

**Die Auswirkung wechselnder Klimabeanspruchungen
auf Formänderungsverhalten und Tragfähigkeit
genagelter Holzspanplatten-Vollholz-Verbindungen**

von

Jürgen Ehlbeck, Peter Beyersdorfer und Günter Steck

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abt. Ingenieurholzbau
Universität Fridericiana Karlsruhe
Univ. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck
1988

V O R W O R T

Nagelverbindungen von Holzspanplatten mit Vollholz werden oft klimatischen Beanspruchungen ausgesetzt, die sich rechnerisch bei Formänderungsnachweisen schwer erfassen lassen. Es war das Langzeitverhalten unter Last für solche Verbindungen unter natürlich wechselndem Klima, aber auch unter zeitlich gerafften, definierten Klimawechseln, zu untersuchen, um Aussagen über die Verformungszunahmen unter derartigen Einwirkungen und über den Einfluß auf die Tragfähigkeit machen zu können.

Diese Forschungsarbeit entstand im Auftrage der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung mit finanzieller Unterstützung durch das Institut für Bautechnik, Berlin (Zeichen IV/1-5-309/81). Die Firma AGEPAN Holzwerkstoffe KG, 6601 Heusweiler (Saar), stellte für die Versuche in dankenswerter Weise Holzspanplatten der Verleimungsart V 100 kostenlos zur Verfügung.

Die Versuche wurden von den Herren Dr.-Ing. G. Steck und Dipl.-Ing.(FH) P. Beyersdorfer geplant, überwacht und ausgewertet. Bei der Versuchsdurchführung haben die Herren G. Rüd, G. Köhler und H. Heck mitgewirkt. Allen Beteiligten wird auch an dieser Stelle gedankt.

Jürgen Ehlbeck

I N H A L T

1	Ziel des Forschungsvorhabens	1
2	Literaturdurchsicht	2
3	Herstellung der Druckscherkörper	4
3.1	Spanplatte	5
3.2	Vollholz	5
3.3	Verbindungsmitel	6
3.4	Versuchskörper	6
4	Durchführung der Kurz- und Langzeitversuche	7
4.1	Versuchsserien K1 und L1	11
4.2	Versuchsserien K2 und L2	11
4.3	Versuchsserien K3 und L3	12
5	Darstellung und Erläuterung der Versuchsergebnisse	13
5.1	Verformungsverhalten bei den Kurzzeitversuchen der Serien K und L	13
5.1.1	Serie K1 unter Normalklima 20/65	13
5.1.2	Serie K2 unter natürlichem Außenklima unter Dach	15
5.1.3	Serie K3 unter Wechselklima	15
5.1.4	Serie L3 unter Normalklima 20/65	15
5.1.5	Serie L2 unter natürlichem Außenklima unter Dach	17
5.1.6	Serie L3 unter Wechselklima	17
5.2	Verformungsverhalten bei den Langzeitversuchen der Serien L1 bis L3	18
5.2.1	Serie L1 unter Normalklima 20/65	18
5.2.2	Serie L2 unter natürlichem Außenklima unter Dach	20
5.2.3	Serie L3 unter Wechselklima	20

5.3	Tragverhalten bei den Kurzzeitversuchen der Serien K und L	25
5.3.1	Serien K1 und L1 unter Normalklima 20/65	25
5.3.2	Serien K2 und L2 unter natürlichem Außenklima unter Dach	25
5.3.3	Serien K3 und L3 unter Wechselklima	26
5.4	Zusammenfassende Darstellung	27
6	Schlußfolgerungen	33
6.1	Tragfähigkeit, Verschiebungen und Verschiebungsmoduln unter Kurzzeitbelastung nach Feuchteänderungen	33
6.2	Verformungen unter Feuchteänderungen bei zulässiger Langzeitbelastung	35
7	Schrifttum	41

1 Ziel des Forschungsvorhabens

Genagelte Spanplatten-Vollholz-Verbindungen werden heute überwiegend in Wand-, Dach- und Deckenelementen eingesetzt, in denen die Verbindungen infolge äußerer Lasteinwirkung in Plattenebene auf Abscheren und zum Teil rechtwinklig dazu auf Herausziehen beansprucht werden.

Die Nagelverbindungen der Außenbauteile sind zusätzlich wechselnden Klimabedingungen ausgesetzt, die Schwind- und Quellverformungen verursachen können. Das Ausmaß der Feuchteänderungen im Bauteil wird im wesentlichen von seinem bauphysikalischen Aufbau, der Feuchte des Holzes und der Holzwerkstoffe zum Zeitpunkt der Verarbeitung sowie von ihrem Sorptionsverhalten im eingebauten Zustand beeinflusst. Da sich die Auswirkungen von Feuchteänderungen auf die Verbindungen in tragenden Bauteilen rechnerisch nicht erfassen lassen, sollte durch Versuche geklärt werden, welchen Einfluß extreme Feuchteänderungen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Spanplatten-Vollholz-Verbindungen haben können.

Hierzu wurden Druckscherkörper im Kurz- und Langzeitverhalten mit dem Ziel untersucht, das Verhalten der Nagelverbindungen unter natürlichen Klimaverhältnissen durch zeitgeraffte Versuche in definiertem Wechselklima zu simulieren.

2 Literaturdurchsicht

Kolb/Radović (1973) haben das Kurzzeitverhalten von einschnittigen Spanplatten-Fichtenvollholz-Verbindungen mit glattschaftigen Nägeln 20 x 40, 25 x 60 und 28 x 65 untersucht. Die Holzfeuchten der Zug- und Druckscherkörper lagen bei ihrer Herstellung zwischen 12 und 15 %. Je ein Drittel der Scherkörper wurde sofort, nach 24 h Wasserlagerung sowie nach 24 h Wasserlagerung und anschließender Trocknung auf etwa 6 % Holzfeuchte geprüft. Selbst bei der extremen Austrocknung der Prüfkörper blieben die Verschiebungen stets unter 1 mm. Während eine Beeinflussung der Höchstlasten der Druckscherkörper selbst durch den extremen Feuchtewechsel nicht nachweisbar war, wurde bei den Zug-scherkörpern dadurch ein deutlicher Abfall beobachtet. Hierfür war vermutlich der mit zunehmender Austrocknung stark abnehmende Auszieh-widerstand der glattschaftigen Nägel verantwortlich. Im übrigen ver-sagten einige Zugscherkörper infolge Überschreitens der Zugfestigkeit der Spanplattenlaschen ($d = 10/16/22$ mm). Möhler (1982) hat neben eigenen Versuchen die Ergebnisse der unter normalklimatisierten Bedin-gungen hergestellten und geprüften Versuchskörper von Kolb/Radović (1973) ausgewertet und nachgewiesen, daß sich die zulässige Belastung eines einschnittig beanspruchten Nagels einer Spanplatten-Vollholz-Verbindung nach der Zahlenwertgleichung zu $N = \frac{500 d_n^2}{10 + d_n}$ in N mit d_n als Nageldurchmesser in mm rechnerisch hinreichend genau erfassen läßt, wenn die Mindestplattendicke $\min a = 4,5 d_n$ beträgt. Dieser Bemessungsvorschlag wurde bereits in die Neufassung der DIN 1052, Teil 2 übernommen.

Das Langzeitverhalten von Nagelverbindungen hat Möhler (1966) im Vergleich zur statischen Kurzzeitbeanspruchung an zweischnittigen Vollholz-Vollholz-Verbindungen aus Fichte mit glattschaftigen Nägeln ($\emptyset 3,1/4,2/6$ mm, vorgebohrt bzw. nicht vorgebohrt) unter wechselnden Klimaverhältnissen untersucht. Bei Herstellung der Druckscherkörper lagen die Holzfeuchten zwischen 15 und > 30 % und bei Versuchsende etwa bei 10 bis 16 %. Die Hälfte der Prüfkörper wurde nach 24 h bzw.

nach 6 bis 9 Monaten Lagerung einem statischen Kurzzeitversuch unterzogen. Die andere Hälfte wurde vor einer Langzeitbelastung von 200 Tagen unter Messung der bleibenden Verschiebungen kurzzeitig (20 min) mit der später vorgesehenen Langzeitbelastung in Höhe der 1,0- bzw. 1,5-fachen rechnerisch zulässigen Belastung beansprucht.

Eine Austrocknung der unbelastet gelagerten Verbindungen erhöhte die Verschiebungen gegenüber den sofort geprüften Körpern um das bis zu dreifache, jedoch wurden Verschiebungen über 1 mm nie erreicht. Verminderte Bruchlasten nach der Austrocknung wurden bei keinem Kurzzeitversuch festgestellt.

Die höchsten Kriechverformungen erlitten die feucht genagelten Verbindungen ($u > 30 \%$) unter konstanter zulässiger Belastung bei gleichzeitiger Austrocknung. Nach Normalklimatisierung auf $u \approx 12 \%$ innerhalb von 20 bis 60 Tagen (je nach Anfangsfeuchte) wurden Verschiebungen von 0,8 bis 2,2 mm (vorgebohrt) bzw. von 1,6 bis 3 mm (nicht vorgebohrt) beobachtet, die bei konstantem Klimaverlauf bis Versuchsende nach 200 Tagen nur noch geringfügig weiter zunahmen. Mit einer Ausnahme lagen alle Verschiebungen schließlich über 1,5 mm. Die Tragfähigkeit der Nagelverbindungen ergab aber keine Unterschiede zwischen den langzeitbelasteten und den nur unbelastet gelagerten Scherkörpern.

Wie sich Feuchteänderungen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Spanplatten-Vollholz-Verbindungen unter Kurz- und Langzeitbelastung auswirken, sollten die nachfolgend beschriebenen Hauptversuche klären.

3 Herstellung der Druckscherkörper

Für alle Serien wurde ein einheitlicher Druckscherkörper verwendet, dessen Form und Abmessungen in Bild 1 dargestellt sind. Auf die Verwendung von Zugscherkörpern wurde wegen der geringen Zugfestigkeit der Spanplatten, die bei den Versuchen von Kolb/Radović (1973) häufig Zugbrüche aufwiesen, sowie wegen des zu großen Platzbedarfes einer Zugbelastungsvorrichtung in der Klimakammer verzichtet.

Um eine möglichst schnelle Angleichung der Scherkörper an die wechselnden Feuchtigkeitsverhältnisse zu erzielen, wurde bei dem im Verhältnis zur Prüfkörpergröße hohen Querschnittsflächenanteil kein feuchtigkeitsabweisender Schutzanstrich vorgesehen.

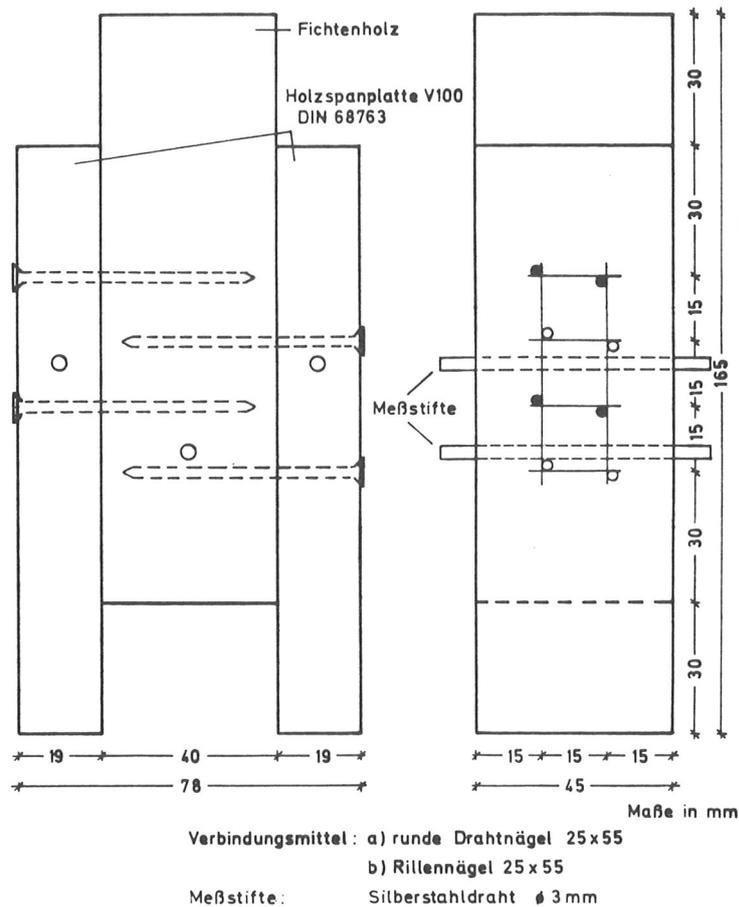


Bild 1: Genagelter Druckscherkörper

3.1 Spanplatte

Die Seitenhölzer für die etwa 400 Prüfkörper wurden aus fünf Flachpreßplatten L/B = 2040/910 mm der Verleimungsart V 100 nach DIN 68 763 mit einer Nenndicke von 19 mm entnommen, numeriert und im Normalklima 20/65-1 DIN 50 014 gelagert. An 10 Proben je Platte wurden die Feuchte und Dicke sowie Rohdichte und Dickenquellung nach DIN 52 361 und 52 364 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

3.2 Vollholz

Die Mittelhölzer der Prüfkörper wurden aus fünf Bohlen (Länge 4,50 m, Dicke 60 mm, Holzfeuchte $u \approx 21$ %) einer Blocklänge eines Fichtenstammes herausgeschnitten.

Die Holzeigenschaften wurden an 24 gleichmäßig über die Bohlenbreiten verteilten Proben nach den einschlägigen Prüfnormen ermittelt und in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Mittelhölzer wurden nach Rohdichte und nach Lage der Jahrringe in den Stirnflächen sortiert und im natürlichen Außenklima unter Dach gelagert.

Tabelle 1: Mittlere Werkstoffeigenschaften der Spanplatten V 100 und des Fichtenholzes

Platten Nr.	Probenanzahl	Plattenfeuchte bei Lieferung %	Plattenfeuchten nach Normalklimatisierung (Klima 20/65) %	Probindicke mm	Rohdichte ρ_N g/cm ³	Dickenquellung q_{24} %
1	10	10,3	10,6	19,0	0,72 (1,7)	5,9 (11,2)
2	10	10,3	10,6	19,1	0,71 (2,3)	6,1 (15,8)
3	10	10,4	10,7	19,1	0,71 (2,3)	6,1 (20,8)
4	10	10,3	10,8	19,1	0,72 (3,6)	6,2 (25,8)
5	10	10,2	10,8	19,1	0,71 (4,5)	6,1 (28,5)
Bohlen-Nr.	Probenanzahl	Holzfeuchte bei Prüfkörperherstellung %	Holzfeuchte nach Normalklimatisierung (Klima 20/65) %	Jahringbreite mm	Rohdichte ρ_N g/cm ³	Druckfestigkeit in Faserrichtung β_{DII} N/mm ²
1 - 5	24	21,0	13,3	1,7 (36,0)	0,45 (4,5)	42,5 (7,3)

Werte in Klammern geben den Variationskoeffizienten einer Eigenschaft an.

3.3 Verbindungsmittel

Es wurden als Nageltyp A verzinkte runde Drahtnägel 25 x 55 nach DIN 1151 und als Nageltyp B korrosionsgeschützte Rillennägel 25 x 55 nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. 9.1-17 - Paslode-Rillennägel als Holzverbindungsmittel - verwendet.

3.4 Prüfkörper

Die Druckscherkörper wurden erst unmittelbar vor dem Ansetzen jeder einzelnen Versuchsserie hergestellt. Die Seitenhölzer aus Spanplatte hatten immer einen Feuchtegehalt von etwa 10 %, während die Mittelhölzer eine dem Außenklima zum jeweiligen Zeitpunkt der Nagelung entsprechende Ausgleichsfeuchte aufwiesen. Bei 3/5 der Prüfkörper jeder Serie verlief der Nagelschaft senkrecht zu den Jahrringen, bei 1/5 tangential und bei 1/5 etwa unter 45° zu den Jahrringen.

In jedem vorgesehenen Klima einer Serie wurden je drei Seiten- und Mittelhölzer als Vergleichsproben gelagert und die Änderungen des jeweiligen Feuchtegehaltes durch laufende Gewichtskontrollen bestimmt.

4 Durchführung der Kurz- und Langzeitversuche

Das Trag- und Verformungsverhalten der Verbindungen wurde in Kurz- und Langzeitversuchen (Serie K und L) unter drei verschiedenen klimatischen Bedingungen untersucht:

- | | | |
|---|--|-------------------|
| 1 | Normalklima 20/65 | (Serie K1 und L1) |
| 2 | Natürliches Außenklima unter Dach | (Serie K2 und L2) |
| 3 | Wechselklima 20/95 - 40/20 bzw.
20/85 - 40/40 | (Serie K3 und L3) |

Bild 2 gibt einen Überblick über den Aufbau der Scherkörper und die Einwirkung auf die Scherkörper.

Aufbau der Druckscherkörper	<p>Seitenhölzer (Holzspanplatte V 100) Herstellfeuchte $u_H \approx 10\%$</p> <p>Mittelhölzer (Fichte) Versuche unter Normal- und Außenklima: Herstellfeuchte $u_H = 21\%$</p> <p>Versuche unter Wechselklima: Herstellfeuchte $u_H =$ Ausgleichsfeuchte u_{q1} bei Lagerung im natürlichen Außenklima unter Dach</p> <p>Nägel Runde Drahtnägel 25 x 55 DIN 1151 (A) Rillennägel 25 x 55 (B)</p> <p><u>Nagelung der Druckscherkörper</u> unmittelbar vor Versuchsbeginn</p>
Klimatische Einwirkung	<p>Infolge Lagerung der Scherkörper im</p> <p>1 Normalklima 2 natürliches Außenklima unter Dach 3a Wechselklima 20/95-40/20 7 Zyklen; 2 Tage je Zyklus 3b,c,d Wechselklima 20/85-40/40 5, 10, 9 Zyklen; 4, 2, 4 Tage je Zyklus</p>
Krafteinwirkung	<p>Kurzzeitbelastung nach ISO 6891</p> <p>Prüfzeit maximal 12 min nach unbelasteter Lagerung über</p> <p>- 0, 1, 2, 3, 6, 9, 12 Monate in Klima 1 - 1, 2, 3, 4 bis 12 Monate in Klima 2 - 4 bis 36 Tage in Klima 3</p> <p>kontinuierlich steigende Belastung bis max F bzw. F_{15} (bei $v = 15$ mm) jeweils bis zu 5 Scherkörper je Nageltyp kontinuierliche Messung der Verschiebungen mittels induktiver Wegaufnehmer</p>
Langzeitbelastung	<p>Ober 12 Monate in Klima 1 und 2 über 14, 20, 36 Tage in Klima 3a bis d konstante Belastung mit $zul F = 2000$ N von 5 bzw. 10 Scherkörpern je Nageltyp und Klimabereich regelmäßige Messung der Verschiebungen mittels 1/100 Meßuhr</p> <p>nach Entlastung und Kriecherholung kontinuierliche Belastung bis max F bzw. F_{15} (bei $v = 15$ mm)</p>

Bild 2: Aufbau der Scherkörper und Einwirkung auf die Scherkörper

Zeitraum, Dauer und Anzahl der Versuche, Klimaverhältnisse, Holzfeuchten und Zeitpunkt der Kurzzeitprüfung bzw. der Ablesung der absoluten Kriechverschiebungen sind für die Serien K1, K2 bzw. L1, L2 in Tabelle 2 (Anlage 1) und für die Serien K3 und L3 in Tabelle 3 (Anlage 2) in Übersichten zusammengestellt.

Die statischen Kurzzeitprüfungen erfolgten in teilweiser Anlehnung an ISO 6891 "Timber Structures - Joints made with mechanical fasteners" vom 01.05.1983. Nach DIN 1052 bzw. allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Nr. Z 9.1-17 beträgt die zulässige Belastung der Prüfkörper ohne Berücksichtigung von Abminderungen infolge klimatischer Einflüsse zu $F = 8 \times 250 = 2000 \text{ N}$ für runde Drahtnägel bzw. Rillennägel.

Zur Beurteilung des Verformungsverhaltens der Nagelverbindungen wurde bei jedem statischen Versuch ein Kraft-Verschiebungsdiagramm bis zu einer Last von 6 kN und einer Verschiebung von 4 mm mit Hilfe eines Zweikomponentenschreibers aufgezeichnet.

Die Messung der Verschiebungen erfolgte mittels zweier induktiver Wegaufnehmer W 20. Jeder Prüfkörper wurde bei einer Verformungsgeschwindigkeit von 1 mm/min kontinuierlich bis zu $F = 2000 \text{ N}$ belastet. Diese Last wurde 30 sec konstant gehalten, bis zu einer Vorlast von 500 N entlastet und nach 30 sec Wartezeit kontinuierlich bis zum Erreichen der Bruchlast $\max F$ bzw. einer Verschiebung von 15 mm (zugehörige Last = F_{15}) wieder belastet. Oberhalb von $2 \times$ zu F wurde die Verformungsgeschwindigkeit allmählich gesteigert, um eine Versuchsdauer von 12 min nicht zu überschreiten.

Für die Scherkörper unter Langzeitbelastung wurde eine Vorrichtung entwickelt, in der fünf übereinander angeordnete Druckscherkörper gleichzeitig belastet werden konnten (Bild 3).

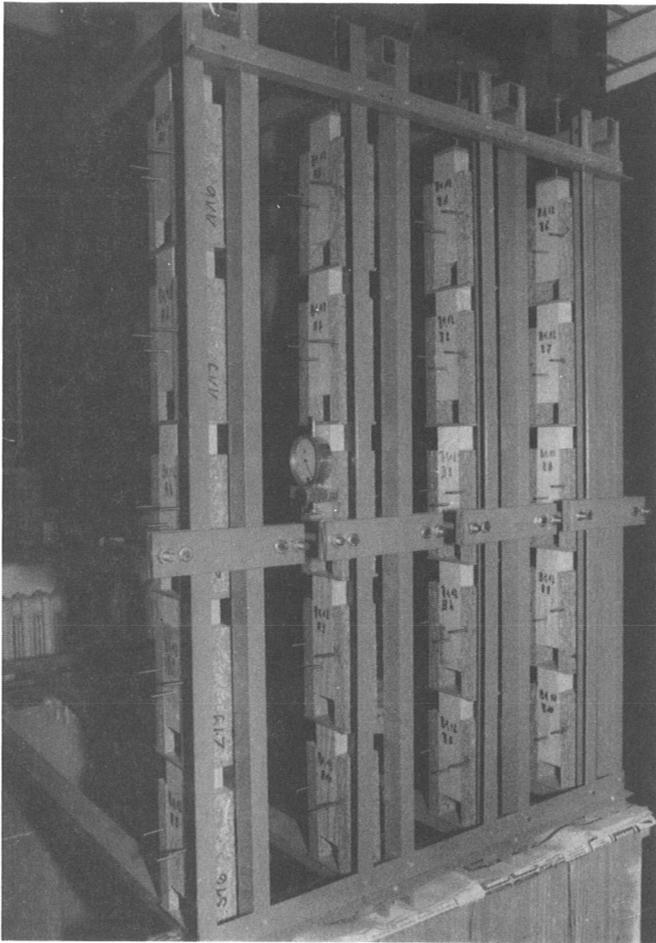


Bild 3:
Belastungsvorrichtung
für Langzeitversuche der
Serien L1, L2, und L3

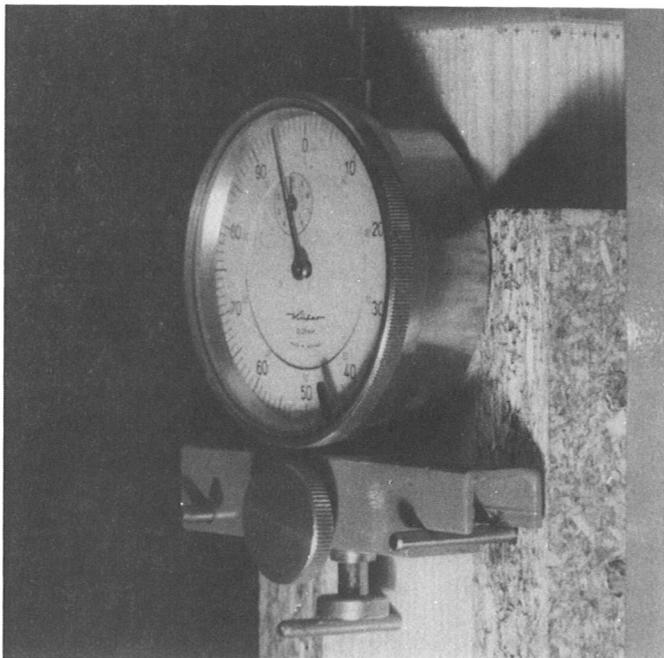


Bild 4:
1/100 Meßuhr
in Meßstellung (Detail)

Die Seitenansicht der Vorrichtung ist schematisch in Bild 5 dargestellt.

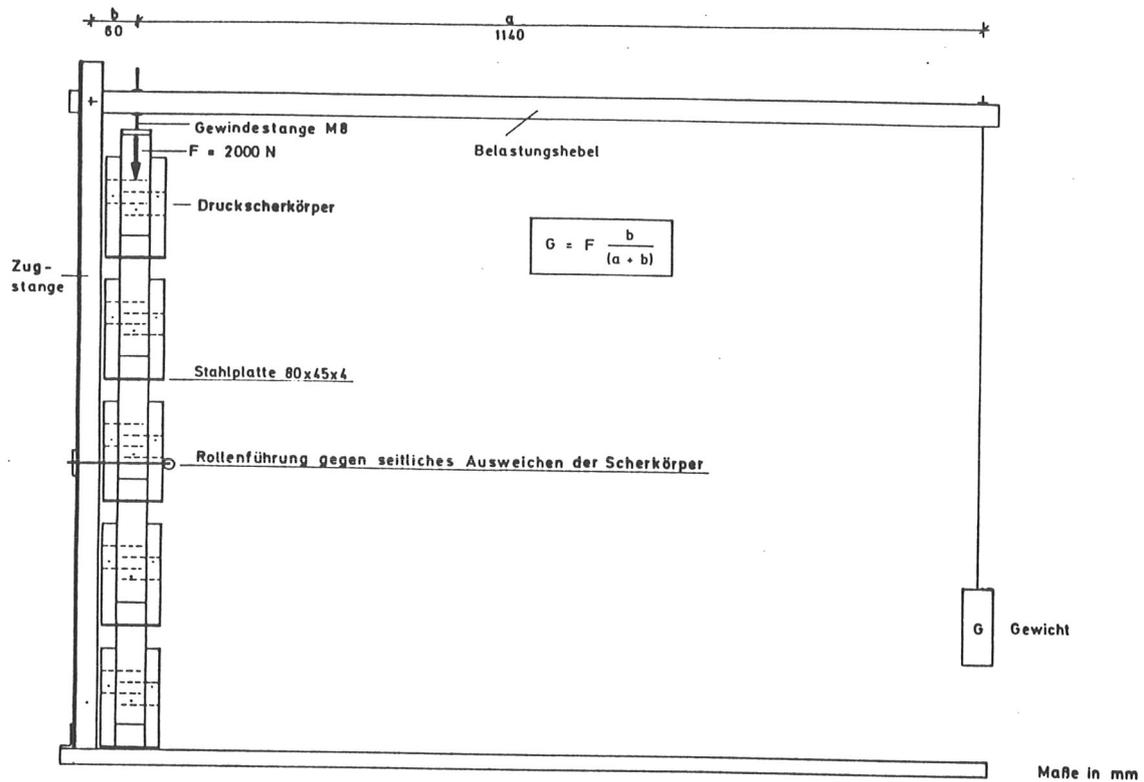


Bild 5: Seitenansicht einer Belastungsvorrichtung für die Langzeitversuche der Serien L1 bis L3

Für die drei Klimabereiche (L1, L2, L3) wurden drei gleiche Vorrichtungen verwendet, in denen die Körper in Serien zu 5 Stück übereinander gestapelt konstant mit zu $F = 2000 \text{ N}$ belastet wurden. Die gegenseitigen Verschiebungen zwischen Seiten- und Mittelhölzern wurden an durchgehenden, versetzt angeordneten Meßstiften aus Silberstahldraht ($\phi 3 \text{ mm}$) an beiden Seiten eines jeden Prüfkörpers mit einer 1/100-Meßuhr regelmäßig abgelesen.

Die Anordnung der Meßstifte ist aus Bild 1 sowie mit einseitig eingesetzter Meßuhr im Detail aus Bild 4 ersichtlich. Im Anschluß an die Langzeitbelastung wurden die Prüfkörper zur Ermittlung der Resttragfähigkeit noch einem statischen Kurzzeitversuch unterzogen.

4.1 Versuchsserien K1 und L1 (Tabelle 2)

Die Prüfkörper der Serie K1 wurden nach der Herstellung in einem Laborraum mit konstantem Normalklima 20/65 unbelastet gelagert. Die statische Prüfung von je 5 Versuchskörpern der Nageltypen A und B erfolgte unmittelbar nach Herstellung (K10) sowie jeweils nach 1, 2, 3, 6, 9 und 12 Monaten (K11 - K12 - K13 - K16 - K19 - K112).

Die Verschiebungen bzw. Bruchlasten der K10-("Null"-)Versuche bildeten die Bezugswerte für alle nachfolgenden Kurzzeitversuche der Serien K1 bis K3 bzw. für alle Bruchversuche mit den Versuchskörpern der Serien L1 bis L3.

Je 10 Prüfkörper der Nagelvarianten A und B (Serie L1) wurden nach der Herstellung im konstanten Normalklima 20/65 über ein Jahr konstant mit $F = 2000 \text{ N}$ belastet. Die Kriechverformungen wurden wöchentlich gemessen und auf die Einzelwerte der Anfangsverschiebungen bezogen, die etwa 2 min nach der Erstbelastung abgelesen worden waren.

4.2 Versuchsserien K2 und L2 (Tabelle 2)

Nach der Herstellung wurden die Prüfkörper der Serie K2 in einem überdachten, zweiseitig offenen Schuppen unbelastet gelagert. Das Außenklima wurde wie das Normalklima 20/65 kontinuierlich mit einem Thermo-Hygrographen aufgezeichnet. Die jeweiligen Tagesmittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit sind in Bild 6 und 7 (Anlage 3 und 4) graphisch aufgetragen.

Im Rhythmus von einem Monat wurden ein Jahr lang je 5 Prüfkörper beider Nagelvarianten geprüft (K21 - K22 - ...- K212).

Die Langzeitversuche der Serie L2 wurden am selben Tag unter gleichen Bedingungen wie Serie L1 angesetzt, jedoch einem natürlichen Außenklima entsprechend Serie K2 ausgesetzt. Die Messung der Verschiebungen erfolgte zweimal wöchentlich.

4.3 Versuchsserien K3 und L3 (Tabelle 3)

Die Prüfkörper der Serien K3 bzw. L3 wurden unbelastet bzw. unter konstanter Dauerlast von 2000 N zyklischen Klimawechseln ausgesetzt. Nach den orientierenden Versuchsreihen K3a und L3a wurde das Wechselklima für die folgenden Serien auf das besser regelbare, gemäßigttere Feuchteklima 20/85 und das Trockenklima 40/40 festgelegt.

Über die Zeitdauer eines Zyklus, der sich aus einer Feuchte- und Trockenzyklushälfte zusammensetzte, konnte das Erreichen der Ausgleichsfeuchte der Prüfkörper gesteuert werden. Da jedoch auch die im gemäßigtteren Wechselklima 20/85 - 40/40 mögliche Feuchteänderung $\Delta u_{Fi} \pm 11 \%$ im Fichtenholz für eine Nagelverbindung eine immer noch unrealistisch hohe Beanspruchung darstellen würde, wurde die Zeitdauer eines Zyklus nur zwischen 2 und 4 Tagen variiert. Damit wurde ein Δu_{Fi} von maximal $\pm 6 \%$ erreicht.

Die Holzfeuchte der Prüfkörper bei Versuchsbeginn entsprach der Ausgleichsfeuchte für das Umgebungsklima, dem die Prüfkörperteile zum jeweiligen Zeitpunkt ihrer Herstellung ausgesetzt waren.

Die Kriechverformungen bei den Serien L1 bis L3 wurden nach jedem Klimawechsel gemessen und auf die entsprechenden Anfangsverschiebungen bezogen, die aus versuchstechnischen Gründen etwa 2 min nach der Lastaufbringung abgelesen worden waren.

Die Prüfkörper der Serie K3c wurden nach 2, 4, 6, 8 und 10 Zyklen statisch geprüft, während die übrigen Scherkörper nur nach Beendigung der einzelnen Serien einer Kurzzeitprüfung unterzogen wurden (Tabelle 3).

5 Darstellung und Erläuterung der Versuchsergebnisse

Für die Druckscherkörper mit den Nageltypen A bzw. B - im folgenden kurz "A" bzw. "B" bezeichnet - wurden die absoluten und relativen Verschiebungen sowie die Bruchlasten ermittelt.

5.1 Verformungsverhalten bei den Kurzzeitversuchen der Serien K und L

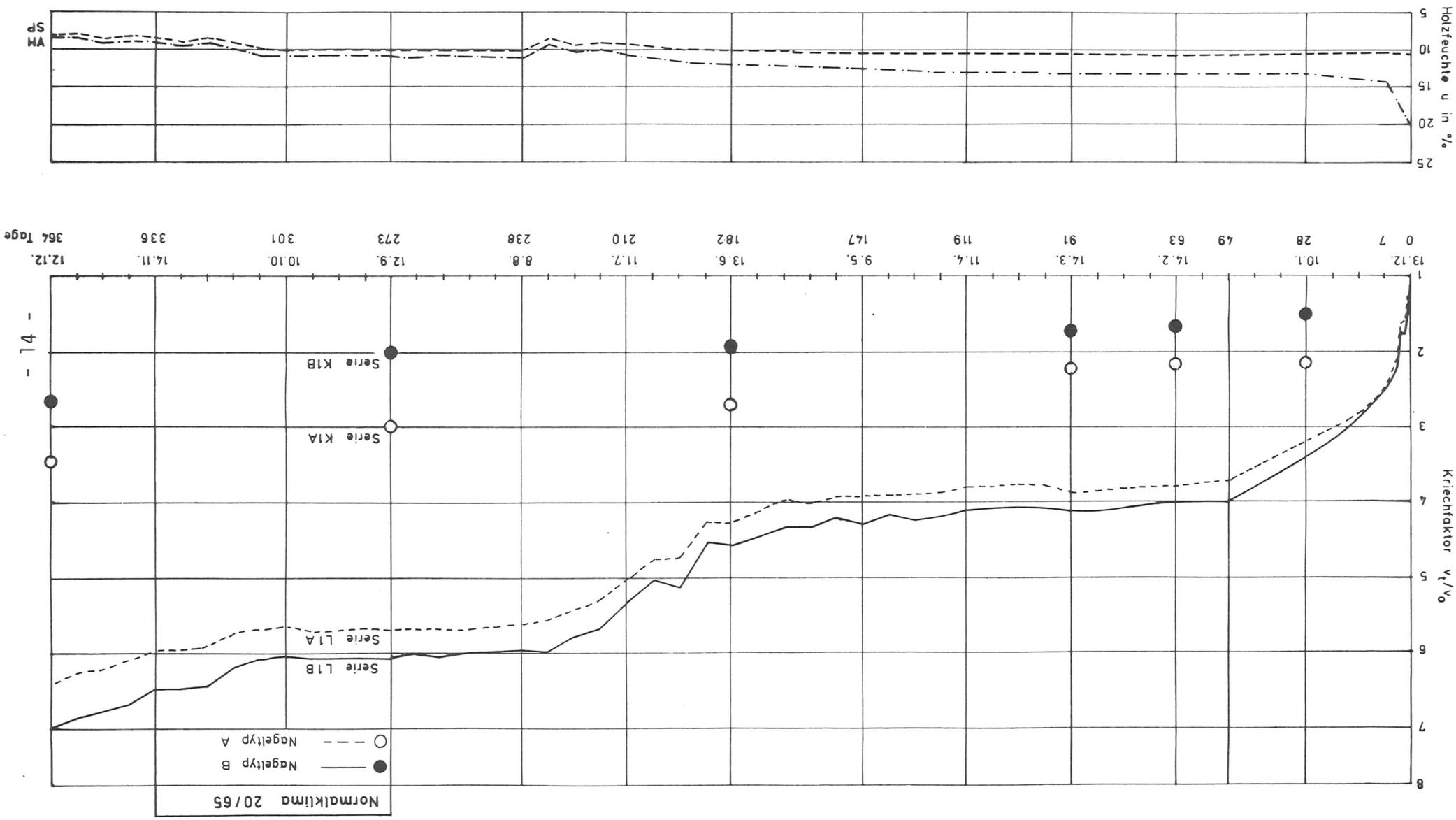
5.1.1 Serie K1 unter Normalklima 20/65 (Tabelle 4 (Anlage 5) und Bild 8)

Eine Austrocknung der unbelastet gelagerten Nagelverbindungen führte infolge Schwindens zu einer Verbreiterung der Verbindungsfugen, deren Einfluß auf die Verschiebungszunahme gegenüber den vergleichbaren Werten der "Nullversuche" (Serie K10) mit fortschreitender Belastung und Verfestigung des Nagelbetts nachließ. Unter 2 x zul F traten bei "A" und "B" nur noch etwa die halben relativen Verschiebungen $\frac{v_K(\Delta u)}{v_K(\Delta u=0; t=0)}$ der Werte unter zul F auf.

Die gemessenen mittleren Verschiebungen sind in Tabelle 4 (Anlage 5) zusammengestellt und zeigen, daß sowohl unter zul F als auch 2 x zul F die Werte für "B" größer sind als für "A". Die Streuungen der Verschiebungswerte bei "B" sind jedoch unter zul F etwas geringer und unter 2 x zul F wesentlich geringer als bei "A".

Die auf die Werte der "Nullversuche" bezogenen Verschiebungen sind in Bild 8 dargestellt und weisen nach 28 Tagen einen 1,5- bzw. 2,1-fachen Anstieg der Anfangsverschiebungen $v_K(\Delta u = 0, t = 0)$ von "B" bzw. "A" unter zul F auf. Bedingt durch eine unregelmäßige Klimaführung stiegen die Verschiebungen mit zunehmender Austrocknung nach 364 Tagen auf ihren 2,7- bzw. 3,5-fachen Ausgangswert von "B" bzw. "A" an. Unter 2 x zul F erreichten die Verschiebungen $v_K(\Delta u, t = 364)$ nur den 1,1- bzw. 1,5-fachen Anfangswert $v_K(\Delta u = 0, t = 0)$ bei "B" bzw. "A".

Bild 8: Verlauf der relativen Verformungen und des Feuchtegehaltes bei den Serien K1 und L1



5.1.2 Serie K2 unter natürlichem Außenklima unter Dach
(Tabelle 5 (Anlage 6), Bild 9)

Die jahreszeitlich bedingten Klimaveränderungen hatten zu Beginn und am Ende der Versuchsserie hohe Holzfeuchten und entsprechend niedrige Verschiebungen unter zul F infolge quellungsbedingter Reibung in den Scherfugen zur Folge. Die starke Austrocknung der Verbindungen in den Sommermonaten verursachte im August ein Verschiebungsmaximum in Höhe des 2,5- bzw. 3,1-fachen Ausgangswertes v_K ($\Delta u = 0, t = 0$) von "B" bzw. "A" (siehe Bild 9). Bei den vergleichbaren Ergebnissen unter $2 \times$ zul F ist infolge zunehmender Verdichtung des Nagelbettes kaum noch eine trocknungsbedingte Verschiebungserhöhung zu erkennen (Tabelle 5).

Wie bei Serie K1 ergeben sich auch bei Serie K2 für den Nageltyp "B" im Mittel größere Verschiebungen als für den Nageltyp "A". Die Streuungen der Verschiebungswerte unter zul F fallen deutlich höher aus als bei der Serie K1. Unter der zweifachen zulässigen Belastung ist dies nur für den Nageltyp "B" der Fall.

5.1.3 Serie K3 unter Wechselklima (Tabelle 6 und 7) (Anlage 7 und 8)

Die be- und entfeuchtungsbedingten Verschiebungen lagen in der Größenordnung der Ergebnisse der Serien K1 und K2 und erreichten je nach Austrocknungsgrad die 2,4- bis 3,2- bzw. 2,6- bis 3,6-fachen Anfangswerte v_K ($\Delta u = 0, t = 0$) bei "B" bzw. "A".

5.1.4 Serie L1 unter Normalklima 20/65 (Tabelle 4)

Der statische Kurzzeitversuch, der bei den Serien L1 und L2 nach zwölfmonatiger Belastung und anschließender eintägiger Entlastung durchgeführt wurde, ergab bei den Versuchskörpern der Serie L1 die gleichen mittleren Verschiebungen unter zul F wie die Versuchskörper

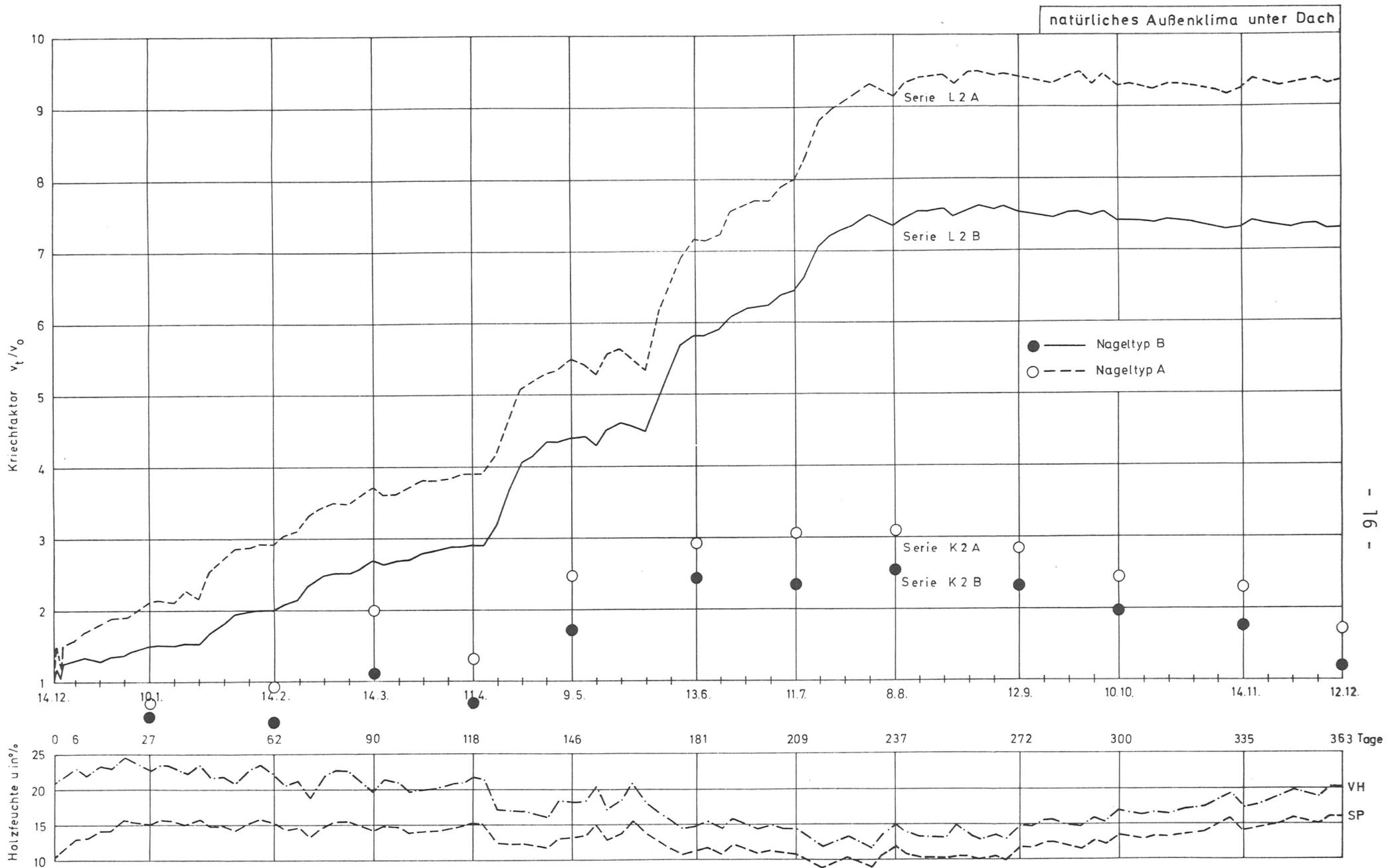


Bild 9: Verlauf der relativen Verformungen und des Feuchtegehaltes bei den Serien K2 und L2

K112 (siehe Tabelle 4). Unter der zweifachen zulässigen Belastung sind die Verschiebungen bei der Serie L1 erwartungsgemäß geringer als bei der Serie K1. Die Mittelwerte unterscheiden sich bei "A" um ca. 23 % und bei "B" um ca. 15 % bezogen auf die Werte der Serie K1. Auch unter der zweifachen zulässigen Last überschritt kein Scherkörper die Verschiebung von 1,5 mm. Die Verschiebungen waren bei "A" im Mittel etwas geringer als bei "B" ($\bar{v}_A/\bar{v}_B \approx 0,85$).

5.1.5 Serie L2 unter natürlichem Außenklima unter Dach (Tabelle 5)

Die Verschiebungswerte bei zulässiger Belastung lagen aufgrund von Quellungseinflüssen um den Faktor 2 unter den Werten der Serie L1 und "A" unterschied sich von "B" fast nicht ($\bar{v}_A/\bar{v}_B \approx 0,95$). Damit wichen die mittleren Verschiebungen der Scherkörper L212 von denen der Scherkörper K212 praktisch nicht ab (siehe Tabelle 5). Unter der zweifachen zulässigen Belastung blieben die Tendenzen beim Vergleich mit der Serie L1 und beim Vergleich "A" mit "B" erhalten. Alle Einzelwerte der Verschiebungen blieben bei Belastung mit $2 \times \text{zul } F$ unter 1,0 mm.

5.1.6 Serie L3 unter Wechselklima (Tabelle 6 und 7)

Nach Abschluß des letzten Klimazyklus wurden die Versuchskörper entlastet und 1 Stunde später im statischen Kurzzeitversuch geprüft. Die mittleren Verschiebungen der Serien L3a bis L3d können den Tabellen 6 und 7 entnommen werden. Diese Mittelwerte liegen bei zweifacher zulässiger Belastung mit einer Ausnahme (L3b, Nageltyp "B") unter dem Wert von 1,5 mm. Bei $\text{zul } F$ wird in keinem Fall eine mittlere Verschiebung von ca. 0,5 mm überschritten.

5.2 Verformungsverhalten bei den Langzeitversuchen der Serien L1 bis L3

5.2.1 Serie L1 unter Normalklima 20/65 (Tabelle 4, Bild 8 und 10)

Die starke Trocknung der Verbindungen innerhalb der ersten 7 Tage unter konstanter zulässiger Belastung (Feuchteänderung $\Delta u_{\text{VH}} = - 7,5 \%$) führte zu einem steilen Anstieg des Kriechfaktors $\frac{v_L(\Delta u, t=7)}{v_L(\Delta u=0, t=0)} = 2,5$ für "A" und "B".

Während der Austrocknung der Scherkörper auf die Ausgleichsfeuchte entsprechend dem Umgebungsklima 20/65 ist die rein zeitabhängige Verdichtung des Nagelbetts $v_L(t)$ von einer feuchteänderungsabhängigen Verformung $v_L(\Delta u(t))$ überlagert.

Zwischen etwa 30 und 50 Tagen ging das Kriechen von "A" bzw. "B" bei nahezu konstanten Klimaverhältnissen über in einen nur noch zeitabhängigen, schwach ansteigenden Verlauf und erreichte nach 182 Tagen Kriechfaktoren $\frac{v_L(\Delta u, t=182)}{v_L(\Delta u=0, t=0)} = 4,3$ bzw. 4,6 ("A" bzw. "B").

In den sehr heißen Sommermonaten Juni und Juli 1983 sowie zu Beginn der Heizperiode Mitte Oktober fiel die relative Luftfeuchte infolge überforderter Klimaregelung auf unter 50 % ab. Eine weitere Austrocknung der Verbindungen in diesen Zeiträumen bewirkte einen rapiden Anstieg der Kriechverformungen auf den zuletzt 6,4- bzw. 7,0-fachen Ausgangswert bei "A" bzw. "B".

Die absoluten Endverschiebungen erreichten 0,8 bzw. 1,0 mm (siehe Bild 10).

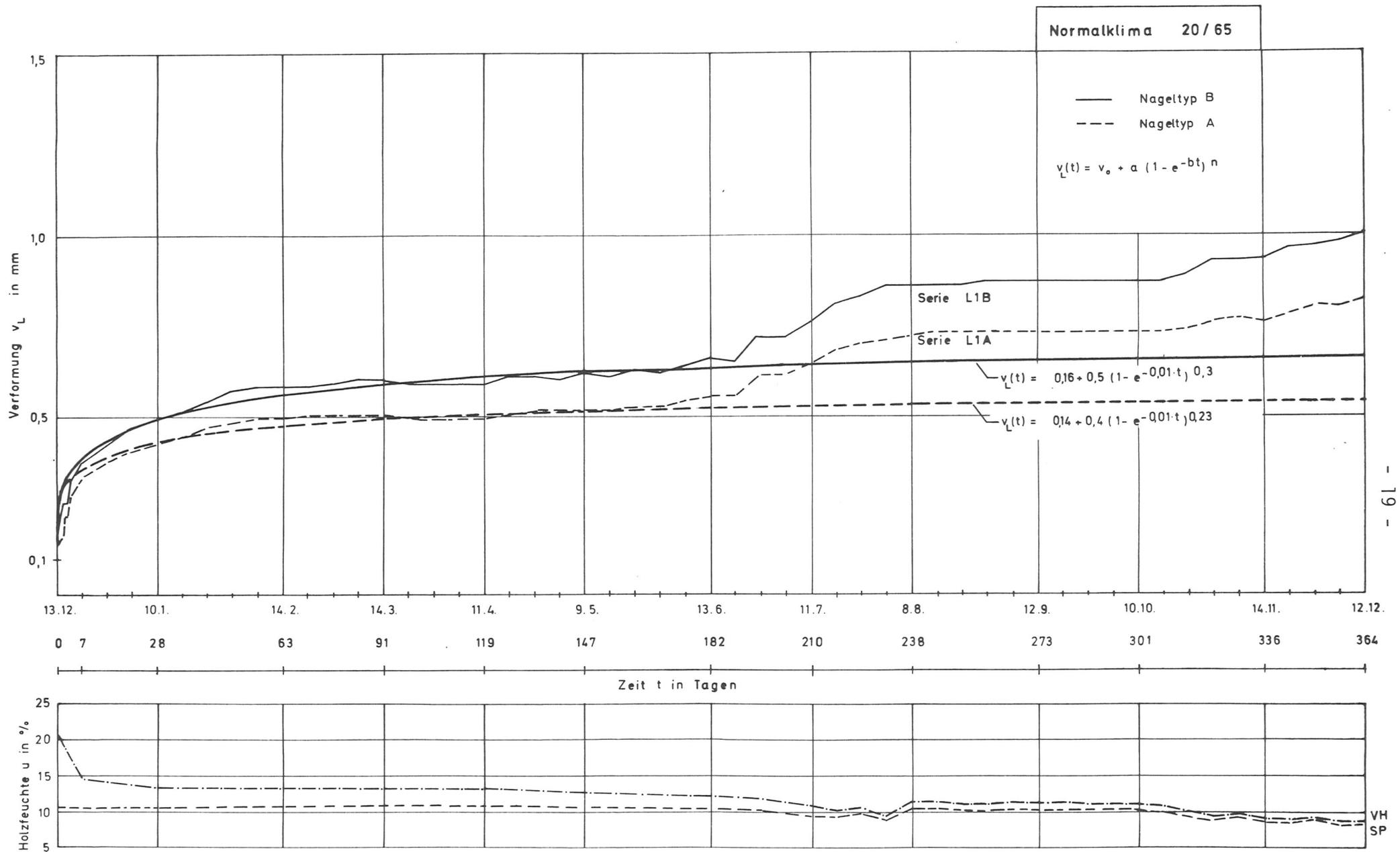


Bild 10: Verlauf der absoluten Verformungen, der angepaßten Exponentialfunktionen und des Feuchtegehaltes bei der Serie L1

5.2.2 Serie L unter natürlichem Außenklima unter Dach
(Tabelle 5, Bild 9 und 11)

Infolge Befeuchtung der Prüfkörper während der ersten 122 Tage (Dezember 1982 bis April 1983) stiegen die relativen Verschiebungen von "B" bzw. "A" unter gleichzeitiger konstanter zulässiger Belastung etwa linear an, um unter wachsender Austrocknung der Verbindungen während der nächsten 108 Tage steil von $\frac{v_L(\Delta u, t=122)}{v_L(\Delta u=0, t=0)} = 2,9$ bzw. $3,8$ auf $\frac{v_L(\Delta u, t=230)}{v_L(\Delta u=0, t=0)} = 7,5$ bzw. $9,3$ ("B" bzw. "A") anzusteigen.

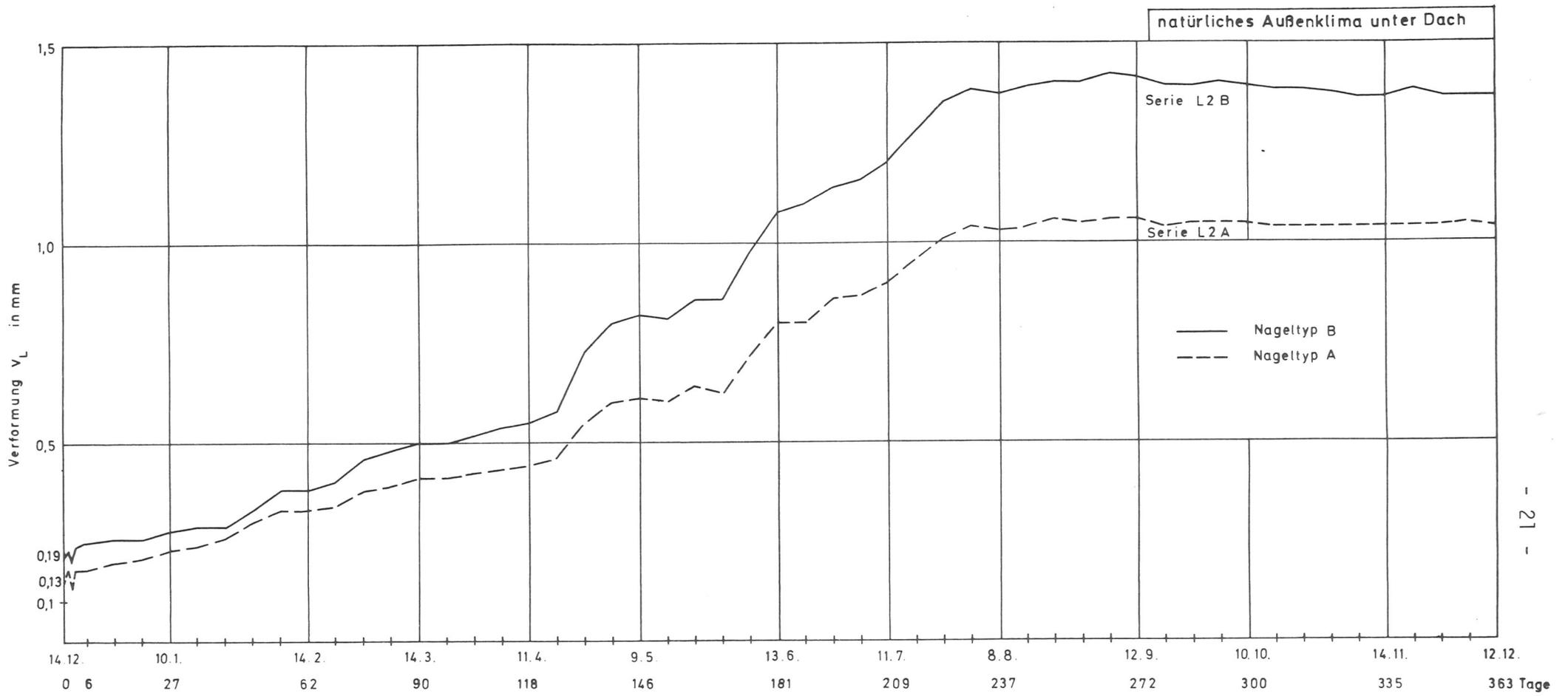
Unter allmählicher Wiederbefeuchtung während der letzten 133 Tage erreichte der Kriechverlauf beider Nageltypen Anfang September sein Maximum mit $\frac{v_L(\Delta u, t=262)}{v_L(\Delta u=0, t=0)} = 7,6$ bzw. $9,5$ und nahm bis Mitte Dezember 1983 geringfügig auf $\frac{v_L(\Delta u, t=363)}{v_L(\Delta u=0, t=0)} = 7,3$ bzw. $9,3$ ab.

Die höchsten Absolutverschiebungen lagen bei $1,1$ ("A") bzw. $1,4$ mm ("B") (siehe Bild 11) und entsprachen annähernd den vergleichbaren Höchstwerten der Kurzzeitversuche (K2) unter $2 \times \text{zul F}$.

5.2.3 Serie L3 unter Wechselklimateinfluß (Tabelle 6 und 7,
Bild 12 und 13)

Bei allen zeitgerafften Wechselklimaversuchen ist die absolute Verschiebungszunahme nach dem ersten vollständigen Zyklus infolge Verfestigung des Nagelbetts am größten.

Bei den folgenden Befeuchtungszyklushälften ist gegenüber den Trockenzyklushälften ein konstanter bzw. nur leicht steigender oder sogar rückläufiger Verschiebungsverlauf zu beobachten, der sich mit zunehmender Versuchsdauer einem Endwert zu nähern scheint.



- 21 -

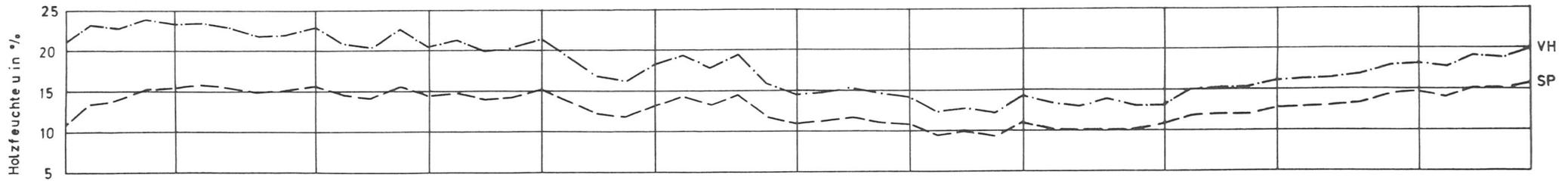


Bild 11: Verlauf der absoluten Verformungen und des Feuchtegehaltes bei der Serie L2

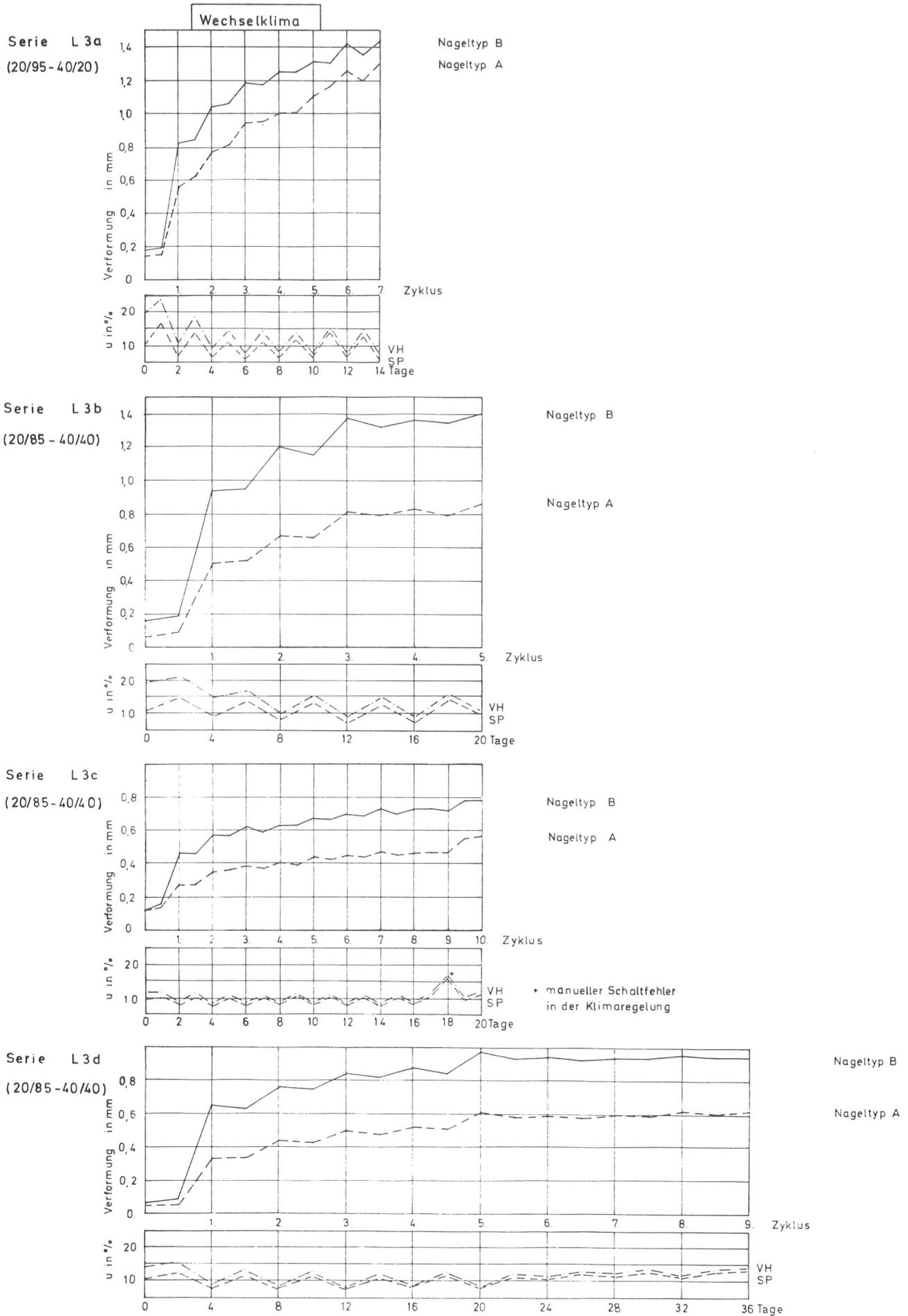


Bild 12: Verlauf der absoluten Verformungen und des Feuchtegehaltes bei den Serien L3a bis L3d

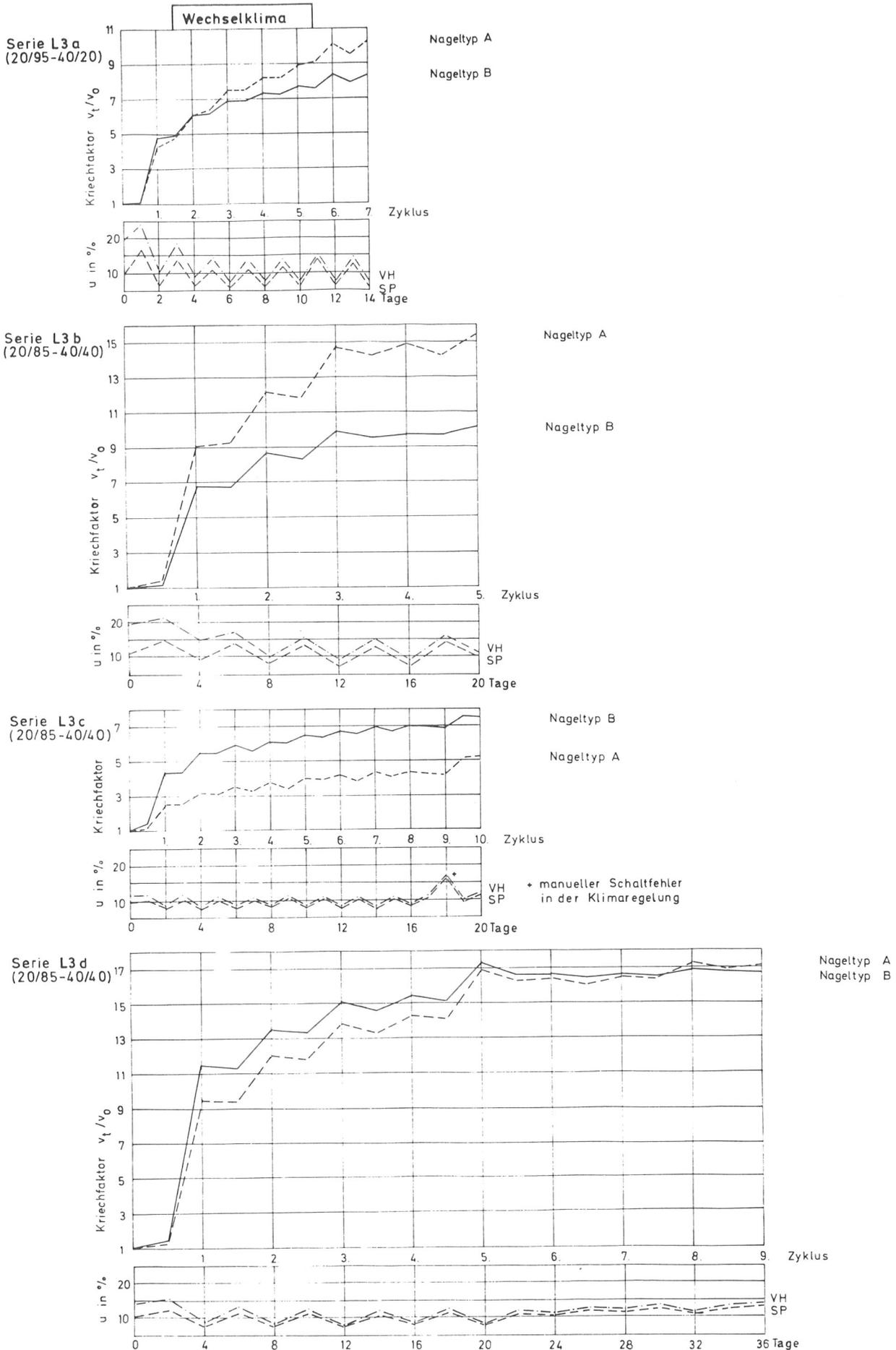


Bild 13: Verlauf der relativen Verformungen und des Feuchtegehaltes bei den Serien L3a bis L3d

Ein nahezu gleichmäßiger Feuchtigkeitsverlauf, wie infolge einer fehlerhaften Wechselklimaführung ab dem 5. Zyklus der Serie L3d, führt zu einem nur noch geringfügig ansteigenden Kriechverlauf, der sich auch in den Kriechkurven der Serie L1 gezeigt hat. Die Endverformungen werden überwiegend von der Höhe der in den Scherkörpern erzielten Feuchteänderungen $\Delta u(t)$ beeinflusst. Die absoluten Verschiebungen der Serien L3a bis L3d erreichten nach dem 1. Zyklus Werte zwischen 0,3 und 0,6 mm bei "A" bzw. 0,5 und 0,9 mm bei "B", die mindestens den halben Endverformungen entsprachen, die zwischen 0,6 und 1,3 mm bzw. 0,8 und 1,4 mm lagen.

Während beim Verlauf der absoluten Verschiebungen "B" wie bei den Serien L1 und L2 stärker kriecht als "A", weicht das relative Kriechverhalten um so mehr von diesem "Normalfall" ab, je größer die Differenz der Anfangsverschiebungen zwischen "B" und "A" ist.

Wegen stark streuender Anfangsverschiebungen sind auch nur die absoluten Endverformungen der Serien L2 und L3b miteinander zu vergleichen, während die entsprechenden Kriechfaktoren der Serie L2 (9,3 und 7,3) am ehesten mit den Werten "A" und "B" von L3a (10,4 und 8,4) übereinstimmen.

5.3 Tragverhalten bei den Kurzzeitversuchen der Serien K und L

5.3.1 Serien K1 und L1 und Normalklima 20/65

Die mittleren Bruchlasten der unbelastet gelagerten Scherkörper "A" erreichten das etwa 3,4 bis 4-fache der zulässigen Belastung, während die Scherkörper "B" der Serie K1 mittlere Bruchlasten aufwiesen, die zwischen der 4,2-fachen (bei Versuchsbeginn) und der 5,1-fachen zulässigen Belastung lagen. Die Bruchversuche mit den Versuchskörpern der Serie L112, d.h. Kurzzeitversuch nach zwölfmonatiger Belastung unter zul F und anschließender eintägiger Entlastung, erbrachten nahezu die gleichen mittleren Bruchlasten wie die unbelasteten Scherkörper der Serie K 112. Die Streuungen der Versuchswerte lagen bei "A" bei allen Serien höher als bei "B".

Die anfänglich starke Austrocknung des Vollholzes hatte bei "A" und "B" zunächst eine Tragkraftsteigerung zur Folge, die dann für "A" bei weiterer Feuchteabnahme in eine Bruchlastminderung überging, während für "B" der Trend zunehmender Tragkraft bei abnehmender Holzfeuchte bis zu einem $u_{VH} \cong 11 \%$ bestehen blieb. Die durch Unstetigkeiten in der Klimaregelung sich ergebenden Feuchten von $u_{VH} \cong 8,5 \%$ und $u_{SP} \cong 9 \%$ scheinen für die Tragkraftabnahme bei "A" und auch bei "B" verantwortlich zu sein. Die mittleren Bruchlasten sowie die Variationskoeffizienten der Serien K1 und L1 sind in Tabelle 4 (Anlage 5) zusammengestellt.

5.3.2 Serien K2 und L2 unter natürlichem Außenklima unter Dach

Die mittleren Bruchlasten der unbelastet gelagerten Scherkörper "A" erreichten das etwa 3,6- bis 4,4-fache der zulässigen Belastung, während die Scherkörper "B" der Serie K2 die 4,3- bis 5,1-fachen Werte der zulässigen Belastung aufwiesen. Die an den Versuchskörpern der

Serie L212 festgestellten mittleren Bruchlasten weichen von den Ergebnissen der Serie K212 im Falle "A" minimal und im Fall "B" auch nur um 7 % voneinander ab. Die Bruchlasten der Scherkörper "A" hatten im Verlauf eines Jahres von Dezember bis wieder Dezember zunehmende Tendenz, während bei "B" ab dem 3. Monat der Versuchsdauer mit einer Ausnahme keine starken Änderungen der Bruchlasten zu verzeichnen waren. Die mittleren Bruchlasten sowie die Variationskoeffizienten der Serien K2 und L2 sind in Tabelle 5 (Anlage 6) zusammengestellt.

5.3.3 Serien K3 und L3 unter Wechselklima

Die Versuchskörper der Serien K3a/L3a und K3b/L3b zeigten bezüglich der mittleren Bruchlasten sehr ähnliches Verhalten. Die mittleren Bruchlasten bei "A" betragen nach den 14 bzw. 20 Tagen Wechselklima noch das 3 bis 3,2-fache der zulässigen Belastung gegenüber dem 3,7-fachen Wert der "Nullversuche". Die mittleren Bruchlasten der Versuchskörper "B" wurden durch die Klimawechsel der Serien 3a und 3b nicht beeinflusst und ergaben den 4,2- bis 4,3-fachen Wert der zulässigen Belastung. Die während der Klimawechsel mit $z_{ul F}$ belasteten Versuchskörper erreichten im Kurzzeitversuch nach Abschluß der Wechselklimabelastung in etwa die Werte der Serien K3a/b nach 14 bzw. 20 Tagen. Die in der Serie K3c zusammengefaßten, den Klimawechseln ohne äußere Last ausgesetzten Scherkörper ergaben wegen der geringen Probenzahl zwar größere Unterschiede in den mittleren Bruchlasten ($2,8 \times$ bis $5,2 \times z_{ul F}$), im Mittel aber blieben die Versuchskörper "B" von den Klimawechseln unbeeinflusst während bei "A" ein geringer Abfall der mittleren Bruchlasten infolge Klimabeanspruchung zu verzeichnen war. Die Ergebnisse der Serie L3c stützen diese Aussage. Vergleicht man die Ergebnisse der "Nullversuche" mit denen der Serie L3d ergibt sich für "A" derselbe Trend wie in den Serien K,L3a bis K,L3c, während die mittlere Bruchlast für "B" mit $4,8 \times z_{ul F}$ am Ende des Klimawechselversuches über dem Wert der "Nullversuche" mit $4,2 \times z_{ul F}$ liegt.

Die mittleren Bruchlasten für die Serien K3a/3c sowie L3a/3c sind in Tabelle 6 (Anlage 7) und für die Serien K3b und L3b/3d in Tabelle 7 (Anlage 8) zusammengestellt.

5.4 Zusammenfassende Darstellung

Für die Spanplatten-Vollholz-Verbindungen mit den Nageltypen A bzw. B - im folgenden kurz mit "A" bzw. "B" bezeichnet - wurden die mittleren absoluten und relativen Verschiebungen sowie Bruchlasten ermittelt.

Die Ergebnisse aller Kurz- und Langzeitversuche sind unter Angabe der jeweiligen Versuchsdauer in Monaten bzw. Tagen und der entsprechenden Holzfeuchten der Prüfkörperteile in den Tabellen 4 bis 7 (Anlagen 5 bis 8) zahlenmäßig gegenübergestellt. Von den Verformungen der Langzeitversuche L1 und L2 (Tabelle 4 und 5) sind nur die jeweiligen Monatswerte angegeben, die zum Zeitpunkt der statischen Kurzzeitversuche K1 und K2 abgelesen wurden. Die graphische Darstellung der absoluten und relativen Verschiebungen wird in den Bildern 8 bis 13 durch die Angabe des Feuchtigkeitsverlaufs ergänzt.

Bei den statischen Kurzzeitversuchen der Serien K1 bis K3 haben die Nagelverbindungen K3a (Wechselklima 20/95 - 40/20) selbst nach extremer Austrocknung ($\Delta u_{VH} \approx -13\%$, $\Delta u_{SP} \approx -5\%$) höchstens mittlere Verschiebungen $v_K (\Delta u) = 0,5$ mm unter zul F bzw. 1,8 mm unter 2 x zul F bei "A" bzw. "B" erreicht. Unter den Langzeitversuchen der Serien L1 bis L3 wurden die höchsten Kriechverformungen in der Serie L3a (Wechselklima 20/95 - 40/20) mit $v_L (\Delta u(t)) = 1,3$ bzw. 1,4 mm bei "A" bzw. "B" ermittelt (Tabelle 6). "B" zeigte gegenüber "A" überwiegend etwas größere absolute Verschiebungen.

Eine Austrocknung der unbelastet gelagerten Nagelverbindungen (K1 bis K3) führte infolge Schwindens zu einer Verbreiterung der Verbindungsfugen, deren Einfluß auf die Verschiebungszunahme gegenüber den ver-

gleichbaren Werten der "Nullversuche" (Serie K10) mit fortschreitender Belastung und Verfestigung des Nagelbetts nachließ. Unter 2 x zul F traten bei "A" bzw. "B" nur noch etwa die halben relativen Verschiebungen $\frac{v_K(\Delta u)}{v_K(\Delta u=0, t=0)}$ der Werte unter zul F auf.

Trockneten die Prüfkörper dagegen unter zulässiger Langzeitbelastung (L1 bis L3) aus, erhöhten sich die Kriechverformungen $v_L(\Delta u(t))$ auf die etwa 2- bis 3-fachen Werte $v_K(\Delta u)$ unter zulässiger Kurzzeitbelastung (Tabelle 4 bis 7).

Die absoluten Kriechverformungen $v_L(\Delta u(t))$ eines Nagelbettes sind erst mit Erreichen der Ausgleichsfeuchte des jeweiligen Umgebungsklimas beendet und gehen nur bei konstant bleibender Holzfeuchte (bis $t = 182$ Tage) in einen rein zeitabhängigen Kriechverlauf über, der sich asymptotisch einem Grenzwert nähert (Serie L1, Bild 10).

Die absoluten Kriechverformungen der Serie L2 steigen zunächst bis zur Verfestigung des Nagelbetts auch bei Feuchtigkeitszunahme $+\Delta u(t)$ an, jedoch weit geringer als bei der starken Austrocknung bei Versuchsbeginn der Serie L1.

Jede weitere Verformungszunahme ist von der Größe der Feuchtigkeitsabnahme $-\Delta u(t)$ abhängig, während eine Wiederbefeuchtung $+\Delta u(t)$ zu einer möglichen Kriecherholung oder Kriechverzögerung führen kann. Die innere Quellkraft zwischen den quer zur Faserrichtung verdichteten Holzfasern im Nagelbett muß jedoch größer als die äußere Nagelbelastung sein (Bild 11).

Die Endverformungen der Serie L2 werden am besten durch die Ergebnisse der Wechselklimaversuche der Serie L3b angepaßt, weil diese vorwiegend durch die Höhe der Feuchteänderungen $\pm \Delta u(t)$ bezogen auf die Herstellfeuchte der Scherkörper beeinflußt werden (Bild 12). Bei den Verformungen von "B" zeigten sich überwiegend kleinere Variationskoeffizienten als bei solchen von "A". Bei den Langzeitversuchen der

Serien L1 und L2 waren bei konstantem Verformungsverlauf auch konstante Variationskoeffizienten zu beobachten, die sich mit steigenden Kriechverschiebungen verminderten. Starke Unterschiede bei den Streuungen der Anfangs- ($v_L (\Delta u = 0, t = 0)$) und Kriechverschiebungen $v_L (\Delta u (t))$ wirkten sich auf die Variationskoeffizienten der Kriechfaktoren $\frac{v_L (\Delta u (t))}{v_L (\Delta u = 0, t = 0)}$ (Zeit in Tagen) negativ aus. Stimmt die Variationskoeffizienten von $v_L (\Delta u = 0, t = 0)$ und $v_L (\Delta u (t))$ gut überein ("B" der Serie L2), streuten auch $\frac{v_L (\Delta u (t))}{v_L (\Delta u = 0, t = 0)}$ nur noch gering. Die stärksten Streuungsvermindernungen ergaben sich nach dem ersten Belastungsmonat (L1, L2) bzw. Belastungszyklus (L3) und sind mit einem Zurechtrücken der Nägel im Holz zu Beginn der Belastung sowie mit allmählicher Verdichtung des Nagelbetts unter zunehmender Austrocknung zu erklären.

Der Kriechfaktor $\frac{v_L (\pm \Delta u (t))}{v_L (\Delta u = 0, t = 0)}$ von "A" und "B" aller Langzeitversuche L1 bis L3 wird entscheidend beeinflusst von den sehr stark streuenden zeitunabhängigen (elastischen) Anfangsverschiebungen $v_L (\Delta u = 0, t = 0)$ in Verbindung mit größerem Kriechen von "B" gegenüber "A". Die starken Streuungen der gemessenen Verschiebungen der Scherkörper unter Kurz- und Langzeitbelastung sind vorwiegend auf die Unregelmäßigkeiten in der Struktur des Nadelholzes zurückzuführen, die auch durch sorgfältige Holz Auswahl nicht auszuschalten sind.

Ein Einfluß der Jahrringlage bezüglich der Einschlagrichtung der Nägel auf das Trag- und Verformungsverhalten sowie auf die Spaltgefahr war bei den geringen Nageldurchmessern nicht festzustellen.

Die Seitenhölzer aus Spanplatte V 100 scheinen sich gegenüber solchen aus Fichtenholz auf das Verformungsverhalten günstig auszuwirken wegen der höheren Rohdichte sowie der geringeren Feuchteänderungen $\max \Delta u_{Sp} \pm 5\%$ bei konstanter Anfangsfeuchte $u_N \approx 10\%$.

Die Tragfähigkeit der unbelasteten wie auch wiederbelasteten Scherkörper "A" (Serie K bzw. L) verringerte sich nur nach extremer Austrocknung ($\Delta u_{VH} > 10 \%$) gegenüber den "Nullversuchen" der Serie K10 auf maximal 3 x zul F, während die Scherkörper "B" ansteigende Höchstlasten erkennen ließen ($\max F \cong 4 \times \text{zul F}$). Bei Befeuchtung bzw. Wiederbefeuchtung erreichten "A" und "B" infolge erhöhter Reibung zwischen den Scherfugen im Vergleich zu Serie K10 ansteigende Bruchlasten. Die Bruchlasten wurden meist bei Verschiebungen unterhalb des Grenzwertes von 15 mm erreicht, der überwiegend für die Höchstlasten von "A" maßgebend wurde.

Die Variationskoeffizienten der Bruchlasten lagen häufig unter 10 % und nur in Ausnahmefällen über 15 %.

Die allgemein geringeren Streuungen der Höchstlasten von "B" gegenüber "A" sind wahrscheinlich mit der besseren Verankerung des Rillennagels im Nagelbett zu erklären. Die erhöhte Tragfähigkeit von "B" gegenüber Serie K10 läßt auch den Schluß zu, daß sich die wiederholten Feuchteänderungen Δu nicht nachteilig auf die maßgebenden Spanplatteneigenschaften der Seitenhölzer ausgewirkt haben. Die gute Wechselklimabeständigkeit der Seitenhölzer aus Spanplatte ist vermutlich auf die Verleimung V100 sowie die geringere Herstellfeuchte, die höhere Lochleibungsfestigkeit und größere Sorptionsträgheit im Vergleich zum Mittelholz zurückzuführen.

In den Bildern 14 bis 28 (Anlagen 9 bis 23) sind ausgewählte Kraft-Verschiebungsdiagramme von "A" und "B" gegenübergestellt, die dem jeweils durchschnittlichen Verformungsverhalten der Versuchskörper einer Serie nahekommen.

Alle unbelastet gelagerten Prüfkörper (K-Serien) zeigten bei ihrer Erstbelastung mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 1 mm/min viskoelastische (verzögert elastische) Verschiebungen, die sich bei Wiederbelastung oberhalb zul F zunehmend elastoplastisch verhielten. Nach einer ersten Verdichtung des Nagelbetts unter zul F verliefen die Verschiebungskurven bei Wiederbelastung deutlich steiler und schwächer gekrümmt.

Die Scherkörper der Serien K1 und K3 haben mit fortschreitender Austrocknung die höchsten Verschiebungszunahmen erzielt, die sich ab etwa 2 x zul F gegenüber den vergleichbaren Werten der "Nullversuche" K10 deutlich abgeschwächt haben (Bild 14, 15, 16, 22, 24).

Eine Austrocknung der Nagelverbindungen erhöhte den Auszieh Widerstand der Rillennägel gegenüber den runden Drahtnägeln. Das Verhaken der gerillten Nagelschäfte im Nagelbett setzte allerdings erst oberhalb einer Verschiebung von 1,5 mm ein. Die Kraft-Verschiebungslinie von "B" verlief deshalb auch etwas steiler als bei "A".

Eine Befeuchtung der Prüfkörper der Serie K2 bei Versuchsbeginn führte gegenüber den "Nullversuchen" K10 zu etwas kleineren Verschiebungen, die - nach der Trocknungsphase im Sommer einsetzenden Wiederbefeuchtung - unter zul F geringfügig über und unter 2 x zul F leicht unter den Anfangswerten K10 lagen (Bild 14, 18, 19, 20).

Während sich der Betrag der Verschiebungen infolge starker Austrocknung bei unbelastet bzw. nach Langzeitbelastung geprüften Verbindungen kaum unterschieden hat, war der Verschiebungsverlauf der vorverformten, wiederbelasteten Verbindungen der Serien L1, L3a und L3b bis zul F noch annähernd elastisch gegenüber dem viskoelastischen Verhalten der vergleichbaren, vorher unbelasteten Scherkörper (Bild 16, 17, 22, 23, 24 und 25).

Die wiederbefeuchteten Versuchskörper der Serien K212 und L212 (Bild 20 und 21) zeigten dagegen infolge quellungsbedingter, überlagerter Reibungseinflüsse in den Verbindungsfugen annähernd gleiches Verformungsverhalten. Die gegenüber "A" überwiegend etwas höheren Verschiebungen von "B" sind wahrscheinlich auf die Schaftprofilierung des Rillennagels zurückzuführen. Der Verzahnungseffekt des Rillennagels im Holz wirkte sich auch hier erst oberhalb einer Verschiebung von 1,5 mm durch höhere und geringer streuende Höchstlasten gegenüber einem

glattschaftigen Nagel aus. Die einen Tag bzw. eine Stunde nach Entlastung der Scherkörper der Serien L1, L2 bzw. L3 gemessenen Verschiebungen können nur unter konstanten Holzfeuchtigkeiten als bleibend angesehen werden. Würden die Prüfkörper wechselnden Klimazyklen ausgesetzt, wäre mit einer weiteren Kriecherholung zu rechnen.

Die Endverformungen aller Langzeitversuche abzüglich der bei gegebenen Feuchteverhältnissen fixierten Verformungen im Nagelbett stimmen recht gut mit den anschließend unter zulässiger Kurzzeitbelastung erzielten Verschiebungen überein.

6 Schlußfolgerungen

6.1 Tragfähigkeit, Verschiebungen und Verschiebungsmoduln unter Kurzzeitbelastung nach Feuchteänderungen

Die Auswertung der Kurzzeitversuche erfolgt in Anlehnung an ISO 6891.

In Bild 29 sind die mittleren absoluten Werte und Standardabweichungen der Tragfähigkeit, der Verschiebungen und Verschiebungsmoduln von vorher unbelasteten bzw. vorher belasteten Scherkörpern unter Kurzzeitbelastung nach Feuchteänderungen in Balkendiagrammen zusammengefaßt. Von den dargestellten Versuchswerten (98 "A" bzw. "B") waren durch extreme Feuchteänderungen 10 bzw. 7 Scherkörper "A" bzw. "B" vor der Prüfung im Mittelholz aufgespalten und wurden deshalb bei der Auswertung nicht berücksichtigt.

Die Tragfähigkeit ist bei "A" ≥ 6 kN (3 x zul F) und bei "B" ≥ 8 kN (4 x zul F). Gegenüber den "Nullversuchen" K 10 (Herstellfeuchte u_H = Prüfffeuchte u_p) werden bei "A" nach extremen Feuchteänderungen ($u_p \ll u_H$) meist geringere und bei "B" höhere Tragfähigkeiten erreicht.

Von den Verschiebungen unter zul F sind die Anfangsverschiebungen v_K (Δu) und die elastischen Verschiebungen nach Entlastung und Wiederbelastung $v_{e,K}$ (Δu) aufgetragen. Die Anfangsverschiebungen von "B" liegen meist über denen von "A" und die elastischen Verschiebungen von "B" meist etwas unter denen von "A".

Eine Feuchteänderung führt infolge verbreiterter Verbindungsfugen ($u_p < u_H$) bzw. quellungsbedingter Reibung zwischen den Fugen der Scherkörper ($u_p > u_H$) zu einer Verschiebungszu- bzw. -abnahme. Aus den Anfangs- bzw. elastischen Verschiebungen errechnen sich die entsprechenden Verschiebungsmoduln wie folgt:

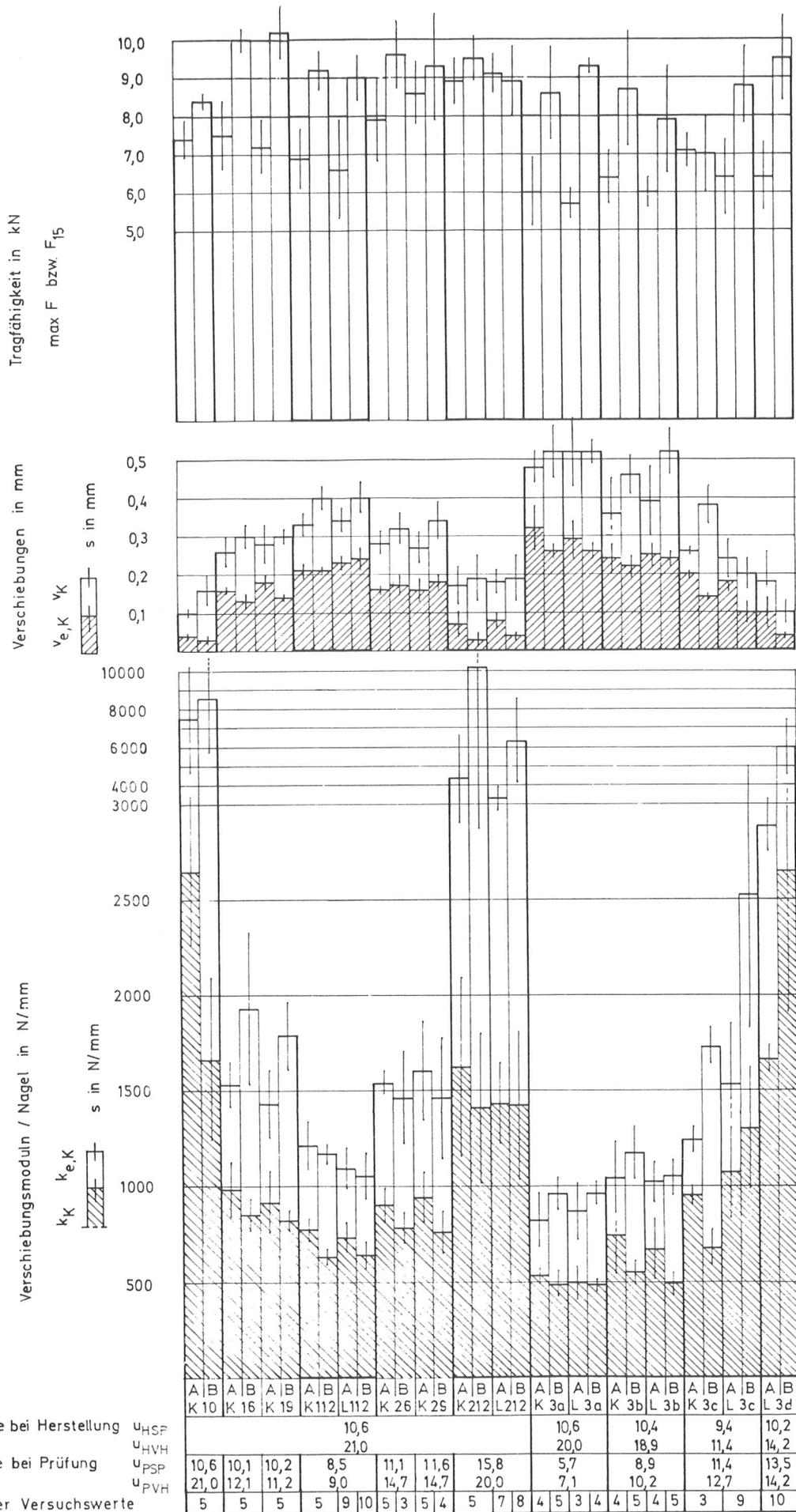


Bild 29: Absolutwerte der Tragfähigkeit, der Verschiebungen und der Verschiebungsmoduln unter Kurzzeitbelastung nach Feuchteänderungen

$$\text{Anfangsverschiebungsmodul/Nagel: } k_K(\Delta u) = \frac{zu1 F}{n \cdot v_K(\Delta u)}$$

$$\text{Elastischer Verschiebungsmodul/Nagel: } k_{e,K}(\Delta u) = \frac{zu1 F}{v_{e,K}(\Delta u)}$$

n = Anzahl der Nägel einer Verbindung

Für $u_p < u_H$ ausgewertet ergibt sich:

$$\text{für "A": } k_K = 500 \text{ bis } 1000 \text{ N/mm}$$

$$\text{für "B": } k_K = 500 \text{ bis } 800 \text{ N/mm}$$

$$\text{für "A": } k_{e,K} = 800 \text{ bis } 1600 \text{ N/mm}$$

$$\text{für "B": } k_{e,K} = 1000 \text{ bis } 1900 \text{ N/mm}$$

In Tabelle 8 sind die Relativwerte der mittleren Tragfähigkeiten, Verschiebungen und Verschiebungsmoduln von vorher langzeitbelastet - und vorher unbelastet gelagerten Scherkörpern unter Kurzzeitbelastung nach Feuchteänderungen ($u_p < u_H$) zusammengestellt.

Die vorher belasteten Nagelverbindungen haben gegenüber den vorher unbelastet gelagerten ihre Tragfähigkeit erhalten, während sich ihre Verschiebungsmoduln nur unwesentlich, nicht einheitlich vermindert haben.

6.2 Verformungen unter Feuchteänderungen bei zulässiger Langzeitbelastung

In Bild 30 sind die absoluten Kriechverformungen der Serien L1, L2 und L3b von "A" und "B" Versuchsergebnissen von Möhler [16] (siehe auch Abschnitt 2 des Berichtes) und Polensek [18] gegenübergestellt, die hinsichtlich Belastung und Klimaverhältnissen - jedoch hinsichtlich des Prüfkörperaufbaus nur bedingt - vergleichbar sind.

Tabelle 8: Relativwerte der mittleren Tragfähigkeiten, Verschiebungen und Verschiebungsmoduln unter Kurzzeitbelastung nach Feuchteänderungen
(Index K = vorher unbelastet, Index L = vorher belastet)

Serie	Holzfeuchte in % bei				Tragfähigkeit		Anfangs- verschiebung		Anfangs- verschiebungsmodul		Elastischer Verschiebungsmodul	
	Herstellung		Prüfung		$\frac{\max F_L}{\max F_K}$		$\frac{v_L}{v_K}$		$\frac{k_L}{k_K}$		$\frac{k_{e,L}}{k_{e,K}}$	
	u_{HSP}	u_{HVH}	u_{PSP}	u_{PVH}	A	B	A	B	A	B	A	B
112	10,6	21,0	8,5	9,0	1,0 (8,1)	1,0 (5,1)	1,1 (10,9)	1,0 (13,8)	0,9 (8,0)	0,9 (8,5)	1,0 (11,3)	1,0 (15,5)
212			15,8	20,0	1,0 (9,3)	0,9 (17,0)	1,1 (29,7)	1,1 (18,8)	0,9 (34,8)	0,9 (63,4)	0,9 (27,6)	1,0 (20,8)
3a	10,6	20,0	5,7	7,1	1,0 (9,0)	1,1 (15,9)	1,1 (22,5)	1,0 (15,8)	1,1 (23,2)	1,0 (7,7)	0,9 (24,5)	1,0 (15,1)
3b	10,4	18,9	8,9	10,2	1,0 (19,2)	0,9 (10,8)	1,1 (5,5)	1,1 (8,2)	1,0 (3,4)	0,9 (12,7)	0,9 (5,8)	0,9 (8,5)

Werte in Klammern geben den Variationskoeffizienten eines Relativwertes an

Die Kriechkurven der Versuche von Möhler (1966) und Polensek (1982) wurden nur herangezogen, um die erheblichen Auswirkungen von großen Feuchteänderungen $\Delta u(t)$ gegenüber konstantem Normalklima 20/65 bei Herstellung und Belastung auf das Verformungsverhalten von Nagelverbindungen quantitativ zu verdeutlichen.

Polensek hat unter anderem das Kriechverhalten von sechs Douglas Fir-Douglas Fir Sperrholz-Nagelverbindungen (1 Nagel 2,9 x 51 mm) mit konstanter Holzfeuchte $u = 12\%$ und unter $z_{ul} F = 280\text{ N}$ über einen Zeitraum von 10 Tagen untersucht.

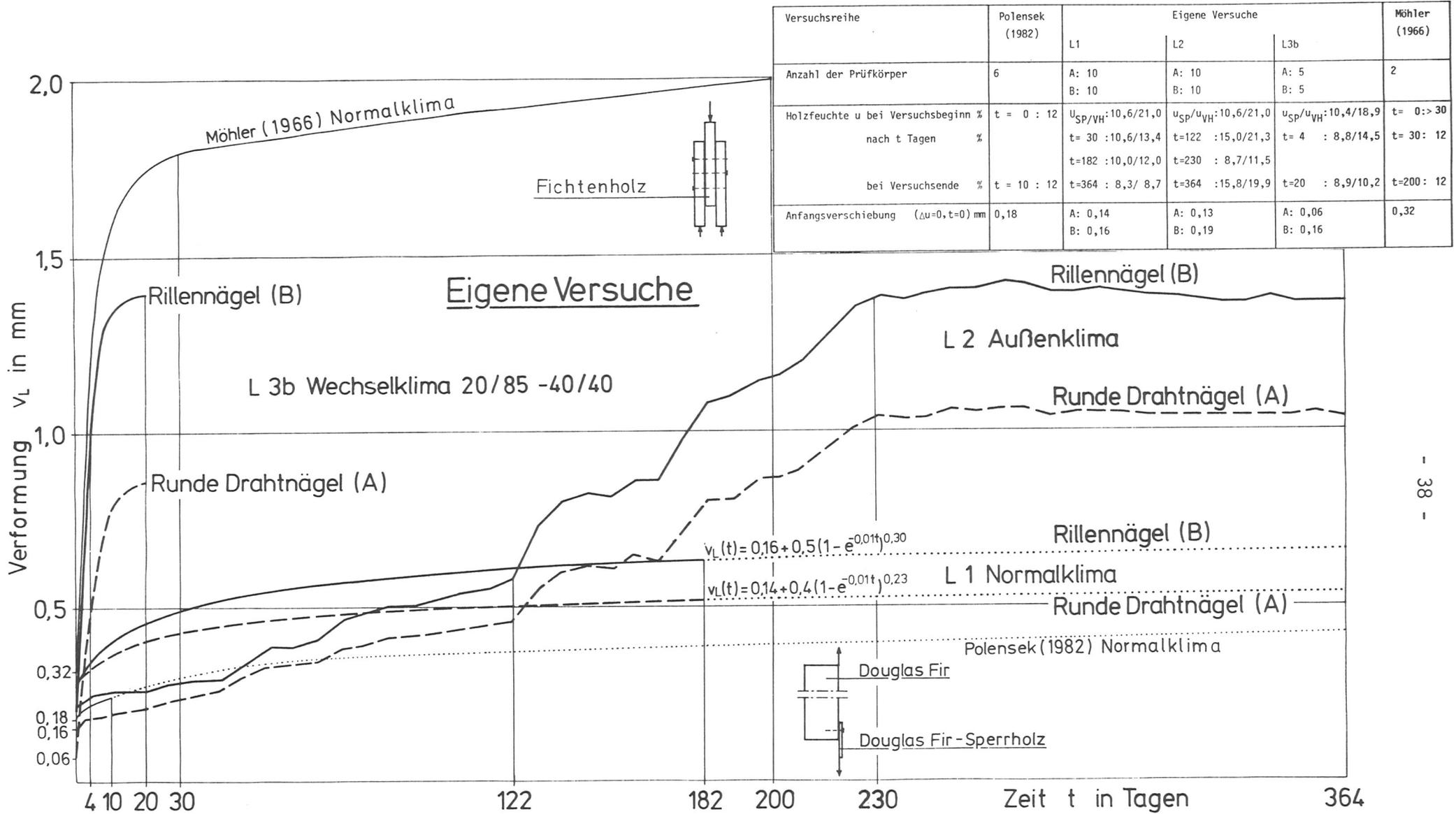
Die Gesamtverformungen v_L setzen sich aus der vollkommen zeitunabhängigen Anfangsverschiebung v_0 und der zeitabhängigen Kriechverformung $v(t)$ zusammen, die mit einer Potenzfunktion $v(t) = a \cdot t^n$ ($a, n = \text{Konstanten}$) beschrieben werden kann.

In Bild 30 sind die mittleren absoluten Verformungen von Polensek mit der Funktion $v_L = v_0 + a \cdot t^n$ für $t = 364$ Tage ausgewertet.

Nagelverbindungen verformen sich rein zeitabhängig, wenn die Herstellfeuchte u_H der Prüfkörper mit der Ausgleichsfeuchte des Umgebungsklimas u_{gl} übereinstimmen (Fall $u_H = u_{gl}$).

Bei Befeuchtung der Scherkörper unter Last (Fall $u_H < u_{gl}$, Serie L2 etwa während der ersten beiden Monate und Serie L3 in der 1. Zyklushälfte) nehmen die Verformungen auch bei anhaltender Befeuchtung zu.

Die höchsten Verformungszunahmen der Verbindungen dagegen fallen bei Serie L1 und den Versuchen von Möhler in den Zeitraum starker Austrocknung und gehen erst mit Erreichen der Ausgleichsfeuchte u_{gl} in rein zeitabhängige Kriechverschiebungen (Fall $u_H > u_{gl}$) über. Zu den sehr viel geringeren Verformungszunahmen von L1 gegenüber denen von Möhler haben wahrscheinlich auch die dichteren Seitenhölzer aus Spanplatte beigetragen, die zusätzlich noch geringeren Feuchteänderungen ausgesetzt waren, als die Seiten- und Mittelhölzer aus Fichtenholz.



Versuchsreihe	Polensek (1982)	Eigene Versuche			Möhler (1966)
		L1	L2	L3b	
Anzahl der Prüfkörper	6	A: 10 B: 10	A: 10 B: 10	A: 5 B: 5	2
Holzfeuchte u bei Versuchsbeginn %	t = 0 : 12	u _{SP/VH} : 10,6/21,0	u _{SP/u_{VH}} : 10,6/21,0	u _{SP/u_{VH}} : 10,4/18,9	t = 0 : > 30
nach t Tagen %	t = 30 : 10,6/13,4	t = 182 : 10,0/12,0	t = 122 : 15,0/21,3	t = 4 : 8,8/14,5	t = 30 : 12
bei Versuchsende %	t = 10 : 12	t = 364 : 8,3/ 8,7	t = 230 : 8,7/11,5	t = 20 : 8,9/10,2	t = 200 : 12
Anfangsverschiebung (Δu=0, t=0) mm	0,18	A: 0,14 B: 0,16	A: 0,13 B: 0,19	A: 0,06 B: 0,16	0,32

Bild 30: Verlauf der absoluten Verformungen unter Feuchteänderungen bei zulässiger Langzeitbelastung

Solange nur die Herstellfeuchte u_H von Nagelverbindungen variiert und das Prüfklima wirklich konstant gehalten wird (Fälle $u_H \approx u_{gl}$), lassen sich die Kriechverformungen $v_L(t)$, die sich aus Anfangsverschiebungen v_0 , aus überwiegend feuchteänderungsabhängigen Verformungen $v(\Delta u(t))$ und ab $u = u_{gl}$ aus rein zeitabhängigen Verformungen $v(t)$ zusammensetzen, empirisch mit Potenz- bzw. Exponentialfunktionen beschreiben. Der absolute Kriechverlauf von "A" und "B" der Serie L1 kann während der ersten 182 Tage bei annähernd konstantem Normalklima (Bild 6) durch folgende Exponentialfunktionen näherungsweise ausgedrückt werden (Bild 10 und 30):

$$\begin{aligned} v_L(t) &= v_0 + v(\Delta u(t)) + v(t) \\ \text{mit } v(\Delta u(t)) + v(t) &= v_{kr}(t) = a(1 - e^{-bt})^n \\ t &= \text{Belastungsdauer in Tagen} \\ a, b, n &= \text{Konstanten.} \end{aligned}$$

Für die Serie L1 ausgewertet, ergibt sich:

$$\begin{aligned} \text{für "A" : } v_L(t) &= 0,14 + 0,4(1 - e^{-0,01t})^{0,23} \\ \text{für "B" : } v_L(t) &= 0,16 + 0,5(1 - e^{-0,01t})^{0,30} \end{aligned}$$

Werden jedoch Herstellfeuchte u_H und Prüfklima verändert (Serie L2 und L3), wird der Kriechverlauf von zusätzlichen Faktoren beeinflusst, über die folgende Aussagen gemacht werden können:

- Die Verformungen nehmen unmittelbar nach der Belastung bis zur Verdichtung des Nagelbettes auch bei anhaltender Befeuchtung der Verbindung zu.
- Nach der ersten Verdichtung des Nagelbettes wird die Geschwindigkeit der Verformungsänderungen durch die Geschwindigkeit der Feuchteänderungen beeinflusst.

- Eine Austrocknung der Verbindungen bewirkt eine Verformungszunahme, während eine Wiederbefeuchtung zu einer Reduzierung oder wenigstens zu konstantem Kriechverlauf führen kann.
- Mit dem Erreichen wirklich konstanter Klimaverhältnisse wird der Kriechverlauf nur noch von der Zeit beeinflusst. Wieder einsetzende Feuchteänderungen bewirken weitere Verformungsänderungen.
- Die Endverformungen werden hauptsächlich vom Ausmaß der Feuchteänderungen beeinflusst.

Gerade wegen der geringen Zeitabhängigkeit von Nagelverbindungen unter zulässiger Langzeitbelastung und wechselnden Klimaverhältnissen können die Endverformungen der Serie L2 (natürliches Außenklima unter Dach) recht gut durch die Wechselklimaversuche der Serie L3b (Wechselklima 20/85 - 40/40) simuliert werden. Vorausgesetzt werden müssen allerdings annähernd vergleichbare Herstellfeuchten u_H und Anfangsverschiebungen v_0 . Um die extremen Feuchteänderungen im ersten Wechselklimazyklus zu begrenzen, wurde die Zyklusdauer auf maximal vier Tage festgelegt. Danach wurden in Serie L3b nach dem ersten Zyklus bereits Verformungen von 0,5 bzw. 0,94 mm ("A" bzw. "B") erzielt, die größer als die halben Endverformungen waren (Bild 30).

Bei Nagelverbindungen unter zulässiger Belastung ist mit den geringsten Verformungszunahmen zu rechnen, wenn die Herstellfeuchte einer Verbindung ihrer zu erwarteten mittleren Gebrauchsfeuchte am nächsten kommt.

- [15] Mehlhorn, L.: Die Wechselbeziehung von Bauteilverhalten und zeitgeraffter Wettersimulation. Holz als Roh- und Werkstoff 1987, S. 105 - 109.
- [16] Möhler, K.: Versuche über das Dauerstandverhalten von Nagelverbindungen. Berichte aus der Bau- forschung, Heft Nr. 47, 1966.
- [17] Möhler, K.: Untersuchungen zur Festlegung zulässiger Belastungen von Vollholz-Holzwerkstoff- Verbindungen. Forschungsbericht des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe, 1982.
- [18] Polensek, A.: Creep Prediction for Nailed Joints under Constant and Increasing Loading. Wood Science 1982, S. 183 - 192.
- [19] Scheer, C., C. Wagner: Röntgenuntersuchen an Nägeln, Klammern und Stabdübeln in Holz und Holzwerkstoffen. Die Bautechnik 1980, S. 88 - 93.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Kurz- bzw. Langzeitversuche der Serien K1, K2 bzw. L1, L2

Zeitraum	Dauer Monate	Serie	Anzahl der Scherkörper Nageltyp		Lagerung der Scherkörper	Klima	Holzfeuchte bei Versuchs-		Kurzzeitversuch nach Monaten	Langzeitversuch Ablesung der Verformungen
			A	B			-beginn u_{SP}/u_{VH} %	-ende u_{SP}/u_{VH} %		
14.12.82 bis 12.12.83	12	K1	35	35	unbelastet	20/65	10,6/21,0	8,5/ 9,0	0, 1, 2, 3, 6, 9, 12 (je Monat 5 Scherkörper/Nageltyp)	-
14.12.82 bis 12.12.83	12	K2	60	60		Außen- klima	10,6/21,0	15,8/20,0	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 (je Monat 5 Scherkörper/Nageltyp)	-
13.12.82 bis 12.12.83	12	L1	10	10	unter $F = 2000N$	20/65	10,6/21,0	8,5/ 9,0	12	einmal wöchentlich
14.12.82 bis 12.12.83	12	L2	10	10		Außen- klima	10,6/21,0	15,8/20,0	12	zweimal wöchentlich

Tabelle 3: Zusammenstellung der Kurz- bzw. Langzeitversuche der Serien K3 bzw. L3

Zeitraum	Dauer Tage	Serie	Anzahl der Scherkörper Nageltyp		Lagerung der Scherkörper	Wechselklima		Anzahl der Zyklen	Zeitdauer pro Zyklus in Tagen	Holzfeuchte bei Versuchs-		Kurzzeit-Versuch nach Tagen	Langzeitversuch Ablesung der Verformungen
			A	B		feucht	trocken			-beginn u_{SP}/u_{VH} %	-ende u_{SP}/u_{VH} %		
17.01. bis 31.01.83	14	K3a	5	5	unbelastet	20/95	40/20	7	2	10,6/20,0	5,7/ 7,1	14	-
13.04. bis 03.05.83	20	K3b	5	5		20/85	40/40	5	4	10,4/18,9	8,9/10,2	20	-
09.09. bis 29.09.83	20	K3c	15	15		20/85	40/40	10	2	9,4/11,4	11,4/12,7	4,8,12, 16,20(je 3 Scherk./ Nageltyp)	-
17.01. bis 31.01.83	14	L3a	5	5	unter zu1 F = 2000 N	20/95	40/20	7	2	10,6/20,0	5,7/ 7,1	14	täglich
13.04. bis 03.05.83	20	L3b	5	5		20/85	40/40	5	4	10,4/18,9	8,9/10,2	20	alle 2 Tage
09.09. bis 29.09.83	20	L3c	10	10		20/85	40/40	10	2	9,4/11,4	11,4/12,7	20	täglich
08.05. bis 13.06.84	36	L3d	10	10		20/85	40/40	9	4	10,2/14,2	13,5/14,2	36	alle 2 Tage

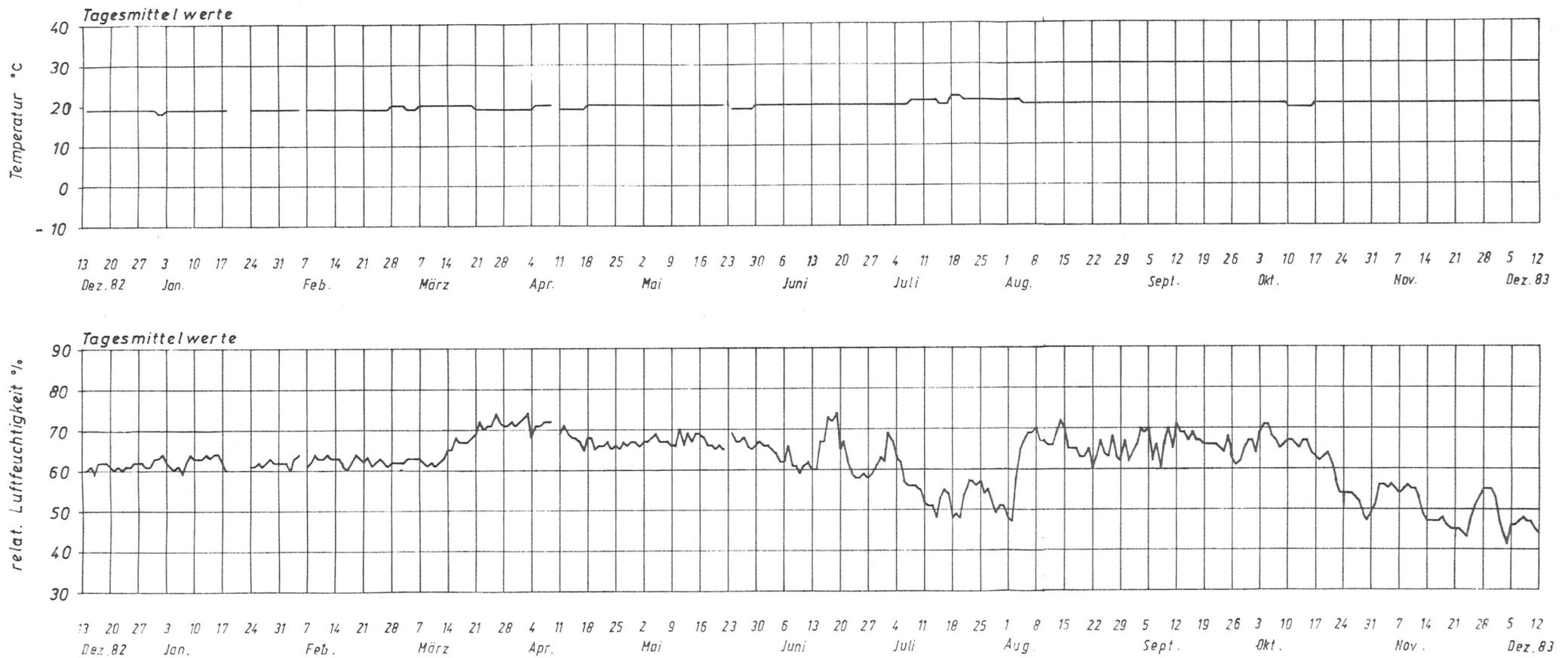


Bild 6: Tagesmittelwerte des Normalklimas 20/65 während des Versuchszeitraumes der Serien K1 und L1

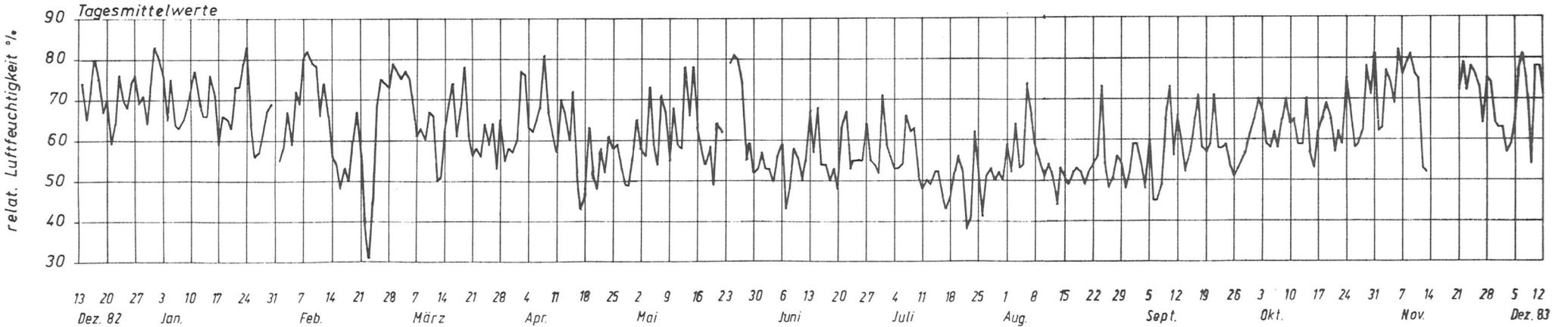
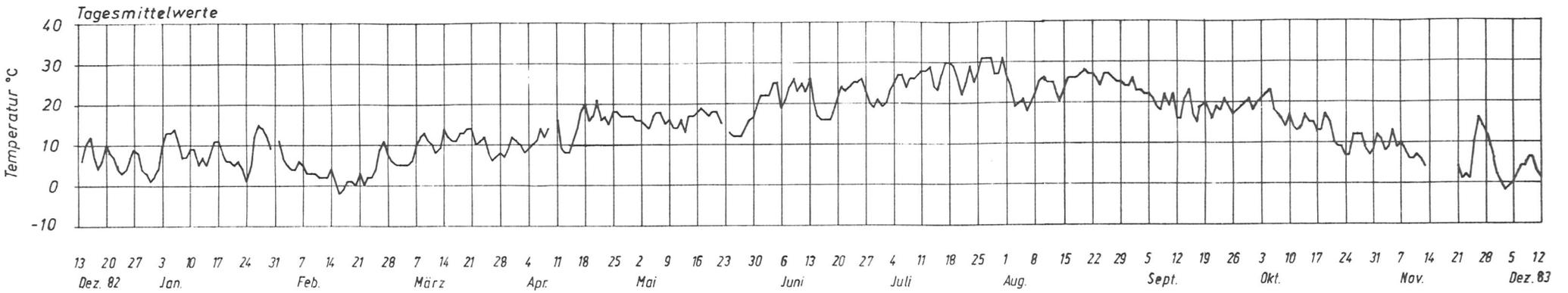


Bild 7: Tagesmittelwerte des natürlichen Außenklimas unter Dach während des Versuchszeitraumes der Serien K2 und L2

Tabelle 4: Absolute und relative Verschiebungen sowie Höchstlasten (Mittelwerte) der Serien K1 und L1 im Normalklima 20/65 (Anzahl der Scherkörper siehe Tabelle 2)

Prüfung nach t Monaten	Nageltyp	Holzfeuchte u_{SP}/u_{VH} %	Serie K1 Verschiebungen unter zul F				Höchstlast F_{15} bzw. max F kN	Serie L1 Verformungen unter zul F	
			$v_{K(t)}$ mm	$\frac{v_{K(t)}}{v_{K(t=0)}}$	$v_{K(t)}$ mm	$\frac{v_{K(t)}}{v_{K(t=0)}}$		$v_{L(t)}$ mm	$\frac{v_{L(t)}}{v_{L(t=0)}}$
			"Nullversuche" K 10					"Nullversuche" L 10	
0	A	10,6/21,0	0,10 (13,4)	1,0	0,98 (32,9)	1,0	7,43 (6,8)	0,14 (38,3)	1,0
	B		0,16 (24,7)	1,0	1,30 (14,5)	1,0	8,37 (2,9)	0,16 (29,1)	1,0
1	A	10,6/13,4	0,20 (23,9)	2,14 (23,3)	0,90 (37,6)	0,97 (46,4)	8,10 (7,1)	0,42 (22,4)	3,13 (27,0)
	B		0,23 (17,4)	1,49 (16,2)	1,13 (17,9)	0,84 (13,7)	9,50 (6,4)	0,49 (12,0)	3,40 (31,3)
2	A	10,8/13,3	0,20 (27,6)	2,15 (29,0)	1,02 (34,3)	1,14 (46,6)	7,57 (23,1)	0,49 (21,1)	3,79 (29,7)
	B		0,25 (10,0)	1,66 (20,4)	1,37 (16,5)	1,10 (32,6)	9,82 (9,3)	0,58 (11,6)	4,01 (28,8)
3	A	10,8/13,2	0,21 (21,3)	2,23 (19,3)	1,10 (29,8)	1,21 (39,9)	7,71 (16,0)	0,50 (21,3)	3,89 (30,1)
	B		0,25 (21,2)	1,72 (37,7)	1,39 (12,6)	1,10 (25,3)	9,89 (8,5)	0,60 (11,7)	4,15 (29,5)
4	A	10,8/13,2						0,49 (21,5)	3,81 (29,8)
	B							0,59 (11,7)	4,11 (29,6)
5	A	10,5/12,7						0,51 (21,1)	3,94 (31,2)
	B							0,62 (11,3)	4,28 (30,2)
6	A	10,1/12,1	0,26 (13,6)	2,72 (14,1)	1,17 (24,1)	1,25 (26,2)	7,52 (12,4)	0,55 (19,5)	4,28 (29,5)
	B		0,30 (8,9)	1,93 (20,0)	1,39 (14,2)	1,08 (25,3)	9,95 (3,3)	0,66 (11,0)	4,58 (30,0)
7	A	9,4/10,9						0,64 (16,2)	5,00 (29,9)
	B							0,76 (9,8)	5,32 (29,8)
8	A	10,3/11,2						0,72 (15,9)	5,62 (30,1)
	B							0,86 (8,7)	5,96 (29,0)
9	A	10,2/11,2	0,28 (18,7)	2,98 (19,5)	1,34 (19,0)	1,46 (29,2)	7,17 (9,7)	0,73 (15,2)	5,72 (30,3)
	B		0,30 (6,6)	2,02 (28,7)	1,42 (16,1)	1,11 (30,7)	10,25 (7,0)	0,87 (8,7)	6,08 (25,5)
10	A	10,2/11,1						0,73 (15,6)	5,67 (30,4)
	B							0,87 (9,1)	6,05 (29,4)
11	A	8,7/9,3						0,76 (14,4)	5,97 (30,6)
	B							0,93 (9,0)	6,48 (29,7)
12	A	8,5/9,0	0,33 (8,0)	3,46 (17,8)	1,32 (24,3)	1,46 (37,2)	6,88 (11,9)	0,82 (14,7)	6,43 (30,4)
	B		0,40 (7,2)	2,67 (29,5)	1,41 (4,6)	1,12 (18,5)	9,15 (5,6)	1,00 (9,0)	6,99 (30,7)
12	A	8,5/9,0	0,34 (9,7)	3,63 (8,4)	1,01 (13,1)	1,12 (25,4)	6,64 (19,0)		
	B		0,40 (11,3)	2,62 (28,3)	1,20 (11,9)	0,92 (19,8)	9,04 (6,1)		

Bruchversuch 1 Tag
nach Entlastung

Werte in Klammern geben den Variationskoeffizienten einer Verschiebung an

Tabelle 5: Absolute und relative Verschiebungen sowie Höchstlasten (Mittelwerte) der Serien K2 und L2 im natürlichen Außenklima unter Dach (Anzahl der Scherkörper siehe Tabelle 2)

Prüfung nach t Monaten	Nagel- typ	Holzfeuchte u_{SP}/u_{VH} %	Serie K2 Verschiebungen				Höchstlast F_{15} bzw. max F kN	Serie L2 Verformungen unter zul F	
			unter zul F		unter 2 x zul F			$v_{L(t)}$ mm	$\frac{v_{L(t)}}{v_{L(t=0)}}$
			$v_{K(t)}$ mm	$\frac{v_{K(t)}}{v_{K(t=0)}}$	$v_{K(t)}$ mm	$\frac{v_{K(t)}}{v_{K(t=0)}}$			
"N u l l v e r s u c h e" K 10									
0	A	10,6/21,0	0,10 (13,4)	1,0	0,98 (32,9)	1,0	7,43 (6,8)	0,13 (37,7)	1,0
	B		0,16 (24,7)	1,0	1,30 (14,5)	1,0	8,37 (2,9)	0,19 (26,5)	1,0
1	A	15,2/22,8	0,07 (45,4)	0,71 (44,4)	1,0 (31,1)	1,09 (39,0)	7,20 (13,1)	0,24 (21,2)	2,11 (42,1)
	B		0,08 (27,7)	0,51 (37,3)	1,12 (9,3)	0,89 (21,7)	9,10 (1,4)	0,28 (25,6)	1,49 (12,4)
2	A	15,2/22,1	0,09 (48,4)	0,94 (49,0)	0,93 (35,0)	1,03 (49,1)	8,03 (12,3)	0,33 (22,2)	2,91 (44,4)
	B		0,07 (70,5)	0,44 (56,4)	0,98 (39,0)	0,68 (29,8)	9,79 (11,3)	0,38 (25,8)	1,98 (11,7)
3	A	14,0/19,7	0,19 (22,9)	2,00 (23,6)	1,29 (41,2)	1,34 (25,6)	7,67 (17,5)	0,42 (20,7)	3,71 (44,0)
	B		0,19 (52,6)	1,12 (35,9)	1,35 (40,3)	0,95 (34,4)	9,68 (11,3)	0,51 (23,3)	2,68 (12,0)
4	A	15,4/21,8	0,12 (27,7)	1,31 (35,9)	1,27 (34,0)	1,37 (39,6)	7,59 (12,6)	0,44 (22,1)	3,84 (45,7)
	B		0,11 (38,3)	0,74 (36,9)	1,10 (29,8)	0,79 (15,8)	9,72 (19,8)	0,55 (23,7)	2,90 (12,7)
5	A	13,1/18,1	0,24 (22,3)	2,49 (24,3)	1,24 (18,8)	1,37 (32,6)	7,80 (15,1)	0,62 (22,6)	5,48 (46,0)
	B		0,28 (48,8)	1,72 (37,5)	1,44 (52,0)	1,09 (48,5)	9,37 (17,7)	0,82 (19,8)	4,38 (16,4)
6	A	11,1/14,7	0,28 (11,0)	2,95 (12,4)	1,47 (35,7)	1,63 (48,3)	7,92 (14,2)	0,81 (21,5)	7,15 (45,1)
	B		0,32 (23,4)	2,44 (12,7)	1,42 (11,0)	1,14 (7,6)	9,55 (9,1)	1,09 (18,6)	5,83 (18,5)
7	A	10,7/14,1	0,29 (13,3)	3,08 (15,2)	1,20 (14,3)	1,31 (27,9)	8,29 (10,3)	0,90 (20,3)	7,99 (46,1)
	B		0,35 (20,4)	2,34 (17,3)	1,52 (20,9)	1,13 (5,8)	9,84 (6,0)	1,20 (17,1)	6,43 (19,4)
8	A	11,7/14,9	0,29 (12,5)	3,10 (15,2)	1,22 (18,8)	1,34 (33,4)	8,05 (15,3)	1,02 (20,4)	9,12 (46,5)
	B		0,33 (3,2)	2,54 (18,4)	1,36 (7,6)	1,10 (9,3)	10,25 (6,5)	1,36 (16,9)	7,31 (20,7)
9	A	11,6/14,7	0,27 (14,6)	2,83 (14,9)	1,15 (12,8)	1,26 (25,8)	8,60 (9,0)	1,05 (20,5)	9,39 (46,7)
	B		0,34 (15,1)	2,31 (9,0)	1,82 (58,6)	1,09 (11,9)	9,29 (14,9)	1,40 (16,8)	7,50 (20,7)
10	A	13,0/16,3	0,24 (18,5)	2,45 (9,2)	1,06 (19,6)	1,13 (18,5)	8,23 (9,5)	1,04 (20,6)	9,29 (46,2)
	B		0,29 (39,6)	1,93 (18,4)	1,38 (32,1)	1,06 (22,9)	9,44 (11,6)	1,38 (16,9)	7,39 (20,8)
11	A	13,8/17,2	0,22 (8,3)	2,30 (12,3)	1,02 (14,8)	1,16 (37,9)	8,76 (5,3)	1,04 (20,5)	9,24 (46,2)
	B		0,27 (13,9)	1,75 (14,2)	1,46 (8,6)	1,13 (15,4)	8,63 (8,8)	1,36 (16,5)	7,30 (19,5)
12	A	15,8/20,0	0,17 (30,7)	1,72 (26,6)	0,88 (16,0)	0,95 (22,2)	8,88 (6,7)	1,04 (20,7)	9,32 (47,1)
	B		0,19 (30,5)	1,18 (9,6)	1,18 (12,8)	0,91 (18,2)	9,51 (6,3)	1,36 (16,9)	7,32 (20,3)
12	A	15,8/20,0	0,18 (15,0)	1,91 (16,8)	0,62 (18,9)	0,67 (28,9)	9,07 (5,7)	← Bruchversuch 1 Tag nach Entlastung	
	B		0,19 (32,7)	1,26 (24,5)	0,70 (24,1)	0,56 (25,8)	8,90 (10,2)		

Werte in Klammern geben den Variationskoeffizienten einer Verschiebung an

Tabelle 6: Absolute und relative Verschiebungen sowie Höchstlasten (Mittelwerte) der Serien K3a/L3a und K3c/L3c im Wechselklima
(Anzahl der Scherkörper siehe Tabelle 3)

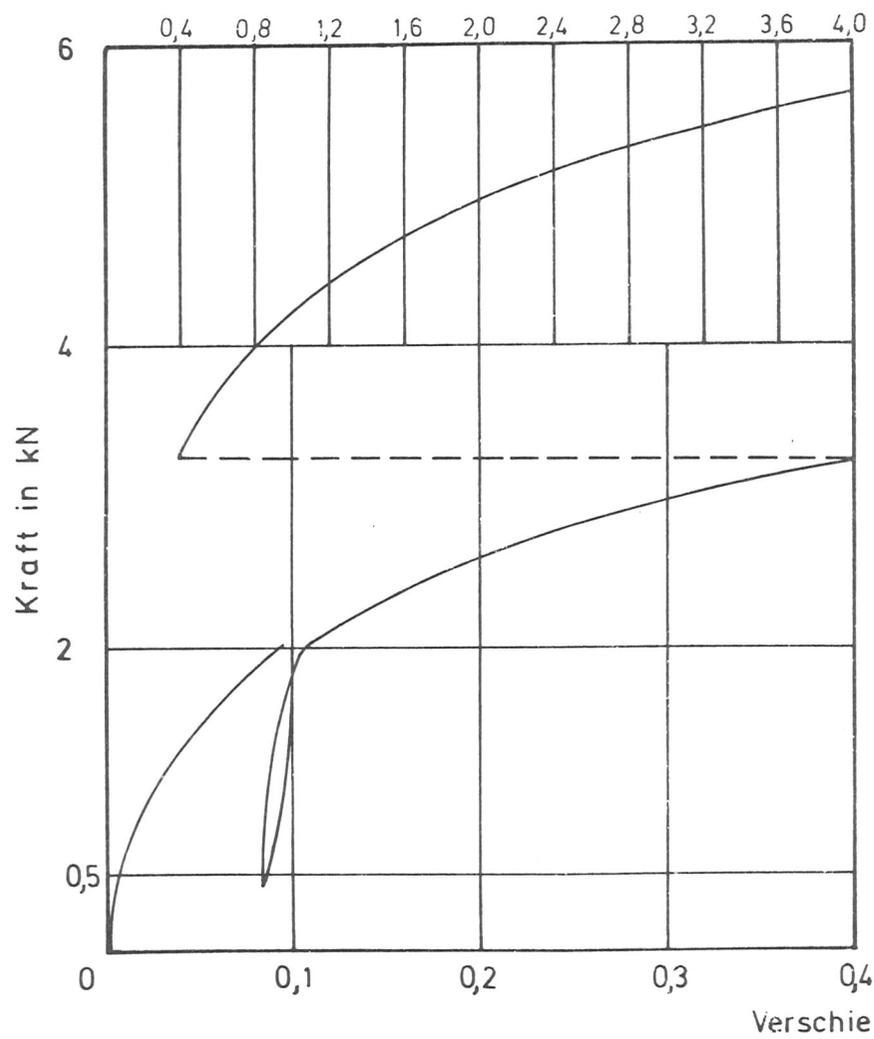
Prüfung nach t Monaten	Nagel- typ	Serie K3a						Serie K3c						Serie L3a			Serie L3c		
		Holzfeuchte u_{SP}/u_{VH} %	Verschiebungen unter zul F unter 2 x zul F				Höchstlast F_{15} bzw. max F kN	Holzfeuchte u_{SP}/u_{VH} %	Verschiebungen unter zul F unter 2 x zul F				Höchstlast F_{15} bzw. max F kN	Holzfeuchte u_{SP}/u_{VH} %	Verformungen unter zul F		Holzfeuchte u_{SP}/u_{VH} %	Verformungen unter zul F	
			$v_{K(t)}$ mm	$\frac{v_{K(t)}}{v_{K(t=0)}}$	$v_{K(t)}$ mm	$\frac{v_{K(t)}}{v_{K(t=0)}}$			$v_{K(t)}$ mm	$\frac{v_{K(t)}}{v_{K(t=0)}}$	$v_{K(t)}$ mm	$\frac{v_{K(t)}}{v_{K(t=0)}}$			$v_{L(t)}$ mm	$\frac{v_{L(t)}}{v_{L(t=0)}}$		$v_{L(t)}$ mm	$\frac{v_{L(t)}}{v_{L(t=0)}}$
"Nullversuche" K 10																			
0	A	10,6/21,0	0,10 (13,4)	1,0	0,98 (32,9)	1,0	7,43 (6,8)	10,6/21,0	0,10 (13,4)	1,0	0,98 (32,9)	1,0	7,43 (6,8)	10,6/20,0	0,14 (35,1)	1,0	9,4/11,4	0,12 (43,9)	1,0
	B		0,16 (24,7)	1,0	1,30 (14,5)	1,0	8,37 (2,9)		0,16 (24,7)	1,0	1,30 (14,5)	1,0	8,37 (2,9)		0,18 (9,6)	1,0		0,12 (36,1)	
2	A													6,9/10,3	0,55 (34,1)	4,31 (32,5)	7,8/8,7	0,27 (26,3)	2,44 (28,3)
	B														0,82 (10,2)	4,82 (15,6)		0,46 (12,3)	4,32 (39,1)
4	A						7,3/8,1	0,19 (10,2)	2,33 (25,0)	1,12 (10,1)	1,65 (30,0)	6,67 (3,4)	6,7/9,0	0,77 (35,1)	6,12 (36,9)	7,3/8,1	0,35 (26,2)	3,16 (32,3)	
	B							0,26 (32,5)	1,72 (52,9)	1,28 (19,5)	1,08 (37,4)	8,62 (2,7)		1,04 (10,7)	6,10 (15,8)		0,57 (12,2)	5,41 (41,2)	
6	A													5,9/7,3	0,94 (35,4)	7,47 (39,8)	7,7/8,4	0,39 (25,8)	3,48 (32,1)
	B														1,18 (12,0)	6,92 (17,9)		0,62 (10,3)	5,85 (40,9)
8	A						8,2/8,6	0,12 (12,3)	1,27 (9,4)	0,57 (16,7)	0,69 (23,9)	6,85 (6,2)	6,4/7,7	1,03 (37,5)	8,20 (41,2)	8,2/8,6	0,41 (23,2)	3,73 (32,5)	
	B							0,30 (10,4)	1,86 (21,0)	1,41 (11,8)	1,12 (18,1)	7,91 (4,6)		1,25 (12,8)	7,36 (18,1)		0,63 (10,6)	6,06 (42,3)	
10	A													6,5/7,4	1,11 (38,9)	8,88 (42,5)	8,0/8,4	0,44 (25,1)	3,96 (33,6)
	B														1,31 (12,7)	7,71 (18,3)		0,67 (11,5)	6,43 (41,6)
12	A						7,7/8,6	0,20 (5,2)	2,18 (10,9)	0,85 (17,7)	1,02 (16,6)	8,33 (5,5)	6,2/7,5	1,26 (33,9)	10,18 (40,8)	7,7/8,6	0,45 (24,4)	4,14 (34,6)	
	B							0,20 (8,2)	1,26 (15,1)	0,84 (2,4)	0,67 (22,1)	10,38 (1,2)		1,42 (14,3)	8,39 (20,8)		0,70 (11,2)	6,68 (41,1)	
14	A	5,7/7,1	0,48 (8,0)	5,22 (18,3)	1,82 (12,4)	2,08 (46,5)	5,98 (15,1)							5,7/7,1	1,30 (42,6)	10,38 (44,1)	7,6/8,5	0,47 (23,5)	4,31 (34,8)
	B		0,52 (13,3)	3,44 (23,4)	1,79 (19,1)	1,39 (25,3)	8,61 (13,9)									1,43 (13,5)		8,39 (19,1)	
14/16	A	5,7/7,1	0,52 (16,8)	5,83 (30,8)	1,36 (20,4)	1,49 (59,3)	5,70 (7,1)	8,3/9,1	0,26 (16,8)	2,91 (18,7)	1,37 (27,7)	1,66 (32,2)	5,58 (15,2)	Bruchversuch 1 Std. nach Entlastung			8,3/9,1	0,47 (24,1)	4,27 (33,2)
	B		0,52 (5,7)	3,70 (30,6)	1,24 (11,0)	1,05 (23,0)	9,28 (2,5)			0,28 (20,7)	1,75 (13,2)	1,33 (18,9)	1,00 (2,7)					8,33 (1,4)	
18	A																9,3/10,5	0,55 (22,7)	5,07 (36,9)
	B																	0,78 (11,0)	7,46 (41,4)
20	A						11,4/12,7	0,26 (4,6)	2,92 (11,5)	1,23 (3,8)	1,53 (32,8)	7,13 (6,0)					11,4/12,7	0,57 (27,0)	5,16 (34,6)
	B							0,38 (12,8)	2,33 (13,0)	1,81 (19,8)	1,33 (4,8)	6,99 (14,2)						0,78 (11,3)	7,44 (42,0)
20	A						11,4/12,7	0,24 (19,0)	2,41 (16,2)	1,07 (28,5)	1,02 (24,1)	6,44 (16,0)	← Bruchversuch 1 Tag nach Entlastung						
	B							0,20 (20,5)	1,41 (40,5)	0,91 (20,9)	0,70 (20,2)	8,79 (11,4)							

Werte in Klammern geben den Variationskoeffizienten einer Verschiebung an

Körper-Nr. K 10 A3

F₁₅

max F = 7,40 kN



Körper-Nr. K 10 B4

F₁₅

max F = 8,25 kN

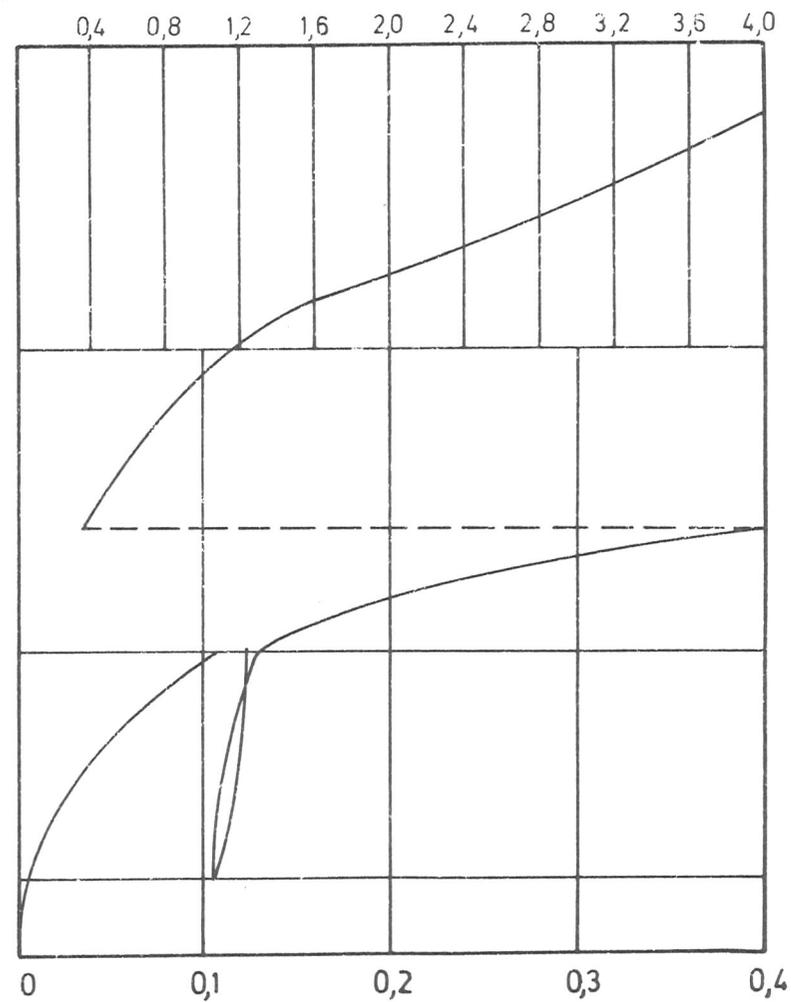
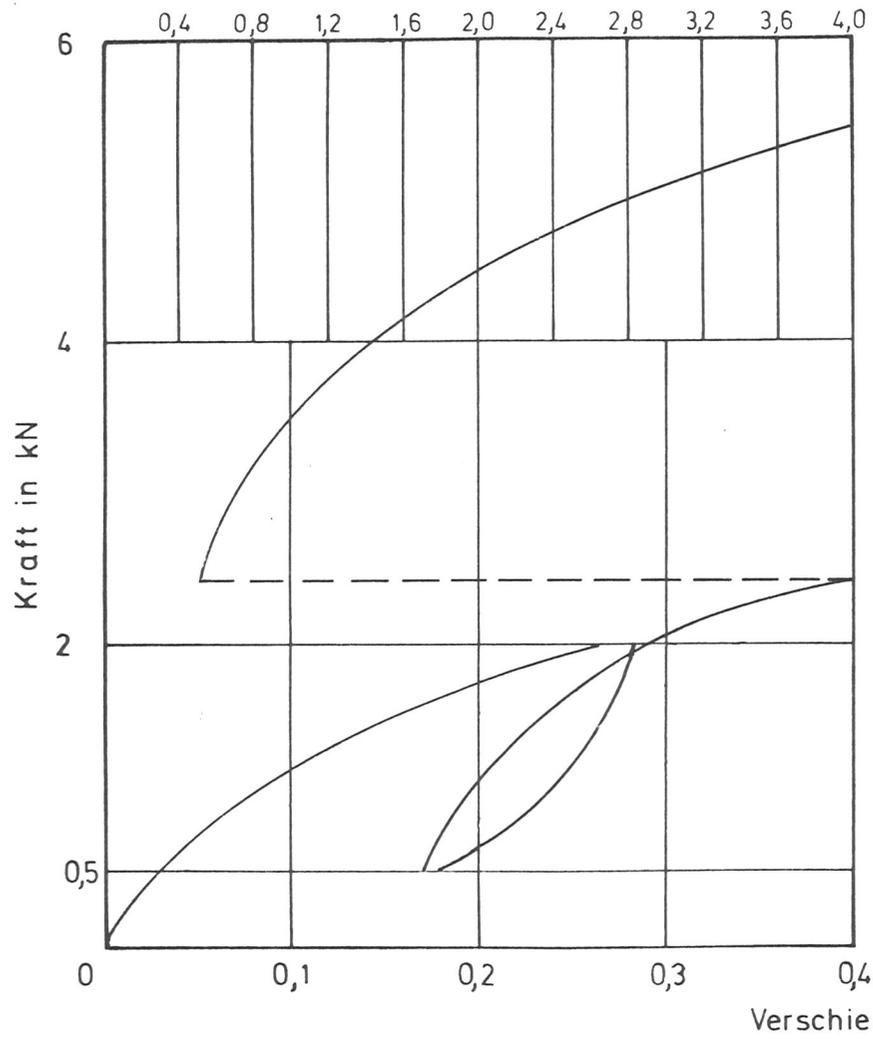


Bild 14: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"
Holzfeuchte bei Herstellung und Prüfung $u_{SP}/u_{VH} = 10,6/21,0 \%$

Körper-Nr. K 1.6 A 4

$F_{15} = 7,60 \text{ kN}$

$\max F = 7,92 \text{ kN}$



Körper-Nr. K 1.6 B 5

$F_{15} = 10,20 \text{ kN}$

$\max F = 10,22 \text{ kN}$

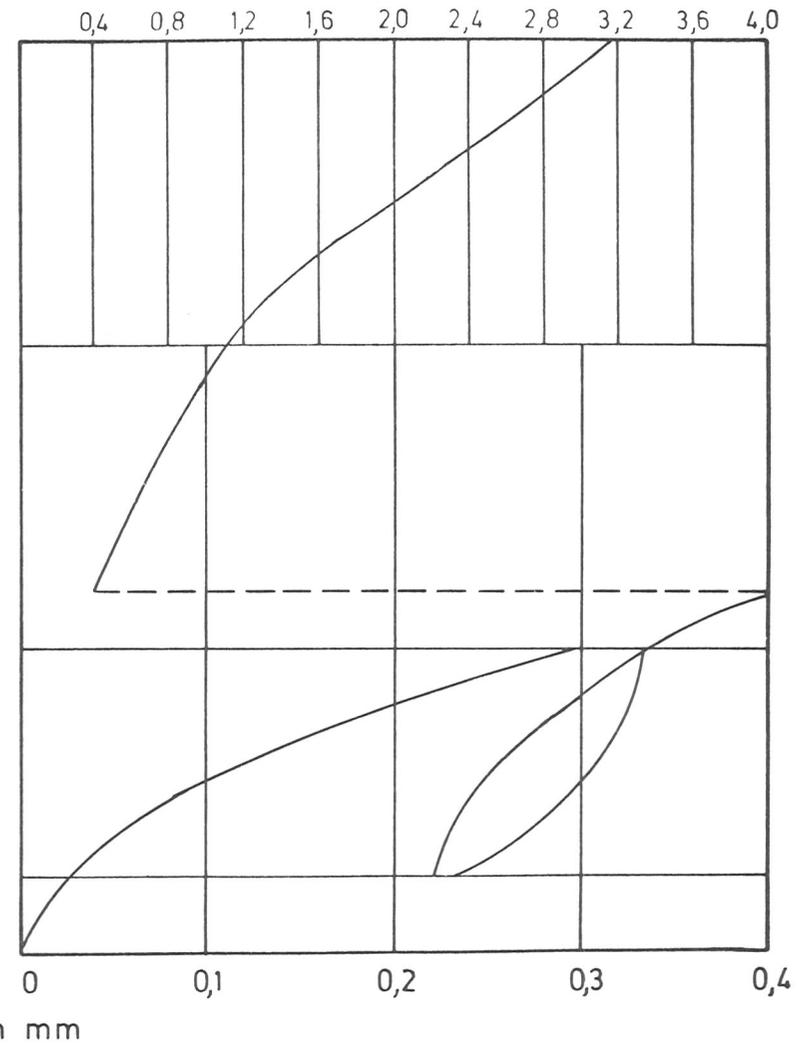


Bild 15: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

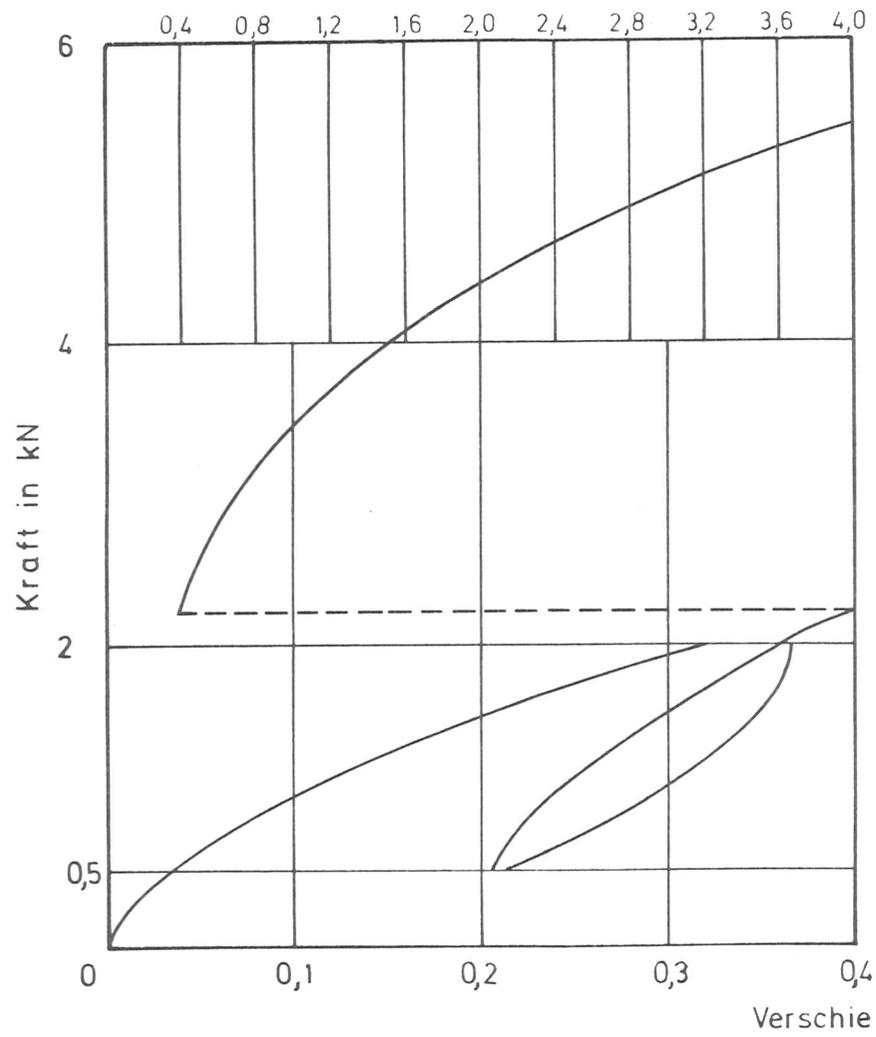
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVVH} = 10,6/21,0 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 10,1/12,1 \%$

Körper-Nr. K 1.12 A4

$F_{15} = 6,42 \text{ kN}$

$\max F = 6,82 \text{ kN}$



Körper-Nr. K 1.12 B4

F_{15}

$\max F = 9,05 \text{ kN}$

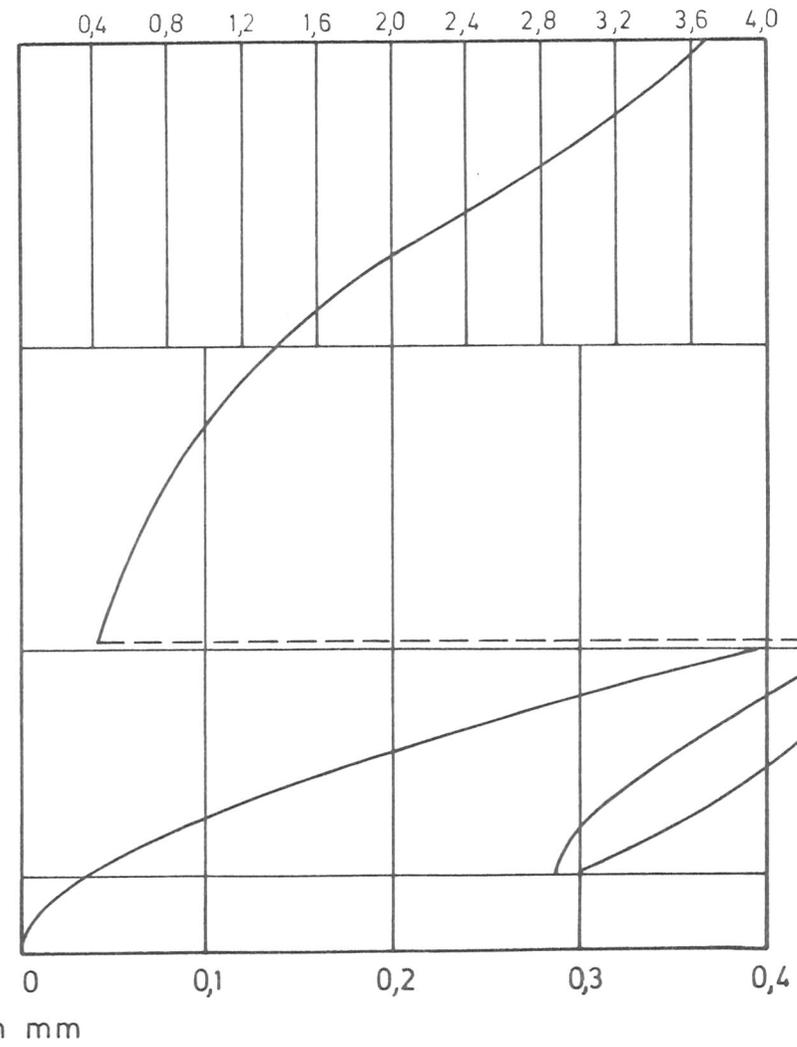


Bild 16: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

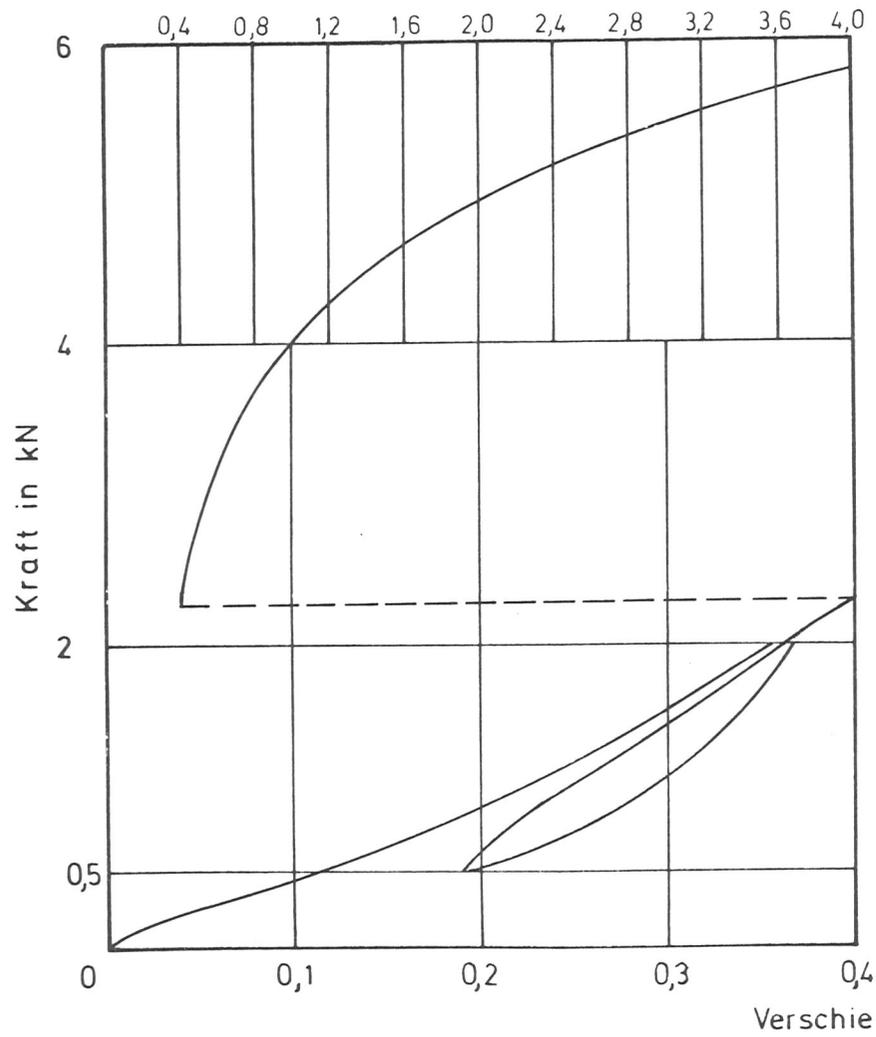
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,6/21,0 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 8,5/9,0 \%$

Körper-Nr. L 1.12 A3

$F_{15} = 7,55 \text{ kN}$

$\max F = 7,64 \text{ kN}$



Körper-Nr. L 1.12 B3

$F_{15} = 9,16 \text{ kN}$

$\max F = 9,16 \text{ kN}$

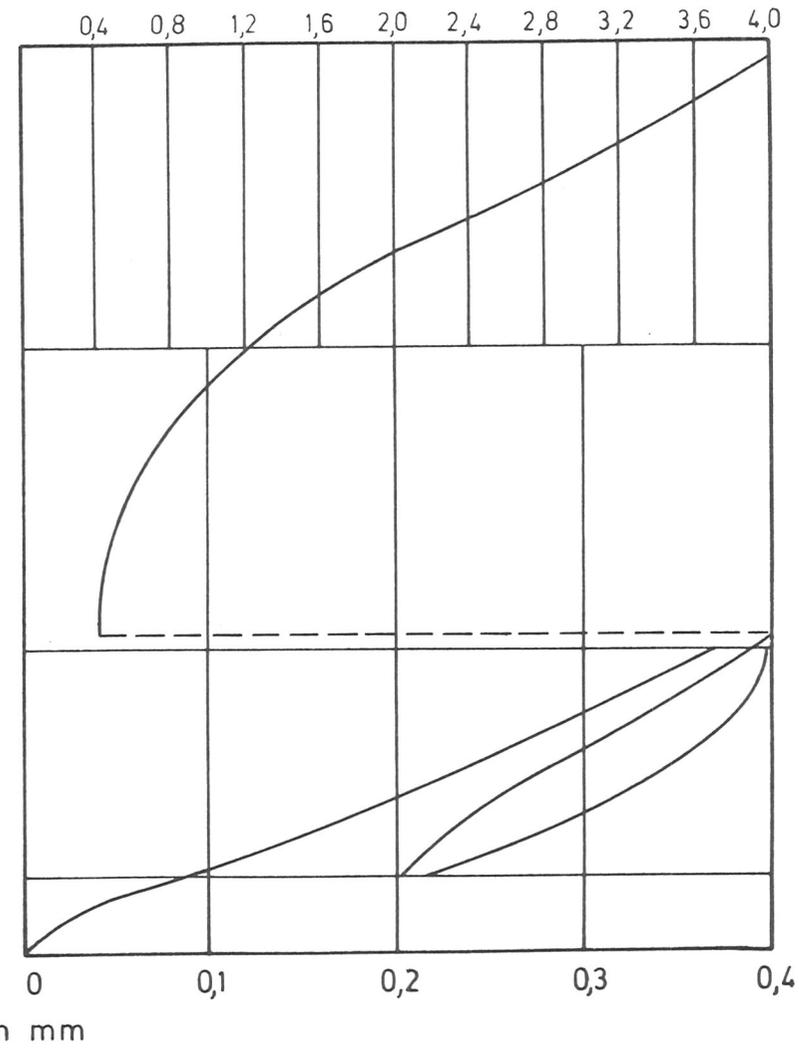


Bild 17: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

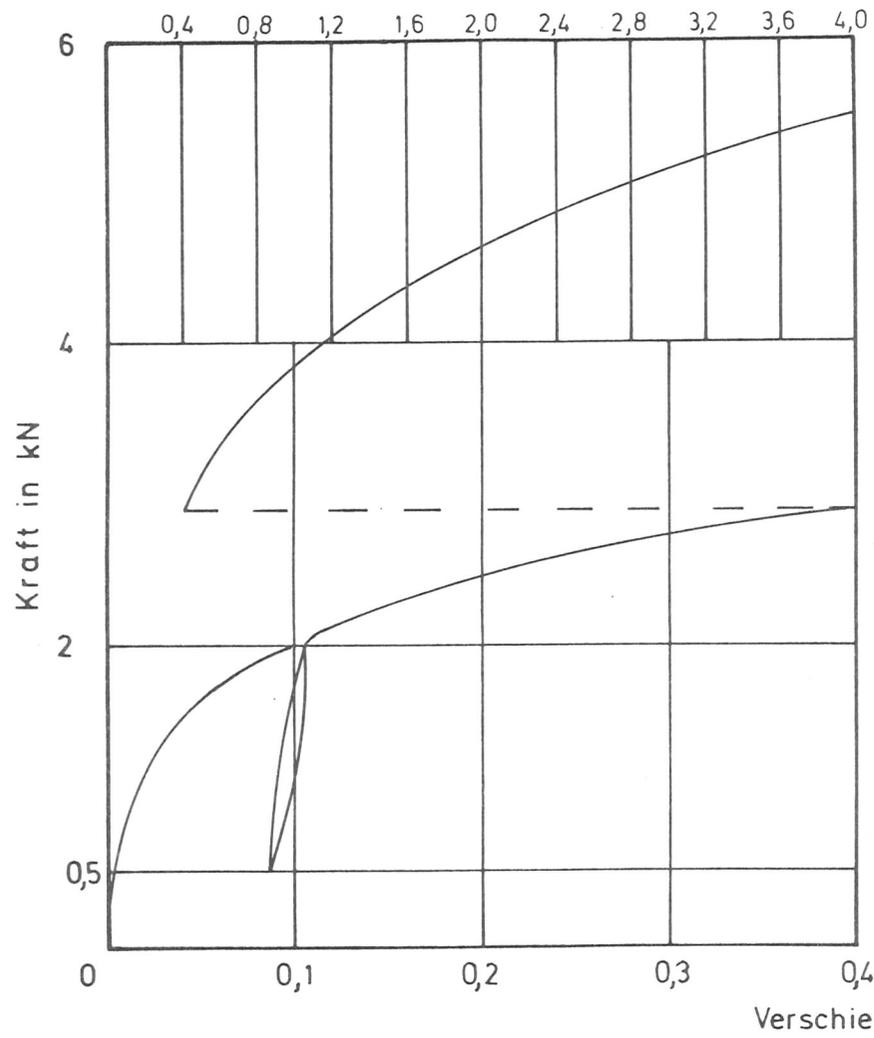
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,6/21,0 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 8,5/9,0 \%$

Körper-Nr. K 2.1 A3

F15

max F = 6,22 kN



Körper-Nr. K 2.1 B5

F15

max F = 9,00 kN

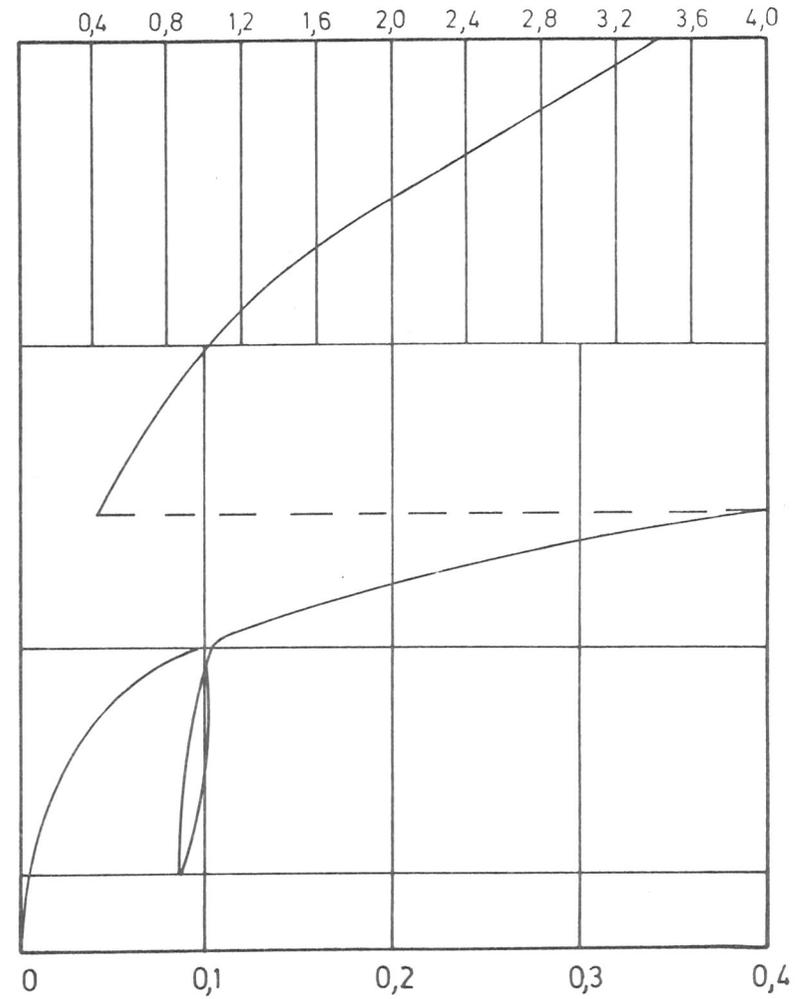


Bild 18: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

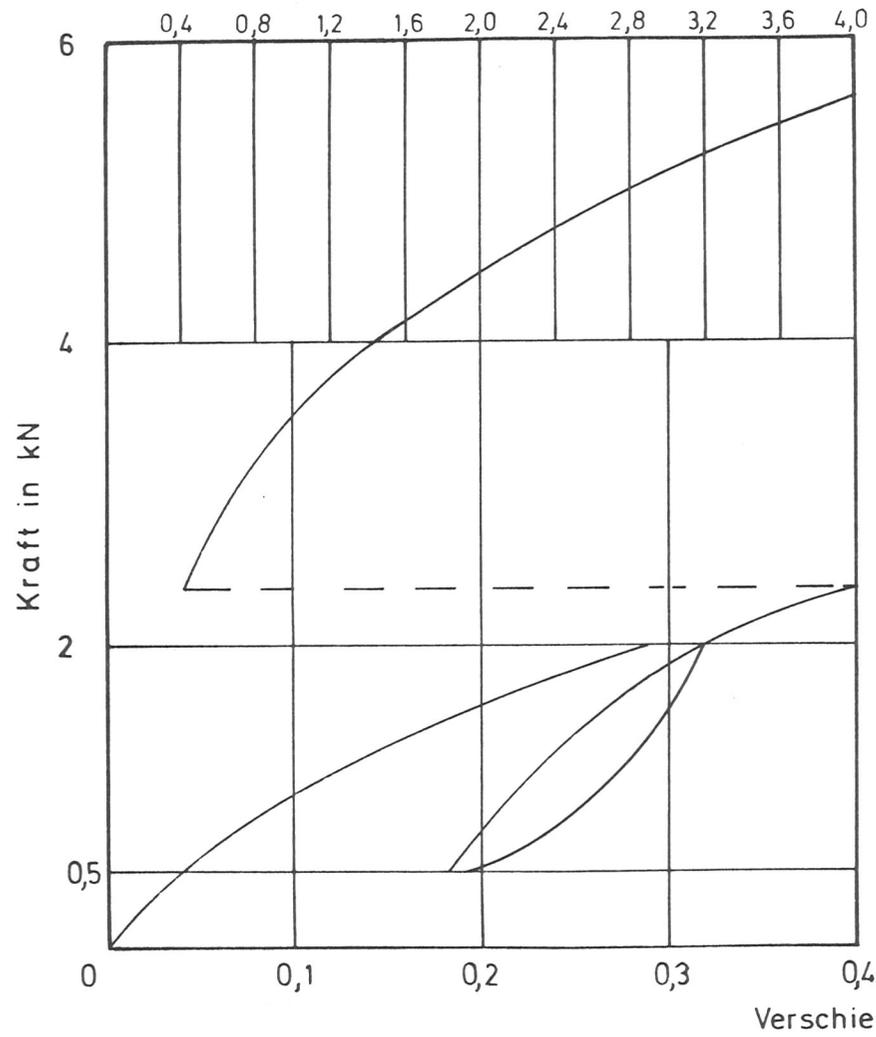
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,6/21,0\%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 15,2/22,8\%$

Körper-Nr. K 2.6 A 4

$F_{15} = 6,63 \text{ kN}$

$\max F = 6,63 \text{ kN}$



Körper-Nr. K 2.6 B 2

F_{15}

$\max F = 8,86 \text{ kN}$

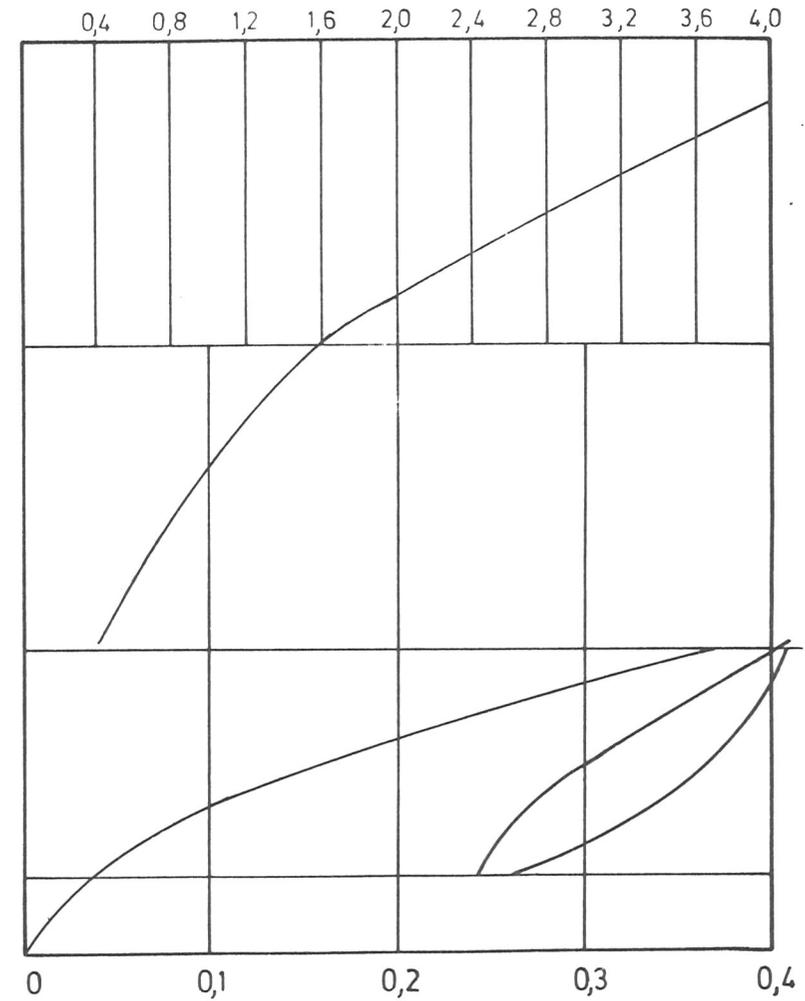


Bild 19: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

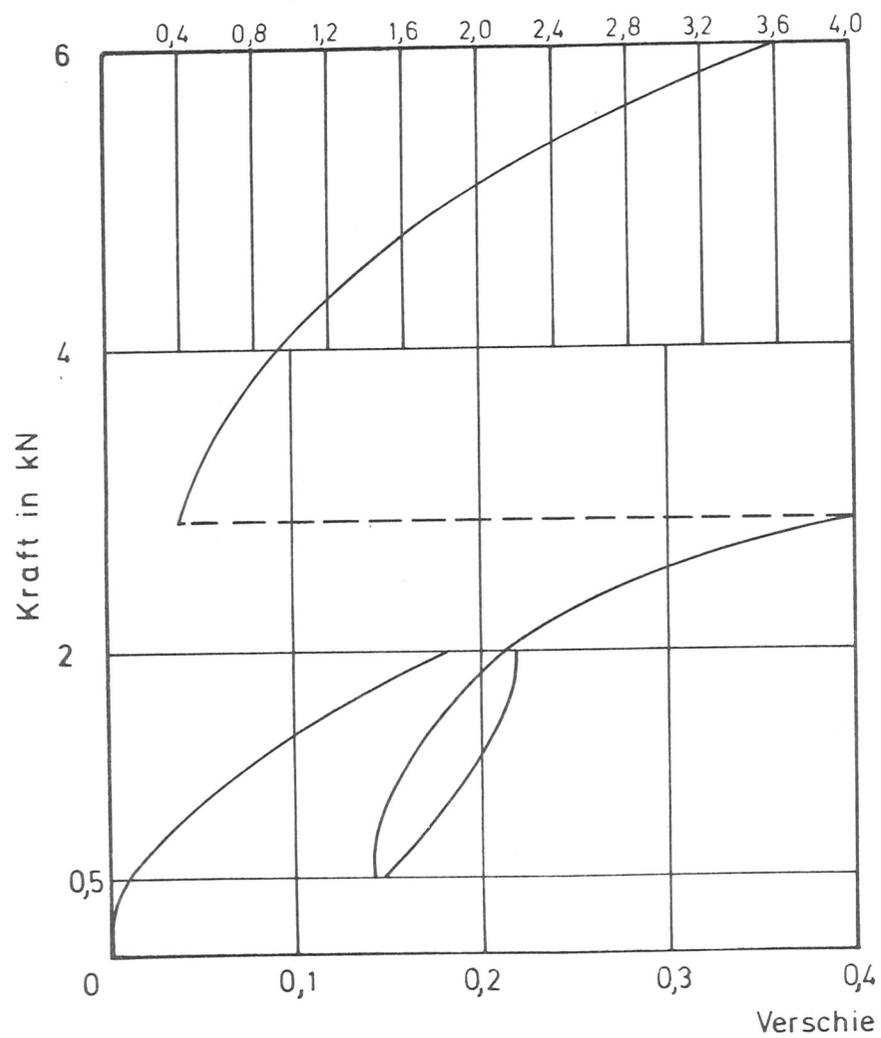
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,6/21,0 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 11,1/14,7 \%$

Körper-Nr. K 2.12 A5

F₁₅ = 9,28 kN

max F = 9,57 kN



Körper-Nr. K2.12 B2

F₁₅

max F = 9,02 kN

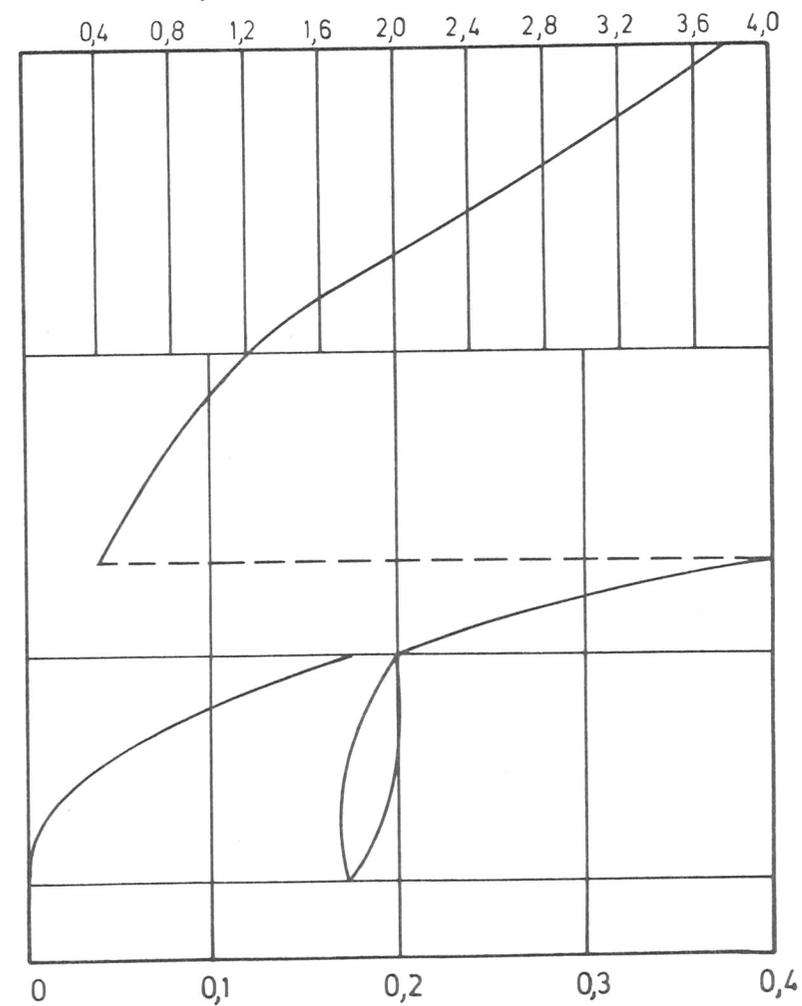


Bild 20: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

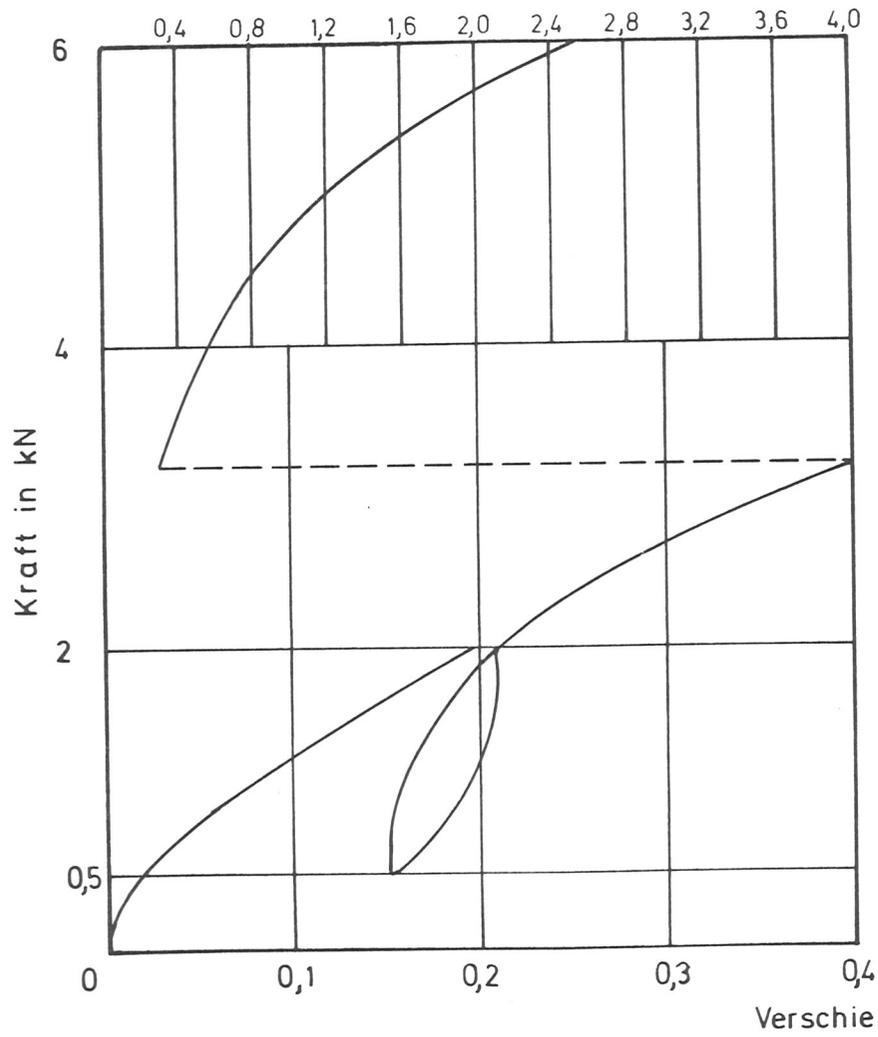
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,6/21,0 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 15,8/20,0 \%$

Körper-Nr. L 2.12 A8

$F_{15} = 9,35 \text{ kN}$

$\max F = 9,48 \text{ kN}$



Körper-Nr. L 2.12 B1

F_{15}

$\max F = 8,85 \text{ kN}$

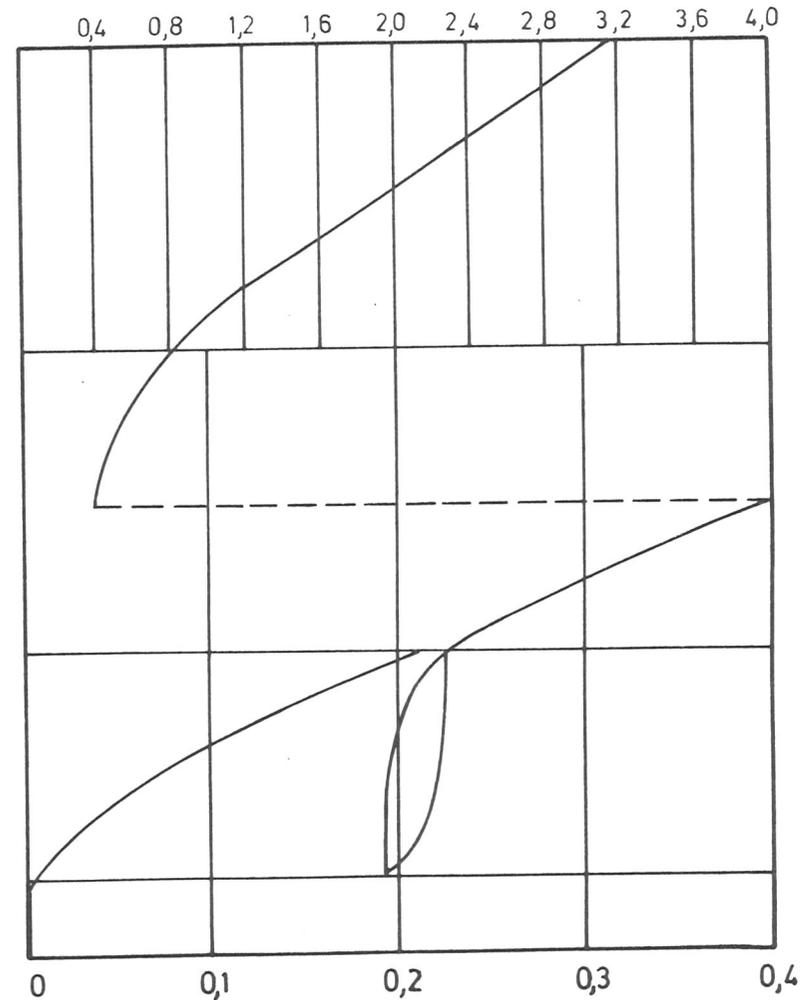


Bild 21: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

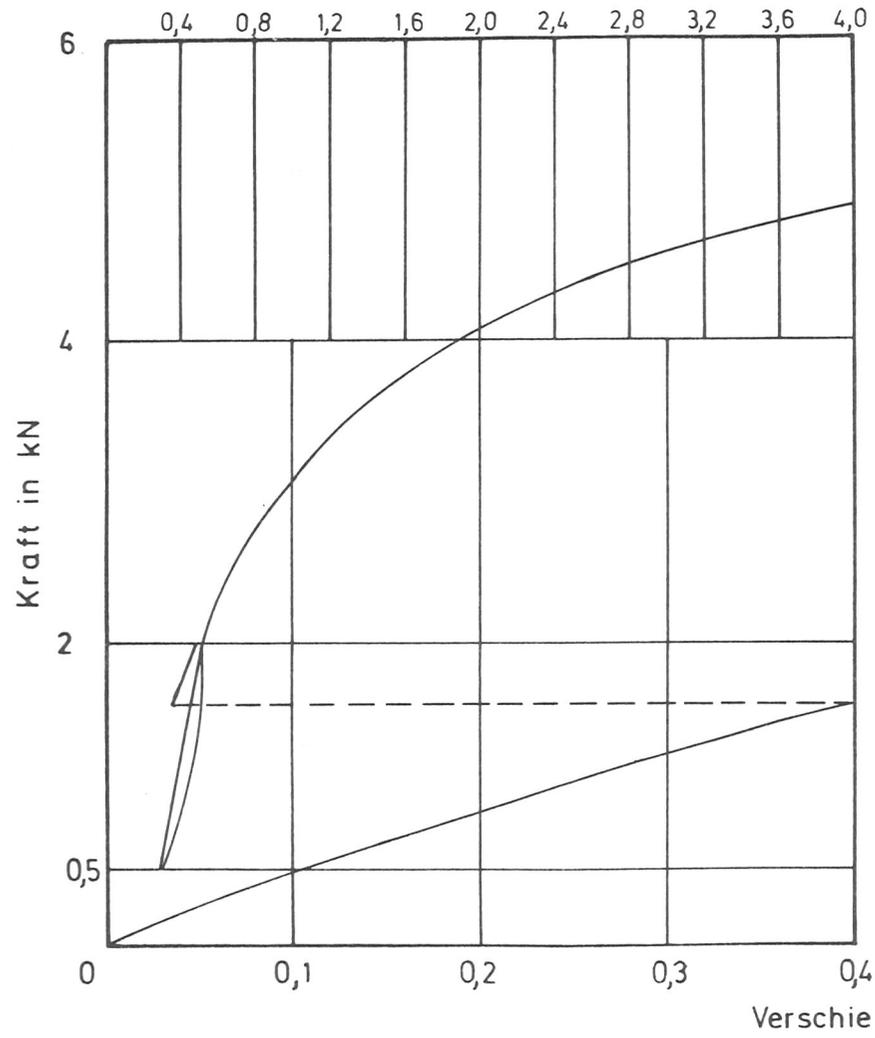
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,6/21,0 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 15,8/21,0 \%$

Körper-Nr. K 3a A2

F₁₅

max F = 5,01 kN



Körper-Nr. K3a B5

F₁₅

max F = 8,97 kN

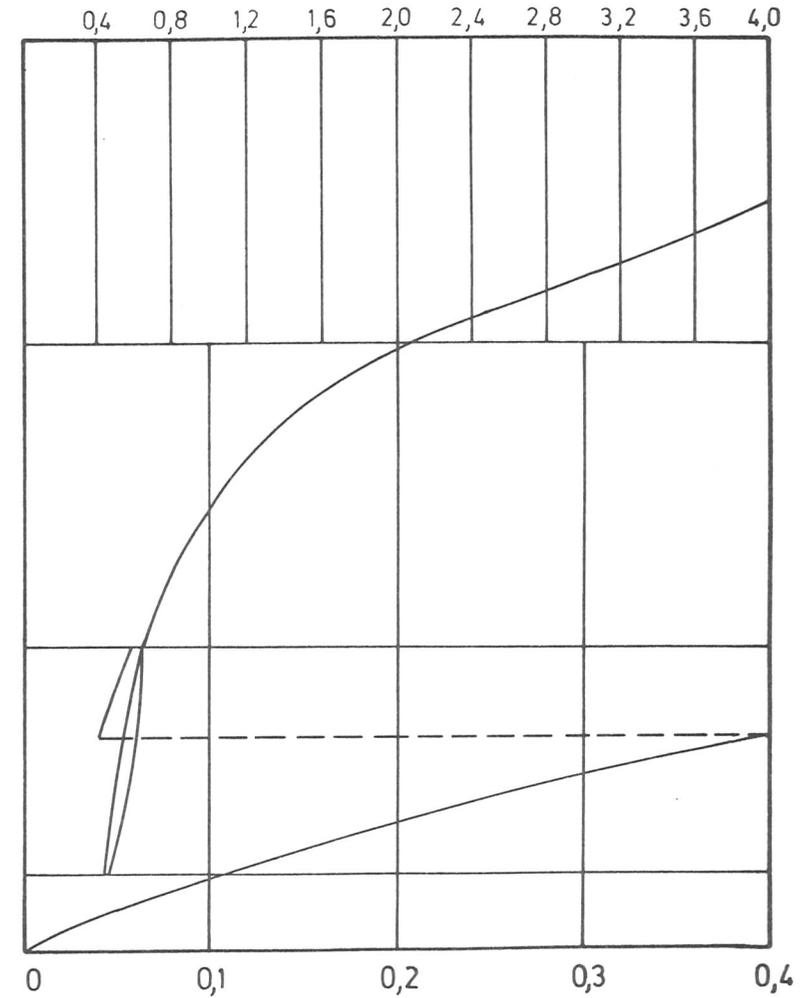


Bild 22: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

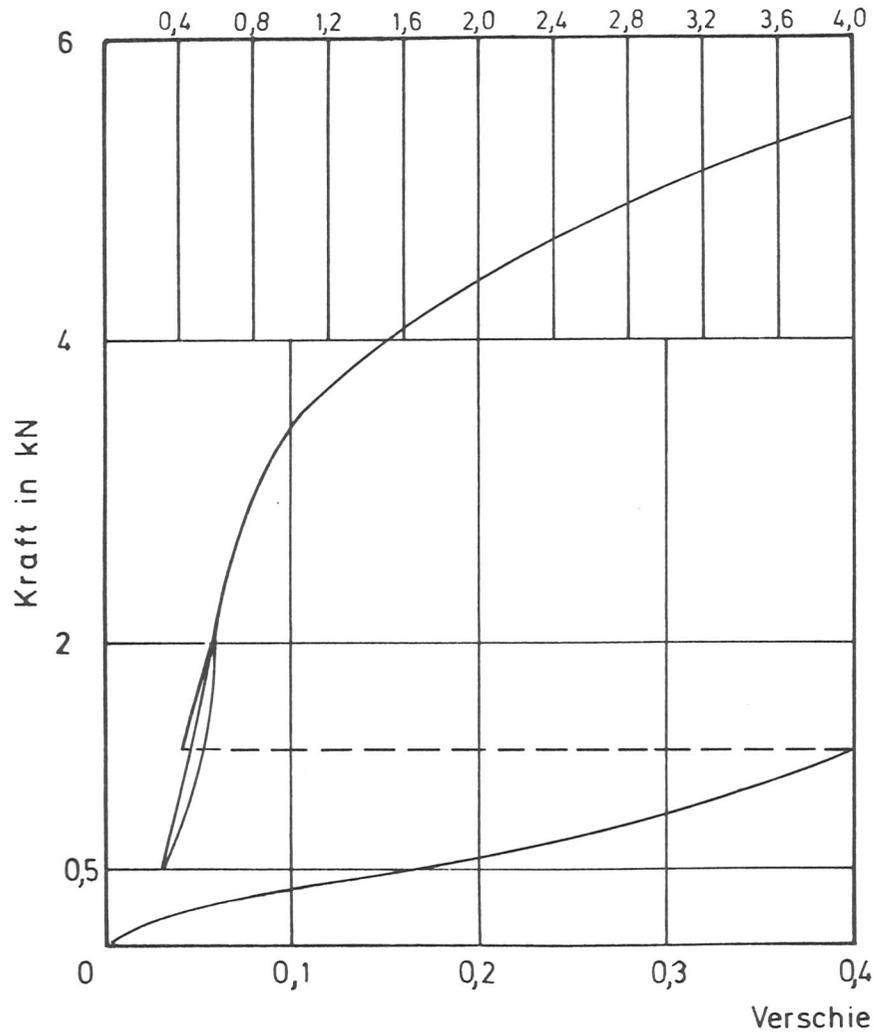
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,6/20,0 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 5,7/7,1 \%$

Körper-Nr. L 3a A1

F₁₅

max F = 6,13 kN



Körper-Nr. L 3a B2

F₁₅

max F = 9,08 kN

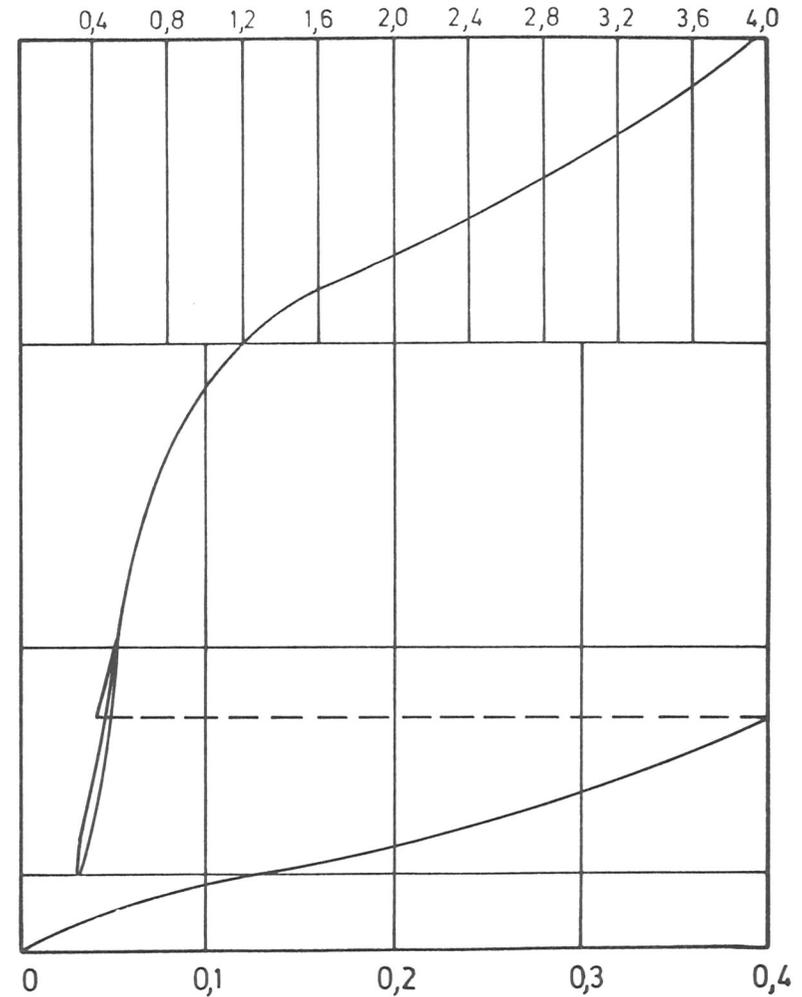


Bild 23: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

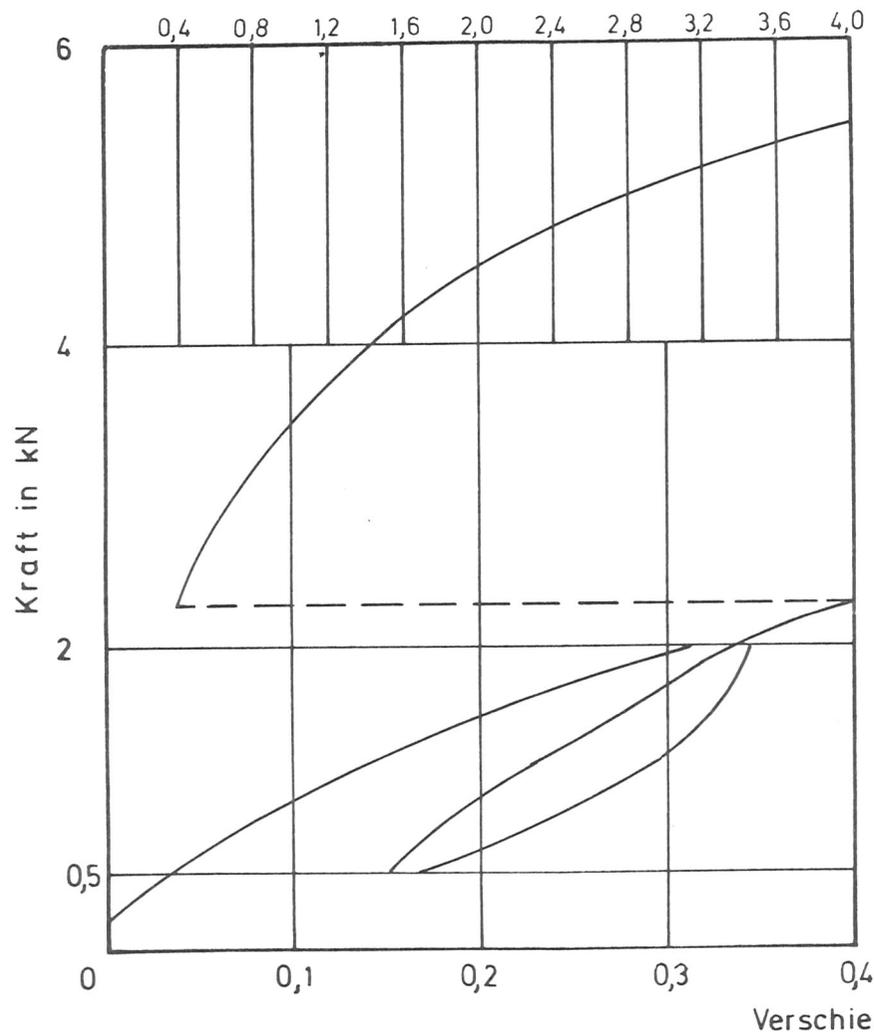
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,6/20,0 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 5,7/7,1 \%$

Körper-Nr. K 3b A3

F₁₅

max F = 5,77 kN



Körper-Nr. K 3b B2

F₁₅

max F = 7,08 kN

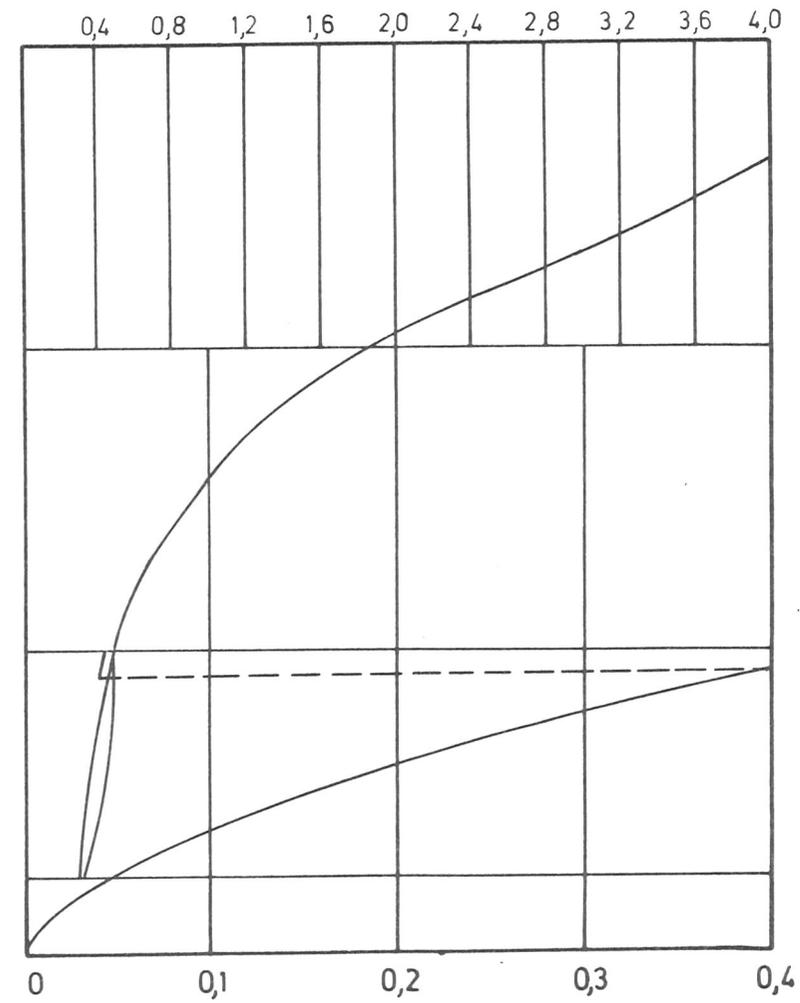
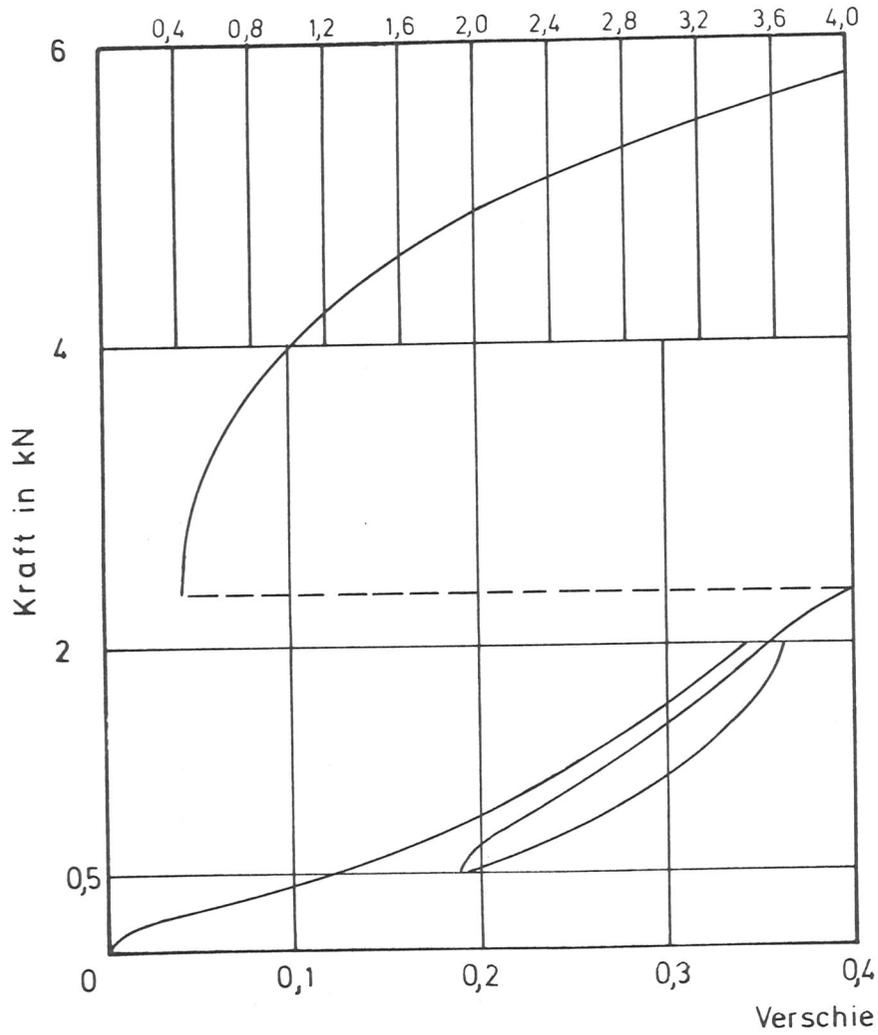


Bild 24: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,4/18,9 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 8,9/10,2 \%$

Körper-Nr. L 3b A3
 F₁₅
 max F = 7,03 kN



Körper-Nr. L 3b B1
 F₁₅
 max F = 7,69 kN

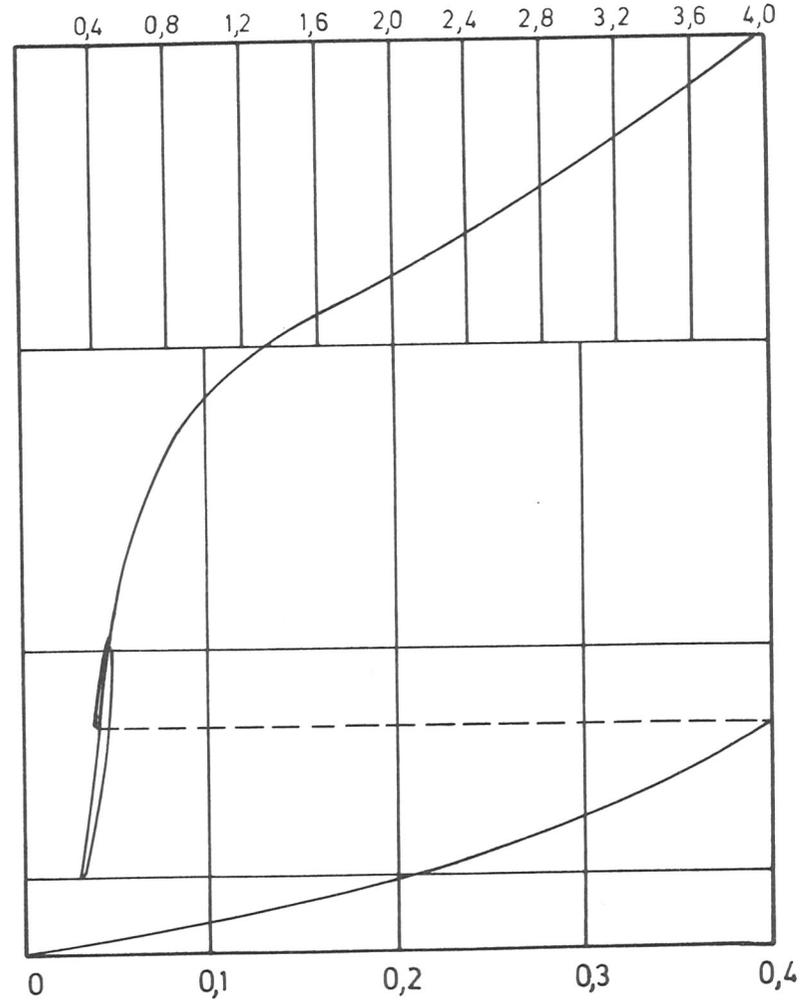


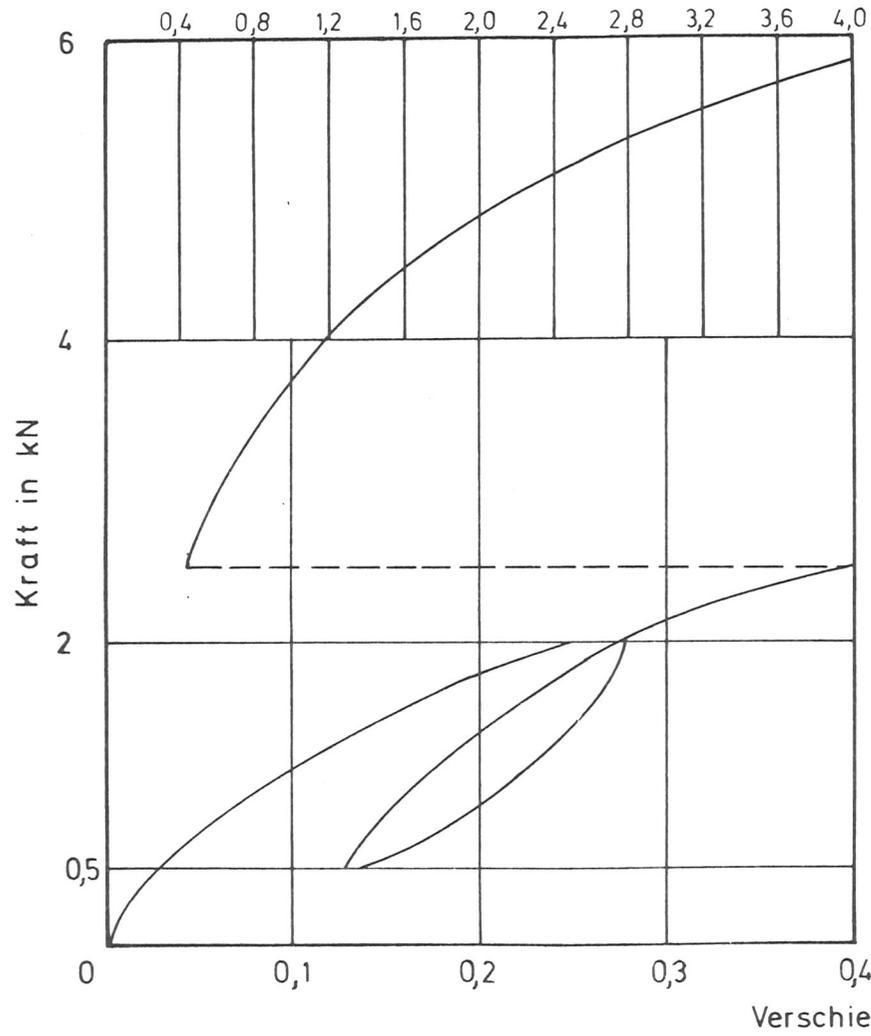
Bild 25: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 10,4/18,9 \%$
 Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 8,9/10,2 \%$

Körper-Nr. K 3 c A13

$F_{15} = 7,53 \text{ kN}$

$\max F = 8,18 \text{ kN}$



Körper-Nr. K 3 c B13

F_{15}

$\max F = 8,13 \text{ kN}$

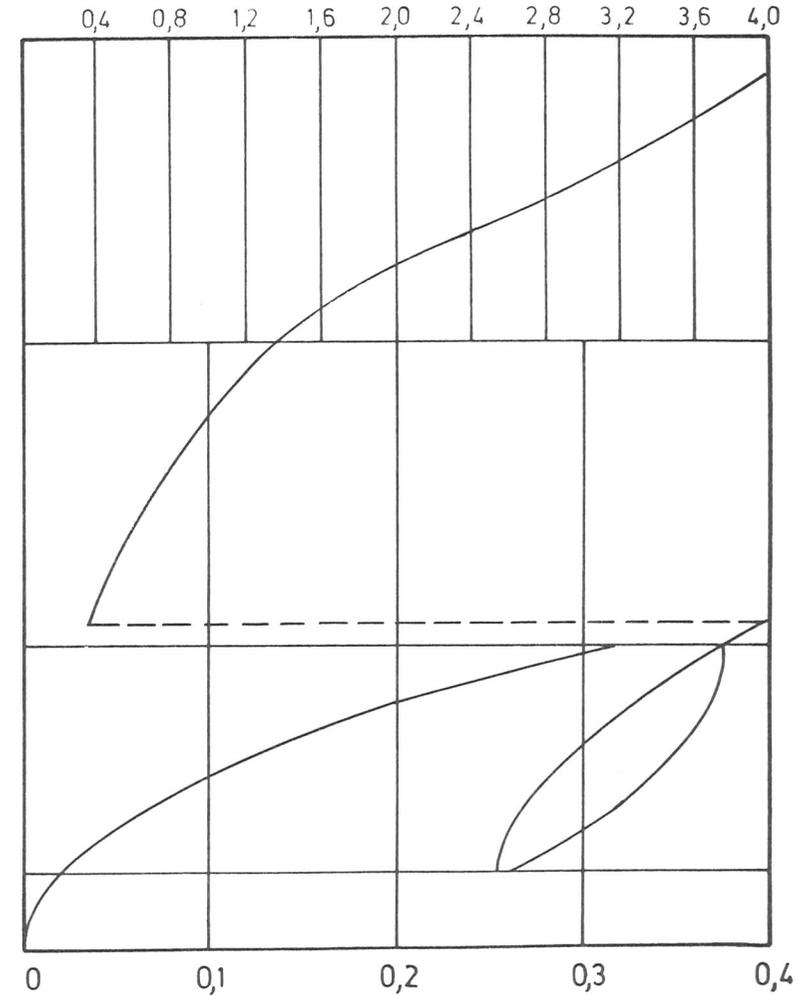


Bild 26: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

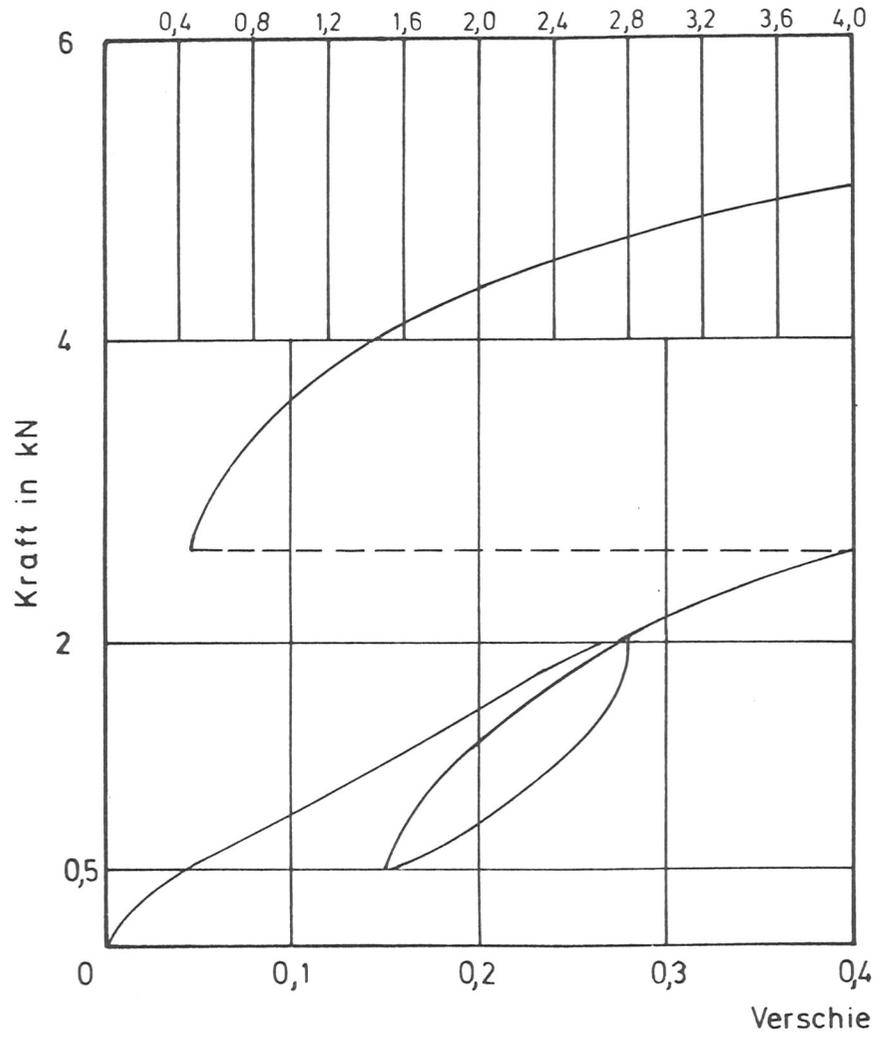
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 9,4/11,4 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 11,4/12,7 \%$

Körper-Nr. L3c A7

F₁₅

max F = 6,43 kN



Körper-Nr. L3c B3

F₁₅

max F = 8,23 kN

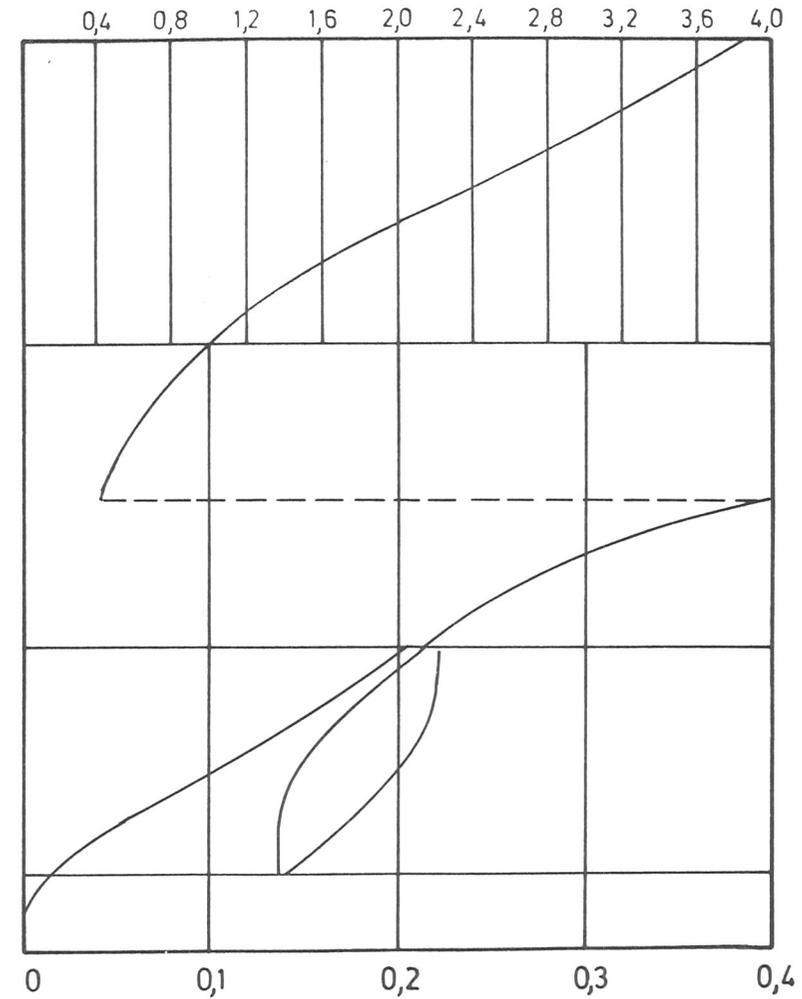


Bild 27: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

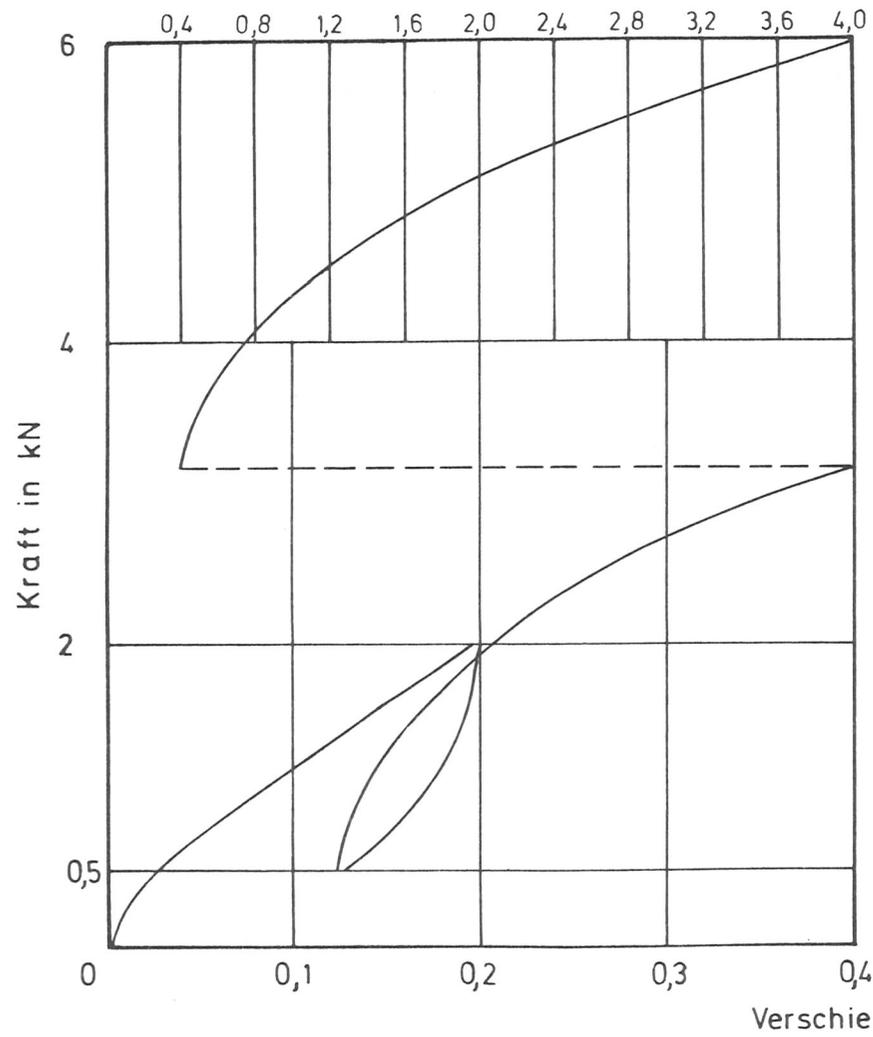
Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVH} = 9,4/11,4 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 11,4/12,7 \%$

Körper-Nr. L 3 d A6

$F_{15} = 7,92 \text{ kN}$

$\max F = 8,26 \text{ kN}$



Körper-Nr. L 3 d B10

$F_{15} = 11,70 \text{ kN}$

$\max F = 11,70 \text{ kN}$

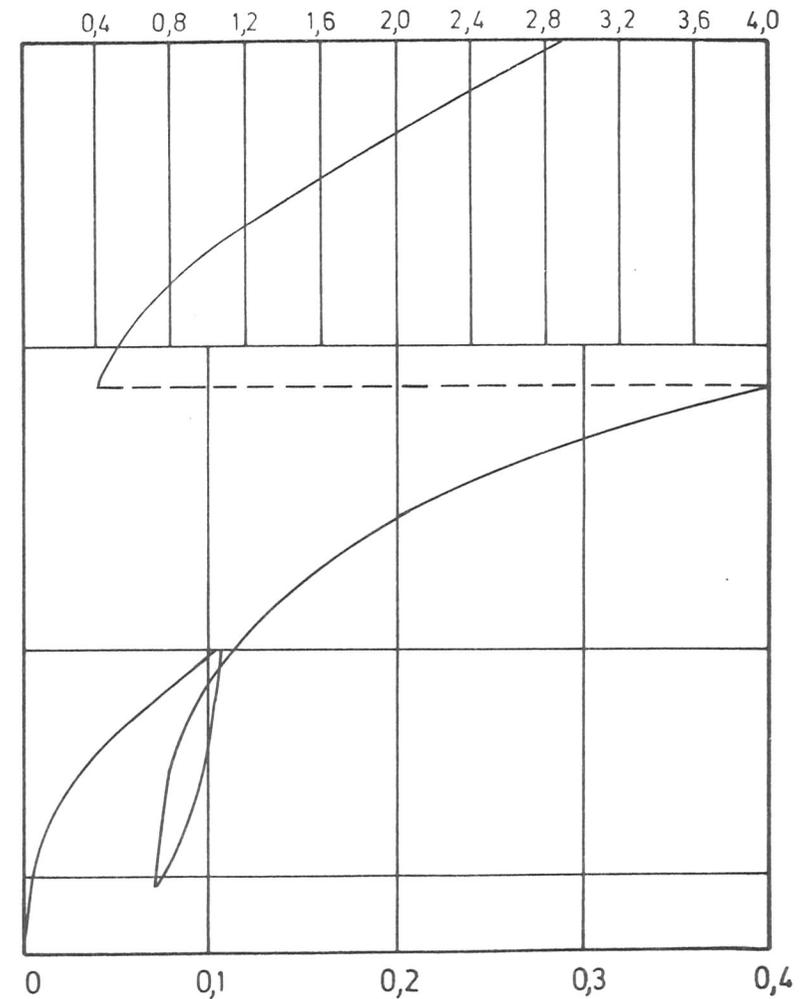


Bild 28: Kraft-Verschiebungsdiagramme der Scherkörper "A" und "B"

Holzfeuchte bei Herstellung $u_{HSP}/u_{HVVH} = 10,2/14,2 \%$

Holzfeuchte bei Prüfung $u_{PSP}/u_{PVH} = 13,5/14,2 \%$