

VERSUCHE MIT GEKRUEMMTEN BRETTSCHICHTTRAEGERN

Teil II: Träger mit geneigtem Obergurt (ohne Firstausrundung)

von

Karl Möhler und Hermann Blumer

Mitteilungen des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe

Versuchsbericht

VERSUCHE MIT GEKRÜMMTEN BRETTSCHICHTTRÄGERN

Teil 2: Träger mit geneigtem Obergurt (ohne Firstausrundung)

Inhaltsverzeichnis:

1. Zweck der Versuche
2. Anlage und Durchführung der Versuche
 - 2.1 Abmessungen und Herstellung der Versuchskörper
 - 2.2 Aufteilung der Versuchskörper
 - 2.3 Versuchsaufbau
 - 2.4 Dehnungs- und Verformungsmessungen
 - 2.5 Anordnung der Meßstellen
 - 2.6 Belastungsversuche
3. Ergebnis der Versuche
 - 3.1 Feuchtigkeitsmessungen
 - 3.2 Versuche zur Ermittlung der Dehnungs- und Spannungsverteilung im Firstquerschnitt (Mittelquerschnitt)
 - 3.3 Dehnungsmessungen über dem gekrümmten Bereich und in den beiden geraden Anschlußstrecken
 - 3.4 Bruchversuche
4. Auswertung der Versuche
 - 4.1 Spannungsverteilung im Firstquerschnitt für Bauart 1 und 2
 - 4.2 Bruchversuche
5. Zusammenfassung, Schlußfolgerungen und Schrifttum.

1. Zweck der Versuche

In Fortsetzung der Versuche mit gekrümmten Brettschichtträgern mit über die ganze Trägerlänge konstanter Querschnittshöhe sollen nunmehr Trägerformen mit gekrümmtem Untergurt und geradem geneigtem Obergurt untersucht werden. Diese Trägerform wird häufig ausgeführt, weil der gerade Obergurt der gewünschten Dachneigung α angepaßt werden kann und **bei gegen die Trägermitte** zunehmender Querschnittshöhe die Widerstandsmomente dem Momentenverlauf entsprechend ansteigen. In Bild 1 (Anlage 1) sind verschiedene derartige Trägerformen dargestellt. Als Grenzfall kann der Träger mit geradem Untergurt nach Bild 1d mit $R = \infty$ angesehen werden. Es sollte durch Dehnungsmessungen geklärt werden, ob die Spannungen, vor allem die Querspannungen, durch die besondere Formgebung gegenüber dem Träger mit konstanter Querschnittshöhe wesentlich beeinflusst werden, wobei wiederum die Anisotropie des Holzes berücksichtigt werden mußte. Schließlich sollte durch Bruchversuche das Tragverhalten derartiger Träger festgestellt werden. Die Versuchsergebnisse sollten schließlich dazu dienen, ein Näherungsverfahren für die Berechnung der maximalen Quer- und Längsspannungen derart geformter Brettschichtträger zu geben. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Meßergebnisse wurden Versuchsträger aus dem 1. Teil des Forschungsauftrages verwendet, die durch entsprechende Bearbeitung des Obergurtes verhältnismäßig leicht in die gewünschte Form gebracht werden konnten.

2. Anlage und Durchführung der Versuche

2.1 Abmessungen und Herstellung der Versuchsträger

Es stand eine Anzahl der für den ersten Teil des Forschungsauftrages angefertigten Versuchsträger (Bauart 1) zur Verfügung. Ihre Form und Abmessungen gehen aus den Bildern 2a bis 2d (Anlage 2) hervor. Alle Messungen wurden zuerst an den Trägern mit konstanter Querschnittshöhe vorgenommen (Bauart 1). Darauf wurde durch einen geraden Sägeschnitt vom Firstpunkt bis zu den Trägerenden die in den Bildern 3a bis 3d (Anlage 3) wiedergegebene Form hergestellt und die Messungen wiederholt (Bauart 2). Beim

Träger 1R2 wurde der Sattel anschließend in einzelnen Schritten (siehe Bild 4a-d, Anlage 4) entlang einer Lamellenfuge abgeschnitten und schließlich der Übergang zum Träger mit konstanter Querschnittshöhe hergestellt.

2.2 Aufteilung der Versuchskörper nach Lagerungsart und Versuchsweise

Ein Teil der Versuchskörper wurde vor den Belastungsversuchen über 13 Monate in einem 3-seitig offenen Schuppen gelagert. Die anderen Träger wurden in einem Prüfraum bei Normalklima aufbewahrt. Eine Zusammenstellung der für die Vergleichsversuche verwendeten Träger mit Angabe des Krümmungsradius R , der Krümmungslänge e , der Querschnittshöhen h_o und h_m , der Verleimungs- und Lagerungsart sowie der Versuchsweise ist in Tabelle 1 (Anlage 5) enthalten.

2.3 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden wie bei Teil 1 auf der 2 x 6 Mp Biegeprüfanlage durchgeführt.

2.4 Dehnungs- und Verformungsmessungen

Es konnten die Meßeinrichtungen aus den früheren Versuchen verwendet werden. Für die Dehnungsmessungen kamen Dehnungsmessstreifen von 20 und 60 mm Meßlänge und induktive Wegaufnehmer von 60 - 120 mm Meßlänge zur Anwendung. Die Durchbiegungs- und Verschiebungsmessungen wurden mit Meßuhren mit einer Anzeigegenauigkeit von 1/100 mm vorgenommen.

2.5 Anordnung der Meßstellen

2.5.1. Versuche mit den Versuchsträgern 1H2 und 1R2 zur Ermittlung der Spannungsverteilung

Der Träger 1H2, der schon im 1. Teil des Forschungsauftrages (Bauart 1) geprüft wurde, wurde mit derselben Meßanordnung in der Bauart 2 für die Vergleichsmessungen belassen. Die Anordnung der Dehnungsmessstreifen geht aus Bild 5 (Anlage 6) hervor. Mit Wegaufnehmern wurden am Träger 1H2 die Quer- und Längsdeh-

nungen im gekrümmten Bereich sowie in den anschließenden geraden Teilen gemessen. Bild 6 (Anlage 6) zeigt die Verteilung der Meßstellen. Am Versuchsträger 1R2 konnten die Querdehnungsmessungen im Firstquerschnitt auf die Stellen beschränkt werden, wo beim Träger 1H2 die größten Dehnungen auftraten. Die Längsdehnungen wurden nur noch auf der Trägersober- und Unterseite gemessen. Bild 7 (Anlage 7) gibt den Lageplan der DMS wieder.

Die Anordnung der Meßuhren für die Durchbiegungsmessungen wurde wie bei Teil 1 vorgenommen.

2.5.2. Bruchversuche

Die Dehnungsmeßstreifen wurden in derselben Anordnung wie im Teil 1 des Versuchsberichtes für die Bruchversuche angebracht. Bis zur P wurden wiederum an je einem Träger jeder Bauart Querdehnungsmessungen mit Wegaufnehmern im gekrümmten Teil und den anschließenden geraden Bereichen vorgenommen. Die Anordnung der Wegaufnehmer geht aus Bild 8 und 9 (Anlage 8) hervor.

2.6 Belastungsversuche

Belastet wurden alle Träger zuerst mit zwei Lastzyklen Vorlast-zu P-Vorlast. Die Last zur P ergab bei den Trägern der Bauart 1 nach Bild 2a-d eine Querkzugspannung von ungefähr $2,5-3,0 \text{ kp/cm}^2$. Bei den Versuchsträgern nach Bauart 2 (Bild 3a-d) mußte, bei Beibehaltung der gleichen Last zur P, mit einer Erhöhung der maximalen Querkzugspannung im Firstquerschnitt um $80 - 100\%$ gerechnet werden. Dadurch war aber ein unmittelbarer Vergleich der Dehnungen zwischen den Trägern der Bauart 1 und der Bauart 2 möglich. Bei den Bruchversuchen wurde von zur P ab in einzelnen Stufen bis zum Bruch belastet. Die Ablesungen der Meßgeräte nahmen pro Laststufe etwa 2-3 Minuten in Anspruch, so daß besondere Wartezeiten nicht eingehalten wurden. Die Querdehnungen wurden zusätzlich in Abhängigkeit von der Belastung mit einem x-y-Koordinatenschreiber aufgezeichnet. Vor den Versuchen wurde an allen Versuchsträgern mit einem elektrischen Holzfeuchtigkeitsmeßgerät der Bauart Siemens an drei Stellen die Feuchtigkeit gemessen.

Nach dem Bruch wurden Darrproben in der Nähe des Bruches entnommen.

3. Ergebnis der Versuche

3.1 Feuchtigkeitsmessungen

Die Holzfeuchtigkeit in den Trägern bei Lagerung in der Versuchsanstalt schwankte zwischen 9,3 und 10,1^o/o und in den Trägern mit Freiluftlagerung zwischen 14,1 und 15,1^o/o. Die Feuchtigkeitswerte der einzelnen Versuchsträger sind in Tabelle 3 (Anlage 13) zusammen mit den übrigen Versuchsergebnissen aufgenommen.

3.2 Versuche zur Ermittlung der Dehnungs- und Spannungsverteilung im Firstquerschnitt (Mittelquerschnitt)

In Bild 10 (Anlage 9) ist die gemessene Verteilung der Längsdehnungen für den Versuchsträger 1H2 der beiden Bauarten 1 und 2 aufgetragen. In Bild 11 (Anlage 10) ist die Verteilung der Querdehnungen wiedergegeben. Am Innenrand ergab die Längsdehnung bei der Bauart 2 (Träger mit geneigtem Obergurt) gegenüber der Bauart 1 (konstante Höhe) eine Erhöhung der Dehnung um 48,5^o/o. Die größten Querdehnungen an den Meßstellen 17 und 43 stiegen um 93^o/o. Die Ergebnisse des am Versuchsträger 1R2 untersuchten Einflusses der Größe der Aufsattelung auf die Dehnungen in Längs- und Querrichtung sind in Tabelle 2 (Anlage 11) zusammengestellt. Gemessen wurde am Träger mit Bauart 1 (s. Bild 2a), Bauart 2 (Bild 3a bzw. 4a) und dann mit den Ausbildungsformen nach Bild 4b bis 4c. Die Innenranddehnungen in Spalte 2 Tabelle 2 nehmen bei den Sattelformen zu. Lediglich beim Uebergang von der Form 4a zu 4b sind praktisch die gleichen Werte aufgetreten. Anders verhalten sich die Querdehnungen an den verschiedenen Meßstellen (Spalte 3). Sie erhöhen sich sehr stark von 2a zu 3a/4a, fallen dann aber wieder ab bis 4c und steigen bei 4d erneut leicht an. Die Durchbiegungen f bzw. Δf und die Zunahme Δl der Auflagerstützweite l (Spalte 4-6) erhöhen sich bei jeder neuen Querschnittsschwächung. In Bild 12 (Anlage 12) sind die aus Vorder- und Rückseite gemittelten Querdehnungen für die verschiedenen Meßstellen des Versuchsträgers 1R2 graphisch für alle Ausbildungsformen aufgetra-

gen. Der Tabelle 3 (Anlage 13) können die Meßergebnisse aller Versuchsträger für die Messungen bis zur P entnommen werden. Neben der Trägerbezeichnung in Spalte 1 sind in Spalte 2 die gemessenen Holzfeuchtigkeiten und in Spalte 3 die beim Versuch registrierten Klimabedingungen festgehalten. Die Spalten 4, 5 und 6 geben die Ergebnisse der Dehnungsmessungen im Firstquerschnitt für die beiden Bauarten wieder. Die Querdehnungen wurden über eine Meßlänge von 6 cm in der Mitte des Querschnittes angegeben. Schließlich sind in den Spalten 7 bis 9 die Resultate der Durchbiegungsmessungen aufgeführt. Um den Unterschied der Querdehnungen zwischen Bauart 1 und Bauart 2 bei gleicher Belastung darzustellen wurden mit einem 2-Koordinatenschreiber die Dehnungen der Meßstreifen 5 und 6 aufgezeichnet. (Bild 13, Anlage 14). Der geradlinige Verlauf der beiden Linien beweist die Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes für diesen Belastungsbereich auch bei Spannungen, die über dem zulässigen Wert liegen.

3.3 Dehnungsmessungen über den gekrümmten Bereich und in den -----beiden geraden Anschlußstrecken-----

Dehnungsmessungen längs des gekrümmten Bereiches und in den beiden Anschlußstrecken wurden am Innen- und Außenrand des Trägers 1H2 (Bauart 2) vorgenommen. Die gemessenen Werte sind in Bild 14 (Anlage 15) aufgetragen. Im Firstpunkt traten keine Längsdehnungen auf; das bedeutet, daß an dieser Stelle keine Längsspannungen vorhanden sind. Die Innenranddehnungen verringern sich mit zunehmender Querschnittshöhe und erreichen ihr Minimum im Firstquerschnitt. Jeweils ca. 15 cm vor Beginn der Krümmung, also praktisch am ^UÜbergang vom geraden oder gekrümmten Teil wurden die Größtwerte der Längsdehnungen sowohl auf der Außenseite wie auch auf der Innenseite festgestellt. Die Absolutwerte scheinen allerdings durch örtliche Wuchseigenschaften bedingt zu sein. Die Querdehnungen wurden an je einem Versuchsträger jeder Ausbildungsart nach Bild 2a - 2d und Bild 3a - 3d gemessen. Die Ergebnisse sind in Bild 15 bis 18 (Anlage 16 - 19) jeweils für Bauart 1 und Bauart 2 aufgetragen. Es zeigte sich, daß bei allen Trägern der Bauart 2 die Querdehnungsverteilung im Firstquerschnitt eine eindeutige Spitze hat und der Größtwert höher als

bei Bauart 1 liegt.

3.4 Bruchversuche

Die den Bruch der Träger (Bauart 2) auslösenden Bruchlasten $\max P$ sind in Tabelle 4 (Anlage 20) zusammengestellt. Die zugehörigen rechnerischen Spannungen wurden mit Hilfe der nach der polarorthotropen Scheibentheorie nach Buchmann [1] mit einem Anisotropiefaktor $s = \sqrt{E_l/E_q} = 6$ für die Träger mit konstanter Querschnittshöhe (Bauart 1) berechneten Werten in der Weise bestimmt, daß diese Werte entsprechend den Dehnungsunterschieden zwischen Bauart 1 und Bauart 2 erhöht wurden. Diese Werte sind in den Spalten 3 und 4 aufgeführt. In Klammer sind die nach DIN 1052 ermittelten Spannungswerte angegeben, wenn mit der Querschnittshöhe des Firstquerschnittes wie bei Bauart 1 gerechnet wird. Ein Vergleich der rechnerischen Werte mit den DIN-Werten zeigt, daß die Längsspannungen am Innenrand 15 bis 22% über den DIN-Werten liegen, während die Querkzugbruchspannungen je nach Krümmung und Krümmungslänge 26 u. 27%, 62 u. 72% und 13 u. 16% höher liegen. Der Bruch erfolgte bei allen Trägern infolge Überschreitens der Querkzugfestigkeit. Beim Träger 3R3 sprang gleichzeitig mit dem Querkzugbruch der Sattel ab. Die Fotos der Bilder 19-21 (Anlage 21, 22) zeigen einige der gebrochenen Versuchsträger.

Die mittels 2-Koordinatenschreiber aufgenommene Last-Querdehnungslinie bis zum Bruch ist in Bild 23 (Anlage 23) für den Versuchsträger 4H4 wiedergegeben. Die Linie verläuft praktisch geradlinig, wobei jeweils bei den Ablesungsstufen geringe Kriecherscheinungen auftreten, während die 1. Rißbildung zu einem Dehnungsrückgang führt.

4. Auswertung der Versuche

4.1 Spannungsverteilung im Firstquerschnitt für Bauart 1 und 2

Die Umrechnung der gemessenen Dehnungen in Spannungen erfolgte wie im 1. Teil unter Zuhilfenahme der beiden folgenden Gleichungen für die Spannungskomponenten in Längs- und Querrichtung:

$$\text{Längsspannung: } \sigma_l = \frac{\epsilon_l \cdot s_{33} - \epsilon_q \cdot s_{23}}{s_{22} \cdot s_{33} - s_{32} \cdot s_{23}} \quad (1)$$

$$\text{Querspannung: } \sigma_q = \frac{\epsilon_q \cdot s_{22} - \epsilon_o \cdot s_{32}}{s_{22} \cdot s_{33} - s_{32} \cdot s_{23}} \quad (2)$$

Die Schubspannungskomponente im Firstquerschnitt verschwindet infolge der zur Trägermitte vorliegenden Symmetrie der Belastung und der Trägerform. Die "elastischen Konstanten" wurden im 1. Teil für den Träger 1H2 (4.1. Vorversuch) bestimmt. Diese Werte können für die Auswertung der Spannungen am Träger 1H2 auch für die Bauart 2 übernommen werden.

Für den Versuchsträger 1R2 wurde $s_{22} = \frac{1}{E_l}$ aus den vertikalen Durchbiegungsmessungen der Bauart 1 bestimmt. $s_{33} = \frac{1}{E_q}$ wurde an einer herausgesägten Zugprobe mit einem Querschnitt von 8 x 8 cm für die einzelnen Meßstellen ermittelt. Diese an der Zugprobe ermittelten Dehnungen s_{33} und die sich hieraus ergebenden Werte E_q können Bild 24 (Anlage 24) entnommen werden. s_{23} bzw. s_{32} konnten an diesem Versuchsträger nicht bestimmt werden, da auf die über den ganzen Querschnitt verteilten Messungen längs zur Faser im Hinblick auf den erforderlichen Aufwand verzichtet werden mußte. Da der Einfluß der Querkontraktionen auf die Querdehnungen in Querschnittsmitte aber relativ gering ist, konnte für die Auswertung der Spannungen mit einem Näherungswert von $s_{23} = s_{32} = 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kp}$ gerechnet werden.

Aus den Gleichungen (1) und (2) können die Spannungen in Längs- und Querrichtung aus den an den beiden Trägern 1H2 und 1R2 gemessenen Dehnungen berechnet werden. In Bild 25 und 26 (Anlage 25) sind die Meßergebnisse des Versuchsträgers 1H2 für die einzelnen Meßstellen zusammen mit dem rechnerischen Spannungsverlauf nach der orthotropen Scheibentheorie aufgetragen. Bauart 1 konnte mit der Theorie von Buchmann [1] gerechnet werden (siehe Teil 1), für die Bauart 2 wurde mangels einer genauen Theorie ein Näherungsverfahren angewendet, wobei die Anisotropieverhältnisse wie folgt angesetzt wurden:

$$s = \sqrt{E_l/E_q} = 6; K = \sqrt{E_l/G} = 4.7; \mu_l = 0.3.$$

Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch ist für die

Längsspannungen verhältnismäßig gut. Bei den Querspannungen stimmen die maximalen Werte von Messung und Rechnung zwar ebenfalls gut überein, die meisten Meßwerte liegen aber unterhalb der Rechnung, was wohl auf die größeren Ungleichmäßigkeiten des Holzes in Querrichtung zurückzuführen sein dürfte. Die Rechnung liegt in jedem Fall auf der sicheren Seite. Trotz der gleichen Querschnittshöhe im Firstquerschnitt und den gleichen Krümmungsverhältnissen von Bauart 1 und 2 unterscheiden sich die maximale Längsspannung um etwa 55^o/o und die größte Querkzugspannung um etwa 70^o/o.

In Tabelle 5 (Anlage 26) sind die Ergebnisse der Spannungsermittlung am Versuchsträger 1R2 bei stufenweiser Verringerung der Firsthöhe wiedergegeben. Die Veränderung der Trägerform im Firstbereich wirkt sich sowohl auf die maximale Längsspannung am Innenrand als auch auf die Querspannungen aus. Es zeigt sich, wie bei Träger 1H2, daß bei geneigtem Obergurt die Querspannungen wesentlich größer werden als beim Träger nach Bauart 1. Hier wurden sogar bei einer rechnerischen Spannungszunahme von 68 bis 76^o/o Zunahmen von 83 bis 94^o/o gemessen. Bei stufenweiser Entfernung des Sattels nahmen die Querkzugspannungen wieder ab und die Stelle der maximalen Querspannung verlagerte sich gegen den Innenrand; gleichzeitig erhöhten sich die Innenrandlängsspannungen als Folge der Verringerung der Querschnittshöhe. Die prozentualen Abweichungen der Meßwerte von den rechnerischen Werten (Tabelle 5) sind bei den maximalen Querkzugspannungen etwas größer als bei den Randspannungen. Bei der starken Streuung der E_q -Werte kann die Übereinstimmung als gut bezeichnet werden.

Bei den Trägern, mit denen Bruchversuche durchgeführt wurden, können aus dem Vergleich der bis zur P gemessenen Dehnungen (Tabelle 3) von Bauart 1 und Bauart 2 die Änderungen der Innenrand- und Querkzugspannungen im Firstquerschnitt festgestellt werden. In Tabelle 6 (Anlage 27) sind in Spalte 2 die Verhältnisse der Innenrandspannungen und in Spalte 3 die Verhältnisse der Querkzugspannungen (Mittel aus Meßstelle 5 und 6, wo etwa die maximalen Querkzugspannungen auftraten) zusammengestellt. Außerdem sind in den Spalten 4, 5 und 6 auch die Verhältnisse der Durchbiegungen und horizontalen Verschiebungen enthalten. Aus dieser Aufstellung geht hervor, daß bei allen Trägern eine Zunahme der

Innenrandspannungen und der Querkzugspannungen beim Uebergang von Bauart 1 in Bauart 2 zu verzeichnen ist. Für diese Trägerformen können die Spannungsnachweise nicht mehr nach DIN 1052 Blatt 1, Abs. 11.5.7 mit den dort angegebenen Formeln (39) und (40) geführt werden, wenn man dabei das Krümmungsverhältnis und die Querschnittshöhe am Firstquerschnitt einsetzt. In diesem Falle würde der Fehler aufgrund der Meßergebnisse für die Innenrandspannung $\max \sigma_B$ für die Bauart 2 bei der Trägerform nach Bild 3a (Träger 1H2 und 1R2) etwa 50⁰/o und für die Querkzugspannung $\max \sigma_{z\perp}$ etwa 100⁰/o betragen. Auch die Durchbiegungen müssen unter Berücksichtigung des veränderlichen Trägheitsmomentes berechnet werden. Bei weniger ausgeprägtem Firstsattel verringern sich die Unterschiede zwischen DIN-Berechnung und Messung bei der Innenrandspannung auf 4-17⁰/o, bei der Querkzugspannung auf 7-67⁰/o, wobei die Trägerform nach Bild 3d (Träger 4H4 und Träger 4H3) die kleinsten Unterschiede aufweist.

4.2 Bruchversuche

4.2.1. Längsspannungen bei z_{ul} P

Die Biegeelastizitätsmoduln wurden aus den gemessenen Durchbiegungen zwischen den Kolben Δf (siehe Tabelle 3, Spalte 9) analog zu Teil 1 nach der genauen Theorie des teils geraden, teils gekrümmten Trägers mit Berücksichtigung der Anisotropie berechnet. In Tabelle 7 Anlage 28 sind die verschiedenen Elastizitätsmoduln E_l zusammengestellt. Der mittlere Elastizitätsmodul ergibt sich zu 129 330 kp/cm² (Kleinstwert 113 290, Größtwert 152 000).

Die aufgetretenen Biegerandspannungen σ_l können aus den gemessenen Längsdehnungen ϵ_l mit $\sigma_l = \epsilon_l \cdot E_l$ bestimmt werden. Die Werte ϵ_l werden der Tabelle 3 (Anlage 13) entnommen. Die Randspannungen für die Bauart 1 sind in Tabelle 7, Spalte 5 und 6 enthalten. In den Spalten 7 und 8 sind die rechnerischen Werte nach Buchmann [1] gegenübergestellt. Die Abweichungen gegenüber den gemessenen Spannungen liegen etwa in der gleichen Größenordnung wie bei Teil 1. In Spalte 9 der Tabelle 7 sind die gemessenen Biegespannungen am Innenrand für die Bauart 2 angegeben.

4.2.2. Querspannungen bei zul P

Bei den Trägern, mit denen Bruchversuche durchgeführt wurden, konnten die aufgetretenen Querspannungen nicht bestimmt werden, da der Bruch meistens in Trägermitte auftrat und daher keine Querprobe zur Bestimmung von E_q wie bei den Trägern 1H2 und 1R2 entnommen werden konnten. Hier konnte nur der Unterschied zwischen Bauart 1 und Bauart 2 gemäß den Verhältniswerten der Tabelle 6, Spalte 3, festgestellt werden.

4.2.3. Bruchfestigkeiten $\sigma_{z\perp}$ Bruch

Die rechnerischen Querkzugfestigkeiten sind in Tabelle 4, Spalte 4, (Anlage 20) zusammengestellt. Die Streuungen sind verhältnismäßig gering. Bei den verhältnismäßig wenigen Trägerversuchen konnte wie bei Teil 1 kein Festigkeitsunterschied weder zwischen den in verschiedenem Klima gelagerten Trägern noch zwischen den beiden Leimsorten festgestellt werden. Aus äußerlich unbeschädigten Reststücken der beiden gebrochenen Träger 1H4 und 4R3 wurden an verschiedenen Stellen im geraden und gekrümmten Bereich einzelne Querkzugproben mit einem Querschnitt von 20 x 55 mm entnommen. Die fehlerfreien Proben wurden hierauf in einer Zugprüfmaschine auf Querkzugfestigkeit untersucht. Die Proben hatten bei diesem Versuch eine mittlere Feuchtigkeit von 10,85% und eine Rohdichte von 0,456 g/cm³. In Tabelle 8 (Anlage 29) ist die statistische Auswertung der Querkzugfestigkeiten für die Versuchsträger aus Teil 1 und aus Teil 2, für die Querkzugproben aus den Trägern 1H4 und 4R3 und schließlich für die Querkzugproben, die im Jahre 1967 mit demselben Querschnitt aus Abschnitten von verleimten Brettschichtträgern aus der Praxis entnommen wurden, wiedergegeben. Die etwas höheren mittleren Querkzugfestigkeiten der Träger mit geradem Obergurt (Teil 2) gegenüber den Trägern mit konstantem Querschnitt (Teil 1) dürfte auf den unterschiedlichen Verlauf der max. Querkzugspannungen längs des gekrümmten Bereiches zurückzuführen sein. Außerdem ist festzustellen, daß der untere Vertrauensbereich der Mittelwerte der Querkzugfestigkeiten der Einzelproben aus den Trägern 1H4 und 4R3 um 10 und 26% über den Festigkeiten der be-

treffenden Träger mit 11,0 und 11,9 kp/cm² liegt.

5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

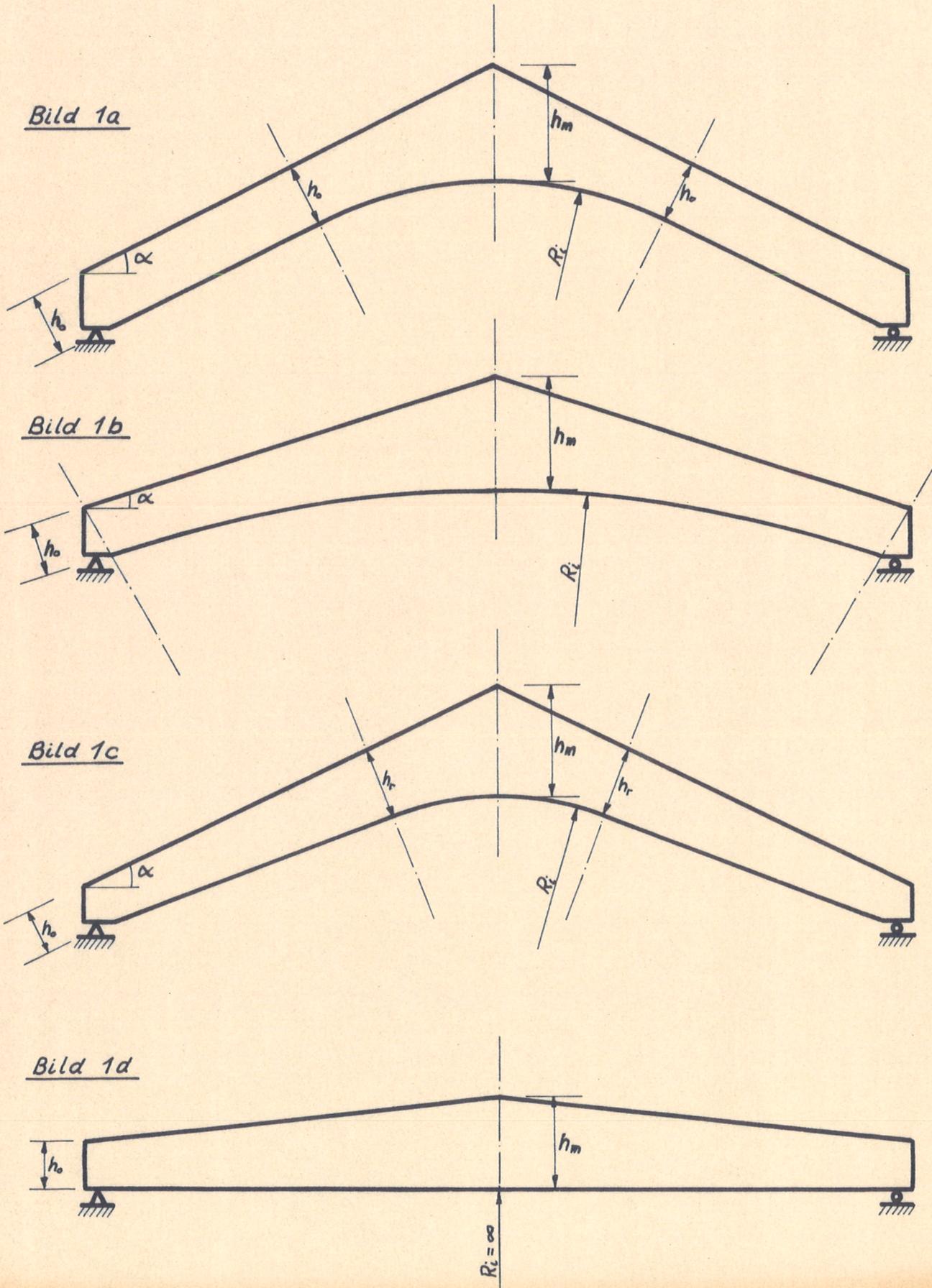
Die Versuche mit gekrümmten Brettschichtträgern mit geneigtem Obergurt im Firstbereich (Teil 2 der Forschungsaufgabe) haben gezeigt, daß der Spannungszustand für die Längs- und Querspannungen gegenüber den Trägern mit konstanten Querschnittsabmessungen erheblich verändert wird. Die Abweichungen bei den maximalen Querzugspannungen sind u.U. größer als bei den Längsspannungen. Der Spannungsnachweis nach der DIN 1052, Blatt 1, Abschnitt 11.5.7 mit den Formeln (39) und (40) kann für die aufgesattelte Trägerform nicht angewandt werden. Er muß durch neue Formeln, die erst noch ausgearbeitet werden müssen, ersetzt werden. Solange diese den tatsächlichen Verhältnissen derartiger Trägerformen gerecht werdende Bemessungsformeln nicht vorliegen, sollte man die Firstaufsattelung ohne starre Verbindung mit dem Trägerteil herstellen, so daß im Krümmungsbereich eine konstante wirksame Trägerhöhe vorliegt. (Hempel [2]).

Die bei den Bruchversuchen festgestellten Querzugfestigkeiten liegen etwas über den im Teil 1 festgestellten Werten, was auf die geringere Verteilungsbreite des Maximalwertes über die Krümmungslänge zurückzuführen ist. Sowohl die Verleimung wie auch die Lagerungsart hatten keinen deutlich erkennbaren Einfluß auf die Querzugfestigkeit. Auch die Versuche des Teiles 2 haben bestätigt, daß im Hinblick auf die in der Praxis gegenüber den Verhältnissen bei den Probekörpern auftretenden Abweichungen eine Erhöhung der nach DIN 1052, Blatt 1 vorgesehenen zulässigen Querzugspannungen von 2,5 kp/cm² nicht verantwortet werden kann.

Schrifttum

- [1] Buchmann,: Berechnung polarorthotroper Kreisbogenscheiben konstanter Dicke unter reiner Biegebeanspruchung.
Die Bautechnik 1/1969, S. 27.
- [2] Hempel, G.: Vorsicht bei Quersugspannungen.
Bauen mit Holz 1970 Heft 2, S. 72.
- [3] Foschi, R.O.: Stresses in curved glued-laminated timber beams: Experimentel Study. Forest Products Journal, Bd. 21 (1971), Heft 7, S. 42/48.

Bild 1 Bauformen gekrümmter Brettschichtträger mit
geneigtem Obergurt



Ausbildung der Versuchsträger Bauart 1

Träger-Querschnitt $b/h = 8/30\text{ cm}$

Bild 2a Krümmungsverhältnis $\beta = R/h = 5$, $e = 100\text{ cm}$ Neigungswinkel $\alpha = 19,5^\circ$

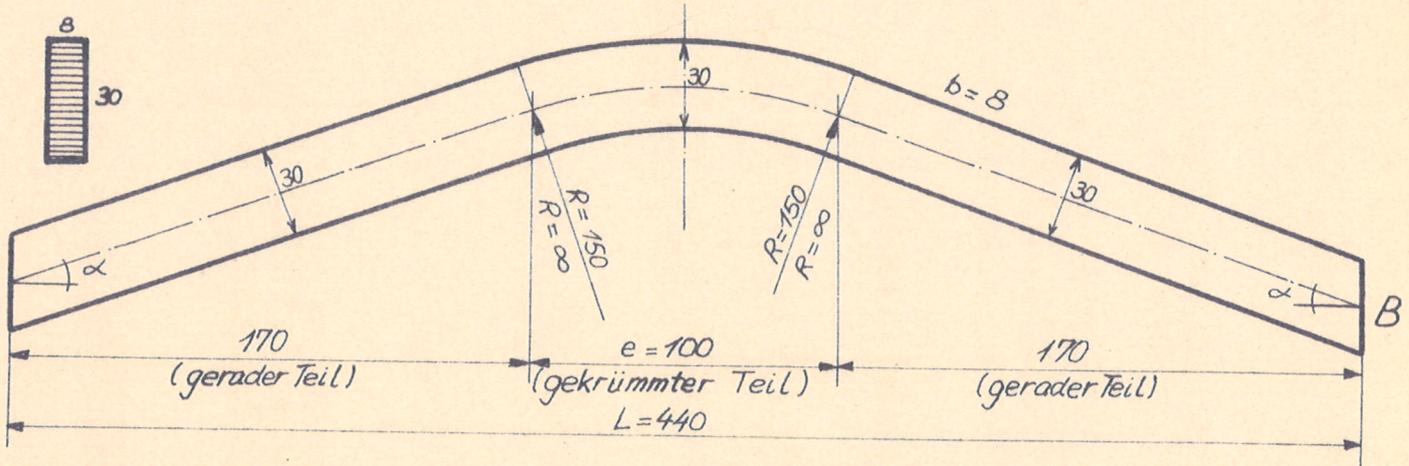


Bild 2b Krümmungsverhältnis $\beta = R/h = 5$, $e = 50\text{ cm}$ Neigungswinkel $\alpha = 9,6^\circ$

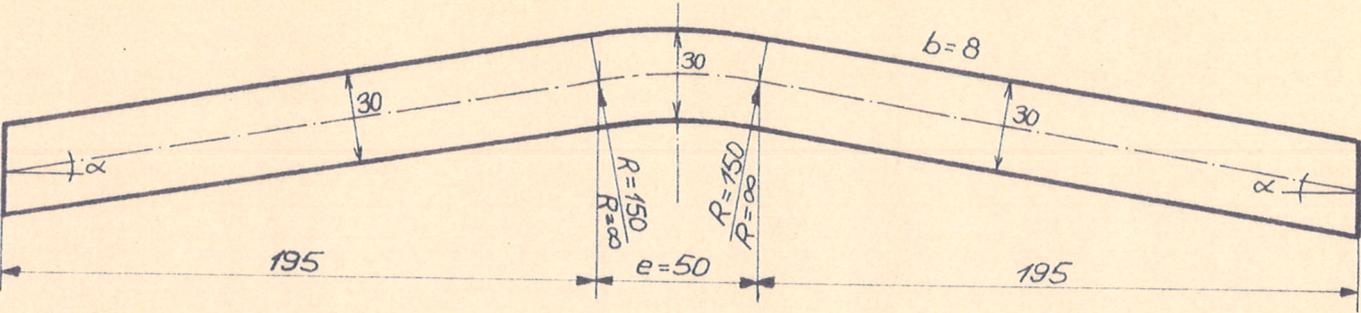


Bild 2c Krümmungsverhältnis $\beta = R/h = 10$, $e = 100\text{ cm}$ Neigungswinkel $\alpha = 9,6^\circ$

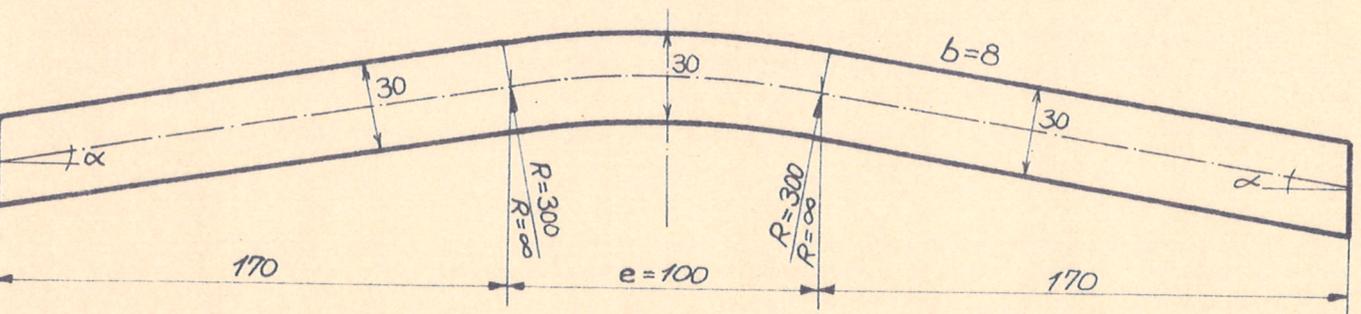


Bild 2d Krümmungsverhältnis $\beta = R/h = 10$, $e = 50\text{ cm}$ Neigungswinkel $\alpha = 4,8^\circ$

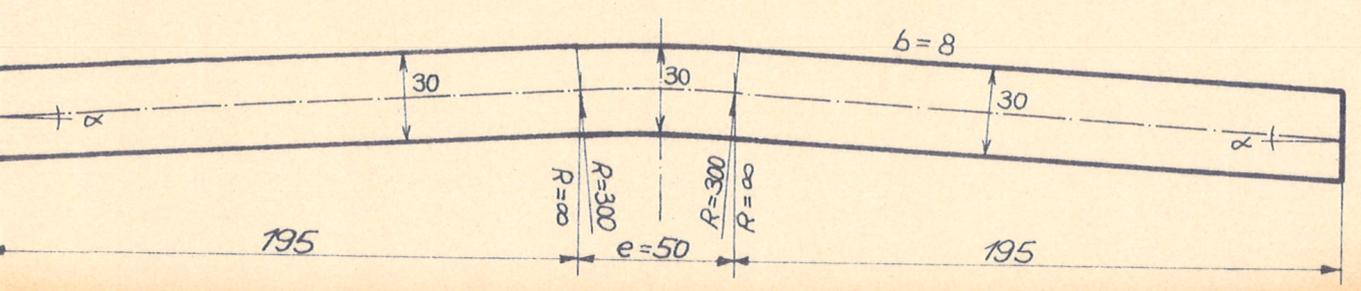


Bild 3 Abgearbeitete Versuchsträger, Bauart 2

Bild 3a: Träger 1H2, 1R2

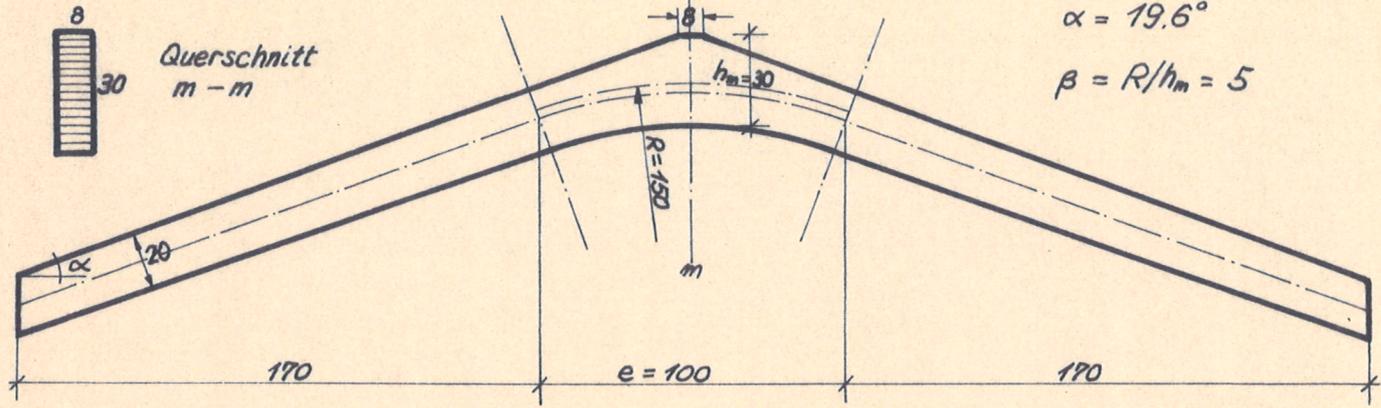


Bild 3b: Träger 2H2, 2R3

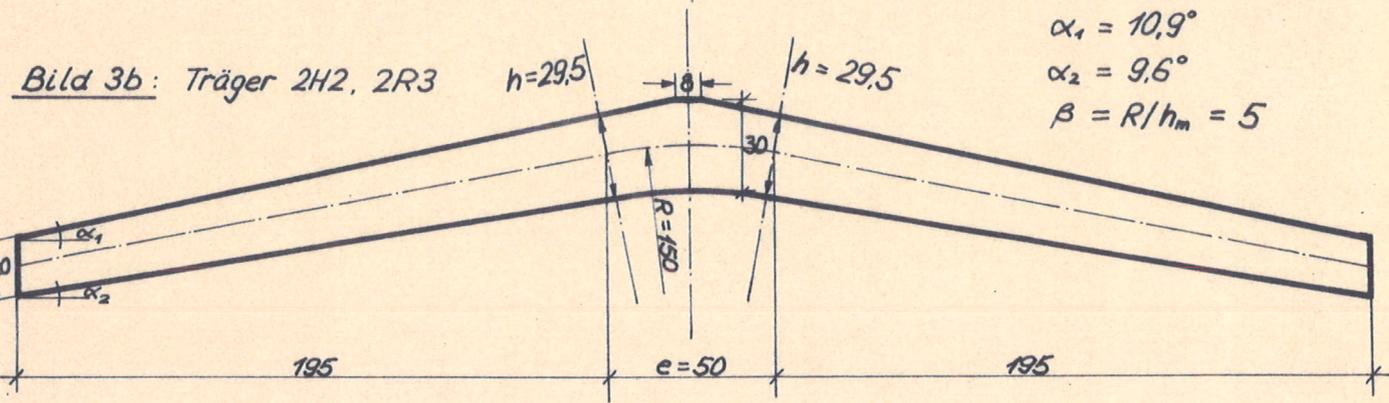


Bild 3c: Träger 3R4, 3R3

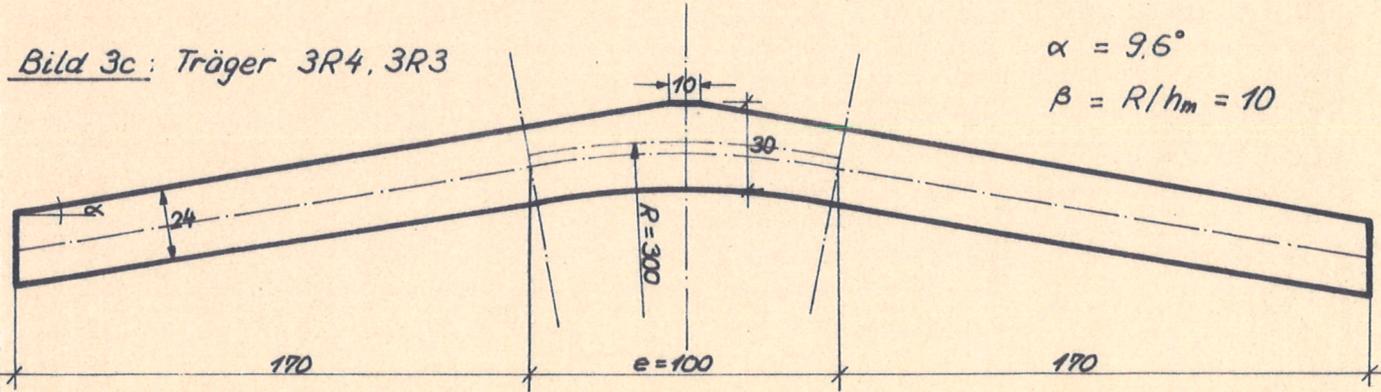


Bild 3d: Träger 4H4, 4H3

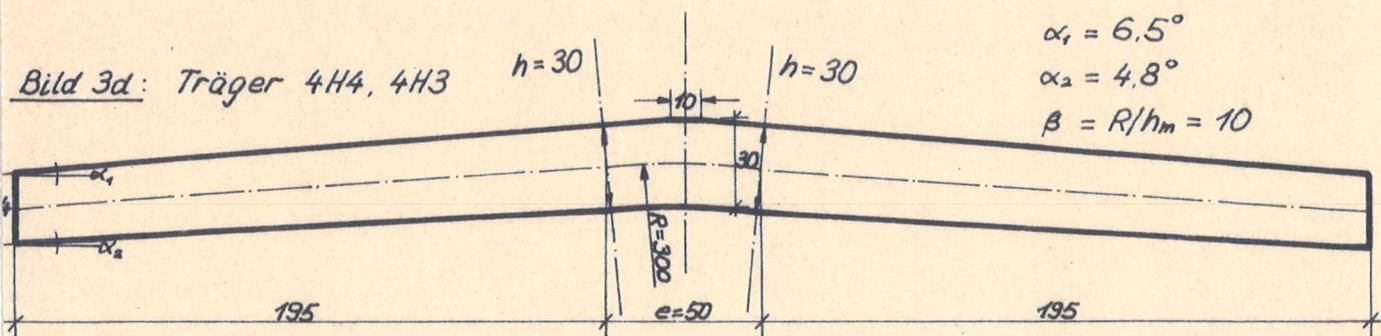


Bild 4 Formgebung am Träger 1R2

Bild 4a

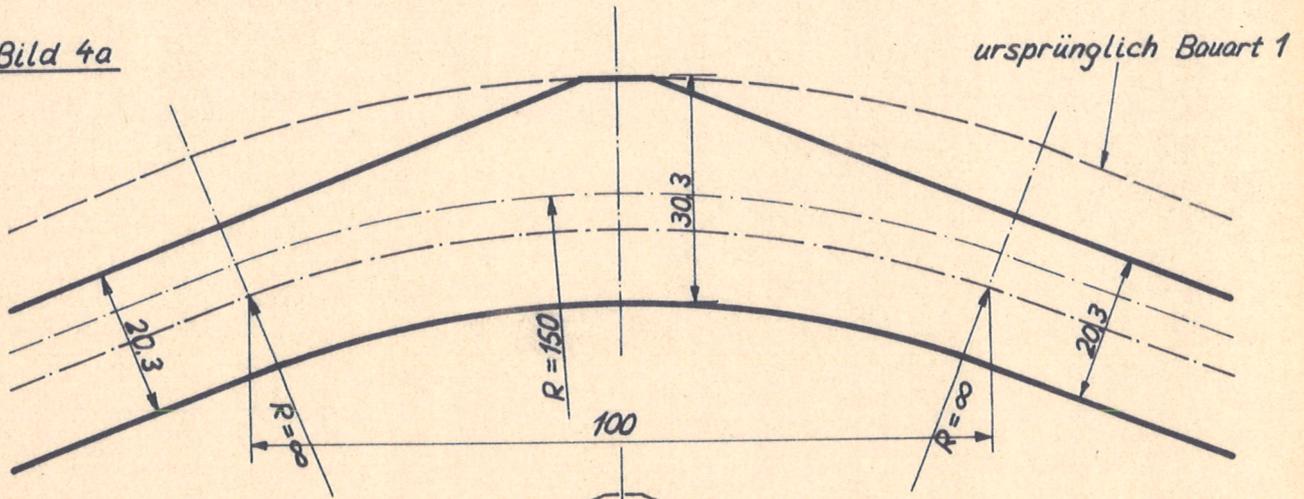


Bild 4b

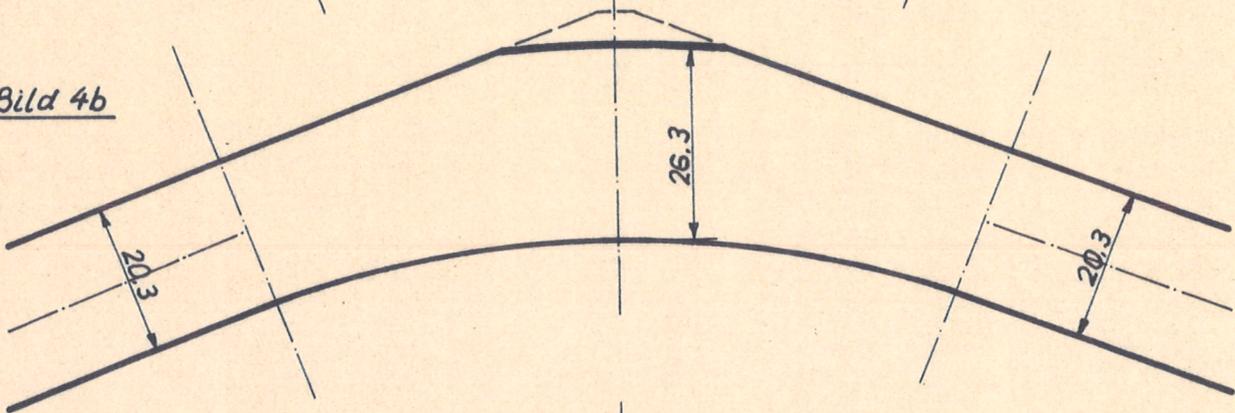


Bild 4c

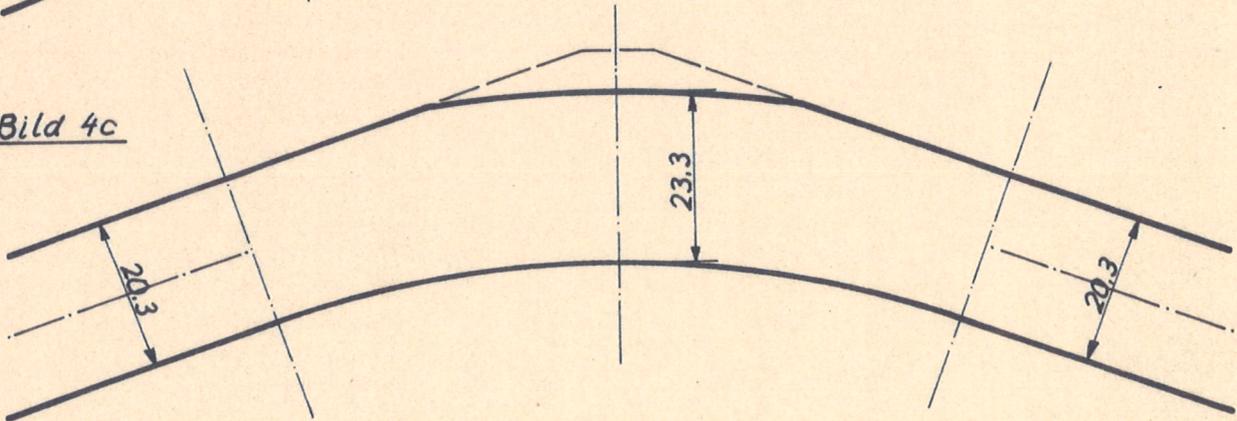


Bild 4d

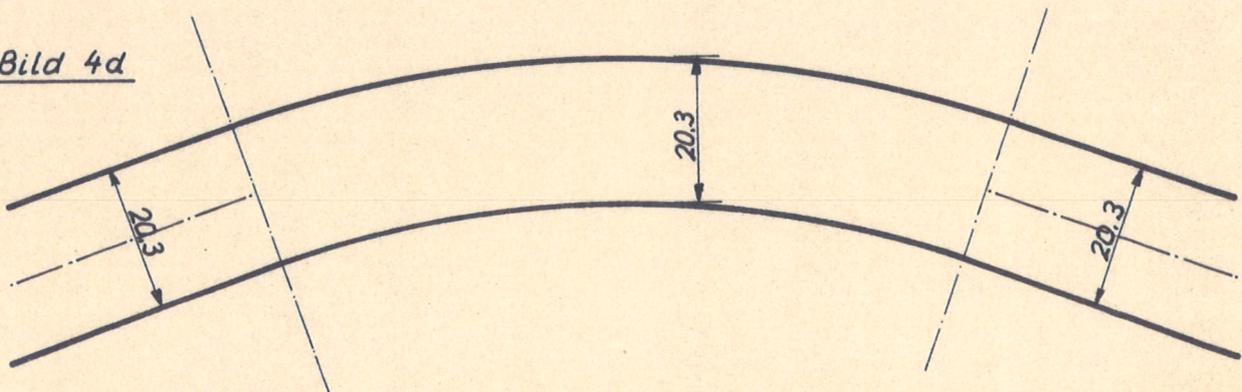


Tabelle 1: Zusammenstellung der verwendeten Versuchsträger

Bezeichnung	R [cm]	e [cm]	h_o [cm]	h_m [cm]	Leim	Lagerung	Versuchsweise
1H2	150	100	20	30	Ha	V	Spannungs- messungen
1R2	150	100	20	30	Re	V	
2H2	150	50	20	30	Ha	V	Bruchversuch
2R3	150	50	20	30	Re	F	
3R4	300	100	24	30	Re	V	
3R3	300	100	24	30	Re	F	
4H4	300	50	24	30	Ha	V	
4H3	300	50	24	30	Ha	F	

Es bedeuten:

R = mittlerer Krümmungsradius

e = Länge des gekrümmten Bereichs

h_o = Höhe an den Endquerschnitten (Bauart 2)

h_m = Höhe in Trägermitte

Leim: Ha = Harnstoff Kaurit 220

Re = Resorzinharz Kauresin 440 R

Lagerung: V = in der Versuchsanstalt

F = im Freien

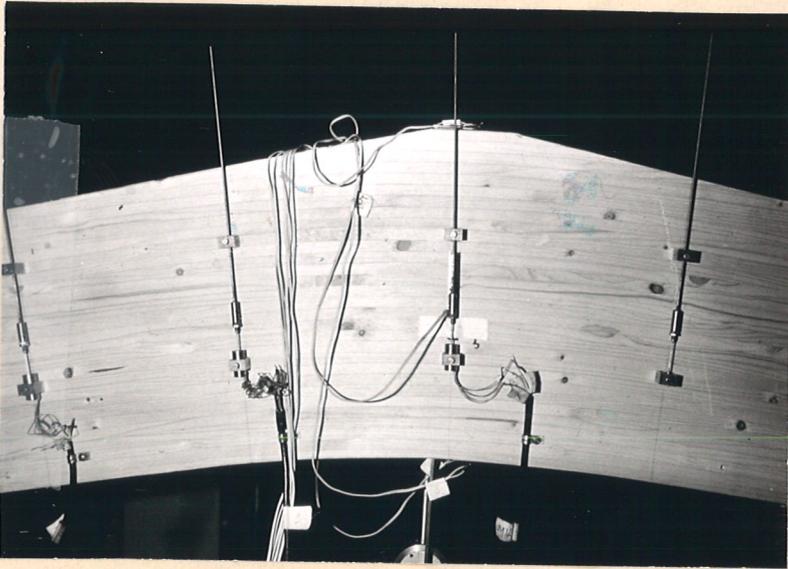


Bild 5

Anordnung der DMS
am Träger 1H2

Bild 6 Anordnung der Wegaufnehmer für die Quer- und Längsdehnungsmessungen am Träger 1H2

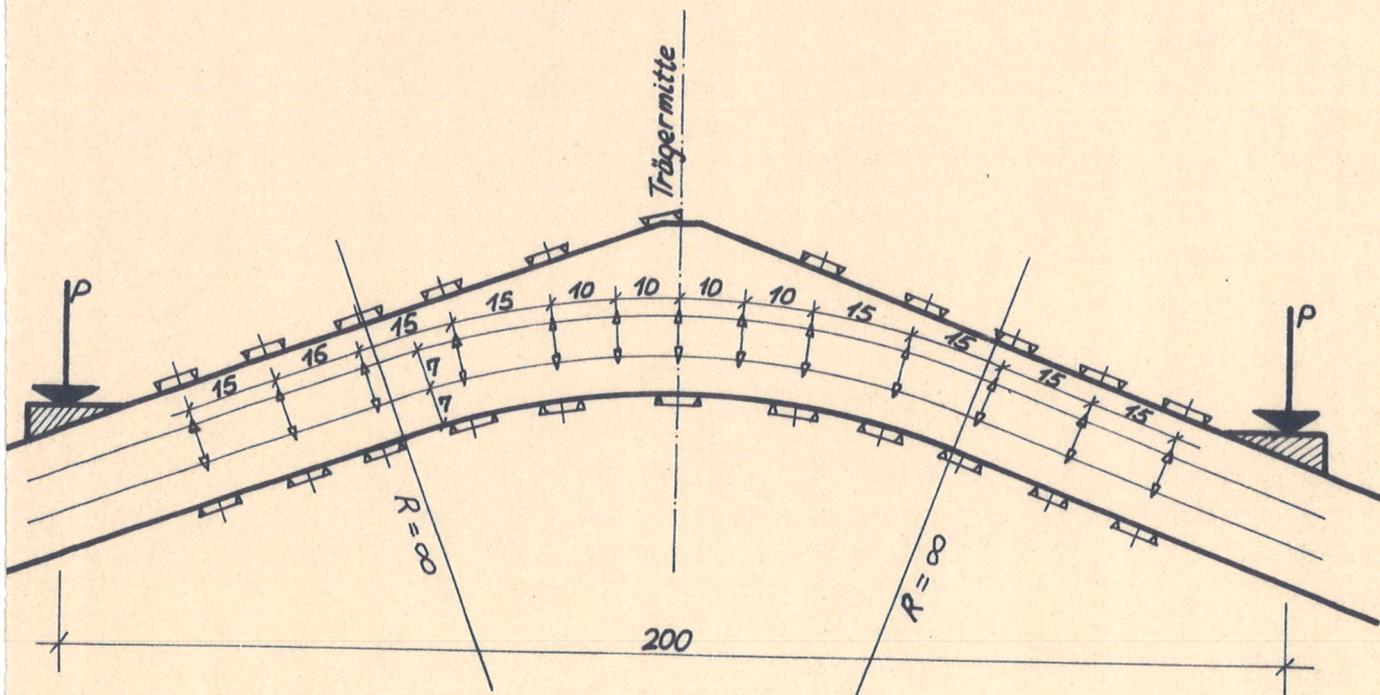
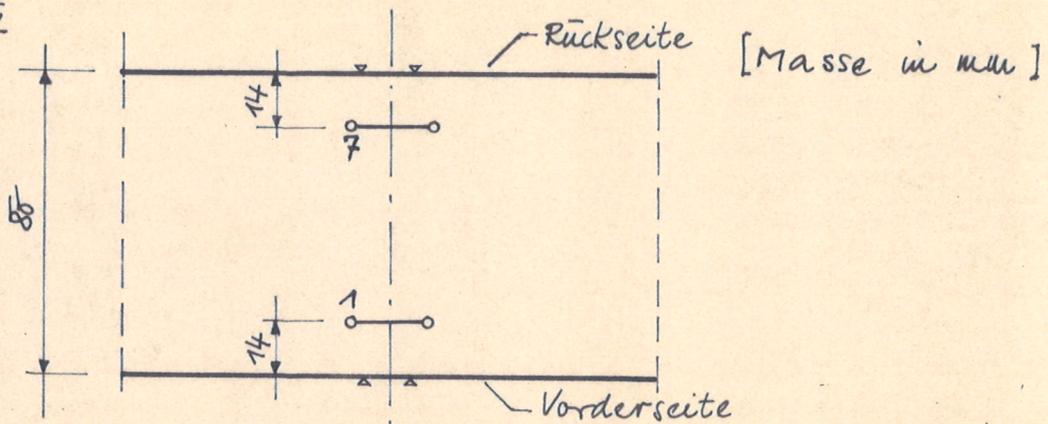
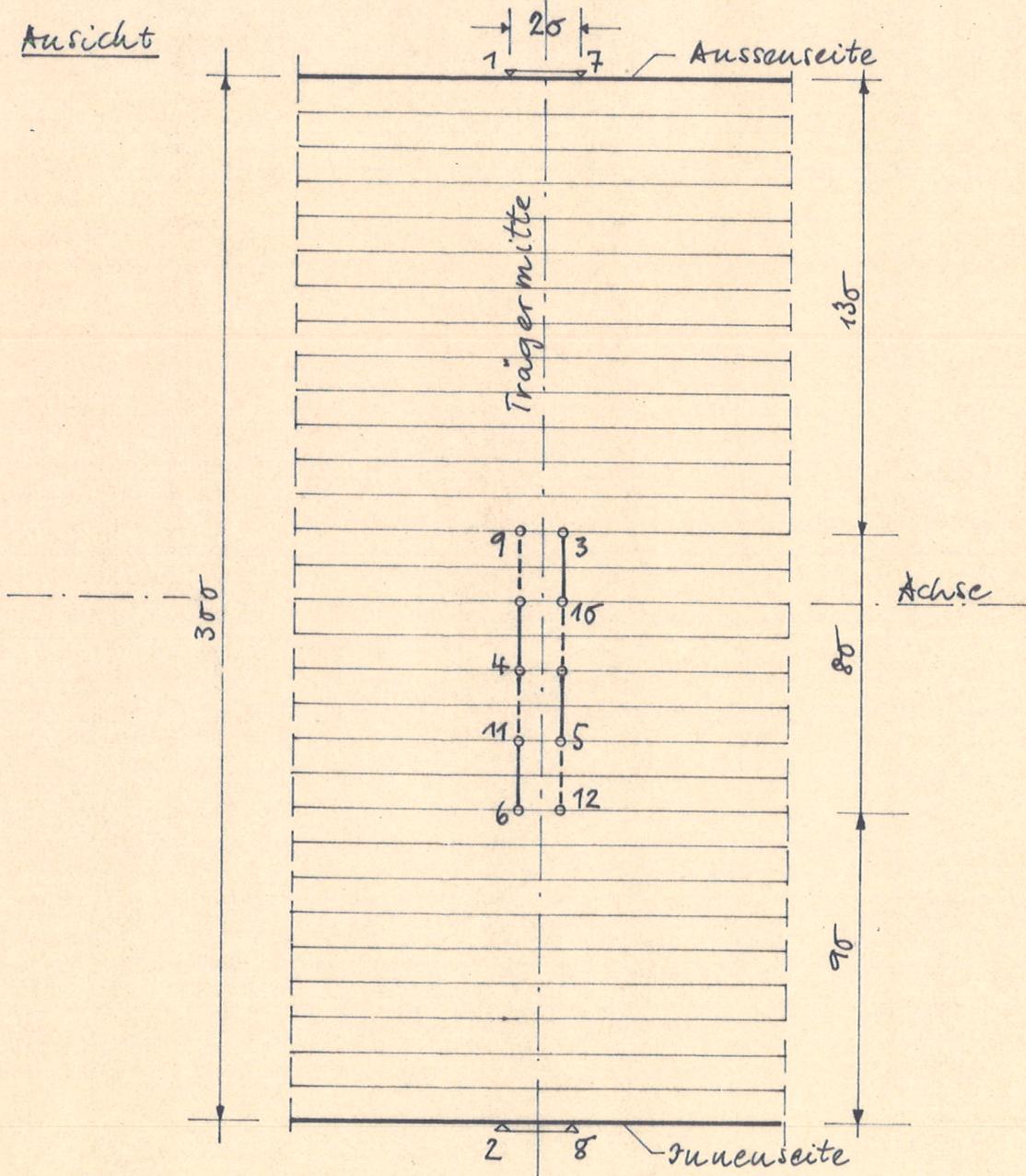


Bild 7: Lageplan der DMS am
Träger 1R2

Draufsicht



Aussicht



Meßstellen: Nr. 1-6 Vorderseite
Nr. 7-12 Rückseite

Bild 8 : Wegaufnehmer für die Querdehnungs-
messungen im gekrümmten Teil und
im Übergang zum geraden Teil

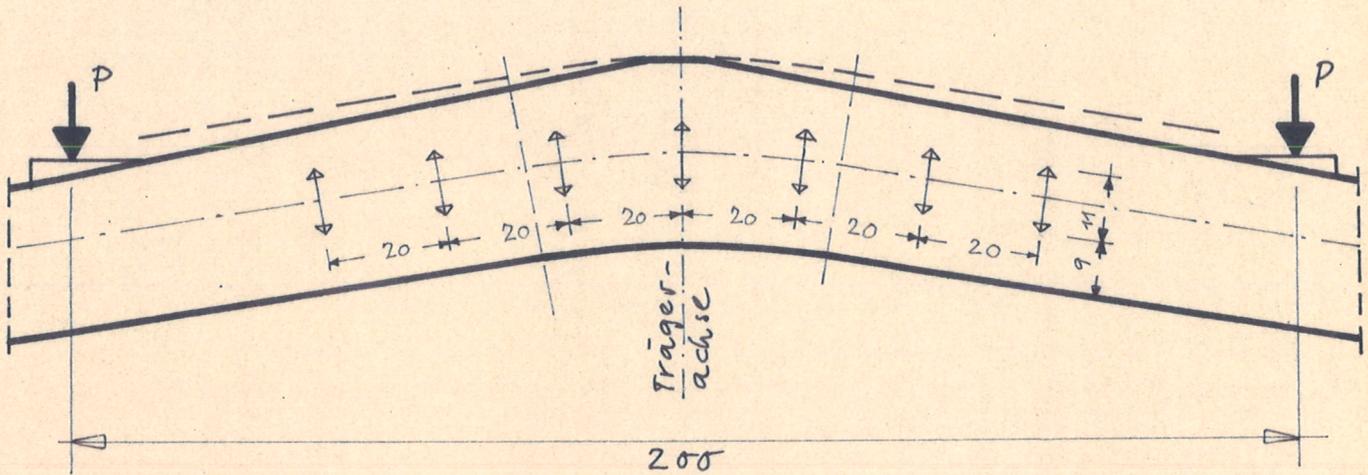


Bild 9 : Anordnung der Wegaufnehmer an
den Trägern für die Bruchversuche

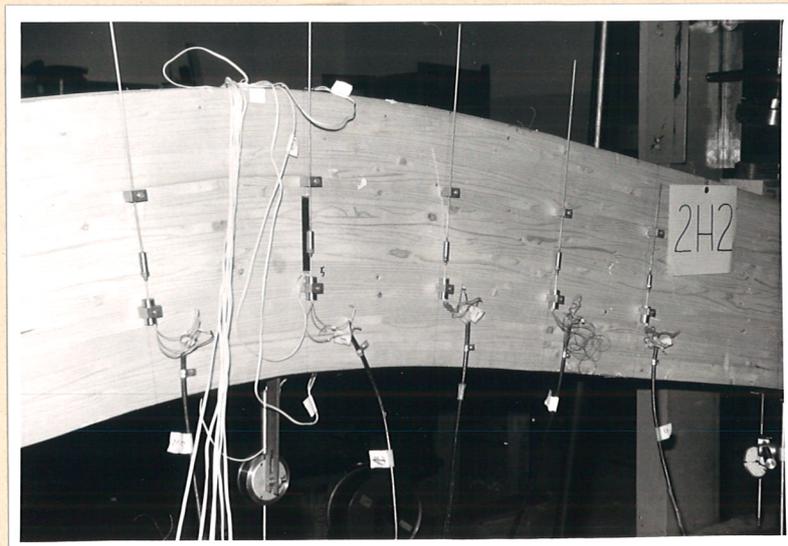


Bild 10: Verlauf der Längsdehnungen bei z_{ul} P am Träger 1 H2

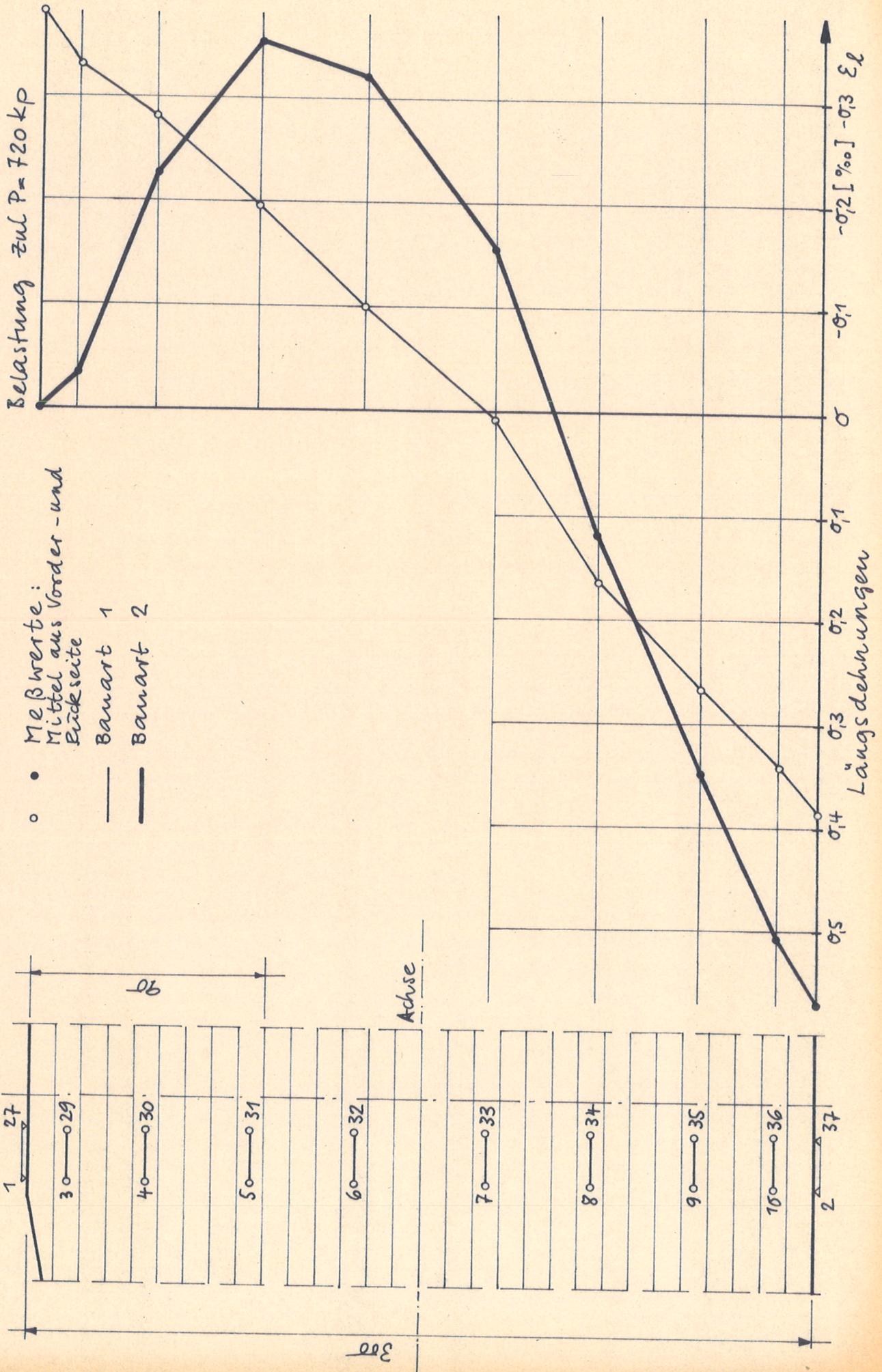
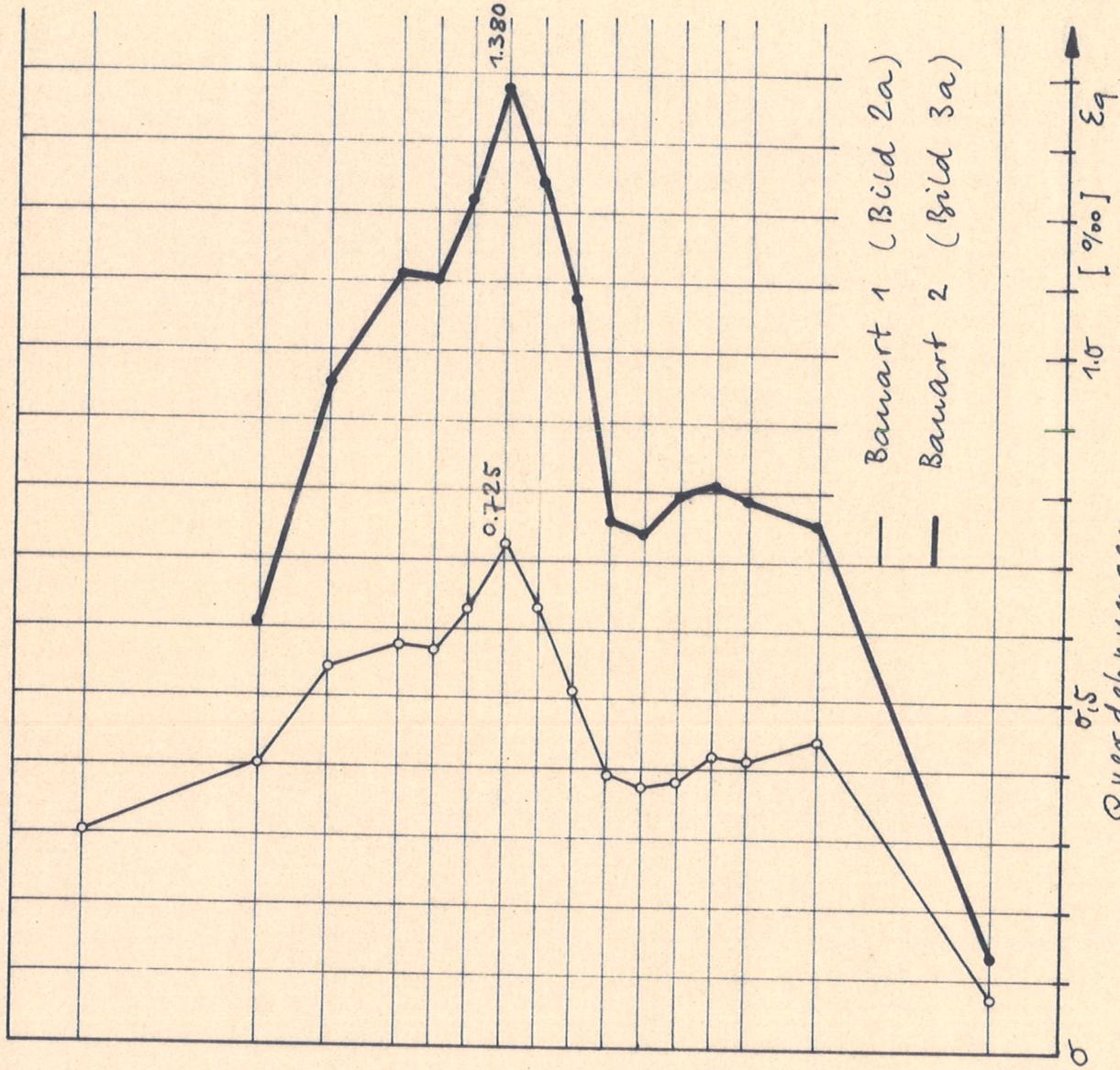


Bild 11: Verlauf der Querdehnungen bei Zul P am Träger 1A2

Belastung Zul P = 720 kP



o Meßwerte, Mittel aus Vorder- und Rückseite

Achse

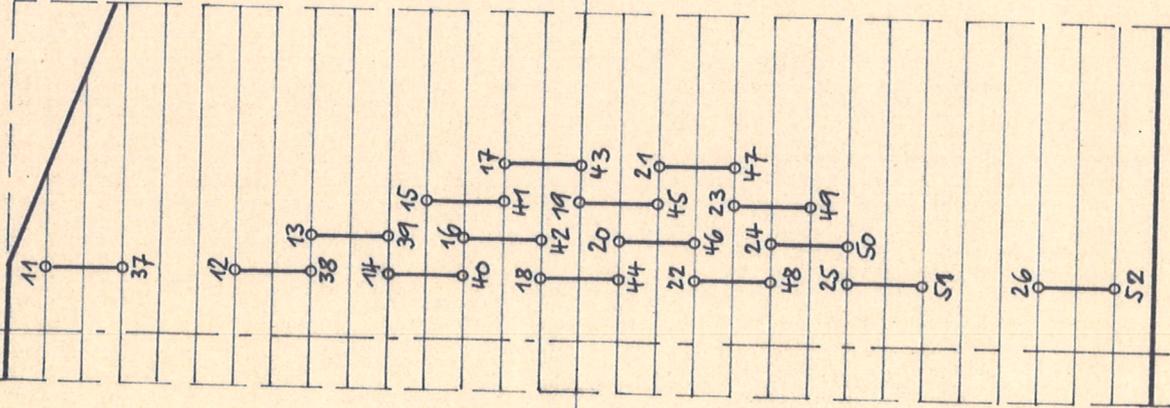


Tabelle 2: Messergebnisse am Träger 1R2 mit unterschiedlichen Ausbildungsformen bei $P = 720 \text{ kp}$

1 Ausbildung nach Bild	2		3				4			5		6
	Dehnungen in ‰ (Mittel aus Vorder- und Rückseite)		Quer zur Faser ϵ_q Messstellen				Gesamte Durchbiegung f [mm]	Gesamte horizon- tale Verlängerung Δl [mm]	Durchbiegung zwi- schen den Lasten P Δf [mm]			
	Innenrand ϵ_l 2+8	3+9	4+10	5+11	6+12							
2a	0,426	0,701	0,524	0,469	0,296	6,23	4,52	1,41				
3a 4a	0,651	1,398	1,063	0,977	0,659	15,95	10,54	3,36				
4b	0,648	1,246	0,977	0,918	0,623	16,07	10,57	3,45				
4c	0,747	0,939	0,788	0,776	0,531	16,46	10,91	3,62				
4d	0,939	1,040	0,862	0,837	0,583	18,71	12,17	4,64				

Bild 12: Querdehnungsverteilung am Träger 1R2 bei veränderlicher Trägerform
Belastung $P = 720 \text{ kp}$

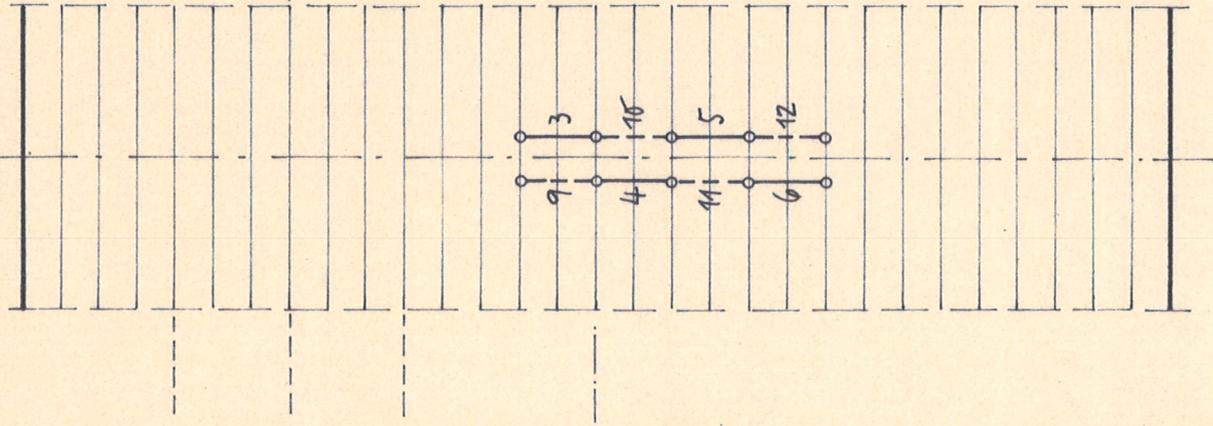
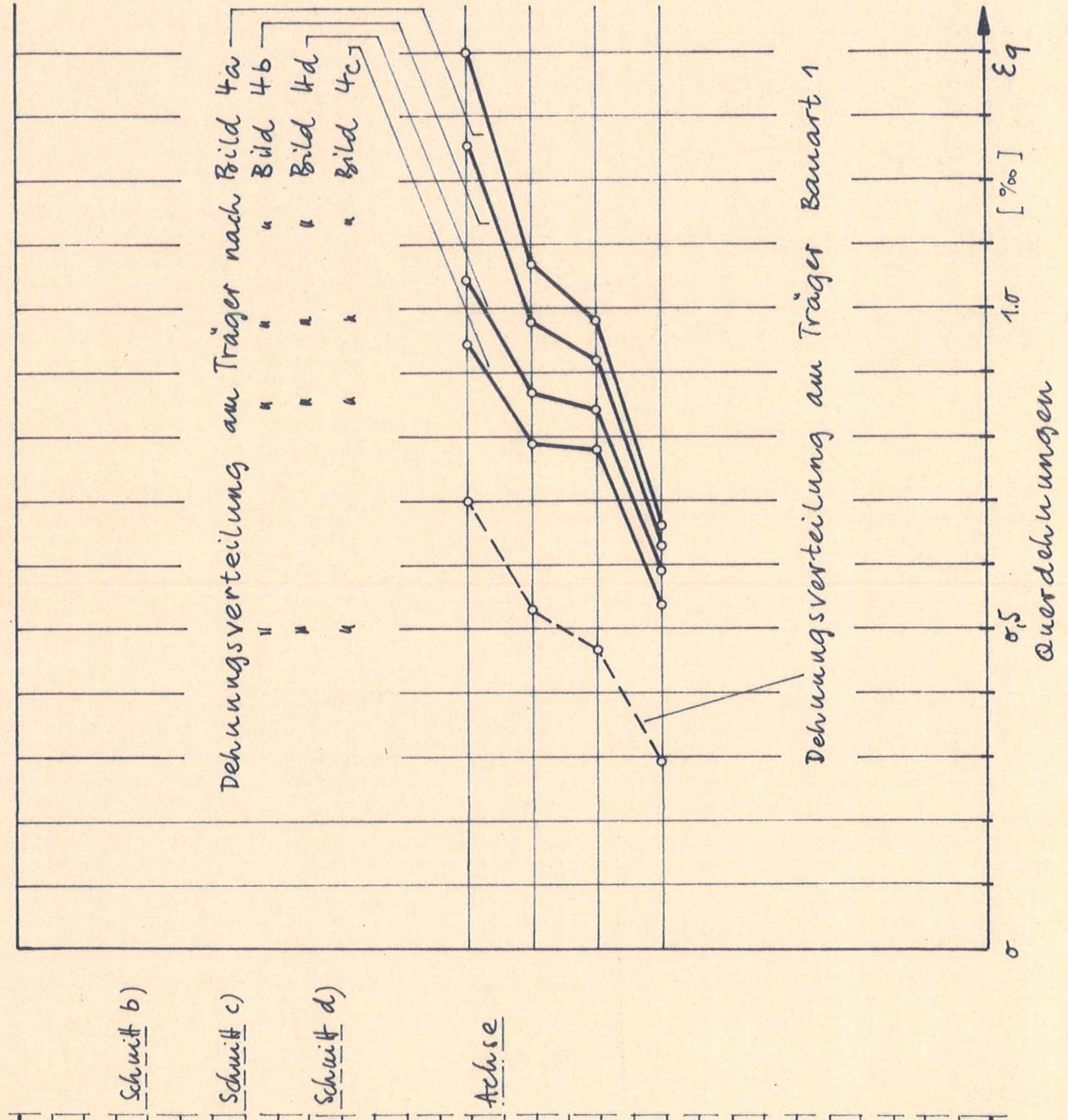


Tabelle 3: Ergebnisse der Dehnungs- und Durchbiegungsmessungen bei zul P

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bezeichnung	Holzfeuchtigkeit [%]	Luftfeuchtigkeit u. Temperatur im Versuchsraum	Dehnungen (Mittel aus Vorder- und Rückseite)		ϵ_q in [°/oo]	Durchbiegungen		Belastung Last pro Kolben	
			am Außenrand ϵ_l in [°/oo]	am Innenrand ϵ_r in [°/oo]		Gesamte horizontale Ver- längerung Δl in [mm]	zwischen den Kolben Δf in [mm]		
			ϵ_l in [°/oo]	ϵ_r in [°/oo]	ϵ_q in [°/oo]	f in [mm]	Δl in [mm]	Δf in [mm]	zul P in [kp]
1H2	9,3	35°/o 18°	0,389 ¹⁾ 0,00 ²⁾	0,384 ¹⁾ 0,570 ²⁾	0,579 ¹⁾ 1,118 ²⁾	6,50 ¹⁾ 17,49 ²⁾	- -	1,56 ¹⁾ 3,44	720
1R2	10,1	70°/o 21°	0,344 0,000	0,426 0,651	0,564 1,146	6,23 15,95	4,52 10,54	1,41 3,36	720
2H2	9,2	48°/o 20,5°	0,361 0,071	0,548 0,625	0,575 0,816	6,69 10,22	1,97 ¹⁾ 3,33 ²⁾	1,66 ¹⁾ 2,03 ²⁾	720
2R3	14,1	62°/o 21°	0,446 0,192	0,588 0,671	0,638 0,933	7,35 11,07	1,92 3,56	1,78 2,36	720
3R4	9,5	58°/o 18°	0,678 0,285	0,622 0,727	0,731 1,222	10,08 14,86	2,45 4,25	2,53 3,38	1200
3R3	14,4	54°/o 19°	0,643 0,266	0,657 0,763	0,656 1,087	9,89 14,60	2,51 4,14	2,41 3,25	1200
4H4	10,0	53°/o 18°	0,752 0,516	0,750 0,842	0,706 0,753	10,57 13,18	1,45 2,09	2,81 3,22	1200
4H3	15,1	46°/o 16°	0,639 0,435	0,861 0,877	0,650 0,751	11,11 13,47	1,21 2,02	2,80 3,09	1200

1) Bauart 1; 2) Bauart 2

Bild 13: Verlauf der Querdehnungen bis zur P vom Träger 2+2 bei der Bauart 1 und 2

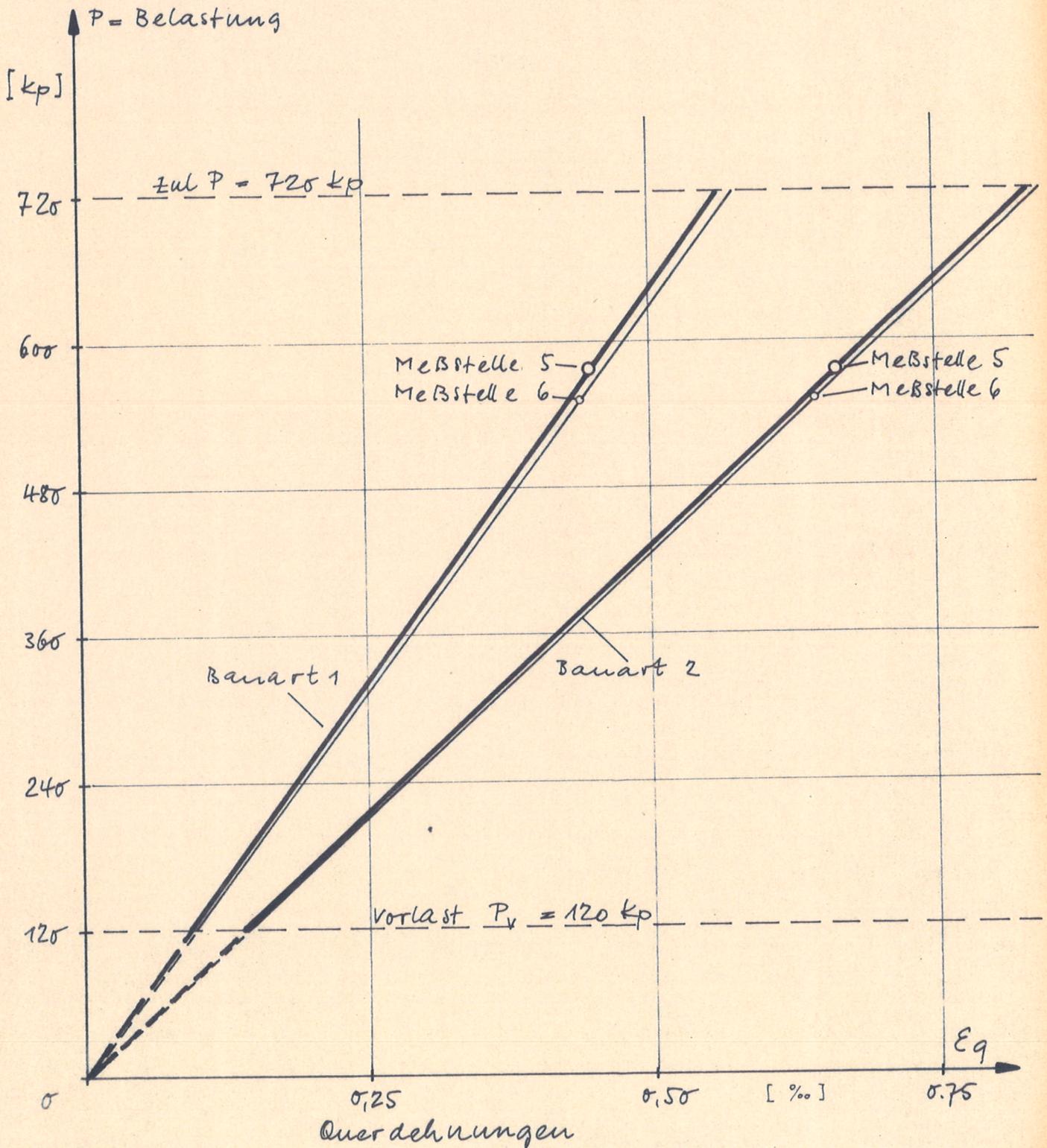
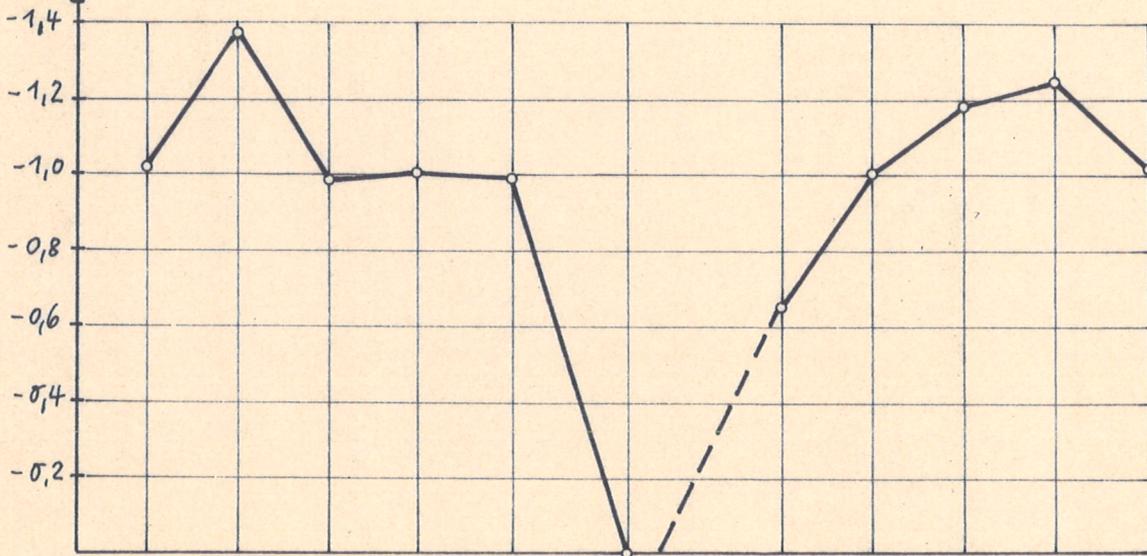
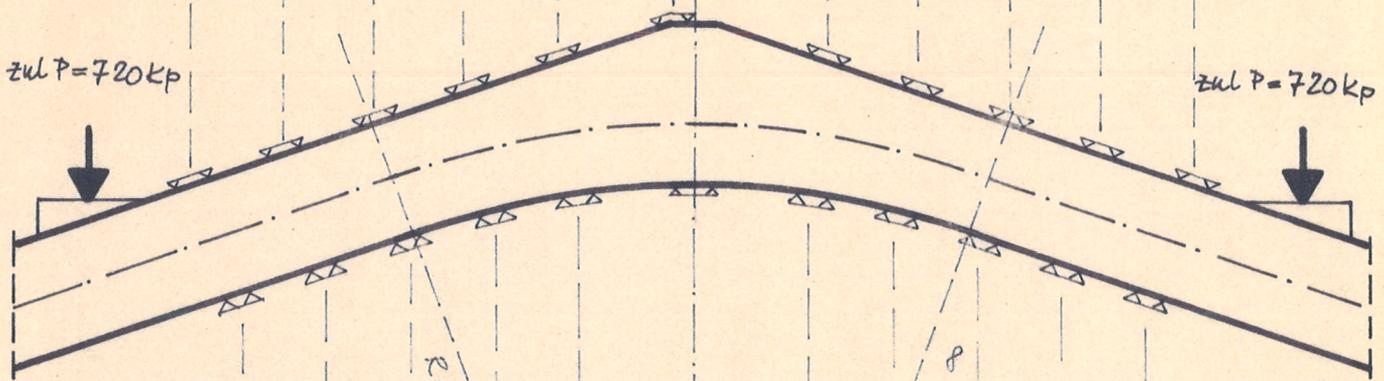


Bild 14: Längsdehnungsmessungen am Träger 1H2
auf der Trägerober- und Trägerunterseite

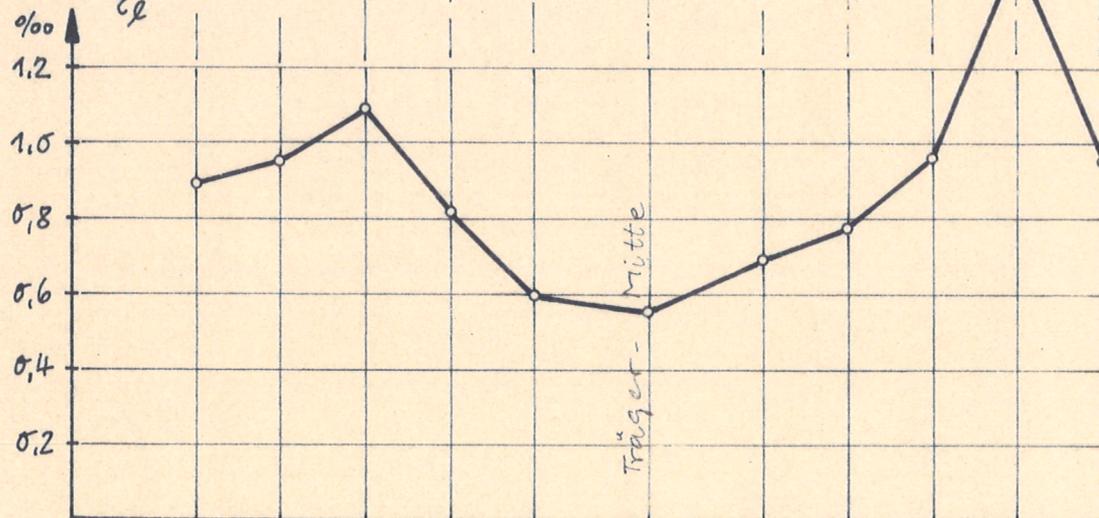
Längsdehnungen
 ϵ_L
‰



Längsdehnungsverteilung am oberen Rand



Längsdehnungen
 ϵ_L
‰



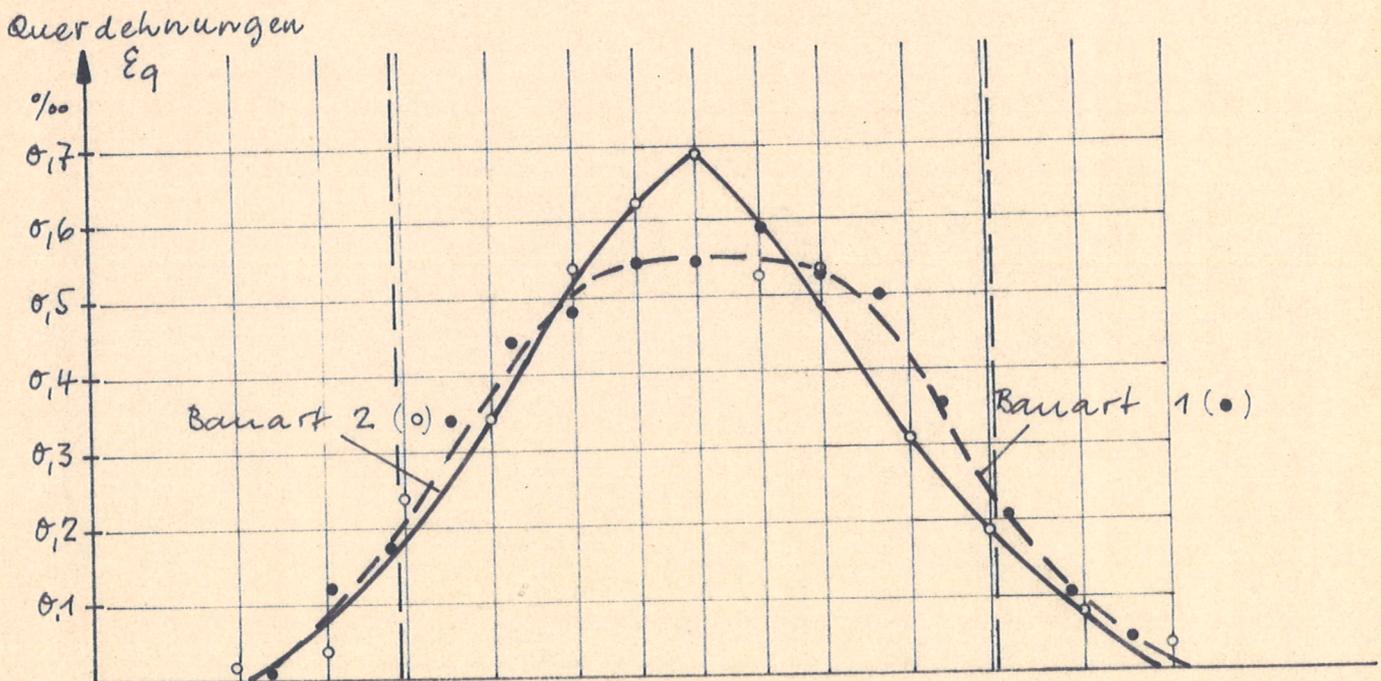
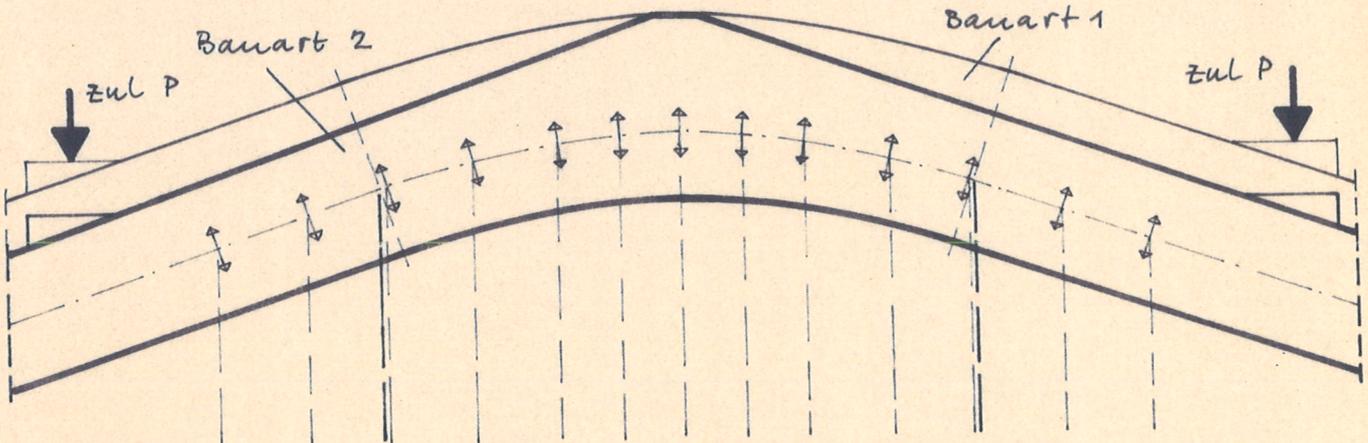
Längsdehnungsverteilung am unteren Rand

Meßstelle über
2 Ästen

o Meßwerte

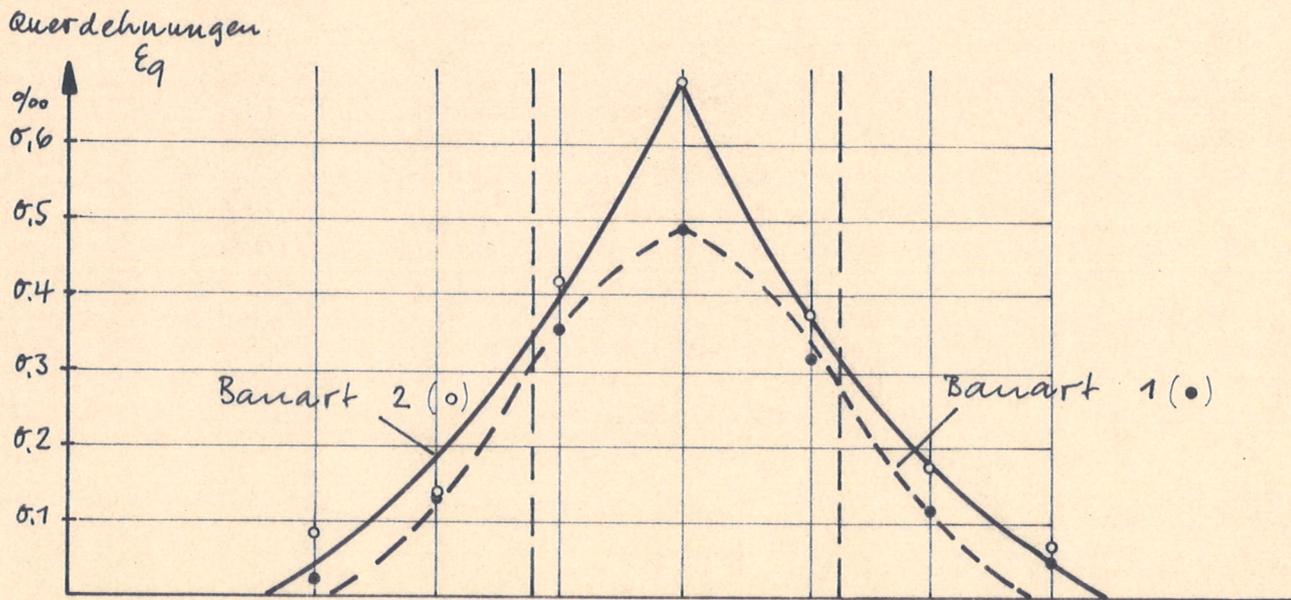
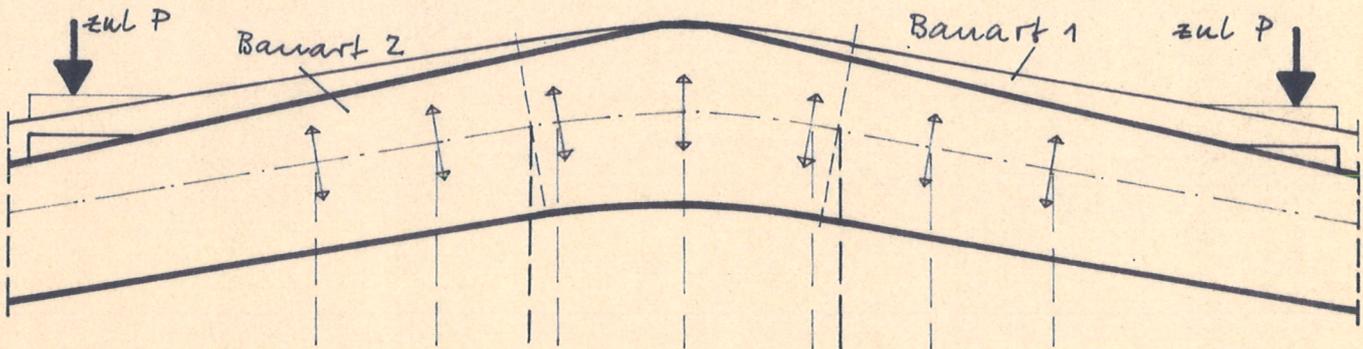
Träger-Mitte

Bild 15: Querdehnungen am Träger 1#2
bei Bauart 1 und 2



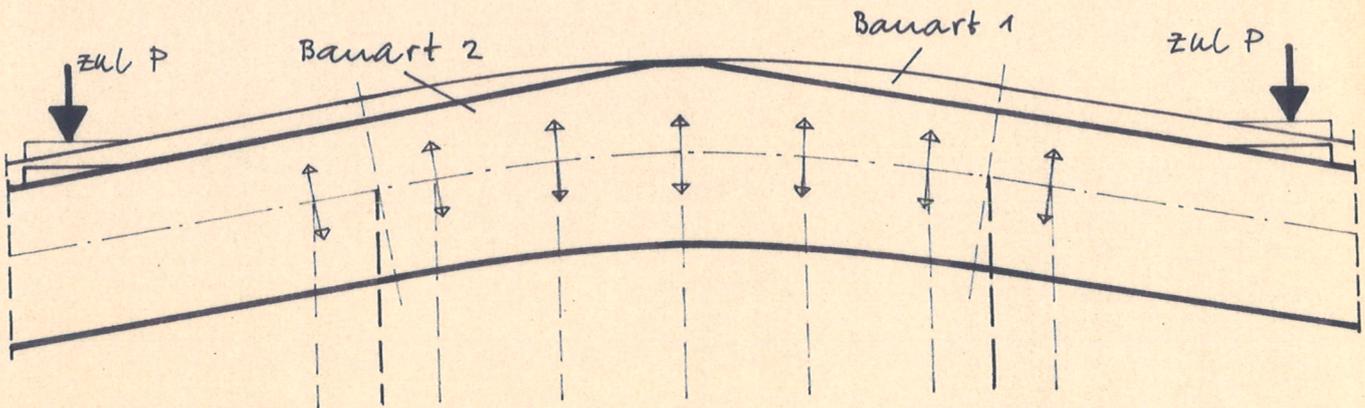
Trägerausbildung — — — nach Bild 2a
 ————— nach Bild 3a

Bild 16: Querdehnungen am Träger 2#2
bei Bauart 1 und 2

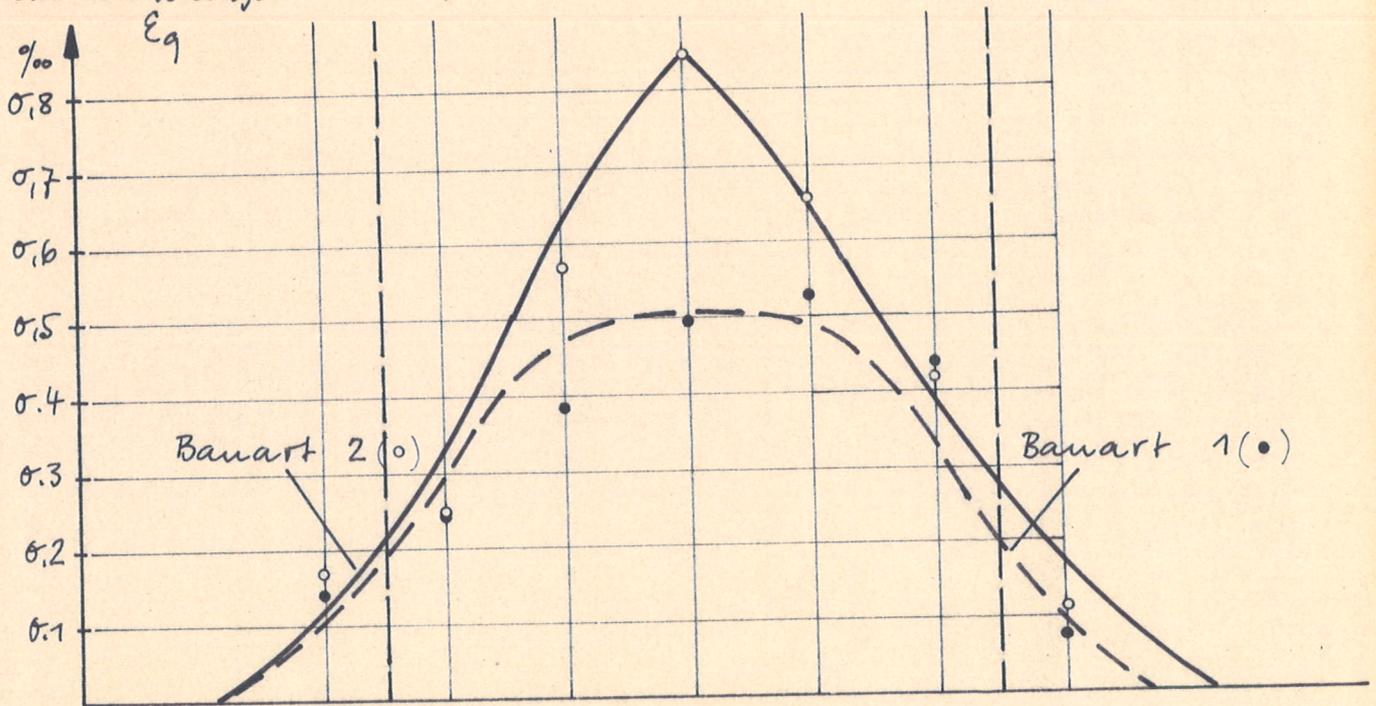


Trägerausbildung — — — nach Bild 2b
 ————— nach Bild 3b

Bild 17: Querdehnungen am Träger 3R4
bei Bauart 1 und 2



Querdehnungen
 ϵ_q



Trägerausbildung — — — nach Bild 2c
 ————— nach Bild 3c

Bild 18 : Querdehnungen am Träger 4#4
bei Bauart 1 und 2

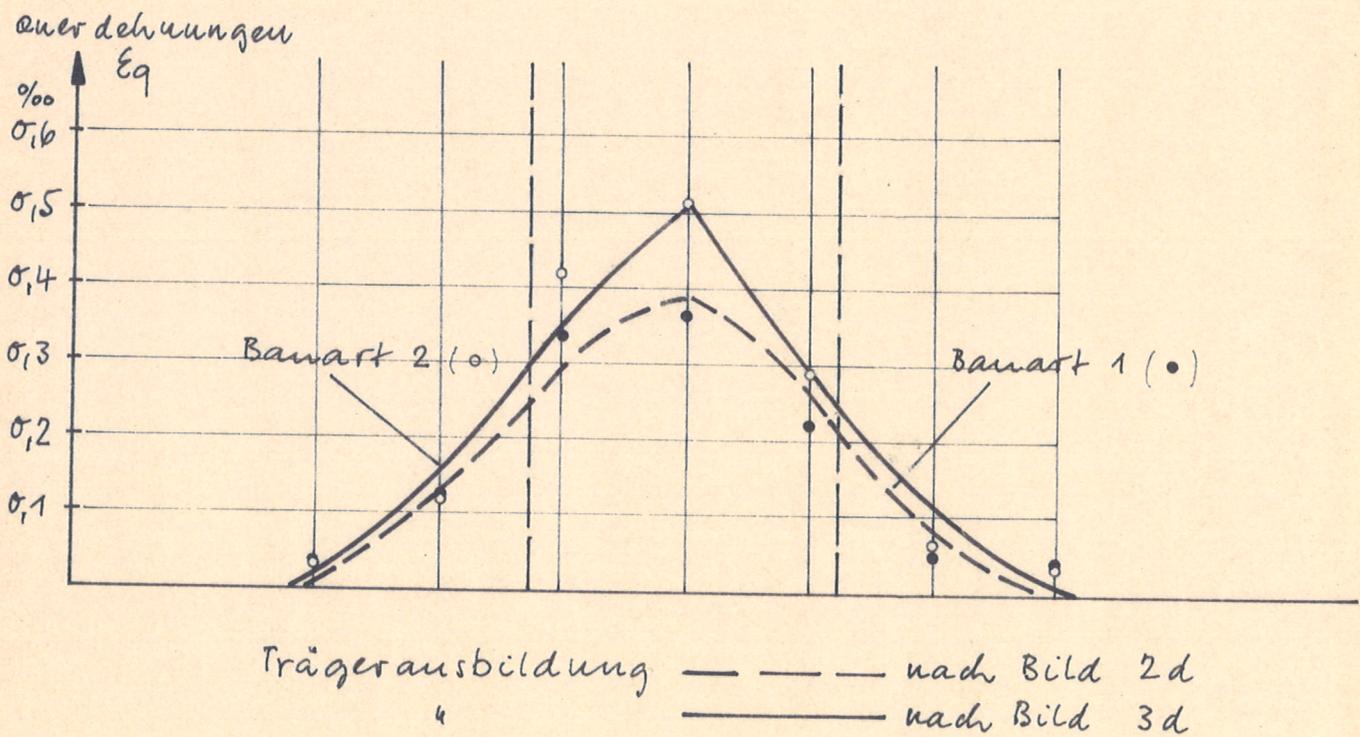
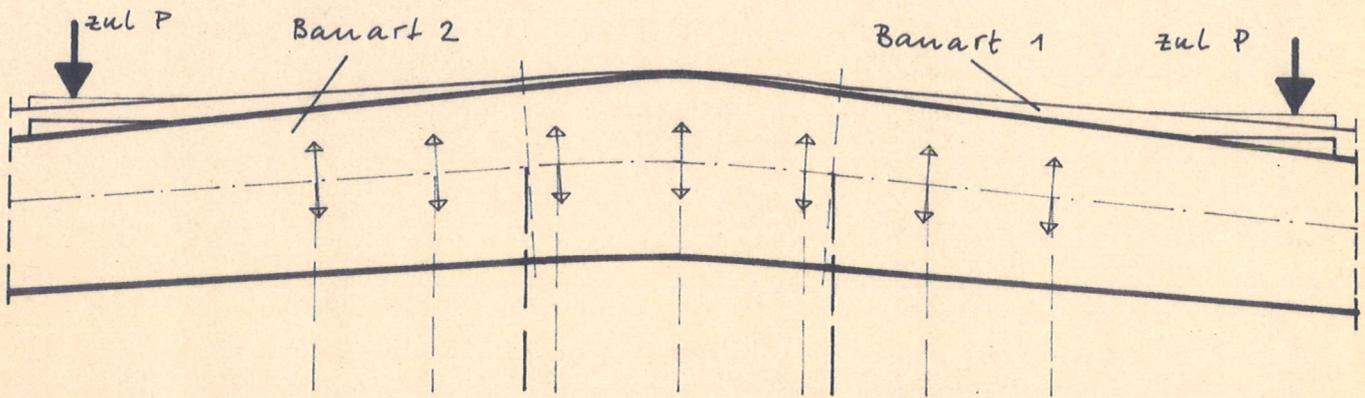


Tabelle 4: Ergebnisse der Bruchversuche

1	2	3	4	5
Träger- bezeich- nung	Bruchlast pro Kolben max P [kp]	Rechnerische Spannungen [kp/cm ²]		Bruchart
		Längsspannung am Innenrand σ_B	max Querkzugspan- nung $\sigma_{Z \perp}$	
2H2	2370	244 (212)	12,1 (9,6)	Querkzugbruch
2R3	2850	292 (251)	14,5 (11,4)	Querkzugbruch
3R4	4850	480 (419)	16,2 (10,0)	Querkzugbruch
3R3	4890	485 (398)	16,4 (9,5)	Querkzugbruch
4H4	5530	506 (428)	12,7 (11,2)	Querkzugbruch
4H3	4950	454 (376)	11,4 (9,8)	Querkzugbruch

() Spannungen nach DIN 1052 bei der Berechnung
wie für Bauart 1

$$\max \sigma_B = \frac{M}{W} \left(1 + \frac{1}{2\beta} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_{Z \perp} = \frac{M}{W} \frac{1}{4\beta} \quad (2)$$



Bild 19

Querzugbruch in Trägermitte

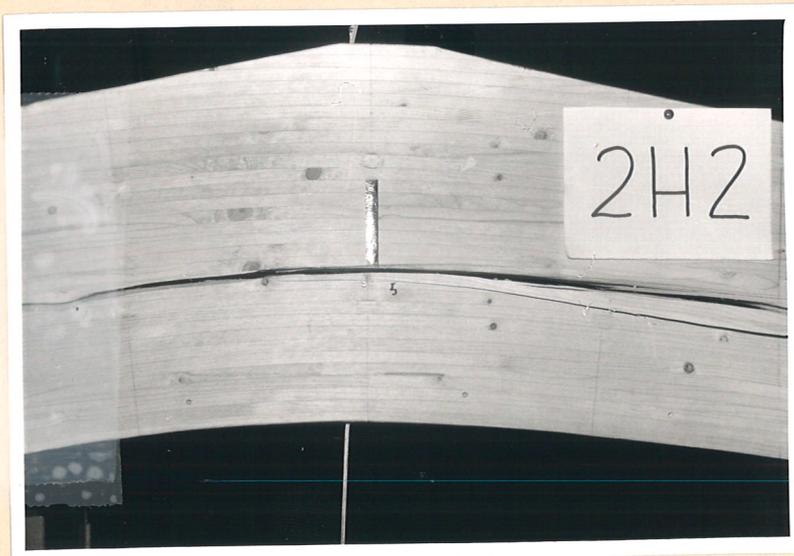


Bild 20

Querzugbruch in Trägermitte



Bild 21

Querzugbruch mit Zerstörung
der Biegezone

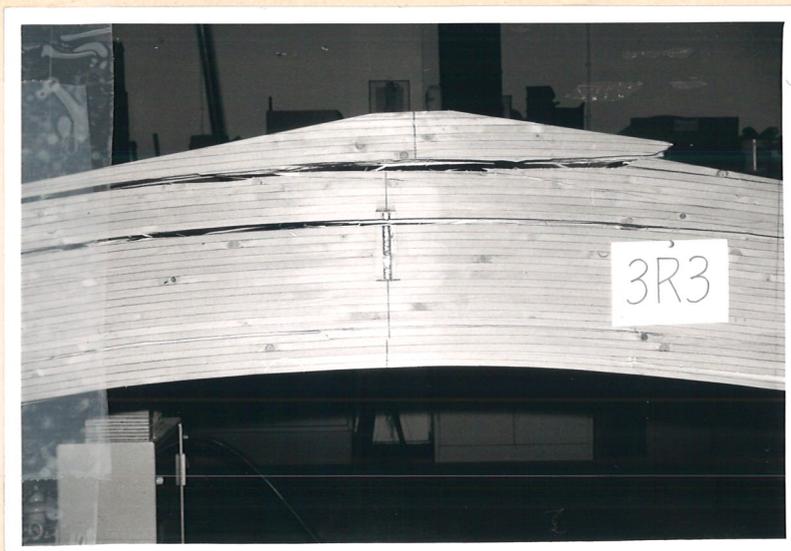


Bild 22

Querzugbruch in der oberen
Trägerhälfte und abgescher-
tem Sattel

Bild 23: Verlauf der Querdehnungen an
der Meßstelle 5 beim Bruchversuch des
Trägers 4 # 4

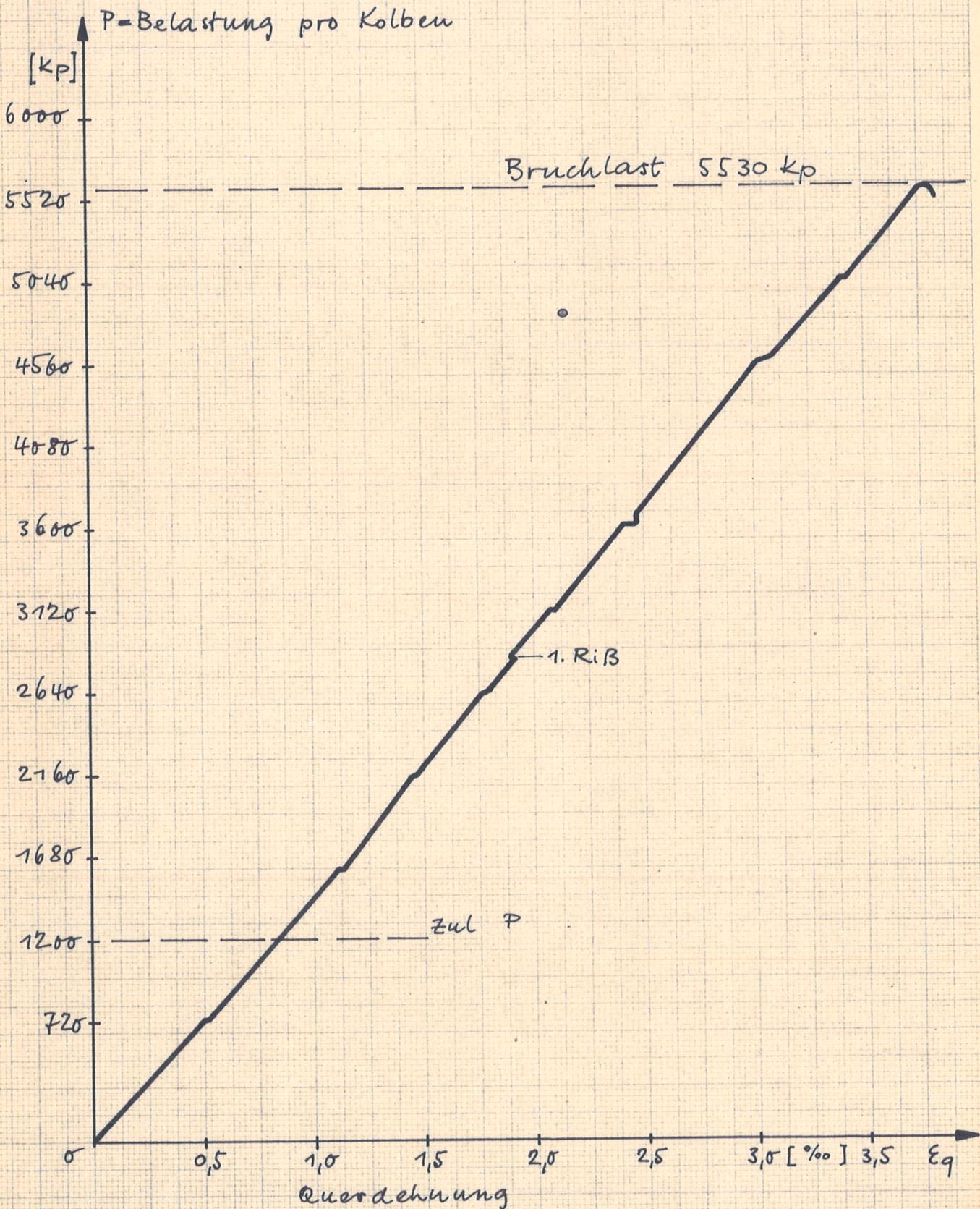


Bild 24: Dehnungen längs zur Beanspruchungsrichtung bei einer Zugbeanspruchung von $3,11 \text{ kp/cm}^2$ an der Querschnittsprobe des Trägers 1 R 2

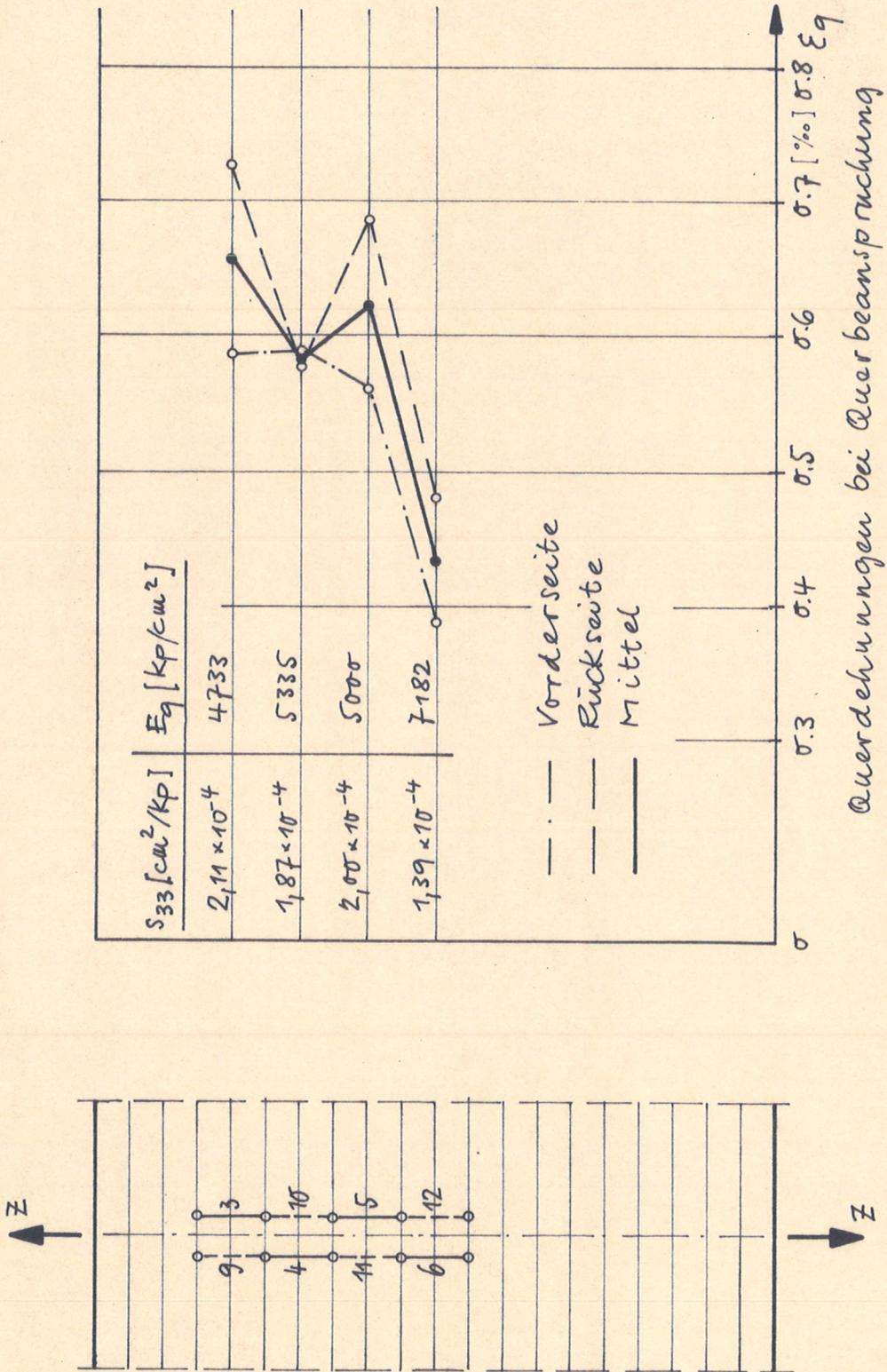


Bild 25: Rechnerische und gemessene Längsspannungen am Träger 1#2

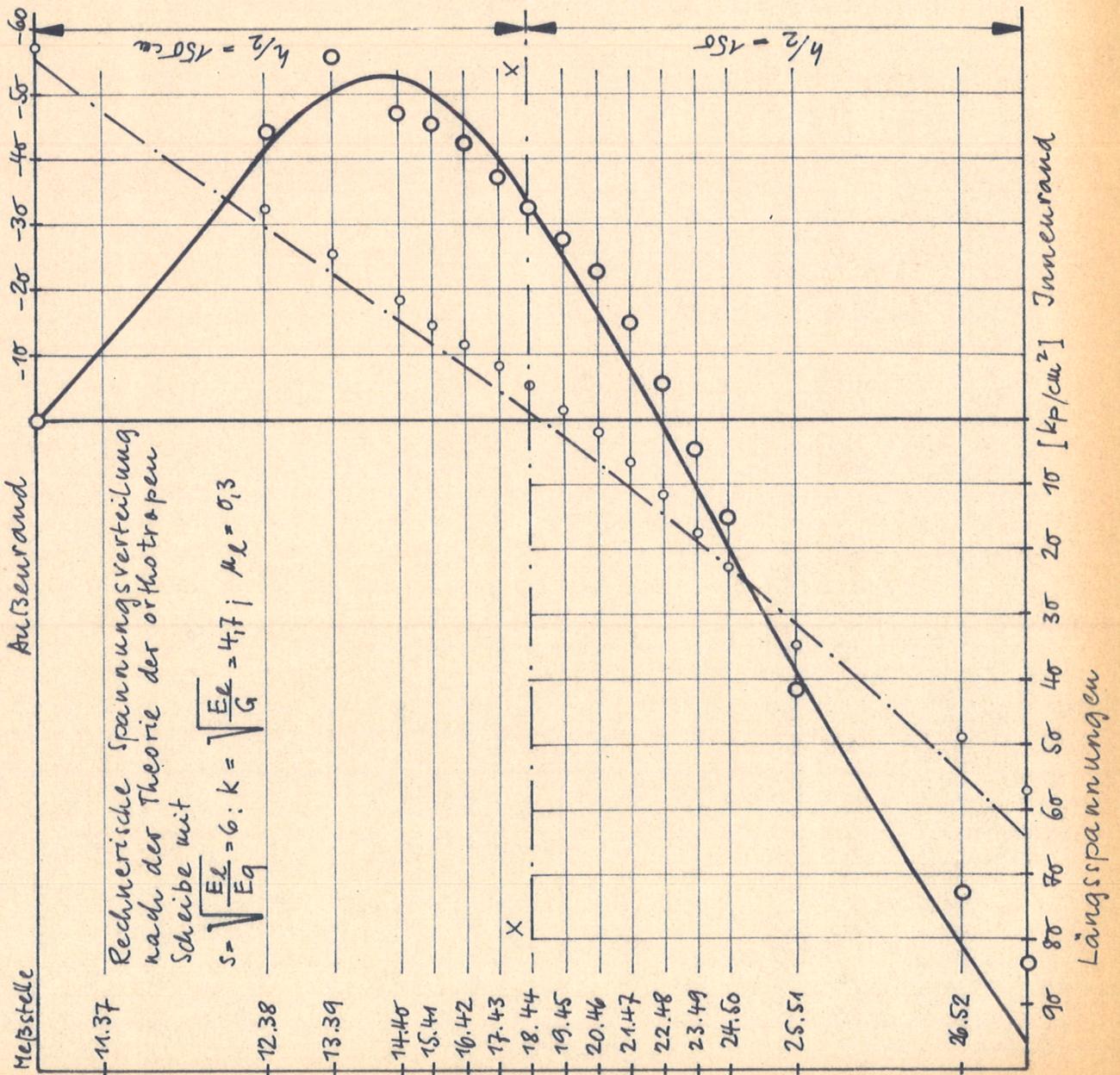


Bild 26: Rechnerische und gemessene Querspannungen am Träger 1#2

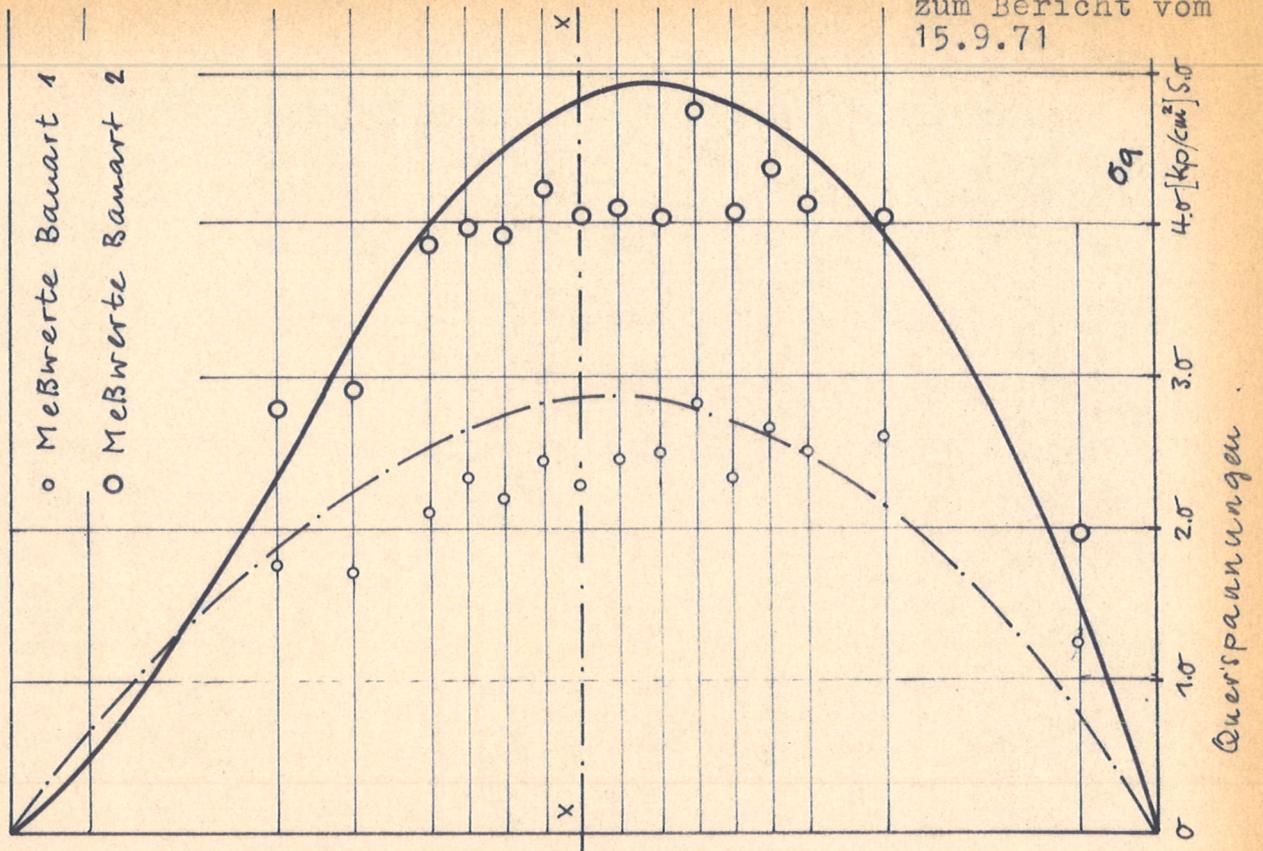


Tabelle 5: Gemessene und rechnerische Spannungen für den Versuchsträger 1R2 bei P = 720 kp.

Trägerausbildung nach Bild	Spannungen in kp/cm^2 bzw. in $\%$ (Lage der Meßstellen nach Bild 10)										Abweichungen in $\%$ Messung / Rechnung			
	Längsspannungen am Innenrand Meßstellen 2 + 8 [kp/cm^2] [$\%$]		Querspannungen im Firstquerschnitt Meßstellen									Innenrandspannung	Querzugspannungen	
			3 + 9	4 + 10	5 + 11	6 + 12								
			[kp/cm^2] [$\%$]	[kp/cm^2] [$\%$]	[kp/cm^2] [$\%$]	[kp/cm^2] [$\%$]								
M	64,8	100	3,32	100	2,85	100	2,53	100	2,53	100	2,53	100	+1,4	-3,4
R	63,9	100	2,91	100	2,95	100	2,94	100	2,79	100	2,79	100		
M	99,0	153	6,21	184	5,28	183	4,76	188	4,91	194	4,91	194	-2,4	-7,6
R	101,4	158	4,92	168	5,10	172	5,15	175	4,91	176	4,91	176		
M	99,0	153	4,88	147	4,67	164	4,40	174	4,61	182	4,61	182	-	-
R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M	113,6	174	3,63	109	3,51	123	3,60	142	3,89	154	3,89	154	-	-
R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M	138,0	213	3,84	106	3,74	131	3,80	150	4,19	166	4,19	166	-0,6	-6,0
R	138,9	217	2,69	92	3,59	122	4,19	142	4,46	160	4,46	160		

+) Für den Vergleich zwischen Messung und Rechnung wird jeweils die maximale Querspannung gemäß Rechnung herangezogen.

M: Aus den gemessenen Dehnungen errechnete Spannungen

R: Rechnerische Spannungen nach der Theorie der polarorthotropen Scheibe mit $s = \sqrt{E_l/E_q} = 6$, $k = \sqrt{E_l/G} = 4,7$, $\mu_l = 0,3$

Tabelle 6: Verhältnisse der max. Spannungen und Durchbiegungen beim Uebergang von Bauart 1 zu Bauart 2 bei zul P

1 Träger	2 Innenrand- längsspan- nungen	3 max. Quersug- spannungen	4 Gesamte Ver- tikale Durch- biegungen	5 Gesamte hori- zontale Ver- längerungen	6 Durchbiegungen zwischen den Kolben
1H2	1,48	1,93	2,69	-	2,21
1R2	1,54	2,03	2,56	2,33	2,38
2H2	1,14	1,42	1,53	1,69	1,22
2R3	1,14	1,46	1,51	1,85	1,33
3R4	1,17	1,67	1,47	1,73	1,34
3R3	1,16	1,66	1,48	1,65	1,35
4H4	1,12	1,07	1,25	1,44	1,15
4H3	1,04	1,15	1,21	1,67	1,10

Tabelle 7: Biegeelastizitätsmodul und Biegerandspannungen bei zul P für Bauart 1 und 2

Träger- bezeichnung	tatsächliche Querschnittsab- messungen [cm]		Biege-E Modul E_1 [kp/cm ²]	Biegerandspannungen kp/cm ²															
	Höhe	Breite		Bauart 1				Bauart 2											
				Messung		Rechnung		Messung		Rechnung									
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12									
1																			
1H2	30,5	8,0	147.000	57,6	57,0	55,8	63,0												84,4
1R2	30,4	8,2	152.000	52,3	64,8	56,2	63,9												99,8 (101,4)
2H2	30,4	8,0	129,400	46,7	70,9	56,2	63,6												80,8
2R3	30,4	8,1	114.180	50,9	67,1	55,6	63,0												76,5
3R4	30,2	8,0	133.750	90,7	83,2	96,2	102,8												97,3
3R3	30,9	8,1	129.460	83,2	85,1	90,6	96,8												98,7
4H4	30,6	7,9	115.540	86,9	86,6	94,5	101,0												97,0
4H3	30,7	8,0	113.290	72,4	95,3	92,8	99,1												99,1

() Rechenwert für Träger 1R2

Tabelle 8: Zusammenstellung der statistischen Auswertungen der Querzugfestigkeiten aus Teil 1 und Teil 2

	Anzahl der Probekörper	Mittelwert [kp/cm ²]	Variationskoeffizient [%]	Standardabweichung [kp/cm ²]	Vertrauensbereich [kp/cm ²]	5% Fraktile [kp/cm ²]
Versuchsträger Teil 1	(8)	(11,6)	(32,6)	(3,78)	(11,4+3,16)	(4,42)
	16 +)	11,6	22,8	2,66	11,6+1,41	6,96
	(8)	(11,7)	(8,13)	(0,94)	(11,7+0,79)	(9,87)
Versuchsträger Teil 2	6 +)	13,9	22,8	2,24	13,9+2,14	9,58
fehlerfreie Querzugproben aus Träger 1H4	17	14,9	34,8	2,66	14,8+2,66	5,82
fehlerfreie Querzugproben aus Träger 4R3	18	17,3	26,5	2,28	17,3+2,28	9,40
Versuche 1967 an fehlerfreien Querzugproben aus Trägerabschnitten	405	17,7	27,9	-	17,7+0,5	9,50

[() Klammerwerte gelten für die Einzelversuchsreihen mit R = 150 cm u. R = 300 cm.]

+) Bei den Versuchsträgern trat nie mehr als 25% Leimbruch auf.