

280

BAUFORSCHUNG
BAUPRAXIS

HOLZBAU

22. Jahrestagung der Arbeitsgruppe
»Timber Structures«

Teil 2



B A U A K A D E M I E

Autoronexemplar

Holzbau

**22. Jahrestag der Arbeitsgruppe
»Timber Structures«
des Internationalen Rates
für Bauforschung**

Berlin, 25. – 28. September 1989

Teil 2

Veranstalter:

**Bauakademie
Institut für Industriebau**

**Fachverband Bauwesen der Kammer der Technik
Zentrale Fachsektion Industriebau
Fachausschuß Ingenieurholzbau**

**VEB Kombinat Bauelemente und
Faserbaustoffe Leipzig**



BAUINFORMATION · BERLIN 1990



Dr.-Ing. Manfred Badstube
 Dr.-Ing. Wolfgang Rug
 Bauakademie
 Institut für Industriebau
 Dipl.-Ing. Werner Schöne
 VEB Kombinat Bauelemente und
 Faserbaustoffe
 Forschungsinstitut

Langzeitversuche aus Trägern aus Brettschichtholz

1. Einleitung

Es wird über die Vorbereitung und Durchführung von Langzeituntersuchungen an Brettschichtholz-Trägern unter Biegebeanspruchung berichtet. Die Lagen des Brettschichtholzes BSH M 3 wurden maschinell nach Festigkeitsklassen sortiert. Die Versuche werden unter einer Freiüberdachung durchgeführt und dauern mindestens 10 Jahre. Hierbei werden die Träger durch eine veränderliche Langzeitlast beansprucht.

Ziel der Untersuchung ist die Messung zeitabhängiger Verformungen und die Ermittlung der Resttragfähigkeit nach einer Belastungsdauer von mindestens 10 Jahren.

Aus den Ergebnissen werden der Kriechfaktor K_{creep} und der Modifizierungsfaktor "Lasteinwirkungsdauer" $K_{mod,1}$ gewonnen.

Diese werden den im Eurocode 5 /1/ angegebenen Faktoren gegenübergestellt und gegebenenfalls im neuen DDR-Fachbereichsstandard TGL 33 135/04 /2/ verwendet.

2. Bestimmung der veränderlichen Langzeitbeanspruchung

Zur Ergänzung der im Vorschriftenwerk /1/, /2/ verwendeten Faktoren

- Kriechfaktor K_{creep}
- Modifizierungsfaktor "Lasteinwirkungsdauer" $K_{mod,1}$

werden Langzeitversuche mit zeitlich veränderlicher Belastung im Klima "Frei unter Dach" erforderlich.

Holz ist ein elastisch-plastisches Material, das unter konstanter Langzeitlast bis zum Bruch kriecht, wobei die Festigkeit mit zunehmender Belastungsdauer absinkt.

Ähnliche Eigenschaften weist bei Brettschichtholz der Klebstoff auf. Es werden deshalb die Untersuchungen an Brettschichtholz-Trägern durchgeführt.

Die Schrifttumsauswertung in /3/ zeigt, daß im wesentlichen der Einzeleinfluß konstanter Langzeitlasten mit verschiedener Belastungsdauer auf die Langzeitfestigkeit von Bauholz erforscht wurde.

Es erweist sich aber als notwendig, den komplexen Einfluß veränderlicher Langzeitlasten zusammen mit der Wirkung von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte auf Bau- und Brettschichtholz zu erforschen.

Der veränderlichen Langzeitlast wird die Lastkombination "Eigenlast + Schnee" zugeordnet.

Aus /4/ wird ein Holzbinder gewählt, dessen Belastung einen hohen Eigenlastanteil mit einem geringen Schneelastanteil enthält. Dadurch entsteht bei der Entlastung von "Eigenlast + Schnee" auf "Eigenlast" ein geringer Rücksprung. Die Belastung des gewählten stahlunterspannten Dachbinders D 24.5 /4/, S. 34, lautet:

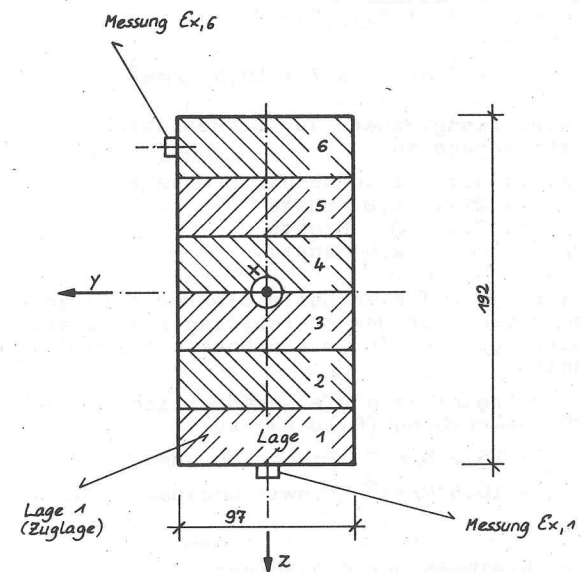
Eigenlast Dach:	0,27 kN/m ²
Eigenlast Decke:	0,45 kN/m ²
Eigenlast Installation:	0,29 kN/m ²

Eigenlast gesamt:	$g_K = 1,01 \text{ kN/m}^2$
Schneelast:	$s_K = 0,5 \text{ kN/m}^2$

Eigenlastanteil:

$$\frac{g_K}{g_K + s_K} = \frac{1,01}{1,01 + 0,5} = 0,67$$

Die Langzeitversuche werden mit Brettschichtholzträgern der Sorte BSH M3 durchgeführt (Bild 83).



Sorte: BSH M 3
 Lage 1 und 6: NSH F II
 Lage 2 bis 5: NSH F III
 BSH Brettschichtholz
 NSH Nadel-schicht-holz
 F Festigkeitsklasse

Bild 83 Trägerquerschnitt

Mit BSH M3 durchgeführte Kurzzeitversuche ergaben, daß Biegefestigkeit $f_{m,K}$ und Elastizitätsmodul $E_{0,mean}$ von Sorte BSH M3 mit Festigkeitsklasse C 5 in Eurocode 5, 10/87 /1/, S. 109, nahezu übereinstimmen. Der charakteristische Wert der Biegefestigkeit lautet:

$$f_{m,K} = 24 \text{ N/mm}^2$$

Der Modifizierungsfaktor "Lasteinwirkungsdauer" wird nach /1/, S. 42, wegen des hohen Eigenlastanteils für die Lasteinwirkungsdauerklasse "lang/mittel" und Feuchteklasse 1 oder 2 mit

$$K_{\text{mod},1} = 0,85$$

gewählt.

Der Materialfaktor wird nach /1/, S. 31, für Brettschichtholz im Hinblick auf die Einführung einer neutralen Fremdüberwachung bei der BSH-Fertigung¹⁾ mit

$$\gamma_M = 1,3$$

gewählt.

Damit ergibt sich der Bemessungswert der Biegefestigkeit zu:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,K} K_{\text{mod},1}}{\gamma_M} = \frac{24 \cdot 0,85}{1,3} = 15,7 \text{ N/mm}^2$$

Es ist der Bemessungswert der - Oberspannung:

$$\sigma_{m,1,d} = f_{m,d} = 15,7 \text{ N/mm}^2$$

- Unterspannung:

$$\sigma_{m,2,d} = \frac{g_K}{g_K + s_K} \sigma_{m,1,d} = 0,67 \cdot 15,7 = 10,5 \text{ N/mm}^2$$

Als Einwirkungsdauern für Schneelasten werden je Jahr angegeben in

- /1/, S. 40: 1 Woche bis 6 Monate
- /5/, S. 217: 1,8 Monate
- /6/, S. 70: 2 Monate
- /7/, 2,5 Monate.

In Hinblick auf eventuelle Standorte in größeren Höhen über dem Meeresspiegel wird als Einwirkungsdauer für die Schneelast 2,5 Monate gewählt.

Nunmehr ergibt sich die veränderliche Langzeitbeanspruchung (Bild 84) zu:

$$\sigma_{m,1,d} = 15,7 \text{ N/mm}^2, \text{ Einwirkungsdauer } 75 \text{ d}$$

$$\sigma_{m,2,d} = 10,5 \text{ N/mm}^2, \text{ Einwirkungsdauer } 285 \text{ d.}$$

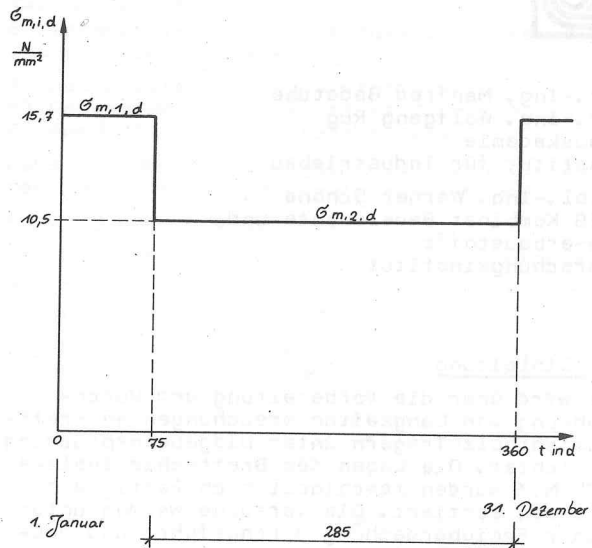
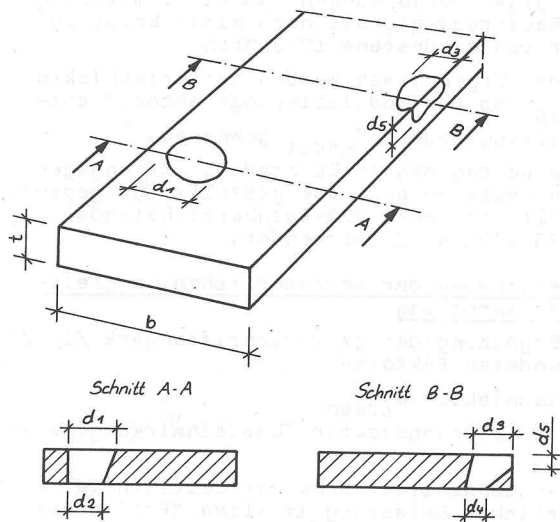


Bild 84 Veränderliche Langzeitbeanspruchung



$$K = \frac{d_1 + d_2}{2b}; \frac{d_3 + d_4 + d_5}{2b}$$

K Festigkeitsklasse

$\leq \frac{1}{3}$	F II
$\leq \frac{1}{2}$	F III

Bild 85 Sortierung nach Einzellasten

Entscheidend für die Zuordnung in eine Festigkeitsklasse ist der ungünstige Wert eines Sortierparameters.

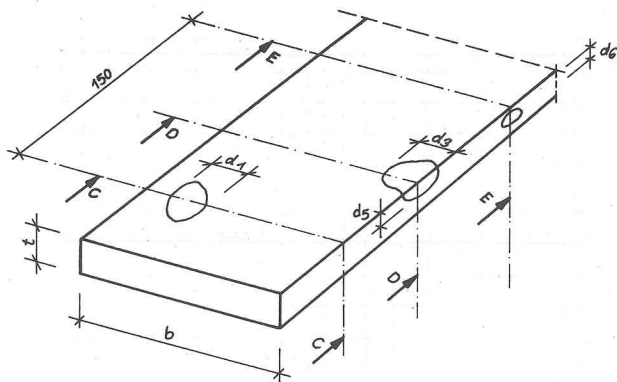
Die Verklebung der Brettlagen untereinander sowie der Keilzinkungen erfolgt mit Phenolharzklebstoff Plastasol L47 N.

Es wird grundsätzlich in der Lage 1 (unterste Trägerlage, Zuglage, Bild 83) innerhalb des Prüfbereichs (Bild 87) eine Keilzinkung angeordnet. In unserem Fall beträgt die Keilzinkenlänge 50 mm.

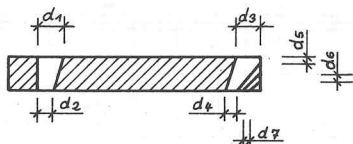
Der Abstand der Keilzinkenverbindungen (Keilzinkenversatz KZV) zwischen 1. und 2. Lage wird mit KZV ≥ 250 mm garantiert.

Die Ausgleichsfeuchte der Brettlagen beträgt nach der Fertigung $\omega \approx 12$ %.

1) BSH = Brettschichtholz



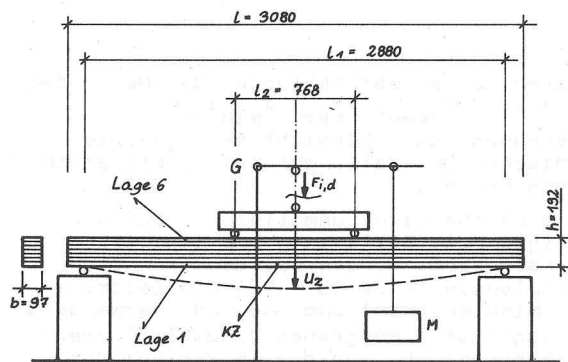
Schnitt CC, DD, EE in einem Schnittbild



$$K = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7}{2b}$$

K	Festigkeitsklasse
$\leq \frac{1}{2}$	F II
$\leq \frac{2}{3}$	F III

Bild 86 Sortierung nach Astansammlungen



- $F_{i,d}$ mit $i = 1, 2$ veränderliche Langzeitlast
- u_z maximale Durchbiegung
- h Prüfkörperhöhe
- l Prüfkörperlänge
- l_1 Stützweite $l_1 = 15 h$
- l_2 Prüfbereichslänge $l_2 = 4 h$
- G höhenverstellbares Gelenk
- M Massestück
- KZ Keilzinkung, stets im Prüfbereich l_2 , Lage 1

Bild 87 Prüfaufbau

4. Prüfaufbau

Für den Prüfaufbau der BSH-Träger wird, um einen querkräftfreien Bereich zu bekommen, eine 4-Punkt-Belastung gewählt (Bild 87).

Aus Untersuchungen an Bauholz /9/ ergibt sich zur Vermeidung von Schubbrüchen das Verhältnis

der Biegespannung $\sigma_{m,d}$ zur Schubspannung τ_d mit 22, für einen Schubeinfluß von etwa 6 % das Verhältnis der Stützweite l_1 zur Prüfkörperhöhe h mit 15. Unter diesen Voraussetzungen errechnet sich die Länge des Prüfbereichs l_2 mit $l_2 = 4 h / 9$ (Bild 87).

Aus den Langzeitspannungen errechnet sich die veränderliche Langzeitlast für

- Eigenlast + Schnee
 $F_{1,d} = 17,74 \text{ kN}$, $t = 75 \text{ d}$
- Eigenlast:
 $F_{2,d} = 11,89 \text{ kN}$, $t = 285 \text{ d}$

Die Kraft $F_{1,d}$ (Bild 87) wird mittels Massestück M über ein Hebegestell eingeleitet.

Das Gelenk G ist höhenverstellbar, damit auch bei zunehmender Durchbiegung u_z eine waagerechte Stellung des Lasthebels gewährleistet werden kann.

Die Langzeitversuche werden unter einer Freiüberdachung durchgeführt. Bei dieser Klimabedingung gelangen Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftbewegung des Außenklimas ungehindert an die Prüfkörper. Vor Niederschlägen und Sonne sind die Prüfkörper jedoch geschützt.

Die zu erwartende maximale Ausgleichsfeuchte beträgt nach /10/ $\omega \leq 18 \%$ und entspricht nach /1/ der Feuchteklasse 2.

5. Messungen

Während der Langzeitversuche werden über der Zeit folgende Messungen durchgeführt:

- a) Trägerdurchbiegung U_z

Diese wird in Stützweitenmitte (Bild 87) mittels Meßuhr, Ablesegenauigkeit 0,1 mm, sowie zusätzlich zur Kontrolle mittels Meßstab und Nivelliergerät, Ablesegenauigkeit 0,5 mm, bestimmt.

- b) Dehnungen ϵ_x

Jeweils in den Brettlagen 1 und 6 (Bild 83) werden in Stützweitenmitte die Dehnungen des Holzes $\epsilon_{x,1}$ und $\epsilon_{x,6}$ mittels mechanischem Setzdehnungsmesser (Fa. Holle, Magdeburg) gemessen.

- c) Holzfeuchte ω

Diese wird jeweils über ein fest in den Träger eingebrachtes Elektrodenpaar, Einschlagtiefe etwa 20 mm, mit Hilfe der elektrischen Widerstandsmessung bestimmt (Hydromette H 65, Fa. Gann, Stuttgart).

- d) Lufttemperatur T und relative Luftfeuchte φ .

Diese werden kontinuierlich mittels Thermohygrographen (Typ 406, VEB Feingerätebau Drebach) registriert.

6. Erste Ergebnisse

Die Langzeituntersuchungen an den zwölf Trägern begannen aus versuchstechnischen Gründen statt am 1. 1. 1988 erst am 15. 4. 1988 mit der Laststufe $F_{1,d}$. Die Laststufe $F_{2,d}$ wirkte vom 29. 6. bis 31. 12. 1988. Am 1. 1. 1989 wurde $F_{1,d}$ des 2. Belastungsjahres aufgebracht.

Die Werte der durchgeführten Messungen von T, φ , ω , ϵ_x , U_z sind für den Zeitraum

15. 4. bis 31. 12. 1988 in Bild 88 - 92 aufgetragen /11/.

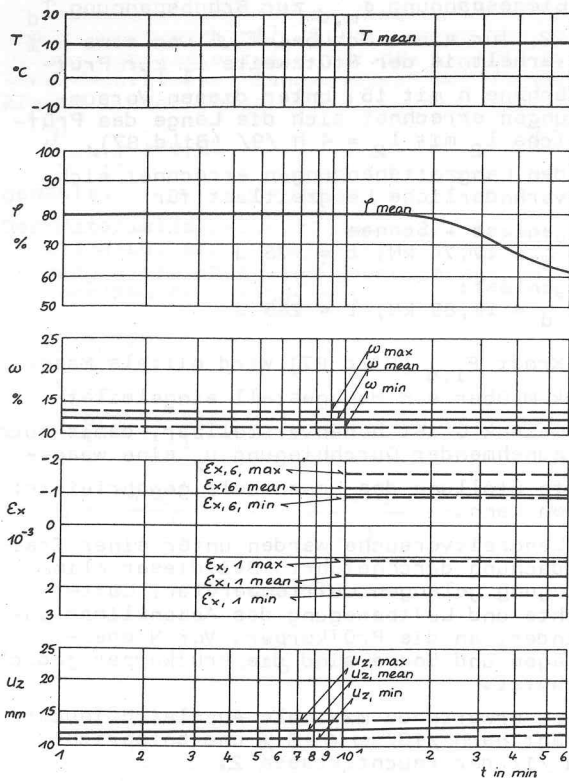


Bild 88 Messungen im Lastbereich F1,D, t=1 bis 60 min, 1. Belastungsjahr, 15.4. - 29.6.88

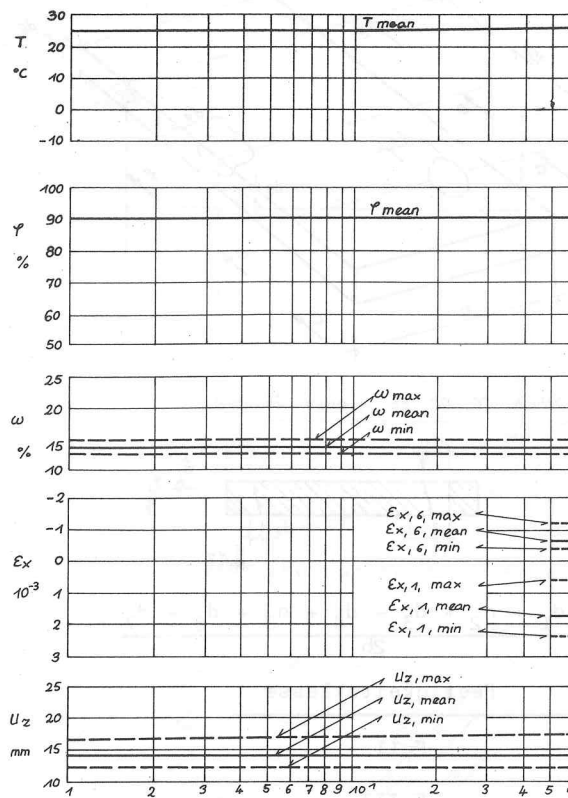


Bild 90 Messungen im Lastbereich F2,d, t=1 bis 60 min, 1. Belastungsjahr, 29.6. - 31.12.88

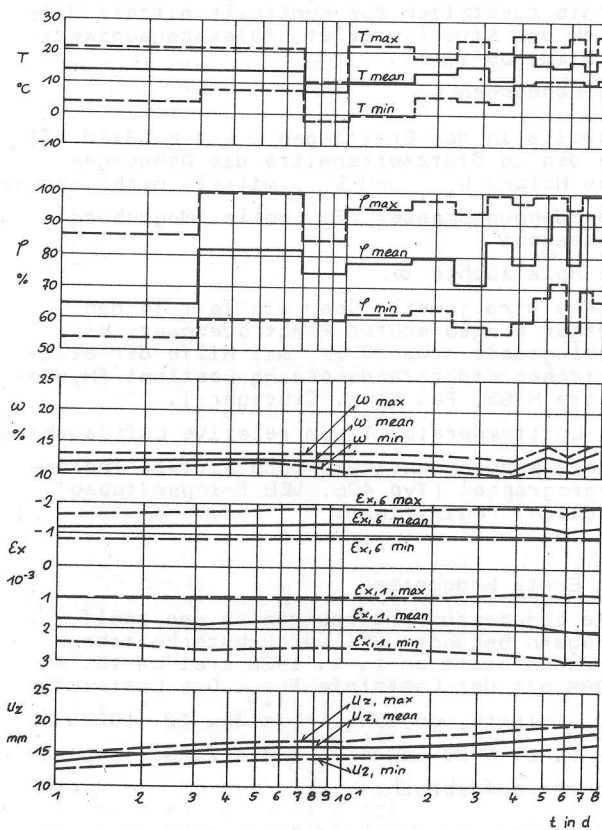


Bild 89 Messungen im Lastbereich F1,d, t=1 bis 75 d, 1. Belastungsjahr, 15.4. - 29.6.88

Die graphischen Darstellungen der Meßgrößen x enthalten X_{mean} , X_{max} , X_{min} . Zur Erhöhung der Übersicht erfolgen die graphischen Darstellungen auf halblogarithmischem Papier.

Da die Zeitbereiche unmittelbar nach der Belastung bzw. Entlastung von besonderem Interesse sind, werden bei den graphischen Darstellungen (Bild 88 - 92) die Zeitmaßstäbe Minuten (min) und Tage (d) verwendet. Die wichtigsten Meßgrößen sind die Trägerdurchbiegungen U_z und die im Verlauf der Zeit auftretenden Kriechverformungen. Die mittlere Durchbiegung $U_{z,mean}$ beträgt

- bei $t = 0$ für $F_{1,d}$ nach Bild 88:

$$U_{z,mean,0} = 12,5 \text{ mm}$$

- bei $t = 75 \text{ d}$ für $F_{1,d}$ nach Bild 89

$$U_{z,mean,75 \text{ d}} = 18,5 \text{ mm.}$$

Dem entspricht der Kriechfaktor

$$K_{creep,1} = \frac{U_{z,mean,75 \text{ d}}}{U_{z,mean,0}} = \frac{18,5}{12,5} = 1,5$$

- bei $t = 186 \text{ d}$ für $F_{2,d}$ nach Bild 92:

$$U_{z,mean,186 \text{ d}} = 14,1 \text{ mm.}$$

Dem entspricht der Kriechfaktor

$$K_{creep,2} = \frac{U_{z,mean,186 \text{ d}}}{U_{z,mean,0}} = \frac{14,1}{12,5} = 1,1$$

Die gemessenen Durchbiegungen gestatten einen ersten Vergleich mit den Angaben in Eurocode 5 /1/.

Bild 91

Messung von T, φ, ω im Lastbereich $F_{2,d}$, $t=1$ bis 186 d, 1. Belastungsjahr, 29.6. - 31.12.88

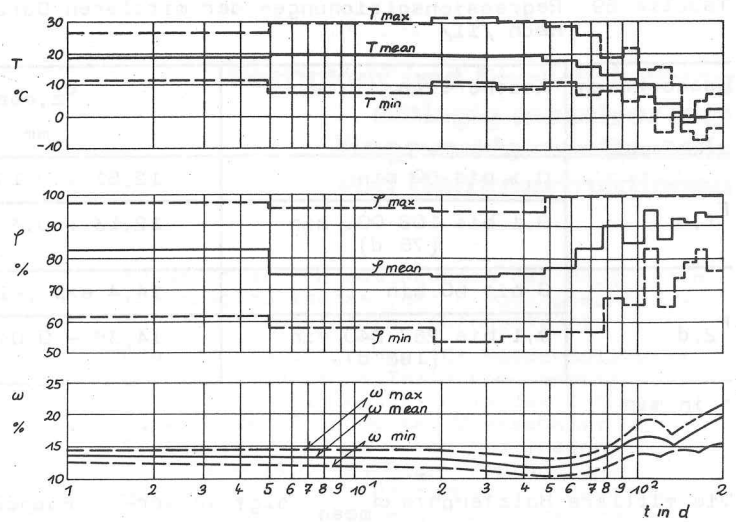
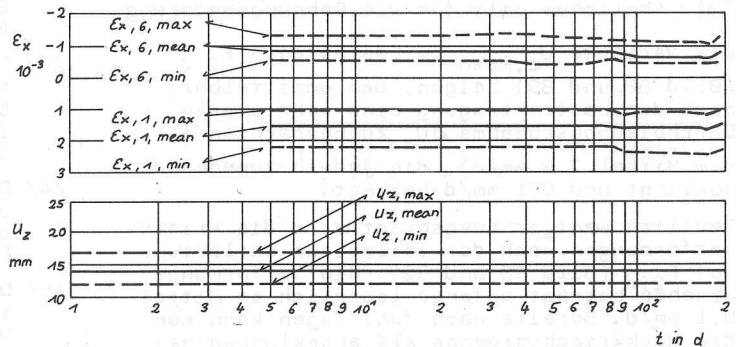


Bild 92

Messung von E_x, U_z im Lastbereich $F_{2,d}$, $t=1$ bis 186 d, 1. Belastungsjahr 29.6. - 31.12.88



Die Mittelwerte der gemessenen relativen Luftfeuchte φ_{mean} , Holzfeuchte ω_{mean} (Bild 89, 91, 92) liegen im Bereich $\varphi_{mean} = 65$ bis 95% , $\omega_{mean} = 12$ bis 18% .

Es liegt deshalb nach /1/, 2.5.4., die Feuchteklasse 2 vor.

Für die im Versuch verwendeten Lastanteile "Eigenlast"

$$\frac{g_K}{g_K + s_K} = 0,67, \text{ "Schnee" } \frac{s_K}{g_K + s_K} = 0,33$$

ergibt sich nach /1/, Tab. 4.1, für Feuchteklasse 2 und $F_{1,d}$ "Eigenlast + Schnee" der Kriechfaktor

$$K_{creep,1} = 0,67 \cdot 1,8 + 0,33 \cdot 1,3 = 1,64.$$

Dieser liegt über dem im Versuch für $F_{1,d}$ bei $t = 75$ d ermittelten $K_{creep,1} = 1,5$.

Nach /1/, Tab. 4.1, erhält man für Feuchteklasse 2 und $F_{2,d}$ "Eigenlast" den Kriechfaktor $K_{creep,2} = 1,8$.

Dieser liegt über dem im Versuch für $F_{2,d}$ bei $t = 75 + 186 = 261$ d ermittelten $K_{creep,2} = 1,1$.

Eine endgültige Aussage zu den Kriechfaktoren läßt sich aber erst in etwa zehn Jahren nach Abschluß der Langzeituntersuchungen machen.

Nach /1/, S. 48, soll die Durchbiegung im Endzustand $\frac{l_1}{250}$ nicht überschreiten.

In den bisherigen Untersuchungen ist die größte mittlere Durchbiegung für $F_{1,d}$ "Eigenlast + Schnee" bei $t = 75$ d:

$$U_{z,mean,75 d} = 18,5 \text{ mm} \quad \frac{l_1}{250} = \frac{2880}{250} = 11,5 \text{ mm}.$$

Die Überschreitung im Grenzzustand der Nutzungsfähigkeit besagt nicht, daß die Belastung $F_{1,d}$ zu hoch gewählt wurde.

Dies kommt zum Ausdruck durch die Festlegung von $K_{mod,1}$ und γ_M^* zur Bestimmung von $\sigma_{m,1,d} = f_{m,d}$ in Abschn. 2:

$$K_{mod,1} = 0,85 \text{ anstelle } 0,9 \text{ in /1/, S. 42,}$$

$$\gamma_M^* = 1,3 \text{ anstelle } 1,25 \text{ in /1/, S. 31.}$$

Eine Berücksichtigung der in /1/ angegebenen $K_{mod,1}$ und γ_M^* -Werte würde zu noch höheren Lasten und damit zu noch höheren Durchbiegungen führen.

Tabelle 69 Regressionsgleichungen, der mittleren Durchbiegungen $U_{z,mean}$ nach /11/

Lastbereich	Zeitbereich	$U_{z,mean}$ mm	r
F _{1,d}	0,1 bis 60 min	12,51 + 0,135 lnt	0,92
	0,1 bis 108 000 min (75 d)	12,13 + 0,488 lnt	0,94
F _{2,d}	0 bis 60 min	14,4 exp (-1,37 · 10 ⁴ t)	0,9
	0,1 bis 267 840 min (186 d)	14,38 - 0,0475 lnt	0,95

t in min

Die mittlere Holzfeuchte ω_{mean} folgt im Verlauf dem der mittleren relativen Luftfeuchte φ_{mean} (Bild 89 und 91).

Man erkennt, daß bei einer länger anhaltenden herbstlichen Witterung bei einer hohen relativen Luftfeuchte von $\varphi_{mean} \approx 93\%$ die Holzfeuchte den Wert $\omega_{mean} = 18\%$ erreicht

(Bild 91). Allerdings sind Zusammenhänge zwischen Holzfeuchteänderung und Durchbiegungsänderung nicht erkennbar (Bild 91 und 92). Ähnliches gilt für die Dehnungsänderung.

Die Verläufe $U_{z,mean}$ im Lastbereich F_{1,d} (Bild 88 und 89) zeigen, daß unmittelbar nach der Lasteintragung eine sehr starke Durchbiegungszunahme ΔU_z zu beobachten ist (im Mittel 2,2 mm/d), die jedoch zunehmend abklingt und 0,1 mm/d beträgt.

Deutlich weniger ausgeprägt sind die Kriechverformungen nach der teilweisen Entlastung auf F_{2,d} (Bild 90 und 92). Die Verformungsabnahme beträgt anfangs lediglich im Mittel 0,1 mm/d. Bereits nach fünf Tagen kann man die Rückkriechvorgänge als abgeklungen betrachten.

7. Regressionsgleichungen

Die mathematische Beschreibung der zeitabhängigen Durchbiegungen ist mit Hilfe einfacher Regressionsgleichungen möglich.

Einflußgröße ist die Zeit t, Zielgröße die mittlere Durchbiegung von zwölf Prüfkörpern $U_{z,mean}$.

Die Regressionsanalyse wird sowohl mit Exponentialfunktionen ($y = a \cdot \exp bx$) als auch logarithmischen Funktionen ($y = a + b \cdot \ln x$) durchgeführt.

Die Regressionsgleichungen mit den höchsten Korrelationskoeffizienten r sind in Tab. 69 angegeben.

8. Zusammenfassung

Es werden Langzeitversuche an Brettschichtholz-Trägern unter Biegebeanspruchung bei Wirkung einer veränderlichen Langzeitlast im Klima "Frei unter Dach" durchgeführt.

Erste Meßergebnisse geben Aufschluß über die zu erwartende Größe der Kriechfaktoren.

Endgültige Werte der Kriechfaktoren K_{creep} und des Modifizierungsfaktors "Lasteinwirkungsdauer" $K_{mod,1}$ für die Feuchteklasse 2 werden in etwa zehn Jahren vorliegen.

9. Literatur

- /1/ Eurocode 5 Holzbauwerke. Deutsche Entwurfsfassung. - Oktober 1987
- /2/ TGL 33 135/04 E 89 Holzbau; Tragwerke; Berechnung, bauliche Durchbildung. - Entwurf September 1989
- /3/ Langzeituntersuchungen an maschinell sortiertem Brettschichtholz unter Biegebeanspruchung. - Bauakademie der DDR, Institut für Industriebau Berlin, Dezember 1988
- /4/ Dach- und Hallenkonstruktionen in Holzbauweise - Informationen und Systemübersichten. - Forschungsinstitut Bauфа Leipzig, 1986
- /5/ Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen / Spaethe, G. - Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1987
- /6/ Die Zuverlässigkeit des Vollholzbalkens unter reiner Biegung / Steck, G. - Universität Fridericiana Karlsruhe, 1982
- /7/ Was darf der Holzbau von dem neuen probabilistischen Sicherheitskonzept erwarten? / Glos, P. - In: Bauen mit Holz. - Karlsruhe 85(1983)1. - S. 26 - 31
- /8/ TGL 33 135/03 Holzbau; Tragwerke; Gütebedingungen; Bauschnittholz. - Entwurf März 1988
- /9/ Ermittlung von Festigkeitskennwerten für Vollholz bei Beanspruchung Biegung durch Versuche / Apitz, R. - Ingenieurhochschule Wismar. - Zwischenbericht vom 27. 11. 1982
- /10/ TGL 33 135/01 Holzbau; Tragwerke; Berechnung, bauliche Durchbildung. - 1. Änderung vom 24. 6. 1986
- /11/ Prüfbericht Nr. 329 4005/88 Langzeituntersuchung an festigkeitssortiertem Brettschichtholz / Schöne, W. - VEB Kombinat Bauelemente und Faserbaustoffe, Forschungsinstitut, Leipzig 14. 11. 1988