

# 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**

## Zuverlässigkeitstheoretische Betrachtung Von Holzbauten

### 1. Einleitung

Es werden Bauteile aus Holz nach der bisher üblichen Methode der zulässigen Spannung /9/ und der Methode der Grenzzustände berechnet.

Die Berechnung nach der Methode der Grenzzustände erfolgte nach dem Entwurf des neuen DDR-Standards (TGL 33 135/04 F. 89, s. /10/) der weitgehend an den Eurocode 5, E. 10/87, angenähert wurde.

Die nach den vorgenannten Methoden bemessenen Bauteile wurden einer zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung unterzogen. Berechnet wurde der Sicherheitsindex  $\beta$ .

### 2. Bemessung der Bauteile

Es wurden drei unterschiedlich beanspruchte Bauteile aus Nadelholz der Güteklasse II (Festigkeitsklasse C 5 n /2/) betrachtet und nach den Methoden zulässiger Spannungen und Grenzzustände berechnet (Bild 80).

Die Berechnung erfolgt nach /9/ und /1/ für zwei Biegeträger und einen ausmittigt belasteten Druckstab. Die verwendeten charakteristischen Einwirkungen (Eigenlast  $g_k$ ,

Nutzlast  $p_k$ , Schneelast  $s_k$ , Windlast  $w_k$ ),

Lastfaktoren  $\gamma$  und Kombinationsfaktoren  $\psi$  sind in Tab. 63 ersichtlich.

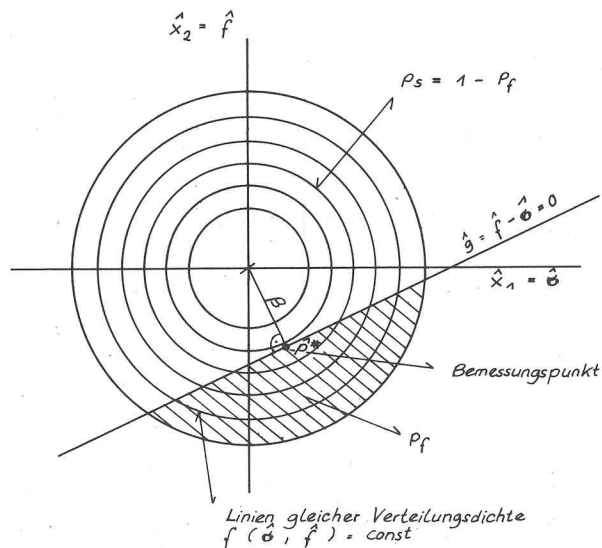
Beispiel	Bauteil	System
A	Dachpfette eines Industriegebäudes	
B	Geschoßdeckenbalken eines Bürogebäudes	
C	Wandstiel eines Bürogebäudes	

Bild 80 Anwendungsbeispiele

Die charakteristischen Einwirkungen werden sowohl bei den Methoden der zulässigen Spannungen als auch nach Grenzzuständen verwendet.

Bei der Berechnung der Bauteile nach Grenzzuständen wird als Materialfaktor  $\gamma_M = 1,4$  und als Modifizierungsfaktor "Einwirkungsdauer"  $K_{mod,1} = 0,9$  gewählt. Die charakteristischen Werte der Festigkeit (charakteristische Kennwerte sind 5%-Fraktile aus Versuchsdaten unter Anwendung der 3parametrischen Weibull-Verteilung) und des E-Moduls werden für Nadelholz der Güteklasse II (NSH GK II) Tab. 64 entnommen.

In Tab. 65 sind die Nachweisbedingungen und Auslastungen der zulässigen Spannungen bzw. Bemessungswerte der Festigkeiten für beide Berechnungsmethoden angegeben. Man erkennt den geringeren Holzbedarf durch Anwendung der Methode nach Grenzzuständen bei den Einzelbeispielen A und B (Biegeträger!).



$p_s$  Überlebenswahrscheinlichkeit

$\hat{\sigma}$  transformierte Zufallsgröße der Spannung

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma - \sigma_{\text{mean}}}{s_{\sigma}}; \quad s_{\sigma} \text{ Standardabweichung}$$

$s_{\text{mean}}$  Mittelwert

$\hat{f}$  transformierte Zufallsgröße der Festigkeit

$$\hat{f} = \frac{f - f_{\text{mean}}}{s_f}; \quad s_f \text{ Standardabweichung}$$

$f_{\text{mean}}$  Mittelwert

$$\beta \text{ Sicherheitsindex } \beta = \frac{f_{\text{mean}} - \sigma_{\text{mean}}}{\sqrt{s_f^2 + s_{\sigma}^2}}$$

Bild 81 Darstellung von Sicherheitsindex  $\beta$  und Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  für zwei Zufallsgrößen

Tabelle 63 Charakteristische Einwirkungen, Last- und Kombinationsfaktoren

Belastung	Anwendungsbeispiel		
	A	B	C
Eigenlast	$g_k = 0,27 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 1,1$	$g_k = 0,95 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 1,1$	$g_k = 2,3 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 1,1$
Nutzlast		$p_k = 2,75 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 1,4$	$p_k = 2,75 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 1,4$ $\psi = 0,9$
Schneelast	$s_k = k_s \cdot c \cdot s_{0,k}$ $= 1 \cdot 1 \cdot 0,5$ $= 0,5 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 1,4$		$s_k = k_s \cdot c \cdot s_{0,k}$ $= 1,01 \cdot 0,63 \cdot 0,7$ $= 0,445 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 1,4$ $\psi = 0,9$
Windlast			$w_k = c \cdot g_{0,k}$ $= 1 \cdot 0,55$ $= 0,55 \text{ kN/m}^2$ $\gamma = 1,2$ $\psi = 0,9$

Kombination der Einwirkungen allgemein:

$$S_d = \gamma_G \cdot G_k + \sum \psi_i \cdot \gamma_{Q,i} \cdot Q_{k,i}$$

$G_k = g$  (hier auf die Grundfläche bezogen)

$$Q_{k,i} = p_k, s_k, w_k$$

Bei Beispiel C (Biege-Druck-Stab!) ist kein ökonomischer Vorteil durch Anwendung der Methode nach Grenzzuständen feststellbar.

### 3. Ergebnis der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnungen

Es werden die in Bild 80 angegebenen Bauteile zuverlässigkeitstheoretisch untersucht. Die Untersuchung erfolgt nach der Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung.

Die Erforschung des Einflusses der zufälligen Streuungen von Lasten und Festigkeiten auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit eines Tragwerkes ist Inhalt der Zuverlässigkeitstheorie.

Das vorhandene Sicherheitsniveau wird hierbei durch den Sicherheitsindex  $\beta$  oder eine äquivalente operative Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  charakterisiert (Bild 81).

In der Zuverlässigkeitstheorie werden Lasten und Festigkeiten als Zufallsgrößen  $X_i$  dargestellt. Eine Zufallsgröße kann in Abhängigkeit vom Zufall verschiedene Werte annehmen.

In Bild 81 werden Verteilungsdichten  $f(X_i)$  und Grenzzustandsgleichungen für zwei transformierte Zufallsgrößen  $X_i$  dargestellt.

Bei der Berechnung der Bauteile werden bis zu sieben Zufallsgrößen verwendet. Es liegt dann ein 7dimensionaler Raum vor, in dem jede Zufallsgröße  $X_i$  mit ihrer Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte beliebig verteilt ist.

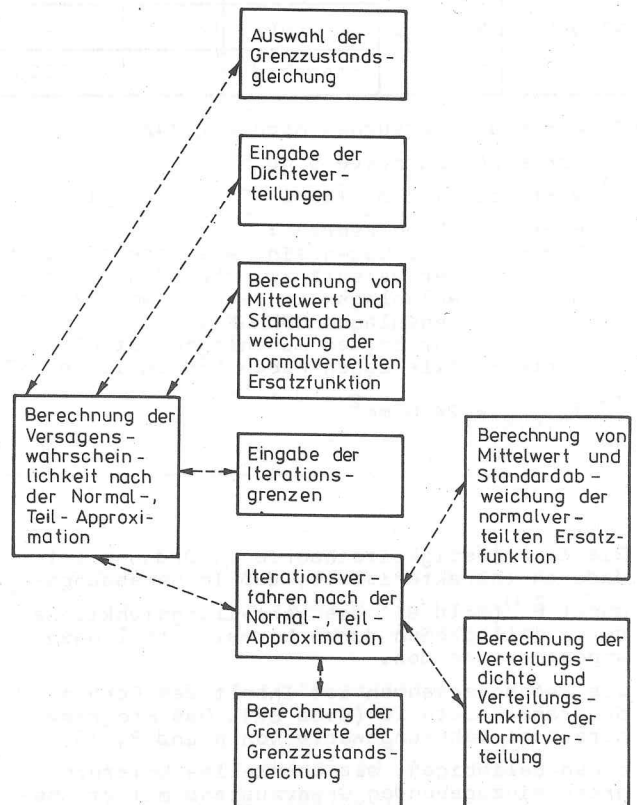


Bild 82 Rechenprogramm Beta 10, Programmstruktur

Tabelle 64 Charakteristische Werte und Mittelwerte der Festigkeit und des E-Moduls in N/mm<sup>2</sup>

Beanspruchung		Quelle	Nadelholz					
			Bauschnittholz			Brettschichtholz		
			Güteklasse			Sorte <sup>4)</sup>		
			I	II	III	1	2	3
		Festigkeitsklasse nach Eurocode 5 /2/						
		C 6	C 5	C 3	C 6	C 5	C 4	
Biegung	f <sub>m,k</sub>	Versuch <sup>1)</sup>	29,6	26,4	23,9	27,9	28,1	27,0
		Eurocode <sup>2)</sup>	28,5	24	19	28,5	24	21,5
		Standard <sup>3)</sup>	28,5	24	19	28,5	24	21,5 <sup>5)</sup>
Zug	f <sub>t,O,k</sub>	Versuch	22,7	13,1	7,1	-	-	-
		Eurocode	17	14,5	11,5	-	-	-
		Standard	17	14,5	7,1	-	-	-
Zug an keilgezinktem Holz	f <sub>t,O,k</sub>	Versuch	-	14,4	-	-	-	-
		Eurocode	-	-	-	-	-	-
		Standard	-	14,4	-	14,4	4,8	14,4
Druck	f <sub>c,O,k</sub>	Versuch	22,3	20,4	18,5	-	-	-
		Eurocode	26	21,5	17,5	-	-	-
		Standard	24	21,5	17,5	24	22,3	24
Biegung	E <sub>O,k</sub>	Versuch	8600	7600	7200	10 100	9700	9500
		Eurocode	8550	7440	6650	8550	7440	7095
		Standard	8500	7500	6500	8500	7500	8500
Biegung	E <sub>O,mean</sub>	Versuch	12 300	11 300	10 500	11 500	10 800	11 000
		Eurocode	12 000	11 000	9000	12 000	11 000	10 000
		Standard	12 000	11 000	9000	12 000	11 000	10 000

1) Werte aus Versuchen nach /3/, /4/

2) Werte aus Eurocode 5 nach /2/

3) Werte aus TGL 33 135/04 E 89 nach /1/

4) Brettschichtholzsorten:

Sorte 1: Alle Lagen sind aus Nadelschnittholz (NSH) der Güteklasse (GK) II. Der Versatz zwischen den Keilzinkungen (KZV) ist stets  $\geq 250$  mm.

Sorte 2: Außenlagen im Bereich von 1/6 der Trägerhöhe haben NSH GK II, Innenlagen NSH GK III.

Nur in den Außenlagen ist KZV  $\geq 250$  mm.

Sorte 3: Alle Lagen haben NSH GK II und KZV  $\geq 0$ .

5)  $f_{m,c,k} = 24 \text{ N/mm}^2$

Die Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung ist dadurch charakterisiert, daß im Bemessungspunkt  $\hat{P}^1$  (Bild 81) die Verteilungsfunktionen der Zufallsgrößen durch Normalverteilungen angenähert werden.

Das Rechenverfahren ist Inhalt des Rechenprogrammes Beta 10 (Bild 82). Das Programm berechnet Näherungswerte von  $\beta$  und  $P_f$  für einen beliebigen, als spezielles Unterprogramm einzugebenden Grenzzustand mit stocha-

stisch unabhängigen Zufallsgrößen. Es können verschiedene Verteilungsfunktionen (Normalverteilung NV, Weibull-Verteilung WV, logarithmische Normalverteilung LNV u. a.) berücksichtigt werden.

Das Programm berechnet die Versagenswahrscheinlichkeit nach der Normal-Tail-Approximation.

Die Verteilungsdichten der Lasten werden /5/ unter Beachtung von /6/ entnommen (Tab. 66). Die Verteilungsdichten der Festigkeiten folgen aus /7/ (Tab. 66).

1) In unserem Falle lauten die Zufallsgrößen  $X_i$ :  $g, P_1, P_2, s, q, c, f$  (Tab. 66)

Die Umrechnung der Lasten in Spannungen erfolgt mittels der Querschnittswerte, die

Tabelle 65 Nachweisbedingungen

Beispiel	Methode zulässiger Spannungen nach /9/ Nachweisbedingung		Methode nach Grenzzuständen nach /1/, /2/ Nachweisbedingung	
	Auslastung von zul $\sigma$ %		Auslastung von $f_d$ %	
A	$\sigma \leq \text{zul } \sigma_m$ $9,6 < 10 \text{ N/mm}^2$	96	$\sigma_d \leq f_{m,d}$ $12,5 < 15,4 \text{ N/mm}^2$	81
B	$\sigma \leq \text{zul } \sigma_m$ $9,4 < 10 \text{ N/mm}^2$	94	$\sigma_d \leq f_{m,d}$ $12,4 < 15,4 \text{ N/mm}^2$	80,5
C	$\omega \cdot \sigma_c + \frac{\text{zul } \sigma_{c,0}}{\text{zul } \sigma_m} \sigma_m$ $\leq \text{zul } \sigma_{c,0}$ $5,6 + 4,3 = 9,9 < 10 \text{ N/mm}^2$	99	$\frac{1}{K_c} \cdot \sigma_{c,d} + \frac{1}{K_m} \frac{f_{c,0,d}}{f_{m,d}} \sigma_{m,d}$ $\leq f_{c,0,d}$ $7,9 + 5,8 = 13,7 < 13,8 \text{ N/mm}^2$	99

Tabelle 66 Verteilungsdichten der Lasten und Festigkeiten

Zufallsgröße	Anwendungsbeispiel		
	A	B	C
Eigenlast	$g_{\text{mean}} = 0,27 \text{ kN/m}^2$ $v_g = 0,1$	$g_{\text{mean}} = 1,7 \text{ kN/m}^2$ $v_g = 0,1$	$g_{\text{mean}} = 2,17 \text{ kN/m}^2$ $v_g = 0,1$
Langzeitige Nutzlast		$p_{1,\text{mean}} = 0,75 \text{ kN/m}^2$ $v_{p_1} = 0,47$	$p_{1,\text{mean}} = 0,75 \text{ kN/m}^2$ $v_{p_1} = 0,47$
Kurzzeitige Nutzlast		$p_{2,\text{mean}} = 1,24 \text{ kN/m}^2$ $v_{p_2} = 0,9$	$p_{2,\text{mean}} = 1,24 \text{ kN/m}^2$ $v_{p_2} = 0,9$
Schneelast	$s_{\text{mean}} = 0,5 \text{ kN/m}^2$ $v_s = 0,2$		$s_{\text{mean}} = 0,5 \text{ kN/m}^2$ $v_s = 0,2$
Windlast	Staudruck		$q_{\text{mean}} = 0,738 \text{ kN/m}^2$ $v_q = 0,21$
	Aerodynamischer Beiwert		$c_{\text{mean}} = 1$ $v_c = 0,1$
Festigkeit	$f_{m,\text{mean}} = 37 \text{ N/mm}^2$ $v_f = 0,27$ $K_{\text{mod},1} = 0,9$	$f_{m,\text{mean}} = 37 \text{ N/mm}^2$ $v_f = 0,27$ $K_{\text{mod},1} = 0,9$	$f_{c,0,\text{mean}} = 32 \text{ N/mm}^2$ $v_f = 0,18$ $K_{\text{mod},1} = 0,9$

$X_{\text{mean}}$  Mittelwert;  $V_x$  Variationskoeffizient

sich aus der Bemessung für  $\sigma_k = \text{zul } \sigma$  (Methode zulässiger Spannungen) und  $\sigma_d = f_d$  (Methode nach Grenzzuständen) ergeben.

- 2)  $\sigma_k$  Spannung aus den charakteristischen Werten der Lasten  
 $\sigma_d$  Spannung aus den Bemessungswerten der Lasten  
 $f_d$  Bemessungswert der Festigkeit

Die Grenzzustandsgleichung (Bild 81)  $\hat{g} = \hat{f} - \hat{\sigma}$  wird für jedes Bauteil aufgestellt und enthält bis zu sieben Zufallsgrößen (Tab. 67).

Die zuverlässigkeitstheoretische Berechnung lieferte folgendes Ergebnis:

- a) Der Sicherheitsindex  $\beta$  beträgt beim Bemessungsquerschnitt für  $\sigma_k = \text{zul } \sigma$ :  
 $\beta = 2,5$  bis  $4,7$  (Tab. 68)  
für  $\sigma_d = f_d$ :  
 $\beta = 2,5$  bis  $3,5$  (Tab. 68)

Man erkennt, daß der für alle Bauweisen erforderliche Sicherheitsindex erf  $\beta \geq 3,5$  der Zuverlässigkeitsklasse III /8/ von den betrachteten Holzbauteilen teilweise unterschritten wird.

Das Sicherheitsniveau für die Bemessung  $\sigma_d = f_d$  (Methode nach Grenzzuständen) liegt unter dem der Bemessung  $\sigma_k = \text{zul } \sigma$  (Methode zulässiger Spannungen).

Die Unterschreitung im Bereich  $\beta \leq 3,5$  beträgt 10 bis 19 % und ist noch vertretbar.

b) Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  beträgt beim Bemessungsquerschnitt für  $\sigma_k = \text{zul } \sigma$ :

$$P_f = 0,001 \cdot 10^{-3} \text{ bis } 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ (Tab. 68)}$$

für  $\sigma_d = f_d$ :

$$P_f = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ bis } 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ (Tab. 68)}$$

Man erkennt, daß die für alle Bauweisen erforderliche Versagenswahrscheinlichkeit erf  $P_f \leq 0,23 \cdot 10^{-3}$  der Zuverlässigkeitsklasse III nach /8/ von fast allen betrachteten Holzbauteilen überschritten wird.

c) Dem Bemessungsquerschnitt für  $\sigma_d = f_d$  nach der Methode der Grenzzustände liegt der Materialfaktor  $\gamma_M = 1,4$  zugrunde.

Die in Tab. 68 dargelegten Ergebnisse hängen stark von den Verteilungsdichten der Lasten ab. Diese werden zur Zeit überarbeitet. Die Ergebnisse stellen deshalb nur erste Orientierungswerte dar.

Tabelle 67 Grenzzustandsgleichungen

Beispiel	Grenzzustandsgleichung
A	$g = f_m K_{\text{mod},1} - (\sigma_{m,g} + \sigma_{m,s})$
B	$g = f_m K_{\text{mod},1} - (\sigma_{m,g} + \sigma_{m,p1} + \sigma_{m,p2})$
C	$g = f_{c,0} K_{\text{mod},1} - (\sigma_{c,0,g} + \sigma_{c,0,p1} + \sigma_{c,0,p2} + \sigma_{c,0,s} + \sigma_{m,w c})$

f Verteilungsdichte der Festigkeit, die Verteilungsdichte wird durch Mittelwert und Variationskoeffizient charakterisiert (Bild 83)

$\sigma$  Verteilungsdichte der Spannung infolge der Lasten g, p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, s, w (Bild 83)

c Verteilungsdichte des aerodynamischen Beiwertes

Tabelle 68 Errechnete Werte von Sicherheitsindex  $\beta$  und Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$

Beispiel	Anzahl der Zufallsgrößen	Bemessungsquerschnitt für $\sigma_k = \text{zul } \sigma$ :		Bemessungsquerschnitt für $\sigma_d = f_d$ :	
		$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
A	3	4,7	$0,001 \cdot 10^{-3}$	3,45	$0,28 \cdot 10^{-3}$
B	4	3,15	$0,829 \cdot 10^{-3}$	2,64	$4,19 \cdot 10^{-3}$
C	7	2,5	$6,26 \cdot 10^{-3}$	2,51	$6,06 \cdot 10^{-3}$

## 5. Zusammenfassung

Es werden 3 Holzbauteile zuverlässigkeits-theoretisch untersucht:

- A) Dachpfette eines Industriegebäudes
- B) Geschoßdeckenbalken eines Bürogebäudes
- C) Wandstiel eines Bürogebäudes.

Dabei werden die Bemessungsquerschnitte aus den Nachweisbedingungen  $\sigma_k = \text{zul } \sigma$  und  $\sigma_d = f_d$  zugrunde gelegt.

Das Sicherheitsniveau bei  $\sigma_d = f_d$  (Methode der Grenzzustände) liegt noch vertretbar unter den bei  $\sigma_k = \text{zul } \sigma$  (Methode der zulässigen Spannungen). Das Sicherheitsniveau für die Methode zulässiger Spannungen liegt bei den betrachteten Holzbauteilen teilweise unter dem anderer Bauweisen. Die Ergebnisse lassen sich nicht verallgemeinern, da nur wenige Anwendungsbeispiele vorliegen.

Da die Verteilungsdichten der Lasten einen großen Einfluß auf die Ergebnisse haben, handelt es sich nur um Ergebnisse mit orientierendem Charakter.

## 6. Literatur

- /1/ TGL 33 135/04 Holzbau; Tragwerke; Berechnung, bauliche Durchbildung. - Entwurf September 1989
- /2/ Eurocode 5, Holzbauwerke. - Deutsche Entwurfsfassung. - Oktober 1987
- /3/ Grenzzustände Holzbau / Bauakademie der DDR, Institut für Industriebau, Forschungsbericht G 3. - Berlin, November 1987
- /4/ Beitrag zur Ermittlung der Verteilungsfunktion der Festigkeitseigenschaften des Bauholzes unter besonderer Berücksichtigung des Festigkeitsverhaltens bei der Druckbeanspruchung für eine Bemessung nach der Methode der Grenzzustände / Kiesel. - Ingenieurhochschule Wismar, Forschungsbericht G 4. - Wismar, Oktober 1987
- /5/ Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen / Spaethe, G. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1987
- /6/ Die Zuverlässigkeit des Vollholzbalkens unter reiner Biegung / Steck, G. - 1982. - Karlsruhe, Universität, Diss. A
- /7/ Anwendung des neuen Sicherheitskonzeptes im Bereich des Holzbaus; Vorteile und Vergleich mit der bisherigen Bemessungspraxis, Besonderheiten des Holzbaus / Freingruber, H.-Chr. - ÖJAZ. - Wien 132(1987)9
- /8/ Zuverlässigkeitskonzeption für tragende Baukonstruktionen / Spaethe, G. - Bauakademie der DDR. - Berlin, September 1986

/9/ TGL 33 135/01 Holzbau; Tragwerke; Berechnung, bauliche Durchbildung. - Januar 1984

/10/ New GDR Timber Design Code, State and Development / Rug, W.; Badstube, M.; Kofent, W. - CIB W 18 Meeting twentytwo, Berlin/GDR