

Versuchsbericht

Versuche mit gekrümmten Brettschichtträgern

Teil 1: Träger mit konstanter Trägerhöhe

Inhaltsverzeichnis:

1. Zweck der Versuche
2. Anlage und Durchführung der Versuche
 - 2.1 Abmessungen und Herstellung der Versuchskörper
 - 2.2 Aufteilung der Versuchskörper und Lagerung vor den Belastungsversuchen
 - 2.3 Versuchsaufbau
 - 2.4 Durchführung der Dehnungs- und Verformungsmessungen
 - 2.5 Anordnung der Meßstellen
 - 2.6 Durchführung der Belastungsversuche
3. Ergebnis der Versuche
 - 3.1 Feuchtigkeitsmessungen
 - 3.2 Vorversuch zur Ermittlung der Dehnungs- und Spannungsverteilung im Mittelquerschnitt
 - 3.3 Bruchversuche
4. Auswertung der Versuche
 - 4.1 Vorversuche
 - 4.2 Bruchversuche
5. Schlußfolgerungen und Zusammenfassung

1. Zweck der Versuche

Gekrümmte Brettschichtträger haben im Holzbau in den letzten 20 Jahren eine weite Verbreitung gefunden, wobei parallelgurtige Biegeträger mit Firstausrundung oder Träger mit wechselnder Querschnittshöhe mit satteldachförmigem Obergurt und ausgerundetem Untergurt eine besondere Rolle spielen. (Bild 1, Anlage 1)

Die Ausgabe der neuen DIN 1052, Oktober 1969, enthält Angaben über den Nachweis der im gekrümmten Bereich auftretenden maximalen Biegerand- und Querspannungen. Dabei wurde die im DIN-Entwurf 1965 noch mit $1,0 \text{ kp/cm}^2$ festgelegte zulässige Querspannung auf $2,5 \text{ kp/cm}^2$ erhöht. Diese Erhöhung schien aufgrund von Versuchen an Quersugproben aus lamellierten Trägern und Versuchen an gekrümmten Trägern sowie im Hinblick auf die Festlegungen anderer Länder gerechtfertigt. Da die rechnerische Ermittlung der maßgebenden Spannungen nach den vereinfachten Gleichungen für den Träger aus isotropem Baustoff erfolgt, solltendurch eingehendere Versuche Verteilung und Größe der maximalen Quer- und Längsspannungen im gekrümmten Bereich ermittelt und die Bruchfestigkeiten des gekrümmten Trägers bei 2 verschiedenen Krümmungsverhältnissen sowie bei 2 verschiedenen Leimsorten und 2 Lagerungsbedingungen festgestellt werden. Verschiedene in der Praxis aufgetretene Schadensfälle, vor allem auch an Trägern mit geneigtem Obergurt (Bild 1c und 1d) ergaben die Notwendigkeit, die Untersuchungen auch auf diese Trägerform auszudehnen. Hierüber wird im 2. Teil berichtet werden.

Der erste Teil des Forschungsauftrages umfaßte die Ermittlung der Spannungsverteilung und der statischen Bruchfestigkeit von gekrümmten, lamellenverleimten Trägern mit über die ganze Länge konstanten Querschnittsabmessungen. Die Versuche sollten vor allem dazu dienen, die Gültigkeit der Berechnungsgrundlagen nach Abschnitt 11.5.7 der DIN 1052, Bl. 1, Oktober 1969 und die dort angenommene zulässige Querkzugspannung von $2,5 \text{ kp/cm}^2$ kritisch zu überprüfen.

2. Anlage und Durchführung der Versuche

2.1 Abmessungen und Herstellung der Versuchskörper

Nach den Gl. (39) und (40) der DIN 1052, Bl. 1, Abs. 11.5.7 sind die maximalen Längs- und Querspannungen in einem gekrümmten Trägerteil vom Krümmungsverhältnis $\beta = R/h$ abhängig. Wenn das Biegemoment am inneren Querschnittsrand Längszugspannungen hervorruft, treten Querkzugspannungen auf, die sich berechnen aus:

$$\sigma_{zL} = \frac{M}{W} \cdot \frac{1}{4\beta} \quad (1)$$

Die maximale Längszugspannung am Innenrand kann für Krümmungsverhältnisse $10 > \beta > 2$ genau genug zu:

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

angenommen werden.

Da es bei den Versuchen in erster Linie darauf ankam, die Verteilung und Größe der Querkzugspannungen und die Querkzugfestigkeiten des gekrümmten Trägers zu bestimmen,

mußten die Trägerabmessungen unter Berücksichtigung der verfügbaren Prüfeinrichtungen so gewählt werden, daß bei den beiden zu untersuchenden Krümmungsverhältnissen $\beta = 5$ und $\beta = 10$ ein Versagen der Versuchsträger durch Querkzug erwartet werden konnte. Für jedes Krümmungsverhältnis wurde die Länge des gekrümmten Trägerteils $e = 100 \text{ cm} = 3,3 \cdot \text{Trägerhöhe}$ und $e = 50 \text{ cm} = 1,65 \cdot \text{Trägerhöhe}$ vorgesehen. Hiernach ergaben sich 4 verschiedene Trägerausführungen, deren Form und Abmessungen aus Bild 2a bis 2d (Anlage 2) hervorgehen.

Von jeder Form wurden 8 Brettschichtträger hergestellt, deren Querschnitt $8/30 \text{ cm}$ aus 1 cm dicken und 8 cm breiten Fichtenholzlamellen vorwiegend der Güteklasse II zusammengesetzt wurde. Die Hälfte der Träger wurde mit dem Kleber "Kaurit 220" (Harnstoff-Basis) und die andere Hälfte mit "Kauresin 440 R" (Resorcin-Basis) verleimt. Der mittlere Holzfeuchtigkeitsgehalt betrug bei der Verleimung 10 ‰ . Der angewandte Preßdruck wurde von der Herstellerfirma mit 9 kp/cm^2 angegeben.

2.2 Aufteilung der Versuchskörper und Lagerung vor den Belastungsversuchen

Jeweils 4 Versuchskörper der 4 verschiedenen Ausbildungsformen wurden in der Versuchsanstalt bei Raumklima gelagert. Die anderen 4 wurden in einem dreiseitig offenen Schuppen aufgestellt und in regelmäßigen Abständen auf Holzfeuchtigkeitsgehalt, Formbeständigkeit und etwaige Veränderungen der Oberfläche oder der Leimfugen (Rißbildung) überprüft. Die Feststellungen dieser ständigen Beobachtungen, die noch nicht abgeschlossen sind, werden

später mitgeteilt werden. Für die hier beschriebenen Versuche wurden je 4 Träger jeder Bauart nach ca. 13 Monaten Lagerung zur Prüfung verwendet. In Tabelle 1 (Anlage 3) sind sämtliche Versuchskörper mit ihrer Bezeichnung, dem mittleren Krümmungsradius, der Länge des gekrümmten Bereiches, der Leimsorte sowie der Lagerung und der Verwendung für die Versuche des Teils 1 zusammengestellt.

2.3 Versuchsaufbau

Die Belastungsversuche wurden auf einer Biege-Prüfanlage mit 2 Druckkolben mit je 6 Mp maximaler Druckkraft durchgeführt. Das Belastungsschema geht aus Bild 3 (Anlage 4) hervor. Die 2 Einzellasten wurden im Abstand von 2,00 m symmetrisch zur Trägermitte aufgebracht, so daß im gekrümmten Trägerteil ein konstantes Biegemoment ohne Querkraft wirkte. Die Krafteinleitungsstellen unter den Kolben waren verschieblich als Rollenlager ausgebildet. An den Trägerenden wurde auf der einen Seite ein Kipplager, auf der anderen ein Rollenlager angebracht. Die schrägen Lager- und Lasteintragungsflächen wurden durch Hartholzkeile ausgeglichen. Der Aufbau der Versuchsanlage kann in seinen Einzelheiten Bild 3 und 4 (Anlage 4) entnommen werden.

2.4 Durchführung der Dehnungs- und Verformungsmessungen

2.4.1 Dehnungsmessungen

Um die Spannungsverteilung über den Trägerquerschnitt zu erfassen, war es erforderlich, an den vorgesehenen Meßstellen die Dehnungen und soweit als möglich den dort

vorhandenen E-Modul zu bestimmen. Wegen der geringen Lammellendicke war man für die Erfassung der Querspannungen auf möglichst kurze Meßlängen angewiesen, während für die Messung in Längsrichtung größere Meßlängen angewendet werden konnten. Nach einigen Vorversuchen wurden für die Dehnungsmessungen vorwiegend Dehnungsmeßstreifen von 20 mm und 60 mm Meßlänge und induktive Wegaufnehmer mit 60 bis 120 mm Meßlänge verwendet.

2.4.2 Verformungsmessungen

Zur Messung der Durchbiegungen in Trägermitte und unter den Lastangriffsstellen und der Vergrößerung der Stützweite l (horizontale Verschiebung der Auflager) wurden Meßuhren mit einer Anzeigegenauigkeit von $1/100$ mm verwendet.

2.5 Anordnung der Meßstellen

2.5.1 Vorversuch mit Träger 1 H 2

Im Vorversuch mit dem Träger 1 H 2 sollte die Verteilung der Längs- und Querspannungen über die Trägerhöhe im gekrümmten Bereich unter z P ermittelt werden. Hierfür wurde der in Trägermitte liegende Querschnitt ausgewählt. Die Dehnungen wurden mittels Dehnungsmeßstreifen und Wegaufnehmern gemessen. Bild 5 (Anlage 5) zeigt die Anordnung der Meßgeräte. Aus Bild 6 und 7 (Anlage 6) geht die Anbringung auf der Trägervorder- und Rückseite hervor. Insgesamt wurden 20 Meßstreifen für die Längsdehnungen und 32 Meßstreifen für die Querdehnungen vorgesehen. Je 3 Wegaufnehmer sollten die Querdehnungen über größere Trägerhöhenabschnitte erfassen.

2.5.2 Bruchversuche

Bei den Bruchversuchen wurden aufgrund der Vorversuche die Dehnungsmessungen weitgehend eingeschränkt. Während die Randdehnungen auf den Trägersaußenflächen nur noch an je 2 Stellen gemessen wurden, wurden die Querdehnungen mit 60 mm Meßlänge nur im Bereich der Trägerachse festgestellt. (Bild 8, Anlage 7). Zusätzliche Messungen über die Querdehnungsverteilung im gekrümmten Teil und den anschließenden Uebergangsbereichen wurden mit Wegaufnehmern durchgeführt. (Bild 9, Anlage 8). Die Fotos Bild 10 und 11 (Anlage 9) zeigen die Dehnungsmeßstreifen und einen Teil der Wegaufnehmer. Die Anordnung der Meßuhren zur Ermittlung der Durchbiegungen und horizontalen Verschiebung geht aus Bild 3 (Anlage 4) hervor.

2.6 Durchführung der Belastungsversuche

Da die Versuche in einem nicht klimatisierbaren Versuchsraum durchgeführt werden mußten, war es erforderlich, den Ablauf einer Meßfolge möglichst zu beschleunigen, da sich vor allem bei den Querdehnungsmessungen Klimaschwankungen auswirken können. Beim Vorversuch wurden daher die stufenweisen Belastungen bis zur P nochmals wiederholt, da eine große Anzahl von Meßstellen abzulesen war. Bei den Hauptversuchen wurden 2 Belastungsversuche durchgeführt. Der erste Versuch erstreckte sich von einer geringen Vorlast ausgehend in ca. 4 Stufen bis zur angenommenen zulässigen Belastung, bei der eine rechnerische Querspannung nach Gl. (1) von 2,5 bis 3,0 kp/cm^2 zu erwarten war. Die zweite Belastung erfolgte von zur P bis zum Bruch

ebenfalls stufenweise, wobei bei jeder Belastungsstufe die Meßgeräte abgelesen wurden. Nach Ueberschreiten der 3fachen zulässigen Belastung wurden die Meßuhren mit Rücksicht auf den zu erwartenden schlagartigen Bruch entfernt. Die manuellen Ablesungen nahmen im allgemeinen eine Zeit von 2 - 3 Minuten in Anspruch. Abgelesen wurde gleich nach dem Erreichen der erwünschten Last. Danach wurde ohne Verzögerung weiter belastet. An allen Versuchsträgern wurde vor den Versuchen die Feuchtigkeit mit einem elektrischen Holzfeuchtigkeitsgerät der Bauart Siemens an drei verschiedenen Stellen gemessen. Nach dem Bruch wurden Darrproben nahe dem Bruchquerschnitt entnommen.

3. Ergebnisse der Versuche

3.1. Feuchtigkeitsmessungen

An den in der Versuchsanstalt gelagerten Versuchskörpern wurde anhand der Darrproben eine Holzfeuchtigkeit von 9,5 bis 10,6 ‰ ermittelt. Höhere Feuchtigkeitwerte ergaben die Messungen an den Trägern, die im Freien aufgestellt waren. Hier lag der niedrigste Wert bei 12,2 und der höchste bei 14,8 ‰.

3.2 Vorversuch zur Ermittlung der Dehnungs- und Spannungsverteilung im Mittelquerschnitt

Wie aus Bild 12 und 13 (Anlage 10) hervorgeht, verlaufen die Längs- und Querdehnungen bis zur P praktisch geradlinig. In Bild 14 (Anlage 11) ist die gemessene Dehnungsverteilung in Trägerlängsrichtung aufgetragen. Bild 15 (Anlage 12) gibt die zugehörige Querdehnungsverteilung

wieder. Während Bild 13 einen einigermaßen stetigen Verlauf der Längsdehnungen wiedergibt, zeigt Bild 15, daß die Querdehnungen sehr ungleichmäßig sind, was darauf hindeutet, daß die Elastizitätsmoduln der einzelnen Lamellen in Querrichtung sehr stark schwanken. Die über mehrere Lamellendicken sich erstreckenden Meßbereiche der 3 Wegaufnehmer bestätigen weitgehend die Meßwerte der Dehnungsmeßstreifen, die sich jeweils nur über 2 Lamellendicken erstreckten.

3.3. Bruchversuche

Beim 1. Belastungsteil bis zur P verliefen die Längs- und Querdehnungen wie die Durchbiegungen und Horizontalverschiebungen linear mit der Belastung (siehe Bild 16 bis 21, Anlage 13 bis 15). Beim Entlasten blieben kleine Restdehnungen und Durchbiegungen zurück, verursacht durch die rheologischen Erscheinungen, die bei den Querdehnungen etwas größere Werte erreichten. Trotzdem darf der Werkstoff für diesen Beanspruchungsbereich als ideal elastisch angesehen werden.

Die Ergebnisse der Versuche bis zur P sind in Tabelle 2 (Anlage 16) zusammengestellt. Neben den Trägerbezeichnungen, der Holzfeuchtigkeit und der während der Versuche im Versuchsraum gemessenen Klimawerte (Spalte 1 - 3) sind die gemessenen Dehnungen am Krümmungsaußen- und Innenrand sowie die Dehnungen quer zur Faser bei zur P in den Spalten 4, 5 und 6 aufgenommen. Die eingetragenen Werte wurden gemittelt aus den beiden gleichen Belastungsreihen mit Vorlast - zur P - Vorlast und extrapoliert auf die Last-

stufe 0 - zul P. Es geht aus der Aufstellung deutlich hervor, daß die Innenrandlängsdehnungen im allgemeinen etwas größer sind als die Dehnungen am Außenrand. Die großen Streuungen in den Meßresultaten zwischen den einzelnen Versuchskörpern lassen darauf schließen, daß auch die mittleren E-Moduln zum Teil stark variieren. In den Spalten 7, 8 und 9 sind die Ergebnisse der Durchbiegungsmessungen aufgeführt.

Die Ergebnisse der nach Bild 9 durchgeführten Querdehnungsmessungen an je einem Versuchsträger der 4 Formen sind in Bild 22 bis 25 (Anlage 17a und 17b) wiedergegeben. Trotz der Streuungen konnte in die Diagramme eine ausgleichende Kurve eingetragen werden, die ungefähr dem qualitativen Verlauf der Querspannungen entspricht. Aus dem Vergleich der Querdehnungen der Träger mit verschieden langem Krümmungsbereich geht hervor, daß der Maximalwert der Querdehnungen bei den längeren Krümmungstrecken größer ist als bei den kurzen, obwohl die rechnerischen Querspannungen nach Gl. (1) für beide Fälle gleich groß sind. Außerdem erkennt man, daß auch im geraden Teil im Grenzbereich bereits Querdehnungen festgestellt wurden. Der Beginn der Querdehnungen liegt etwa um die Trägerhöhe vor dem Uebergang der Geraden zum Bogen.

Die beim Bruch der Träger erreichten Bruchlasten $\max P$ pro Kolben sind in Tabelle 3 (Anlage 18) zusammengestellt. Die bei dieser Belastung sich ergebenden rechnerischen maximalen Querspannung- und Biegespannungen sind nach der Theorie der polarorthotropen Scheiben (Buchmann 1969)

berechnet und in den Spalten 3, 4, 5 aufgeführt worden. Der Anisotropiefaktor $s = \sqrt{E_l/E_q}$ wurde dabei mit 6 angenommen. In Klammern sind die nach Gl. (1) und (2) sich ergebenden Werte eingetragen. Mit Ausnahme der Träger 3R2 und 4H2 traten bei allen Versuchskörpern Querkzugbrüche auf. Einige typische Bruchformen zeigen die Bilder 26 bis 31 (Anlage 19 bis 21). Allerdings wurde bei den Trägern mit dem größeren Krümmungsverhältnis von $\beta = R/h = 10$ oft die Zugzone total zerstört, wobei praktisch gleichzeitig Längszugrisse einzelner Fasern oder Lamellen und Querkzugrisse auftraten. Der Bruch dürfte daher in diesen Fällen durch Ueberlagerung von Querkzug- und Biegespannungen verursacht worden sein.

Um den Lastdehnungsverlauf oberhalb zur P zu erhalten, wurden bei der Laststeigerung bis zum Bruch die Querdehnungen einer Meßstelle mit einem 2-Koordinatenschreiber in Abhängigkeit von der Belastung aufgezeichnet. In Bild 32 und 33 (Anlage 22 und 23) sind für 2 Träger die erhaltenen Kurvenzüge wiedergegeben.

Bei den Belastungspausen jeder Stufe traten zwar mit der Lasthöhe zunehmende Kriechverformungen auf, die elastische Biegesteifigkeit EJ blieb aber praktisch bis kurz vor dem Bruch gleich.

4. Auswertung der Versuche

4.1 Vorversuch

Für den rotationssymmetrischen Belastungszustand, wie er bei den Versuchen vorlag, erhält man für die Spannungen σ_l und σ_q folgende Gleichungen:

$$\text{Längsspannung: } \sigma_l = \frac{\epsilon_l \cdot s_{33} - \epsilon_q \cdot s_{23}}{s_{22} \cdot s_{33} - s_{32} \cdot s_{23}} \quad (3)$$

$$\text{Querspannung: } \sigma_q = \frac{\epsilon_q \cdot s_{22} - \epsilon_l \cdot s_{32}}{s_{22} \cdot s_{33} - s_{32} \cdot s_{23}} \quad (4)$$

Um aus den gemessenen ϵ_l - und ϵ_q -Werten die Spannungen berechnen zu können, benötigt man die "elastischen Konstanten". Sie wurden folgendermaßen ermittelt:

a) $s_{22} = \frac{1}{E_l}$; E_l = Elastizitätsmodul in Längsrichtung.

E_l wurde als Mittelwert für den gesamten Träger aus der gemessenen Trägerdurchbiegung berechnet, wobei die Theorie der anisotropen Bogenscheibe (Buchmann) verwendet wurde. In Anbetracht der nach Bild 14 gleichmäßigen Dehnungsverteilung erscheint die Verwendung des so berechneten E_l -wertes gerechtfertigt. Für den Versuchsträger 1H2 ergab sich:

$$\underline{E_l = 147\,000 \text{ kp/cm}^2}.$$

b) $s_{33} = \frac{1}{E_q}$ und $s_{23} = \frac{\mu_q}{E_q}$ E_q = Elastizitätsmodul in Querrichtung.

Zur Bestimmung dieser Werte wurden nach Abschluß der Messungen bis zur P aus dem Probeträger 2 Probekörper nach Bild 34 (Anlage 24) herausgesägt. Körper 1 war mit den Längsmeßstellen, Körper 2 mit den Quermeßstellen versehen. Unter einachsiger Zug- bzw. Druckbelastung wurden die Dehnungen in Längs- und Querrichtung gemessen. Die Meßwerte der Zugbelastungen sind in Bild 35 und 36 (Anlage 25 und 26) aufgetragen. Aus den

an den einzelnen Stellen gemessenen Dehnungen ϵ_q und ϵ_l und den aus der aufgebrachten Zugkraft Z und dem Probenquerschnitt F bekannten Spannungen σ_q berechnen sich die gesuchten Werte

$$s_{33} = \frac{\epsilon_q}{\sigma_q} \quad \text{und} \quad s_{23} = \frac{\epsilon_l}{\sigma_l}$$

Die s_{33} -Werte sind in Bild 36 eingetragen, wo auch die jeweils sich ergebenden E_q -Werte angegeben sind.

c) s_{32}

s_{32} wurde annähernd gleich s_{23} gesetzt.

Aus $s_{32} = s_{23} = -5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kp}$ folgt $\mu_l = 0,63$

und $\mu_q = -s_{23} \cdot E_q = 0,023$.

Damit können die Spannungen aus den gemessenen Dehnungen nach Gl. (3) und (4) berechnet werden. Das Ergebnis ist in Bild 37 und 38 (Anlage 27) zusammen mit den rechnerischen Werten nach Buchmann aufgetragen. Es zeigt sich bei den Längsspannungen eine verhältnismäßig gute Uebereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch, während bei den Querspannungen in mehreren Lamellen größere Abweichungen vorliegen. Bei einer Messung über mehrere Lamellen hinweg darf aber ein ausreichend genauer Wert erwartet werden.

Beim Vergleich der Meßwerte mit den rechnerischen Werten nach Buchmann und nach den Werten der DIN 1052, Gl. (1) erkennt man, daß diese Rechenwerte durch den Versuch weitgehend bestätigt wurden. Der Anisotropiewert $s = \sqrt{E_l/E_q}$ ergab sich im Versuch zu 5,6; Buchmann

rechnet mit 6. Dieser Unterschied ist für die Spannungsberechnung unbedeutend. Gegenüber den DIN-Werten betrug der Unterschied bei der maximalen Längsspannung $-10,0\%$ bei der maximalen Querspannung $+3,2\%$.

Aus diesem Vorversuch kann gefolgert werden, daß nach der Theorie von Buchmann mit Berücksichtigung des Anisotropiefaktors $s = 6$ die Spannungen zuverlässig genug erfaßt werden können. Auch die Näherungsformeln der DIN 1052 wurden bestätigt. Diese Berechnungsmethoden ergeben aber nur genaue Resultate, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Der Querschnitt muß rechteckig und über den Bereich der Krümmung konstant sein.
2. Die Krümmung muß konzentrisch und die Länge des gekrümmten Bereiches größer 2mal der Querschnittshöhe sein.
3. Der gekrümmte Teil wird nur durch querkraftfreie Biegung belastet.

4.2 Bruchversuche

4.2.1 Längsspannungen bei zul P

Die Biegeelastizitätsmoduln E_L wurden aus den gemessenen Durchbiegungen zwischen den Kolben Δf (Tabelle 2, Spalte 9) unter Zugrundelegung der genauen Theorie des teils geraden, teils gekrümmten Trägers berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 (Anlage 28) zusammengestellt. Als Mittelwert aller 16 Träger ergab sich $E_{L \text{ Mittel}} = 134\,600 \text{ kp/cm}^2$ (Kleinstwert 109 272, Größtwert 164 690).

Die Biegerandspannungen $\max \sigma_{\perp}$ wurden aus $\sigma_{\perp} = \varepsilon_{\perp} \cdot E_{\perp}$ berechnet, wobei die Werte ε_{\perp} der Tabelle 2 (Anlage 16) entnommen wurden. Diese Randspannungen sind in den Spalten 5 und 6 von Tabelle 4 enthalten, während die Spalten 7 und 8 die rechnerischen Werte nach Buchmann [1] wiedergeben. Diese Werte stimmen mit den rechnerischen Maximalspannungen nach Gl. (1) von $\max \sigma_{\perp} = 66 \text{ kp/cm}^2$ für $\beta = 5$ und $\max \sigma_{\perp} = 105 \text{ kp/cm}^2$ für $\beta = 10$ gut überein, während die Meßwerte in der Regel etwas niedriger liegen. Die mittleren Abweichungen der 4 Einzelträger einer Ausführungsart sind in Tabelle 5 zusammengefaßt.

Tabelle 5: Vergleich der gemessenen und gerechneten Biegerandspannungen nach Tabelle 4.

Trägerform nach Bild 2	Mittlere Abweichung in % der Meßwerte von den theoretischen Werten	
	Biegespannungen Außenrand	Biegespannungen Innenrand
2a	- 4,15	-1,21
2b	-13,67	-5,86
2c	- 7,59	-1,81
2d	- 9,91	-9,45

Die Unterschiede sind bei den maximalen Innenrandspannungen der Träger mit größerer Krümmungstrecke ($e = 100\text{cm}$) gering, bei $e = 50 \text{ cm}$ ca. -6 und $-9,5\%$. Bei den Werten für die Biegedruckseite sind die Unterschiede etwas größer. Da in 13 von 16 Fällen die gemessenen Werte unter den gerechneten blieben, dürften die Unterschiede außer von der Trägerform auch von den Verschiedenheiten des Biege-Elastizitätsmoduls gegenüber den Zug- oder Druckmoduln und von den Annahmen des Berechnungsverfahrens ab-

hängen.

Aus Tabelle 4 geht weiter hervor, daß die Spannungen von Außenrand (Druck) und Innenrand (Zug) verschieden sind. Nach den verschiedenen Theorien ergäben sich die in Tabelle 6 zusammengestellten und mit den Mittelwerten aus den Versuchen verglichenen Verhältniswerte.

Tabelle 6: Verhältniswerte der Längsspannungen am Außen- und Innenrand der gekrümmten Träger.

erhält- iswerte	Krümmungs- verhältnis $\beta = R/h$	Gerader Balken	Gekrümmter Balken Schelling [2]	Balken Stüssi [3]	isotrope Scheibe Buchmann [1]	anisotrope Scheibe Buchmann [1] s=6	Mittelwert aus 8 Versuchen
ax σ_{li}	5	1,00	1,143	1,143	1,136	1,20	
ax σ_{la}	10	1,00	1,067	1,069	1,068	1,11	

Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung liegen bei 4 und 5 %.

4.2.2 Querspannungen bei zul P

Die beim Vorversuch angewandte Methode, den E-Modul in Querrichtung an dem mit der Meßvorrichtung versehenen Trägerabschnitt zu bestimmen, konnte bei den Bruchversuchen nicht angewandt werden, da die Träger vorwiegend in Trägermitte zu Bruch gingen. Hier konnten somit nur die absoluten Querdehnungen der einzelnen Bauarten miteinander verglichen werden. Aus den rechnerischen Querspannungen wurden die E_q -Werte zu $E_q = 5400 \text{ kp/cm}^2$ für die Träger mit ca. 10% Holzfeuchtigkeit und zu $E_q = 4250 \text{ kp/cm}^2$ für die Träger mit ca. 14% Holzfeuchtigkeit berechnet. Von einer Berechnung der Querspan-

nung für einen jeden Träger mußte abgesehen werden.

4.2.3 Bruchfestigkeiten

Die in Tabelle 3 zusammengestellten rechnerischen Querkzugfestigkeiten der einzelnen Versuchsträger schwanken beträchtlich. Es konnte kein eindeutiger Festigkeitsunterschied weder zwischen den verschieden gelagerten Trägern noch zwischen den beiden Leimsorten festgestellt werden. Der Bruch ging in keinem Falle von der Leimfuge aus, wenn auch teilweise im Bereich von Einzellasten ein örtlich begrenzter Leimbruch vorlag. Vorwiegend war aber die Querkzugfestigkeit des Holzes für das Eintreten des Bruches maßgebend. Die große Streuung der Holzquerkzugfestigkeit erklärt somit auch die Tatsache, daß der Querkzugbruch nicht immer an der Stelle der theoretisch größten Querkzugspannung auftrat, sondern praktisch im gesamten unteren Bereich von $2/3$ der Querschnittshöhe vorkam.

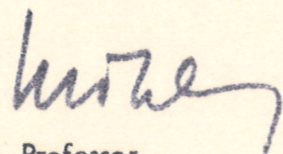
Die statistische Auswertung der Querkzugfestigkeiten geht aus Tabelle 7 (Anlage 29) hervor.

5. Schlußfolgerungen und Zusammenfassung

Die Versuche mit gekrümmten Brettschichtträgern mit konstantem Querschnitt haben gezeigt, daß man mit den Näherungsformeln (1) und (2) nach DIN 1052 die maximale Längsspannung am Innenrand und die größte Querspannung ausreichend genau berechnen kann. Hierbei ist die Anisotropie des Holzes bei den in der Praxis gebräuchlichen Krümmungsverhältnissen ausreichend genau berücksichtigt. Die Querkzugfestigkeiten der Träger wiesen starke Streuungen auf.

In keinem Fall war die Verleimung Ursache für den Quersugbruch, dies gilt für beide Leimsorten. Auch in Bezug auf die Lagerung der Versuchskörper bei unterschiedlichen Klimaverhältnissen konnten keine Unterschiede in der Festigkeit festgestellt werden.

In Anbetracht dessen, daß bei den verhältnismäßig sorgfältig hergestellten Versuchsträgern mit nur 10 mm dicken Lamellen bereits große Streuungen in den Quersugfestigkeiten auftraten, muß besonders darauf hingewiesen werden, daß die nach DIN 1052, Bl. 1, Abs. 11.5.7 zulässige Quersugspannung nur dann ausreichende Sicherheit bietet, wenn bei Trägern konstanter Trägerhöhe auf Holz Auswahl, Holz-trocknung und Verleimung größte Sorgfalt verwendet wird. Es wird die Aufgabe weiterer Forschungsarbeiten sein, den Einfluß der Trägerformgebung und der Lamellendicke auf die Quersugfestigkeit zu klären, wobei verschiedene Trocknungs- und Verleimungsverfahren der Lamellen berücksichtigt werden müssen.



o. Professor

Bild 1

zum Bericht vom
1.3.1971

BAUFORMEN GEKRÜMMTER BRETTSCHICHTTRÄGER

Bild 1a

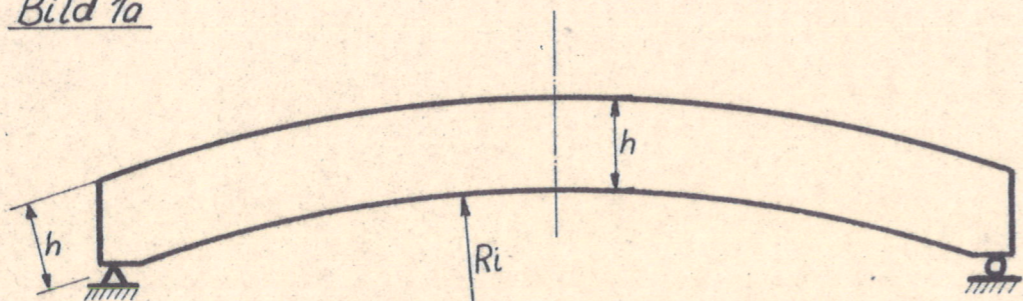


Bild 1b

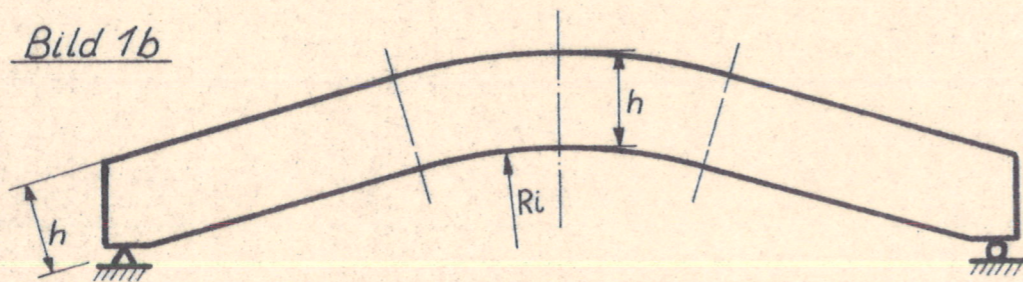


Bild 1c

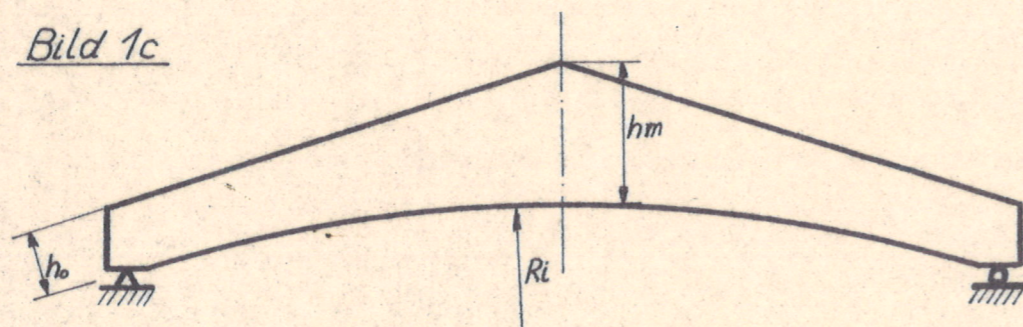


Bild 1d

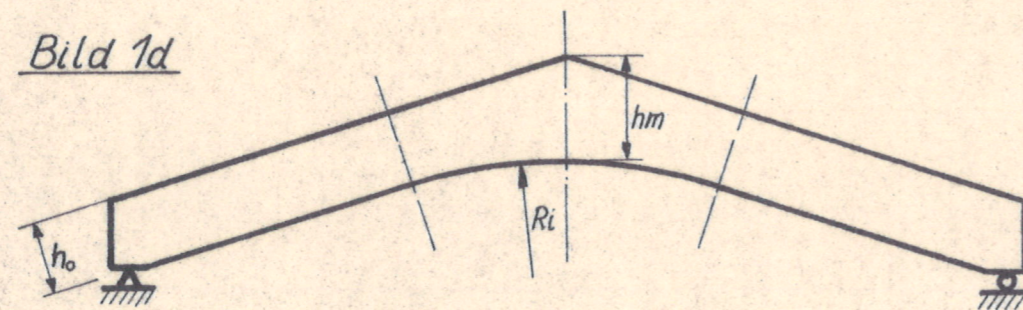


Bild 2

AUSBILDUNG DER PROBEKÖRPER (Masse in cm)

Träger-Querschnitt $b/h = 8/30$ cm

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

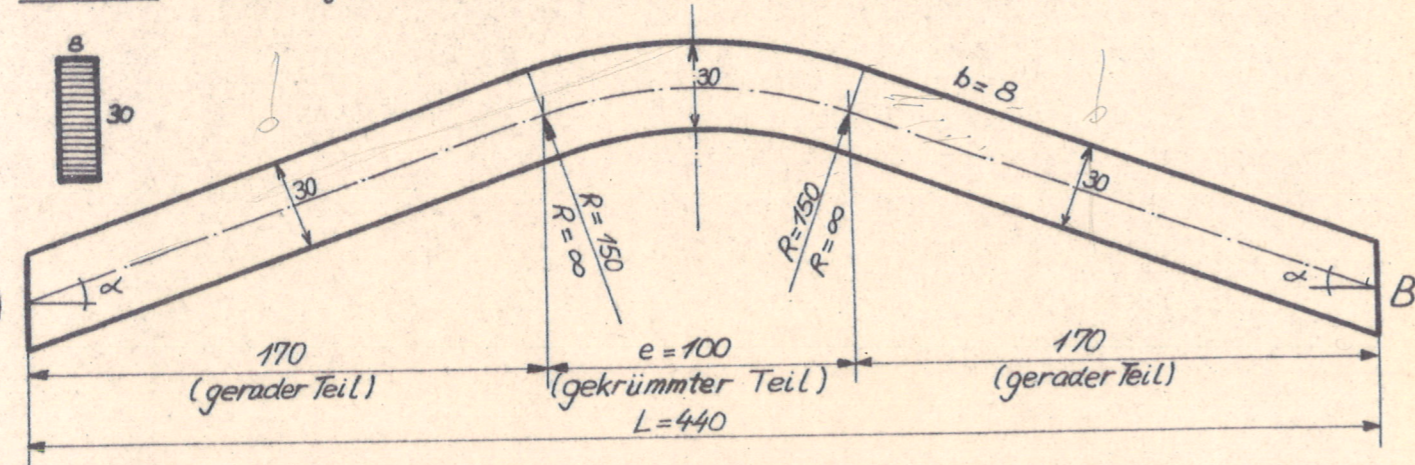


Bild 2b Krümmungsverhältnis $\beta = R/h = 5$, $e = 50$ cm Neigungswinkel $\alpha = 9,6^\circ$

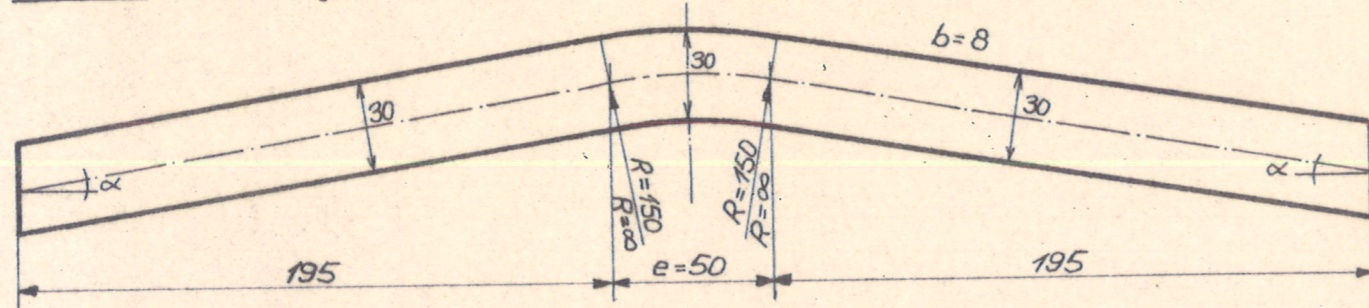


Bild 2c Krümmungsverhältnis $\beta = R/h = 10$, $e = 100$ cm Neigungswinkel $\alpha = 9,6^\circ$

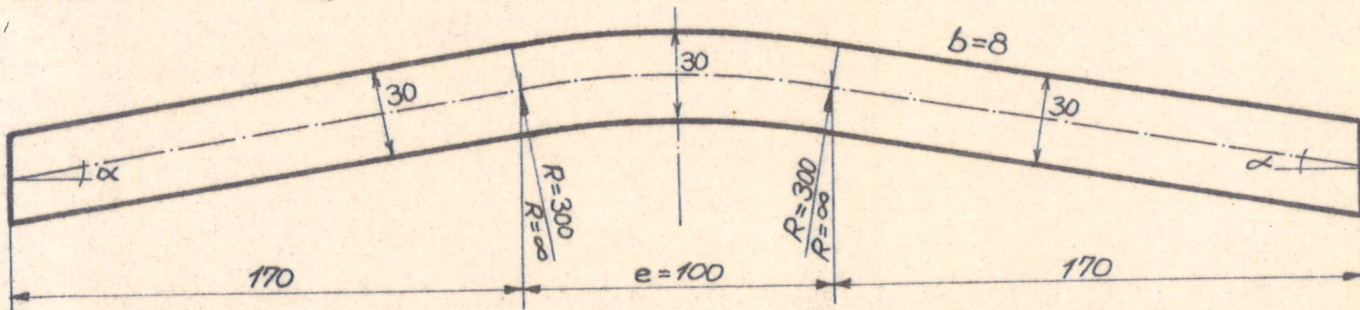
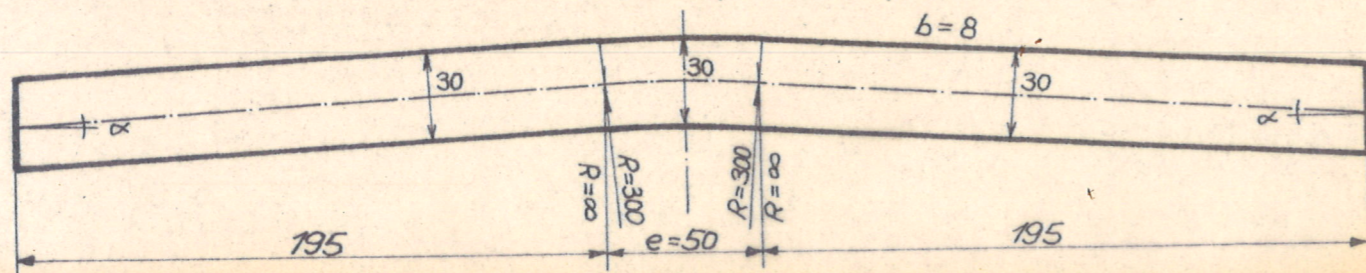


Bild 2d Krümmungsverhältnis $\beta = R/h = 10$, $e = 50$ cm Neigungswinkel $\alpha = 4,8^\circ$



zum Bericht vom
1.3.1971

Tabelle 1: Zusammenstellung der hergestellten Versuchskörper

Bezeichnung	R [cm]	e [cm]	Leim	Lagerung	Verwendung	Bezeichnung	R [cm]	e [cm]	Leim	Lagerung	Verwendung
1H1	150	100	Ha	F	+	3H1	300	100	Ha	F	+
1H2	150	100	Ha	V	+	3H2	300	100	Ha	F	
x 1H3	150	100	Ha	F		3H3	300	100	Ha	V	+
1H4	150	100	Ha	V	+	3H4	300	100	Ha	V	
1R1	150	100	Re	F	+	3R1	300	100	Re	F	+
1R2	150	100	Re	V		3R2	300	100	Re	V	+
x 1R3	150	100	Re	F		3R3	300	100	Re	F	
/ 1R4	150	100	Re	V	+	3R4	300	100	Re	V	
x 2H1	150	50	Ha	F		4H1	300	50	Ha	V	+
2H2	150	50	Ha	V		4H2	300	50	Ha	F	+
2H3	150	50	Ha	V	+	4H3	300	50	Ha	F	
2H4	150	50	Ha	F	+	4H4	300	50	Ha	V	
x 2R1	150	50	Re	V		4R1	300	50	Re	F	
2R2	150	50	Re	F	+	4R2	300	50	Re	V	+
2R3	150	50	Re	F		4R3	300	50	Re	F	+
2R4	150	50	Re	V	+	4R4	300	50	Re	V	

Es bedeuten:

R = mittlerer Krümmungsradius in cm.

e = Länge des gekrümmten Bereiches in cm

Leim: Ha Harnstoff Kaurit 220

Lagerung: F im Freien

Re Resorcinharz Kauresin 440 R

V in der Versuchsanstalt

Verwendung: + Träger, die für die Versuche des Teils 1 verwendet wurden.

Bild 3 Aufbau der Versuchsanlage

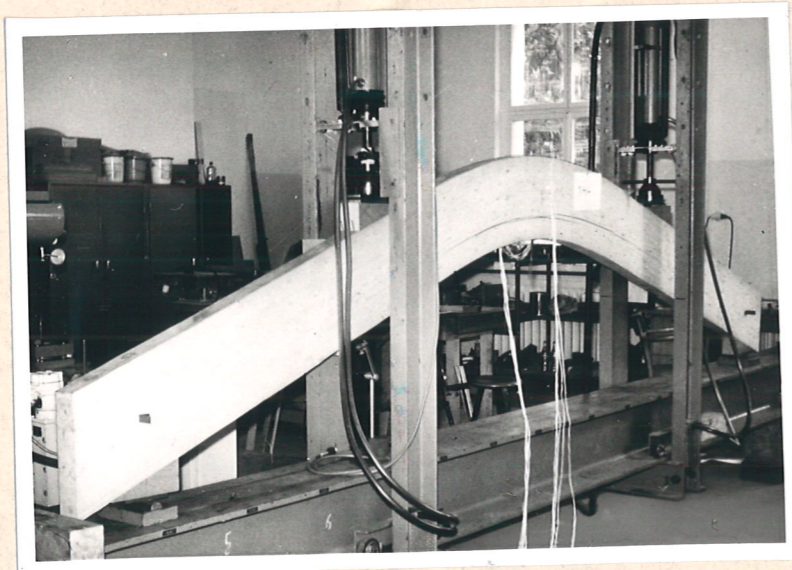
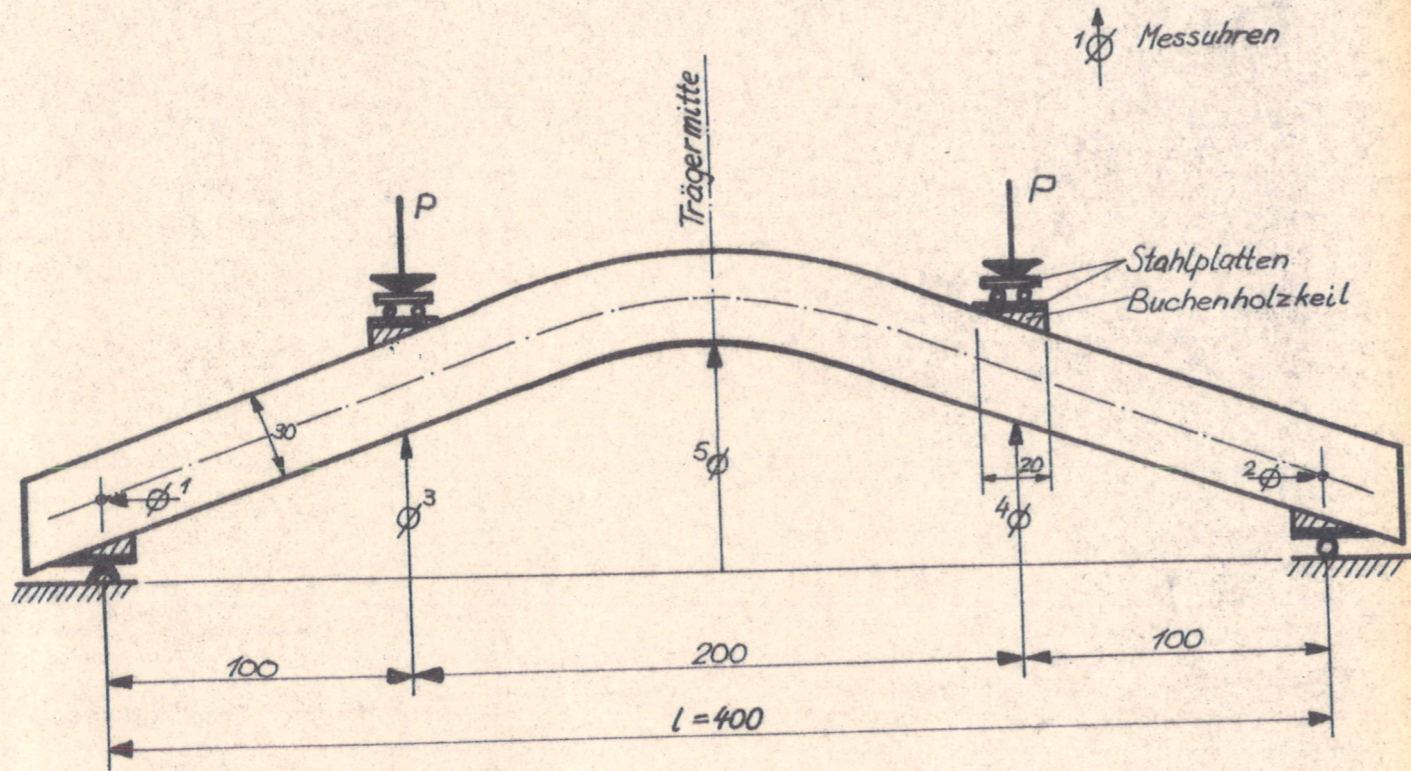


Bild 4
Aufgebauter Versuchsträger

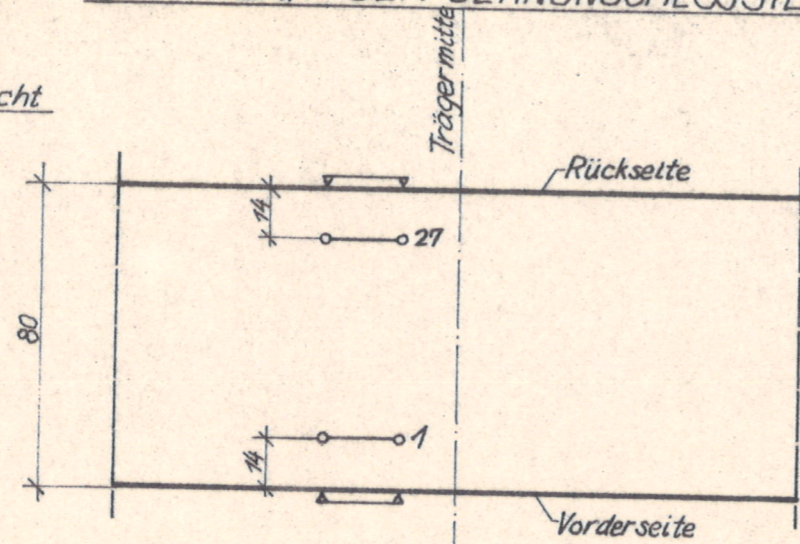
Bild 5

LAGEPLAN DER DEHNUNGSMESSSTELLEN

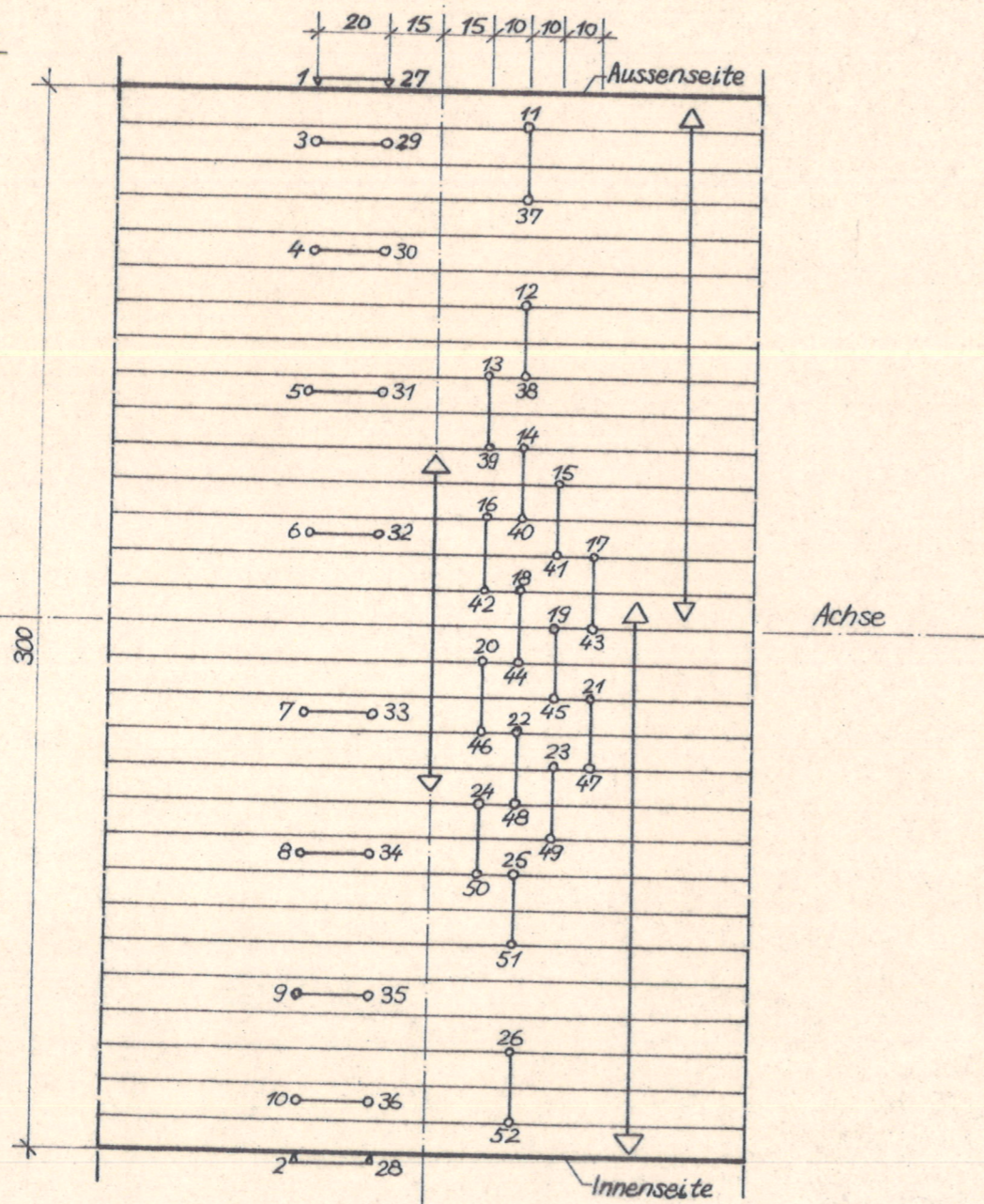
Anlage 5
zum Bericht
vom 1.3.1971

Draufsicht

[Masse in mm]



Ansicht



3-29 DMS

Messstelle Nr. 1-26 Vorderseite
Nr. 27-52 Rückseite

↔ induktive Wegaufnehmer W1-W6

Anlage 6

zum Bericht vom 1.3.71

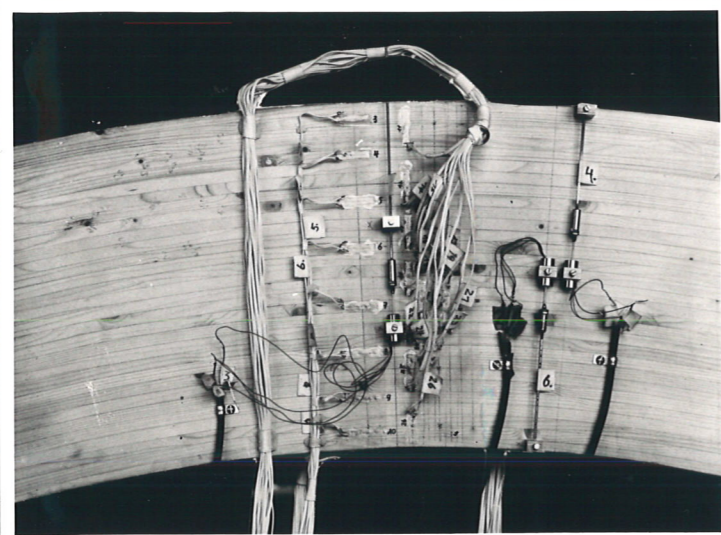


Bild 6
Anordnung der Messgeräte
auf der Vorderseite

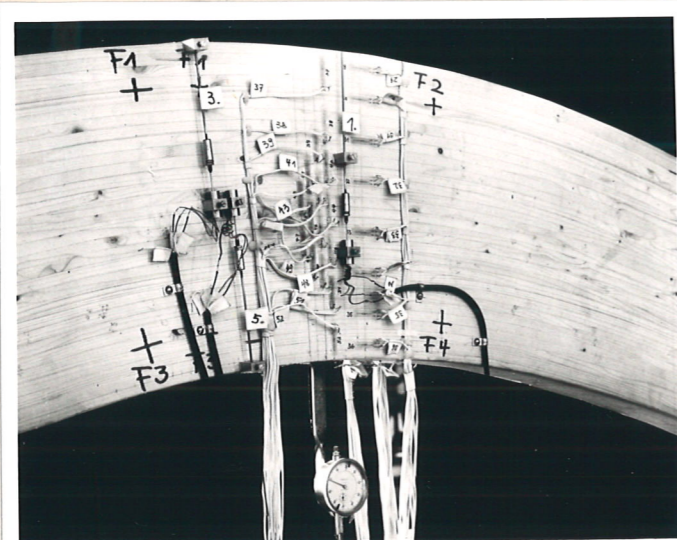


Bild 7
Anordnung der Messgeräte
auf der Rückseite

Bild 8

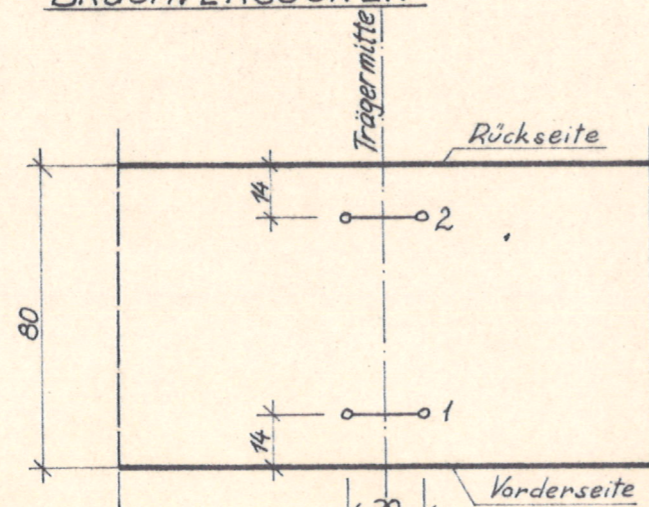
LAGEPLAN DER DMS BEI DEN BRUCHVERSUCHEN

Anlage 7

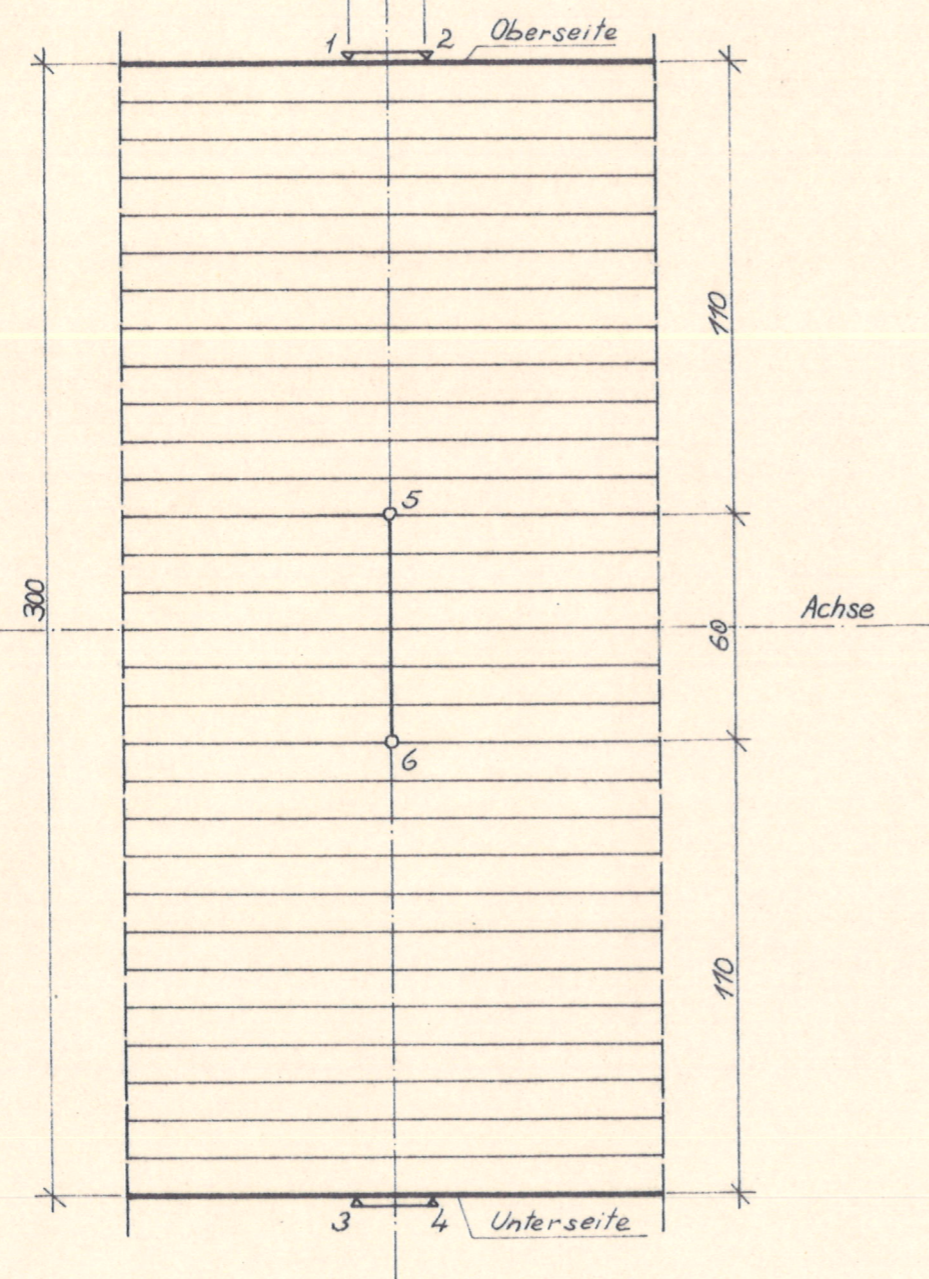
zum Bericht vom
1.3.1971

Draufsicht

[Masse in mm]

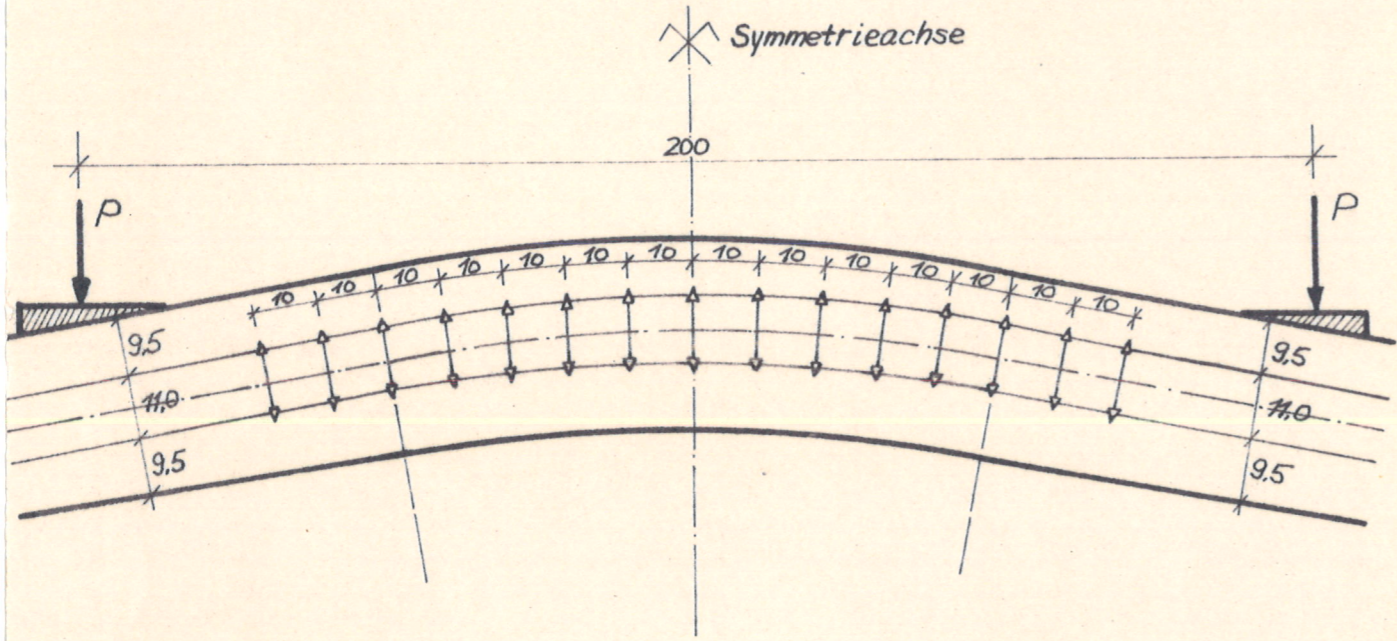


Ansicht



Messstelle Nr 1, 3, 5 Vorderseite
Nr 2, 4, 6 Rückseite

Bild 9 Querdehnungsmessungen im gekrümmten Teil und den
Übergangsbereichen mit Wegaufnehmer



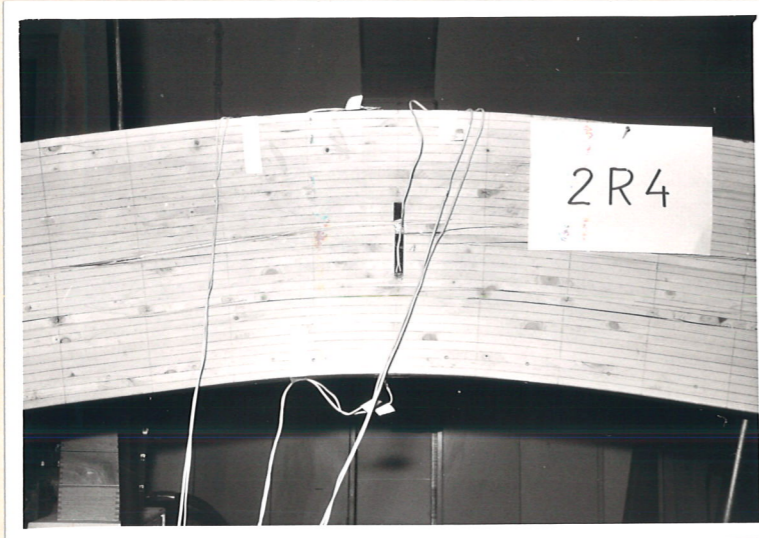


Bild 10

Dehnungsmessstreifen für
Querdehnungsmessung

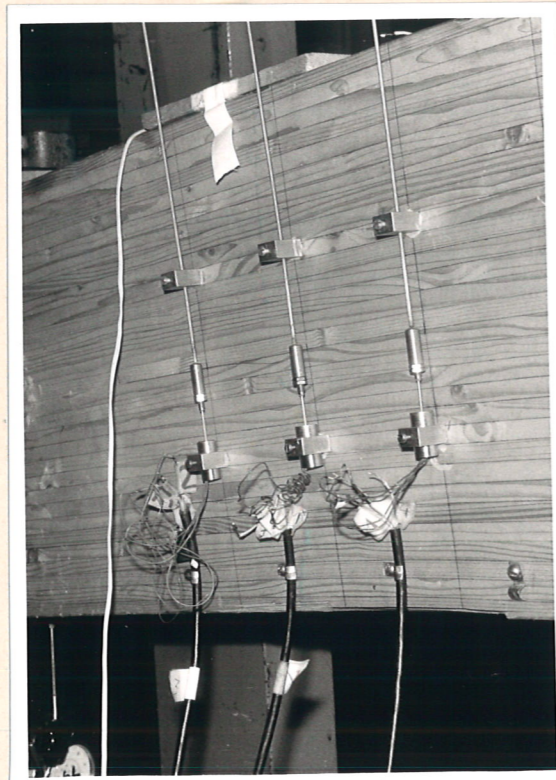


Bild 11

Induktive Wegaufnehmer
zur Querdehnungsmessung

Bild 12

Gemessene Längsdehnungen DMS 2 und 28 in Abhängigkeit von der Belastung

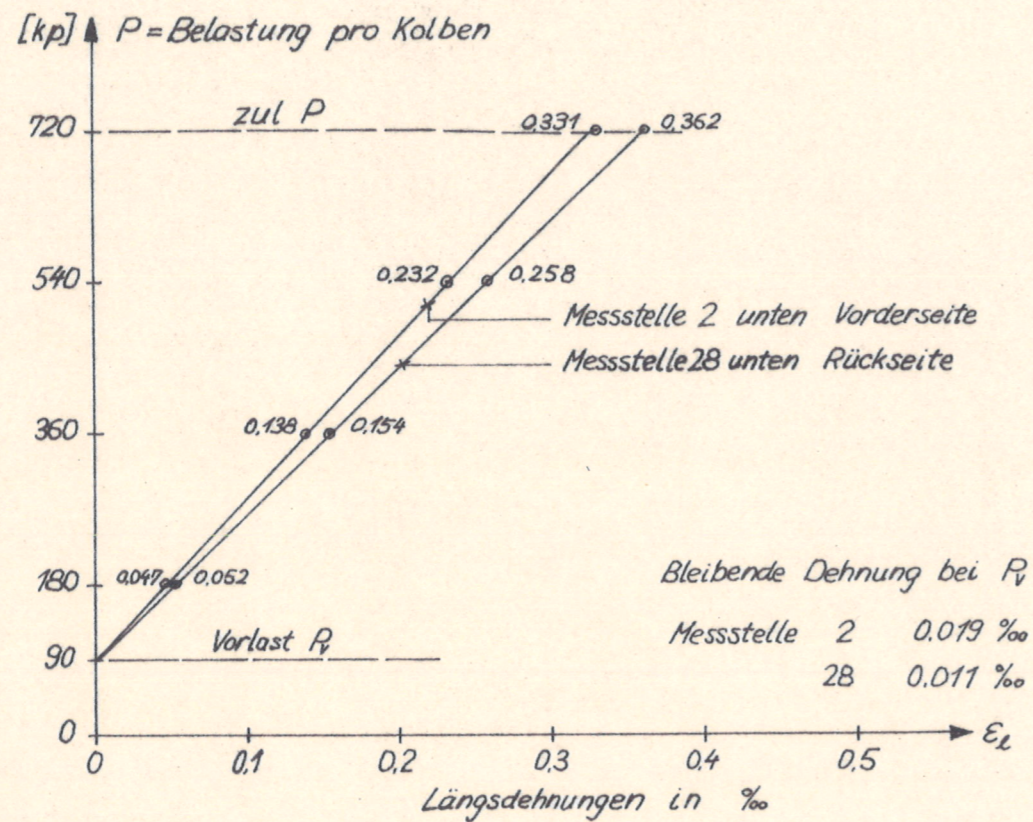
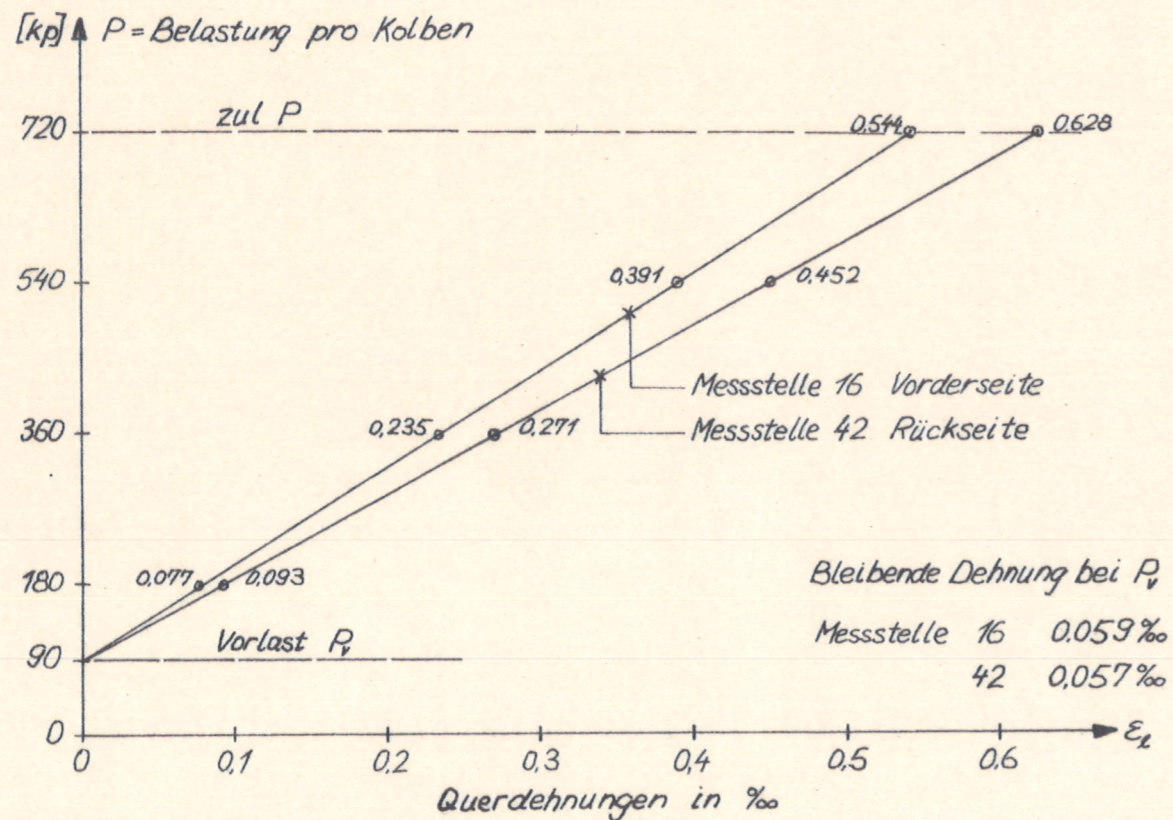


Bild 13

Gemessene Querdehnungen DMS 16 und 42 in Abhängigkeit von der Belastung



Verlauf der Längsdehnungen bei zul P am Träger 1H2

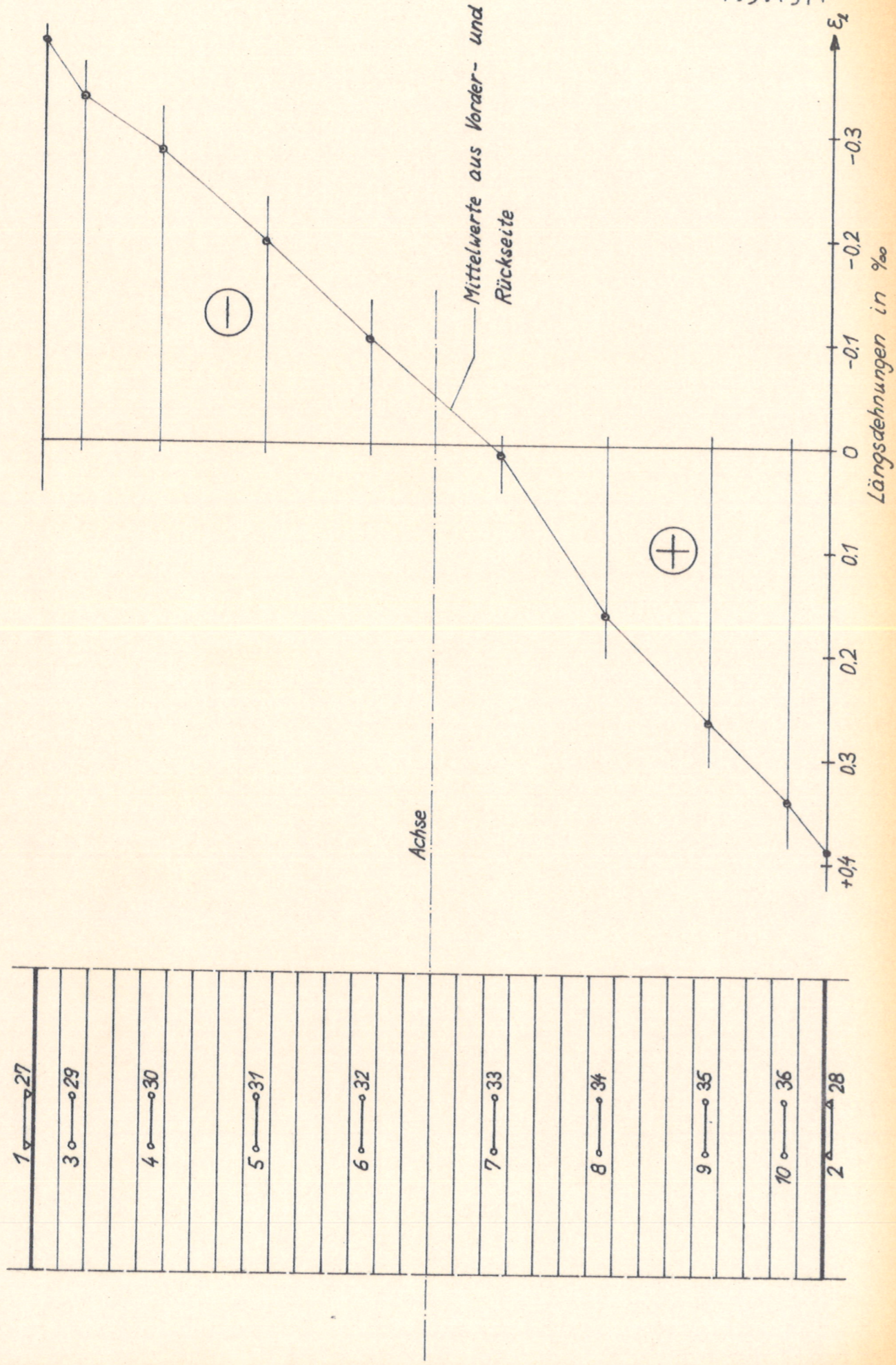


Bild 15

Verlauf der Querdehnungen bei zul P am Träger 1H2

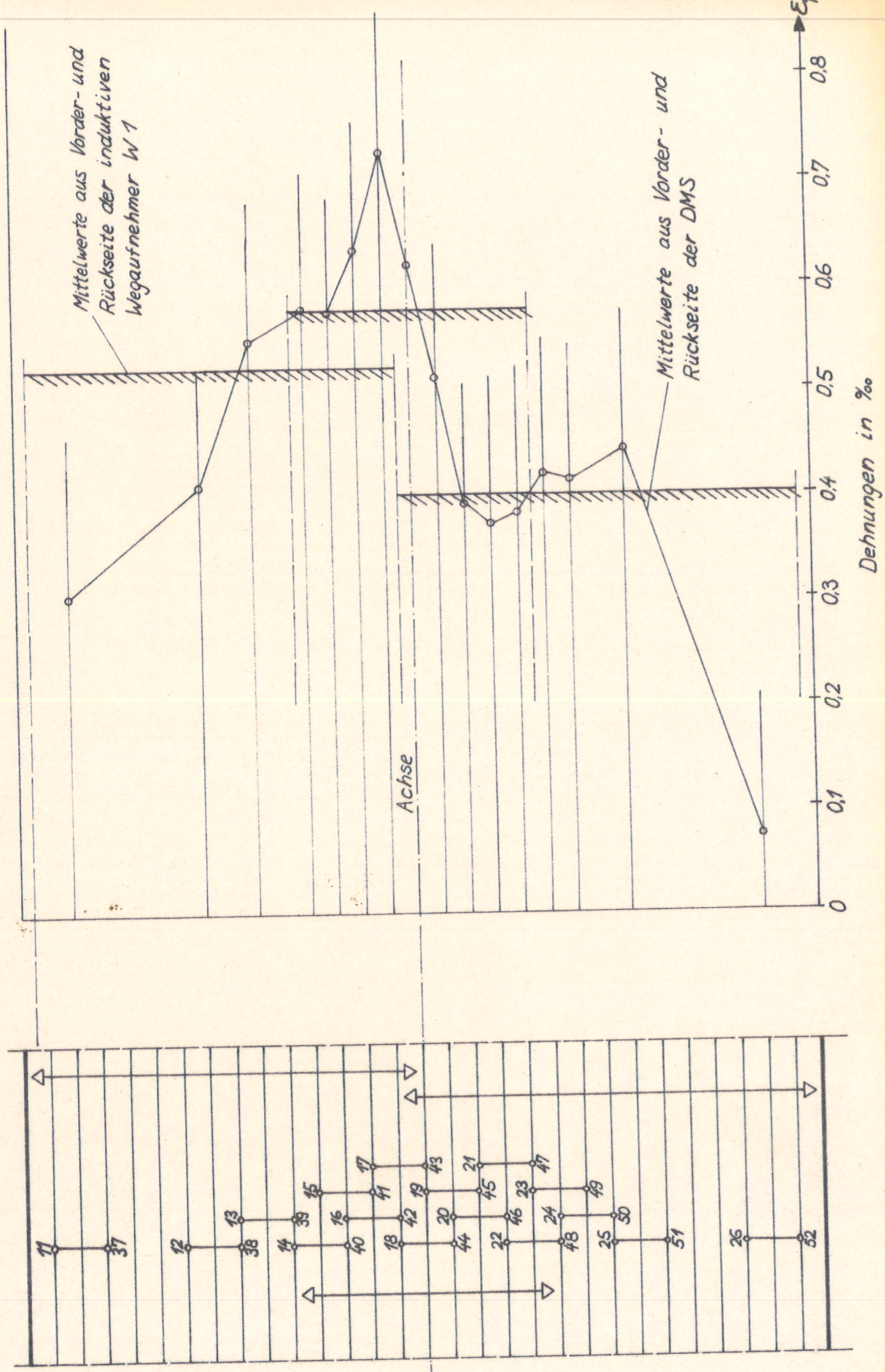
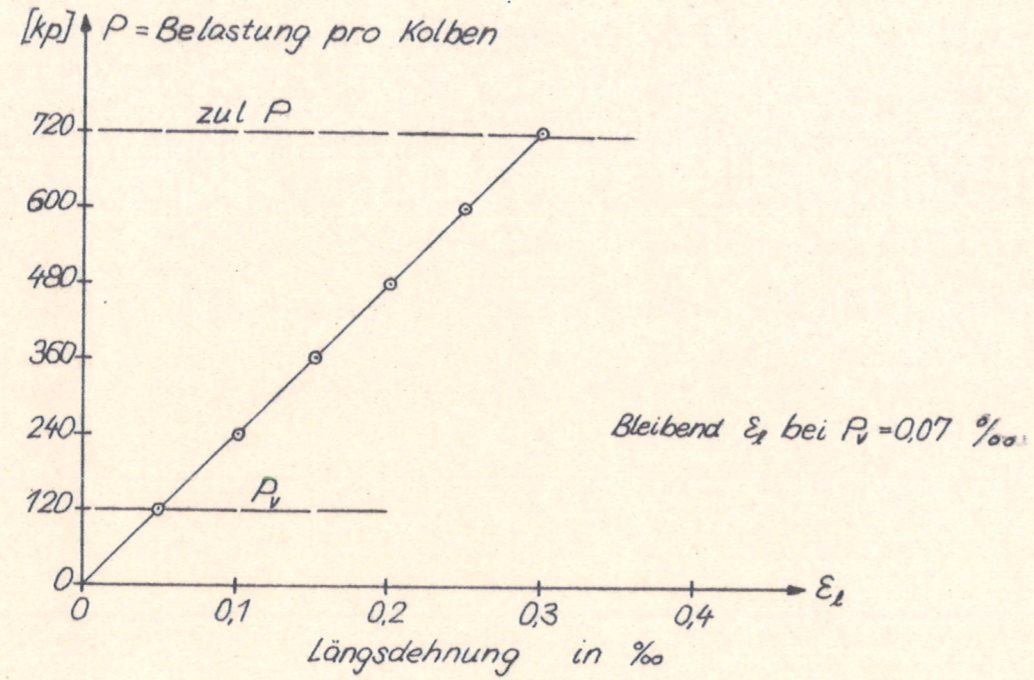


Bild 16 Last-Dehnungslinie für Träger 1R1

Messstelle 1 (DMS längs zur Faser am Aussenrand)

Bild 17 Last-Dehnungslinie für Träger 1R1

Messstelle 5 (DMS quer zur Faser)

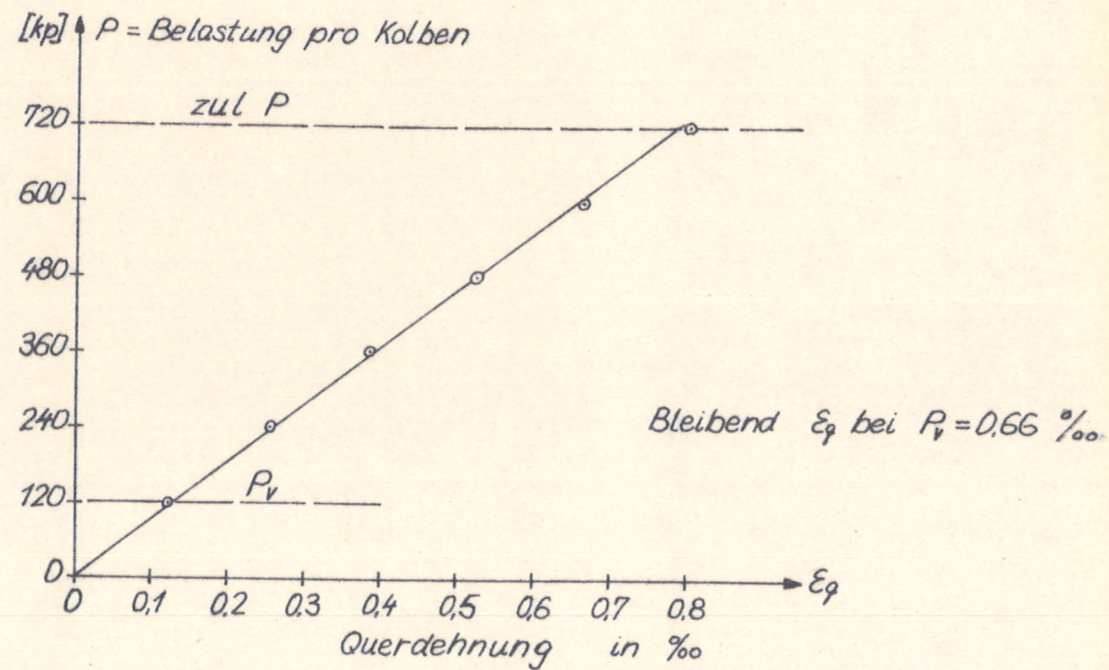


Bild 18 Last-Dehnungslinie für Träger 4H1
Messstelle 3 (DMS längs zur Faser am Innenrand)

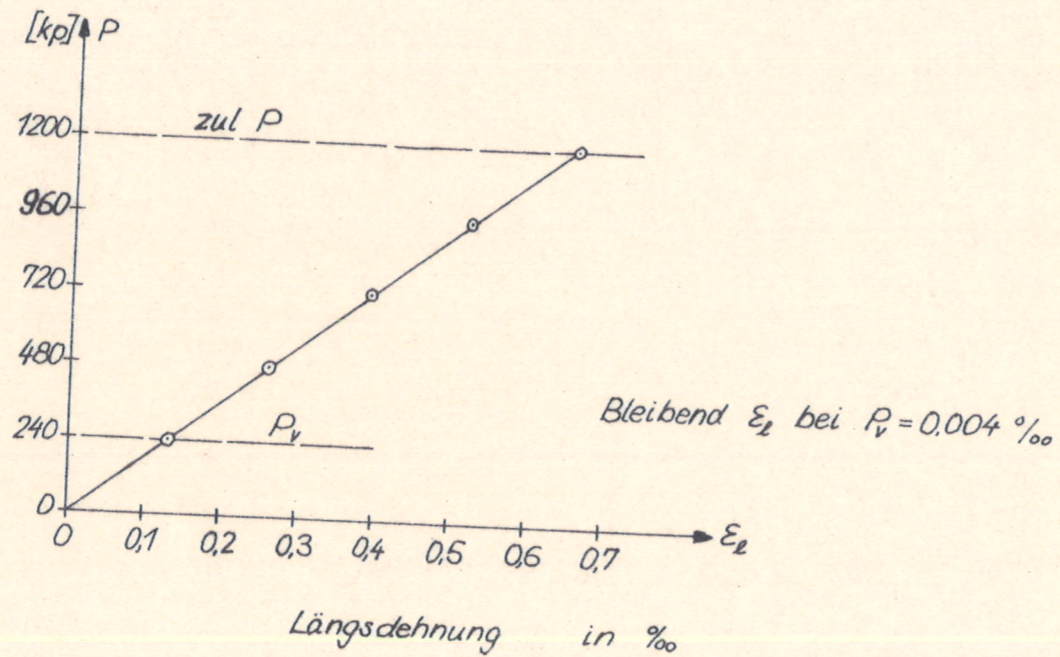


Bild 19 Last-Dehnungslinie für Träger 4H1
Querdehnung mit induktivem Wegaufnehmer

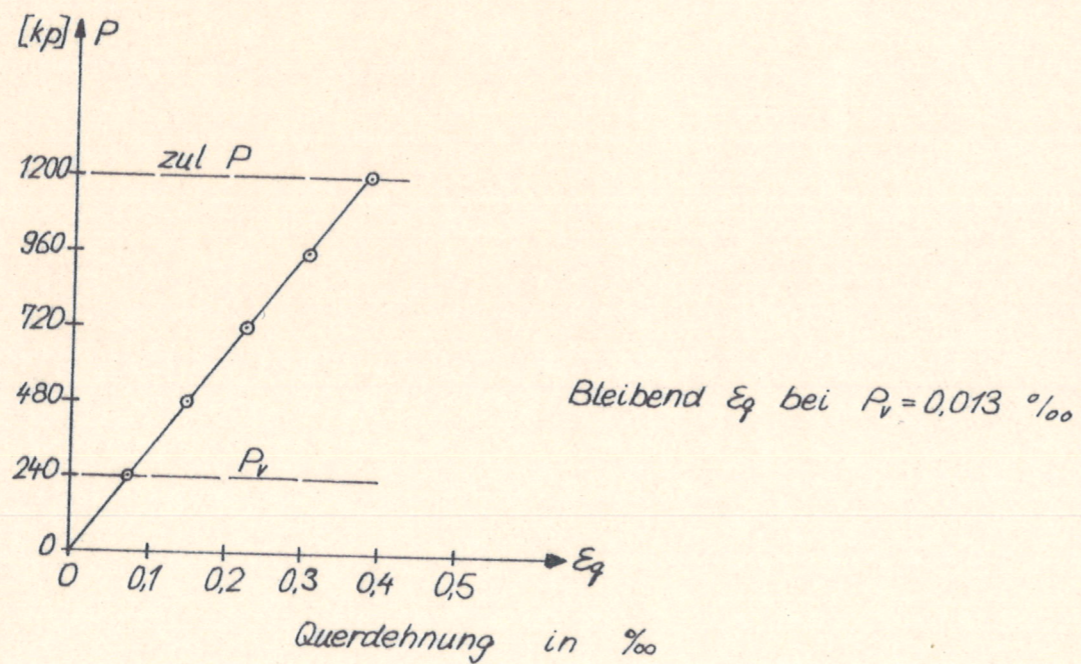


Bild 20 Last-Durchbiegungslinie für Träger 3R2
Messung mit Uhr 5 in Trägermitte

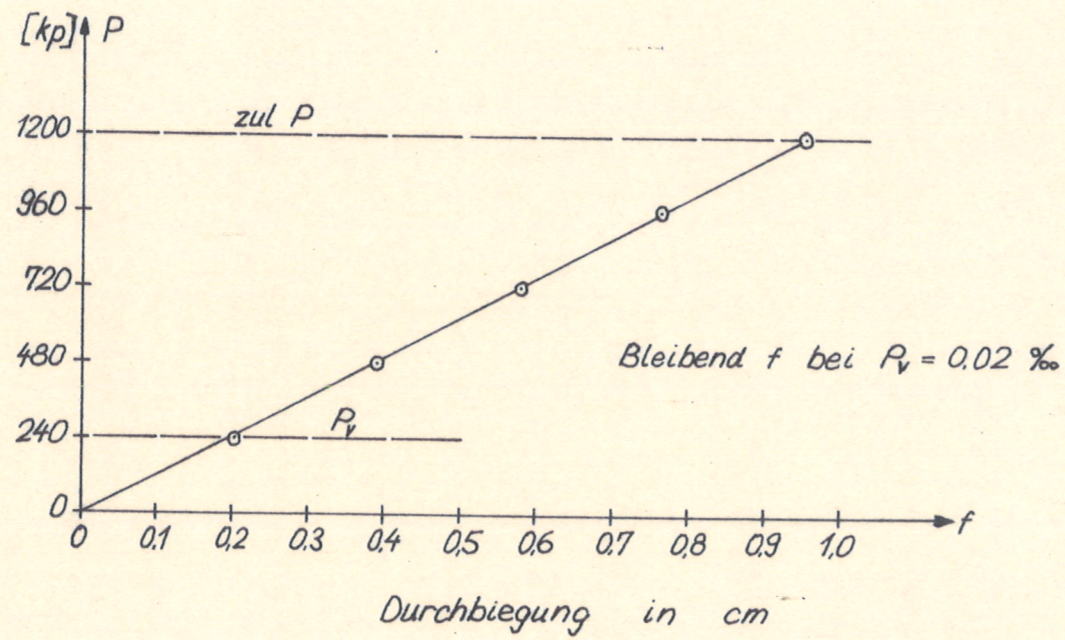


Bild 21 Abhängigkeit der waagrechten Verschiebung Δl von der
Belastung für Träger 3R2

Messung mit Uhr 2 am Auflager links

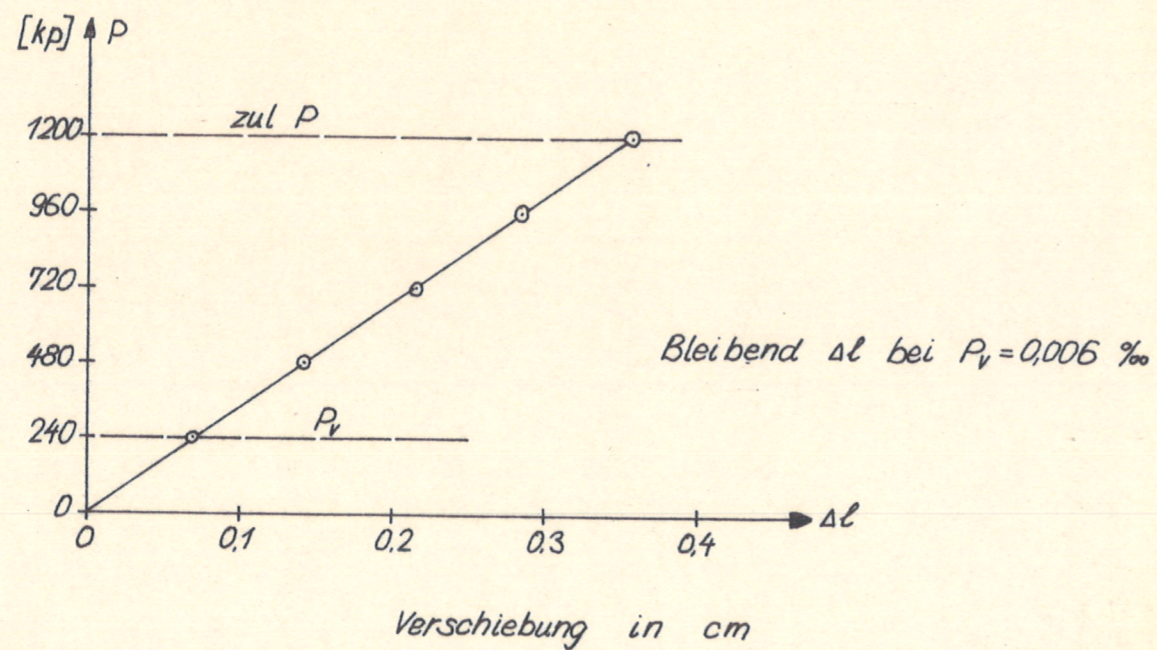


Tabelle 2: Ergebnisse der Dehnungs- und Durchbiegungsmessungen bei zul P

1	2	3	Dehnungsmessungen			Durchbiegungsmessungen			Belastung
			Mittelwert aus Vorder- und Rückseite						
Trägerbezeichnung	Holzfeuchtigkeit %	Luftfeuchtigkeit, Temperatur im Versuchraum	4	5	6	7	8	9	10
			Dehnungen am Außenrand ϵ_L in $\frac{0}{100}$	Dehnungen am Innenrand ϵ_L in $\frac{0}{100}$	quer zur Faser im Querschnittbereich ϵ_q in $\frac{0}{100}$	Gesamte Durchbiegung f in mm	Gesamte horizontale Vergrößerung Δl in mm	Durchbiegung zwischen den Kolben Δf in mm	Last pro Kolben in kp
1H4	10,0	$70 \frac{0}{21}$	0,348	0,487	0,540	6,40	3,79	1,68	720
1R4	9,8	$58 \frac{0}{18,5}$	0,412	0,454	0,549	6,64	3,99	1,76	720
1R1	12,2	$56 \frac{0}{16,5}$	0,315	0,357	0,805	5,07	2,81	1,29	720
1H1	12,9	$50 \frac{0}{20}$	0,461	0,557	0,638	6,15	3,57	1,64	720
2R4	10,4	$80 \frac{0}{16,5}$	0,414	0,536	0,412	6,92	1,97	1,71	720
2H3	10,6	$70 \frac{0}{21}$	0,356	0,462	0,583	6,49	1,76	1,59	720
2R2	13,6	$64,5 \frac{0}{22,5}$	0,434	0,474	0,680	6,68	1,77	1,67	720
2H4	14,0	$67 \frac{0}{21}$	0,358	0,462	0,688	7,11	1,92	1,77	720
3R2	9,5	$69 \frac{0}{21}$	0,564	0,628	0,455	9,32	2,32	2,19	1200
3H3	10,3	$68 \frac{0}{22}$	0,688	0,646	0,641	10,10	2,48	2,39	1200
3R1	14,5	$69 \frac{0}{22,5}$	0,609	0,798	0,701	10,27	2,57	2,39	1200
3H1	14,8	$69 \frac{0}{21}$	0,518	0,625	0,720	8,65	2,17	2,09	1200
4H1	10,2	$54 \frac{0}{20}$	0,668	0,655	0,512	9,87	1,19	2,55	1200
4R2	9,9	$47 \frac{0}{23,5}$	0,735	0,767	0,417	10,62	1,14	2,75	1200
4R3	13,8	$50 \frac{0}{20}$	0,629	0,738	0,460	10,78	1,29	2,76	1200
4H2	14,5	$54 \frac{0}{19,5}$	0,778	0,914	0,534	11,70	1,40	3,08	1200

Querdehnungsmessungen im gekrümmten Teil und in den Übergangsbereichen

Bild 22 Versuchsträger 1H2 $\beta=5$ $e=100$

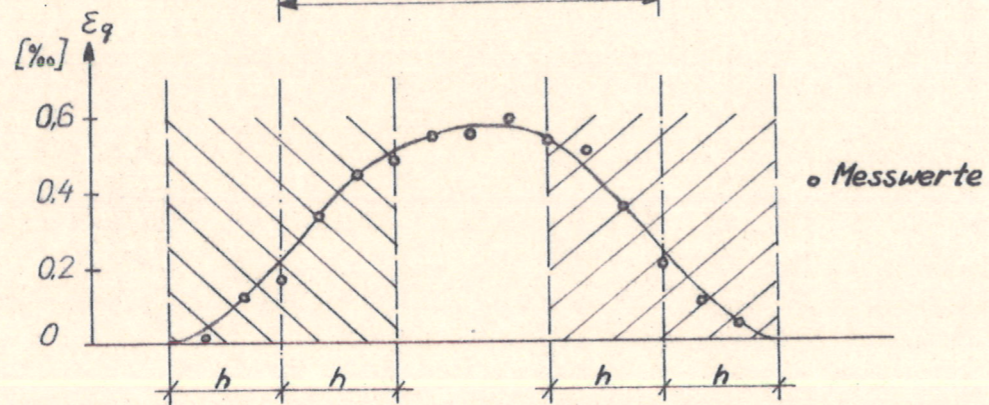
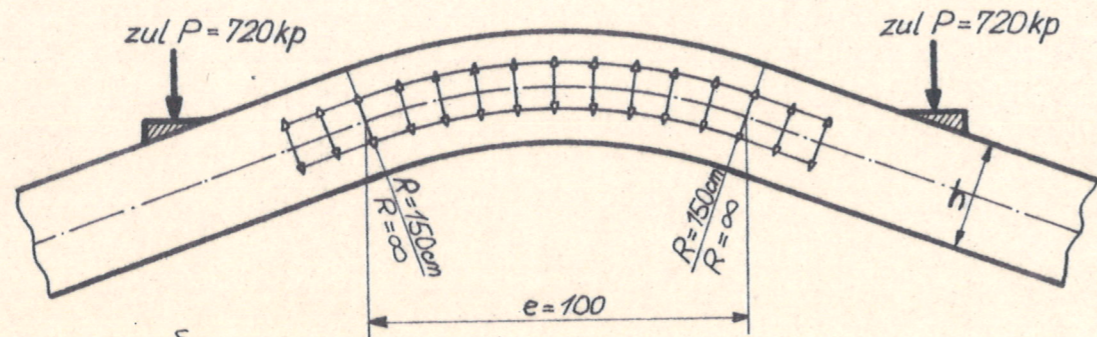
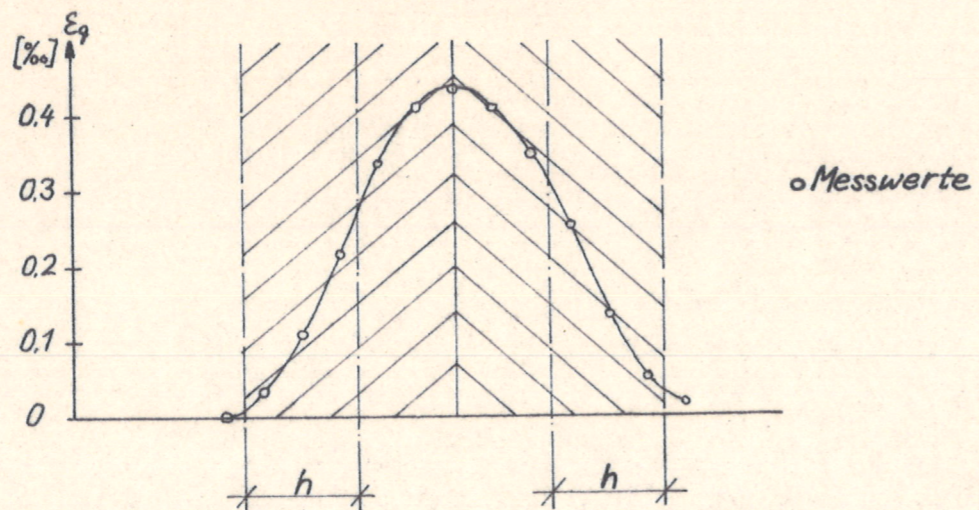
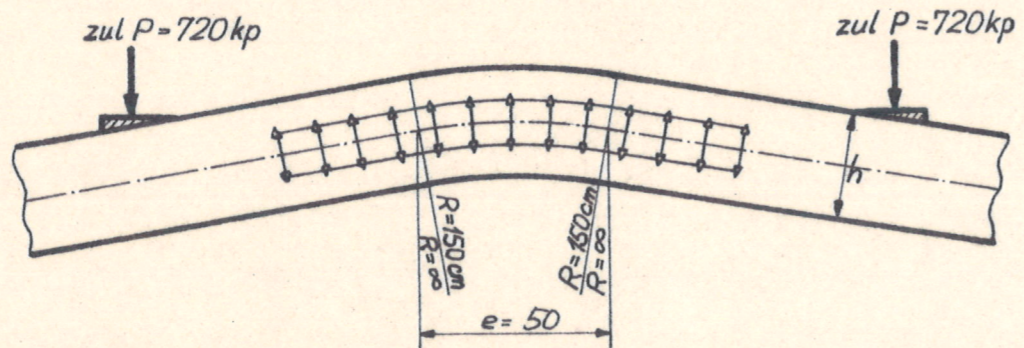


Bild 23 Versuchsträger 2R4 $\beta=5$ $e=100$



Querdehnungsmessungen im gekrümmten Teil und in den Übergangsbereichen

Bild 24 Versuchsträger 3R2 $\beta = 10$ $e = 100$

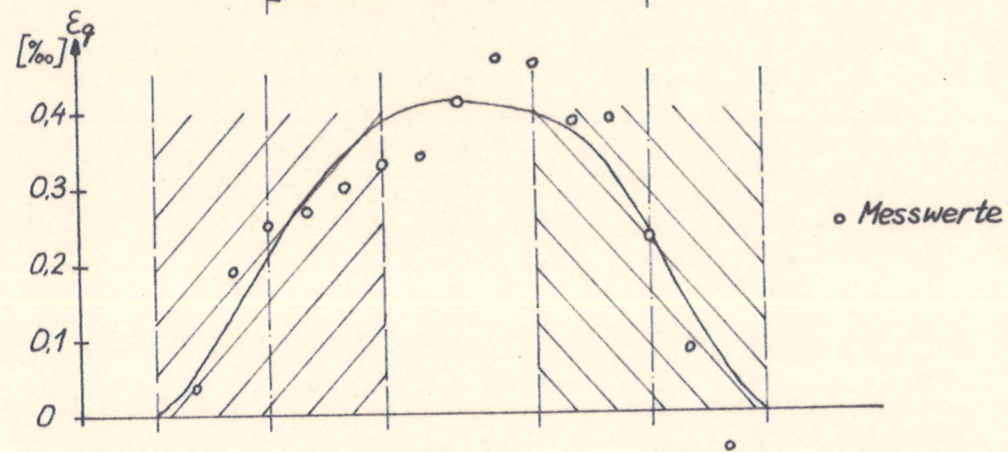
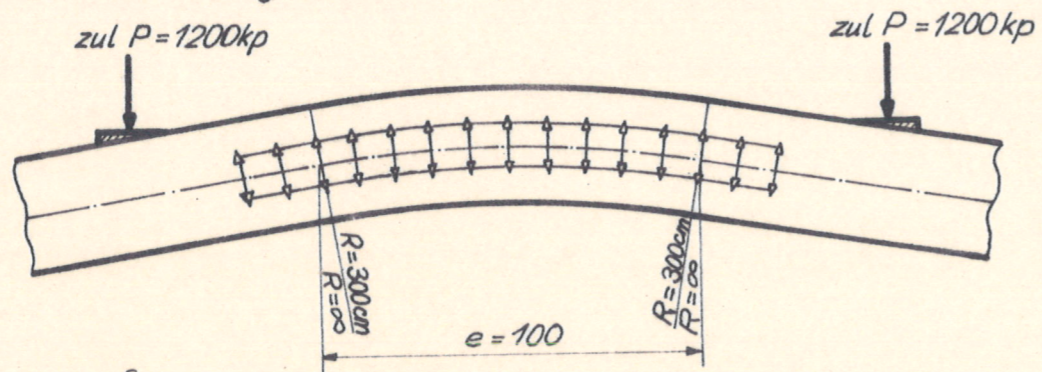


Bild 25 Versuchsträger 4H1 $\beta = 5$ $e = 50$

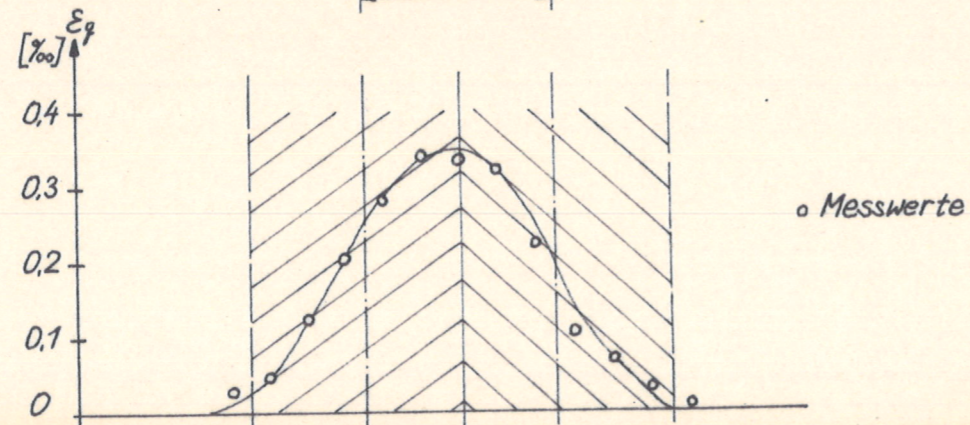
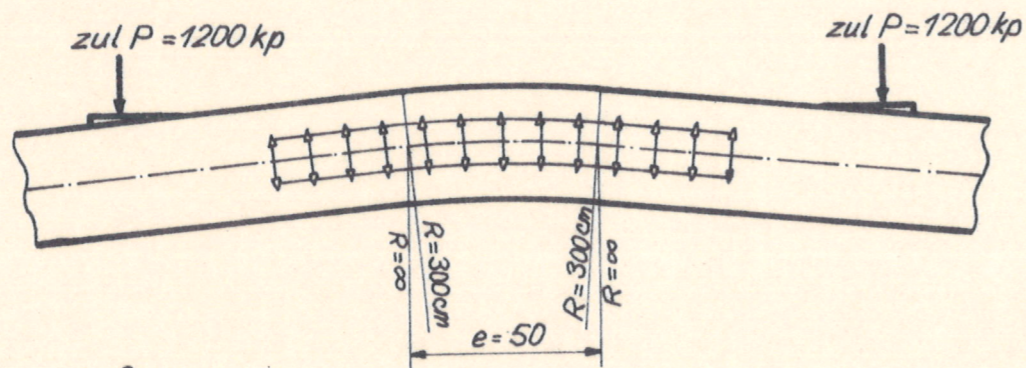


Tabelle 3: Ergebnisse der Bruchversuche

1 Trägerbe- zeichnung	2 Bruchlast P pro Kolben [kp]	3 Rechnerische Spannungen beim Bruch nach Buchmann [1]			6 Bruchart
		Maximale Querzug- spannung [kp/cm ²]	4 Maximale Biegerand- spannungen am Außen- rand [kp/cm ²]	5 am Innen- rand [kp/cm ²]	
1H4	2700	11,0 (11,0)	-211	239 (241)	Querzugbruch
1R4	2400	10,0 (10,0)	-192	219 (220)	"
1R1	1680	6,7 (6,7)	-129	146 (147)	"
1H1	2400	9,1 (9,1)	-175	199 (200)	"
2R4	3860	16,0 (16,0)	-309	352 (354)	"
2H3	2480	10,4 (10,4)	-200	227 (229)	"
2R2	4440	18,5 (18,5)	-356	404 (406)	"
2H4	2640	11,2 (11,2)	-216	245 (247)	"
3R2	6000 ¹⁾	>12,6 (12,7)	-494	527 (532)	(nicht gebrochen)
3H3	4860	10,1 (10,1)	-394	421 (425)	Querzug- +(Biege- bruch)
3R1	5970	11,9 (12,0)	-466	498 (502)	Querzugbruch
3H1	5820	11,6 (11,6)	-451	482 (486)	Querzugbruch
4H1	6000	12,6 (12,7)	-494	527 (532)	Querzug- +(Biege- bruch)
4R2	5745	12,3 (12,3)	-479	511 (516)	Querzug- +(Biege- bruch)
4R3	5505	11,9 (11,9)	-465	496 (501)	Querzug- +(Biege- bruch)
4H2	5040	>10,4 (10,4)	-406	433 (438)	Biegebruch

1) Der Träger konnte bei der verfügbaren Kolbenlast nicht zu Bruch gebracht werden.

() Werte nach Gl. (1) bzw. (2)

Anlage 19

zum Bericht vom 1.3.71

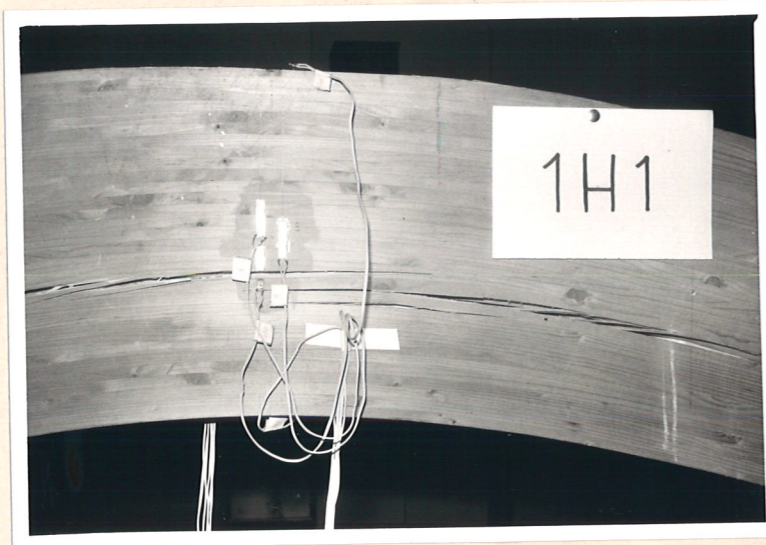


Bild 26

Typischer Quersugbruch an
der Stelle der maximalen
Quersugspannung



Bild 27

Quersugbruch mit Zerstö-
rung der Biegezone

Anlage 20

zum Bericht vom 1.3.71

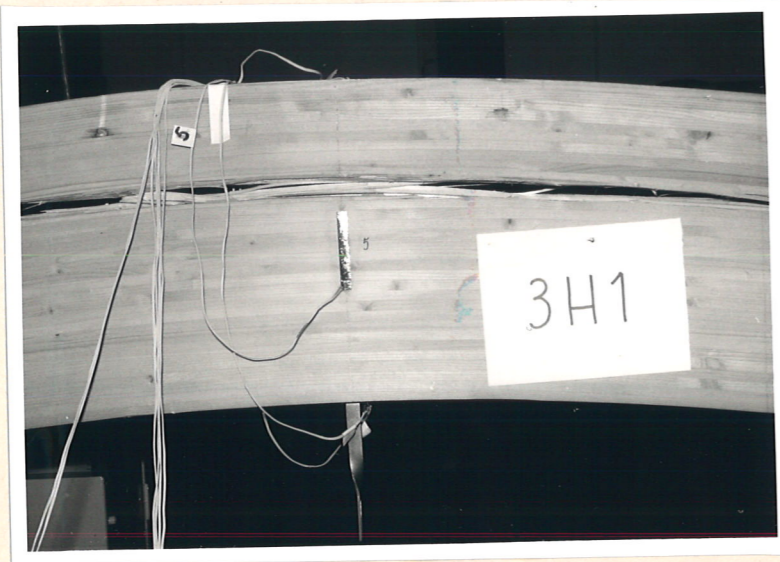


Bild 28

Querzugbruch oberhalb der
Nulllinie

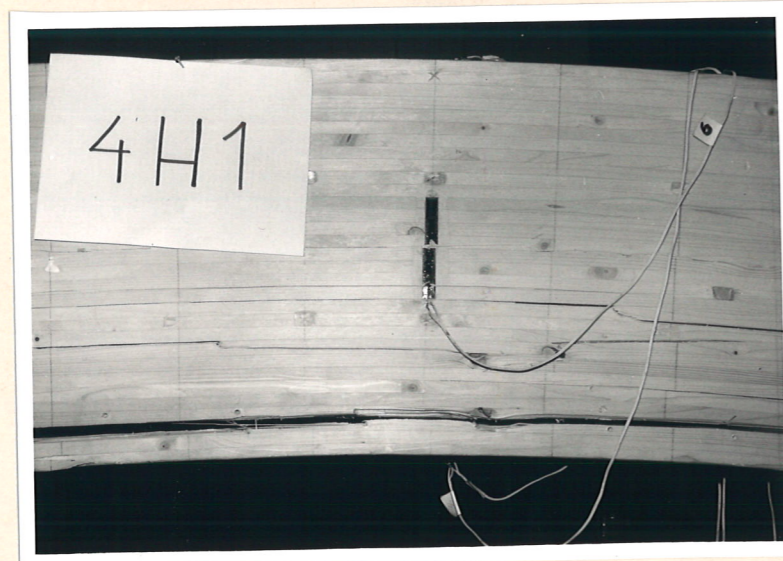


Bild 29

Querzugrisse in der Mitte
und im unteren Trägerteil

Anlage 21

zum Bericht vom 1.3.71



Bild 30

Schubbruch nach voraus-
gegangenem Querkzugbruch

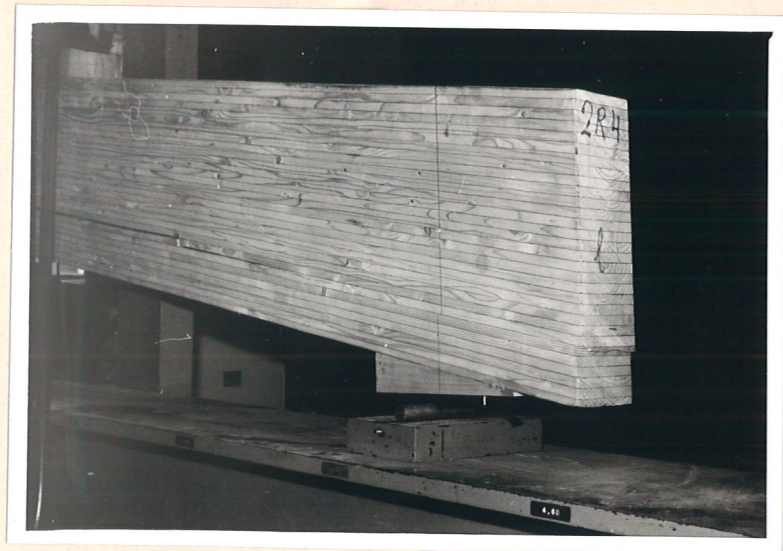


Bild 31

Schubbruch nach voraus-
gegangenem Querkzugbruch

Bild 32 Verlauf der Querdehnungen an der Messstelle 5 beim Bruchversuch des Trägers 3R1

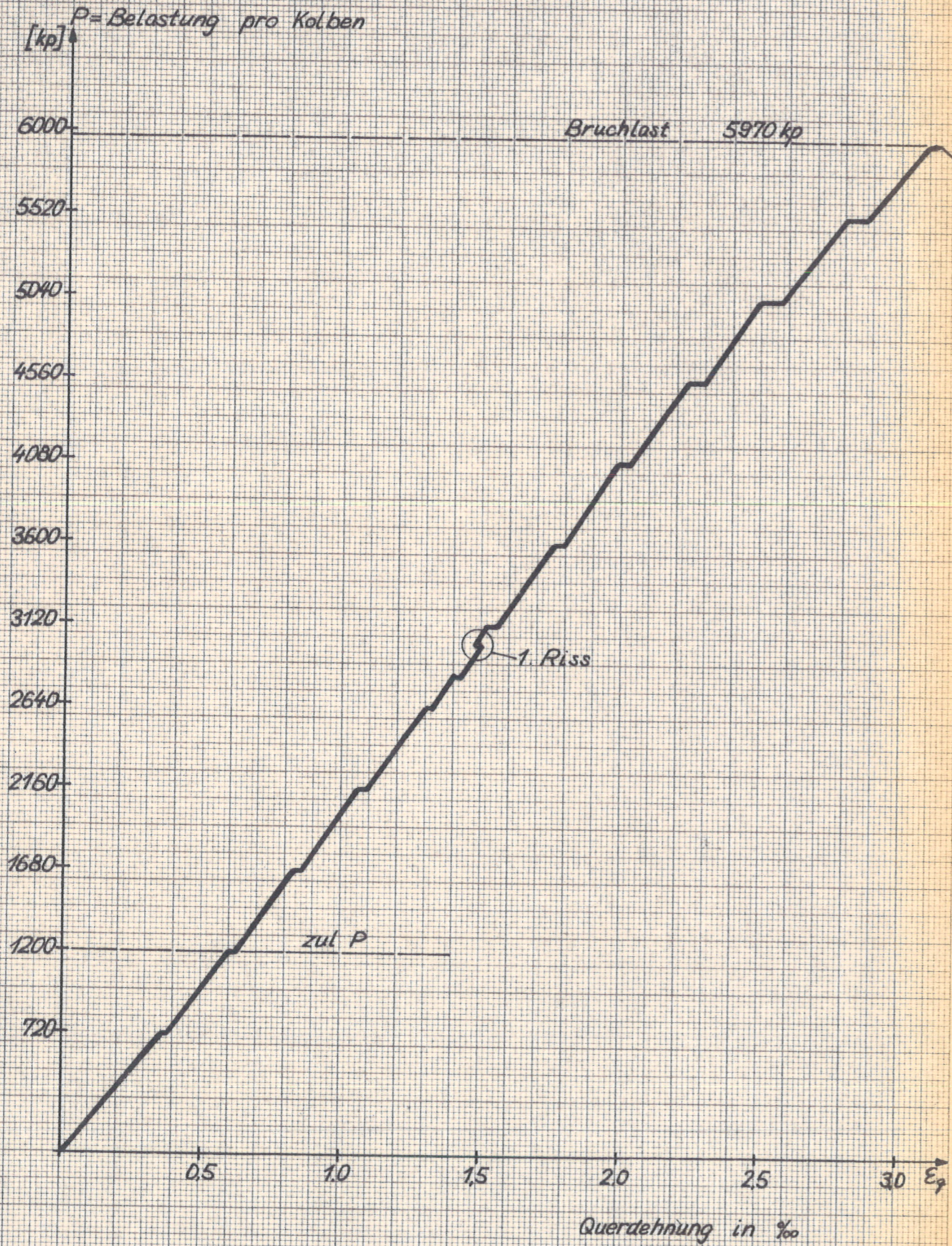
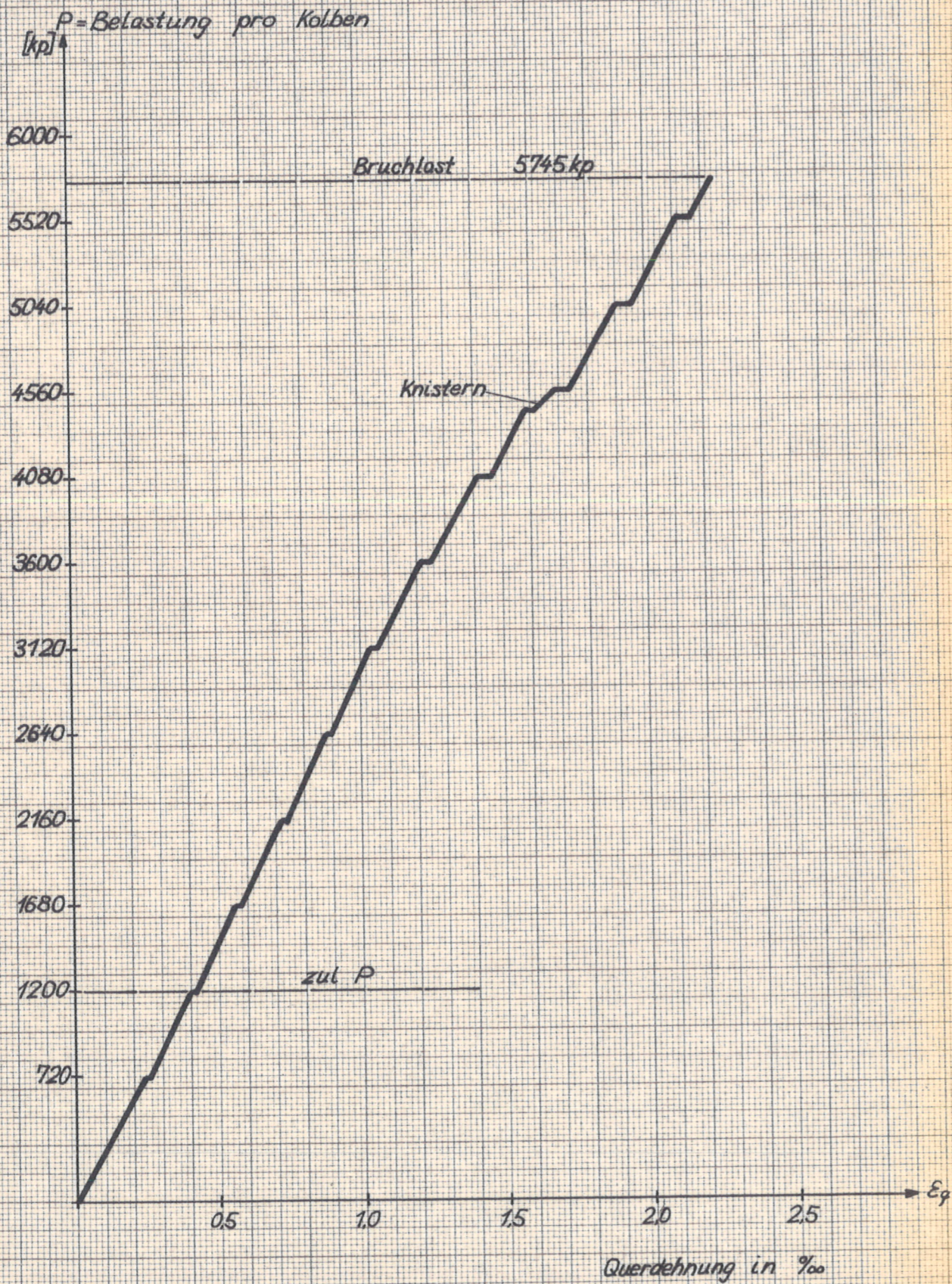


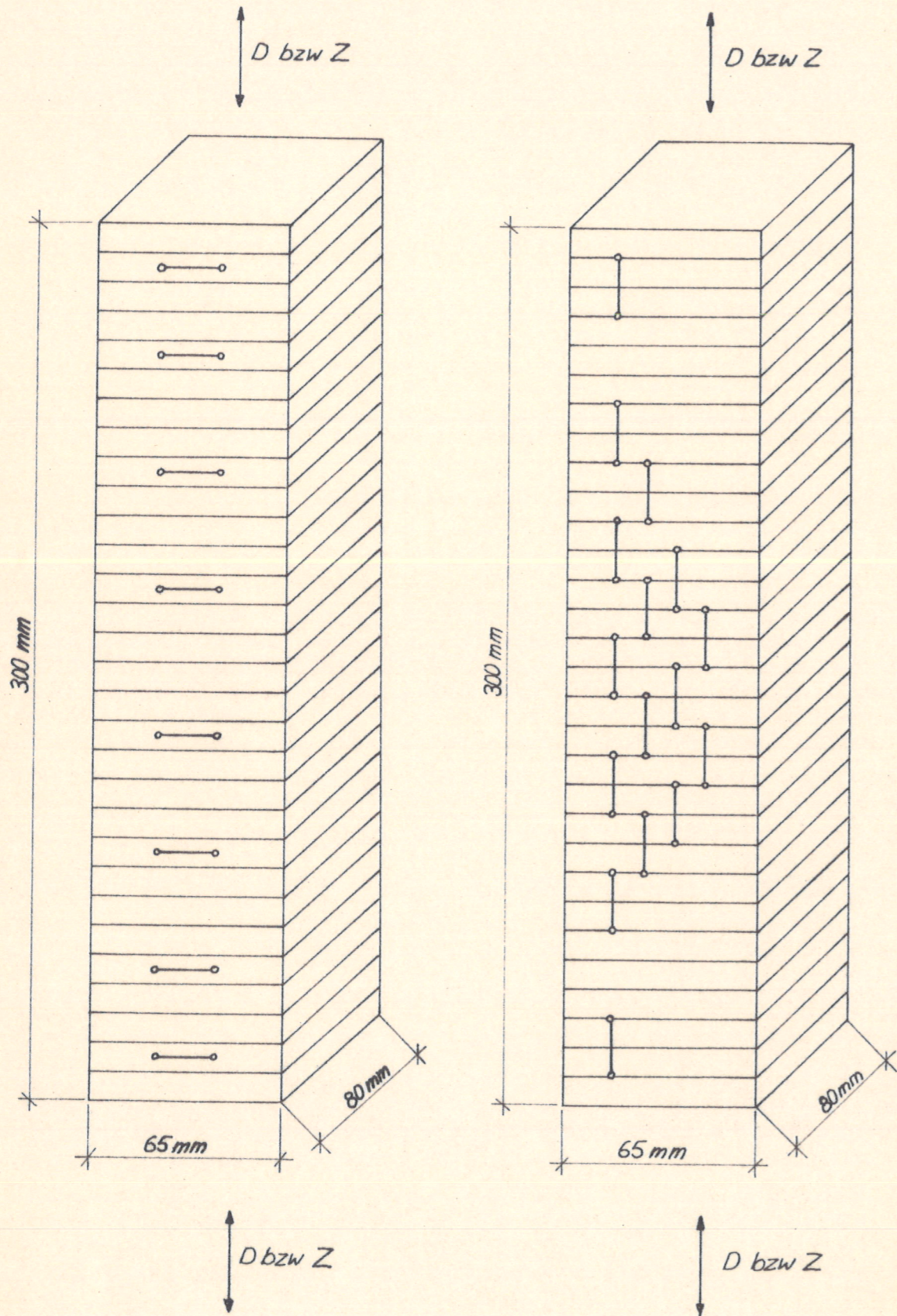
Bild 33 Verlauf der Querdehnungen an der Messstelle 5
des Trägers 4R2



Probekörper zur Bestimmung der „elastischen Konstanten“ s_{33} und s_{23}

Messstellen längs zur Faser

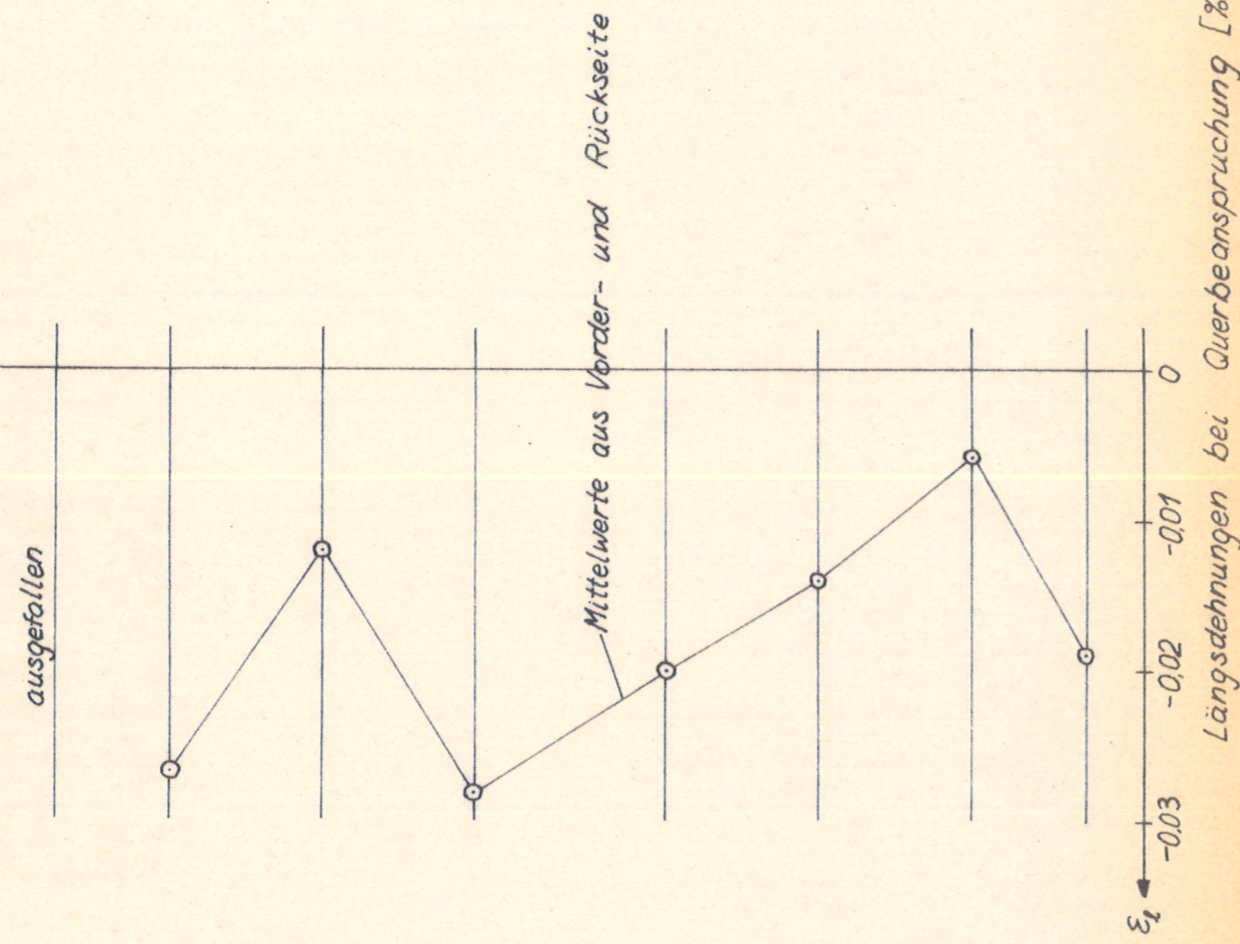
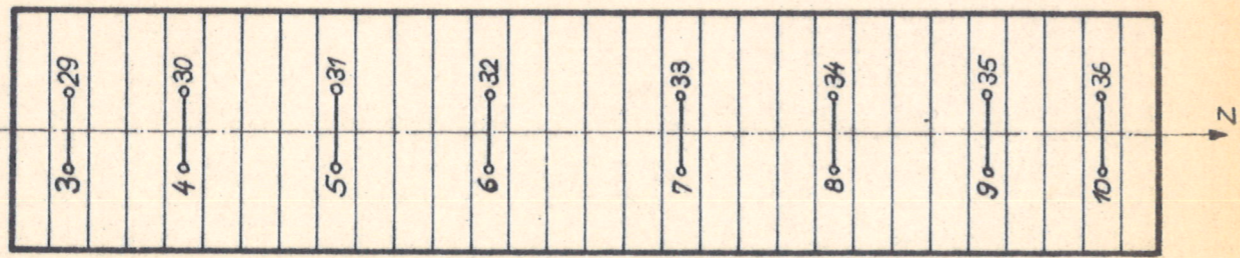
Messstellen quer zur Faser



Dehnungen quer zur Beanspruchungsrichtung bei einer Zugspannung von $\sigma_z = 4,62 \text{ kp/cm}^2$

Anlage 25
zum Bericht vom
1.3.1971

Herausgesägter
Probekörper



Dehnungen längs zur Beanspruchungsrichtung bei einer Zugspannung von 4,50 kp/cm²

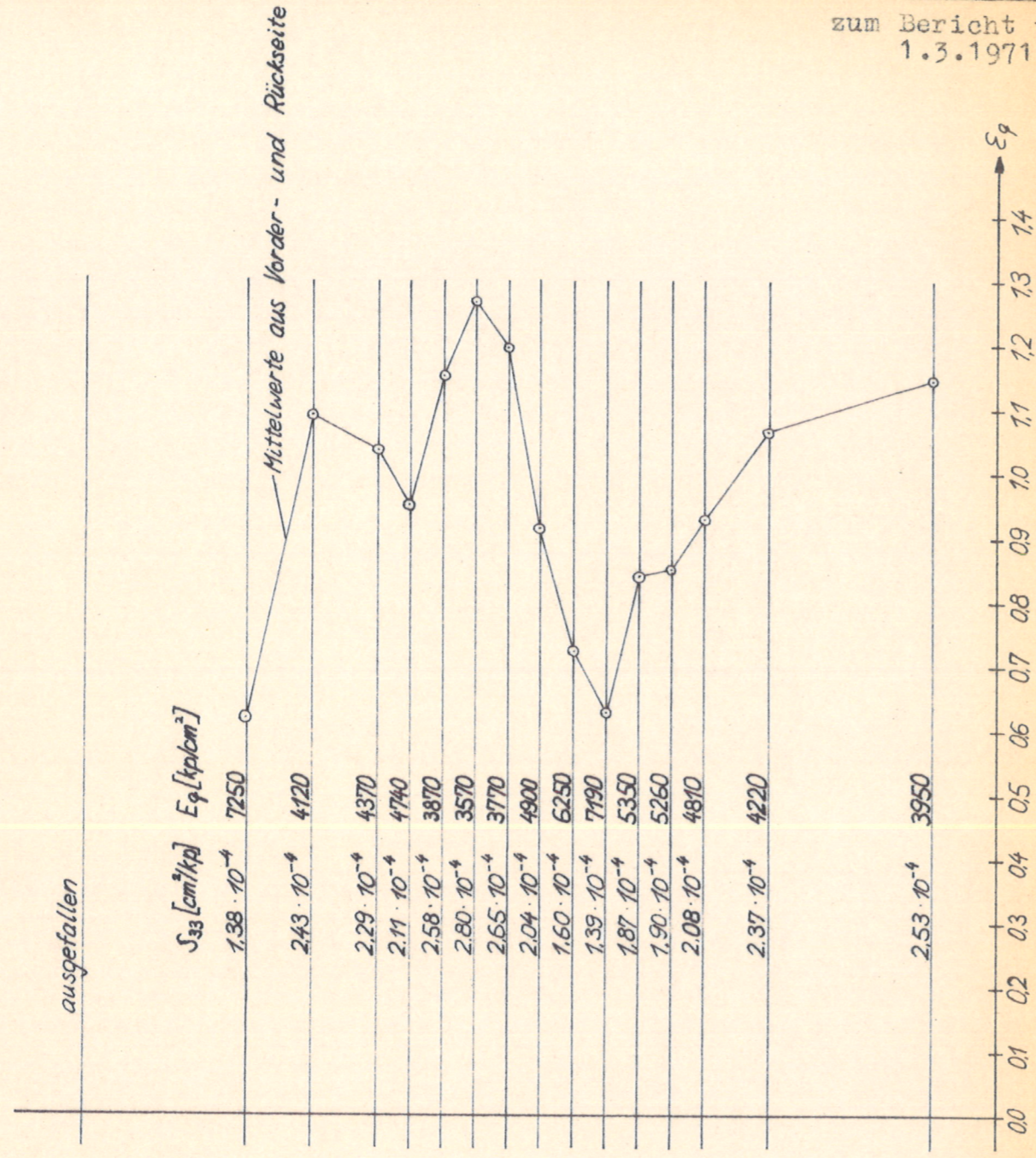
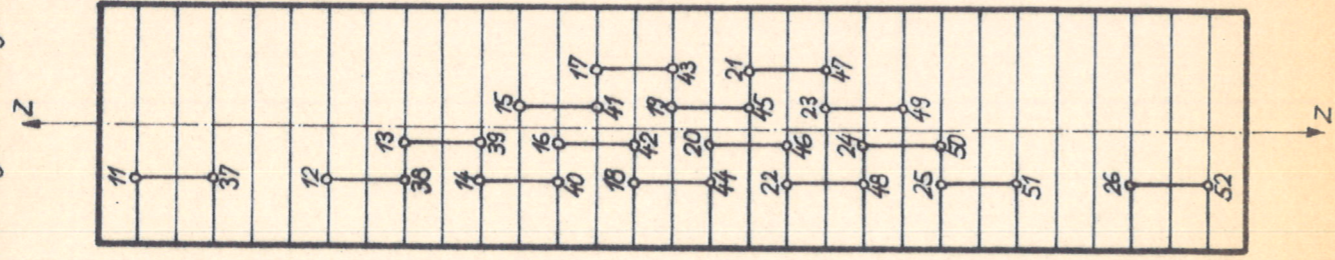


Bild 37

Rechenergebnisse und gemessene Längsspannungen

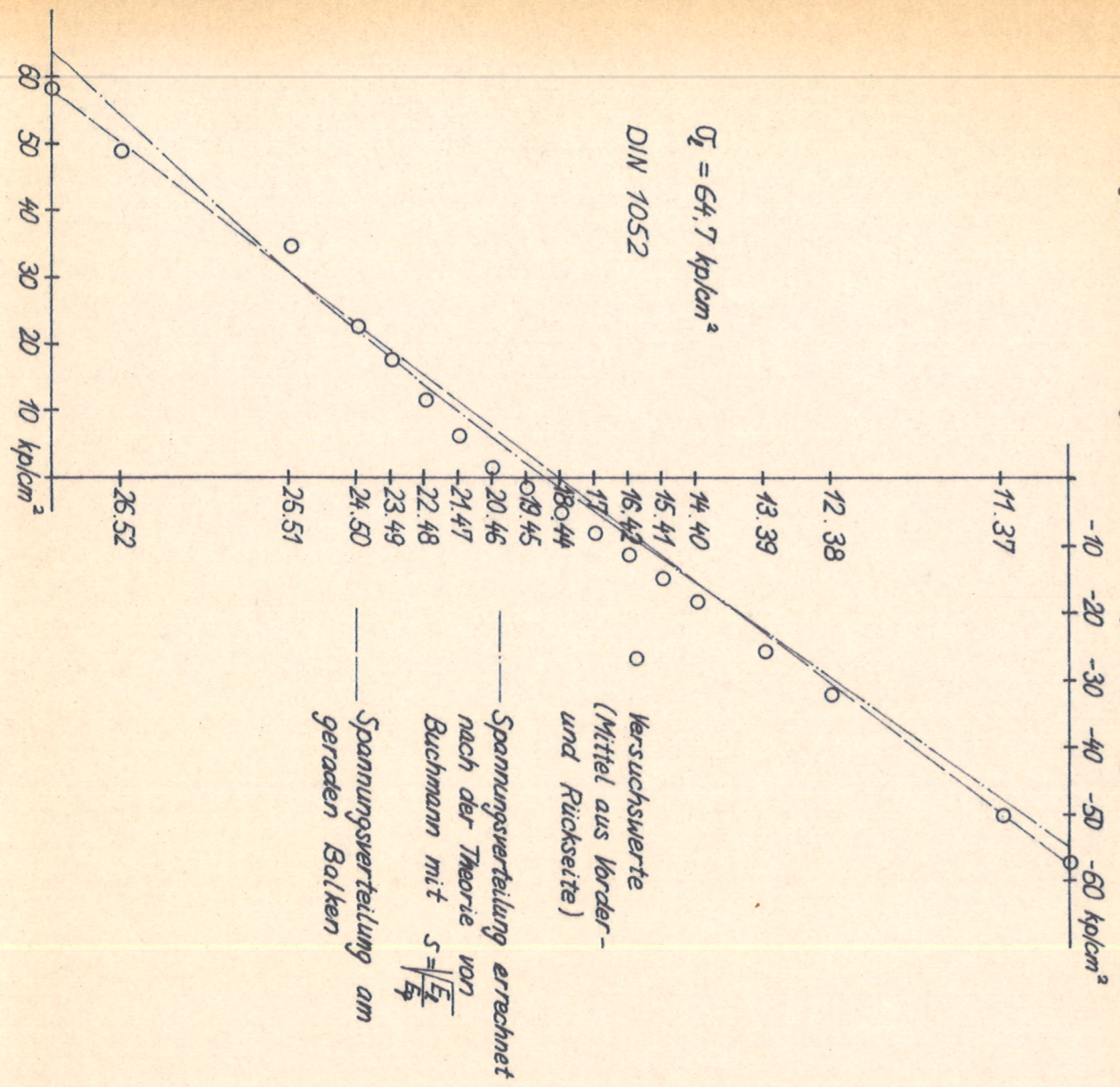


Bild 38

Rechenergebnisse und gemessene Querspannungen

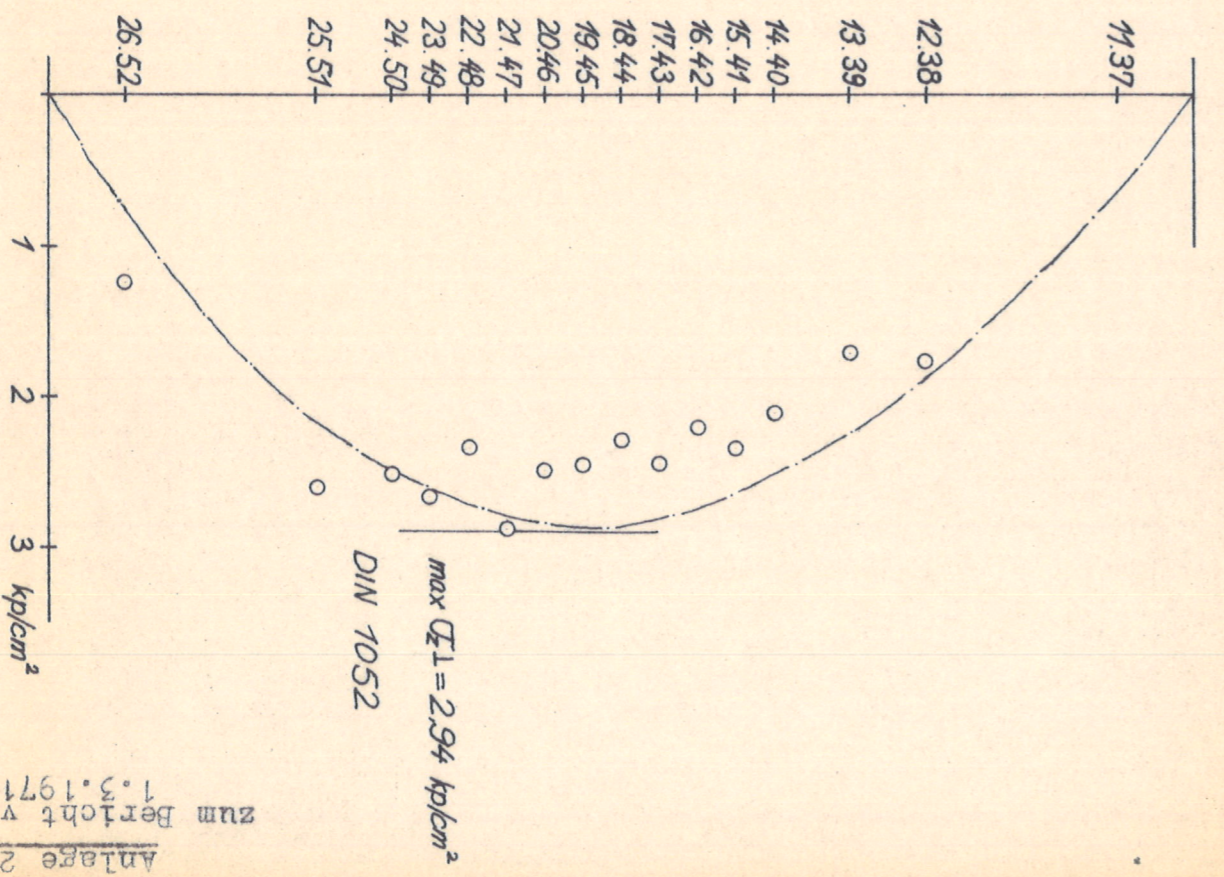


Tabelle 4: Biegeelastizitätsmoduln und
Biegerandspannungen bei zul P.

Trägerbe- zeichnung	tatsächliche Querschnitts- abmessungen		Biege- E-Modul [kp/cm ²]	Biegerandspannungen [kp/cm ²]			
	Höhe [cm]	Breite [cm]		(Messung)		(theoretische W.)	
1	2	3	4	außen 5	innen 6	außen 7	innen 8
1H4	30,4	8,0	129300	-50,7	+ 63,0	-56,2	63,9
1R4	30,0	8,0	128400	-52,9	+ 58,3	-57,7	65,5
1R1	30,5	8,1	164690	-51,9	+ 58,8	-55,1	62,6
1H1	30,9	8,3	121570	-56,0	+ 67,7	-52,4	59,6
2R4	30,0	8,0	125220	-51,8	67,1	-57,7	65,5
2H3	29,9	8,0	136020	-48,4	62,8	-58,1	66,0
2R2	30,0	8,0	128220	-55,6	60,8	-57,7	65,5
2H4	29,7	8,0	124670	-44,6	57,6	-58,8	66,9
3R2	29,8	8,0	160820	-90,7	101,0	-98,7	105,3
3H3	30,0	8,0	144435	-99,4	93,3	-97,4	104,0
3R1	30,4	8,1	137094	-83,5	109,4	-93,6	100,0
3H1	30,5	8,1	155236	-80,4	97,0	-93,0	99,3
4H1	29,8	8,0	138116	-92,3	90,5	-98,7	105,3
4R2	29,6	8,0	124856	-91,8	95,8	-98,0	104,6
4R3	29,6	7,9	125660	-79,0	92,7	-98,7	105,3
4H2	30,1	8,0	109272	-85,0	99,8	-96,7	103,3

Tabelle 7: Statistische Auswertung der Trägerversuche Teil 1
in bezug auf die Querkzugfestigkeit

Versuchsträger Bauart	Anzahl der Träger	Mittel- wert [kp/cm ²]	Variations- koeffizient %	Standard- abwei- chung [kp/cm ²]	Vertrau- ensbe- reich ₂ [kp/cm ²]	5 °/o Fraktile [kp/cm ²]
R = 150 cm e = 100, 50 cm	<u>8</u>	<u>11,6</u>	<u>32,6</u>	<u>3,78</u>	<u>11,6±3,16</u>	<u>4,42</u>
R = 300 cm e = 100, 50 cm	<u>8</u>	<u>11,7</u>	<u>8,13</u>	<u>0,94</u>	<u>11,7±0,79</u>	<u>9,87</u>
R = 150, 300 cm e = 100, 50 cm	<u>16</u>	<u>11,6</u>	<u>22,8</u>	<u>2,66</u>	<u>11,6±1,41</u>	<u>6,96</u>

Werte aus den Querkzugproben aus dem Jahre 1967

Probenquerschnitt 55 x 20 mm

Querkzugproben	<u>405</u>	<u>17,7</u>	<u>27,9</u>	-	<u>17,7±0,5</u>	<u>9,5</u>
----------------	------------	-------------	-------------	---	-----------------	------------

Bei den Versuchsträgern wurde selten über 20°/o Leimbruch festgestellt.

Die Querkzugproben mit 60°/o Leimbruch haben einen Mittelwert von

> 18 kp/cm²

Literaturverzeichnis

- [1] Buchmann: Berechnung polarorthotroper Kreisbogenscheiben konstanter Dicke unter reiner Biegebeanspruchung.
Die Bautechnik 1/1969, S. 27
- [2] Schelling, W.: Berechnung gekrümmter Brettschichtträger mit Biegebeanspruchung.
Bauen mit Holz 1967 Heft 4, S. 158
- [3] Stüssi, F.: Baustatik I, S. 297
Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart