

VERSUCHSANSTALT FÜR HOLZ, STEIN UND EISEN
PRÜFRAUM GABER • TECHNISCHE HOCHSCHULE KARLSRUHE

HEFT 3

STATISCHE UND DYNAMISCHE
VERSUCHE
MIT NAGELVERBINDUNGEN

VON
E. GABER

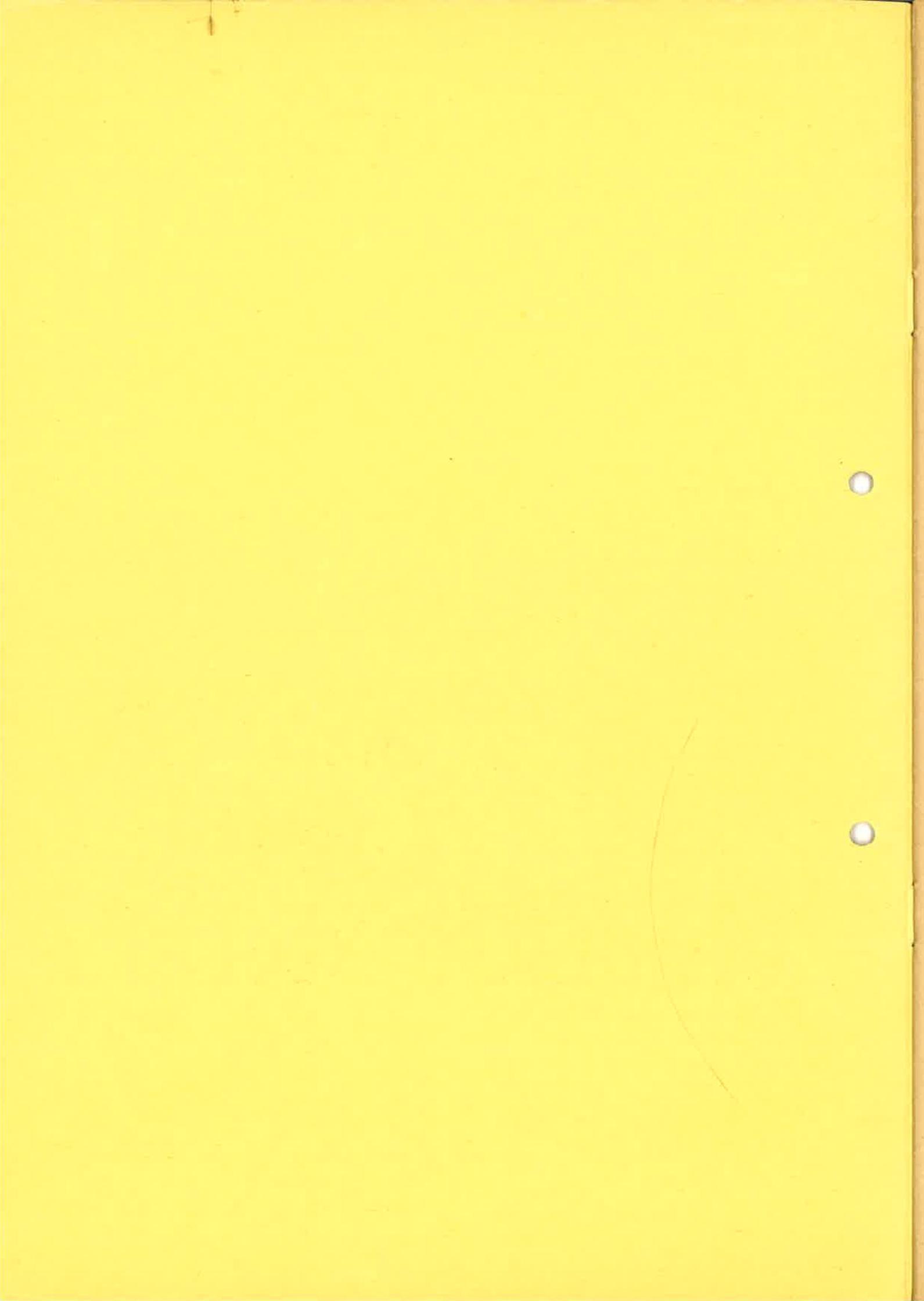


Aufnahme Dr. Burger

Ansicht der neuen Holzhalle der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen mit genagelten Fachwerkbindern aus Bohlen

Arch. Baurat Schmider, Karlsruhe

Karlsruhe 1935



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	3
Teil A: Verhalten von Nagelverbindungen unter statischer Last	5
I. Der Druckstoß	5
II. Die Wirkung des Nagels	10
III. Zusammenwirkung von Leimung und Nagelung	13
IV. Schräganschluß eines zweiteiligen Wandstabes an einen ein- und zweiteiligen Gurt mit einschnittigen Nägeln oder Leim	13
V. Genagelte Biegeträger unter statischer Last	14
VI. Bohlen-Knickversuche	16
VII. Zusammenfassung	17
Teil B: Verhalten von Nagelverbindungen unter dynamischer Last (Schwellast)	19
Teil C: Dynamische Versuche mit genagelten vollwandigen Biegeträgern	22
Teil D: Ergänzungsversuche	29
1. Der Einfluß der Holzfeuchtigkeit auf die Tragkraft und Steifig- keit der Nagelverbindungen	29
2. Das Schwinden von naßgenagelten Bohlen	30
3. Der Einfluß der Nagelschlankheit	30
4. Nageldichte	31
5. Schwächung der Druckfestigkeit von Bohlen durch Nagelung oder Bohrung	31
6. Versuche über den besten Randabstand eines Nagels	32
Teil E: Ergebnisse der Versuche von Stoy	33
Teil F: Schlußfolgerungen aus unseren Versuchen	33



Innenansicht der neuen Holzhalle der Versuchsanstalt mit der liegenden 20-t-Maschine, auf welcher die Versuche mit den genagelten Bohlen durchgeführt wurden.

Einleitung.

Im Laufe des letzten Jahrhunderts haben fast alle Zweige des Baugewerbes einen starken technischen Aufschwung erlebt, weil man die wissenschaftliche Forschung rechtzeitig in ihren Dienst gestellt hat. Von dem mit dem Holz verbundenen Baugewerbe kann man dies nicht in dem gleichen Maße sagen. Es ist offenkundig, daß z. B. die stahlverarbeitende Industrie und auch der Eisenbetonbau das Holz langsam auch auf solchen Gebieten des Bauwesens stark zurückgedrängt haben, wo es ohne Zweifel als Baustoff den anderen künstlichen Stoffen wie Stahl, Beton, Eisenbeton von Haus aus überlegen ist. Mit dem Hinweis auf eine sog. Zeitströmung allein ist diese Tatsache nicht erklärt. Der tiefere Grund liegt darin, daß gerade die Stahl- und Zementindustrie und alle, welche Stahl oder Zement verarbeiten, in den letzten Jahrzehnten unter Aufwendung bedeutender Mittel ihre Baustoffe und Konstruktionen wissenschaftlich durchforscht und in hohem Maße vervollkommen haben.

Erst von dem Augenblick ab, wo zu der erprobten handwerklichen Kunst noch die mathematisch durchgebildete Ingenieurkunst beim Holzbau trat, begann eine Fortentwicklung der Holzkonstruktionen und vor allem der Holzverbindungen.

Die alten Bolzenverbindungen mit verhältnismäßig dünnen und langen Bolzen sind für stark beanspruchte Holzkonstruktionen zu weich und daher ungeeignet. Werden die Bolzen dicker, so schwächen ihre Löcher die Tragteile empfindlich. Durch Einführung von Dübeln, Krallenplatten u. dgl. wurde dieser Mißstand etwas gemildert, aber keineswegs beseitigt. Die ideale Verbindung soll den Holzquerschnitt nicht schwächen. Die Fortentwicklung des Leimes, die bald auch den wasserfesten Leim als Verbindungsmittel für der Witterung ausgesetzte Holzkonstruktionen zu wirtschaftlichen Bedingungen zur Verfügung stellen wird, vergrößert die Möglichkeit der Verwendung von vollwandigen, also biegefesten Holzträgern. Von gewissen Stützweiten ab aber bleibt nun die gegliederte Fachwerkkonstruktion die richtige, steife und wirtschaftliche Trägerart. Bei ihr wird der Leim vielleicht nur an untergeordneten Stellen, als Verbindungsmittel zusammengesetzter Druckstäbe u. dgl., Vorteile bringen. Hier wird man also zu einer Fortentwicklung der Bolzenverbindungen greifen müssen. Es muß aber erreicht werden, diese Verbindung steifer zu machen und die Berührungsfläche zwischen Stahl und Holz zu vergrößern, ohne das Holz zu schwächen. Ein Weg zur Erreichung dieses Zieles besteht darin, daß man den massiven Bolzen in eine gleichwertige Anzahl von Nägeln auflöst. Bei gleichem Gewicht der Nägel wie des Bolzens vergrößern sich die Berührungsflächen zwischen Stahl und Bolzen ganz bedeutend: Dem 30 mm Bolzen

gewichtsgleich sind 25 Nägel mit 6 mm Durchmesser. Diese haben aber die $\frac{30}{6} = 5$ fache Berührungsfläche mit dem Holz, also bei gleicher Last nur den fünften Teil des Lochleibungsdruckes des Bolzens. Die auseinandergezogene Nagelverbindung erhöht mit aus diesem Grund die Steifigkeit der Verbindung. Der eingeschlagene Nagel braucht keine Bohrarbeit, verdrängt nur die Holzfasern und schwächt weniger den Holzquerschnitt. Das Fortfallen der Bohrarbeit, des Einpassens der Dübelverbindungen u. dgl. verbilligt und beschleunigt die Arbeit. Zu den genagelten Holzverbindungen müssen weitgehend Bohlen und Bretter herangezogen werden. Bei Brettern ist man aber freier in der Querschnittsgestaltung und kann leichter und billiger zu großen Querschnitten übergehen als bei Verwendung von Balken. Der seit Jahrtausenden bekannte und angewandte Nagel ist in Wahrheit ein vorzügliches Verbindungsmittel für Holzkonstruktionen. Seine richtige Verwendung setzt aber die genaue Erforschung seiner Festigkeit, Tragkraft und Wirkungsweise voraus.

Der allgemeinen Verwendung des Leimes steht der bis heute noch nicht ganz behobene Mißstand im Wege, daß die Leimfestigkeit durch Feuchtigkeit erheblich leidet. Unsere Versuche mit Doppelkörpern¹⁾ mit einigen handelsüblichen Leimen haben folgendes Bild ergeben:

Leimsorte	Leimfestigkeit in kg/cm^2		Zeit der Wasserlag. in St.
	lufttrocken	n. Wasserlag.	
Synthetisch	34	22	720
Kasein 1	14	5	54
Kasein 2	24	2	24

Jede Konstruktion muß von Anfang an Rücksicht nehmen auf den zu verwendenden Baustoff und die vorgesehenen Verbindungsmittel. Es ist daher selbstverständlich, daß eine genagelte Bretterverbindung anders gestaltet werden muß als z. B. ein Tragwerk aus Kantholz. Die dünnen Bretter gestatten eher exzentrischen Anschluß der Wandstäbe, die zahlreich werden sollen, damit die von den Nägeln zu übertragende Einzelstabskraft klein bleibt, und die im wesentlichen Zugstäbe sein müssen.

*

Der Wettbewerb für eine ganz aus Holz geplante Markthalle gab uns 1932 eine willkommene Gelegenheit für den Entwurf eines Musterbeispiels einer genagelten Holzkonstruktion. Dazu brauchten wir aber genaue zahlenmäßige Unterlagen für die Festigkeitsberechnung, die wir uns in der meinem Lehrstuhl angegliederten Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen durch umfangreiche und planmäßige Versuche gewonnen haben.

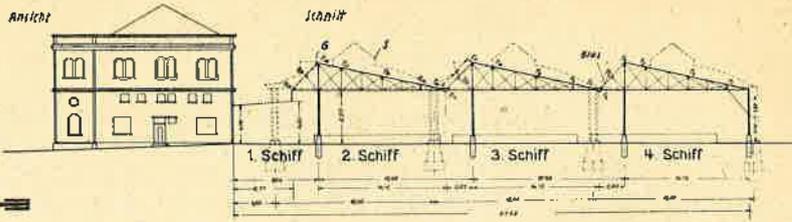
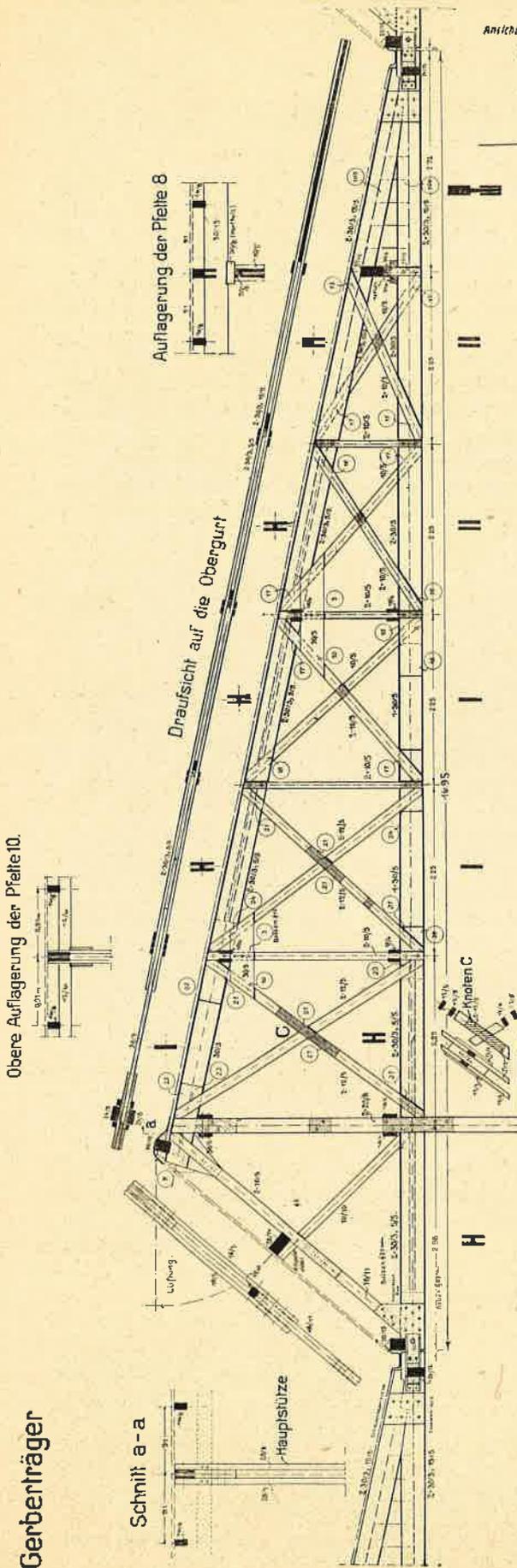


Abb. 1. Entwurf einer Markthalle aus Holz. Hallenquerschnitt. Der städtische Entwurf mit massivem Unterbau ist gestrichelt eingezeichnet. Der Entwurf aus genagelten Bohlen läßt nur Nordlicht in das Halleninnere.

Sie wurden dann in mancher Hinsicht erweitert und vor allem auf das Verhalten von Nagelverbindungen unter wechselnder Last, also im Holzbrückenbau, ausgedehnt.

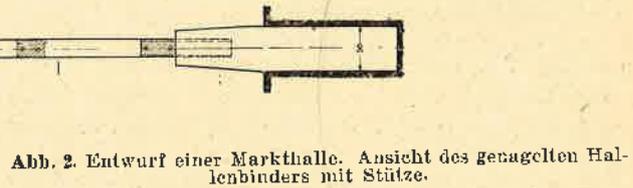
Der Leim ist ohne Zweifel ein für Bohlen besonders geeignetes Verbindungsmittel, da er Kräfte über eine ganze Berührungsfläche verteilt überträgt — allerdings nur an der Oberfläche des Holzes, im Gegensatz zum Nagel, welcher die Kräfte auch ans Holzinnere abgibt. Man untersuchte in diesem Zusammenhange daher auch die Möglichkeit gleichzeitiger Verwendung von Leim und Nägeln.

Bei Anlage und Durchführung der Versuche machte sich mein Betriebsleiter, Herr Dr.-Ing. Hoeffgen, sehr verdient. Dem deutschen Fachauschuß für Holzfragen bin ich dafür dankbar, daß er einen Großteil dieser Druckkosten übernahm. Die Karlsruher Hochschulvereinigung stiftete namhafte Beträge für die Arbeiten.

Wenn auch die Untersuchungen über genagelte Holzverbindungen in unserer Versuchsanstalt weitergehen und gerade jetzt wieder eifrig betrieben werden, so soll doch über diese ersten, zum Teil 3 Jahre alten Arbeiten heute berichtet werden, damit sie bei der Herausgabe von amtlichen Berechnungsvorschriften als Unterlagen mitbenützt werden können.

Karlsruhe, im Frühjahr 1935.

Dr.-Ing. E. Gaber.



Teil A

Verhalten von Nagelverbindungen unter statischer Last.

Übersicht über die Versuche.

Das Holz wird beim Nageln mehr geschont als beim Bohren, da die Holzfasern nicht zerstört, sondern zur Seite gedrängt werden. Am besten wird der zweischnittige Nagel ausgenützt. Bei mehreren Brettlagen lassen sich aber einschnittige Nägel nicht vermeiden, denn lange Nägel müßten, wegen der Knickgefahr beim Einschlagen, so dick werden, daß das Holz zu spalten droht.

Bei der Entwurfsbearbeitung für die Holzmarkthalle ergaben sich folgende Versuchsreihen:

1. Es wurde zunächst der unmittelbare Anschluß eines einteiligen Stabes an einen zweiteiligen untersucht, ein Fall, wie er an einem solchen Stoß auftritt, wo die zweiteilige Fachwerkgurt in eine einteilige übergeht. Zur Vereinfachung wurde die Verbindung nicht gezogen, sondern gedrückt.
2. Es wurde der schräge Anschluß eines gedrückten Wandstabes an eine starke Gurt beobachtet.
3. An zusammengesetzten Biegeträgern wurde das Verhalten der ganzen Konstruktion beobachtet und die Bruchlast gemessen.
4. Ein zusammengesetzter Druckstab von rd. 2,20 m Länge wurde auf sein Verhalten beim Knicken beobachtet und der Einfluß des Stabendenanschlusses festgestellt.
5. Es wurde an Nägeln mit verschiedenen Köpfen der Widerstand gegen Herausziehen aus dem Holz gemessen.
6. Ferner wurde der Widerstand des Holzes gegen das Einpressen von Nagelschäften durch hohen Lochleibungsdruck ermittelt.

I. Der Druckstoß.

Die Abmessungen der genagelten Versuchsstücke gehen aus Abb. 3, 4 hervor. Ein Mittelholz war jeweils symmetrisch mit solcher Länge an zwei Seitenhölzer angeschlossen, daß die gewählte Anzahl zweischnittiger Nägel gut untergebracht werden konnte. Die Bohlen hatten breite und sauber bearbeitete Stirnflächen und alle Seitenflächen waren gehobelt, um die gewollten Dicken zu erhalten.

Bei manchen Versuchen wurde der überstehende Nagelschaft quer zur Faserrichtung umgeschlagen, bei anderen Versuchen aber ein vernieteter Nagel probiert, der dadurch entstand, daß nach dem Einschlagen

- a) über den hervorstehenden Nagelschaft ein Unterlagsplättchen mit 4,5/10 mm Durchmesser und 1 mm Stärke geschoben und mit dem Locheisen leicht ins Holz getrieben wurde,
- b) der überflüssige Teil des Nagelschaftes nun kurz über der Unterlagsscheibe mit der Reißzange abgezwickt wurde,

Das Holz und die Nägel.

Die Bohlen aus einheimischer Tanne oder Fichte wurden als gehobelte Schreinerware möglichst fehlerfrei aus einem großen, gedeckt gelagerten Vorrat des Holzhändlers herausgesucht, waren 4,5 m lang, 28,5—30,0 cm breit und in ungehobeltem Zustande 3,0—5,8 cm stark. Nach der Anfuhr wurden sie in geheiztem Arbeitsraume gelagert. Die Normendruckfestigkeit des Holzes betrug 350 bis 490 kg/cm² bei 15—11 % Feuchtigkeit. Das Holz war etwa zimmertrocken bei den Versuchen.

Die Nägel üblicher Handelsqualität mit einem Durchmesser von 3,8, 4,2 oder 4,6 mm, hatten eine Zugfestigkeit des Stahles von 62—78 kg/mm², wiesen aber ziemlich bedeutende Unterschiede im Durchmesser auf:

Liste 3.

Abmessungen und Zerreißfestigkeit der Nägel.			
Nennmaße der Nägel in mm	gemessener Durch- messer in mm	Zugfestigkeit in kg/mm ²	
4,6/100	4,47	61,8	} 64,3
	4,65	65,6	
	4,43	65,6	
4,2/100	4,22	69,7	} 66,3
	4,06	63,3	
	4,15	65,9	
3,8/100	3,75	74,2	} 74,3
	3,78	78,3	
	3,76	70,3	

Die Zugfestigkeit war beim dünnen Nagel größer als beim dicken. Sie wird in der Konstruktion freilich nicht ausgenützt.

c) der Schaftstumpf mit der Finne eines kleinen Hammers durch zahlreiche Schläge zu einem zweiten Nagelkopf geformt wurde (genieteter Nagel).

Für Herstellung eines Nagelbildes mit 43 zweischnittigen Nägeln wurden folgende Zeiten gebraucht:

Anreißen, Nageln u. Umschlagen 11—15 Minuten
Anreißen, Nageln, Abschneiden,
Unterlagsscheibe einbringen und
vernieten 38—50 Minuten.

Der Zeitaufwand für genietete Nägel ist also mindestens doppelt so groß als für umgeschlagene,

Das Nagelbild.

Es wurde zunächst ausprobiert, mit welchen kleinsten Abständen sich Nägel ohne Spaltgefahr einschlagen lassen, und dazu trockenes Holz mit etwa 11—15% Feuchtigkeit verwendet, das also recht spröde war und sich sicher ungünstiger verhalten mußte als das übliche nicht so ausgetrock-

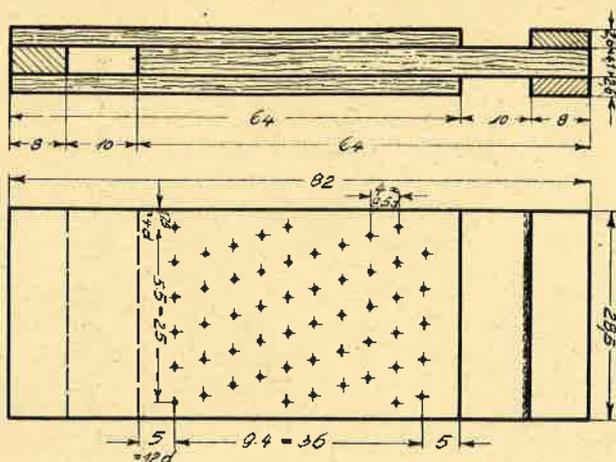


Abb. 3. Ansicht eines normalen Druckstoßes für den Versuch.

nete Bauholz. Die in Abb. 3, 4 gezeigten Nagelbilder mit Anordnung in schrägen Geraden haben sich im allgemeinen als zweckmäßig erwiesen. Als Mindestnagelabstände wurden dabei wie folgt gewählt:

- In Faserrichtung 10 d.
- Quer zur Faserrichtung . . . 12 d.
- Randabstand in Faserrichtung . . 12 d.
- Randabstand quer zur Faser. . . 6 d.

Hin und wieder traten bei der fortschreitenden Austrocknung der fertig genagelten, aber noch nicht geprüften Versuchskörper im geheizten Arbeitsraum besonders bei Kernbohlen Risse auf, wenn die Richtung der Jahresringe mit der Lage der Nägel zusammenfiel. Solche Holzröckrisse setzen aber weder die Festigkeit der Verbindung noch die erreichbare Höhe des Lochleibungsdruckes im Holz merklich herab.

Die Versuchsstücke wurden in eine liegende, handbetriebene 20 t-Universal-Prüfmaschine eingespannt und stufenweise auf Druck, unter jeweiliger Entlastung, bis zum Bruch beansprucht. Die Laststufen waren dabei so gewählt, daß von Stufe zu Stufe eine Erhöhung des Lochleibungsdruckes durch die Nägel im Mittelholz etwa von 25 zu 25 kg/cm² erfolgte. Zu den einzelnen Laststufen wurden mit Hilfe von zwei in der Stoß-

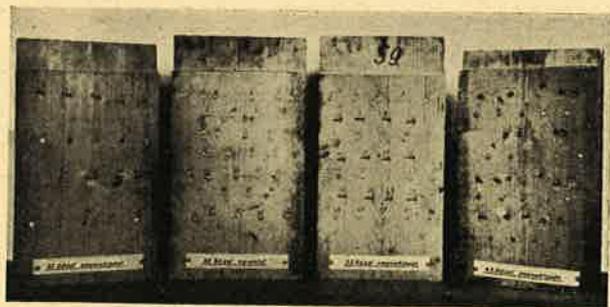


Abb. 4. Vier Druckstoße nach Erschöpfung ihrer Tragkraft in der Reihenfolge von links nach rechts:
1. Körper mit 20 umgeschlagenen Nägeln.
2. mit 32 vernieteten Nägeln.
3. Körper mit 32 umgeschlagenen Nägeln.
4. Körper mit 43 umgeschlagenen Nägeln.

mitte an den Schmalseiten der Bretter angebrachten Meßuhren die Verschiebungen der beiden Seitenhölzer gegen das Mittelholz mit einer Meßgenauigkeit von 1/100 mm ermittelt. Um den sich einstellenden Formänderungen Zeit zur vollen Ausbildung zu lassen, wurde zu jeder Be- und Entlastung eine genaue Zeitspanne eingehalten, welche beim Belasten betrug: 30 sec nach der ersten Laststufe und jeweils 15 sec mehr bei jeder folgenden Laststufe. Nach dem Entlasten wurde die Hälfte der Zeit wie beim vorhergehenden Belasten zugewartet. Die Messungen wurden im allgemeinen bis zu 10 mm Verschiebung durchgeführt, darauf die Meßuhren abgebaut und die Versuchskörper weiter belastet, wobei zu der Höchstlast noch die Bruchverschiebung gemessen wurde.

Die Abhängigkeit zwischen Verschiebung im Stoß und Leibungsdruck.

Abb. 5 bis 10.

Mit Hilfe von Meßuhren wurden die Beziehungen zwischen dem rechnerischen Lochleibungsdruck σ_1 der Nägel im Mittelholz und den zugehörigen Verschiebungen δ der Seitenhölzer gegen das Mittelholz gefunden. Die Verschiebung δ wurde als Mittel aus den beiden an den Schmalseiten gemessenen Werten errechnet. Der Lochleibungsdruck wurde berechnet aus $\sigma_1 = \frac{P}{n \cdot d \cdot a}$

- P = Last in kg,
- n = Anzahl der Nägel,
- d = Nageldurchmesser in cm,
- a = Stärke des Mittelholzes in cm.

Das allgemeine Verhalten der Stoßverbindung.

Jede gezeichnete Linie bedeutet das Mittel aus mindestens zwei mit gleichen Körpern parallel durchgeführten Versuchen.

Der Charakter aller Spannungs-Verschiebungslinien ist ziemlich gleich; anfänglich wächst die Verschiebung des Mittelholzes gegen die beiden Seitenhölzer annähernd in gleichem Maße wie die Druckkraft. Bei höherem Druck erst wachsen die Verschiebungen rascher als der Druck ansteigt, um schließlich in einen Zustand zu gelangen, wo sie wieder gleichmäßig zunehmen, nur daß die Verbindung erheblich weicher geworden ist als am Anfang der Belastung.

Ein Zustand, bei dem sich plötzlich die Tragkraft der Nagelverbindungen ändert, also ähnlich dem Fließen, wie es bei Stahluntersuchungen auftritt, zeigt sich in keinem Falle.

Der zulässige Leibungsdruck bei statischer Last.

Im allgemeinen wird aus einer gegenseitigen Verschiebung von 1,5 mm der Holzverbindungen auf die Größe der zulässigen Belastung geschlossen. In allen Abbildungen stehen daher die Werte für Nagelleibungsdruck σ_1 zul. im Mittelholz bei einer Verschiebung von 1,5 mm des Mittelholzes gegen beide Seitenhölzer.

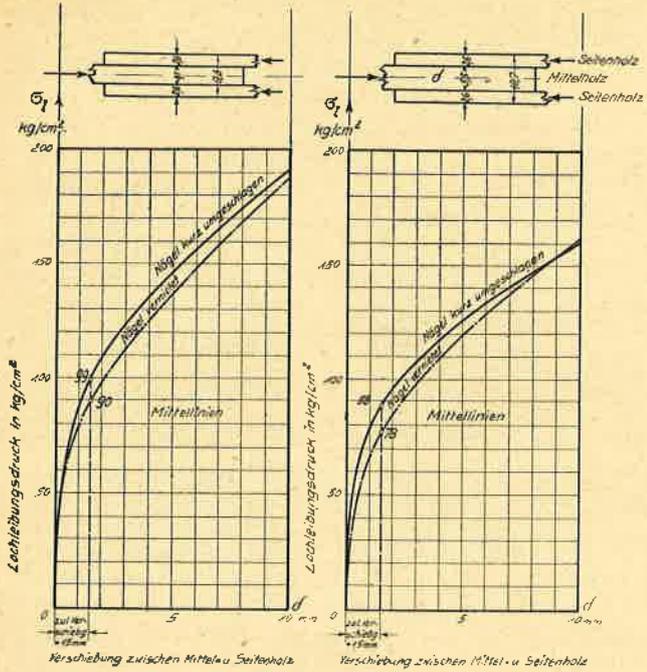


Abb. 5.

Abb. 6.

Abb. 5. Spannungsverschiebungslinien bei umgeschlagenen und vernieteten Nägeln beim dünnen Mittelholz.

Abb. 6. desgl. beim dicken Mittelholz.

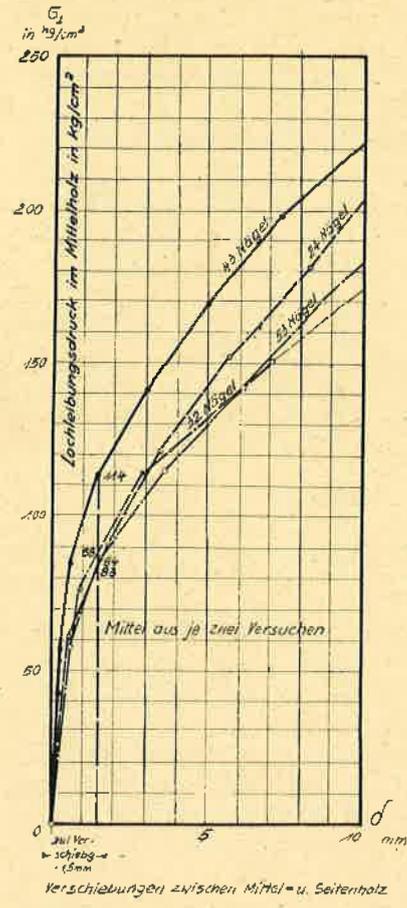


Abb. 7. Spannungsverschiebungslinien bei verschiedener Zahl der umgeschlagenen Nägel.

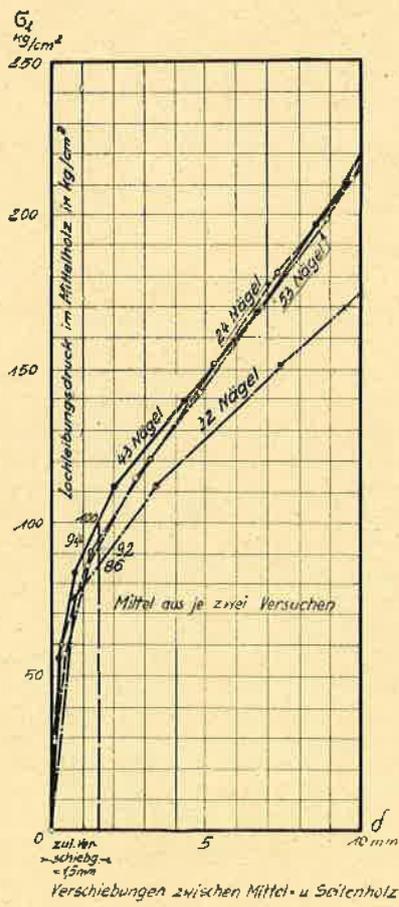


Abb. 8. Spannungsverschiebungslinien bei verschiedener Zahl der vernieteten Nägel.

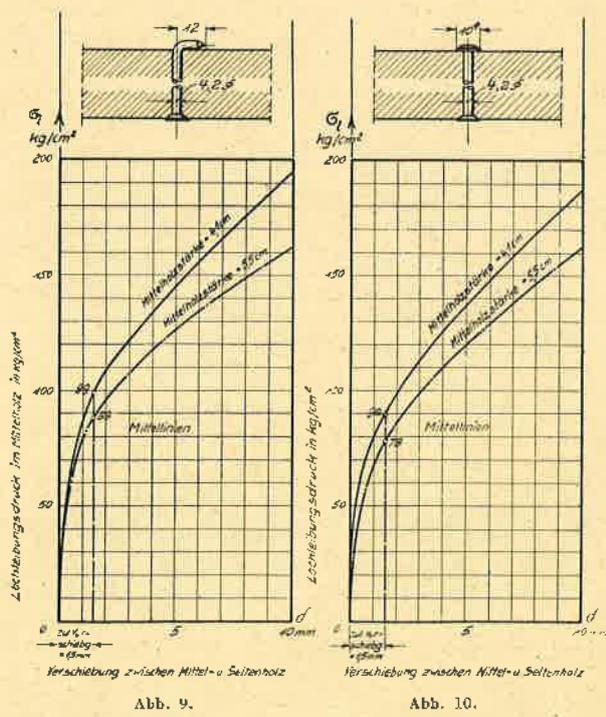


Abb. 9.

Abb. 10.

Abb. 9. Spannungsverschiebungslinien bei kurz umgeschlagenen Nägeln beim dünnen und dicken Mittelholz.

Abb. 10. desgl. bei vernieteten Nägeln.

4,1 cm Mittelholz, Nagel 4,2 mm ø				
Zahl der Nägel	24	32	43	53
Vernietete Nägel				
zulässiges σ_1	94	86	100	92 kg/cm ²
Umgeschlagene Nägel				
zulässiges σ_1	84	88	114	83 „
Schlankheit	9,8	9,8	9,8	9,8
5,5 cm Mittelholz, Nagel 4,2 mm ø.				
Zahl der Nägel		32	43	
vernietete Nägel σ zul.		72	87	kg/cm ²
umgeschlagene Nägel σ zul.		89	85	„
Schlankheit		13	13	
4,1 cm Mittelholz, Nagel 4,6 mm oder 3,8 mm ø.				
Zahl der Nägel		40	52	
Nageldurchmesser		4,6	3,8	mm
Lochleibungsfläche		75,5	81,0	cm ²
Umgeschlagene Nägel σ_1 zul.		128	108	kg/cm ²
Schlankheit		9	10,8	

Die Frage nach der Sicherheit gegen Bruch bleibe hier zunächst unberücksichtigt.

Einfluß der Art der Nagelung (Abb. 5, 6).

Die umgeschlagenen Nägel verhalten sich im Lochleibungsdruck bei 4,1 cm starkem Mittelholz um 10%, bei 5,5 cm starkem Mittelholz sogar um 13% günstiger als die genieteten Nägel. Dieses zunächst unerwartete Ergebnis erklärt sich daraus, daß beim Umschlagen des überstehenden Nagelschaftes eine Zugspannung im Nagel entsteht, welche die Hölzer aneinander preßt und so eine günstige Reibung zwischen Holz und Holz erzeugt. Beim Vernieten des Nagels dagegen wird durch die zentrischen Hammerschläge eher eine Lockerung anstelle eines Zusammenpressens der verbundenen Teile erzeugt. Die Klemmwirkung des Nagels geht dabei zunächst verloren.

Anders verhalten sich aber die genieteten Nägel, wenn man die Tragkraft ins Auge faßt. Der genietete Nagel hat unter sonst gleichen Umständen bei 5,5 cm starkem Mittelholz eine um 16%, bei 4,1 cm starkem Mittelholz eine um 9% höhere Bruchlast als der umgeschlagene Nagel. Die Sicherheit gegen Bruch, wenn man bei den genagelten Verbindungen 1,5 mm Verschiebung zuläßt, ist also bei den genieteten Nägeln höher als bei den umgeschlagenen.

Der genietete Nagel ist am Anfang der Belastung etwas weicher als der umgeschlagene, verleiht der Verbindung aber eine höhere Tragkraft.

Die Abhängigkeit der Tragkraft von der Zahl der Nägel (Abb. 7, 8).

Ein wichtiges Ergebnis der z. T. in Abb. 7 bis 10 dargestellten Versuche besteht in der durchaus nicht selbstverständlichen Feststellung, daß die Tragkraft einer genagelten Verbindung gleichmäßig mit der Anzahl der Nägel wächst. Im großen Durchschnitt, d. h. unter Berücksichtigung der durch die Verschiedenartigkeit der Nagelfestigkeit und Holzstruktur bedingten Streuung trägt ein

Nagel beim Bruch immer die gleiche Last, unabhängig von der Anzahl der Nägel in der Verbindung.

Zweischnittiger Nagel:

Bruchleibungsdruck im Mittelholz
 Nagel genietet 250 kg/cm²
 Nagel umgeschlagen 220 kg/cm²

Zulässiger Leibungsdruck im Mittelholz aus 1,5 mm V.
 Nagel genietet 85 kg/cm²
 Nagel umgeschlagen 95 kg/cm²

Es ergeben sich dabei folgende Sicherheiten gegen Bruch:

Nagel genietet 2,9fache Sicherheit
 Nagel umgeschlagen 2,3 „ „

Einfluß der Mittelholzstärke beim 4,2 mm Nagel (Abb. 9, 10).

Als zulässiger Lochleibungsdruck für die Verschiebung 1,5 mm ergab sich natürlicherweise bei dem dünnen 4,1 cm Mittelholz ein größerer Wert als bei dem 5,5 cm starken Mittelholz und zwar beim genieteten und beim umgeschlagenen Nagel. Der zulässige Leibungsdruck sinkt, wenn die Mittelholzstärke von 4,1 cm auf 5,5 cm anwächst.
 beim genieteten Nagel von 90 auf 78 kg/cm²
 beim umgeschlagenen Nagel „ 99 „ 88 „

Das dünne Mittelholz ergab auch größere Tragkraft beim Bruch: 260—239 gegen 241—207 kg/cm² beim dicken Mittelholz.

Das starke Mittelholz hatte hier schlanke und daher weiche Nägel. Die Formänderung der Nägel ist auch von der Schlankheit $\frac{1}{d}$ abhängig.

l = Summe der Dicke der verbundenen Teile,
 d = Nageldurchmesser.

Sie wächst hier vom dünnen zum dicken Mittelholz von 22 auf 25 an.

Einfluß der Nagelstärke.

Bei etwa gleichbleibender Summe der Leibungsflächen ergab der dickere Nagel kleinere Verschiebung bei gleicher Belastung. Infolge davon wächst auch der zulässige Lochleibungsdruck

von 108 kg/cm² bei 3,8 mm Nageldurchmesser auf 128 „ „ 4,6 „ „
 bei 4,1 cm Mittelholz an.

Der starke Nagel hatte die Schlankheit $\frac{1}{d} = 20$ der dünne aber 24.

Die Tragkraft eines dicken Nagels wächst natürlich rascher, als der Zunahme des Nageldurchmessers entspricht.

dünnere Nagel 3,8 mm Durchm. 452 kg Tragkraft
 dicker „ 4,6 „ „ 620 „ „
 bei 4,1 cm Mittelholz.

Daraus folgt die wichtige Lehre für den Entwurf, daß man so dicke Nägel für eine Bohlenkonstruktion nehmen soll, als die Spaltgefahr der Bohlen beim Einschlagen der Nägel gerade noch zuläßt.

Die Brucherscheinungen bei den zweischnittigen Nagelverbindungen.

Bei den Versuchen war, etwa von Lochleibungsdrücken $\sigma_1 = 80 \text{ kg/cm}^2$ ab, immer stärker ein Knarren hörbar, welches offenbar durch die Reibung an den zusammengedrückten Holzflächen verursacht wurde. Im Gegensatz zu der Ansicht anderer Forscher zeigen die Versuche, daß die Reibung mit fortschreitender Verschiebung zunächst immer größer wird, da der verbogene Nagel eben eine größere Klemmwirkung ausübt. Selbst bei der Höchstlast ist noch erhebliche Reibung wirksam. Erst nach einer Verschiebung von 30–40 mm, wenn also die Höchstlast längst überschritten ist, hört die Reibung auf, weil die Seitenbretter infolge der starken Verkrümmung der Nägel vom Mittelholz abgedrückt werden.

Die Tragkraft der zweischnittigen Nagelverbindung hängt zunächst von dem Widerstand ab, den das Mittelholz dem Einpressen der Nagelschäfte entgegensetzt, dann aber auch von dem Widerstand, den die Seitenhölzer dem Herausziehen der Nagelköpfe bieten. Sowohl bei den umgeschlagenen als auch bei den vernieteten Nägeln erfolgt die Zerstörung so,

daß bei dem starken Mittelholz (5,5 cm) sich der fertige Nagelkopf wie auch der Schließkopf oder der Schaft in der Nagelrichtung durch die Seitenhölzer durchzieht, während das Mittelholz weniger geschädigt wird.

daß aber beim schwachen Mittelholz (4,1 cm) sich der Schaft mehrere Zentimeter tief in das Mittelholz einfrißt, während die Nagelköpfe nur wenig in die Seitenhölzer hineingezogen werden.

Die Leibungsflächen des dicken Mittelholzes boten also mehr Widerstand als die Anliegeflächen der Nagelköpfe, während beim dünnen Mittelholz die Anliegefläche der Nagelköpfe und der Druck quer zur Faser die schwachen Stellen der Verbindung waren.

Mit der Stärke des Mittelholzes müßte also auch die Anliegefläche des Nagelkopfes wachsen.

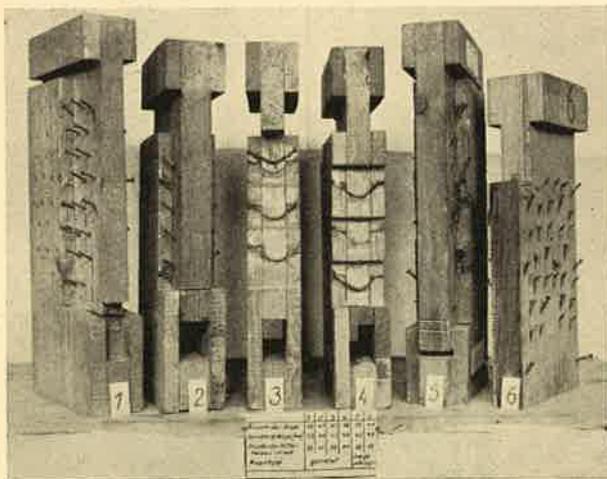


Abb. 11. Einige nach dem Versuch aufgeschnittene Druckstöße. Körper 1–4 mit genieteten, Körper 5–6 mit umgeschlagenen Nägeln.

Das Verhältnis der Holzstärken war bei unseren Versuchen

$$\text{bei } 5,5 \text{ cm starkem Mittelholz } \frac{2 \times 2,6}{5,5} = 0,95,$$

$$\text{bei } 4,1 \text{ cm starkem Mittelholz } \frac{2 \times 2,6}{4,1} = 1,27.$$

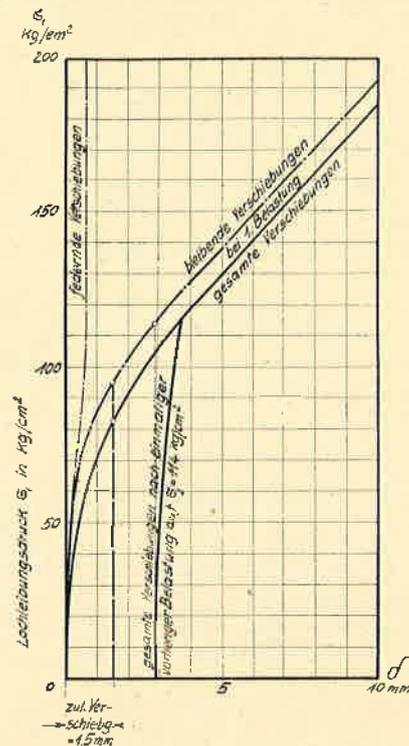


Abb. 12. Federnde, bleibende und gesamte Verschiebungen eines Druckstoßes bei der 1. Belastung und die gesamten Verschiebungen nach Vorbelastung mit 114 kg/cm^2 .

Die gesamten, bleibenden und federnden Verschiebungen eines genagelten Druckstoßes.

Bei der Bemessung des zulässigen Lochleibungsdruckes auf Grund der zulässigen Verschiebungen wurde bisher immer nur auf die gesamten gemessenen Verschiebungen Bezug genommen.

In Abb. 12 sind nun an einem typischen Beispiel an einem Druckstoß mit 53 umgeschlagenen Nägeln $4,2 \times 110 \text{ mm}$ bei 4,1 cm starkem Mittelholz die gesamten und bleibenden Verschiebungen dargestellt. Es ist sofort zu erkennen, daß bei den höheren Lasten fast alle Verschiebungen bleibender Art sind. Die federnden Verschiebungen wachsen ungefähr gradlinig bis zum Leibungsdruck von etwa 100 kg/cm^2 und bleiben dann konstant. Es sind demnach alle größeren Verschiebungen auf bleibende Formänderungen des Holzes zurückzuführen. Die bleibende Deformation ist schon früh gerade so groß wie die federnde.

Einige Versuchskörper wurden nach einer erreichten Leibungsspannung von 114 kg/cm^2 entlastet und dann an ihnen nochmals die σ_1/δ -Linie ermittelt. Bei dieser zweiten Belastung zeigten sich in diesen Grenzen kaum noch bleibende

Verschiebungen, sondern fast nur noch elastische. In der Abb. 12 läuft die Linie der gesamten Verschiebungen ganz erheblich steiler wie das erste Mal und ist fast der federnden Verschiebung der ersten Belastung parallel.

Bei erstmaliger Belastung besteht etwa bis zu $\sigma_1 = 50 \text{ kg/cm}^2$ Proportionalität zwischen Spannung und gesamter Formänderung. Die

Formänderung ist aber nur hälftig federnd, zur anderen Hälfte bleibend.

Bei wiederholter Belastung treten bis $\sigma_1 = 114 \text{ kg/cm}^2$ kaum weitere bleibende Formänderungen auf und es besteht ungefähr Proportionalität zwischen Spannung und Verschiebung bis $\sigma_1 = 100 \text{ kg/cm}^2$.

II. Die Wirkung des Nagels.

Der Widerstand der Nägel gegen Herausziehen.

Da bei dem 5,5 cm starken Mittelholz die Festigkeit der Verbindung im wesentlichen durch den Widerstand der Nägel gegen Herausziehen aus den Seitenhölzern bedingt war, wurde der Widerstand des genieteten oder umgeschlagenen Nagels besonders festgestellt.

Es wurden 4,2 mm Nägel durch ein 26 mm starkes Tannenholz geschlagen (Abb. 14) und dann herausgezogen:

1. Nagelende ohne Kopf
2. „ 1,2 cm weit umgeschl. auf 3 d Länge,
3. „ 2,2 „ „ „ „ 6 d „
4. „ doppelt umgeschlagen,
5. normaler Nagelkopf,
6. vernietetes Nagelende mit Unterlagsscheibe.

Die Nägel wurden in der in Abb. 14 dargestellten Richtung mit einer 5 t-Maschine herausgezogen und die Zugkraft abhängig von dem zurückgelegten Wege selbsttätig aufgezeichnet.

Die Jahresringe des Holzes lagen so, daß die Nägel einmal senkrecht, einmal unter 45° und einmal parallel zu den Jahresringen gezogen wurden (Abb. 14). Es wurden an ein und demselben Brett mit jeder Nagelkopfart und mit jeder der drei Lagen der Jahresringe 5 Versuche angestellt und die Lage der Versuchsstücke im Brett so ausgewählt, daß etwaige Unterschiede der Holzfestigkeit sich ausgleichen mußten. Die Druckfestigkeit des Brettes, an Prismen von der doppelten Höhe der Seitenlänge gemessen, betrug rd. 480 kg/cm^2 , seine Feuchtigkeit 10–11%.

Den größten Ausziehewiderstand hat der vernietete Nagel, dann der doppelt umgeschlagene Nagel und dann kommt erst der gewöhnliche Nagelkopf.

Der umgeschlagene Nagelschaft verhält sich gut, wenn das umgeschlagene Stück nicht länger als 3 d ist.

Geringen Ziehewiderstand bietet nur der frei herausstehende Nagelschaft.

Der Einfluß der Jahresringe liegt bei den verschiedenen Nagelköpfen nicht in der gleichen Richtung. Die Vermutung, daß eine Lage der Jahresringe senkrecht zu den Nägeln den größten Widerstand ergäbe, traf nicht zu. Für jede Nagelverbindung ist es günstig, wenn schon für kleine Ziehwege große Kräfte nötig werden und die Höchstkraft möglichst früh auftritt. Im all-

gemeinen wurde die Höchstlast dann erreicht, wenn der Nagel durch die Hälfte der Holzdicke durchgezogen war.

Diese Höchstlast zeigt sich in folgender Reihenfolge:

	Vernieteter Nagel	Gewönl. Nagelk.	Schaft dopp. umgeschl.	Schaft kurz umgeschl.	Schaft lang umgeschl.
Höchstlast	272	219	218	195	173 kg
Gütezahl	4,3	3,4	3,4	3,0	2,7

Gibt man dem gewöhnlich frei herausragenden Nagel mit 64 kg Widerstand die Güte 1, so ergeben die anderen Nägel die obigen Gütezahlen.

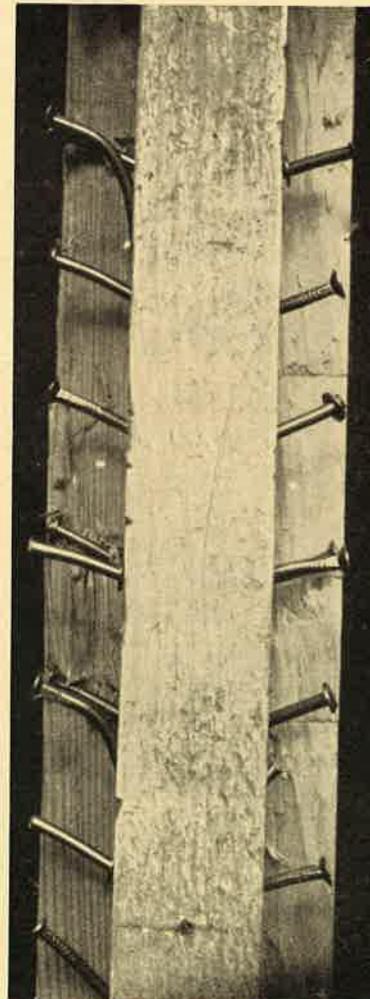


Abb. 13. Genietete Nägel eines Druckstoßes nach Entfernung der beiden Seitenhölzer.

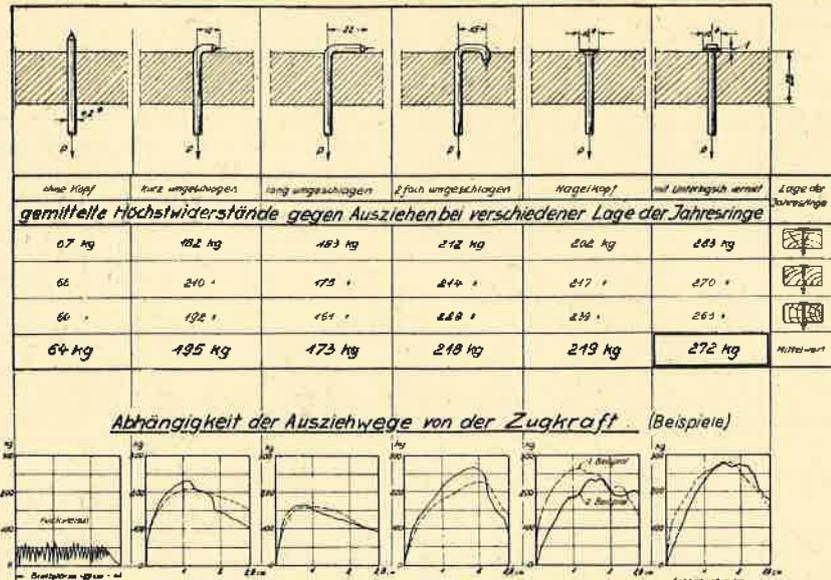


Abb. 14. Ausziehungswiderstand der verschiedenen behandelten Nägel.

Einpressung des Nagels in die Leibung.

Da bei den Gurtstößen mit 4,1 cm starkem Mittelholz die Zerstörung im wesentlichen dadurch eintrat, daß die Nagelschäfte sich unter Überwindung des Scherwiderstandes des Holzes parallel der Faser in das Mittelholz und z. T. auch in die Seitenhölzer einfraßen, wurde auch der Widerstand des Holzes gegenüber einer solchen Scherbeanspruchung und deren Beziehung zur Druckfestigkeit des Holzes untersucht, wobei die Stärke der Nägel und der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes verändert wurden.

hineingedrückt. Der Querschnitt der in das Holz einzupressenden Fläche war meistens nach Form I und nur in wenigen Fällen nach Form II ausgebildet. Im ersten Falle war aber das Blech nicht kreisrund, sondern nur an den Ecken abgerundet. Nach einer gewissen Eindringtiefe konnte hier also Reibung zwischen dem Holz und den Seitenflächen des Bleches auftreten.

Im zweiten Falle war die Beanspruchung des Holzes durch einen Nagel besser nachgeahmt, da ein Kreiszyylinder eingedrückt wurde.

Versuche mit dem nach Form I abgerundeten Blech wurden mit verschiedenen Holz- und Blechstärken ausgeführt.

Einige wenige Vergleichsversuche zwischen Form I und Form II zeigten, daß bei der der Wirklichkeit näher kommenden Versuchsanordnung mit dem liegenden Zylinder sich um rd. 16% kleinere Eindringwiderstände ergeben.

Um den Einfluß der Holzfeuchtigkeit auf den kritischen Leibungsdruck zu finden, wurden Nägel von verschiedener Stärke in getrocknetes, luft-trockenes oder nasses Holz gepreßt, wobei sämtliche Holzversuchsstücke aus einem einzigen Brett geschnitten und die Versuchsstellen so ausgesucht waren, daß bei der Mittelbildung die Ungleichmäßigkeit des Holzes sich möglichst ausglich. Der untersuchte Holzquerschnitt ist in Abb. 15 mit den Jahresringen gezeichnet.

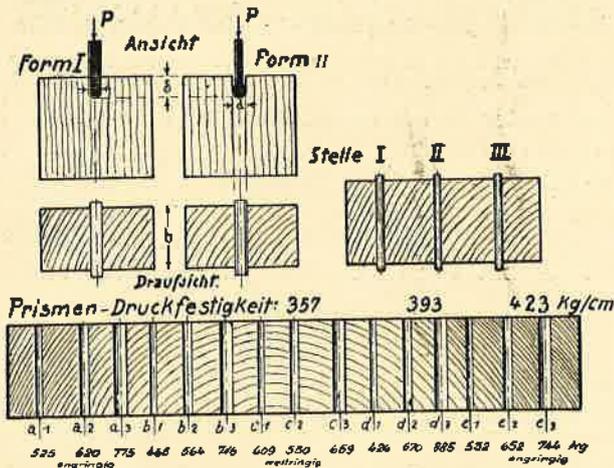


Abb. 15. Einpreßversuch parallel der Holzfaser mit biegefesten Nägeln; die Lage der Jahresringe ist angegeben. Durchmesser 3,1 bis 6 mm.

Man suchte den kritischen Leibungsdruck, bei welchem die Formänderung ununterbrochen weiterging, bis sich der eingedrückte Nagel ganz durch das Holz geschoben hatte.

Anstelle eines Nagels wurde ein biegesteifes, abgerundetes Blech in die Stirnfläche des Holzes

Die Versuchsergebnisse zeigen nebenbei — mit einer Ausnahme —, daß der Widerstand gegen das Eindringen des Nagels in die Lochleibung mit der Nagelstärke schwach abnimmt (s. Abb. 16). Wenn man trotzdem ein Gesamtmittel über die verschiedenen Nagelstärken bildet, so ergibt sich, daß die Holzfeuchtigkeit den Einpreßwiderstand ungünstig beeinflusst, aber nicht ebenso ungünstig wie z. B. die Druckfestigkeit.

Zustand des Holzes	getrocknet	lufttrocken	naß
Einpfeßwiderstand K in kg/cm ²	522 (1)	388 (0,7)	262 (0,5)
Holz-Druckfestig- keit σ_B in kg/cm ²	666 (1)	398 (0,6)	220 (0,3)
Verhältnis Einpfeß- widerstand / Druck- festigkeit $\frac{K}{\sigma_B}$	0,78	0,97	1,19

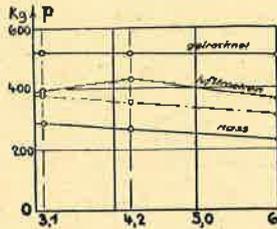


Abb. 16

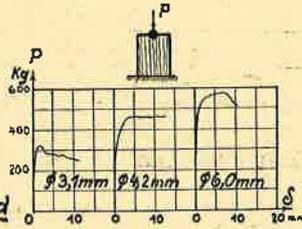


Abb. 17

Abb. 16. Abhängigkeit der Einpressung eines Nagels von seinem Durchmesser und von der Feuchtigkeit des Holzes.

Abb. 17. Abhängigkeit der Belastung von dem Einpressungsweg bei drei verschiedenen starken Nägeln.

Auch der Einfluß der Weite der Jahresringe auf den kritischen Leibungsdruck wurde gesucht.

Der Holzquerschnitt zu dem Versuch und das Ergebnis ist in Abb. 15 dargestellt. Es ergibt sich hier wieder zunächst wie früher mit aller Deutlichkeit, daß der kritische Lochleibungsdruck K mit wachsendem Schaftdurchmesser fällt.

Nagel d =	3,1	4,2	6,0 mm
Widerstand K =	373	355	310 kg/cm ²

Das engringige Holz erwies sich als widerstandsfähiger als das weiringige in Übereinstimmung mit der Druckfestigkeit, welche im Anschluß an die Eindringversuche an dem gleichen lufttrockenen Holz ermittelt wurde.

Jahresringe	eng	mittel	weit
Kritischer Leibungs- druck in kg/cm ²	365	344	308
Druckfestigkeit in kg/cm ²	423	393	357
Verhältnis Leibungs- druck / Druckfestigkeit	0,86	0,87	0,86

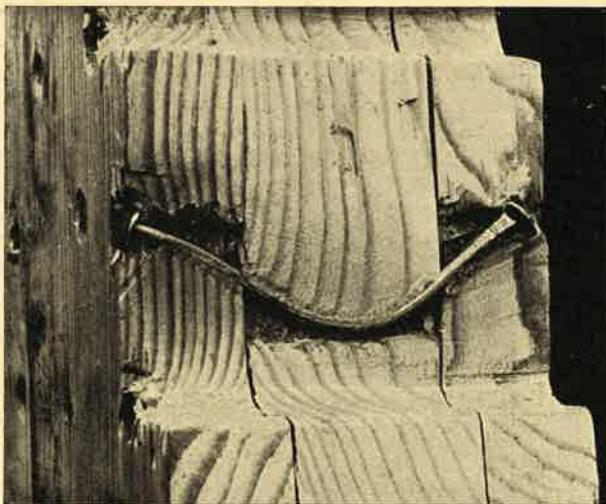


Abb. 18. Verformung des Holzes und des genieteten Nagels durch den Leibungsdruck und das Einziehen der Nagelköpfe.

Während der Versuche wurde die Abhängigkeit des Eindringweges δ des Nagelschaftes in das Hirnholz von der zugehörigen Einpfeßkraft P durch die Schreibvorrichtung der 5 t-Maschine aufgezeichnet. Abb. 17 zeigt einige dieser P/ δ -Linien. Der Höchstwiderstand wird dann erreicht, wenn der Nagel in das Holz etwa bis zum halben Durchmesser eingedrungen ist; die Last fällt dann rasch ab, weil nun die unter dem Nagel knickenden Fasern eine keilförmige Wirkung auf das Holz ausüben. Je trockener das Holz war, umso höher war der erreichbare Einpfeßdruck und umso geringer der Einpfeßweg.

Das höhere Verhältnis $\frac{K}{\sigma_B}$ bei nassem Holz kann wohl dadurch erklärt werden, daß das nasse Holz geschmeidiger ist und weniger leicht spaltet als das trockene. Der keilförmigen Wirkung des vom Nagel zusammengequetschten Holzes widersteht das nasse Holz eben besser als das ausgetrocknete.



Abb. 19. Verformung des Holzes und des umgeschlagenen Nagels durch den Leibungsdruck und das Einziehen der Nagelköpfe.

Je feuchter also das Holz ist, desto leichter dringt zwar der Nagel in die Leibungswand ein, desto geringer ist aber die Spaltgefahr.

Vergleich des Verhaltens der genagelten Druckstöße mit den Ergebnissen der Auszieh- und Einpfeßversuche.

Die Lichtbilder Abb. 18, 19 zeigen an einem aufgeschnittenen Druckstoß mit 4,1 cm starkem Mittelholz die freigelegten Nägel. Da die beiden Versuche unmittelbar nach Erreichen der Höchstlast abgebrochen wurden, geben die Lichtbilder den Zustand der Nägel wieder, wie er bei der Höchstlast vorhanden war. Man erkennt die starke Verkrümmung der Nägel, die tiefe Einpressung des Nagelschaftes in das Holz und das Einziehen der Nagelköpfe, als die beiden Seitenhölzer sich gegen das Mittelholz um etwa 40 Millimeter verschoben hatten.

Die beiden verbogenen Nagelschenkel bilden miteinander den Winkel von 96° beim umgeschlagenen Nagel und von 110° beim vernieteten Nagel.

Setzt man nach den früheren Versuchen $K = \sigma_{1B} = 0,8 \sigma_{-B}$, so hätte bei den Nagelverbindungen mit einer Holzdruckfestigkeit $\sigma_{-B} = 300$ bis 400 kg/cm^2 ein Lochleibungsdruck der Nägel im $4,1 \text{ cm}$ starken Mittelholz von 240 bis 320 kg/cm^2 er-

reicht werden müssen. Es wurden tatsächlich erreicht 273 bis 332 kg/cm^2 , also nur unwesentlich höhere Werte.

Lichtbild Abb. 13 zeigt einen Gurtstoß nach seiner Zerstörung mit längs aufgeschnittenen Seitenbohlen.

III. Zusammenwirken von Leimung und Nagelung.

Geleimte und genagelte Druckstöße.

1. Vorversuch.

Ein Druckstoß ähnlich wie Abb. 3 mit zwei Leimflächen von $30,5 \text{ cm}$ Breite und 45 cm Länge wurde zunächst mit Tischlerleim unter Druck hergestellt. Nach dem Erhärten des Leimes wurde der Versuchskörper noch mit 52 Nägeln von $4,2 \text{ mm}$ Stärke versehen und in der 500 t -Maschine zerdrückt. Der Bruch erfolgte bei $35\,200 \text{ kg}$ durch Überschreiten der Druckfestigkeit des Mittelholzes außerhalb des Stoßes bei einer Druckspannung des Holzes von 275 kg/cm^2 . Die gemittelte Schubspannung in der Leimfläche in diesem Augenblick betrug $12,8 \text{ kg/cm}^2$. Da praktisch keine Verschiebung zwischen Seiten- und Mittelholz auftrat, waren die Nägel an der Aufnahme der Last kaum beteiligt gewesen.

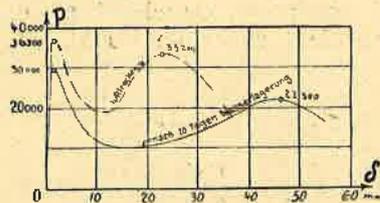


Abb. 20. Verhalten gleichzeitig geleimter und genagelter Druckstöße im trockenen und wassersatten Zustande.

2. Vergleichsversuche zwischen einem lufttrockenen und einem nassen Holzkörper mit Leimung und Nagelung.

Beide Versuchskörper waren etwa nach Abb. 3 ausgebildet und wurden zunächst mit einem handelsüblichen Kaseinleim hergestellt, erhielten aber ohne Pressung unmittelbar nach dem Leimauftrag 37 Nägel von $4,2 \text{ mm}$ Durchmesser, die an der überstehenden Seite vernietet wurden. Die Versuchskörper blieben darauf über drei Wochen

lang lufttrocken stehen. Anschließend wurde der eine Körper zehn Tage lang in Wasser gelegt und unmittelbar darauf in nassem Zustande geprüft. Der andere Körper wurde in gleichem Alter aber lufttrocken geprüft. Der Bruch trat immer so ein, daß zunächst die Leimfuge abgeschoben wurde, worauf die Belastung stark abfiel. Dann, nach größeren Verschiebungen, traten die Nägel in Wirkung und es wurde eine zweite kleinere Bruchlast der Nagelung erreicht. Es ergaben sich dabei die Bruchlasten von $30,0$ und $36,5 \text{ t}$ für die Leimfuge, von $22,3$ und $32,2 \text{ t}$ für die Nagelung. Die Kraftverschiebungslinie nimmt etwa den in Abb. 20 gezeichneten Verlauf.

Die Leimfestigkeit ist in lufttrockenem Zustande mit $18,5 \text{ kg/cm}^2$ verhältnismäßig klein ausgefallen. Sie nahm durch zehntägige Wasserlagerung um 18% ab. Bei beiden Körpern trug der Leim mehr als die Nägel. Der Lochleibungsdruck der Nägel beim Bruch fiel durch die Wasserlagerung um 33% .

Die Wasserlagerung hat somit die Tragkraft der Nägel stärker herabgesetzt als die des Leimes.

Rein rechnerisch könnte man bei einer gegebenen Verbindungsfläche durch Leim eine vier- bis fünfmal so große Kraft anschließen als durch Nägel. Die späteren Versuche mit Diagonalstäben und die vorhin beschriebenen Versuche haben aber gezeigt, daß die reine Leimfestigkeit in einer solchen Konstruktion schlechter ausgenutzt wird als die Tragkraft des Nagels, weil sie durch unvermeidliche Zusatzspannungen viel stärker beansprucht wird als die federnde und ausgleichende Nagelverbindung.

Wegen der verschiedenen Nachgiebigkeit von Leim und Nagel wirken beide Verbindungsmittel praktisch nicht zusammen. Die Nägel tragen erst dann, wenn die Leimverbindung zerstört ist. Das Nacheinanderwirken bringt aber keinen Gewinn für die Tragkraft einer Konstruktion.

IV. Schräganschluß eines zweiteiligen Wandstabes an einen ein- und zweiteiligen Gurt mit einschnittigen Nägeln oder Leim.

Man wollte den zulässigen Lochleibungsdruck und die Tragkraft eines genagelten Anschlusses eines Wandstabes schräg zur Faser einen Fachwerkurt mit einschnittigen Nägeln von $\varnothing 3,8 \text{ mm}$ und 100 mm Länge (Schlankheit 26) feststellen.

Die Versuche wurden auf drei Arten durchgeführt:

- a) Der gedrückte Wandstab wurde zwischen dem zweiteiligen Gurtstab durch einschnittige Nägel angeschlossen (Abb. 21).
- b) Bei der gleichen Lage erfolgte der Anschluß aber nicht durch Nägel sondern durch Leimen.
- c) Der Gurt war einteilig und der zweiteilige gedrückte Wandstab wurde durch einschnittige Nägel außen angeschlossen (Abb. 22).

Um die Ungleichmäßigkeiten des Holzes auszuhalten, waren sämtliche Versuchsstücke aus einem einzigen zimmertrockenen Tannenbrett hergestellt. Es wurden bei jeder Belastung die Verschiebung δ des gedrückten Wandstabes gegen den Gurt mit Meßuhren festgestellt und schließlich die Bruchlasten aufgeschrieben.

Für die genagelte und für die geleimte Verbindung sind die ermittelten Spannungs-Verschiebungslinien in Abb. 23 gegenübergestellt. Wie zu erwarten war, sind die Formänderungen der Leimverbindungen verschwindend gering gegenüber den Nagelverbindungen.

Der in dem zweiteiligen Gurt innen angebrachte Stab brachte anfänglich rund doppelt so große Verschiebungen wie der außen angebrachte und infolgedessen zu einer Verschiebung von 1,5 mm einen geringeren zulässigen Lochleibungsdruck der Nägel im Wandstab. Bei höheren Lasten kehrte sich das Verhalten aber um. Der außen angeschlossene Wandstab verschob sich dann viel stärker als der innen angebrachte. Auch die Bruchlasten waren beim Innenanschluß erheblich größer.

Wandstab-Anschluß	genagelt innen	genagelt außen	geleimt innen
Bruchlasten in t	3,5	2,7	4,6
Leibungsdruck bei 1,5 mm Verschiebung.	90	101	kg/cm ²

Es wurde nur eine mittlere Leimschubfestigkeit von 12,6 kg/cm² erreicht.

Die geleimte Verbindung, welche theoretisch bei einer Leimschubfestigkeit von 40 kg/cm² eine Bruchlast von 14,6 t erreichen sollte, hat diese Leimfestigkeit also bei weitem nicht ausnützen können, da durch die Starrheit des Leimes die beim Holz unvermeidlichen unregelmäßigen Formänderungen Spannungen hervorriefen, welche die Leimfläche sehr ungleichmäßig beanspruchten. Zu ihnen traten zusätzliche Biege- und Vordrehungs-spannungen, wodurch die Gesamtfestigkeit litt und die Tragkraft des geleimten Anschlusses ganz erheblich herabgesetzt wurde.

Die Verschiebungen bis zum Bruch sind bei den Leimverbindungen verschwindend klein und beim genagelten, äußeren Anschluß des Wandstabes am größten.

Nach den Bruchlasten verhält sich die innen liegende Diagonale besser als die weit auseinandergezogene außen angeschlossene.

Der Bruch im Holz erfolgte bei Leibungsdrücken der einschnittigen Nägel

von 227 kg/cm² beim Innenanschluß und
 „ 177 „ „ „ Außenanschluß.

Der innere einschnittig genagelte schräge Wandstabanschluß hat nicht nur eine größere Tragkraft sondern auch eine größere Zähigkeit als der äußere einschnittig genagelte Anschluß an einen Gurtstab. Er verdient daher konstruktiv den Vorzug.

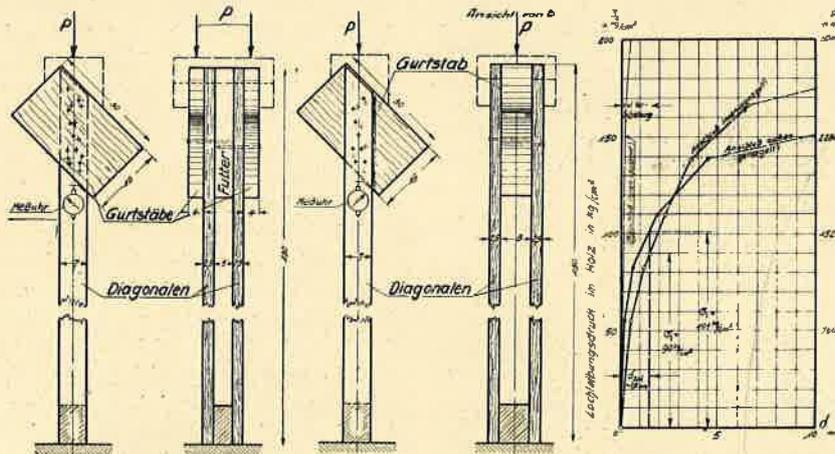


Abb. 21.

Die zweiteilige Strebe innen an den zweiteiligen Gurt angeschlossen.

Abb. 21.

Abb. 22.

Abb. 23.

Abb. 22. Die zweiteilige Strebe außen an den einteiligen Gurt angeschlossen.

Abb. 23.

Spannungs-verschiebungslinie beider Streben.

V. Genagelte Biegeträger unter statischer Last.

Aus Bohlen lassen sich hohe Biegeträger vorteilhaft ausbilden, da es leichter fällt, breite Bohlen aufzutreiben als gleich hohe Balken. Zudem hat man die Möglichkeit, beim zusammengesetzten Biegequerschnitt viel Material in die beiden Gurten und wenig in den sie verbindenden Steg zu legen.

Die hier zunächst untersuchten beiden Biegeträger bestanden (Abb. 24) aus zwei hochkant

stehenden Stegbrettern von rd. 2 cm Stärke und 27,5 cm Breite, die an beiden Langseiten mit Kant-hölzern 5/5 cm zusammengenagelt waren, sodaß ein Hohlbalken entstand von 27,5 m Trägerhöhe. Die 3,8 mm starken Nägel waren 70 mm lang, gingen also an dem Gurt nicht durch alle drei Hölzer. Sie wurden von beiden Seiten in 7,5 cm Abstand, der sich an den Auflagern auf 5 cm Abstand verringerte, eingeschlagen.

Der Versuchsträger wurde auf einer Biegevorrichtung mit bis 6 t Kraftwirkung 4,20 m weit gestützt und mit vier gleich großen und gleich weit entfernten Kräften belastet. Zur besseren örtlichen Lastverteilung waren 3 cm starke Bretter von 20 cm Länge aufgelegt. Der Träger I war ohne jede Aussteifung seines doppelten Steges, der genau gleiche Träger II war aber mit den in Abb. 25 u. 26 dargestellten lotrechten Aussteifungen versehen. Der Träger I war ferner, abgesehen von

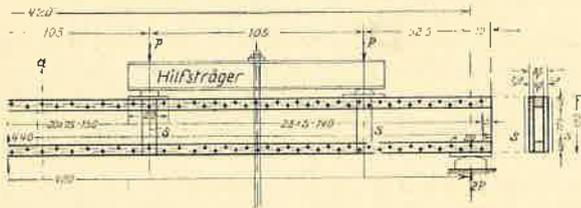


Abb. 24. Rechte Hälfte eines genagelten Biegeträgers mit der Belastungsvorrichtung.

den Auflagern, nirgends seitlich geführt, konnte sich also verwinden, während der Träger II in der Mitte der Stützpunkte sowohl gegen Verdrehung wie auch gegen seitlich waagrechte Verschiebung gesichert war, sodaß er in der Mitte sich zwangsläufig nur nach unten bewegen konnte. (Lichtbild 25.)

Die Belastung wurde stufenweise aufgebracht, wobei jede Laststufe eine Minute lang dauerte. Jedesmal wurde die Durchbiegung in Feldmitte abgelesen. Der Träger II blieb bei einer Biegespannung $\frac{M}{w} = 200 \text{ kg/cm}^2$ 5 Stunden lang stehen, wurde dann entlastet und nun nochmals stufenweise belastet und beobachtet.

Unter der Last verdrehte sich der unausgesteifte und nicht geführte Träger I allmählich in der Mitte und knickte schließlich bei einer Gesamtlast von 4600 kg aus.

Der ausgesteifte Träger II, welcher in der Mitte geführt war, verdrehte sich unter der Last gegenläufig in seinen Viertelpunkten und knickte dann in jeder Hälfte für sich aus. In Abb. 25 ist die

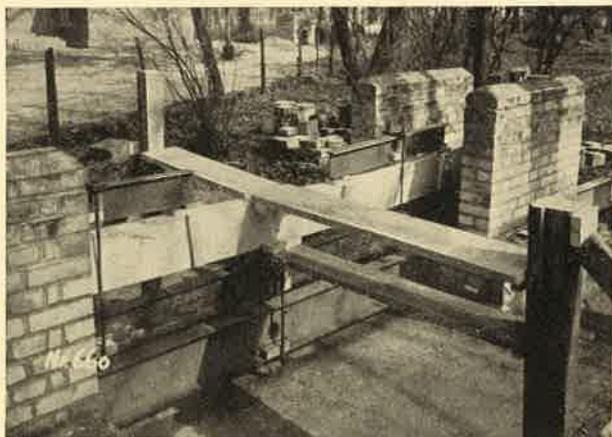


Abb. 25. Der in der Mitte geführte Biegeträger II bei der Erschöpfung seiner Tragkraft.

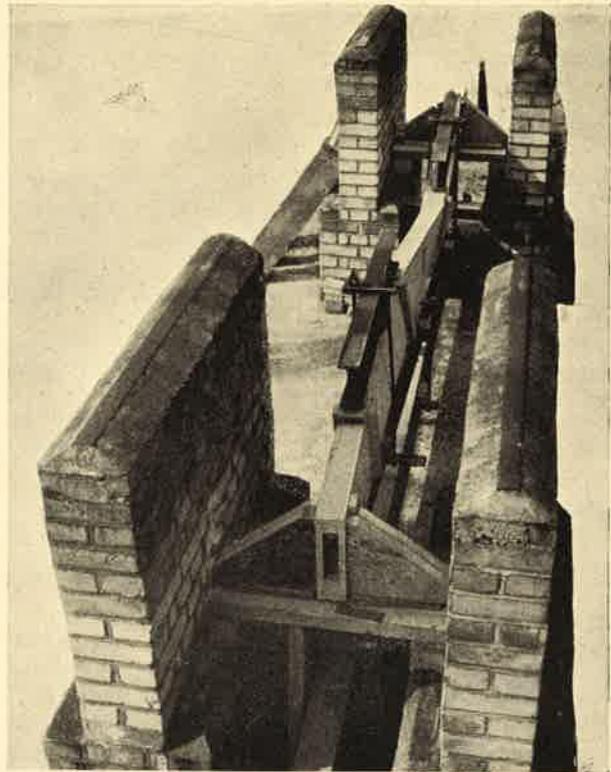


Abb. 26. Der Biegeträger II nach dem Ausknicken seiner Oberkante und nach Entfernung der Führung.

Abstützung der Trägermitte zu sehen, während sie bei Abb. 26 entfernt worden ist.

Beide Träger sind somit nicht durch Überwindung der Biegefestigkeit zu Bruch gegangen, sondern durch Verdrehen und Ausknicken. Es ergab sich daraus die Lehre, Holzbiegeträger nicht einzeln sondern immer paarweise durch Verbände zu einem räumlichen Tragwerk vereinigt zu prüfen. Die erreichte Biegespannung betrug bei Träger I 264 kg/cm^2 , bei Träger II 344 kg/cm^2 , während die Biegefestigkeit des Holzes zu 500 kg/cm^2

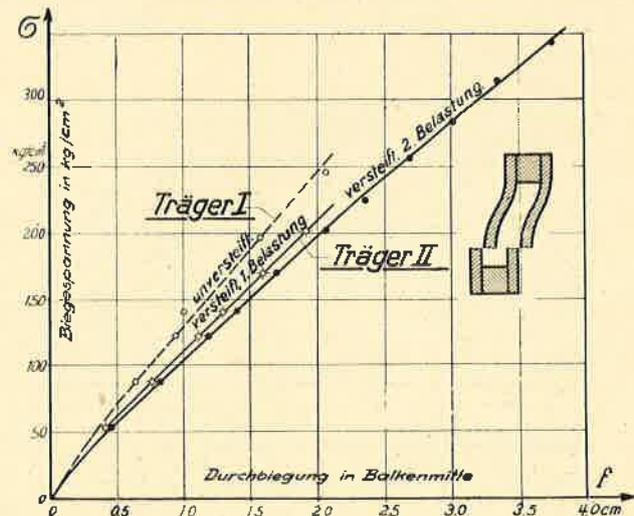


Abb. 27. Die Spannungsdurchbiegungslinie der beiden Biegeträger I und II. Der Querschnitt rechts gibt die Zerstörung der Stegbretter von Träger I wegen des Fehlens von lotrechten Versteifungen wieder.

geschätzt wird. Sie ist bei der gewählten Versuchs-anordnung wegen des Knickens nur zu 53% bei Träger I und zu 63% bei Träger II ausgenützt worden.

Die Tragkraft läßt sich durch gutes Koppeln nebeneinanderliegender Biegeträger, wie es in der Anwendung wohl immer möglich ist, erhöhen. Die große Bedeutung richtig angeordneter An-

steifungen des Steges erhellt aus dem Verlauf des ersten Versuches.

Unter der Dauerlast bei einer Biegespannung von 200 kg/cm² vergrößerte sich die Durchbiegung von 19,8 auf 24,3 mm, also um 23%. Bei der nach 3 Tagen wiederholten Belastung des Trägers II änderte sich der Charakter der Spannungs-Durchbiegungslinie nicht. (Abb. 27.)

VI. Bohlen-Knickversuche.

Bei Bohlenfachwerkträgern wählt man am besten Tragsysteme, deren Wandstäbe meist Zug haben; aber ganz lassen sich Druckstäbe nicht vermeiden. Um die wichtige Frage zu beleuchten, wie sich Bohlen zu Druckstäben zusammenfügen lassen, wurden einige Knickversuche mehr zur Demonstration durchgeführt mit dem Einzelbrett sowie mit zusammengesetzten genagelten oder geleimten Brettern.

1. Einzelbrett.

Es wurde zu den Versuchen ein zimmertrockenes Brett 4,1×28,2 cm aus Fichte einmal durch an beiden Enden aufgeschraubte Winkeleisen nach Abb. 28a ziemlich gut gelenkig gelagert mit einer Knicklänge von 2,26 m. Nach diesem Knickversuch wurden die beiden Enden des Brettes mit den darauf befestigten Winkeleisen senkrecht zur Stabachse abgeschnitten und der Stab, nach Abb. 28 b eingespannt, ein zweites Mal zum Knicken gebracht. Es ergab sich:

Beide Enden gelenkige Lagerung (Abb. 28a) 2,26 m Knicklänge, 3,3 t Knicklast; $\sigma_k = 29 \text{ kg/cm}^2$.

Enden mit dem ganzen Querschnitt anliegend (Abb. 28 b) 2,19 m Knicklänge, 7,8 t Knicklast. $\sigma_k = 67 \text{ kg/cm}^2$.

Jeder Versuch ließ sich einige Male wiederholen, da das Knicken rein elastisch war, und brachte immer das gleiche Ergebnis.

Im ersten Falle der gelenkigen Lagerung berechnet sich nach DIN 1074 eine Knicklast von 3,2 t gegen 3,3 t des Versuches, also kein großer Unterschied.

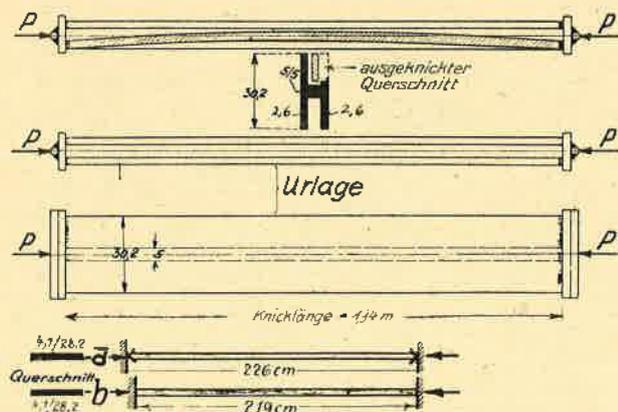


Abb. 28. Oben der zusammengesetzte Knickstab. Der eingezeichnete Querschnitt gibt die Zerstörung der einen Bohle beim geleimten Stab wegen des Fehlens von lotrechten Verstärkungen wieder. Die untere Figur zeigt den Knickversuch an der Einzelbohle mit flacher oder gelenkiger Lagerung.

Das rasche Anwachsen der Tragkraft eines Druckstabes auf über das Doppelte nur durch eine recht geringe Einspannung der Enden deckt sich mit unseren Erfahrungen mit Stahlstäben. In jeder Konstruktion werden die Druckstäbe an den Enden nicht gelenkig, sondern elastisch eingespannt angeschlossen. Ihre Tragsicherheit ist also — gerade Stäbe vorausgesetzt — nicht unerheblich höher, als die übliche Rechnung als Gelenkstab ergibt.

2. Zusammengesetzte Bohlenstäbe.

Für diese Knickversuche wurden zwei zimmertrockene Bretter 30,2/2,6 cm mit einem quadratischen Kantholz 5/5 cm zu einem H-förmigen Querschnitt durch Nageln oder Leimen verbunden. Anstelle der sonst üblichen Bindungen wurde also eine einzige durchgehende Bindung gewählt, welche zugleich den nutzbaren Querschnitt im kritischen Bereich vergrößerte. Bei diesen Versuchen hatte der geleimte Druckstab

den Querschnitt $F \dots\dots = 182 \text{ cm}^2$

das Trägheitsmoment $J \dots\dots = 2406 \text{ cm}^4$

den Trägheitsradius $i \dots\dots = 3,64 \text{ cm}$.

1. Der Versuchsstab hatte:

zweischnittig umgeschlagene Nägel 3,8 cm \varnothing ,

2. vernietete Nägel 3,8 mm \varnothing ,

3. nur einige Heftnägeln und sonst nur Kaseinleimung.

Es sind die Knicklasten nach DIN 1074 bei den genagelten Stäben für mehrteilige und bei dem geleimten Stab für einteilige Stäbe eingeklammert den Versuchswerten gegenübergestellt worden.

1. Knicklänge 224 cm, umgeschlagene Nägel mit 27 Schlankheitsgrad, 91 (134) kg/cm² Knickspannung, 16,5 (24,5) t Knicklast;

2. Knicklänge 222 cm, vernietete Nägel mit 27 Schlankheitsgrad, 91 (137) kg/cm² Knickspannung, 16,5 (24,8) t Knicklast;

3. Knicklänge 220 cm, geleimt, 41 Schlankheitsgrad, 197 (180) kg/cm² Knickspannung, 35,85 (32,7) t Knicklast.

Bei den genagelten Versuchskörpern schoben sich die drei Einzelteile in den durch Nägel verbundenen Flächen sichtbar aneinander vorbei. Die Bindung war also recht weich und das wirksame Trägheitsmoment daher nur $\frac{2}{3}$ des theoretischen. Der Stab knickte als Ganzes aus.

Bei dem geleimten Stab knickte nur der in Abb. 28 schraffierte freie Teil unter Überwindung

der reinen Schubfestigkeit des Holzes senkrecht zur Stabachse aus. Die Knicklast hätte also hier durch eine richtig angebrachte Versteifung quer zur Stabachse erhöht werden können, kam aber auch ohne Aussteifung etwas über den nach DIN 1071 errechneten Wert. Die Leimung zeigte sich also hier der üblichen Nagelung und auch den Nägeln mit genieteten Köpfen weit überlegen.

Die weiche Nagelung vermag nicht von Anfang an ein Zusammenwirken beider Bohlen zu erzwin-

gen und die rechnerische Knicklast zu erreichen. Nur die Leimung bewährt sich gut beim mehrteiligten Druckstab und erreicht den rechnerischen Wert.

Der Konstrukteur aber erkennt, daß man bei Druckstäben aus Bohlen neben der Bindung der Einzelteile auch eine gute Aussteifung der freien biegsamen Teile braucht und daß es möglich ist, die unentbehrliche Bindung in den nutzbaren Stabquerschnitt einzubeziehen.

VII. Zusammenfassung.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser 1932/33 hier durchgeführten Versuche sind kurz etwa folgende:

Der Nagel.

1. Die Zerreißeigenschaften der bei Bohlen üblichen Nägel von 3,8—4,2—4,6 mm Durchmesser fällt von 74 auf 64 kg/mm² mit zunehmender Nageldicke.
2. Beim Einpressen eines zylindrischen, aber biegefesten Nagelschaftes in das Holz tritt der größte Widerstand dann auf, wenn der Kreis-zylinder etwa um $\frac{d}{2}$ eingedrungen ist. Dieser kritische Leibungsdruck steigt in gleichem Maße wie die Holzdruckfestigkeit und erreicht 80—120% dieser. Er nimmt bei zunehmender Feuchtigkeit weniger stark ab als die Holzdruckfestigkeit. Dicke Nägel verhalten sich weniger günstig dabei als dünne.
3. Der Ausziehungswiderstand des Nagels ist am größten beim genieteten Kopf. Ihm folgt dann der gewöhnliche Kopf und der doppelt umgeschlagene Schaft, dann der auf 3 d umgeschlagene Schaft. Der lang, auf 6 d, umgeschlagene Schaft ist weniger gut und am schlechtesten der gewöhnliche Schaft. Die Lage der Jahresringe ist fast belanglos.
4. Für den genieteten Nagel mit zwei Köpfen braucht man die dreifache Zeit wie für den gewöhnlichen Nagel.

Das Nagelbild.

5. Es ist zweckmäßig
 - der Abstand der Nägel untereinander in Faserrichtung des Holzes 10 d
 - der Abstand der Nagelreihen quer zur Faserrichtung des Holzes 12 d
 - der Randabstand des letzten Nagels in Faserrichtung 12 d
 - der Randabstand der äußeren Nägel quer zur Faser 6 d
 Um möglichst wenig Nägel in eine Faser zu bringen, ordnet man die Nägel in schrägen Geraden an.
6. Kernbohlen spalten beim Nageln leichter als Splintbohlen, trockene leichter als feuchte.

Die Nagelverbindung.

7. Bei einer genagelten Verbindung besteht im statischen Versuch zunächst Proportionalität zwischen Kraft und Verschiebung. Allmählich wird die Verbindung weich, ohne aber plötzlich zu fließen.

8. Aus der zulässigen Verschiebung von 1,5 mm ergibt sich für eine genagelte Verbindung

beim Nageldurchmesser	3,8	4,2	4,6 mm
zulässiger Lochleibungsdruck beim umgeschlagenen Nagel	108	83—115	128 kg/cm ²
zulässiger Lochleibungsdruck beim Nagel mit zwei Köpfen	—	72—100	— kg/cm ²

Mittelwert aus allen Versuchen für den zulässigen Leibungsdruck:

- im Mittelholz beim zweischnittigen Nagel mit 2 Köpfen 85 kg/cm²
- mit einer Sicherheit gegen Bruch von 2,94,
- beim zweischnittigen kurz umgeschlagenen Nagel 95 kg/cm²
- mit einer Sicherheit gegen Bruch von 2,32.

9. Der Nagel mit 2 Köpfen hat eine um 9—16% größere Sicherheit gegen Zerstörung der Verbindung als der umgeschlagene Nagel.

10. Die Tragkraft einer genagelten Verbindung wächst gleichmäßig mit der Anzahl der Nägel.

11. Bei dreifacher Sicherheit gegen Bruch ergibt sich beim zweischnittigen Nagel mit einer Schlankheit von höchstens 25 ein zulässiger Leibungsdruck bei statischer Belastung als Mittel aus diesen Versuchen:

Schlankheit des Nagels	19	23	26
σ_{1B} im Mittelholz	110	93	75 kg/cm ²
σ_{1B} „ Seitenholz	94	73	79 „

12. Wachsen die vernagelten Holzstärken, so sinkt sowohl der zulässige Leibungsdruck als auch die Tragkraft der Nagelverbindung bei gleich bleibender Nagelzahl.

13. Die Schlankheit eines Nagels $\frac{l}{d}$ soll 25 nicht übersteigen.

14. Der aus der Verschiebung abgeleitete zulässige Leibungsdruck steigt mit dem Nageldurchmesser, die Tragkraft aber noch rascher bei 4,1 cm starkem Mittelholz:

$d = 3,8$	4,6 mm
$\sigma_1 \text{ zul} = 108$	128 kg/cm ²
die Tragkraft eines Nagels = 452	620 kg

15. Man wähle also den Nagel so dick, als die Spaltgefahr der Bohlen beim Einschlagen gestattet.

16. Die Tragkraft der zweischnittigen Nagelverbindung hängt ab

beim d ü n n e n Mittelholz von seinem Lochleibungsdruck,

beim starken Mittelholz vom Auszieh-
widerstand der Nägel in den beiden Seitenhölzern.

Beim Mittelholz so dick wie beide Seitenhölzer zusammen, ziehen sich die Nagelköpfe durchs Seitenholz.

Beim dünnen Mittelholz mit nur 0,8 mal den Seitenholzstärken aber halten die Nagelköpfe und fressen sich die Nagelschäfte ins Mittelholz ein.

Nagelverbindung bei wiederholter statischer Belastung.

17. Bei erstmaliger Belastung besteht bis zu $\sigma_1 = 50 \text{ kg/cm}^2$ Proportionalität zwischen Spannung und Verschiebung; diese ist aber nur hälftig eine federnde.

Bei wiederholter Belastung sind fast alle Verschiebungen federnd und ungefähr proportional der Spannung.

Nagelung und Leimung.

18. Wegen der Unnachgiebigkeit des Leimes und der Weichheit der Nagelung wirken beide nicht gleichzeitig, sondern nacheinander und erhöhen zusammen nicht die Tragkraft.

19. Eine genagelte und geleimte Verbindung wird erst in den Leimfugen zerstört; die Nägel tragen hernach nur noch einen Teil der Bruchlast des Leimes.

20. Zehntägige Wasserlagerung setzt die Tragkraft der Nägel stärker herunter als die des Kaseinleimes. Der Leim büßt nur 18%, die Nagelverbindung aber 33% ein.

Anschluß von schrägen Wandstäben.

21. Werden Diagonalen an Fachwerkgurten genagelt, so tragen die Nägel, obwohl der Leibungsdruck schräg zur Holzfaser wirkt, nicht viel weniger, als wenn er parallel zur Faser wirkt.

22. Liegt die zweiteilige Diagonale im Innern einer zweiteiligen Gurt, so tragen die Nägel mehr, als wenn die zweiteilige Diagonale mit einer zwischenliegenden einteiligen Gurt vernagelt ist.

23. Der einschnittige Nagel $d = 38 \text{ mm}$ 100 mm lang, hält beim Innenanschluß $\sigma_1 = 227 \text{ kg/cm}^2$,

„ „ Außenanschluß $\sigma_1 = 177$ „

24. Der Innenanschluß ist anfänglich aber weich und bringt bei 1,5 mm Verschiebung nur $\sigma_1 \text{ zul} = 90 \text{ kg/cm}^2$ gegen 101 kg/cm^2 beim Außenanschluß der zweiteiligen Strebe.

Genagelte Biegeträger aus Bohlen.

25. Ein steifer Biegeträger entsteht durch Vernagelung von zwei hochkant stehenden Brettern mit zwei zwischenliegenden Rahmenschenkeln als Gurten.

26. Eine gute Aussteifung der Bretter quer zur Achse und ein gutes Sichern des Trägers gegen Torsion ist nötig.

27. Die einschnittigen Nägel mit $d = 3,8 \text{ mm}$ halten 5 und 7,5 cm Abstand und reichen für den Schub des 4,20 m weit gespannten Balkens bis zum Bruch aus, der durch Verwindung auftrat.

Druckstäbe aus Bohlen.

28. Geringe Abweichung von gelenkiger Lagerung steigert bei einer Bohle 28,2/2,6 von rd. 2,20 m Länge die Knicklast von 3,3 auf 7,8 t.

29. Zwei Bohlen 30/2,6 und rd. 2,20 m lang waren mit einem Rahmenschenkel 5/5 cm in der Neutralachse durch zweischnittige Nägel mit $d = 3,8 \text{ mm}$ verbunden und bildeten einen H-förmigen Druckstab. Umgeschlagene und genietete Nägel brachten jedesmal 16,5 t Knicklast.

30. Die weiche Nagelung ließ die rechnerische Last für voll wirksames Trägheitsmoment von rd. 30 t fast auf die Hälfte sinken.

31. Die gleiche Verbindung durch Leim erreichte die Knicklast des starr verbundenen H-Querschnittes.

Teil B

Verhalten von Nagelverbindungen unter Wechsellast (Schwellast).

Bei der Verwendung von Holzkonstruktionen im Hochbau überwiegt im allgemeinen ihre statische Belastung; bei den Verbindungsmitteln kommt es dann darauf an, wie sie sich beim erstmaligen Aufbringen ihrer Höchstlast und bei ihrer dauernden gleichmäßigen Einwirkung über Jahrzehnte hinweg verhalten.

Schon im Hochbau gibt es Konstruktionen (Deckenträger z. B.) mit Nutzlast, die erheblichen Schwankungen unterworfen sein kann. Im Brückenbau aber, bei den verhältnismäßig kleinen Stützweiten hölzerner Tragwerke, überwiegt die wechselnde Verkehrslast ganz erheblich die ständige Last.

Häufigem Lastwechsel unterworfenen Holzverbindungsmitel sind noch wenig untersucht und da an uns die Frage herantrat, wie weit genagelte Bohlentragwerke für Brückenbauten verwendet werden können, wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Für einen Leibungsdruck von 80 oder 100 kg/cm² wurde das Verhalten verschieden schlanker zweischnittiger Nägel unter häufigem Lastwechsel beobachtet und die Grenze ihres Arbeitsvermögens zu ermitteln versucht.

Als Versuchskörper wurden wieder Druckstöße aus Tannen- und Fichtenholz (Schreinerware) in den gleichen Abmessungen wie früher gewählt. Ein Mittelholz, dessen Stärke bald 4,2 bald 5,5 cm betrug, war mit zwei Seitenhölzern von 2,6 cm Stärke durch zweischnittige Nägel von 4,2 mm Durchmesser — nur bei einem Körper waren die Nägel 5 mm dick — gefaßt, deren Enden quer zur Faser umgeschlagen wurden. An einem einzigen Versuchskörper waren die Nagelenden nach Einfügen einer Unterlagscheibe vernietet.

3 Körpern faßte der Stoß 20, bei 5 Körpern 32 Nägel. Der Schlankheitsgrad der Nägel stieg von 21 über 23 auf 26.

Die Belastung stieg beim Lastwechsel gleichmäßig an: bei 3 Körpern bis 80 kg/cm² Leibungsdruck, bei 5 Körpern bis 100 kg/cm². Die unterste Belastungsgrenze schwankte, so wie es die Maschine zuließ, zwischen 2 und 21 kg/cm² Leibungsdruck. Die Prüfmaschine mit einer größten Kraftwirkung von 10 t wurde auf etwa 70 Lastwechsel in der Minute eingestellt.

Wie bei den statischen, so wurde auch bei den dynamischen Versuchen durch Feinmeßuhren an den Schmalseiten eines jeden Druckstoßes die Verschiebung des Mittelholzes gegen die beiden Seitenbohlen beobachtet.

1. Die Verschiebung innerhalb des Leibungsdruckes von 100 kg/cm² (Abb. 29).

Fast alle Verbindungsmittel wirken erst dann richtig und gleichmäßig, wenn sie einige Male in der zulässigen Höhe vorbelastet waren. Wenn auch die Nägel im Holz im Gegensatz zu den Nieten im Stahl durch die beim Einschlagen verdrängten Holzfasern gleich festsetzen, so bedarf es doch auch bei ihnen einer mehrfachen Vorbelastung, bis sie zur gleichbleibenden Wirkung gelangen.

Es verhalten sich die quer zur Holzfaser umgeschlagenen Nägel genau so, wie die, deren Spitze nach Einschalten einer kleinen Unterlagscheibe vernietet werden.

Bei allen hier durchgeführten Versuchen zeigt sich das gleiche bezeichnende Bild, und beim langsamen Ansteigen der erstmaligen Belastung

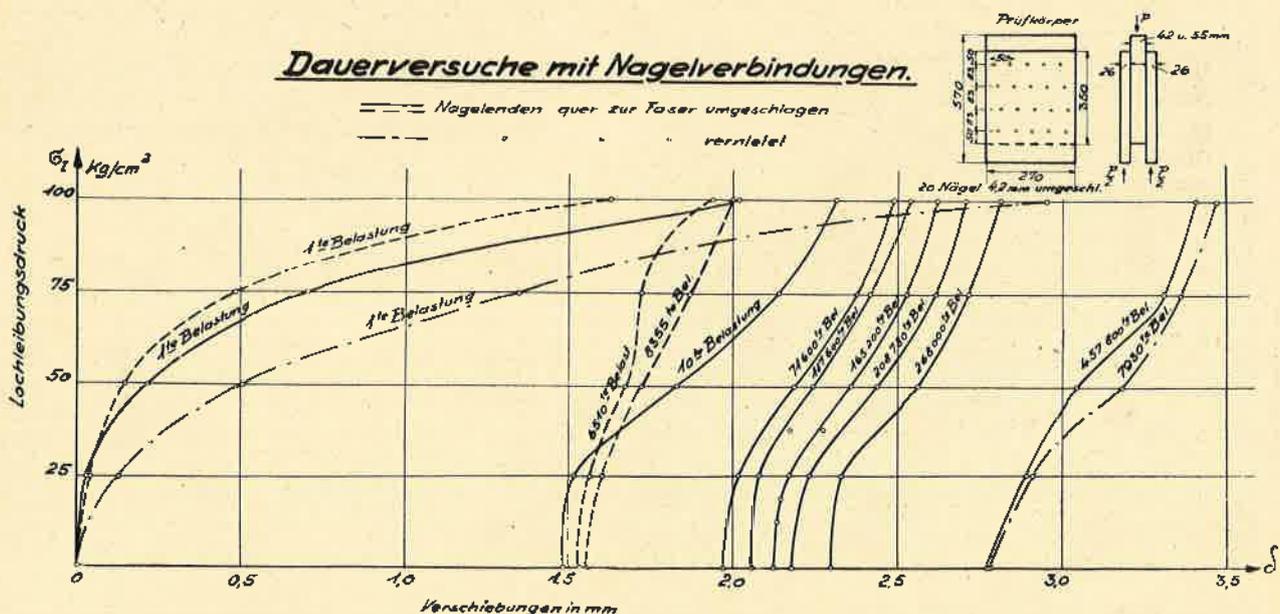


Abb. 29. Beziehung zwischen Verschiebung und Lochleibungsdruck nach verschiedener Anzahl von Lastwechseln.

und sich dazu erst einspielen müssen. Dann wächst die federnde Verschiebung trotz gleicher Last, mehr oder minder stetig, so langsam, daß nach 1 000 000 Lastwechsel noch keine Verdopplung erreicht wird.

Die bleibende Verschiebung wird nur langsam größer und ebenso auch die Gesamtverschiebung.

Die Linien 4, 5, 6 geben das Verhalten der genagelten Stöße bei einem häufig erreichten oberen Leibungsdruck von 80 kg/cm². Der 5 mm starke Nagel behält aber nach Linie 4 im Gegensatz zum 4,2 starken Nagel sowohl bei der federnden, als bei der bleibenden und der Gesamtverschiebung bis zu 300 000 Lastwechsel das gleiche Verschiebungsmaß bei und zeigt erst bei weiterem Lastwechsel ein Anwachsen der drei Verschiebungen trotz gleichem Leibungsdruck.

Beim Körper 9, dessen oberste Belastung einen Leibungsdruck von 100 kg/cm² erzeugte, verhält sich der 4,2 mm Nagel mit der Schlankheit 22 fast ebenso wie vorhin der 5 mm dicke Nagel mit der Schlankheit 19, d. h. die federnde Verschiebung bleibt längere Zeit fast unabhängig von der Lastwechselzahl. Erst nach 300 000 bis 400 000 Lastwechseln nehmen die bleibenden Formänderungen merkbar zu.

In Linie 10 ist das Verhalten eines Druckstoßes dargestellt, bei dem trotz gleichen Holzstärken der Stoß nicht 32 sondern nur 20 Nägel von 4,2 mm Durchmesser mit der Schlankheit 22 erhalten hatte. Hier nimmt wegen der geringeren Zahl der Nägel die federnde Verschiebung wieder zu und verdoppelt sich etwa nach 300 000 Lastwechseln, während die bleibende Verschiebung bis zu dieser Zeit ungefähr konstant bleibt. Nach dem Bruch einiger Nägel nehmen die Verschiebungen natürlich rasch zu, bis nacheinander fast alle Nägel brechen.

Zweischmittige Nagelverbindungen mit 80 kg/cm² Leibungsdruck und einem Schlankheitsgrade bis 22 ertragen unbedenklich mindestens 300 000 Lastwechsel, d. h. sie können ebenso oft ent- und belastet werden, ohne daß die federnde oder die Gesamtverschiebung bedenklich anwächst.

Diese Feststellung ist wichtig, denn wenn die Verschiebung mit der Belastungszahl stark anwachsen würde, wäre ein baldiger Bruch der Nägel in hölzernen Brückentragwerken zu befürchten. Bekanntlich kann jeder Nagel durch häufiges Hin- und Herbiegen, also durch wiederholte übermäßige Formänderung gebrochen werden.

3. Der Bruch der Nägel (Abb. 32).

Der Nagelbruch wurde so festgestellt, daß von Zeit zu Zeit jeder einzelne Nagel in den Stromkreis einer Taschenlampenbatterie eingeschaltet wurde. Im allgemeinen trat der Bruch immer an mehreren Stellen eines Nagels auf.

Beim Leibungsdruck von 100 kg/cm² brachen die 4,2 mm dicken — aber genieteten — Nägel mit dem Schlankheitsgrad von 23 nach 340 000 Lastwechseln.

Bei den umgeschlagenen Nägeln ergab sich dieses Bild:

Umgeschlagene Nägel.

Nageldurchmesser mm	Schlankheit	Leibungsdr. kg/cm ²	Lastwechsel	
5,0	21	80	1 230 000	Kein Bruch
4,2	22	80	593 000	„ „
4,2	25	80	360 000	Nagelbruch
4,2	22	100	594 000	Kein Bruch
4,2	25	100	416 000	„ „

Beim Leibungsdruck von 80 kg/cm² ist ein Nagelbruch zu befürchten bei einem Schlankheitsgrad zwischen 22 und 25.

Nägel von solchem Schlankheitsgrad bis 22 ertragen offenbar beliebig viele Lastwechsel auch bei dem hohen Leibungsdruck von 100 kg/cm².

Nägel in feuchten Bohlen.

1 Druckstoß aus feuchten Bohlen mit etwa 30 Gew.-% Wassergehalt wurde mit 32 Nägeln mit 4,2 mm Durchmesser und der Schlankheit 22 genau wie früher hergestellt, deren Enden quer zur Faser umgeschlagen wurden. Nach 400maligem Lastwechsel mit einem obersten Leibungsdruck von 80 kg/cm² wurde das erste Mal und nach 35 000 Lastwechsel das zweite Mal die Spannungsverschiebungslinie aufgetragen.

Es zeigte sich vollkommene Proportionalität etwa bis zu einem Leibungsdruck von 60 kg/cm².

Die Neigung der Geraden hat sich durch die Steigerung der Lastwechsel von 400 auf 35 000 nicht geändert.

4. Schlußfolgerungen:

1. Will man eine zweifache Sicherheit gegen Bruchgefahr bei den Nägeln, so kann man bei genagelten Bohlentragwerken mit häufigem Lastwechsel

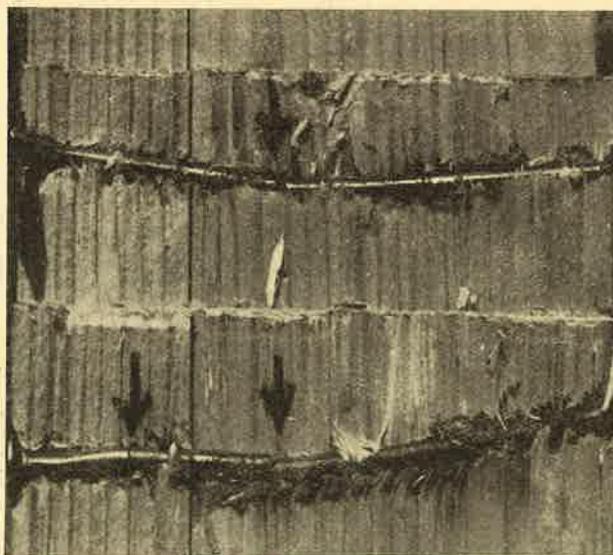


Abb. 32. Nach dem Dauerversuch aufgeschnittener Versuchskörper. Die beiden Nägel sind an mehreren Stellen ohne wesentliche Formänderung gebrochen.

- den Leibungsdruck von 50 kg/cm^2 und den Schlankheitsgrad von höchstens 25 zu lassen.
2. So beanspruchte Nagelverbindungen vergrößern weder ihre federnden noch ihre gesamten Formänderungen im Laufe zahlreicher Belastungswechsel in unzulässiger Weise.
 3. Die Verbindung kommt erst nach einigen Lastwechseln in ihren richtigen Wirkungszustand,

bei dem dann ungefähr Proportionalität zwischen Belastung und Formänderung herrscht und die Formänderungen kleiner ausfallen als in der ersten Periode.

4. Die umgeschlagenen Nagelenden strecken sich durch den Lastwechsel nicht gerade und behalten ihre gute Wirkung.
5. Der genietete Nagel brach früher als der umgeschlagene.

Teil C

Dauerversuche mit genagelten vollwandigen Biegeträgern aus Holz.

Beim Holzbrückenbau ist die Verwendung von Kanthölzern als Hauptträger auf kleine Öffnungen beschränkt. Das Zusammenfügen von mehreren Kanthölzern übereinander durch Dübel mit Klemmschrauben ist nicht besonders wirtschaftlich, da durch die Weichheit der Dübelverbindung mind. $\frac{1}{4}$ des theoretischen Widerstandsmomentes verloren geht. Es wurde daher versucht, an Stelle der verdübelten Träger vollwandige Holzbiegeträger zu konstruieren mit zwei ausgesprochenen Gurten und einem sie verbindenden vollwandigen Steg aus Bohlen.

Jede Gurt bestand aus zwei lotrechten Bohlen und einer sie verbindenden waagrechten Bohle als Gurtplatte. Der Steg wurde gebildet durch zwei Bohlenlagen, welche sich unter einem Winkel von 120° kreuzten.

I. Vorversuch.

Man wolle zunächst sehen,

1. ob sich die Nägel für solch schwere Brückenträger eignen,
2. ob Alligatorendübel für dünne Bohlen brauchbar sind,
3. ob eine Bohle als Gurtplatte wirksam mitträgt.

Die Gurt- und Stegbohlen waren Tannen- oder Fichten-Schreinerware. Eine Lage der schrägen $2,4 \text{ cm}$ dicken Stegbohlen wurde durch einschneittige Nägel $4,6 \text{ mm}$ dick mit der $12/5 \text{ cm}$

starken Gurtseitenbohle vernagelt unter gelegentlicher Zwischenschaltung von Alligatorscheiben $\varnothing = 7,5 \text{ cm}$. Die so entstandenen beiden vollwan-

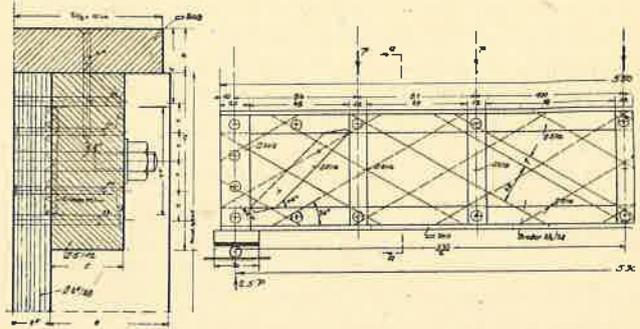


Abb. 34. Konstruktion des 1. Versuchsträgers (Einzelträger). (Die Druckstrebe im Endfeld wurde nicht ausgeführt). Die Kreise stellen die Alligatordübel dar.

digen Scheiben wurden durch 6 mm dicke Nägel von 180 mm Länge in Ober- und Untergurt zu einem einheitlichen Träger verbunden. Schließlich wurde die obere und untere Bohle $20/3 \text{ cm}$ aufgenagelt mit $4,6 \text{ mm}$ dicken und 80 mm langen einschneittigen Nägeln. Die Steifen über dem Auflager waren $20/8$, sonst $12/8 \text{ cm}$ und hielten mit $\frac{1}{2}''$ Bolzen die zweiteilige Gurt und den Steg sicher zusammen. (Abb. 34.)

Der $5,50 \text{ m}$ lange Träger von 81 cm Höhe wurde bei einer Stützweite von $5,30 \text{ m}$ durch zwei symmetrische gleiche Einzellasten beansprucht. Sein Trägheitsmoment war $599\,400 \text{ cm}^4$, sein Widerstandsmoment $14\,800 \text{ cm}^3$. Es wurden zwei statische Versuche durchgeführt; von ihnen hatte der erste Versuch bei einer Biegespannung von

98 kg/cm^2 die Durchbiegung von 34 mm , der zweite Versuch bei einer Biegespannung von 168 kg/cm^2 die Durchbiegung von 60 mm .

Bei der zulässigen Biegespannung von 100 kg/cm^2 betrug die Durchbiegung also $\frac{1}{155}$.

Zwischen beiden Versuchen lagen einige hundert Lastwechsel zwischen 0 — 100 kg/cm^2 Biegespannung. Da die Obergurt nicht seitlich geführt war, wich sie beim zweiten Versuch durch Verdrehung langsam zur Seite, knickte also richtig aus und erschöpfte dadurch die Tragkraft des Trägers schon bei einer Druckspannung in der Obergurt von nur 168 kg/cm^2 .

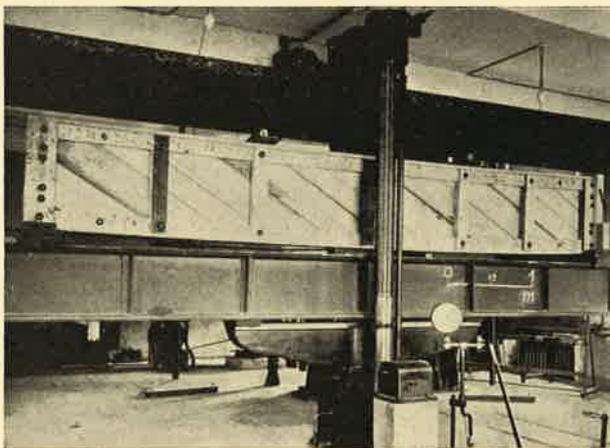


Abb. 33. Der Einzelträger mit zwei Einzellasten bei $5,30 \text{ m}$ Stützweite auf einer 500 t Maschine mit Wechsellast.

Ergebnis.

Die Abbildung 35 zeigt, daß beim Träger die Nägel erst nach einer Anzahl Lastwechsel richtig wirken und daß dann die Abhängigkeit von Spannung und Durchbiegung der Proportionalität zustrebt. Nach längerem Einspielen werden die Verbindungen wesentlich steifer, also besser.

Aus der Herstellung des Trägers und dem Versuch ergaben sich folgende Lehren:

1. Die Nägel wirken ausreichend als Verbindungsmittel im Steg, in der Gurt und zwischen Steg und Gurt. Die Vernagelung versteift sich mit der Zeit.
2. Die angenagelte Gurtplatte trägt wirksam mit.
3. Die Alligatoren eignen sich für den Zusammenbau von soch dünnen Bohlen nicht. 1/2" Klemmschrauben sind zu schwach.
4. Das Zusammennageln erst einer Hälfte und nachträgliches Zusammenfassen zum einheitlichen Träger ist zeitraubend und unzweckmäßig.
5. Die Versuche können wegen der Knickgefahr der Obergurt nur an Trägerpaaren durchgeführt werden.

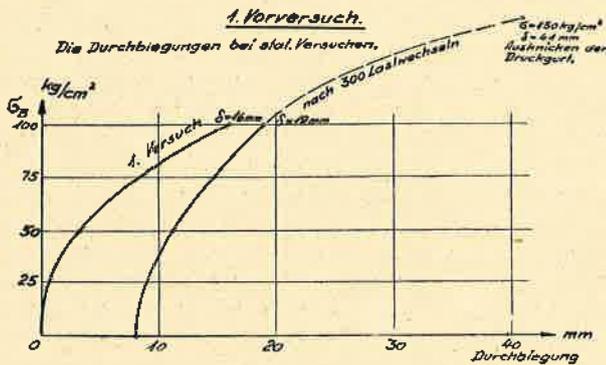


Abb. 35. Beziehung zwischen Biegespannung und Durchbiegung beim 1. Versuchsträger.

II. Hauptversuche.

Für die weiteren Träger wurden die Stegbohlen 3 cm und alle Gurtbohlen einheitlich 5 cm dick genommen. Da die Alligatoren für die schwachen Bohlen sich nicht eigneten, traten an ihre Stelle bei den weiteren Trägern Bulldoggscheiben. Die Kopfplatte der Gurt wie die beiden Seitenteile wurden nunmehr aus einer 5 cm starken Bohle gebildet, nachdem sich beim Vorversuch erwiesen hatte, daß die Verbindung der Gurtplatte mit der übrigen Gurt durch Nägel für ein gutes Zusammenwirken genügte. Um eine sichere Aussteifung der gedrückten Obergurt in der waagrechten zu erreichen, wurden immer zwei Hauptträger durch Streben über der Obergurt und durch ein Kreuz an jedem Auflager zu einem einheitlichen Tragwerk verbunden. (Abb. 36.) Die kräftige lotrechte Aussteifung mit 1/4" Klemmbolzen war wieder über jedem Auflager und unter jedem Lastangriff angeordnet.

Die 3 cm dicken Stegbohlen wurden durch einschneittige 4,6 mm dicke, 80 mm lange Nägel

(Schlankheit 13) verbunden, deren überstehendes Ende quer zur Faser umgeschlagen wurde. Die Verbindung zwischen Gurt und Steg wurde durch zweischnittige 6 mm dicke, 180 mm lange Nägel (Schlankheit 27) hergestellt. Da die durchgehenden Nägel mit umgeschlagenen Enden aber allein die Schubkraft streckenweise nicht aufnehmen konnten, wurde zu ihrer Unterstützung in Auf lagernähe die erforderliche Anzahl von Bulldoggscheiben $d = 9,5$ cm noch angeordnet. Die waagrechte Gurtplatte hatte 4,6 mm dicke, 120 mm lange Nägel (Schlankheit 26) und 150 mm lange Schlüsselschrauben $d = 13$ mm (Schlankheit 12).

Die zulässige Belastung betrug beim:

9,5 cm Bulldog	2500 kg
4,6 mm Nagel, einschneittig, mit Leibungsdruck 50 kg/cm ²	115 „
6 mm Nagel, zweischnittig, mit Leibungsdruck 80 kg/cm ²	288 „
13 mm Holzschraube, einschneittig mit Leibungsdruck 50 kg/cm ²	325 „

Der Anschluß der Kopfplatte einer jeden Gurt brauchte im	1.	2. Feld
einschnittige 4,6 mm Nägel	26	15 Stück
einschnittige Holzschrauben $\varnothing 13$ mm	10	5 „

Der Anschluß einer Gurt an den Steg brauchte im	1.	2. Feld
Bulldog $\varnothing = 9,5$ cm	3	1 Paar
zweischnittige Nägel 6 mm	19	15 Stück

Beim ersten Trägerpaar waren die Nägel und Holzschrauben in der Kopfplatte nicht versetzt wie beim zweiten Paar. Jeder Klemmbolzen von 1/2" der Gurt durchfuhr nur zwei Krallenscheiben (Bulldogs), während beim zweiten Trägerpaar jeder Klemmbolzen 3/4" hatte und drei Bulldoggs zusammenfaßte, da noch einer zwischen die beiden Stegbretter gelegt wurde.

Beim 6 mm Nagel betrug der Abstand in Kraft- richtung	
im 1. Feld	8 d = 5 cm,
im 2. Feld	16 d = 10 cm.



Abb. 36. Der erste Zwillingsträger mit 4,30 m Stützweite und vier gleichgroßen Einzellasten in der 500-t-Wechselmaschine.

Durch Anlegen paralleler aber zur Faser schräger Nagelrisse kamen hintereinander gelegene Nägel nicht in die gleiche Faser und gelang es, die Spaltgefahr zu vermindern. Einige unvermeidliche Spaltrisse haben sich bis zuletzt nicht als gefährlich erwiesen.

Bei Holz ist es besonders wichtig, die lotrechte Tragebene durch kräftige Aussteifungen zwischen den beiden Gurten und über den vollwandigen Steg hinweg zu sichern. Sie wurden daher in kräftiger Ausbildung über den beiden Auflagern und unter den vier Lastangriffspunkten vorgesehen. Die Aussteifungen wurden paarweise durch kräftige Klemmschrauben verbunden und hielten dadurch unabhängig von der Klemmwirkung der umgeschlagenen Nägel die zweiteilige Gurt sicher zusammen.

Das Trägheitsmoment des Trägers war 480 800 cm⁴, das Widerstandsmoment 13 800 cm³. Die Biegespannung von 100 kg/cm² wurde erzeugt durch ein größtes Biegemoment von 13,8 tm und durch eine Belastung von 4 × 5,6 t, denn die Stützweite betrug bei allen Versuchen einheitlich 430 cm bei einer Trägerlänge von 450 cm.

1. Die Beobachtungen.

Es wurde das Verhalten der Konstruktion bei der ersten statischen Belastung, dann aber auch nach häufig wiederholter Belastung durch folgende Messungen festgestellt:

1. die größte Durchbiegung in Trägermitte,
2. die Verschiebung der oberen Kopfplatte gegen die Seitenteile der Gurt am Auflager,
3. die gegenseitige Verschiebung in zwei Richtungen zweier sich kreuzender Stegbohlen in Auflagernähe,
4. die Verschiebung der Obergurt gegen die Untergurt am Trägerende.

Benutzt wurde unsere stehende 500-t-Maschine mit aufgelegtem 6 m langem Biegetisch. Mit Hilfe der Lastwechsellvorrichtung wurde nun die Konstruktion in gleichem Rhythmus tagelang belastet, wobei die Beanspruchung ungefähr zwischen der Biegespannung 0 und 100 kg/cm² wechselte.

1. Statischer Versuch, Belastung in 6 Stufen bis 100 kg/cm² Biegespannung.

2. 5000 Lastwechsel von 0 bis 100 kg/cm² Biegespannung.
3. Statischer Versuch in 6 Stufen bis 100 kg/cm² Biegespannung.
4. Weitere 15 000 Lastwechsel von 0 bis 100 kg/cm² Biegespannung.
5. Statischer Versuch in 6 Stufen bis 100 kg/cm² Biegespannung.
6. Weitere Lastwechsel (1560 beim ersten Trägerpaar und 1280 beim zweiten Trägerpaar) von 0 bis 125 kg/cm² Biegespannung durch nur 2 Einzelasten.
7. Statischer Versuch in 7 Stufen bis 125 kg/cm² Biegespannung.
8. Fortbelasten bis zum Erschöpfen der Tragkraft.

2. Die Messungen beim ersten Trägerpaar.

Die einzelnen Meßstellen zeigt Abbildung 39. Auf der linken Seite ist das Ergebnis der statischen Versuche aufgezeichnet.

Auf der rechten Seite sieht man die Zunahme der größten Formänderung bei 100 kg/cm² Biegespannung mit den Lastwechseln.

Die Spannungsverschiebungslinien der statischen Versuche strecken sich erfreulicherweise und streben dem geraden Verlauf, also der Proportionalität zu, vor allem bei der wichtigen Durchbiegung in Trägermitte. Die waagrechte Gurtplatte wird durch ihre Nägel und Holzschrauben allmählich so wirksam zur Arbeit herangezogen, daß sie sich kaum mehr gegen die beiden seitlichen Gurtbohlen verschieben kann. (Meßstelle 9/10.)

Die Vernagelung der gekreuzten Stegbohlen verhindert nach einigem Einspielen unangenehme Verschiebungen und erzwingt den einheitlich wirkenden vollwandigen Steg.

3. Die Messungen beim zweiten Trägerpaar.

Beim zweiten Trägerpaar zeigt sich das gleiche Bild, da es in der Ausbildung nur durch Hinzutritt eines dritten Bulldoggs an jedem Klemmbolzen sich unterscheid. Der häufige Lastwechsel zwischen 0 und 100 kg/cm² Biegespannung wirkt auch hier nur günstig auf die Abhängigkeit zwischen Belastung und Formänderung (Abb. 40). Die Einschaltung eines dritten Bulldoggs an jeder Klemmschraube — zwischen den beiden Stegbohlen — bringt keine Vorteile. (Meßstelle 5/7, 6/8.)

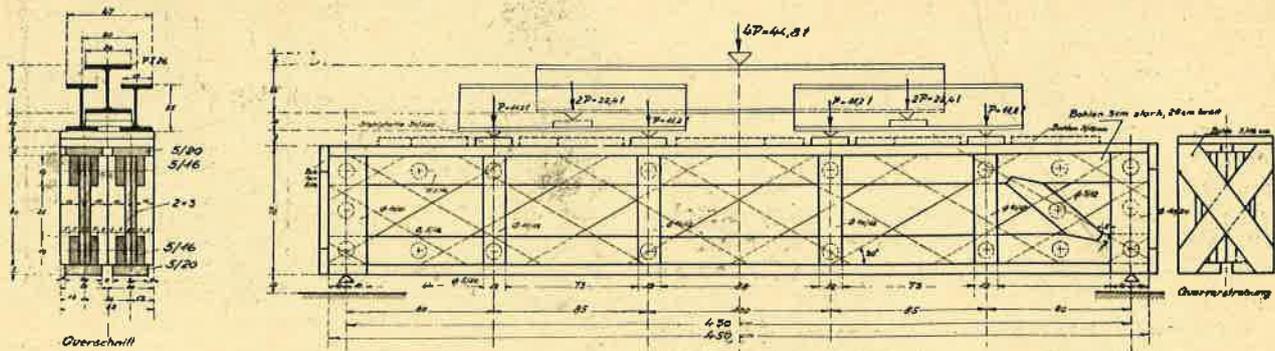
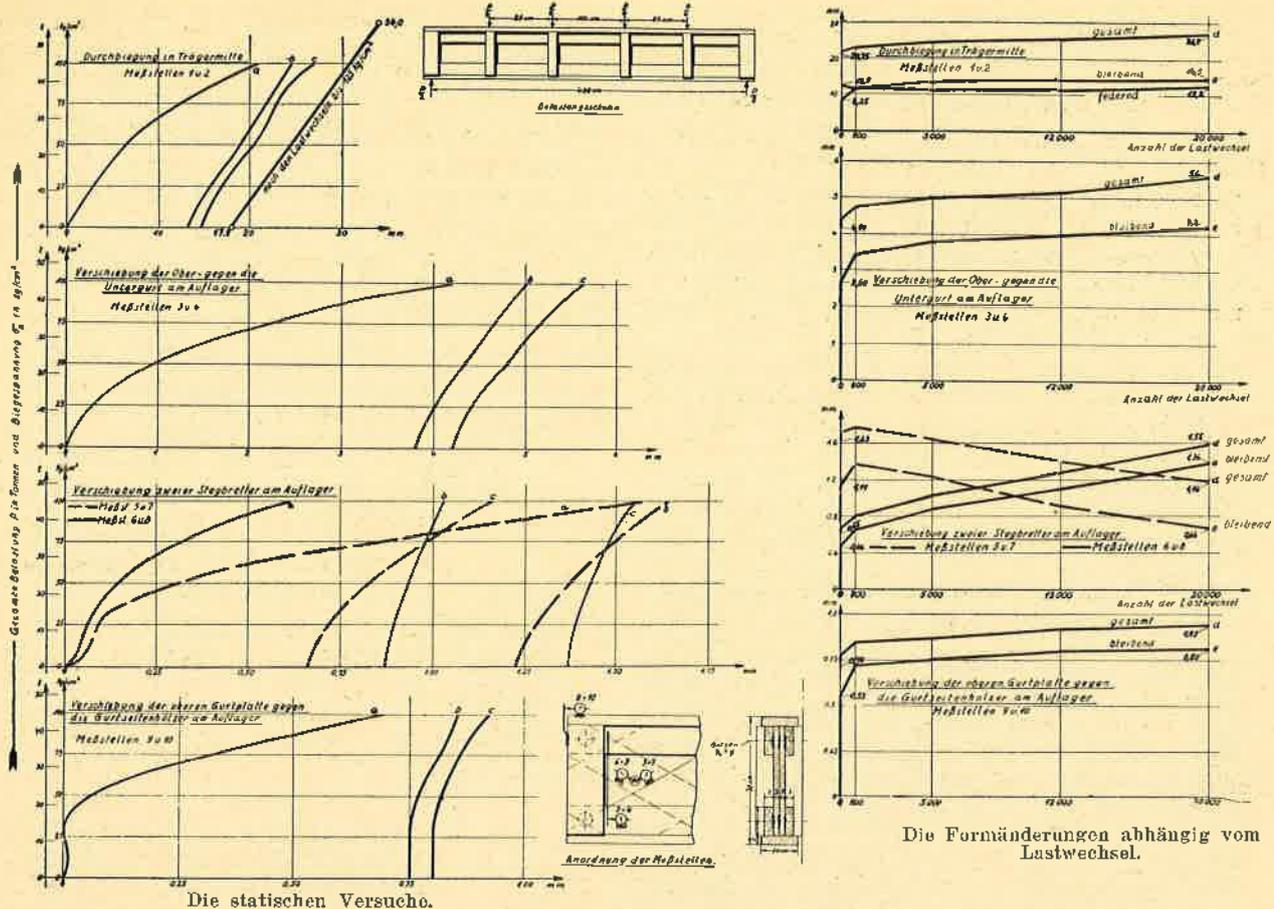


Abb. 37 u. 38. Konstruktion des Zwillingssträgers. (Die Druckstöße im Endfeld war nicht ausgeführt).



Die statischen Versuche.

Abb. 39. Die beim ersten Trägerpaar gemessenen Verschiebungen und Durchbiegungen

a: bei der 1. Belastung
 b: „ „ 5 000. „
 c: „ „ 20 000. „

4. Die Zunahme der Formänderungen durch den Lastwechsel.

Durch 20 000 Lastwechsel nimmt die gesamte Durchbiegung um rund 20 % beim 1. und um rund 30 % beim 2. Trägerpaare zu. Die federnde Durchbiegung ändert sich aber beide Male nur um 8% (Abb. 41).

Diese Tendenz, sich nur langsam zu vergrößern, zeigt sich auch bei allen anderen Messungen.

Damit ist erwiesen, daß solche Biegeträger aus Holzbohlen sich gut halten und nicht lahm werden unter häufig wechselnder Beanspruchung:

bei einem größten Leibungsdruck des einschneidigen Nagels oder der Holzschraube von 50 kg/cm²,

bei einem größten Leibungsdruck des zweischneidigen Nagels oder der Holzschraube von 80 kg/cm²,

bei einer Belastung einer 9,5 cm Krallenscheibe mit 2,5 t.

Dabei erhebt sich freilich die wichtige Frage nach der dann noch vorhandenen Bruchsicherheit.

5. Verhalten der Holzschrauben und Nägel.

Es werden sich die Verbindungsmittel, Nägel, umso besser verhalten, je kleiner ihr Schlankheitsgrad ist.

Da der Nagel beim Einschlagen die Holzfasern verdrängt, wird er von diesen eingeklemmt; es ist aber zu befürchten, daß beim Austrocknen des Holzes diese Klemm- und Haftwirkung an den Nägeln stark nachläßt. Um den Zusammenhang zu sichern, wird man daher auch bei Nagelverbindungen eine ausreichende Anzahl durchgehender Klemmbolzen vorsehen, welche beim Schwinden des Holzes nachgezogen werden und ihre Klemmwirkung weiter ausüben können.

An manchen Trägerstellen sind solche durchgehenden Klemmbolzen nicht möglich wie z. B. in der Kopfplatte der Gurt. Hier verwendet man neben den Nägeln zweckmäßig Holzschrauben mit Vierkantkopf ohne Unterlagscheibe in versetzten Reihen. Auch wenn das Holz schwindet, haften diese Schrauben fest und ein Klaffen der Einzelteile kann durch Nachziehen wieder zum Verschwinden gebracht werden.

Aus allen aufgezeichneten Kurven ergibt sich ein einwandfreies Verhalten der Nägel. Nirgends zeigte sich bei den Versuchen, selbst beim Überschreiten der zulässigen Last, eine Neigung, daß die umgeschlagenen Nagelenden sich aufbiegen. Richtig entworfene Nagelbilder und nicht zu schlanke Nägel verleihen dem Tragwerk eine gute

Steifigkeit; auch die 5 cm dicke Gurtplatte wird von ihnen zur planmäßigen Arbeit gezwungen.

6. Das Verhalten der Bulldogscheiben.

Die Bulldogscheiben mit $\varnothing = 9,5$ cm zur Verbindung des Steges mit der Gurt über den Auflagern wurden bis zu 4 t/Stück beansprucht. Auch bei den bis zur Erschöpfung ihrer Tragkraft beanspruchten Trägern zeigten sich nach dem Auseinandernehmen die Eingriffstellen der Zähne im Holz beim 1. Trägerpaar als tragkräftige, scharf umgrenzte Schlitze (Abb. 42). Nur an einer einzigen Bulldogscheibe waren die Holzfasern neben einigen Zahnschlitzten sichtbar ausgeknickt. Da die Dübel sich überraschend gut verhalten und sich auch auf dem Werkplatz bequem haben einbauen lassen, werden die Krallenscheiben bei schwerbelasteten Tragwerken mit Vorteil an gefährdeten Stellen zur Unterstützung der Nägel herangezogen.

7. Das elastische Verhalten und die Steifigkeit der Bohlenträger.

Bei dem Einzelträger des Vorversuches und den nachfolgenden beiden Trägerpaaren haben sich die federnden Durchbiegungen im Verlaufe der Dauerbenützung nicht nennenswert vergrößert. Man konnte aus ihnen auf den gemittelten Elasti-

zitätsmodul der genagelten Bohlenkonstruktion schließen. Er errechnet sich für 100 kg/cm² Biegespannung

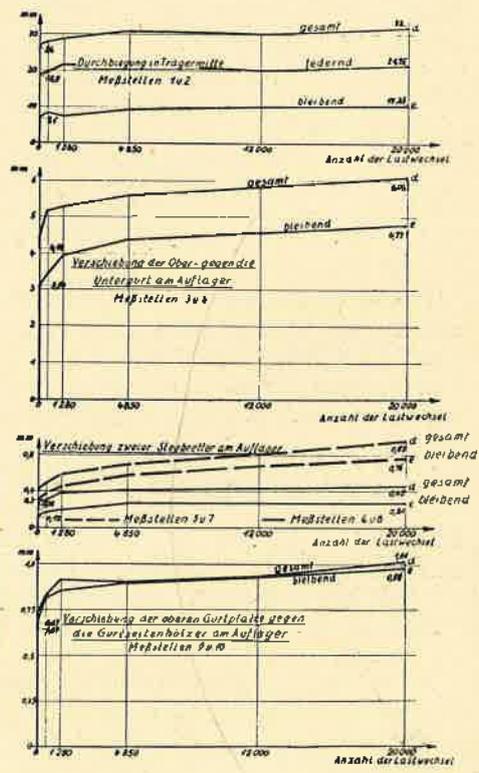
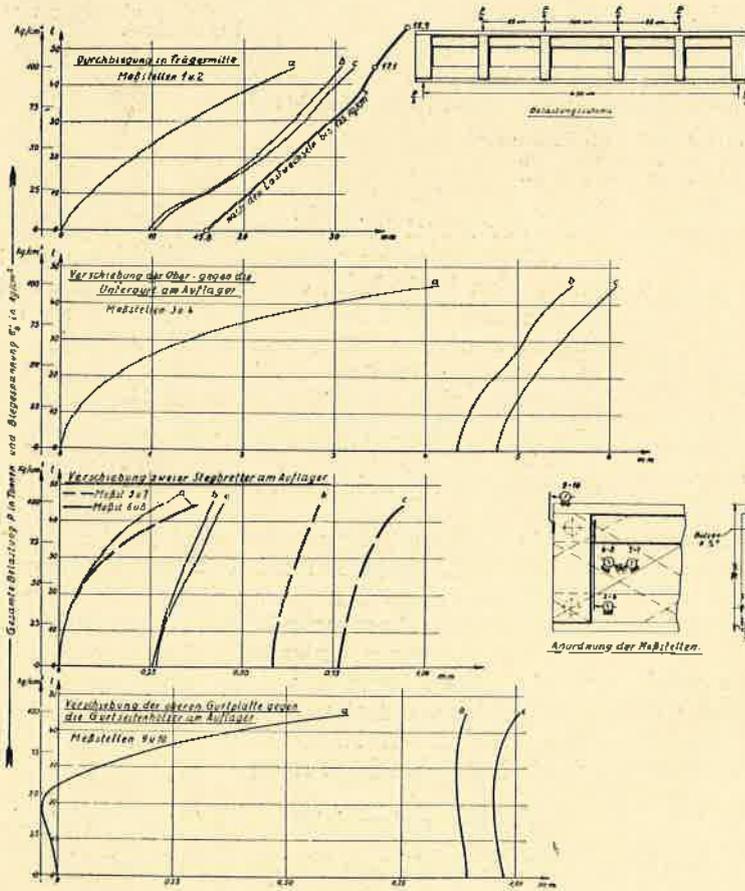
a) beim Einzelträger zu $E = 73\,500$ kg/cm² beim 1. stat. Versuch,
 $E = 66\,800$ nach 300 Lastwechseln,

b) beim 1. Trägerpaar $E = 29\,900$ kg/cm²,
c) beim 2. Trägerpaar $E = 45\,000$ kg/cm²
beim ersten statischen Versuch.
 $E = 25\,900$ kg/cm² $E = 46\,000$ kg/cm²

nach dem letzten statischen Versuche, also nach 20 000 Lastwechselversuchen.

Unter der zulässigen Biegebeanspruchung von 100 kg/cm² betrug in Trägermitte am Ende des Lastwechselversuchs:

	beim Einzelträger	1. Trägerpaar	2. Trägerpaar
die federnde Durchbiegung	$\frac{1}{480}$	$\frac{1}{200}$	$\frac{1}{350}$
die bleibende Durchbiegung	$\frac{1}{280}$	$\frac{1}{135}$	$\frac{1}{160}$
der Stützweite.			



Die Formänderungen in Abhängigkeit vom Lastwechsel.

Die statischen Versuche. Abb. 40. Die beim zweiten Trägerpaar gemessenen Verschiebungen und Durchbiegungen.

a: bei der 1. Belastung
 b: " " 5 000. "
 c: " " 20 000. "

Beim ersten Trägerpaar stieg die größte Durchbiegung von 30 mm nach 10stündigem Lastwechsel nur auf 32 mm nach 54stündigem Lastwechsel.

Die kräftigen Gurten werden also durch die umgeschlagenen Nägel im Verein mit den Krallenscheiben innig mit dem Steg aus gekreuzten Bohlen verbunden und erzeugen dadurch eine bemerkenswerte Steifigkeit.

Bei beiden Trägerpaaren wurde die größte Tragkraft kurz vor dem Bruch erreicht. Um die lastverteilenden Stahlträger nicht überzubeanspruchen, traten vor dem Bruch bei beiden Trägerpaaren an Stelle der 4 nur 2 Einzellasten. Bei Anwachsen der Belastung bis in die Nähe der Tragkraft zeigten sich übermäßige innere Formänderungen durch laute Geräusche an.

	beim 1. Trägerpaar	beim 2. Trägerpaar
1. Knacken bei	148 kg/cm ²	142 kg/cm ²
2. „ „	153 „	153 „
größte Tragkraft bei	198 „	190 „

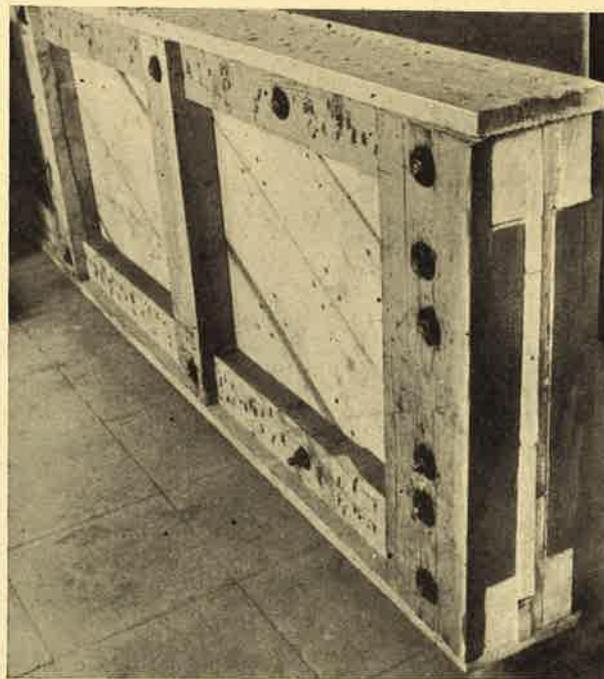
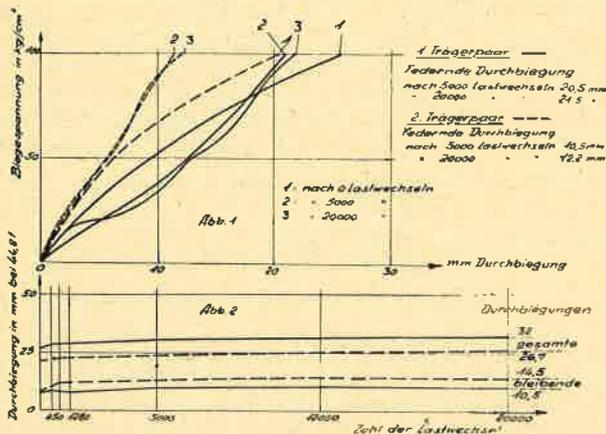


Abb. 43. Der Träger vom Vorversuch. Abb. 34. Ansicht auf die Stirnfläche.

Der Unterschied gegen den Elastizitätsmodul eines massiven Kantholzes aus Tanne oder Fichte mit etwa $E = 100\,000 \text{ kg/cm}^2$ beträgt gemittelt 50%, da sich aus unseren E-Werten ein Mittel von $53\,000 \text{ kg/cm}^2$ ergibt.

Mit Rücksicht auf die Durchbiegung wird man bei hölzernen Brücken gerne große Trägerhöhen nehmen. Dies war leider bei diesen Versuchen nicht möglich, da unsere 500-t-Maschine für die lastverteilende Konstruktion und den Versuchs-träger selbst keine größere Höhe zur Verfügung stellte.

8. Das Verhalten beim Bruch.

Beim Einzelträger knickte die ganze Obergurt schon weit vor der erwarteten Bruchlast aus.

Beim ersten Trägerpaar riß die untere Gurtplatte dort, wo neben einem kleinen Ast noch eine Holzschraube ihren Querschnitt schwächte; aber auch an den seitlichen Gurtbohlen zeigten sich Zugrisse.

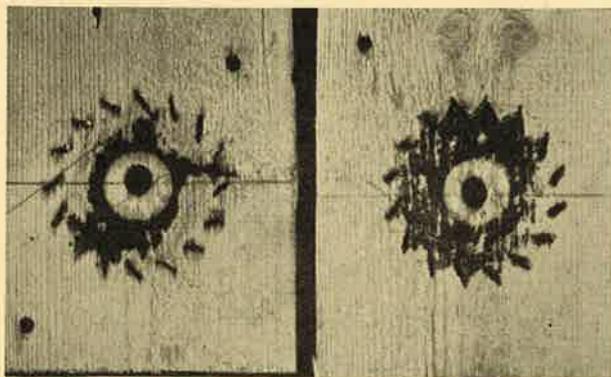


Abb. 42. Zwei Hölzer aus dem ersten Trägerpaar nach dem Bruchversuch auseinandergenommen. Die Eingriffstellen der Zähne der Bulldogscheiben sind unversehrt geblieben.

Beim zweiten Trägerpaar konnte der Bruch nicht erreicht werden, weil die Prüfmaschine eine weitere Vergrößerung der Durchbiegung des Holz-trägers nicht mehr erlaubte.

Das Zusammenfassen der Obergurten beider Träger durch waagrechte Streben verhinderte ein seitliches Ausknicken, wie es beim Vorversuch aufgetreten war. Es möge beachtet werden, daß die letzte Lastwechselperiode bei beiden Trägerpaaren als obere Biegespannung 125 kg/cm^2 hatte und daß trotzdem sich keine bedenklichen Formänderungen weder am Holz noch an den umgeschlagenen Nagelenden gezeigt haben.

9. Zusammenfassung.

1. Schwere Brückenträger unter häufigem Lastwechsel mit kleinen Stützweiten lassen sich als Vollwandträger aus Bohlen zusammennageln.
2. Zum Anschluß der Kopfplatte an die Gurtbohlen genügen vielleicht Nägel; einen Teil davon ersetzt man aber doch zweckmäßig durch Holzschrauben, um die Klemmwirkung zu sichern.
3. Für den Anschluß der Gurt an den Steg genügen in Auflagernähe die Nägel nicht mehr ganz. Man fügt zweckmäßig Krallenscheiben (Bulldogs etc.) hinzu.
4. Der aus gekreuzten Bohlen gebildete Steg nimmt die Schubkraft auch dann sicher auf, wenn man ihn nur nagelt und nicht mit Krallenscheiben zwischen den Brettlagen versieht.
5. Erst nach einer gehörigen Anzahl von Lastwechseln kommen die Nagelverbindungen zur endgültigen Wirkung.
6. Im Laufe der Benützungszeit nehmen alle Formänderungen kaum zu. Durch zahlreiche Lastwechsel ändert sich am federnden Verhalten der genagelten Brückenträger kaum etwas.
7. Die kurz umgeschlagenen Nägel haben sich vor Erschöpfen der Tragkraft nicht geöffnet. Sie haben sich also auch hier bewährt.
8. Das Nagelbild muß sorgfältig entworfen werden, um ein Spalten der Bohlen zu vermeiden. Wenige, trotz aller Vorsicht auftretende Spalt- risse schädigen die Tragkraft kaum.

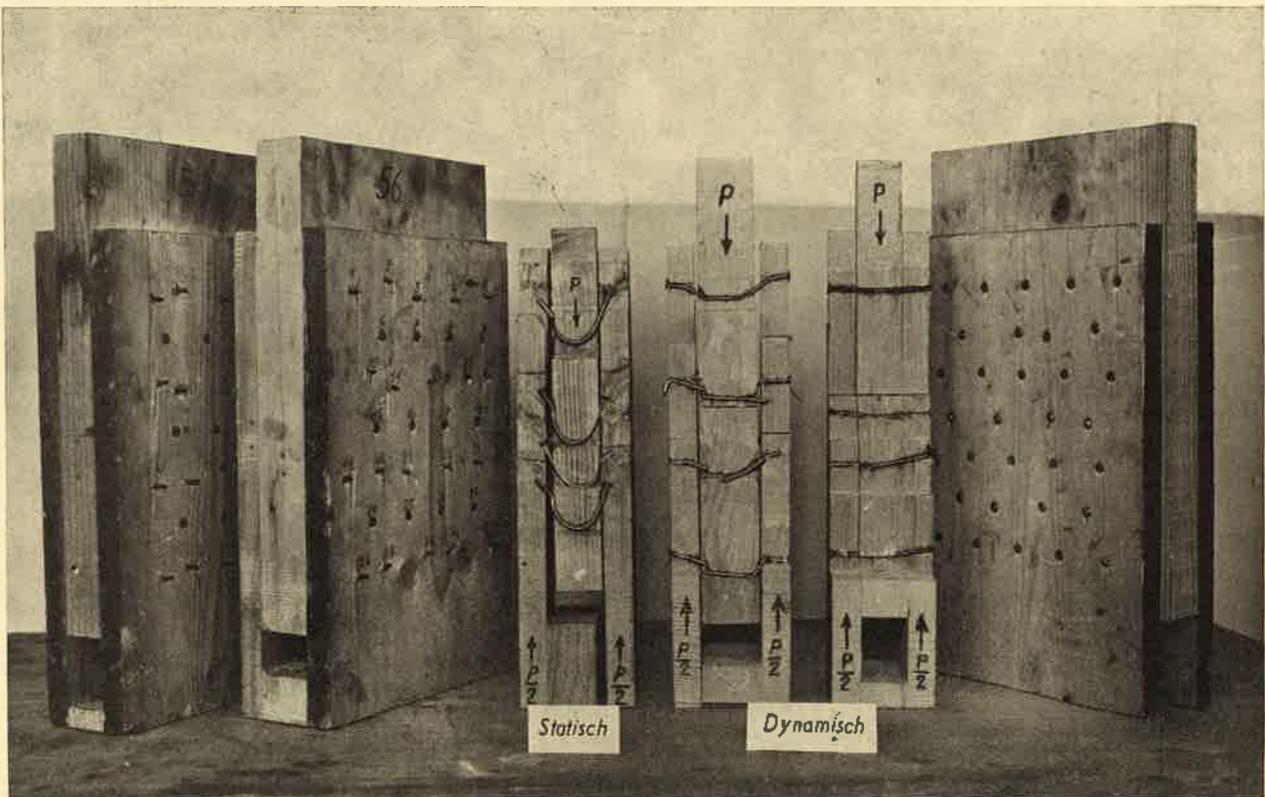


Abb. 44. Festigkeitsversuche mit genagelten Druckstößen.

Links zwei Versuchskörper mit umgeschlagenen Nägeln, rechts ein Versuchskörper mit vernieteten Nägeln, in der Mitte drei aufgeschnittene Versuchskörper, die bis zum Bruch beansprucht waren.

Beim statischen Versuch haben sich die Nägel unter sehr starker Verkrümmung aus den Seitenhölzern herausgezogen, beim dynamischen Versuch sind die Nägel an mehreren Stellen ohne übermäßige Formänderung glatt abgebrochen.

Teil D

Ergänzungsversuche

1. Der Einfluß der Holzfeuchtigkeit auf die Tragkraft und Steifigkeit der Nagelverbindungen.

Es wurden Fichtenholz-Druckstöße in der früheren Ausbildung mit 32 zweischnittigen Nägeln von 4,2 mm Dicke und 120 mm Länge

- a) aus trockenen Brettern genagelt und in diesem Zustande sofort belastet,
- b) aus trockenen Brettern genagelt und nach 4 Wochen Luftlagerung belastet,
- c) aus feuchten Brettern (24—35% Feuchtigkeit) genagelt und sofort belastet,
- d) aus feuchten Brettern genagelt und nach 4 Wochen Luftlagerung belastet.

Der Schlankheitsgrad der Nägel betrug im Mittelholz 13,1, über alle Holzdicken 25,5.

Es muß hier vermerkt werden, daß bisher als „Schlankheit“ der Nägel der Quotient aus Klemmlänge der Nägel geteilt durch Nageldurchmesser bezeichnet wurde. Um unsere Versuche mit denen von Herrn Dr.-Ing. Stoy vergleichen zu können, wird im folgenden als Gegensatz hierzu als „Schlankheit“ der Nägel bezeichnet die Stärke des Mittelholzes geteilt durch Nageldurchmesser.

Alle Körper wurden unmittelbar nach der Herstellung auf der 10 t Lastwechsellmaschine 400 mal von 13 auf 80 kg/cm² Leibungsdruck im Mittelholz belastet; anschließend hieran wurde die 1. Spannungsverschiebungslinie gemessen; dann wurden die Lastwechsel in den gleichen Grenzen fortgesetzt bis zu insgesamt 36 000 Lastwechseln. Nun wurde die 2. Spannungsverschiebungslinie ge-

lungen etwas steifer (s. Abb. 45), die zweite Linie ist immer etwas steiler als die erste. Die nassen Bretter weisen schon nach 400maliger Belastung mit 80 kg/cm² Leibungsdruck im Mittelholz eine bleibende Verschiebung von rd. 1,5 mm auf, welche sich durch die 36 000 Lastwechsel noch um 1/2 mm vergrößert.

Die nasse Nagelverbindung ist weicher als die trockene. Die vierwöchige Trockenlagerung ändert den Charakter der Spannungsverschiebungslinie grundsätzlich nicht; die dritte-Spannungsverschiebungslinie zeigt, daß durch die Zwischenlagerung die Nagelverbindung wieder etwas weicher geworden ist.

Dies zeigt sich besonders stark bei den naß genagelten Körpern. Nach vierwöchiger Trockenlagerung war die Verbindung beim einmaligen statischen Versuch viel weicher als vorher im nassen Zustand.

Wenn man also Holzkonstruktionen aus nassen Bohlen zusammengenagelt und sie in diesem nassen Zustand häufigem Lastwechsel unterwirft und anschließend wieder entlastet, dann werden später bei neuer Belastung in getrocknetem Zustande sich erheblich größere Formänderungen einstellen, als wenn man beim Bau schon trockene Bohlen verwendet hätte. Es ist nämlich zu vermuten, daß während der 4 Wochen Ruhe- und Entlastungszeit die ursprünglich vorhandene große bleibende Formänderung sich bei den feucht genagelten Bohlenträgern viel stärker zurückbilden kann als beim trockenen Holz. Bei einer neuen Belastung freilich geht diese Rückbildung aus elastischer Nachwirkung des ursprünglich feuchten Holzes zum größten Teil wieder verloren.

Bei der Betrachtung der Tragkraft ergibt sich aber ein anderes Bild, wie aus nachstehender Liste hervorgeht.

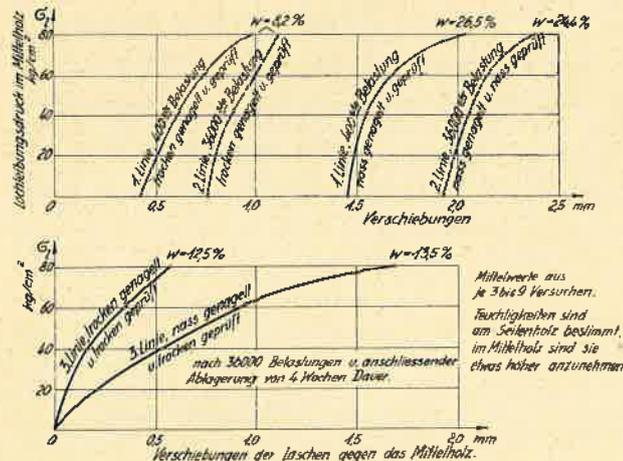


Abb. 45. Einfluß der Holzfeuchtigkeit auf die Verschiebungen.

messen; anschließend hieran wurde ein Drittel der Körper zerstört; bei den übrigen Körpern wurde erst nach vierwöchiger Luftlagerung die 3. Spannungsverschiebungslinie gemessen und dann der Bruch herbeigeführt.

Durch die vielen Belastungen werden sowohl die trockenen als auch die nassen Holzverbin-

Körper	im Mittelholz Lochleibungsdruck GIB beim Bruch kg/cm ²	Feuchtigkeit W in Holz % zur Zeit der Zerstörung	Druckfestigkeit GIB des Seitenholzes kg/cm ² (berechnet zu W = 15%)	Druckfestigkeit des Mittelholzes kg/cm ² (berechnet zu W = 15%)
--------	---	--	--	--

trocken genagelt, sofort trocken zerstört . . .	254	8,2	428	321
trocken genagelt, nach 4 Wochen trocken zerstört . . .	266	12,5	428	321
naß genagelt, sofort naß zerstört	221	24,4	385	325
naß genagelt, nach 4 Wochen trocken zerstört .	256	13,5	385	325

Die Feuchtigkeit wurde am Seitenholz bestimmt; die Zerstörung trat in allen Fällen durch Herausziehen der Nagelenden aus den Seitenhölzern ein.

Hinsichtlich der Tragkraft ergibt sich aus diesen Versuchen das Bild, daß die Bohlentragwerke unter der Feuchtigkeit leiden, wenn diese dauernd vorhanden ist, daß sie aber durchaus nicht leidet, wenn die Bohlentragwerke vor der kritischen Belastung Zeit hatten auszutrocknen.

Zusammenfassend kann man für die hier untersuchten Verhältnisse feststellen: Die Verwendung von feuchten Bohlen für Tragwerke ist ungünstig im Hinblick auf die Formänderungen, sofern während der Austrocknung das Tragwerk häufigem Belastungswechsel unterworfen ist, aber nicht im Hinblick auf die Tragfähigkeit, sofern das Tragwerk bis zur endgültigen Belastung austrocknen kann. Man hat aus den Versuchen aber keinen Anhalt dafür, wie sich Bohlentragwerke verhalten, wenn sie während ihrer Austrocknung belastet bleiben.

Will man sicher sein, daß feucht genagelte Bohlentragwerke nicht nur ihre volle Tragkraft sondern auch ihre Steifigkeit haben, so muß man sie erst austrocknen lassen, ehe man sie belastet.

2. Das Schwinden von naß genagelten Bohlen.

Es wurden 3 Fichtenbretter (mittleres Brett 5 cm, anschließend 2 seitliche Bretter 4 cm stark) 21×25 cm groß in durchnäßigem Zustand, d. h. nach 5 Tagen Wasserlagerung durch 5 Nägel von 6 mm \varnothing zu einem Versuchskörper miteinander verbunden. Die beiden äußeren Bretter wurden mit ihren Jahresringen so gelegt, daß sie sich beim Austrocknen nach außen hohl werfen mußten.

Es wurden 2 solcher Versuchskörper hergestellt, bei einem waren die Nägel so durchgeschlagen, daß sie beiderseits überstanden, beim anderen wurden die Nägel bis zum Kopfe eingeschlagen und die durchstoßenden Enden dann umgeschlagen.

Die Versuchskörper wurden nun frei so gelegt, daß sie allmählich austrocknen konnten.

Bei jedem Versuchskörper wurde nun an zwei äußeren Nägeln gemessen

- das Heraustreten der beiderseitigen Nagelenden durch das Schwinden des Holzes mit Hilfe von Meßuhren,
- der sich zwischen dem Mittelholz und den Seitenhölzern bildende Spalt mit Hilfe von dünnen Blechen (sog. Spionen). Hierzu waren von den Seiten her Löcher bis nahezu an die Nagelschäfte heran gebohrt, um den Spalt möglichst in der Nähe der Nägel messen zu können.

Als Ergebnis wurde festgestellt:

Das Mittelholz schwand, von seiner Mittelachse aus gesehen, ziemlich gleichmäßig auf beiden Seiten. Die Seitenhölzer dagegen wurden, offenbar durch die beim Verwerfen entstehenden Kräfte, mit den Rändern nach außen gedrückt, so daß die Nägel nicht so weit aus den Seitenbohlen heraustreten, als dem Schwinden entsprach.

Vernagelte nasse Bretter schwinden so stark, daß ihre Fugen sichtbar klaffen und die Reibung zwischen den Hölzern bei der Belastung nicht mehr wirkt.

3. Der Einfluß der Schlankheit der Nägel auf das statische Verhalten von genagelten Druckstößen.

Versuchskörper.

Alle Versuchskörper waren aus Fichtenbohlen ähnlich wie die früheren ausgeführt, (Abb 3.)

Die Seitenholzstärke betrug 4,8 cm, die Mittelholzstärke war veränderlich zwischen 4,8, 7,0 und 9,0 cm. Die Schlankheit des 7 mm dicken Nagels betrug also rd. 7 — 10 — 13. Die Nagelung bestand aus 22 Nägeln 70×210 mit umgeschlagenen Enden. Die Nageldichte betrug $0,63 \text{ cm}^2$ Holz je mm^2 Nagel.

Durchführung der Versuche.

Zunächst wurden alle Körper so belastet, daß sich der Lochleibungsdruck σ_1 im Mittelholz um je 20 kg/cm^2 steigerte. Jedesmal wurden die Verschiebungen der Hölzer gemessen. Nach jeder Belastung wurde wieder vollständig entlastet und wieder gemessen. Hatte der Leibungsdruck 80 kg/cm^2 erreicht, so wurde weiter 5 mal auf 80 kg/cm^2 be- und entlastet. Nach dem fünfmaligen Lastwechsel wurde wieder stufenweise be- und entlastet und die Verschiebungen gemessen. Bei einem Körper jeder Gruppe wurde dabei bis $\sigma_1 = 140 \text{ kg/cm}^2$ gegangen. Die beiden anderen Körper wurden nur bis $\sigma_1 = 80 \text{ kg/cm}^2$ belastet, anschließend weitem 5 Lastwechseln von 0 bis 80 kg/cm^2 unterworfen und erst dann wieder stufenweise bis auf 140 kg/cm^2 gebracht.

Anschließend wurden die Körper zerdrückt.

Ergebnis.

Die Spannungsverschiebungslinien (Abb. 46) für die 3 verschiedenen Schlankheiten zeigen deutlich, wie weich eine Verbindung aus schlanken Nägeln ist; bei allen drei Schlankheiten aber versteift sich die Verbindung schon nach 5 Lastwechseln. Bei schlanken Nägeln nimmt diese Versteifung nur langsam zu; bei den weniger schlanken Nägeln erreicht die Verbindung offenbar schon nach 10 Lastwechseln ihre volle Widerstandskraft.

Beim Leibungsdruck von 80 kg/cm^2 ist die Verschiebung der vernagelten Hölzer gegeneinander stark von der Schlankheit abhängig. Die kritische Verschiebung von 1,5 mm bei $\sigma_1 = 80 \text{ kg/cm}^2$ tritt auf bei einem Nagel mit einem Schlankheitsgrad von rd. 12.

Je schlanker die Nägel sind, bei desto kleinerem Leibungsdruck tritt der Bruch auf. Die Linie für P (Abb. 46d) zeigt, daß praktisch die Tragkraft des hier verwendeten 7 mm starken Nagels, ausgedrückt in kg, fast unabhängig von seiner Schlankheit ist. Die 22 zweischnittigen Nägel des Druckkörpers haben getragen:

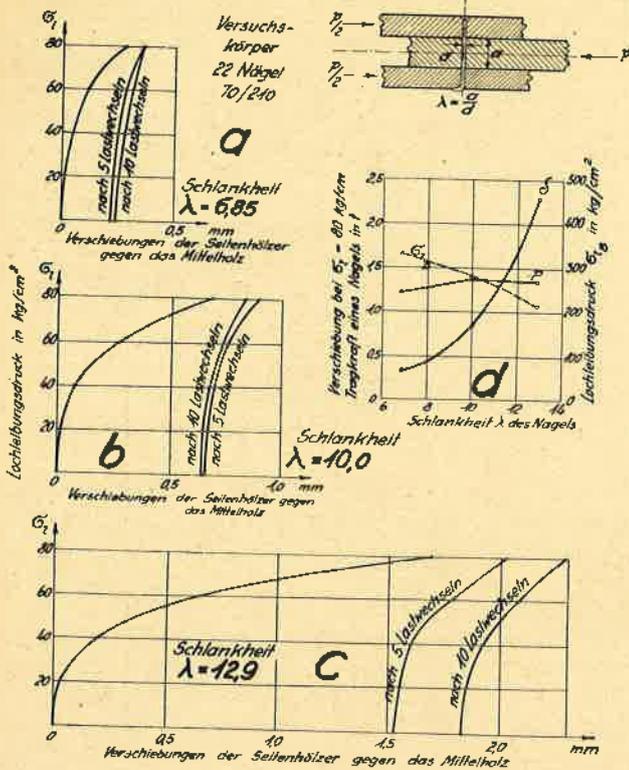


Abb. 46. Einfluß der Schlankheit eines Nagels auf die Tragkraft.

bei Schlankheit	Versuch Nr.	Bruchlast in t	Bruchlast Mittel	Bruchlast je Nagel t
6,85	a	26,0		
	b	22,3	26,5	1,20
	c	24,8		
10,00	a	28,7		
	b	30,0	30,0	1,36
	c	31,3		
12,90	a	32,0		
	b	25,5	29,6	1,35
	c	31,3		

Das Abfallen der Leibungsdruckfestigkeit wird also ausgeglichen durch die Verlängerung der Leibungsfläche im dicken Mittelholz. Praktisch scheint eben die Tragkraft eines Nagels von seiner Länge und Schlankheit wenig abhängig zu sein.

Die Tragkraft des Nagels ist von einer gewissen Stärke des Mittelholzes ab fast unabhängig von seiner Schlankheit, weil dann eben nicht mehr der Widerstand des Mittelholzes, sondern der Auszieh Widerstand im Seitenholz maßgebend ist. Dieser Auszieh Widerstand wird aber von der Stärke des Mittelholzes nicht beeinflusst.

In diesen Fällen würde sich die Berechnung von Nagelverbindungen außerordentlich vereinfachen. Es würde genügen, für jeden Nageldurchmesser eine zulässige Belastung in kg vorzuschreiben.

4. Nageldichte.

Als „Nageldichte“ wird im folgenden der für 1 mm² Nagelquerschnitt vorhandene spezifische

Aufwand an Holzfläche abzüglich der nicht nutzbaren Randzonen bezeichnet.

Bei unseren Versuchskörpern betrug die Nageldichte der 2schnittigen Nägel mit 3,8 bis 4,6 mm Durchmesser 1,04 bis 1,39 cm², gemittelt 1,2 cm².

Bei den Versuchen zur Ermittlung des Einflusses der Nagelschlankheit mit den 7 mm starken Nägeln stieg die Nageldichte aber auf 0,63 cm².

Bei der ausgeführten Dachbinderkonstruktion unserer neuen Holzhalle (s. Titelblatt) ergab sich aus rein konstruktiven Gründen folgende Nageldichte:

- Untergurt, Mittelstoß 1,52 cm² einschnittig,
- Anschluß der einen Strebe an Untergurt 0,87 cm² einschnittig,
- Anschluß der anderen Strebe an Untergurt 0,36 cm² zweisechnittig,
- Anschluß der anderen Strebe an Obergurt 0,91 cm² einschnittig.

Vor allem beim Anschluß der Wandstäbe an die Gurten besteht das Bedürfnis, die Nägel dichter zu setzen und über die Dichte von 0,5 hinauszugehen.

5. Schwächung der Druckfestigkeit von Bohlen durch Nagelung oder Bohrung.

Es wurde eine Anzahl von luftgetrockneten Bohlen aus Fichtenholz mit etwa 28 cm Breite, 5 cm Stärke und 18 cm Höhe entweder unverletzt oder mit eingeschlagenen Nägeln oder aber mit Bohrungen gleich dem Nageldurchmesser längs zur Faser gedrückt. Dabei wurden jeweils nur Proben miteinander verglichen, welche unmittelbar in Faserrichtung hintereinander aus dem gleichen Brett entnommen waren. Das Verhältnis der nutzbaren Brettfläche in cm² zur Nagelfläche in mm², d. h. die Nageldichte, betrug 0,35 bis 0,68.

In der folgenden Liste ist die Festigkeit des genagelten oder gebohrten Holzes bezogen auf die Festigkeit des unverletzten Holzes wiedergegeben. Dabei ist die Bruchlast einmal bezogen auf den ganzen Holzquerschnitt, d. h. ohne Abzug durch Schwächung durch Nagelung oder Bohrung, ein andermal bezogen auf den geschwächten Holzquerschnitt, d. h. mit Abzug der Löcher durch Nagelung oder Bohrung berechnet worden. Die Druckfestigkeit der ungeschwächten Bohle ist gleich 1 gesetzt.

Durchmesser der Nägel od. der Bohrung in mm	genagelt		gebohrt		Querschnittsverlust in % durch die Nagelung oder Bohrung
	ohne Abzug	mit Abzug	ohne Abzug	mit Abzug	
4,2	0,93	1,04	0,91	1,02	11
4,6	0,88	0,96	0,82	0,89	8
5,5	0,92	1,06	0,87	0,98	12
6,0	0,83	0,93	0,84	0,93	11
Mittel	0,89	1,00	0,86	0,95	10

Hiernach ist die Festigkeit des übrigbleibenden Querschnitts bei der Nagelung die gleiche wie die des unverletzten Holzes, während bei der Bohrung auch der übrigbleibende Querschnitt in der Festigkeit leidet. Die Nagelung schwächt das Holz etwas weniger trotz der Neigung zum Spalten als die Bohrung.

In überraschender Weise spielt die Schwächung des Holzes auch beim Druckversuch eine Rolle, selbst wenn, wie hier, das Loch durch den Nagel ausgefüllt ist und den Druck weiterleiten kann. Ein Druckstab mit 6 mm starken Nägeln hat bei einer Querschnittsverwächung von 11% an Tragkraft 17% eingebüßt, obwohl die Löcher durch die Nägel satt ausgefüllt waren. Bei der gleichen Versuchsreihe fiel die Tragkraft durch das Bohren und ohne Lochausfüllung um das gleiche Maß ab. Praktisch verringert selbst beim Druckstab sowohl die Nagelung wie die Bohrung den nutzbaren tragenden Querschnitt.

Weiterhin wurde noch eine kleine Versuchsreihe durchgeführt, um festzustellen, ob große Bohrungen auch verhältnismäßig ungünstiger sind als kleine. Die Versuche ergaben folgende Druckfestigkeiten zusammengehöriger Versuchsreihen.

Bohrungs-						
durchmesser in mm	0	4	6	7	10	14
Druckfestigkeit des						
übrig bleibenden	313	303	—	—	289	—
Querschnittes in	—	330	319	—	295	—
kg/cm ²	336	—	—	316	—	307

Hiernach wirken große Verschwächungen ungünstiger als kleine. Die Druckfestigkeit des Holzes wird durch zahlreiche dünne Nägel weniger beeinträchtigt als durch wenige dicke Nägel von dem gleichen Nutzquerschnitt.

6. Versuche über den besten Randabstand eines Nagels.

Der kleinstzulässige Randabstand eines Nagels in Richtung der Belastung und parallel zur Faser des Holzes sollte dadurch gefunden werden, daß ein Nagel mit dem Schlankheitsgrade $\lambda = 8 d$ in ein Brett eingeschlagen und dann mit Hilfe von 2 Stahllaschen beiderseits des Brettes so lange gegen den Rand des Holzes gezogen wurde, bis das Holz spaltete. Die verwendeten Bretter waren aus Fichte mit 17—18% Feuchtigkeit. Verwendet wurden Nägel von 6 und 7 mm Dicke. Der Nagel wurde eingeschlagen mit einem Randabstande gleich dem 8, 10, 12, 14, 16 fachen Nageldurchmesser. Ohne daß sich der Nagel merkbar in die Holzleibung einrißt, steigt die Belastung zunächst bis zu einer Höchstlast an. Sobald aber der kritische Leibungsdruck erreicht ist, frißt sich der Nagel ununterbrochen durch das Holz hindurch, indem er die vor ihm liegenden Fasern zerknickt. Wenn dabei sein Abstand vom Holzrande klein genug zu e_0 geworden ist, spaltet sich das Holz auf, wobei die Scherwirkung des Nagels und die Keilwirkung der zusammengedrückten Holzfasern sich unterstützen. In folgender Liste sind die Randabstände jeweils auf die Nageldurchmesser bezogen.

Randabstand	$\frac{e}{d}$	8	10	12	14	16
Spaltabstand	$\frac{e_0}{d}$	5,6	6,7	7,1	7,5	8,9
beim 6 mm Nagel						
Spaltabstand	$\frac{e_0}{d}$	5,0	7,1	7,7	9,5	10,9
beim 7 mm Nagel						

Es ist demnach nicht so, daß ein Nagel gleichen Durchmessers sich bis auf einen konstanten Abstand e_0 dem Holzrande genähert haben muß, ehe das Holz spaltet. Die Versuche zeigen vielmehr, daß bei einem ursprünglich größeren Randabstand e das Holz auch bei einem größeren Randabstand e_0 schon spaltet. Je größer also der Randabstand e_0 ursprünglich war, desto ungünstiger wird das Verhältnis $\frac{e_0}{d}$. Unter diesem Gesichtspunkt hat es keinen Zweck, den Randabstand des Nagels in Kraft- und Faserrichtung größer als 8—10 d zu machen.

Der kritische Leibungsdruck, bei dem sich der Nagel unwiderstehlich in Holz einrißt, lag zwischen 91 und 94% der Druckfestigkeit des Holzes. Bei den auf Seite 11/12 beschriebenen früheren Versuchen erreichte der kritische Leibungsdruck beim biegefesten Stahlzylinder ähnliche Werte. Genähert kann man sagen, daß beim lufttrockenen Holz der kritische Lochleibungsdruck etwa 90% der Normen-Holzdruckfestigkeit beträgt. Bei der Verbindung von Bohlen mit Bohlen durch Nägel wird dies Verhältnis ungünstiger sein, da der Nagel sich stärker verbiegt und daher sich ungleichmäßiger in das Holz einrißt.

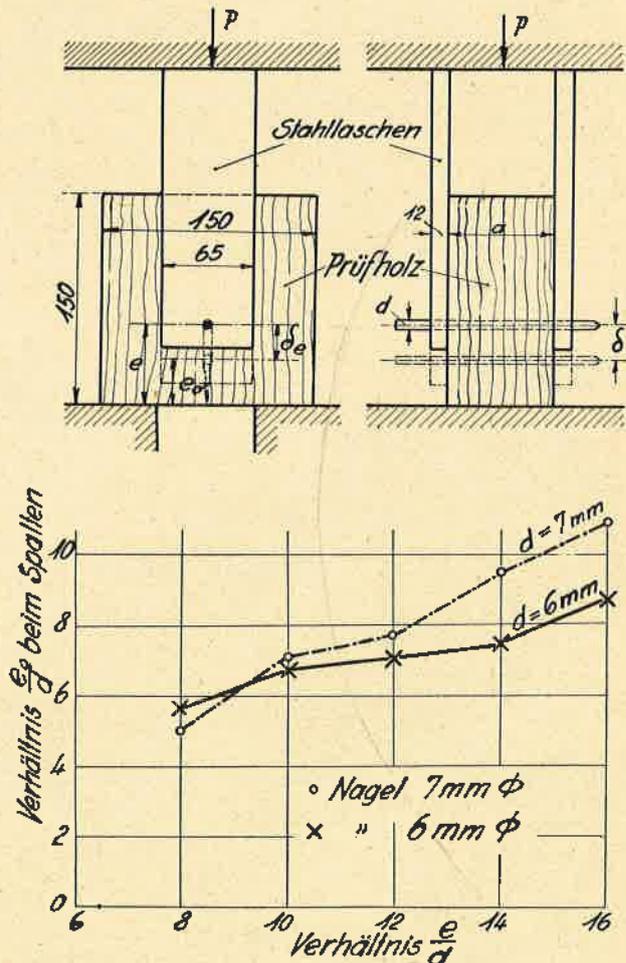


Abb. 47. Versuch über den besten Randabstand eines Nagels.

Teil E

Ergebnisse der Versuche von Stoy.

In den Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein Deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein Heft 11: „Tragfähigkeit von Holzverbindungen im Holzbau“ hat Dr.-Ing. Wilhelm Stoy VDI wiederum einen wertvollen Beitrag zu Beurteilungen der Nagelverbindungen im Holzbau neben seinen früheren Veröffentlichungen auf diesem Gebiete geliefert. Aus den in großer Zahl und mit bemerkenswerter Sorgfalt durchgeführten Versuchen kann der Konstrukteur folgendes entnehmen:

1. Nägel aus Thomasstahl sind besser als die aus Siemens-Martin-Stahl. Die Zugfestigkeit fällt mit zunehmendem Durchmesser. 3 mm starke Nägel haben eine Festigkeit von rd. 80, 7,6 mm starke nur von rd. 50 kg/mm². Die Fließgrenze liegt sehr hoch, bei 95% der Zugfestigkeit. Die Zähigkeit ist klein, denn die Bruchdehnung schwankt zwischen 2 und 5%.

2. Das günstigste Verhältnis zwischen kritischem Leibungsdruck (Lochleibungsfestigkeit) im Holz und der Holzdruckfestigkeit liegt bei einer Schlankheit der Nägel zwischen 7 und 8.

3. Dünne Hölzer vertragen eher schlanke Nägel als dicke.

4. Die Feuchtigkeit beeinträchtigt die Widerstandskraft des Holzes gegen Leibungsdruck lange nicht so stark wie gegen Druck parallel zur Faser.

5. Das mit dem Austrocknen des Holzes verbundene Schwinden bringt i. A. keine Verminderung der Festigkeit der Nagelverbindungen, aber größere Formänderungen.

6. Mit zunehmender Schlankheit fällt der Bruchleibungsdruck des Nagels. Ein Nagel hat bei der Schlankheit 7 eine Leibungsfestigkeit von 60%, bei der Schlankheit 12 aber nur noch 45% der Holzdruckfestigkeit.

7. Der einschnittige Nagel soll die 2,5 bis 3 fache Länge des stärksten Holzes haben.

8. Es ist günstiger, eine größere Anzahl dünner Bretter zu verwenden, als wenige dicke Bohlen.

9. Der Nagelabstand in der Krafrichtung und parallel der Holzfasern und auch der Randabstand soll gleich dem 10 fachen Durchmesser, quer zur Krafrichtung gleich dem 5 fachen Durchmesser sein.

10. Als „Nageldichte“ kann man betrachten die für 1 mm² Nagelquerschnitt erforderliche Holzfläche in cm². Als Holzfläche wird betrachtet die nach Abzug der vier Randabstände verfügbare Nagelungsfläche des Holzes.

Nach dieser von uns gewählten Definition ergibt sich aus den Versuchen von Stoy eine wirtschaftliche Nageldichte von 0,5 cm² Holzfläche für jeden mm² Nagelquerschnitt.

Aus früheren Veröffentlichungen Stoy's ergibt sich

11. Bei der Verwendung von Schraubennägeln „Dickkopf“ erhöht sich die Tragkraft einschnittiger Nagelverbindungen um mehr als 10%, da die breiten Köpfe nicht so leicht ins Holz eingezogen werden. Man dürfte also bei Schraubennägeln einen höheren Leibungsdruck zulassen als bei gewöhnlichen Nägeln.

12. Auch bei den Schraubennägeln fällt der kritische Lochleibungsdruck mit zunehmender Schlankheit der Nägel.

Teil F

Schlussfolgerungen aus unseren Versuchen.

1. Das Holz.

Für Nagelverbindungen eignen sich am besten Bretter und Bohlen (weniger Kanthölzer). Übersteigt deren Dicke ein gewisses Maß, so werden die Nägel, deren Schlankheit begrenzt ist, auch entsprechend dicker, bringen größere Spaltgefahr und sind schwerer einzuschlagen. Dünne und breite Querschnitte eignen sich daher am besten zum Nageln. Stehende Jahresringe sind zu vermeiden, da hier das Holz besonders leicht spaltet.

Astreinheit ist nicht nötig, da die Äste bei Brettern und Bohlen nur einen geringen Teil des Querschnittes ausmachen, doch sollen die Äste wegen der Möglichkeit der Nagelung und aus Festigkeitsrücksichten ein gewisses Maß (etwa 20 mm) nicht überschreiten und nicht gehäuft auftreten. Große Druckfestigkeit und enge Jahresringe sind erwünscht, da die Leibungsfestigkeit mit der Holzdruckfestigkeit wächst. Bei dünnen

Brettern ist die Verwendung zweischnittiger Nägel, welche umgeschlagen werden können, eher möglich als bei dicken Bohlen.

2. Das Nageln, die Nägel und das Nagelbild.

Dünne Nägel haben höhere Streckgrenze und Zugfestigkeit als dicke Nägel und ergeben verhältnismäßig bessere und steifere Verbindungen.

Die Abstände betragen zweckmäßig:

Nägel untereinander in Faserrichtung des Holzes: 10 d,

Randabstand in Faserrichtung: mindestens 10 d,

Nägel untereinander quer zur Faser: 8—12 d,

Randabstand quer zur Faser: mindestens 6 d.

Die Nägel werden am besten in schwach zur Brettachse geneigten Schrägachsen angeordnet, ihr Abstand in der gleichen Faser, sofern dies nicht ganz zu vermeiden ist, soll mindestens 40 d betragen. Die Nägel können in frisches Holz leichter und mit weniger Spaltgefahr eingeschlagen

werden als in trockenem; die Festigkeit der Verbindung leidet dann nicht, wenn das Tragwerk vor der Belastung ausgetrocknet ist. Die Nageldichte, d. h. die auf ein mm^2 Nagelquerschnitt entfallende Holzfläche nach Abzug der Randzonen kann bis auf $0,4 \text{ mm}^2$ heraufgehen, beträgt normalerweise aber 1 mm^2 Nagel auf 1 cm^2 Holzfläche.

Die Nägel werden zweckmäßig quer zur Faser auf einer Länge 3 d umgeschlagen, der hierbei erzielte Auszieh Widerstand beträgt etwa das 0,9 fache des Auszieh Widerstandes des normalen Nagelkopfes. Mit Unterlagscheibe vernietete Nägel sind teurer und ergeben 10 bis 15% größere Tragkraft, leider aber auch etwas größere Verschiebungen. Durch Verwendung von Nägeln mit besonders breiten Köpfen läßt sich die Tragkraft der Verbindungen steigern, sofern der Auszieh Widerstand dabei maßgebend ist.

Im großen und ganzen scheint ein zweischnittiger Nagel ebenso viel zu tragen wie zwei einschnittige. Die Steifigkeit zweischnittiger Nagelverbindungen wird aber größer sein als die einschnittiger.

3. Tragkraft der zweischnittigen Nagelverbindungen.

Bei normaler Nageldichte ist jeder Nagel gleichmäßig an der Übertragung der Kraft beteiligt.

Bei zweischnittigen Verbindungen hängt die Art der Zerstörung von dem Verhältnis der Stärke des Mittelholzes zu den Seitenhölzern ab. Wird das Mittelholz wesentlich dicker als das Seitenholz, so tritt die Zerstörung dadurch ein, daß sich die Nagelköpfe in die Seitenhölzer hineinziehen, die Lochleibungsfestigkeit des Mittelholzes wird also nicht voll ausgenutzt. Die Tragkraft solcher Verbindungen wird unabhängig von der Stärke des Mittelholzes und von der Schlankheit des Nagels und nur durch den Auszieh Widerstand der Nägel bedingt; sie hängt nur noch von der Nageldicke ab. Wird das Mittelholz aber so dick wie ein Seitenholz, so tritt die Zerstörung durch Überwindung der Lochleibungsfestigkeit im Mittelholz ein. Die Tragkraft richtet sich in diesem Falle also nach der Lochleibungsfestigkeit des Mittelholzes.

4. Das elastische Verhalten der Nagelverbindungen.

Bei erstmaliger Belastung nehmen die Verschiebungen bis zu einem Lochleibungsdruck bis 50 kg/cm^2 gleichmäßig mit den Spannungen zu. Bis dahin gehen die Verschiebungen beim Entlasten etwa bis zur Hälfte zurück. Beim weiteren Belasten nehmen sie etwas rascher zu als die Kräfte; ab 100 kg/cm^2 sind nahezu alle weiteren Verschiebungen bleibend.

Wird die Verbindung wiederholt belastet, so tritt bei einer Schlankheit der Nägel bis zu 10 schon nach wenigen (10) Lastwiederholungen auf $\sigma_1 = 80 \text{ kg/cm}^2$ ein Beharrungszustand ein, d. h. der Zuwachs an Verschiebung durch Wiederholen der Belastung ist gering oder gleich Null. Bei Ver-

bindungen mit Nägeln mit einem Schlankheitsgrad über 10 tritt dieser Zustand erst nach einer größeren Zahl von Lastwechseln ein.

Die Spannungsverschiebungslinie ändert sich dabei immer grundsätzlich sehr stark, indem sie sich zunächst steiler stellt und schließlich S-förmige Gestalt annimmt. Die Nagelverbindung wird durch Wiederholung der Belastung nicht weicher, sondern steifer.

Jede Nagelverbindung kommt also erst nach wiederholter Belastung in einen elastischen Zustand.

5. Dauerfestigkeit der Nagelverbindungen.

Bei Nägeln mit einer Schlankheit von 10 trat bei unseren Schwellastversuchen selbst bei einer oberen Leibungsdruckgrenze von 100 kg/cm^2 nach mehreren 100 000 Lastwechseln noch kein Bruch ein. Überstieg die Schlankheit der Nägel aber das Maß von 10, so lag Gefahr eines Dauerbruchs der Nägel vor, auch bei einem Leibungsdruck von nur 80 kg/cm^2 im Mittelholz mit zweischnittigen Nägeln. Der Bruch trat in den Nägeln ohne allzu große Verformung ein.

6. Anschlüsse quer zur Faser.

Nach unseren wenigen Versuchen mit Anschlüssen unter 45° schräg zur Holzfasern trugen zwei einschnittige Nägel etwa ebensoviel wie ein zweischnittiger Nagel. Der Kraftangriff schräg zur Faser macht sich nicht ungünstig bemerkbar.

7. Zusammenwirkung von Nagelung und Leimung.

Nagelung und Leimung wirken nicht gleichzeitig, sondern nacheinander. Zuerst bricht die Leimfuge oder das anschließende Holz nach äußerst geringer Verschiebung; die Nägel tragen nichts. Erst nach weiterer großer Verschiebung wird dann die Nagelverbindung zerstört. Die Tragkraft hängt also zuerst ab nur von der Leimfestigkeit und später von der Stärke der Nagelverbindung und ist keinesfalls die Summe beider.

8. Berechnung und zulässige Beanspruchung zweischnittiger Nägel.

a) Statische Beanspruchung.

Da bei gleich dicken Nägeln und bei zunehmender Schlankheit die Leibungsfestigkeit fällt, die Leibungslänge aber zunimmt, kann unter Umständen die Tragkraft unabhängig von der Schlankheit werden. Dies ist wahrscheinlich immer dann der Fall, wenn das Mittelholz dicker ist als ein Seitenholz. Weitere Versuche hierüber sind allerdings noch nötig. In solchen Fällen wäre die Tragkraft eines Nagels lediglich von seiner Dicke abhängig und die Berechnung wäre sehr vereinfacht.

Will man zunächst an der Berechnungsweise mit einem zulässigen Lochleibungsdruck festhalten, so ergeben sich aus unseren Versuchen mit zweischnittigen Verbindungen folgende zulässige Lochleibungsspannungen, errechnet

- a) aus der Forderung nach höchstens $1,5 \text{ mm}$ Verschiebung,
- b) aus der Forderung nach dreifacher Sicherheit gegen Bruch.

Nageldurchmesser	Schlankheit des Nagels		Zulässiger Leibungsdruck in kg/cm ²		Bruchlast eines Nagels in kg
	im Mittelholz	über alles	im Mittelholz aus 3fach. Bruch-sicherheit	aus 1,5 mm Verschiebung	
4,2	10	22	86	95	450
4,2	13	25,5	69	88	480
4,2	13	25,5	87	—	600
7,0	6,9	21	110	140	1200
7,0	10	24	93	100	1360
7,0	13	26	71	77	1350

Diese kurze Übersicht beweist überzeugend, daß bei zweischnittigen Nägeln die Forderung nach dreifacher Bruchsicherheit den Ausschlag gibt. Bei der Forderung nach 1,5 mm Maximalverschiebung würden durchweg höhere Leibungsdrucke im Mittelholz zulässig sein.

Läßt man 80 kg/cm² Leibungsdruck im Mittelholz zu, so beträgt die Bruchsicherheit etwa 3,3 bei der Schlankheit 10 und 2,85 bei der Schlankheit 13.

Es scheint aber überhaupt unzweckmäßig zu sein, die Berechnung von Nagelverbindungen immer vom Leibungsdruck abhängig zu machen. Bei dicken Mittelhölzern, wie sie im allgemeinen bei unseren Versuchen verwandt wurden, empfiehlt es sich vielleicht bei zweischnittigen Nägeln die Belastung eines Nagels in Abhängigkeit von seinem Durchmesser für alle Verwendungszwecke vorzuschreiben. Denn wie die kurze Übersicht

zeigt, trugen der 4,2 mm starke Nagel unabhängig von seiner Schlankheit zwischen 450—600 kg und der 7 mm dicke Nagel wiederum unabhängig von seiner Schlankheit 1200—1360 kg. Diese Unterschiede sind klein und berechtigen zu der Annahme der Tragkraft

eines Nagels von 4,2 mm Dicke zu 450 kg,
7 mm Dicke zu 1200 kg.

Bei einer Forderung nach dreifacher Sicherheit dürfte man nach unseren Versuchen belasten einen zweischnittigen Nagel

mit 3,8 mm Durchmesser mit 150 kg
4,2 „ „ „ 150 „
4,6 „ „ „ 200 „
7,0 „ „ „ 400 „

b) Dynamische Beanspruchung.

Bei der Forderung nach zweifacher Bruchsicherheit ergibt sich für den zulässigen Leibungsdruck zweischnittiger Nägel im Mittelholz höchstens 50 kg/cm² bei einer Schlankheit im Mittelholz von 13. Dies entspricht einer zulässigen Belastung

des zweischnittigen Nagels

mit 4,2 mm Durchmesser von rd 85 kg,
5,0 „ „ „ „ 100 „

Es sind noch zahlreiche statische und dynamische Versuche nötig, bis man die so einfachen und vorzüglichen genagelten Bohlentragwerke im Hochbau und im Brückenbau beliebig verwenden kann.

Einzelwerte der Versuche mit Nagelverbindungen unter Wechsellast.

Ausbildung nach Abb. 3 Seite 6.

Nägel	Nageldurchmesser mm	Zahl der Nägel	Schlankheit der Nägel		Mittelholzstärke cm	Lochleibungsdruck in kg/cm ² bei Wechsellasten	Obere Belastung eines Nagels in kg	Zahl der aufgebrachten Lastwechsel	
			über alles	im Mittelholz					
vernietet	4,2	32	22	10	4,2	9—100	176	340 000	} Nägel gebrochen
umgeschlagen	4,2	20	25	13	5,5	21—80	185	360 000	
	4,2	20	25	13	5,5	2—100	231	310 000	
umgeschlagen	4,2	32	25	13	5,5	18—100	231	416 000	} Nägel unversehrt
	4,2	32	22	10	4,2	12—100	176	160 000	
	4,2	32	22	10	4,2	8—100	176	594 000	
	4,2	32	22	10	4,2	6—80	141	593 000	
	5,0	20	21	11	5,5	6—80	220	1 230 000	

Einzelwerte der Versuche mit Nagelverbindungen unter statischer Last.

Ausbildung nach Abb. 3 Seite 6.

I. Nagelenden senkrecht zur Faser umgeschlagen.

Durchm. d. Nägel mm	Schlankheit der Nägel über alles	Schlankheit der Nägel im Mittelholz	Anzahl der Nägel	Stärke des Mittelholzes cm	Stärke d. Seiten- holzes cm	Bruch- last t	Leibungsfestigkeit im		^{1/3} Leibungsfestigkeit im	
							Mittelholz kg/cm ²	Seitenholz kg/cm ²	Mittelholz kg/cm ²	Seitenholz kg/cm ²
3,8	23,4	10,8	52	4,1	2,4	23,5	290	248	97	83
4,2	25,5	13,1	43	5,5	2,6	21,7	218	231	73	77
4,2	25,5	13,1	43	5,5	2,6	22,5	227	240	76	80
4,2	25,5	13,1	32	5,5	2,6	16,0	217	229	72	76
4,2	25,5	13,1	32	5,5	2,6	12,2	165	175	55	58
4,2	22,2	9,75	43	4,1	2,6	19,8	268	211	89	70
4,2	22,2	9,75	43	4,1	2,6	21,0	284	224	95	75
4,2	22,2	9,75	32	4,1	2,6	11,7	212	168	71	56
4,2	22,2	9,75	32	4,1	2,6	10,5	191	150	64	50
4,2	22,2	9,75	53	4,1	2,6	24,7	271	214	90	71
4,2	22,2	9,75	53	4,1	2,6	24,8	272	214	91	71
4,2	22,2	9,75	24	4,1	2,6	12,2	296	232	98	77
4,2	22,2	9,75	24	4,1	2,6	11,6	282	221	94	74
4,6	19,3	8,9	40	4,1	2,4	24,8	328	281	109	94

II. Nagelenden mit Unterlagscheibe vernietet.

4,2	25,5	13,1	43	5,5	2,6	28,0	282	298	94	99
4,2	25,5	13,1	43	5,5	2,6	26,1	263	278	88	93
4,2	25,5	13,1	32	5,5	2,6	17,3	234	248	78	83
4,2	25,5	13,1	32	5,5	2,6	13,5	183	193	61	64
4,2	22,2	9,75	43	4,1	2,6	19,1	258	204	86	68
4,2	22,2	9,75	43	4,1	2,6	21,8	294	232	98	77
4,2	22,2	9,75	32	4,1	2,6	13,3	241	191	80	64
4,2	22,2	9,75	32	4,1	2,6	13,4	244	192	81	64
4,2	22,2	9,75	53	4,1	2,6	30,0	329	260	110	87
4,2	22,2	9,75	53	4,1	2,6	30,0	329	260	110	87
4,2	22,2	9,75	24	4,1	2,6	13,8	334	263	111	88
4,2	22,2	9,75	24	4,1	2,6	13,7	332	261	111	87

III. Mittelwerte.

Schlankheit der Nägel		Nagelenden	Leibungsdruck beim Bruch in kg/cm ²		Zul. Lochleibungsdruck (σ _l zul.) bei 3facher Sicherheit in kg/cm ²	
über Alles	im Mittelholz		Mittelholz	Seitenholz	Mittelholz	Seitenholz
25,5	13,1	umgeschlagen	207	219	69	73
25,5	13,1	vernietet	240	254	80	85
22,2	9,8	umgeschlagen	259	204	86	68
22,2	9,8	vernietet	295	233	98	78



