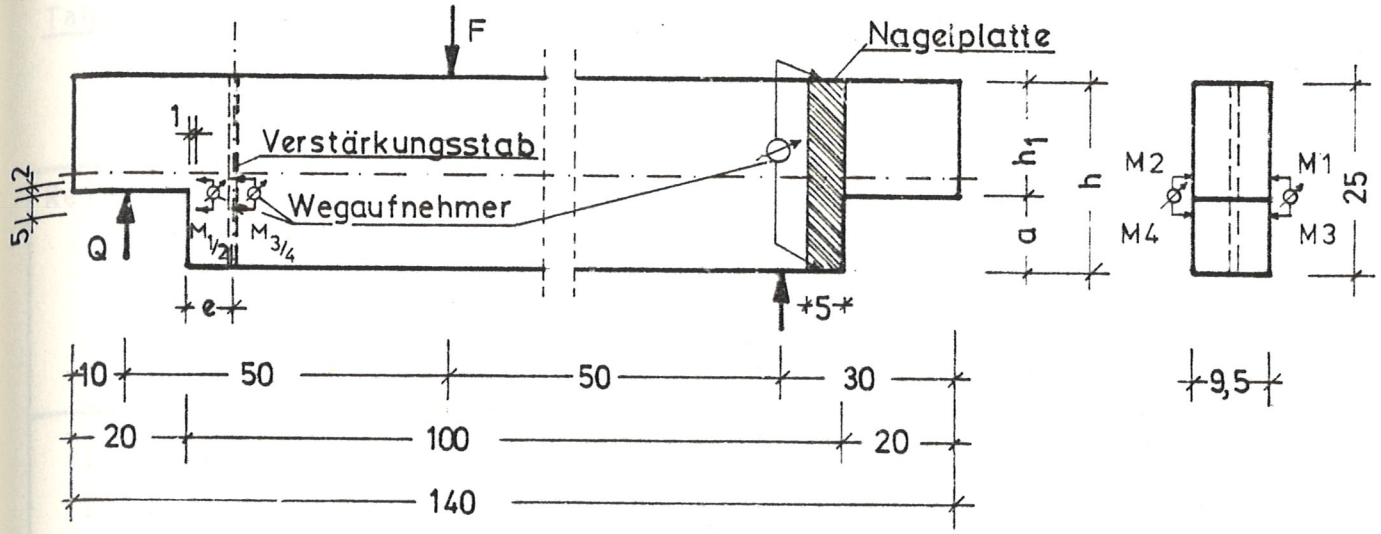


Bild 4.1.1: Ausgeklinkter Versuchsträger Reihe I bis VI

	Nadelholz GKL. II	Brettschichtholz GKL. II
Biegung zul F (kN)	41.7	45.8
Querkraft *) zul $Q = \frac{2}{3} b \cdot h_1 \cdot$ zul $\tau_{\parallel} \cdot k$ (kN)	2.25	3.0
Querkraft *) mit Verstärkung zul $Q = \frac{2}{3} b \cdot h_1 \cdot$ zul $\tau_{\parallel}$ (kN)	7.5	10.0

*) für $h_1 = 0{,}5\ h = 12{,}5$ cm

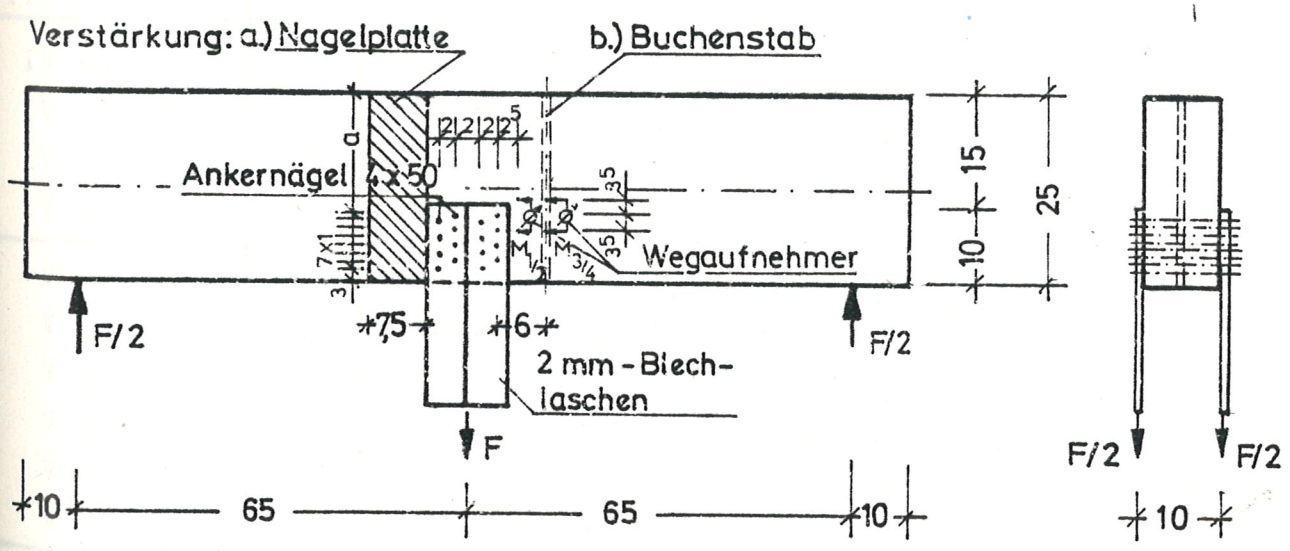


Bild 4.2.1: Versuchskörper mit Queranschluß Reihe VII

Verbindungsmittel : zul F = 24 kN

Maße in cm

Tabelle 3: Versuche mit ausgeklinkten Trägern
- Übersicht -

Reihe	Ausklinkungsverhältnis a/h	Abstand e (mm)	Verstärkungsmaßnahme Werkstoff	Stab-Ø (mm)	Bohr-Ø (mm)	zulässige Querkraft nach 2.6 $zulQ_k$ (kN)	$zulQ_{(k=1)}$ (kN)	Bemerkung
I 0	0,5	-	-	-	-	3,0	-	keine Verst.
I 1	"	30	1 Buchenstab	20	22	"	10,0	-
I 2	"	60	"	"	"	"	"	-
I 3	"	80	"	"	"	"	"	-
II 1	0,16	60	"	"	"	9,3	16,8	anderes Ausklinkungsverhältnis
II 2	0,28	60	"	"	"	4,3	14,4	
III 1	0,5	40	"	12	13	3,0	10,0	-
III 2	"	80	"	25	26	"	"	-
III 3	"	40	BSt 220/340GU	12	13	"	"	-
III 4	"	"	BSt 420/500RU	12	14	"	"	-
III 5	"	"	Gewindestange	M12	12	"	"	-
III 6	"	"	Nagelplatten GN 14 b=5cm	-	-	"	"	-
III 7	"	40	2 Buchenstäbe	12	13	"	"	-
III 8	"	"	"	12	13	"	"	l_E = 55 mm
IV 0	"	-	-	-	-	2,14	-	Vollholz
IV 1	"	60	1 Buchenstab	20	22	"	7,13	b = 9,5 cm
IV 2	"	40	BSt 220/340GU	12	13	"	"	"
IV 3	"	"	Gewindestange	M12	12	"	"	"
V 0	"	-	-	-	-	3,0	-	Klimawechsel
V 1	"	60	1 Buchenstab	20	22	"	10,0	
V 2	"	40	BSt 220/340GU	12	13	"	"	
V 3	"	"	Gewindestange	M12	12	"	"	
V 4	"	60	1 Buchenstange	20	22	2,14	7,13	Vollholz b=9,5cm
V 5	"	-	-	-	-	"	-	
VI 0	"	-	-	-	-	3,0	-	Langzeitvers.
VI 1	"	60	1 Buchenstab	20	22	"	10,0	
VI 2	"	40	BSt 220/340GU	12	13	"	"	
VI 3	"	"	Gewindestange	M12	12	"	"	
VI 4	"	-	2 Nagelplatten GN 14 b=5cm	-	-	"	"	

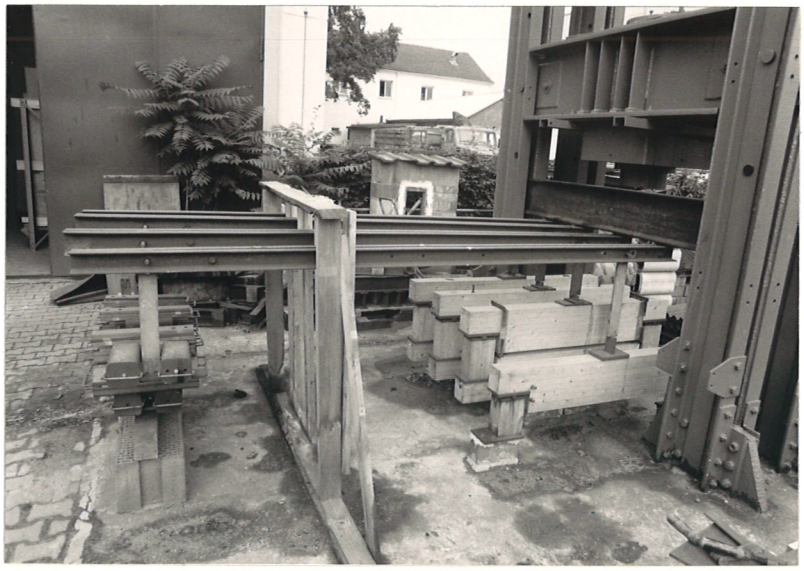


Bild 4.1.2 : Langzeitversuche Reihe VI



Bild 4.1.3 : Langzeitversuche Reihe VI

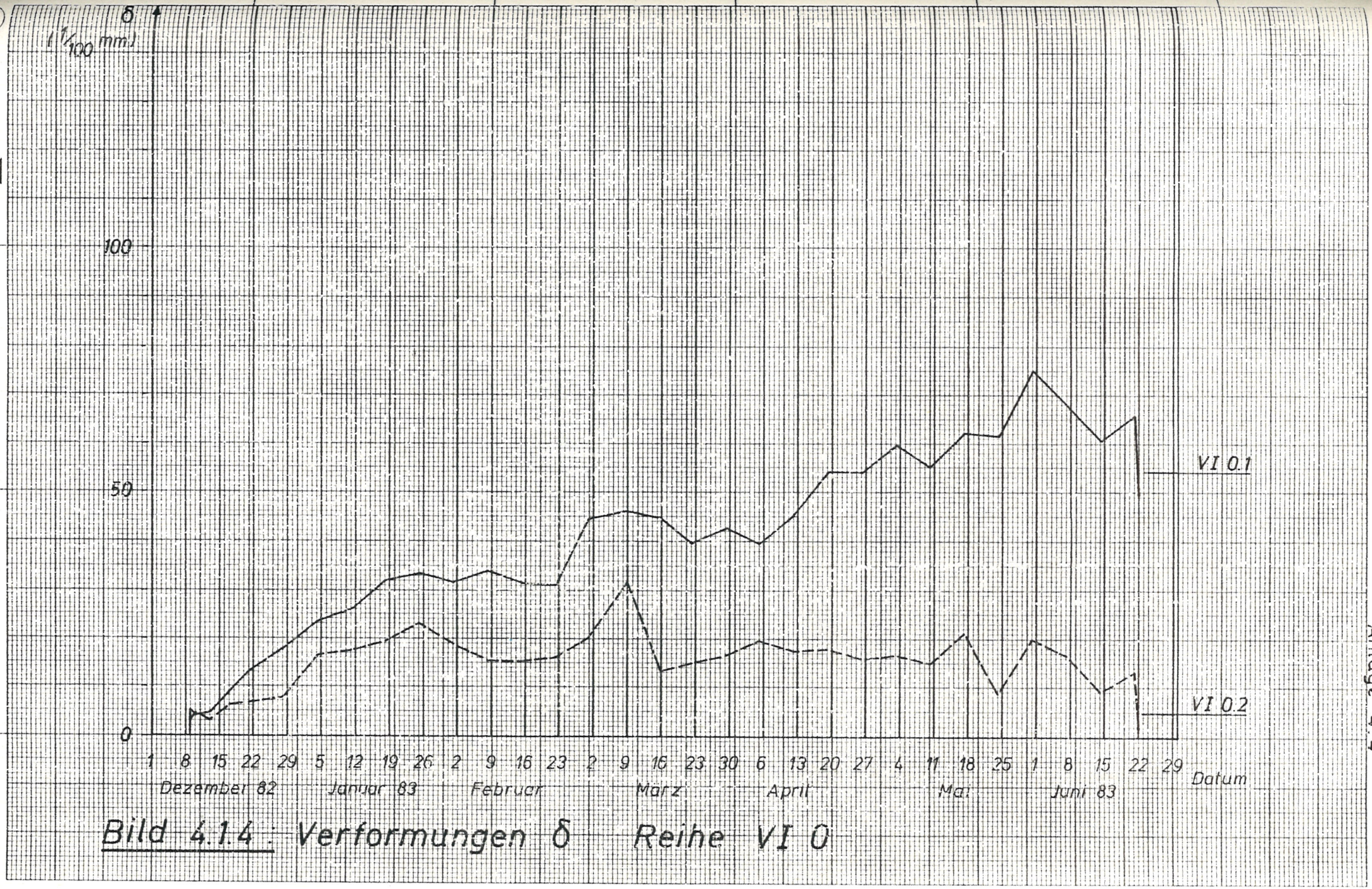


Bild 4.1.4 : Verformungen δ Reihe VI 0

Anlage 4.4

A4 210x297 mm
MADE IN GERMANY

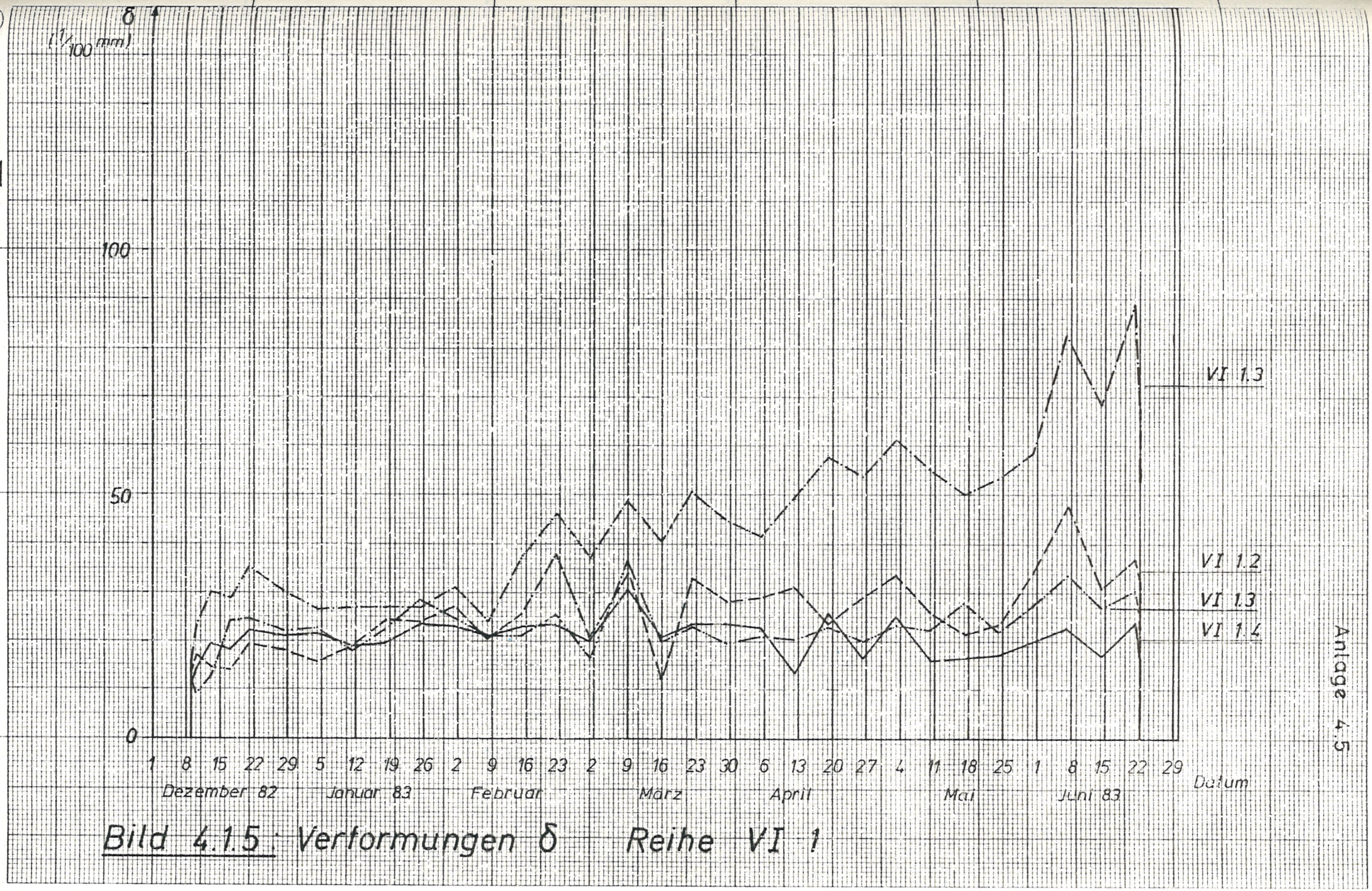


Bild 4.1.5 : Verformungen δ Reihe VI 1

Anlage 4.5

A 4 210 x 297 mm
MADE IN GERMANY

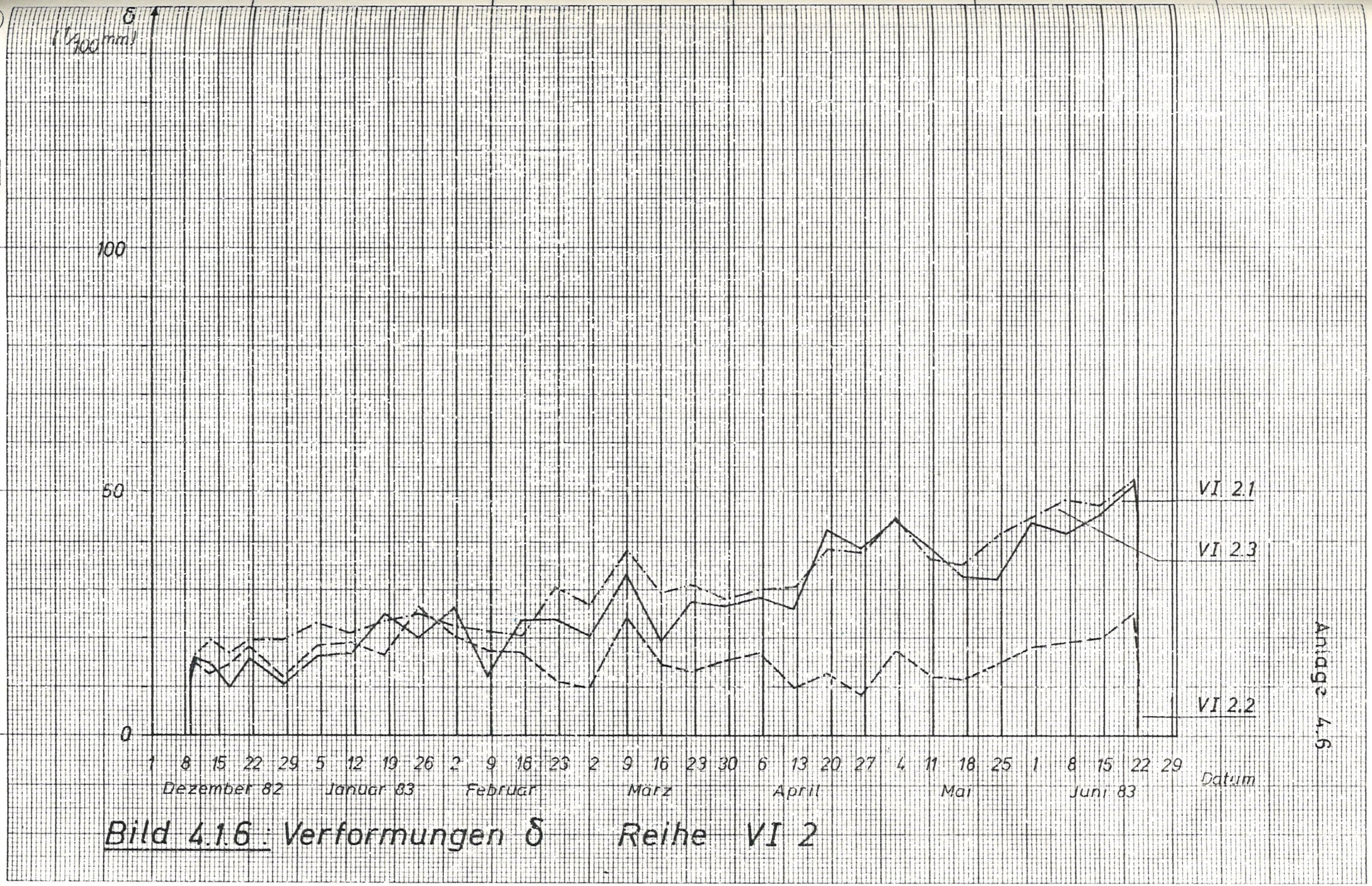
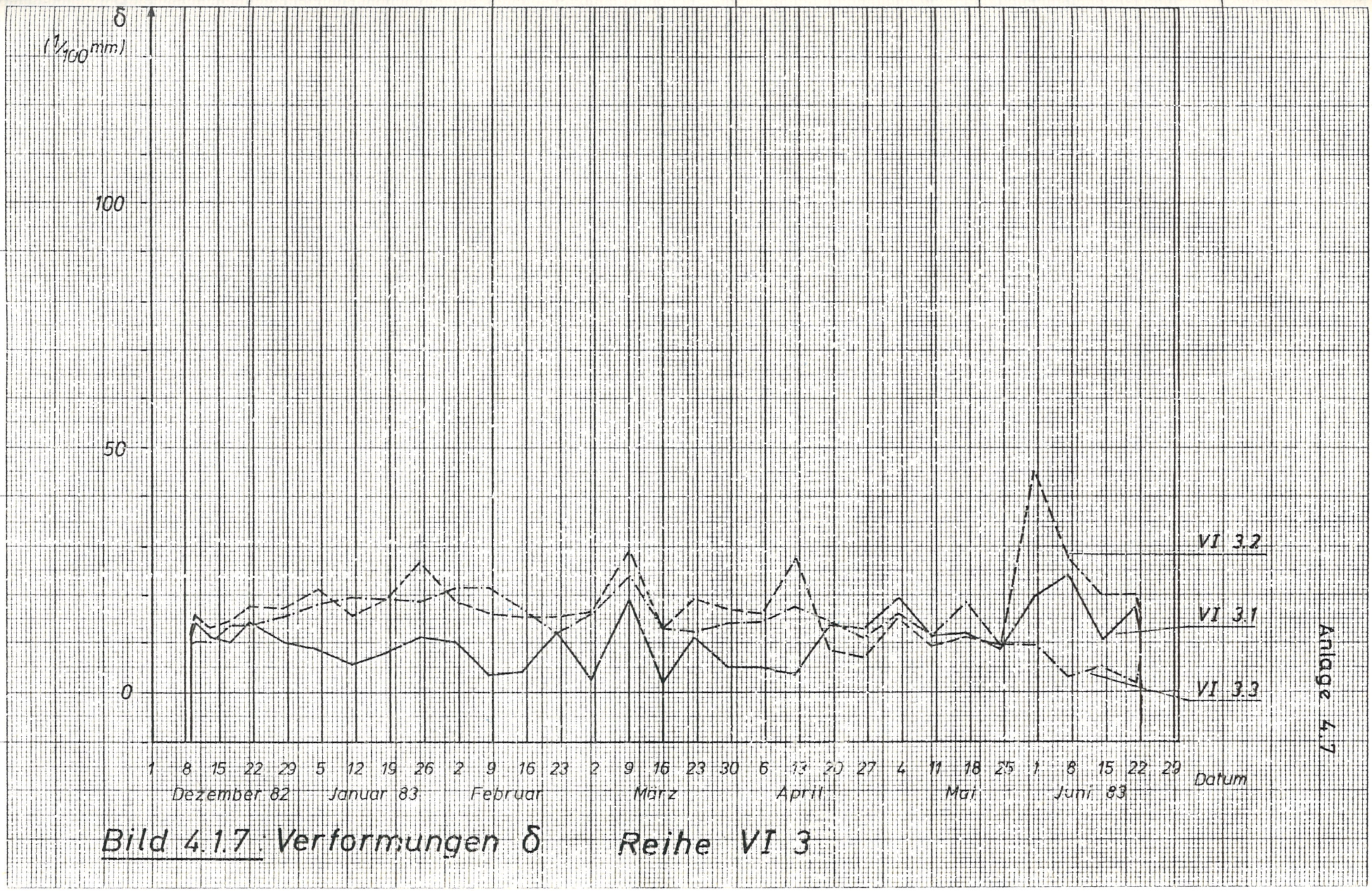


Bild 4.1.6: Verformungen δ Reihe VI 2

Anlage 4.6

A 4 210 x 297 mm
MADE IN GERMANY



Anlage 4.7

Bild 4.1.7 Verformungen δ Reihe VI 3

SELECTA A 4 210x297 mm
MADE IN GERMANY

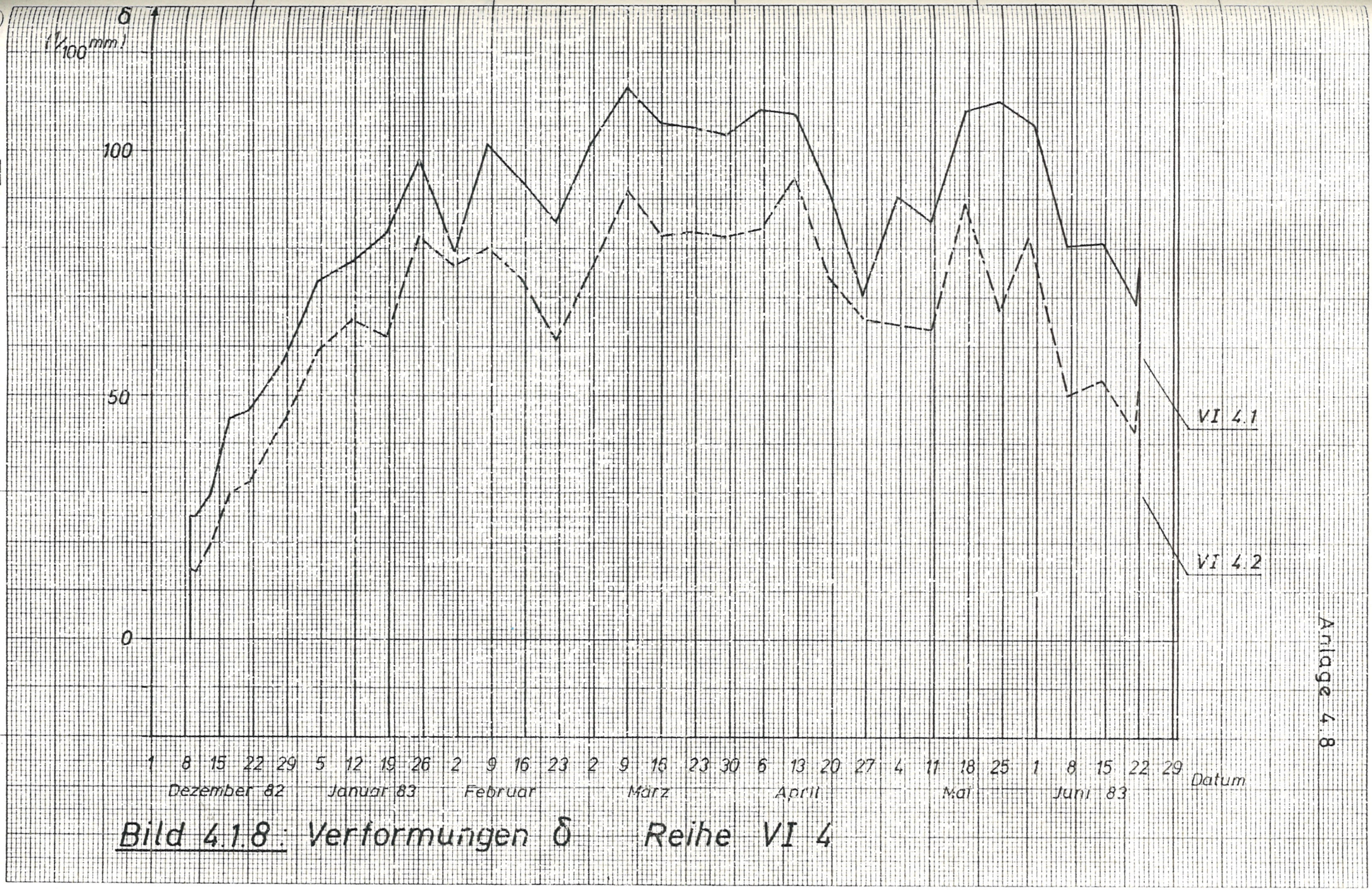
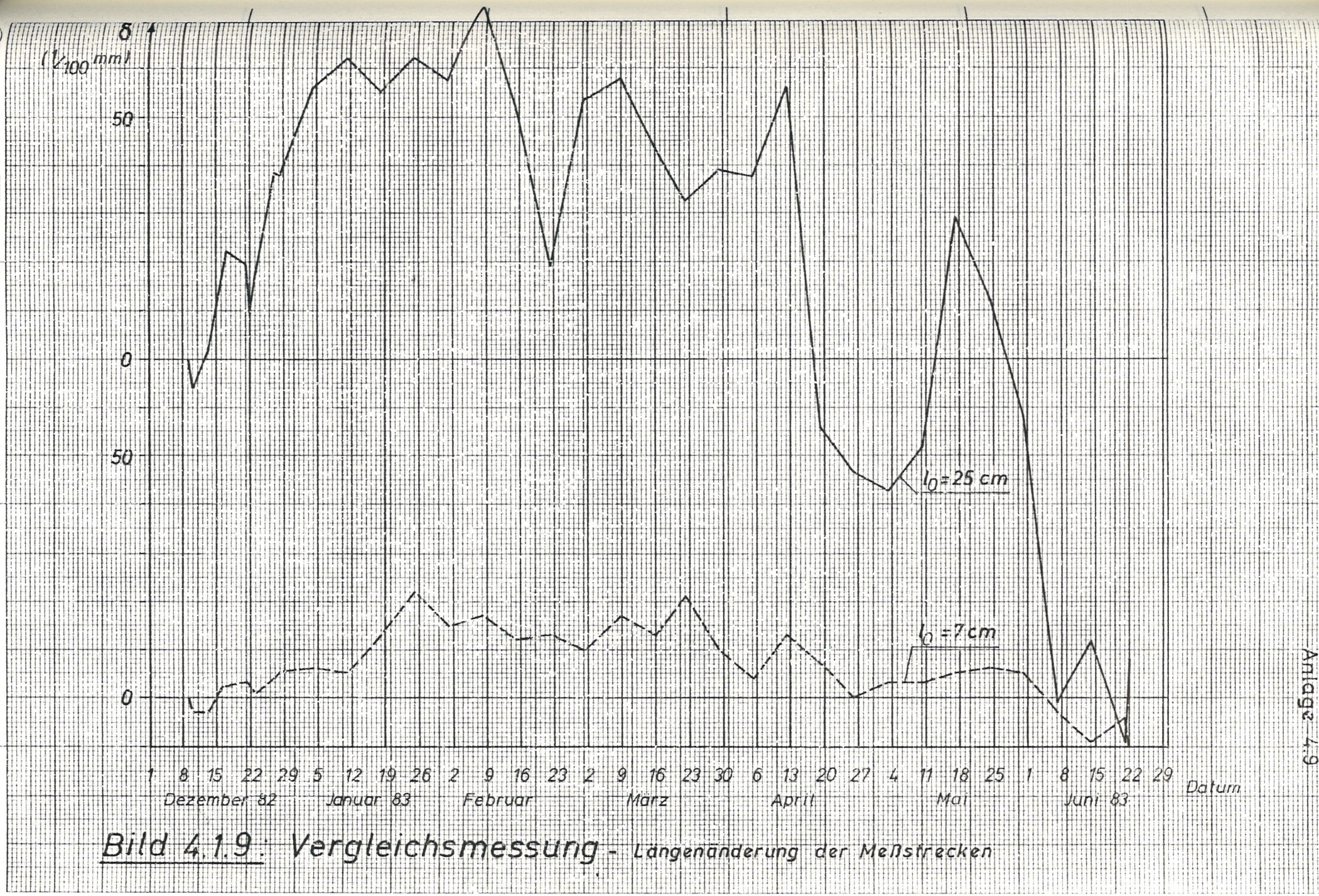


Bild 4.1.8: Verformungen δ Reihe VI 4

Anlage 4.8

A 4 210 x 297 mm
MADE IN GERMANY



Anlage 4.9

Bild 4.1.9: Vergleichsmessung - Längenänderung der Meßstrecken

A 4 210x297 mm
MADE IN GERMANY

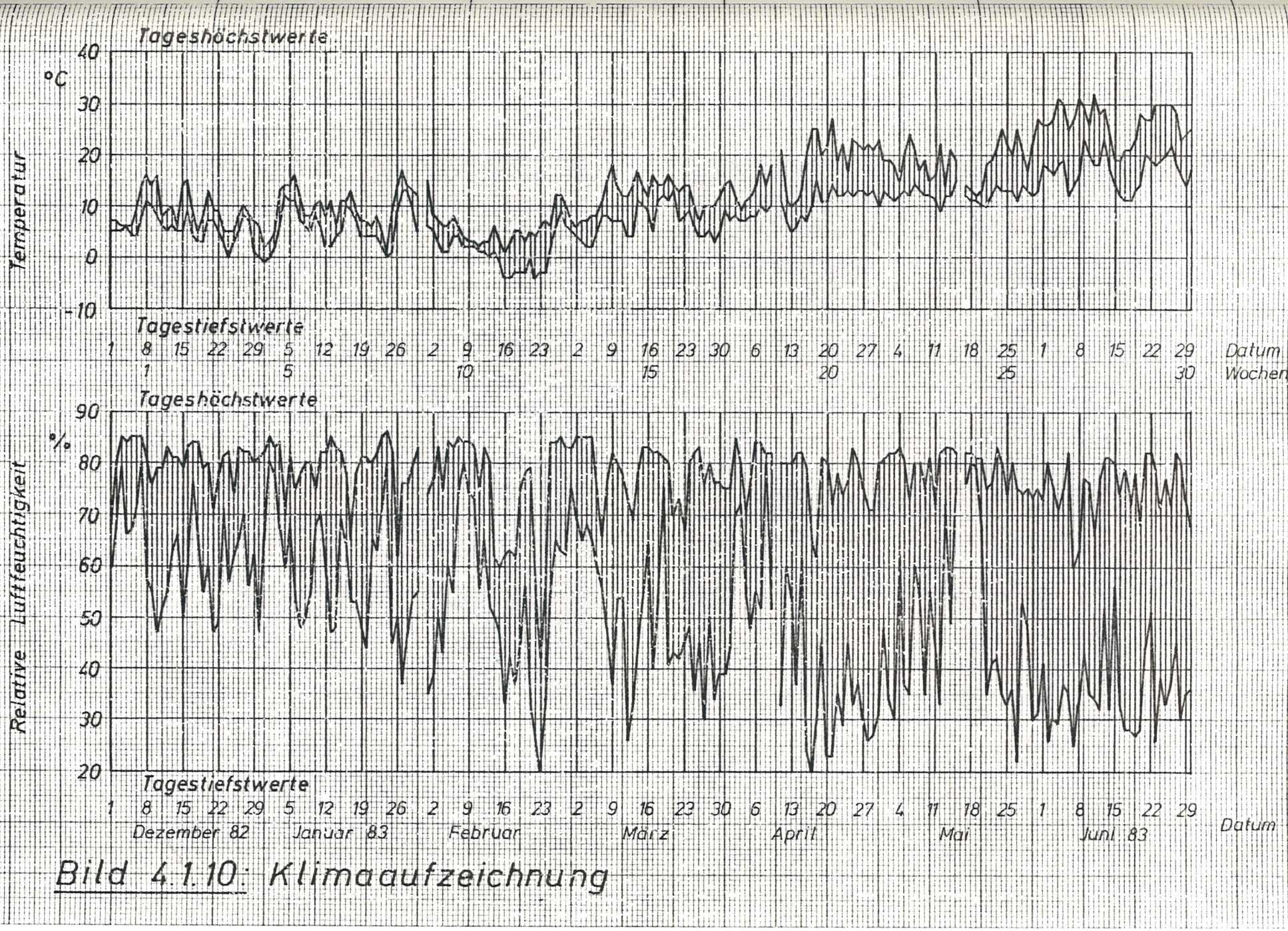


Bild 4.1.10: Klimaaufzeichnung

Anlage 4.10

A4 210x297 mm
MADE IN GERMANY

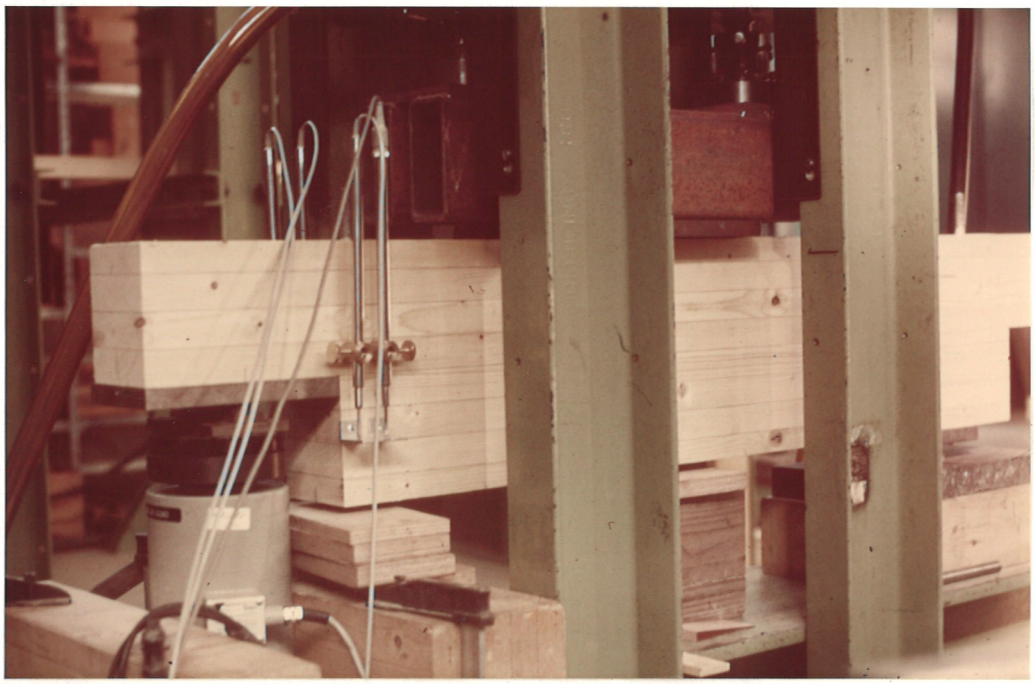


Bild 4.1.11 : Träger III.3.3 unter der Prüfanlage

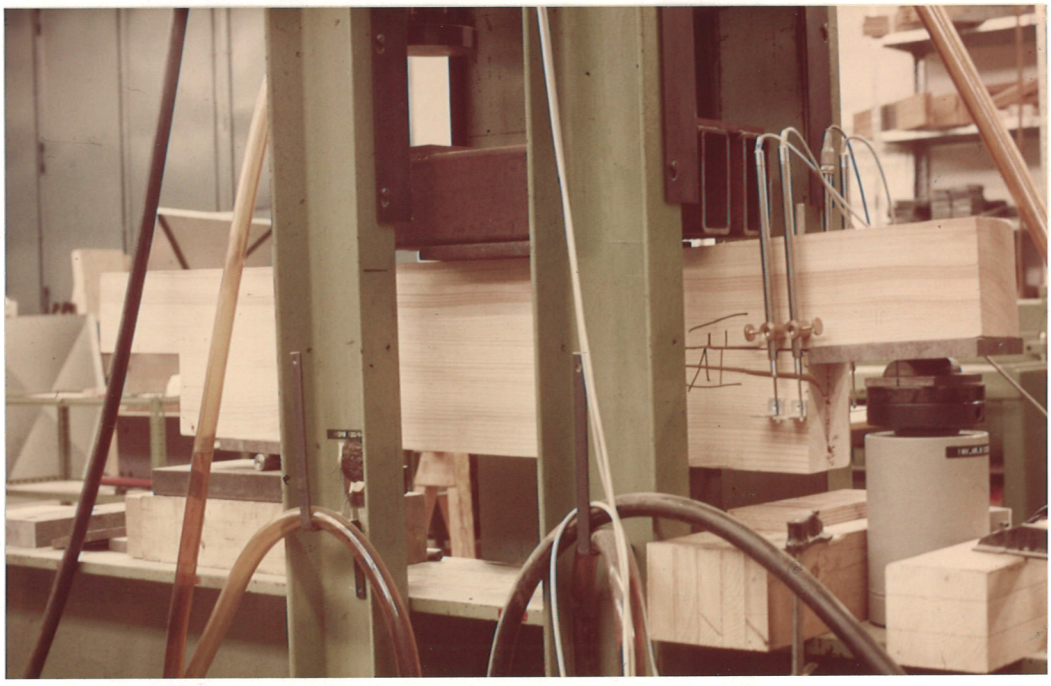


Bild 4.1.12 : Träger IV.2.1 nach Erreichen der Höchstlast

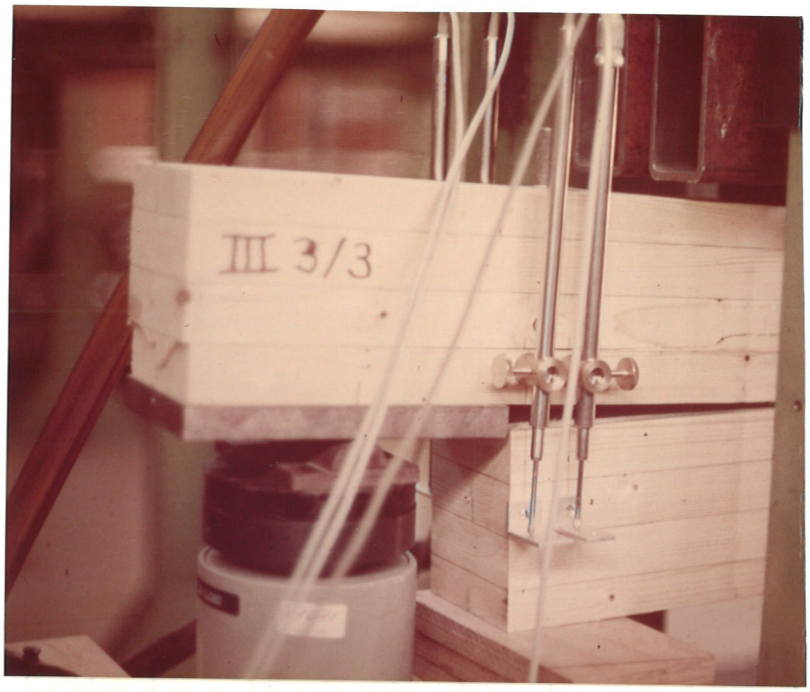


Bild 4.1.13 :

Träger III.3.3
nach der Prüfung

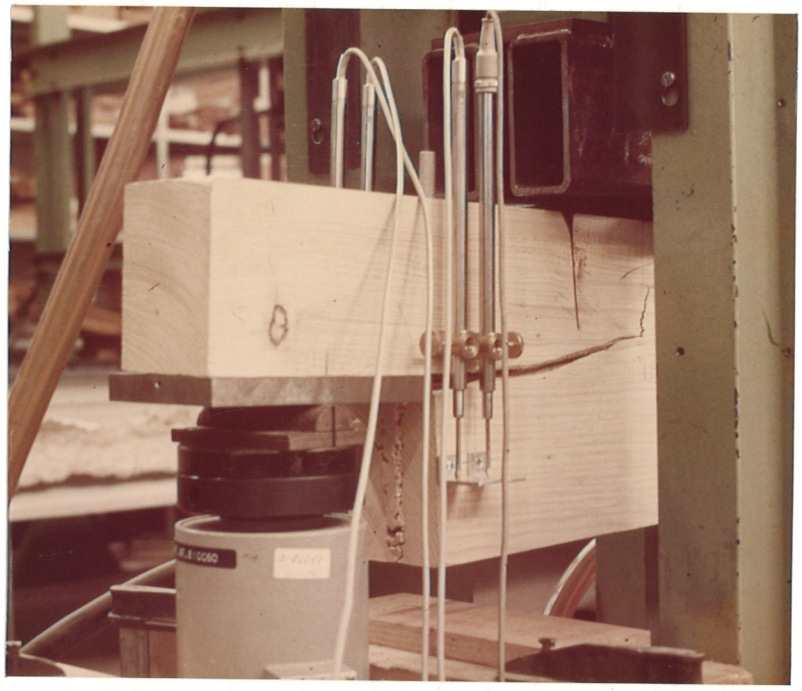


Bild 4.1.14 :

Träger IV.2.1
nach der Prüfung

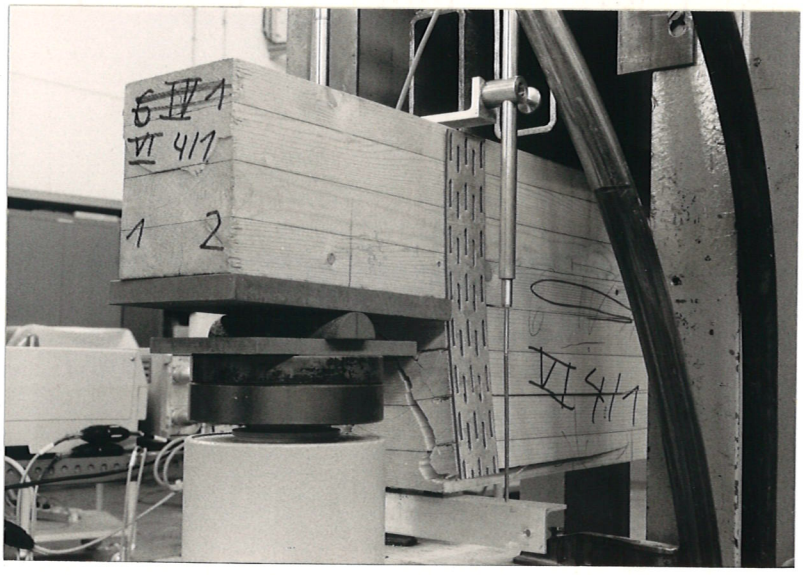


Bild 4.1.15 :

Träger VI.4.1
nach der Prüfung

Tabelle 4: Versuchsergebnisse Reihe I bis VI

Reihe	Auflagerkräfte (kN)					Mittelwerte								
	beim Anriß	beim Bruch maxQ				Rißaufweitung δ(mm) bei Q_R		bei maxQ		Schub-spannung	Querzug-kraft	Zug-spannung im Stab	Haft-festig-keit	Bruch-erschein-ungen
	Q_R	Einzelwerte			Mittel-wert	M1/2	M3/4	M1/2	M3/4	max τ (N/mm^2)	max Z nach (2.6) (kN)	σ_Z (N/mm^2)	τ_Z 1) (N/mm^2)	*)
I.0	14,8	18,0	16,5	13,3	15,9	0,15	-	0,20	-	(1,9)	8,0	-	-	Q
I.1	17,7	35,0	32,7	34,0	33,9	0,23	-	1,32	-	4,1	17,0	53,9	2,0	Q,Z
I.2	11,7	29,0	28,0	55,0	37,3	0,10	-	1,50	-	4,5	18,7	59,4	2,2	Q,Z,R
I.3	12,0	45,0	33,0	28,0	35,3	0,12	-	2,10	-	4,3	17,7	56,2	2,0	Q,Z,S
II.1	26,0	93,0	86,0	70,0	83,0	0,03	-	1,70	-	5,9	5,7	18,1	2,1	Q,S, $\sigma_{D\perp}$
II.2	21,0	63,0	60,0	50,0	58,0	0,12	-	1,10	-	4,8	11,1	35,1	2,3	Q,Z
III.1	13,5	(22,0)[2]	25,0	32,0	28,5	0,14	0,06	1,10	0,60	3,4	14,3	126,0	2,8	Q,Z
III.2	11,2	43,5	48,5	33,0	41,7	0,11	0,03	2,40	1,20	5,0	20,8	42,4	2,0	Q,Z,S
III.3	12,7	56,0	49,0	68,0	57,7	0,10	0,03	2,60	1,80	6,9	28,8	255,0	5,6	Q,S,Z
III.4	15,8	47,2	53,1	50,0	50,1	0,11	0,03	1,50	0,90	6,0	25,1	222,0	4,6	Q,Z,S
III.5	11,8	44,0	47,0	49,5	46,8	0,15	0,07	2,90	2,10	5,6	23,4	315,0	5,0	Q,Z,S
III.6	13,7	38,0	44,0	44,0	42,0	-	0,10	-	1,50	5,1	21,0	2100[3]	228[4]	Q
III.7	16,5	42,0	55,0	61,0	52,7	0,20	0,09	1,95	1,39	6,3	26,3	116,0	2,6	Q,R,Z
III.8	12,7	38,0	38,0	39,0	38,3	0,14	0,07	1,73	1,29	4,6	19,2	85,0	4,3	Q,Z
IV.0	8,1	8,5	8,3	9,2	8,7	0,15	0,07	0,84	0,50	(1,0)	4,3	-	-	Q
IV.1	11,4	29,0	32,3	36,0	32,4	0,10	0,03	2,10	0,90	4,1	16,2	51,6	1,9	Q,Z
IV.2	11,8	35,0	38,0	43,3	38,8	0,10	0,03	3,50	3,00	4,9	19,4	171,0	3,8	Q,Z
IV.3	10,3	33,0	39,0	50,0	40,7	0,15	0,07	3,20	2,30	5,1	20,3	273,0	4,3	Q,Z, $\sigma_{D\perp}$
V.0	12,1	11,5	12,7	-	12,1	0,30	0,19	0,30	0,19	(1,5)	6,1	-	-	Q
V.1	13,3	35,7	43,5	-	39,6	0,29	0,08	3,70	2,90	4,8	19,8	63,0	2,3	Q,Z,R
V.2	20,2	27,0	54,4	55,5	45,6	0,44	0,39	2,50	1,80	5,5	22,8	202,0	4,5	Q,Z
V.3	18,5	46,6	47,1	49,1	47,6	0,58	0,38	3,10	2,40	5,7	23,8	320,0	5,1	Q,Z,S
V.4	13,7	32,0	40,3	41,9	38,1	0,35	0,13	3,80	2,40	4,8	19,0	60,6	2,2	Q,Z, $\sigma_{D\perp}$
V.5	14,8	14,8	-	-	14,8	0,18	-	0,18	-	(1,9)	7,4	-	-	Q
VI.0	11,5	13,8	16,6	-	15,2	0,19	-	0,61	-	(1,8)	7,6	-	-	Q
VI.1	14,2	32,0	36,3	43,7	39,3	0,27	0,07	1,70	1,10	4,7	19,6	62,5	2,3	Q,R,Z
VI.2	15,3	32,0	45,0	53,8	43,6	0,19	0,09	1,50	1,10	5,2	21,8	193,0	4,3	Q,S,Z
VI.3	14,8	31,5	47,3	52,3	43,7	0,26	0,13	1,70	1,30	5,2	21,9	294,0	4,6	Q,S,Z
VI.4	19,0	50,0	56,0	-	53,0	-	0,30	-	3,40	6,4	26,5	2650[3]	288[4]	Q,S

*)
Q = Querzug risse
Z = Stab ausgezogen
R = Stab gerissen
S = Schub risse
$\sigma_{D\perp}$ = Querdruck (Lasteinleitung)

( ) Schubspannung im Restquerschnitt mit k=1 gerechnet

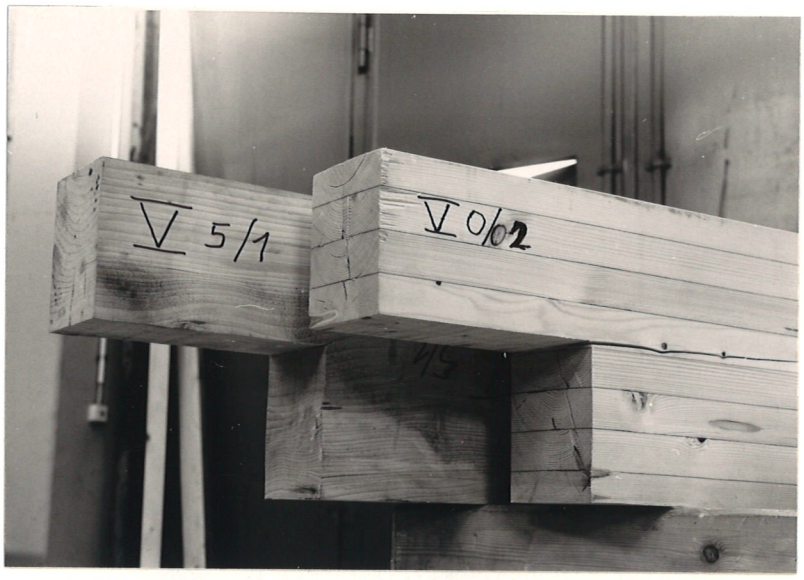
1) auf Bohrlochdurchmesser d_1 bezogen

2) Einleimlänge l_E = 75 mm

3) Plattenbelastung durch max Z in N/cm

4) Nagelbelastung durch max Z in N/cm^2

vergl. Zulassungsbescheid



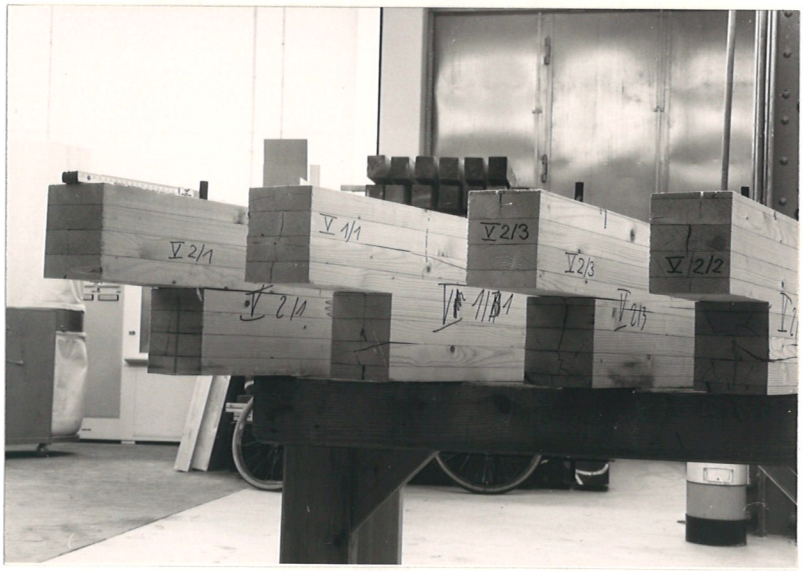




Bild 4.1.16 bis 4.1.18 :

Rißbildung nach Abschluß der Wechselklimabeanspruchung

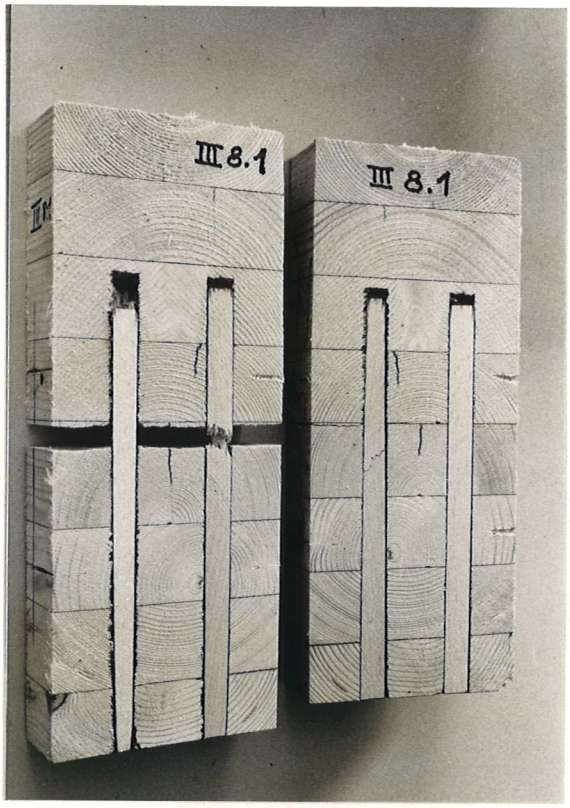


Bild 4.1.19 :

Versuch III.8.1 :

ein Stab gerissen
ein Stab ausgezogen



Bild 4.1.20 :

Versuch VI.3.3

eingeleimte
Gewindestange
(mit Längsnut)



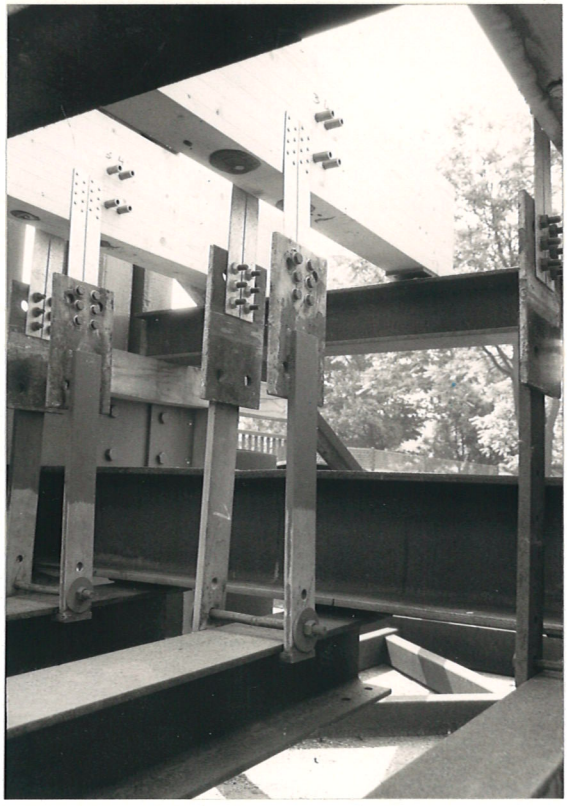


Bild 4.2.2 und 4.2.3 : Queranschlüsse unter Langzeitbelastung

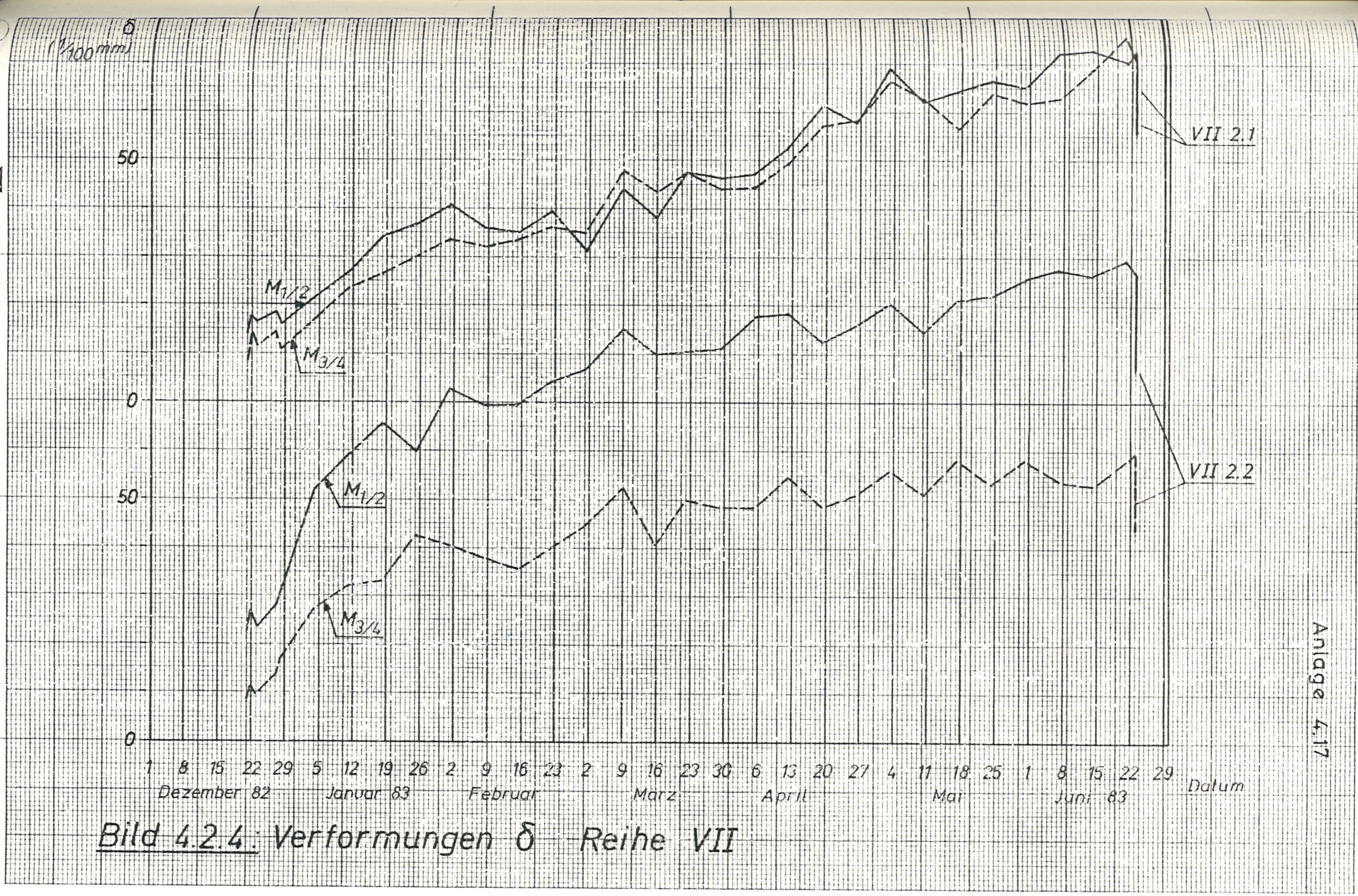


Bild 4.2.4 Verformungen δ Reihe VII

Anlage 4.17

A 4 210 x 297 mm
MADE IN GERMANY

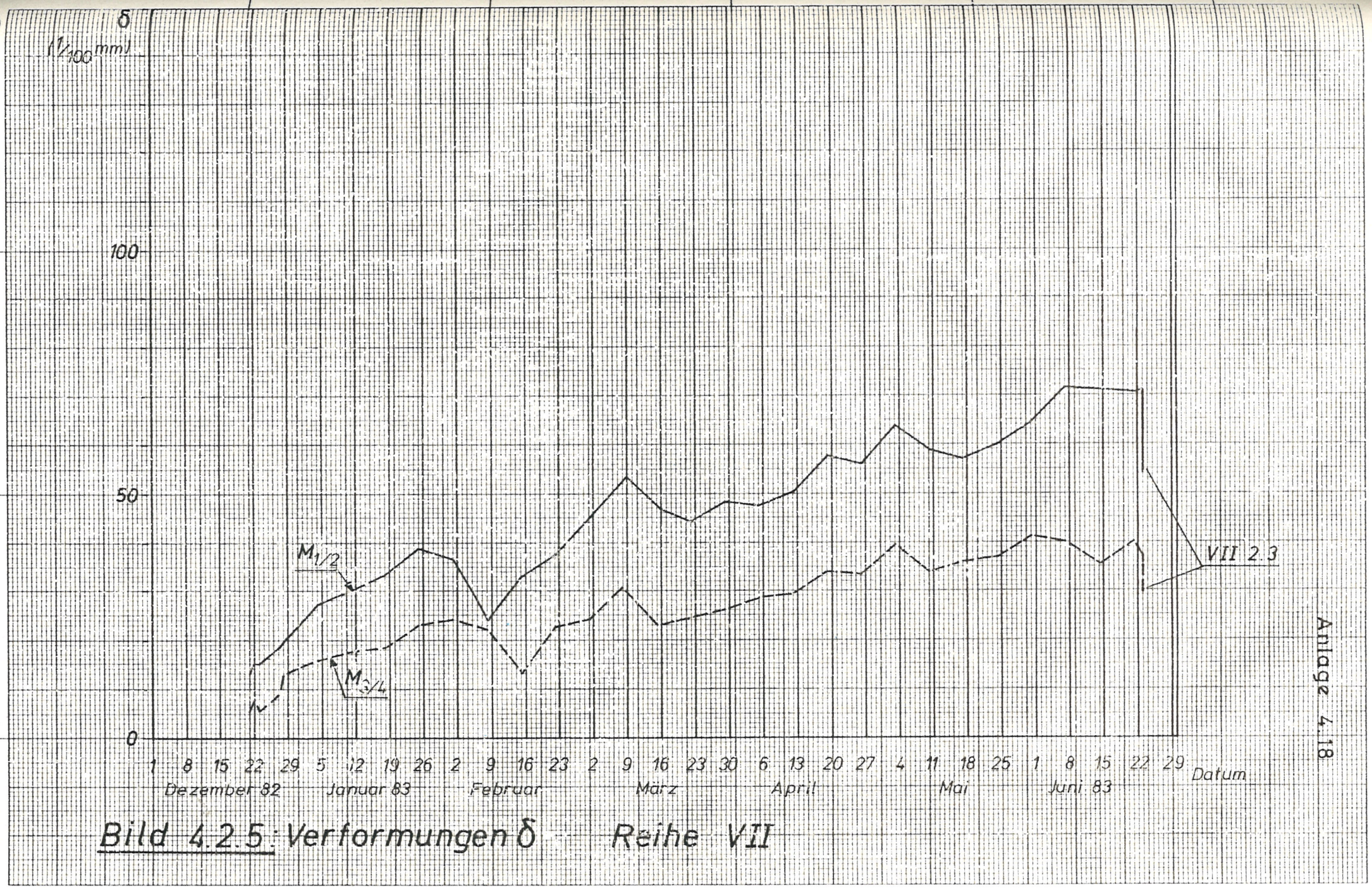


Bild 4.25: Verformungen δ Reihe VII

Anlage 4.18

A 4 210 x 297 mm
MADE IN GERMANY

Tabelle 5: Versuchsergebnisse Reihe VII

Reihe	Belastung (kN) beim Anriß $\frac{}{F_R}$	beim Bruch maxF Einzelwerte			Mittelwert	Mittelwerte Rißaufweitung δ (mm) bei F_R M1/2	bei F_R M3/4	bei max F M1/2	bei max F M3/4	Schubspannung max τ (N/mm²)	Querzugkraft max Z nach [2.6] (kN)	Zugspannung im Stab σ_Z (N/mm²)	Haftfestigkeit τ_Z (N/mm²)	Brucherscheinungen x)
VII.0	20,0	42,2	46,7	36,2	41,7	-	-	-	-	3,1	27.0	-	-	Q
VII.1	33,0	58,7	53,9	53,0	55,2	0,21	0,13	1,25	0,78	4,1	35,7	56,9	2,8	Q,Z
VII.2	31,3	61,7	60,4	53,0	58,4	0,24	0,14	1,00	0,62	4,4	37,8	60,2	3,0	Q,Z,S
VII.3	34,2	72,0	68,9	70,6	70,5	-	0,05	-	0,90	5,3	45,7	1520 1)	195 2)	Q,Z,S
VII.4	38,3	70,4	67,0	68,7	68,7	0,19	0,10	1,50	0,80	5,2	44,5	35,4	>1,8	Q,N

x) Q = Querzugrisse
Z = Stab ausgezogen
S = Schubrisse
N = Nagelanschluß versagt

1) Plattenbelastung durch max Z in N/cm

2) Nagelbelastung durch max Z in N/cm²

vergl. Zulassungsbescheid

Anlage 4.19

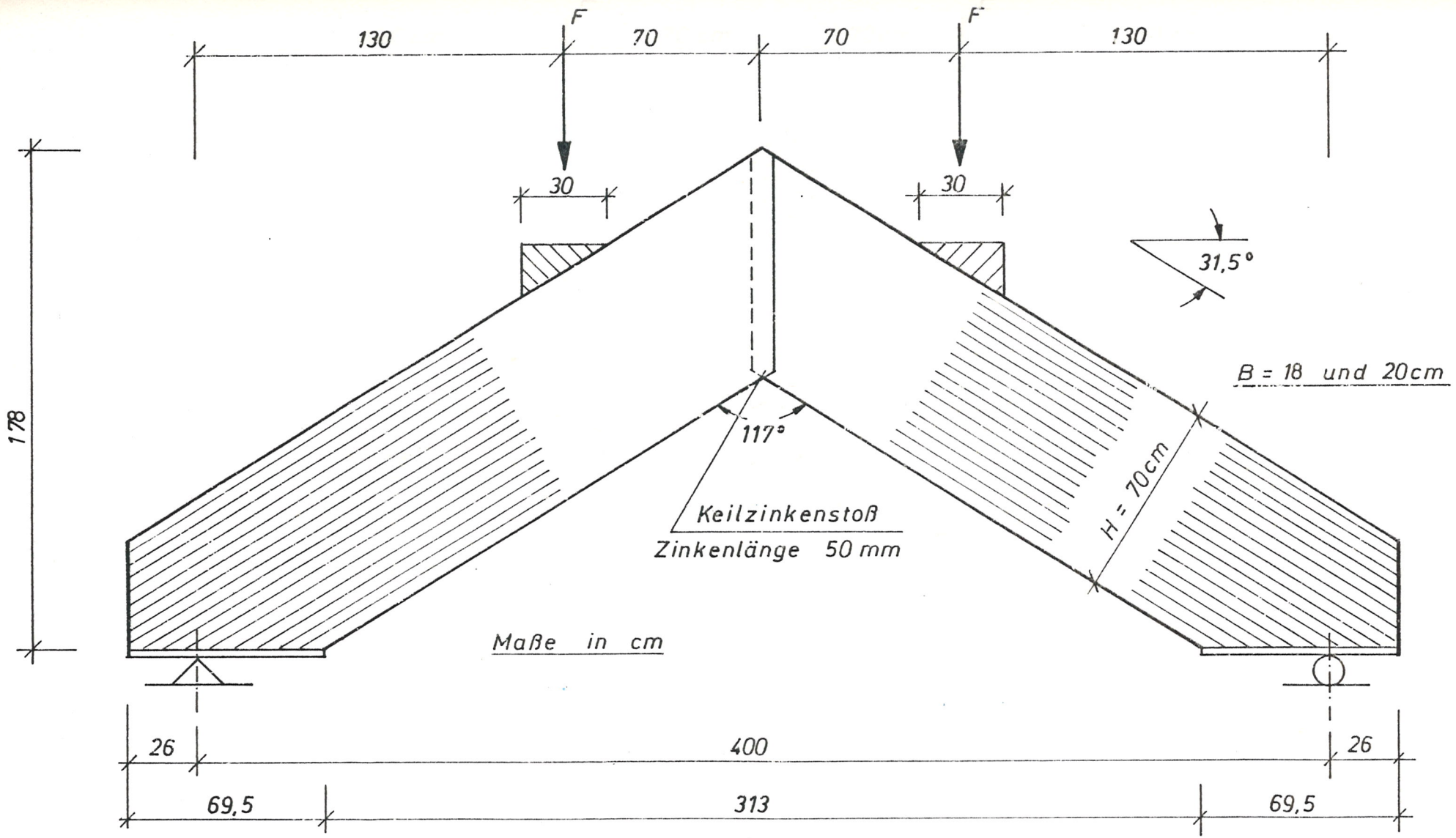


Bild 4.3.1: Ausbildung der Probekörper und Belastungsanordnung

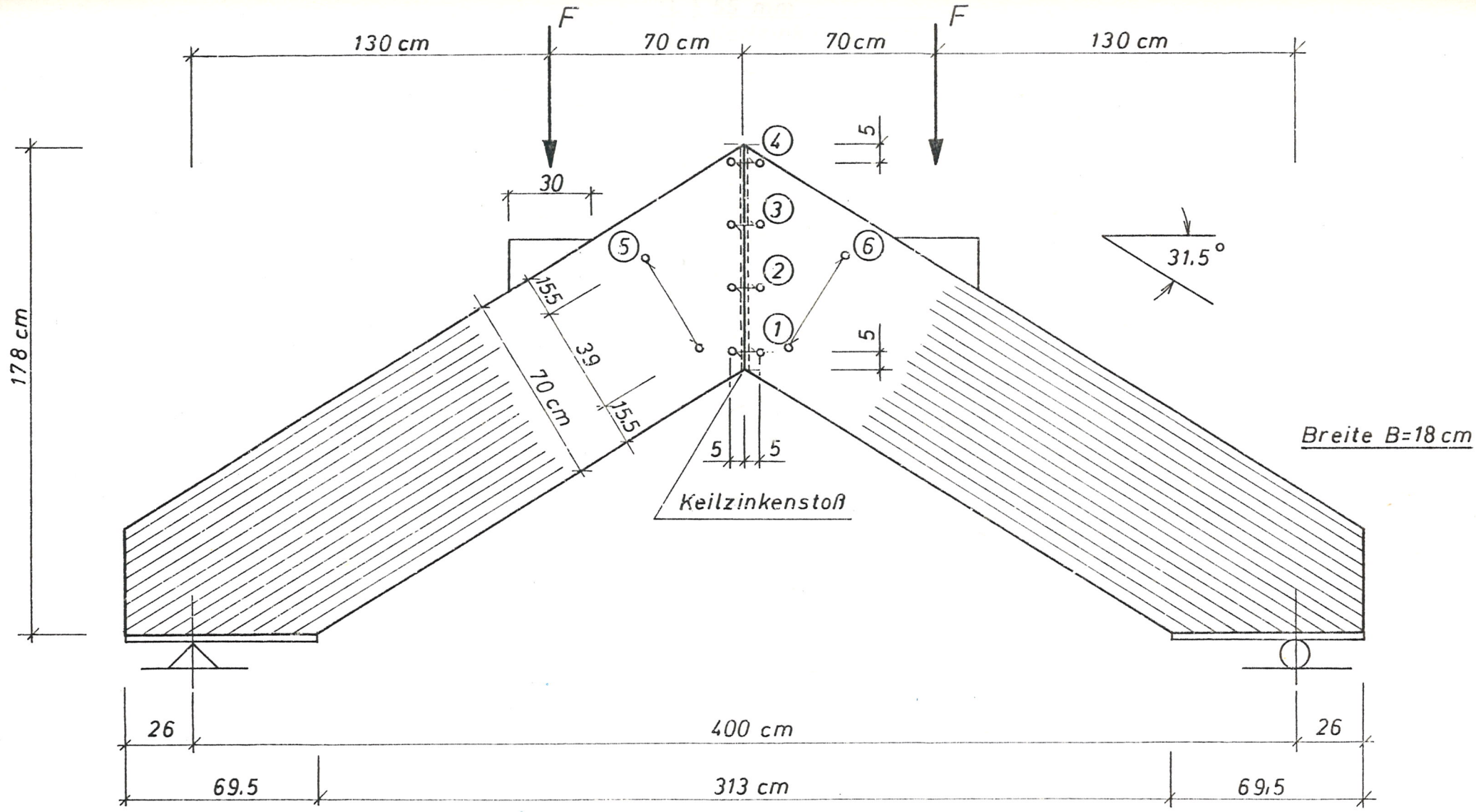


Bild 4.3.2: Versuchsaufbau sowie Lage und Bezeichnung der Meßstellen bei Probekörper Nr. I

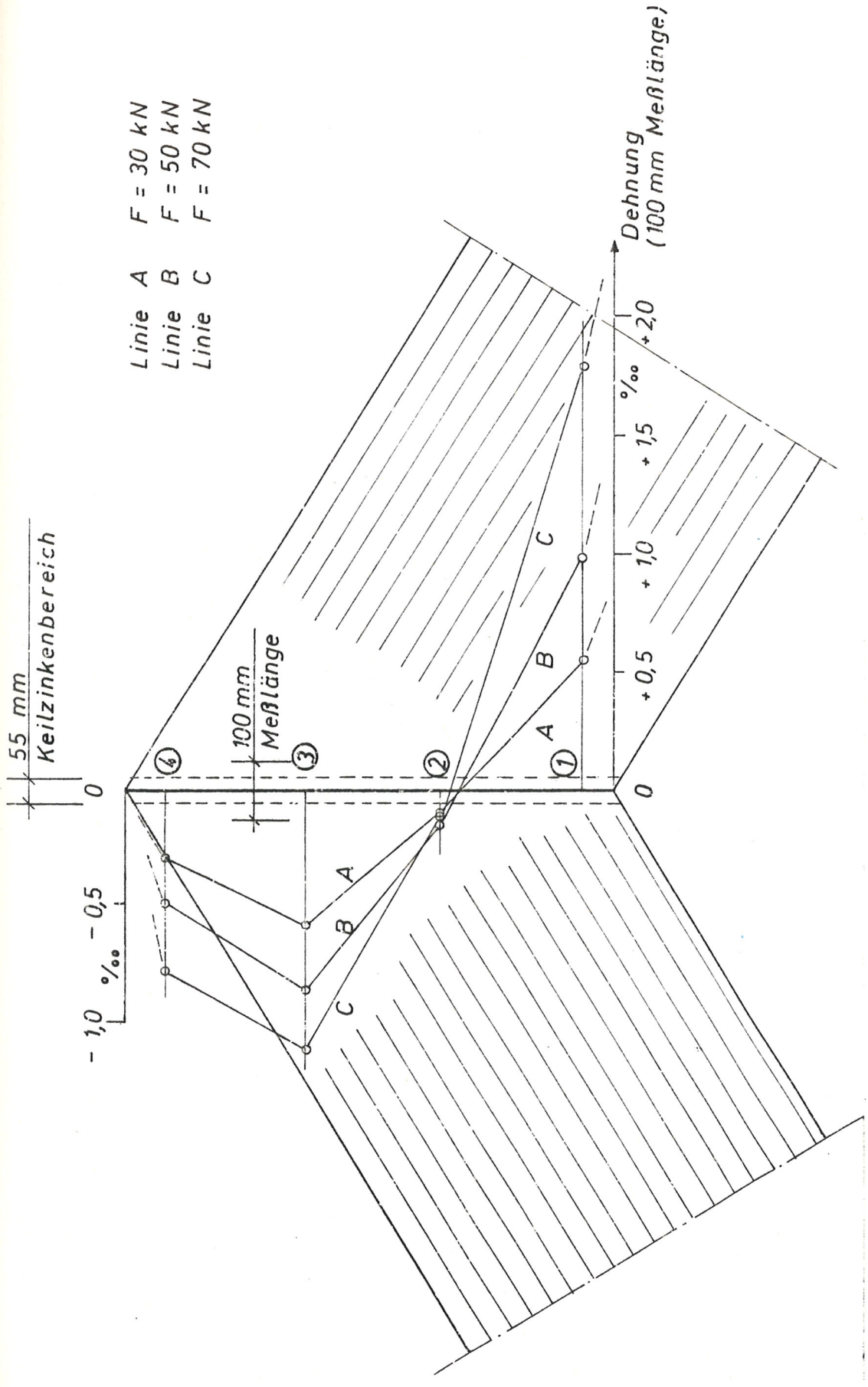


Bild 4.3.3: Längsdehnungsverlauf im Stoßquerschnitt bei F = 30-50-70 kN

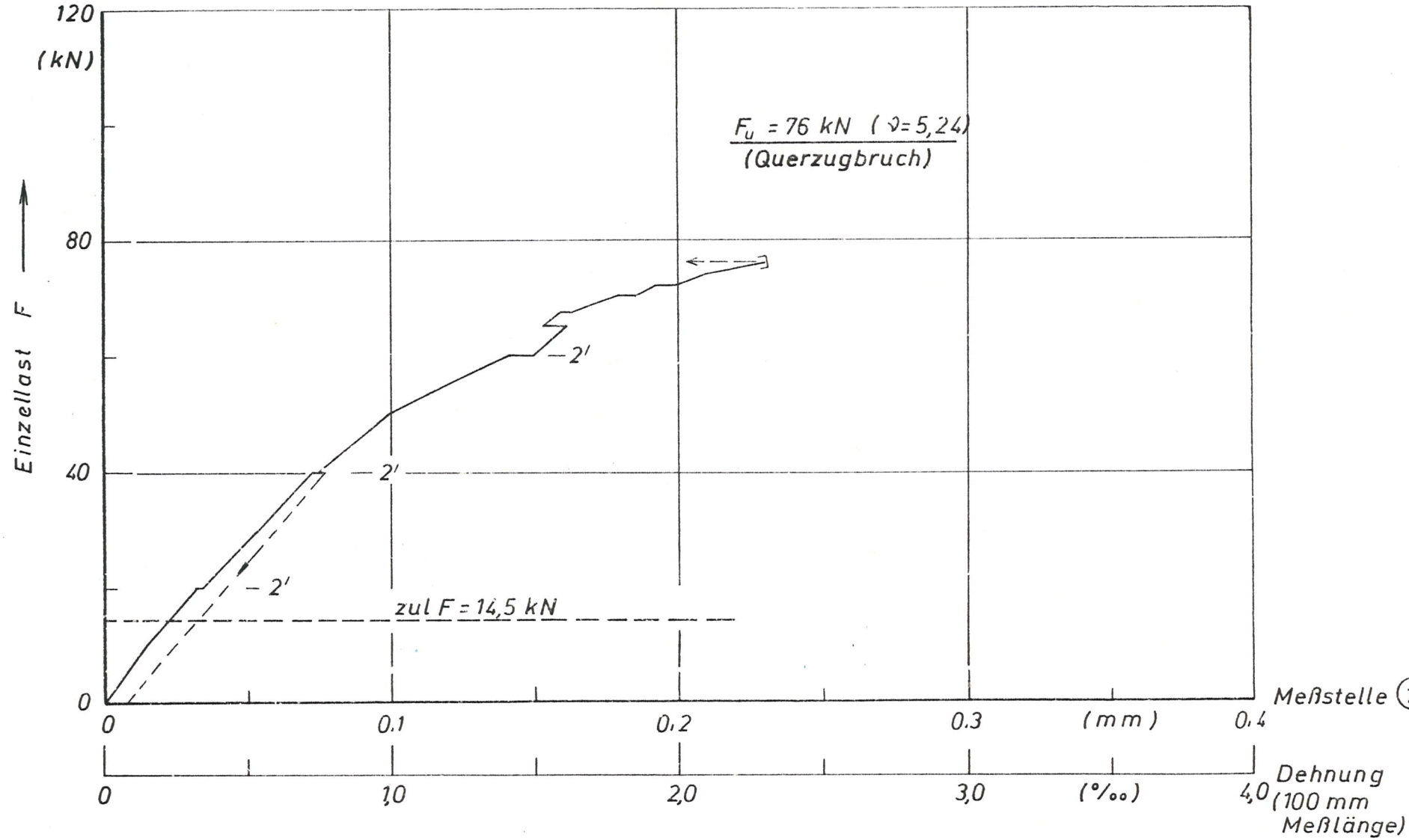


Bild 4.3.4: Längsdehnung an der Meßstelle (1) in Abhängigkeit von der Last F

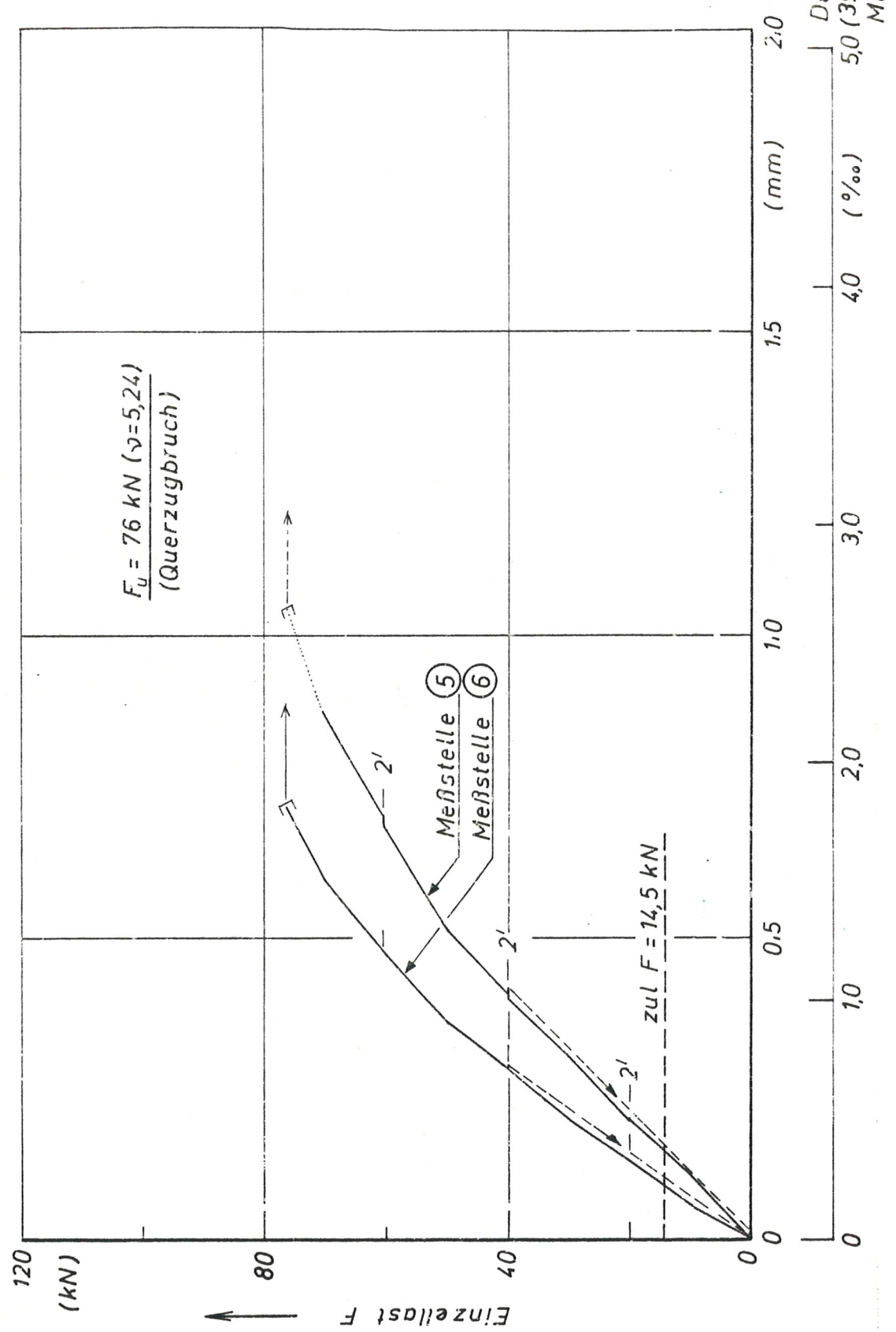


Bild 4.3.5: Querdehnungen bei ⑤ und ⑥ in Abhängigkeit von der Last F

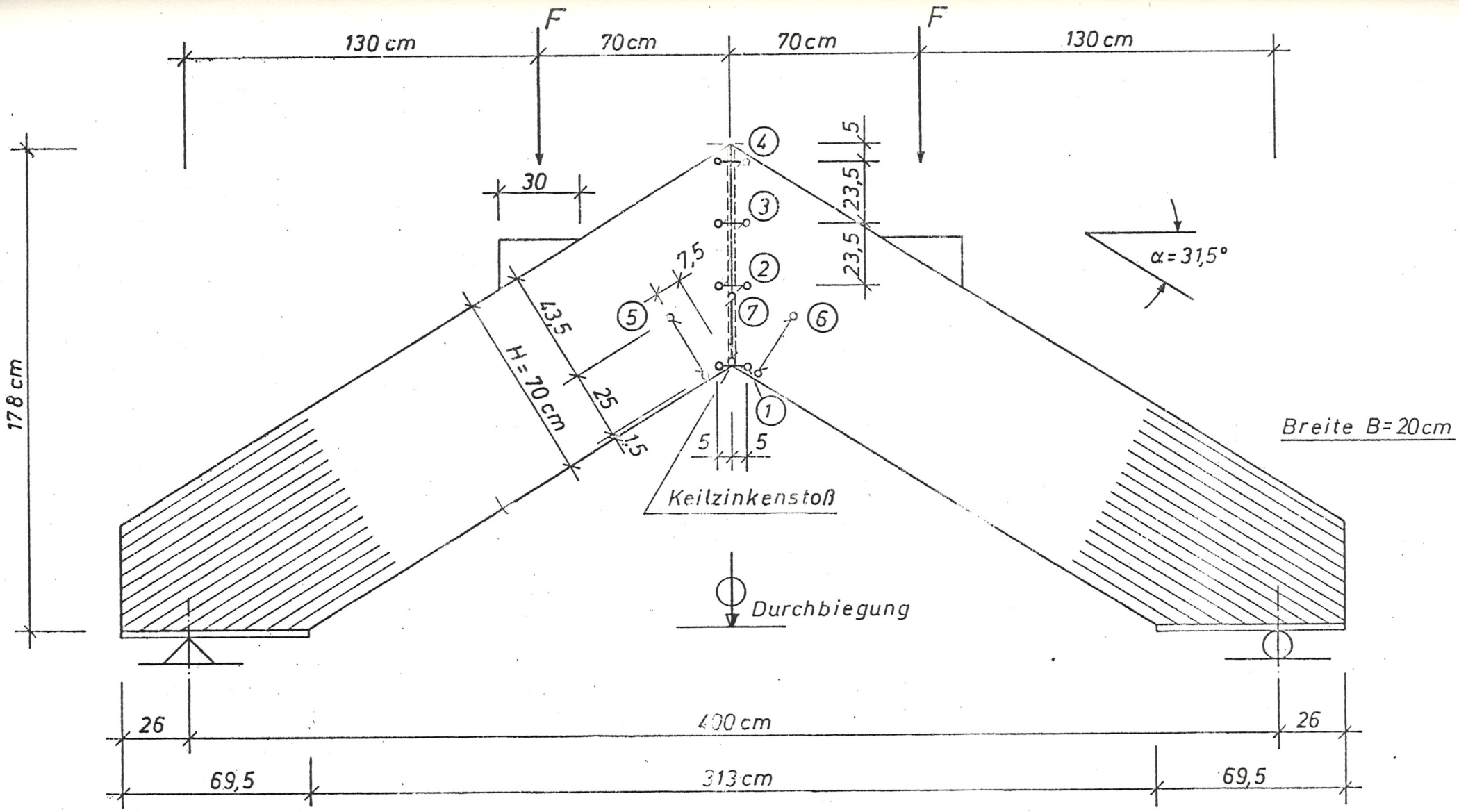


Bild 4.3.6: Meßstellenanordnung bei Probekörper Nr. II

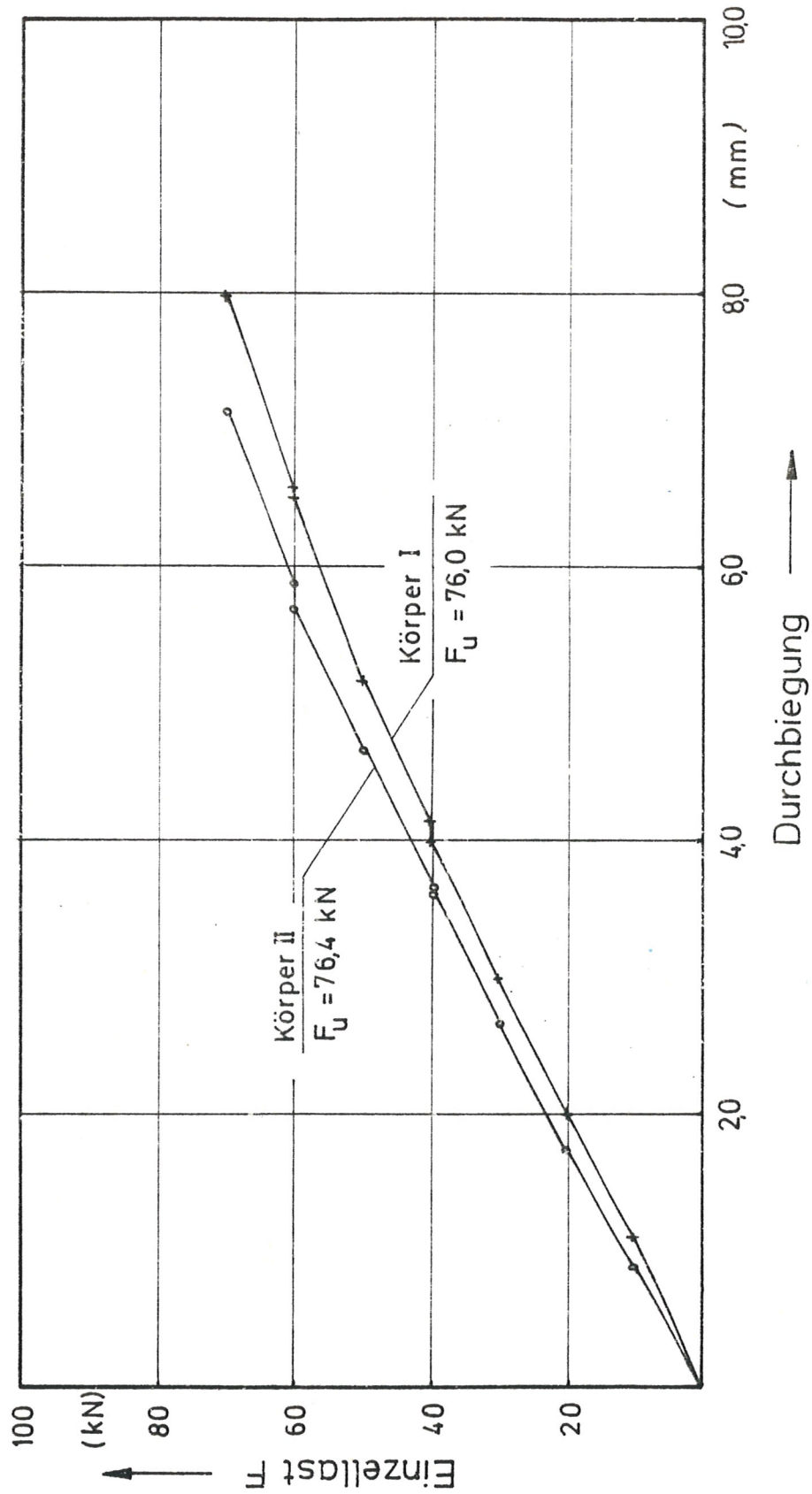


Bild 4.3.7: Last-Durchbiegungslinien für Körper Nr. II und Körper Nr. I

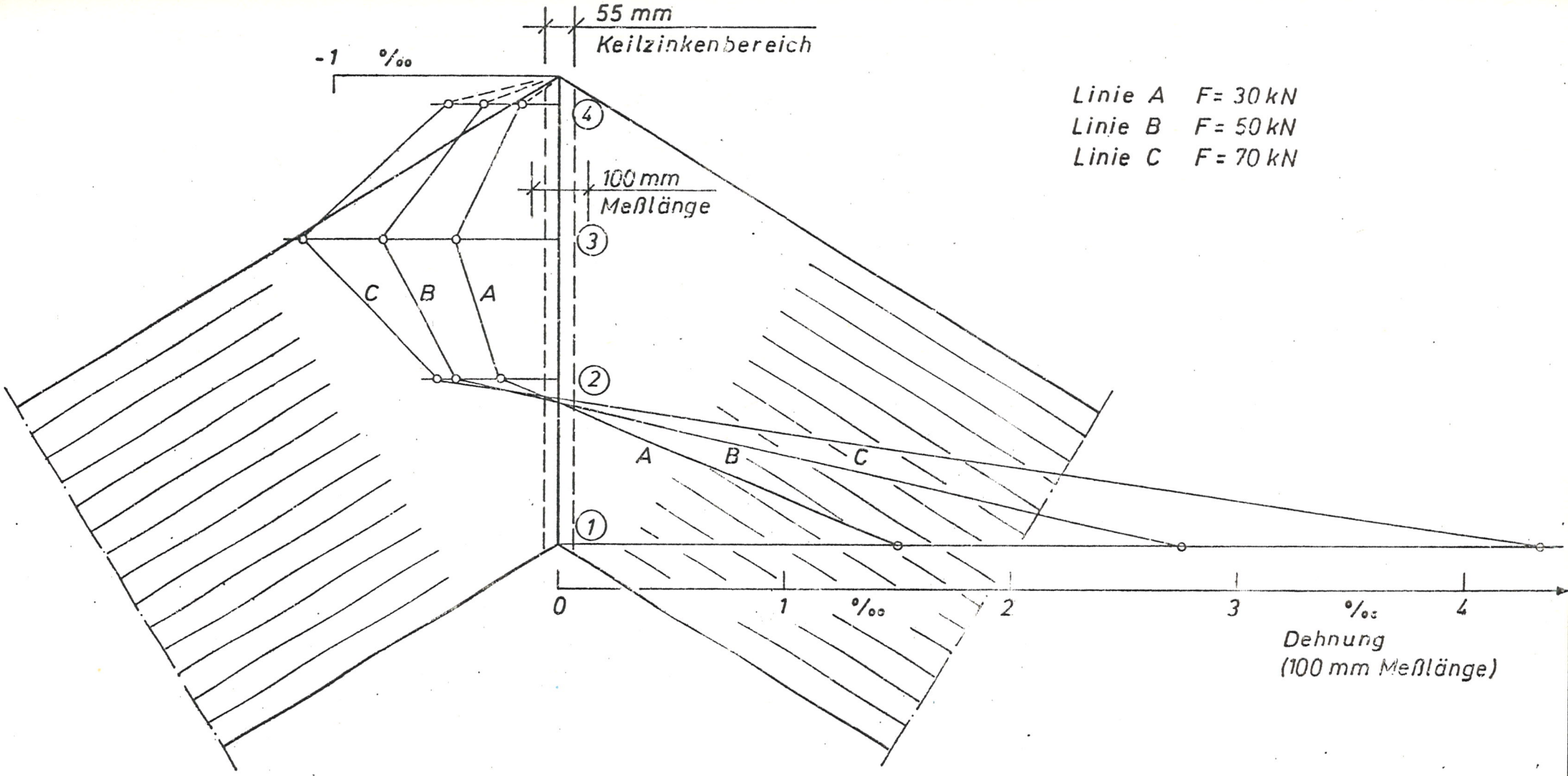


Bild 4.3.8: Längsdehnungsverlauf im Stoßquerschnitt bei F = 30-50-70 kN

Anlage 4.27

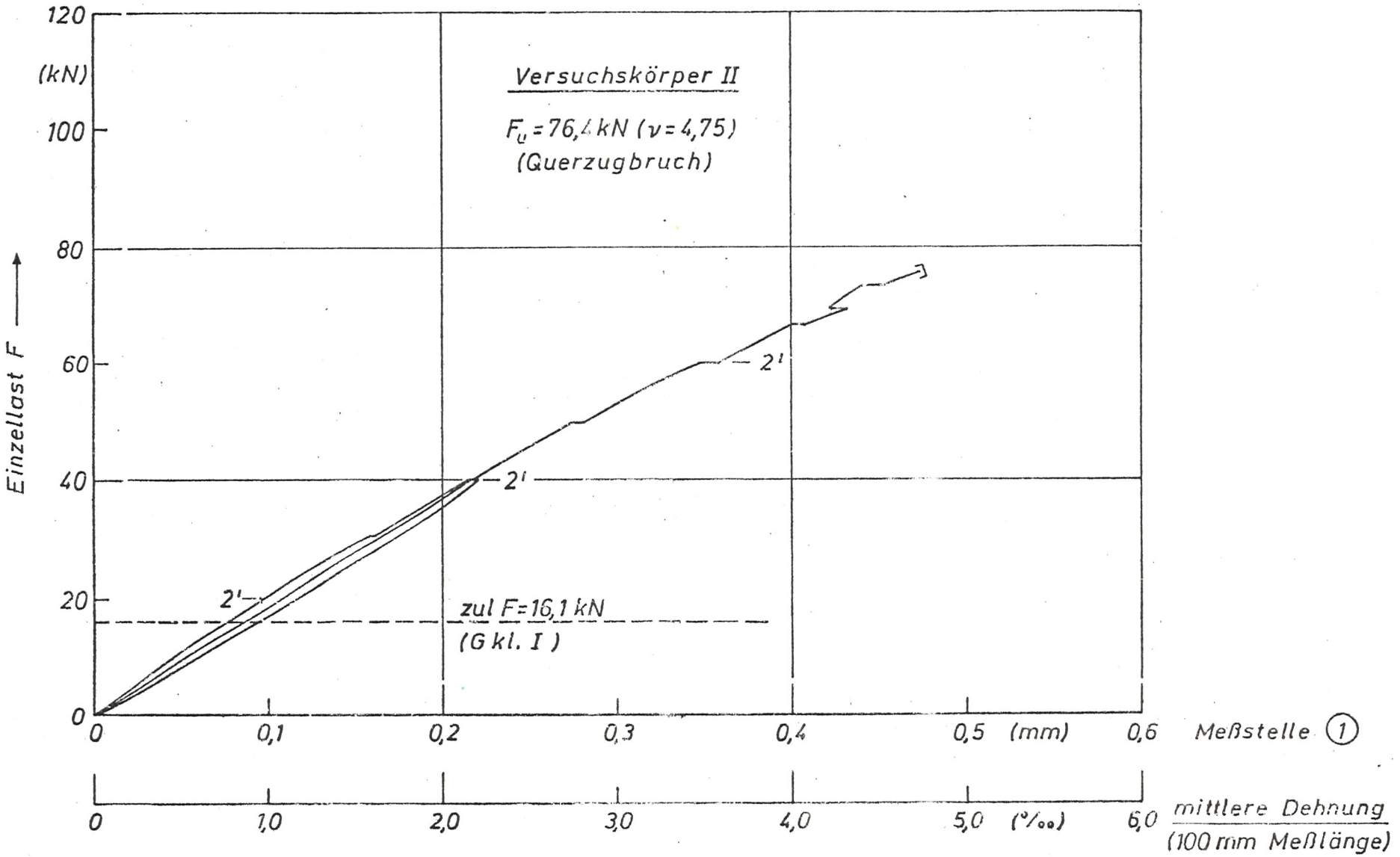


Bild 4.3.9: Längsdehnung an der Meßstelle (1) in Abhängigkeit von der Last F

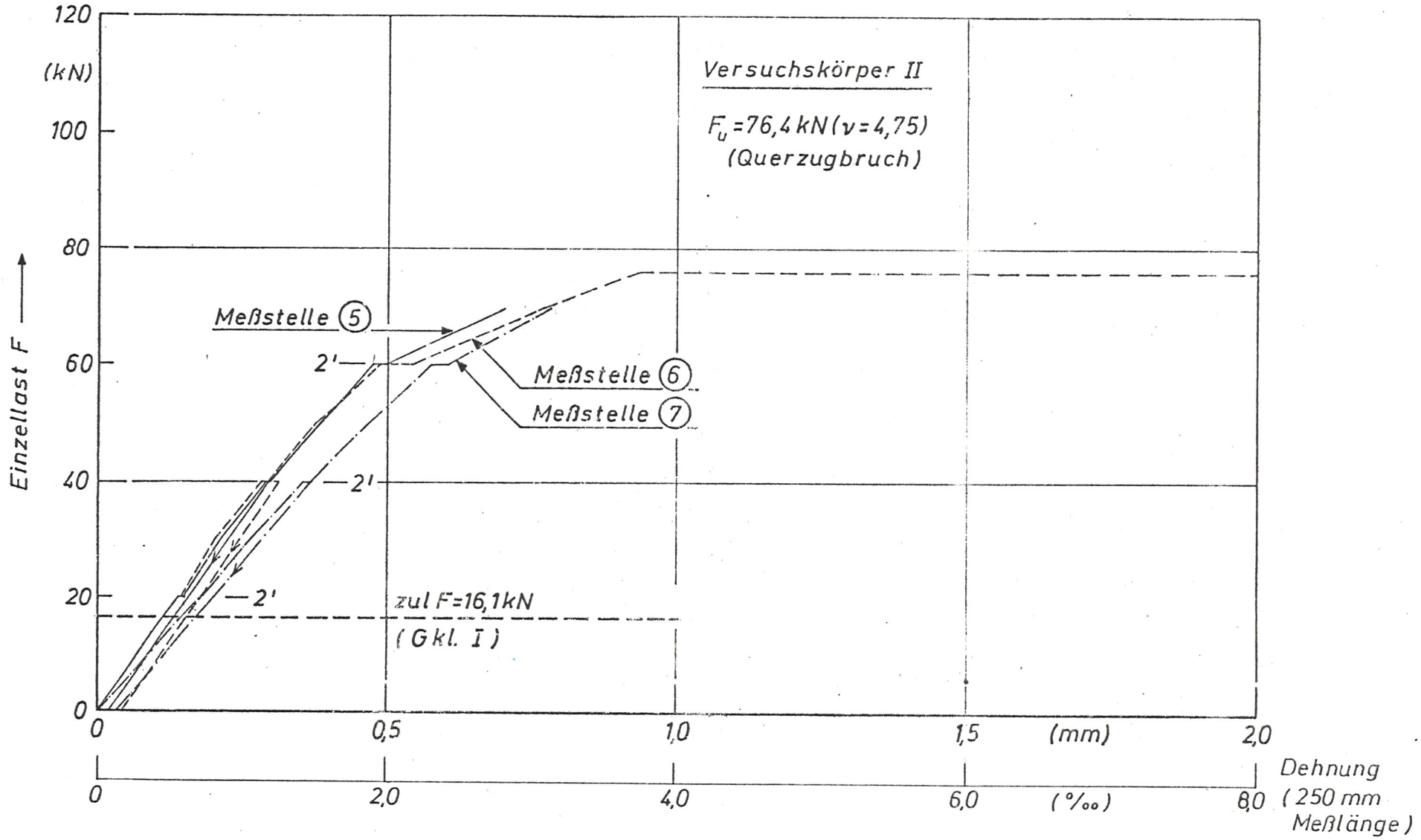


Bild 4.3.10: Querdehnungen an den Meßstellen (5), (6) und (7) in Abhängigkeit von der Last F

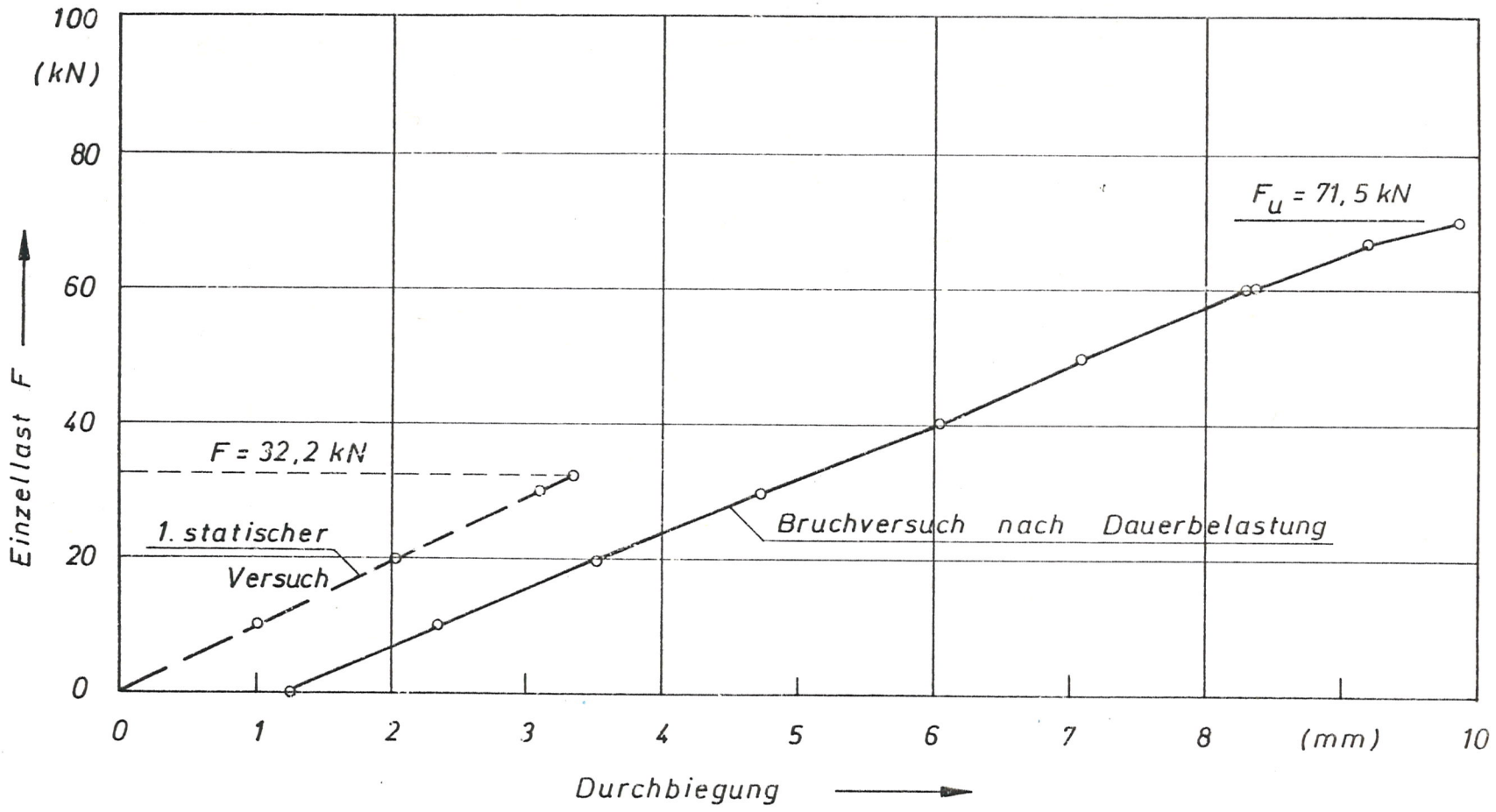


Bild 4.3.11: Last-Durchbiegungslinien für Körper Nr. III beim 1. statischen Versuch und beim Bruchversuch nach der Dauerstandsbelastung

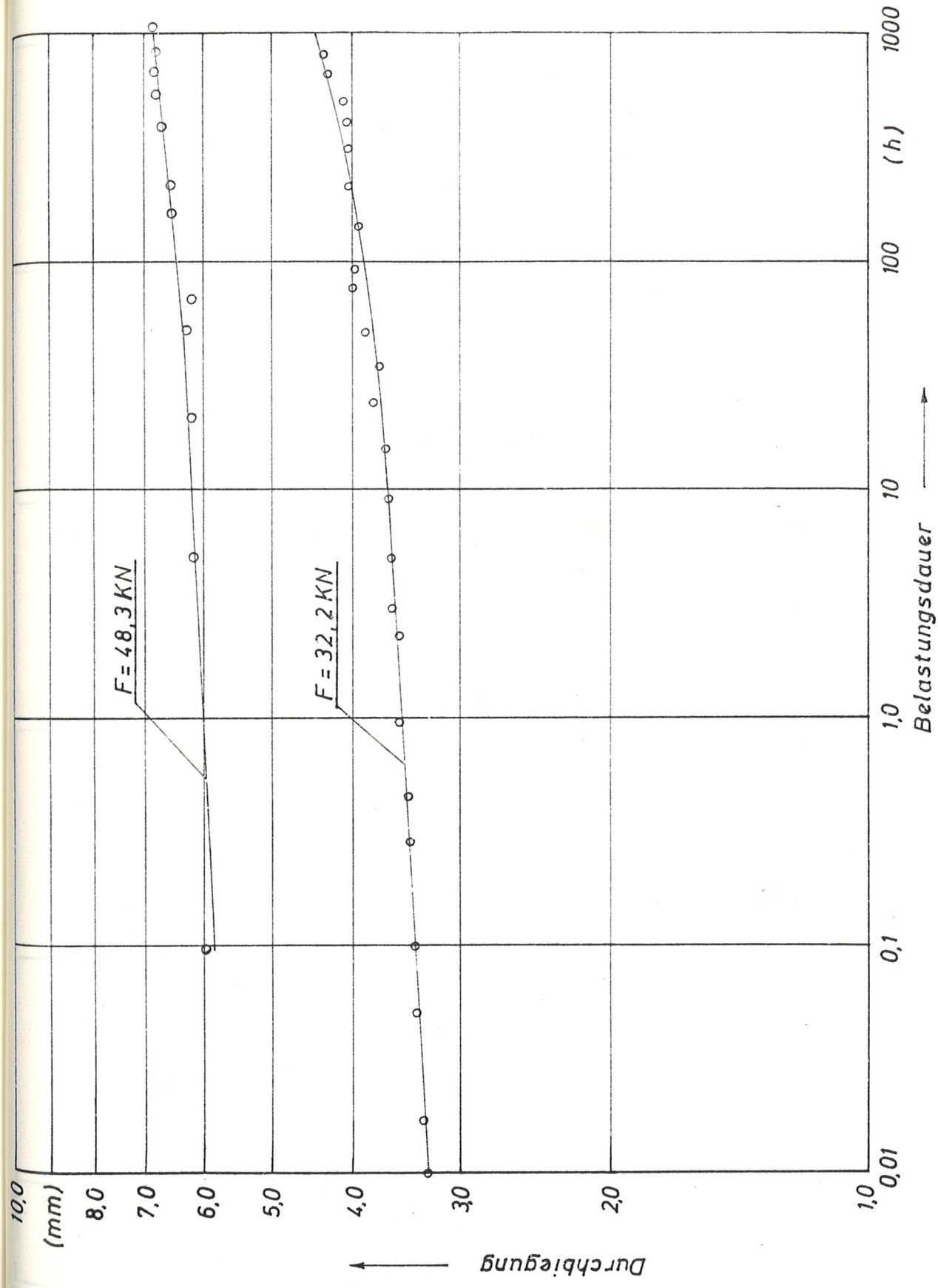


Bild 4.3.12: Durchbiegung in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bei F = 32,2 und 48,3 kN

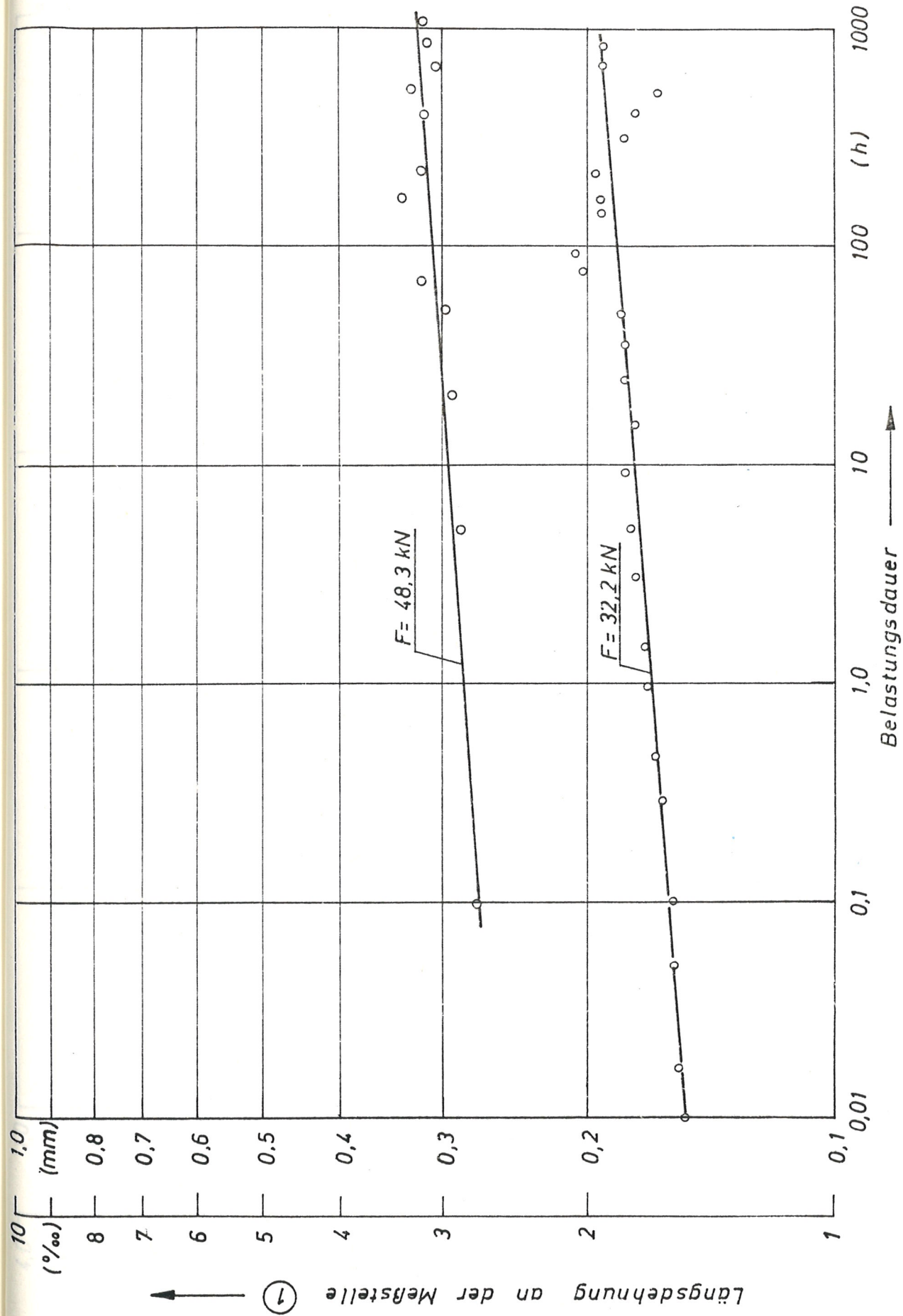


Bild 4.3.13: Längsdehnung bei ① in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bei F = 32,2 und 48,3 kN

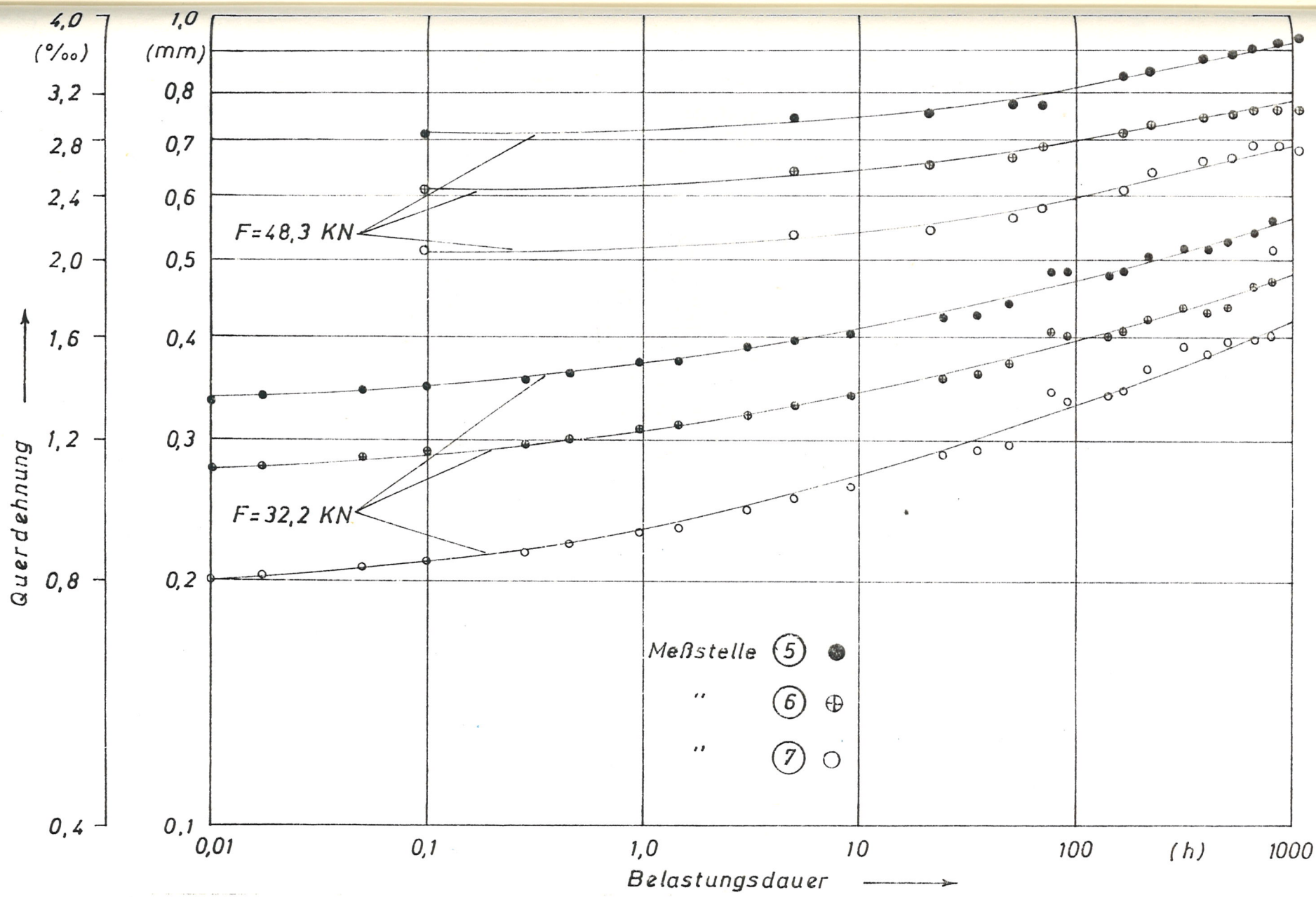


Bild 4.3.14: Querdehnung bei (5), (6) und (7) in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bei F = 32,2 und 48,3 kN

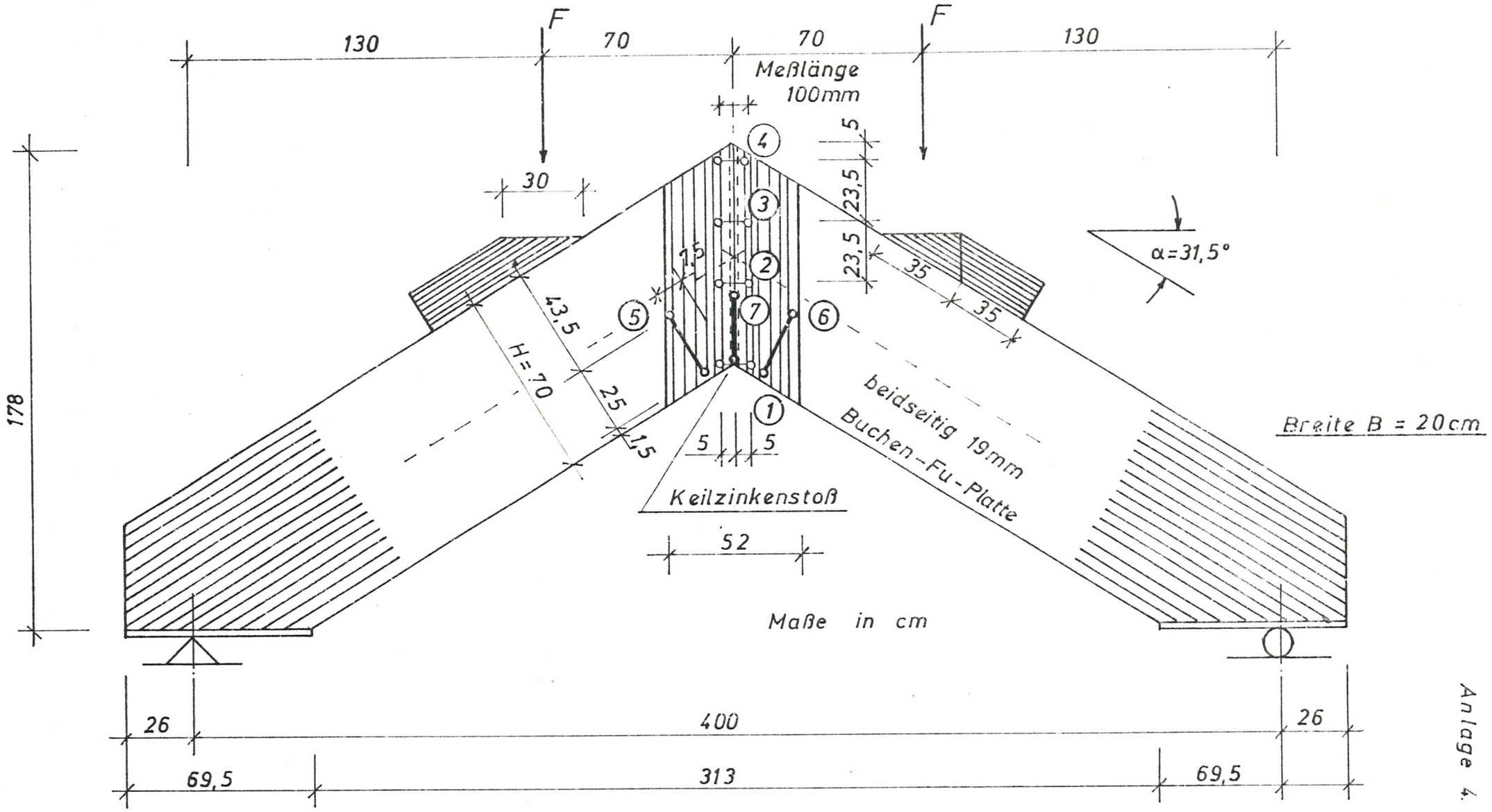


Bild 4.3.15: Ausbildung und Meßstellenanordnung beim Probekörper Nr. IV

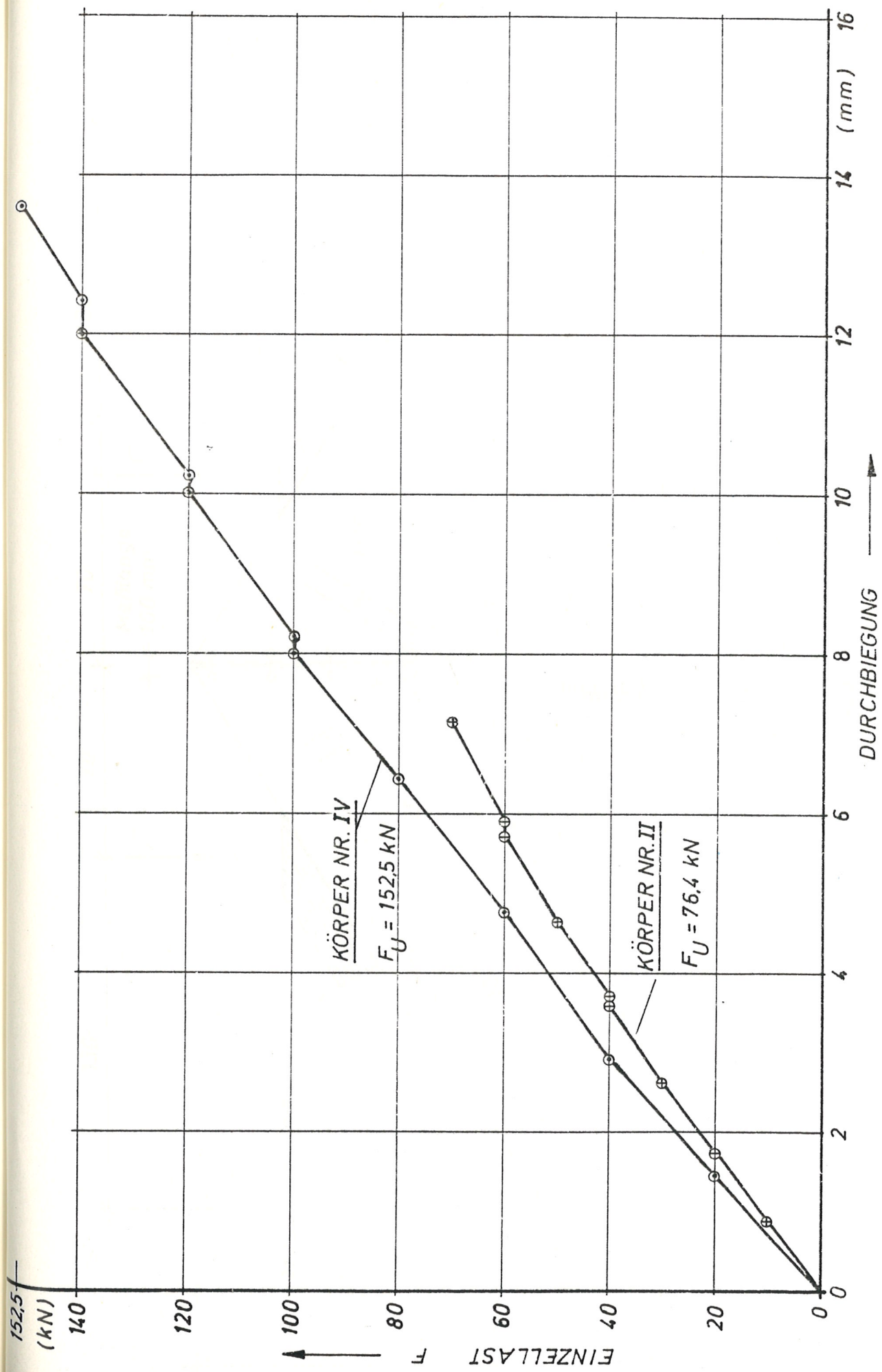


Bild 4.3.16: Last-Durchbiegungslinie und Vergleich mit Körper Nr. II (unverstärkt)

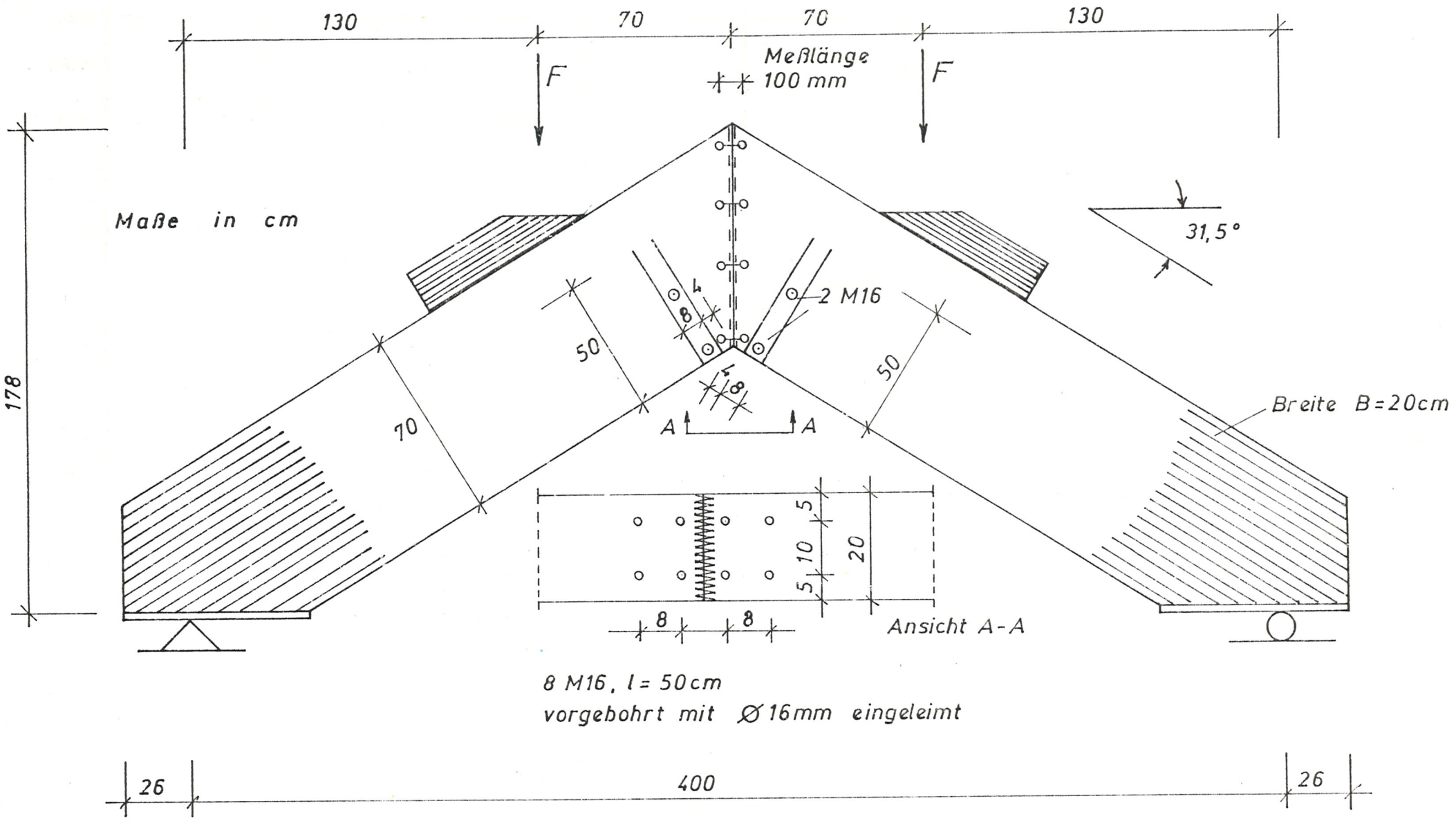


Bild 4.3.17: Ausbildung und Meßstellenanordnung beim Probekörper Nr. V

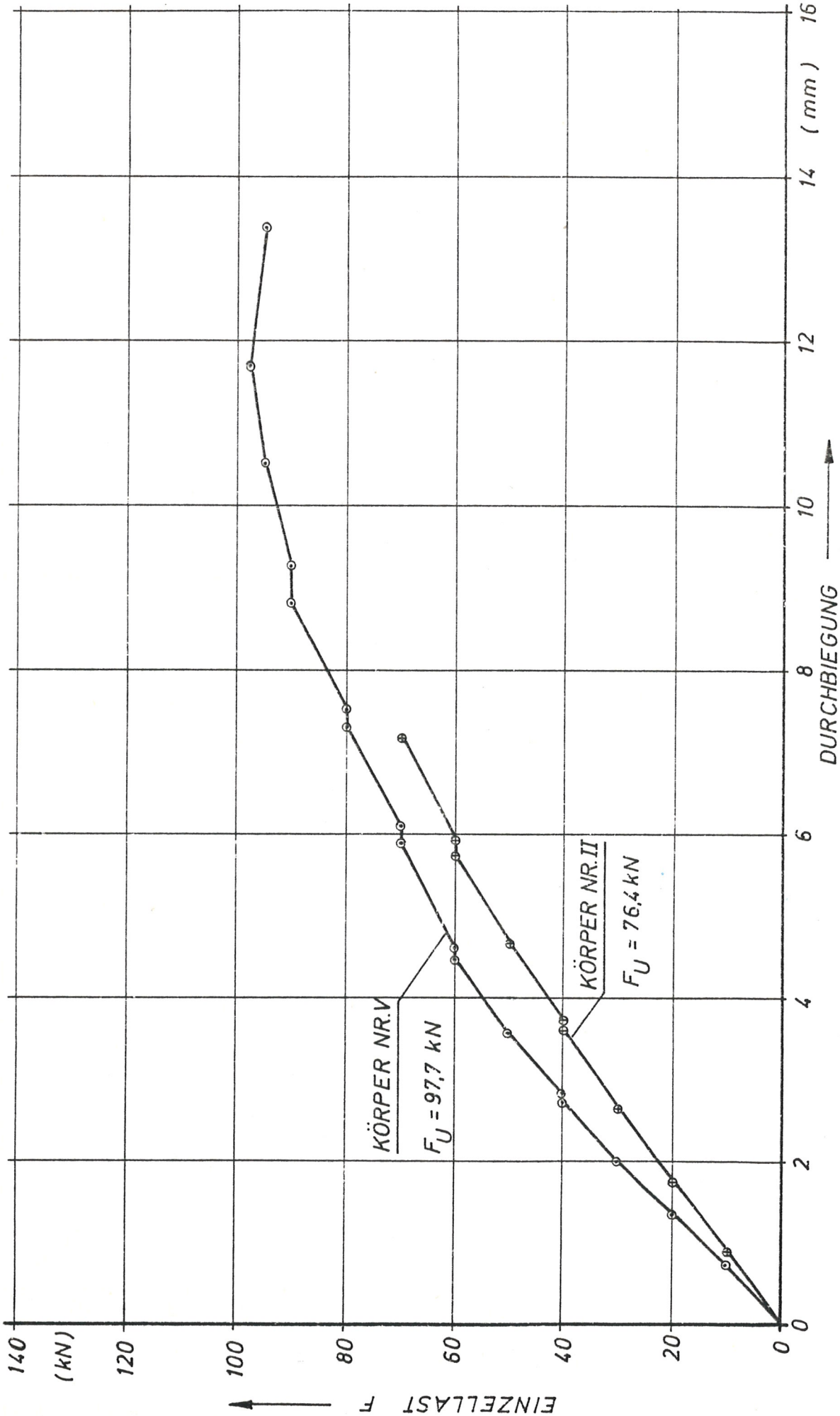


Bild 4.3.18: Last-Durchbiegungslinien für Körper Nr. V und Körper Nr. II (unverstärkt)

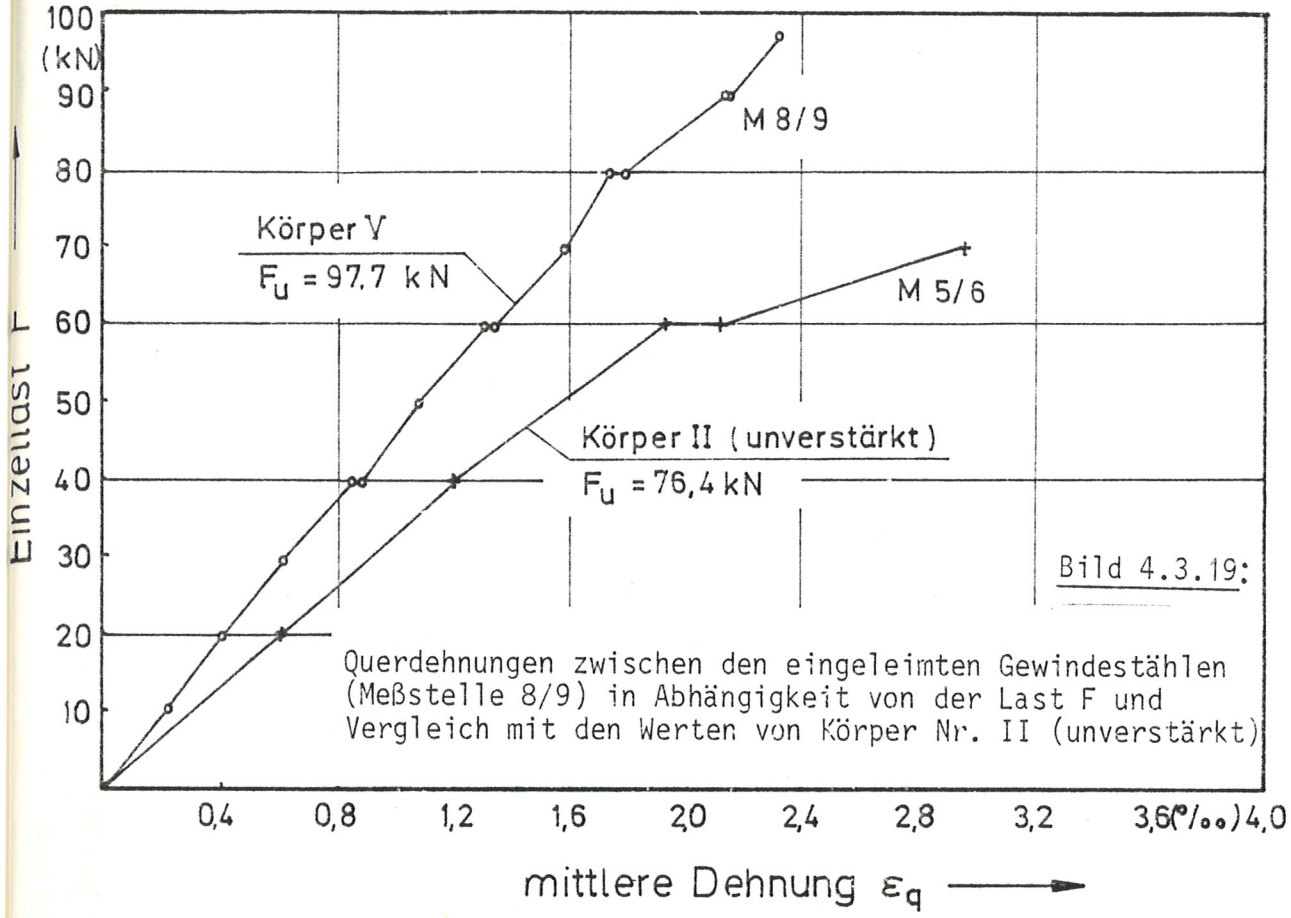


Bild 4.3.19:
Querdehnungen zwischen den eingeleimten Gewindestählen (Meßstelle 8/9) in Abhängigkeit von der Last F und Vergleich mit den Werten von Körper Nr. II (unverstärkt)

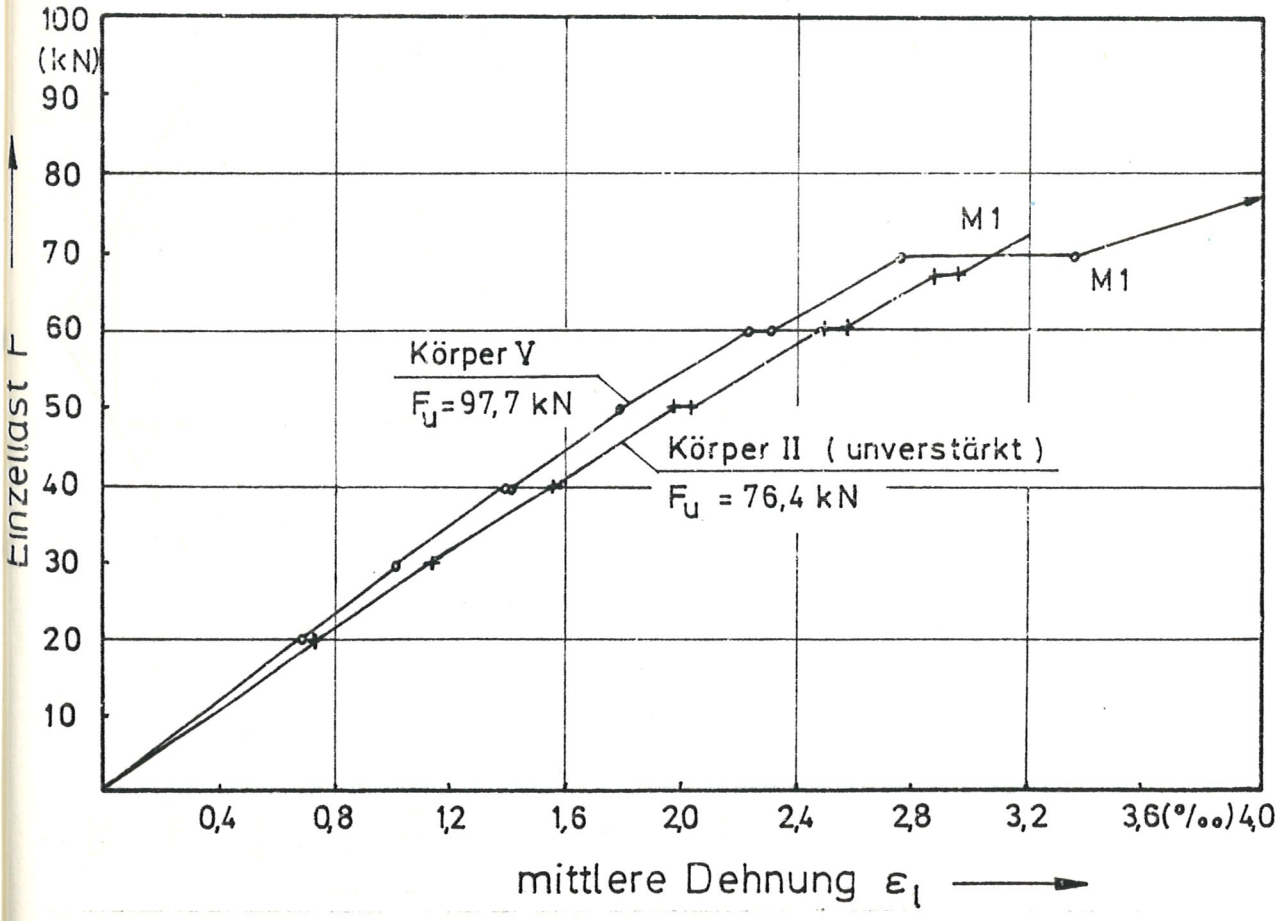
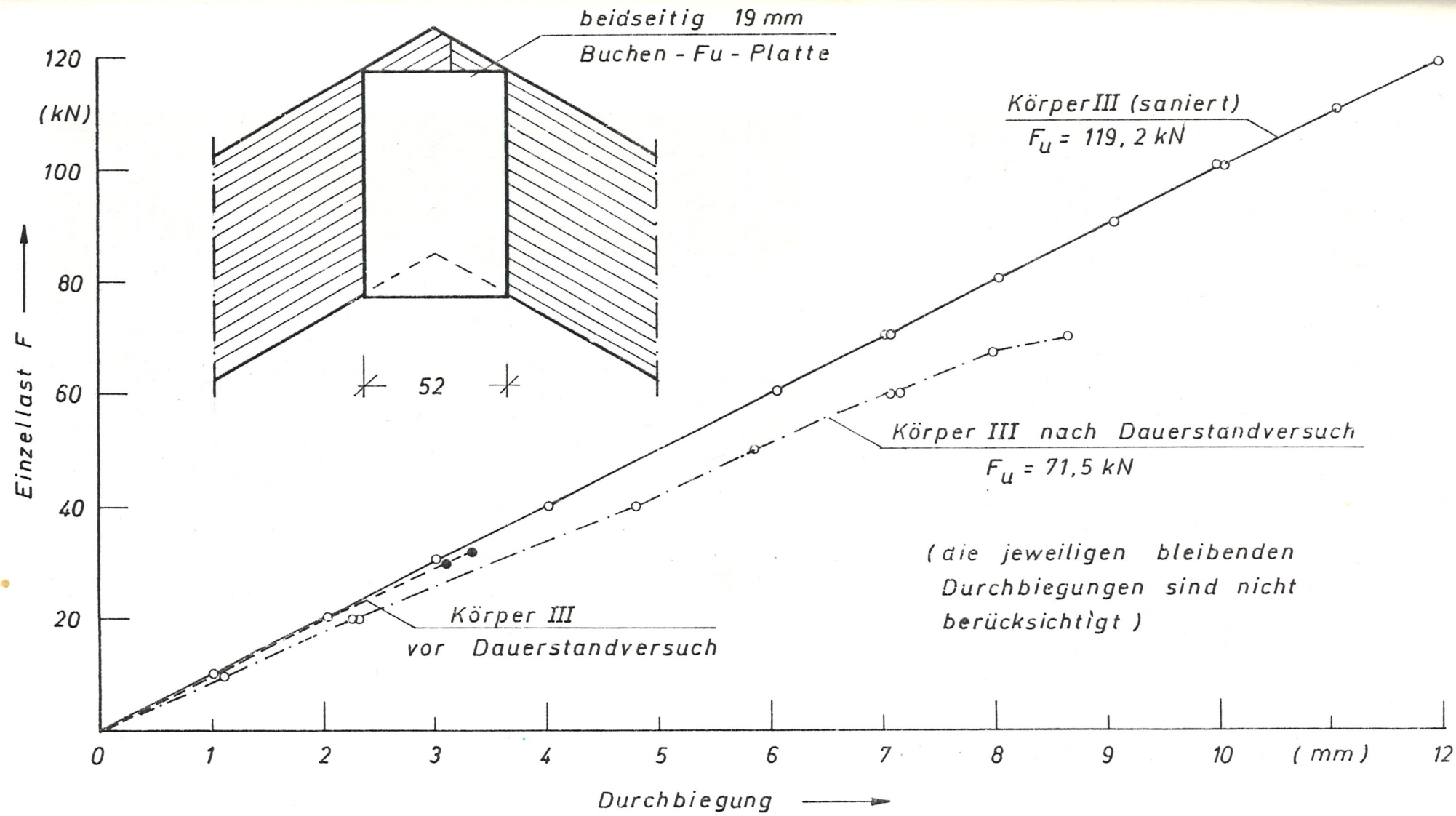


Bild 4.3.20: Maximale Längsdehnungen in Abhängigkeit von der Last F und die entsprechenden Werte beim Körper II (unverstärkt) - Meßstelle (1)



Anlage 4.39

Bild 4.3.21: Last-Durchbiegungslinie des Körpers Nr. III vor und nach der Sanierung

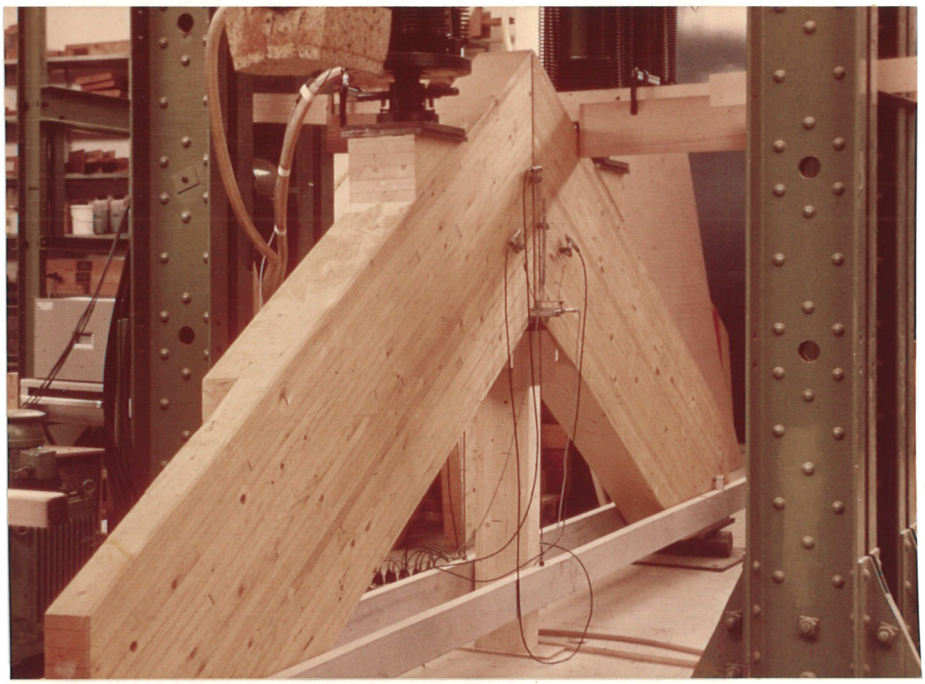


Foto Nr. 4 a

Probekörper Nr. II unter der Prüfanlage beim Belastungsversuch.

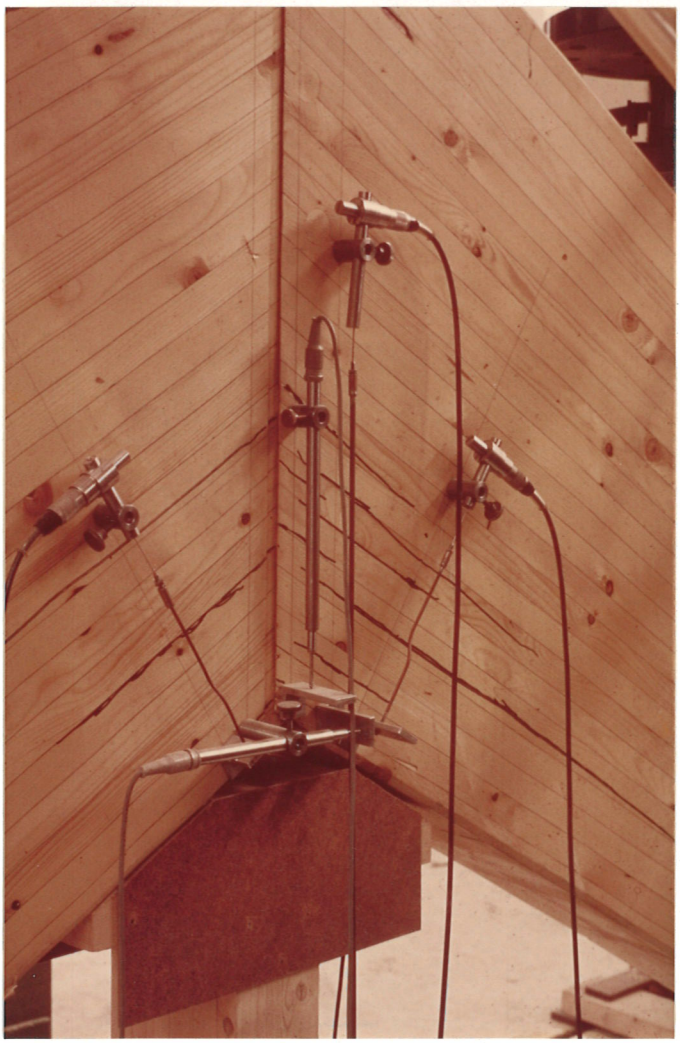


Foto Nr. 4 b

Probekörper Nr. II
Anordnung der Querdehnungsmeßstellen im Stoßbereich und Querzugrisse nach Erreichen der Höchstlast F_u.

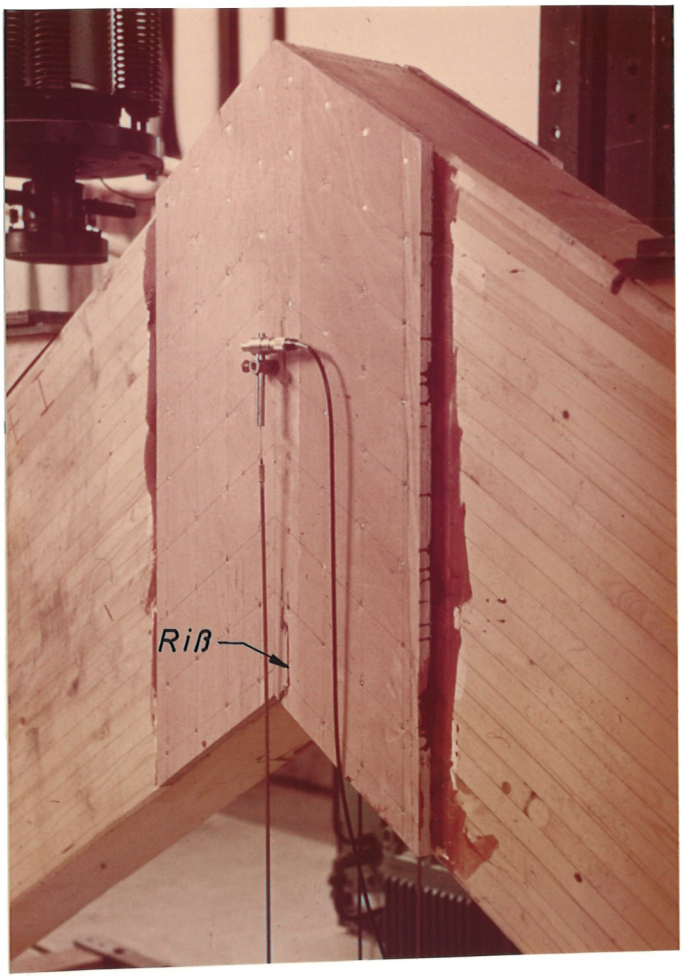


Foto Nr. 4 c

Probekörper Nr. IV
Verstärkung des Firstbereiches durch beidseitige FU-Platten, 19 mm dick.
Anriß der FU-Platten beim Bruchversuch.

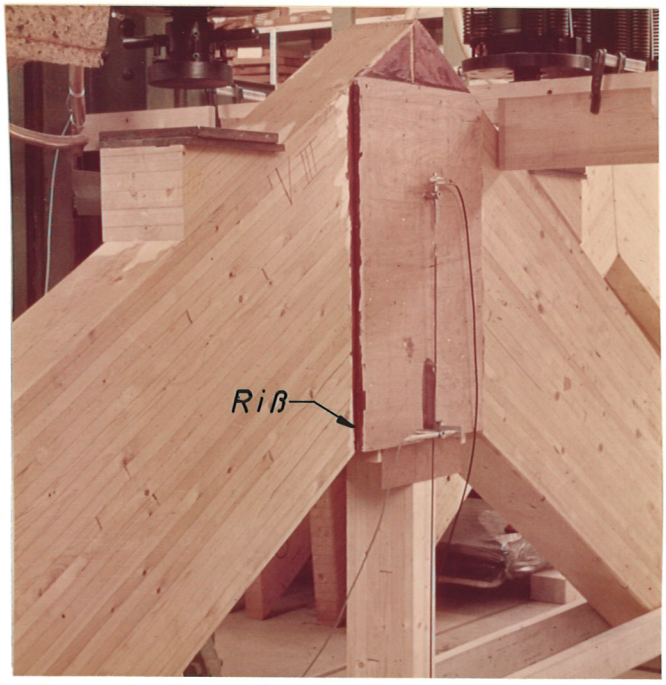


Foto Nr. 4 d

Probekörper Nr. III, saniert Verstärkung des durch Querzugversagen rissegeschädigten Firstbereiches durch beidseitige FU-Platten.