

HBV

**Städtische Nachverdichtung unter Einstz
Modularer Holz-Beton-Verbund-Systeme**

**Zur Nachweisführung von
Holz-Beton-Verbundbauteilen
im Brandfall**

Manfred AUGUSTIN

holz.bau forschungs gmbh, Graz

Graz, 19. März 2025

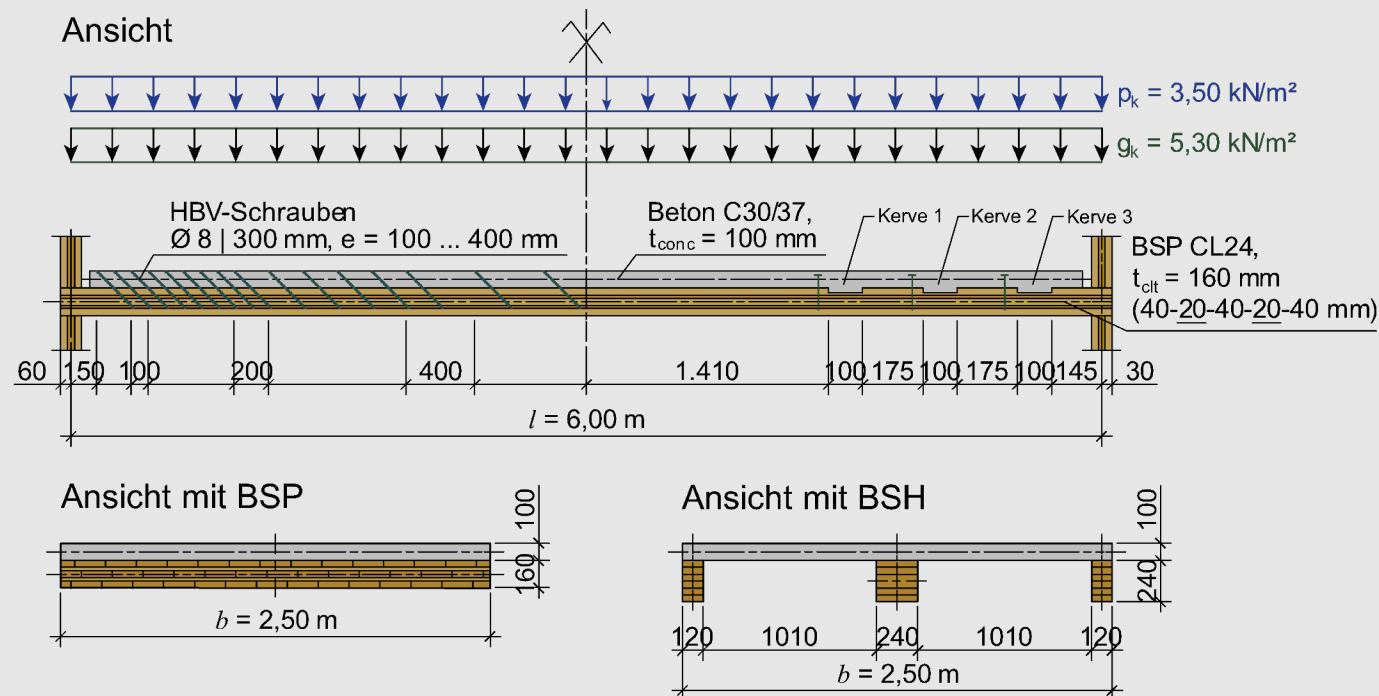


**Das Kompetenzzentrum
für Holzbau und Holztechnologie**
im Bautechnikzentrum
der Technischen Universität Graz

Das Holz-Beton-Verbund System und seine Komponenten

Holz

platten- | rippenförmige Querschnitte, Produkte: BSP, LVL | BSH, KVH, VH; übliche Festigkeitsklassen (C 24, GL 24); übernimmt (Biege-) Zugspannungen; Einsatz in NK 1 und NK 2, Langzeitverformungen über k_{def} Werte berücks.



Beton

mind. C 20/25; üblich: C 30/37, C 35/45 übernimmt (Biege-) Druckspannung; geht durch Rißbildung in den Zustand II über; Kriechbeiwert $\varphi_0 = 2,5$ bis $3,5$ | Schwindkoeffizient $\varepsilon_{SH} = 0,40$ bis $0,60$ mm/m (rund $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ der Langzeitverformung)

Bewehrung

in der Betonplatte; dient der Rissevertlg.; kommt i. Allg. nicht ins Fließen

Verbindungsmittel

Parameter: Verschieb.-modul | Festigkeit

kontinuierlich

Schrauben, Stahlblechformteile, eingeklebte Bleche, ...

diskontinuierlich

Kernen

in der Verbundfuge treten Reibungseffekte auf (rund 5-10% von w)

Abhebesicherung

deckt Zugspannungen in der Verbundfuge ab; verhindert Klaffungen in der Verbundfuge

normative Vorgaben für die Nachweisführung von HBV-Bauteilen im Brandfall (nur Kriterium R)

- aktuell sind **keine normativen Regelungen** für den Nachweis von HBV-Bauteilen im Brandfall definiert
- im **Draft EN 1995-1-2 (Stand: 05.09.2023)** werden im Kapitel 7 “vereinfachte Bemessungsmethoden”, 7.2 “wirksamer Restquerschnitt” allgemein gehaltene Regeln für den Nachweis von Holz-Beton-Verbund Bauteilen angegeben (Abschnitt 7.2.5)

7.2.5.1 Allgemeines

- (1) Die Festlegungen des Abschnittes 7.2.5 sollten nur für Holz-Beton-Verbund Bauteile mit stab- oder plattenförmiger Holzbauteilen angewandt werden.
- (2) Die Nachweisführung des Holz-Beton-Verbundbauteils sollte die **Nachgiebigkeit der Verbindung** zwischen dem Holz- und dem Betonbauteil berücksichtigen.
- (3) Die Nachweisführung des Holz-Beton-Verbundbauteils sollte gegebenenfalls die **temperaturbedingte Verminderung des Verschiebungsmoduls** berücksichtigen.
- (4) **Stabförmige Holzbauteile** sind entsprechend Abschnitt 7.2.2 nachzuweisen.
- (5) **Plattenförmige Holzbauteile** sind entsprechend Abschnitt 7.2.3 nachzuweisen.
- (6) Die **Nachweisführung des Betonbauteils** ist entsprechend den **Festlegungen in EN 1992-1-2** durchzuführen.

7.2.5.2 Verbindungen

- (1) Der **Verschiebungsmodul K_{fi} der Verbindung** des Holz- und Betonbauteils **im Brandfall** darf mittels Gleichung (7.2) berechnet werden, wobei gilt:
 - der **Verschiebungsmodul im „Kaltzustand“** darf gemäß EN 1995.1.1 oder **CEN/TS 19103** berechnet werden.
 - der **Modifikationsbeiwert $h_{K,fi}$** ist gemäß 7.2.5.2 (2), 7.2.5.2 (3) und 7.2.5.2 (4) zu berücksichtigen.
- (2) Für Verbindungen mit rechtwinklig zur Scherebene eingebrachten, auf Abscheren beanspruchten dübelförmigen Verbindungsmitteln sollte der Modifikationsbeiwert aus Tabelle 7.1 [in EN 1995-1-1] verwendet werden.
- (3) Für Verbindungen mit axial beanspruchten Verbindungsmitteln sollte der Modifikationsbeiwert wie folgt ermittelt werden.

$$\eta_{K,fi} = \begin{cases} 0 & \text{für } a_p \leq 0,65 \cdot t_{req} \\ \frac{0,2 \cdot a_p - 0,12 \cdot t_{req}}{0,2 \cdot t_{fi,d} + 3} & \text{für } 0,65 \cdot t_{req} \leq a_p \leq 0,8 \cdot t_{req} + 3 \\ \frac{0,8 \cdot a_p - 0,6 \cdot t_{req} + 1,8}{0,2 \cdot t_{req} + 21} & \text{für } 0,8 \cdot t_{req} + 3 \leq a_p \leq t_{req} + 24 \\ 1,0 & \text{für } a_p \geq t_{req} + 24 \end{cases}$$

Dabei ist:

a_p ist der Kleinstwert der Abstände $a_{p,i}$ auf der brandzugewandten Seite in Abb. 9.6, in mm;

t_{req} ist die erforderliche Feuerwiderstandsdauer, in min.,

- (4) **Für Verbindungen mit Kerven darf der Modifikationsbeiwert mit $h_{K,fi} = 1$ in Rechnung gestellt werden. → ???**
- (5) Die Tragfähigkeit von rechtwinklig zur Scherebene eingebrachten, auf Abscheren beanspruchten Verbindungsmitteln darf gemäß Abschnitt 9.2 ermittelt werden.
- (6) Die Tragfähigkeit von axial beanspruchten Verbindungsmitteln darf gemäß Abschnitt 9.3 ermittelt werden.
- (7) **Die Tragfähigkeit von Verbindungen mit Kerven darf unter Berücksichtigung des wirksamen Querschnitts gemäß den Festlegungen in CEN/TS 19103 bestimmt werden. → ???**

Nachweisführung von HBV-Bauteilen im Brandfall

Zusammenfassung: **Draft EN 1995-1-2 (Stand: 05.09.2023)**

“Holz wie Holz, Beton wie Beton, mit Verbundwirkung”

Übersicht Nachweisverfahren

Holz (EN 1995-1-2)

- **tabellarische Daten**
→ siehe ÖNORM B 1995-1-2
- **wirksamer Restquerschnitt**
ECSCM ... Effective Cross Section Method
→ Abbrandrate β_0 bzw. β_n
→ temperaturbeeinflusster Randbereich → d_0
→ Berechnung wie im „Kaltzustand“ (mit Anpassungen)
- **reduzierte Festigkeit und Steifigkeit**
RSSM ... Reduced Strength and Stiffness Method
 - thermische Analyse
→ Abbrandgrenze Holz bei 300°C
 - reduzierte Steifigkeit und Festigkeit abh. von Temperatur

Beton (EN 1992-1-2)

- **tabellarische Daten**
- **vereinfachte Rechenverfahren**
 - 500°C-Isothermen Methode
 - Zonenmethode
 - Abschätzung der Krümmung (für M+N beanspr. BT)
- **allgemeine Rechenverfahren**
 - thermische Analyse
 - mechanische Analyse

Verbindung: hier: nur Kerven als Verbindung → Draft EN 1995-1-2: **Modifikationsbeiwert $h_{K,fi} = 1$ (wie „kalt“)**

Grundlagen für den Brandnachweis nach ÖNORM EN 1995-1-2

2.4 Nachweisverfahren

2.4.1 Allgemeines

- (1)P Das für die Bemessung angenommene Modell des Tragwerks muss das **Verhalten der Tragstruktur i Brandfall** wiedergeben. ...
- (4)P Bei anderen Materialien als Holz müssen Auswirkungen **thermischer Dehnungen** berücksichtigt werden. ...
- (6) Als **Alternative** zur Bemessung durch Berechnung darf die Brandbemessung auf der Grundlage von Brandversuchen oder einer Kombination aus Brandversuchen und Berechnungen erfolgen, siehe EN 1990:2002, 5.2

2.4.2 Bauteilberechnung

- (1) Beanspruchungen sollten für den **Zeitpunkt $t = 0$** unter Verwendung der **Kombinationsbeiwerte** $\psi_{1,1}$ oder $\psi_{2,1}$ entsprechend EN 1995-1-2:2002, 4.3.1 bestimmt werden. ...
- (4) Die Randbedingungen an den Auflagern dürfen als **konstant** über die Zeit angenommen werden. ...

3.4.1 Abbrandtiefe ...

- (4) Als Lage der Abbrandgrenze sollte die Position der 300°-Isotherme angenommen werden. ...
- ... → aus Tabelle 3.1: Bemessungswert der Abbrandrate $\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$ | $\beta_n = 0,70 \text{ mm/min}$

Nachweisführung für flächenförmige Holzbauteile (Brettstapel | BSP)

Der Betonquerschnitt bleibt i. Allg. „kalt“ und ist mit den zugehörigen mechanischen Kenngrößen durchzuführen. Der Holzquerschnitt kann (wie üblich) mit dem wirksamen Restquerschnitt nachgewiesen werden.

Der Verschiebungsmodul und die Tragfähigkeit der **Kerbe** dürfen i. Allg. wie für den „Kaltzustand“ berücksichtigt werden.

Wo der Mindestwert für die „**verbleibende Überdeckung**“ ohne **signifikanten Temperatureinfluss** liegt ist nicht definiert/bekannt.

Prüfungen an Brettstapeldecken

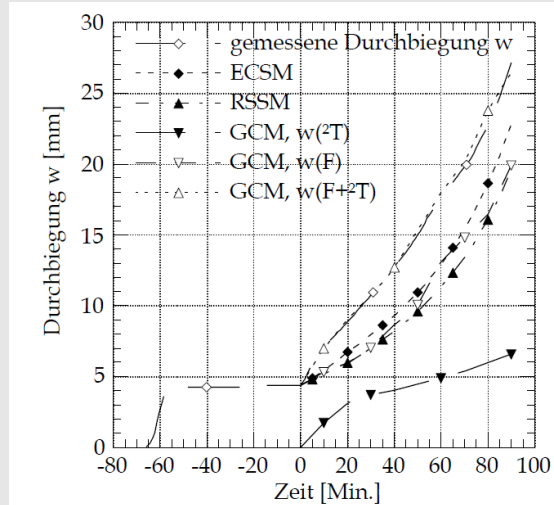


Abb. 4 - Während des Brandversuches gemessene Zunahme der Durchbiegung in der Deckenmitte

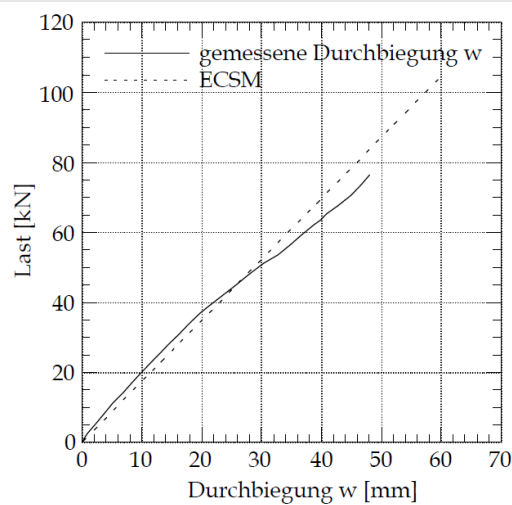
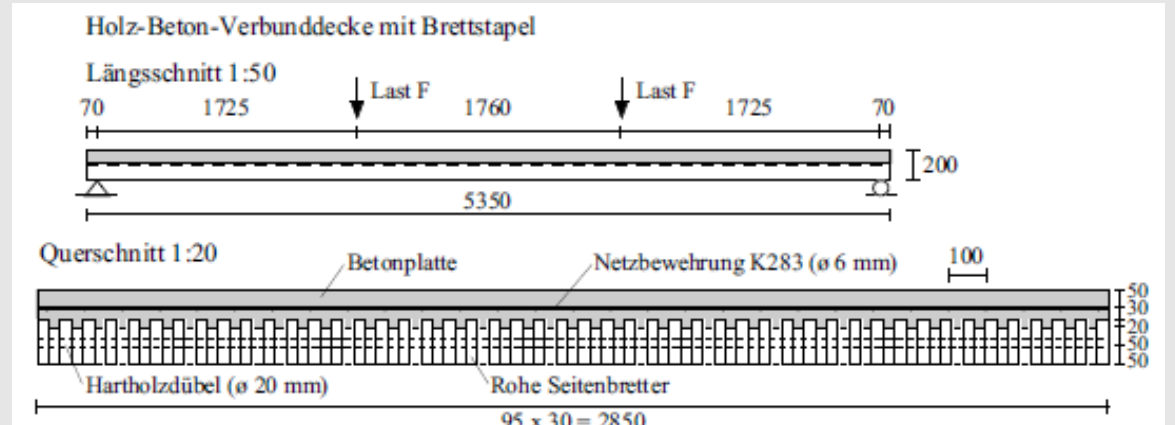


Abb. 5 - Nach dem Brandversuch gemessene Zunahme der Durchbiegung bis zum Deckenversagen

Quelle: M. Fontana „Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken“, ETH Zürich



Quelle: A. Frangi „Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken“, Diss., ETH Zürich

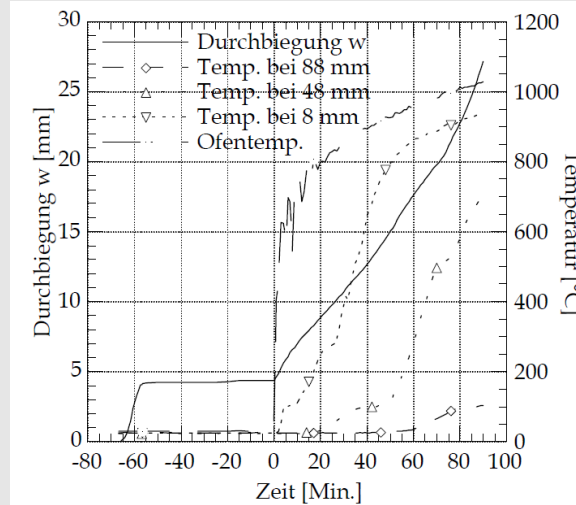


Abb. 6 - Gemessene Temperaturen im Holzquerschnitt bei unterschiedlichen Tiefen von der Feuerseite

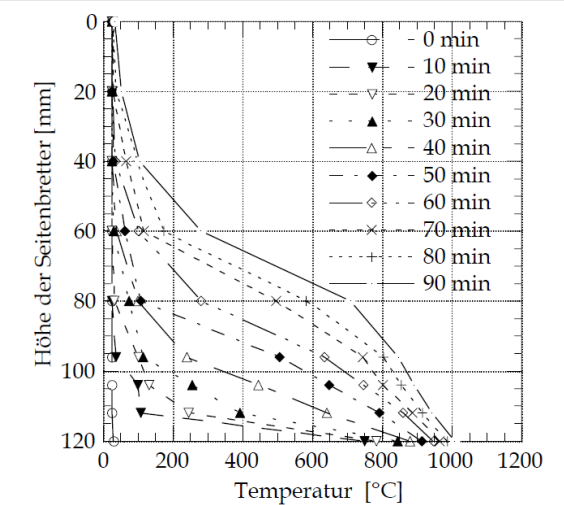


Abb. 7 - Während des Brandversuches gemessene Holztemperaturprofile

Nachweisführung für stabförmige Holzbauteile mit Holzschalung

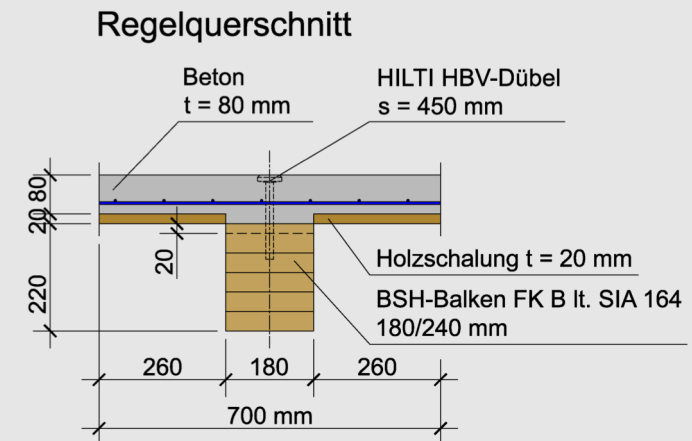
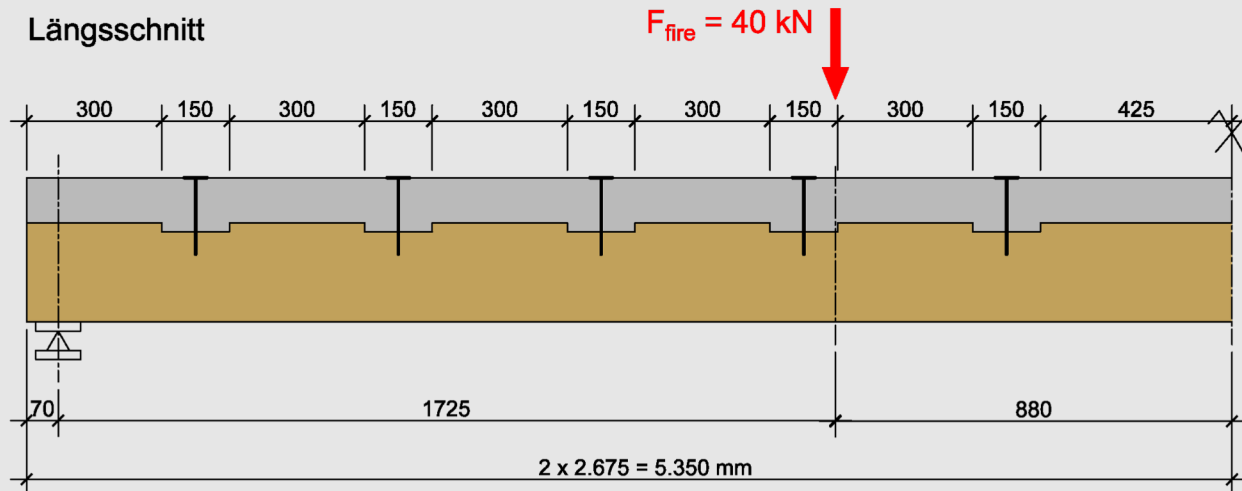
Für diese Konfiguration sind – einige wenige – Ergebnisse von Prüfungen veröffentlicht. Es besteht die Vermutung, dass die Festlegungen im Draft EN 1995-1-2:2023 auf dieser Konfiguration beruhen!

→ A. Frangi „**Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken**“,
Institut für Baustatik und Konstruktion, Dissertation, ETH Zürich, 2001

Es werden durchgeführte Brandprüfungen (je 1 PK) an HBV-“Rippenquerschnitten“ (mit Holzschalung) unter Last mit

- Kernen ($t_n = 20$ mm, $l_n = 150$ mm, $e = 450$ mm) mit Hilti-Dübeln (eingeklebte Gewindestange mit Vorspannung)
- SFS-HBV-Verbundschrauben VB-48-7.5x100

- Die Prüfung wurde nach rund **63 Minuten** ISO-Normbrand abgebrochen; daher für $R \leq 60$ min. gültig



Verformungen der belasteten Decke

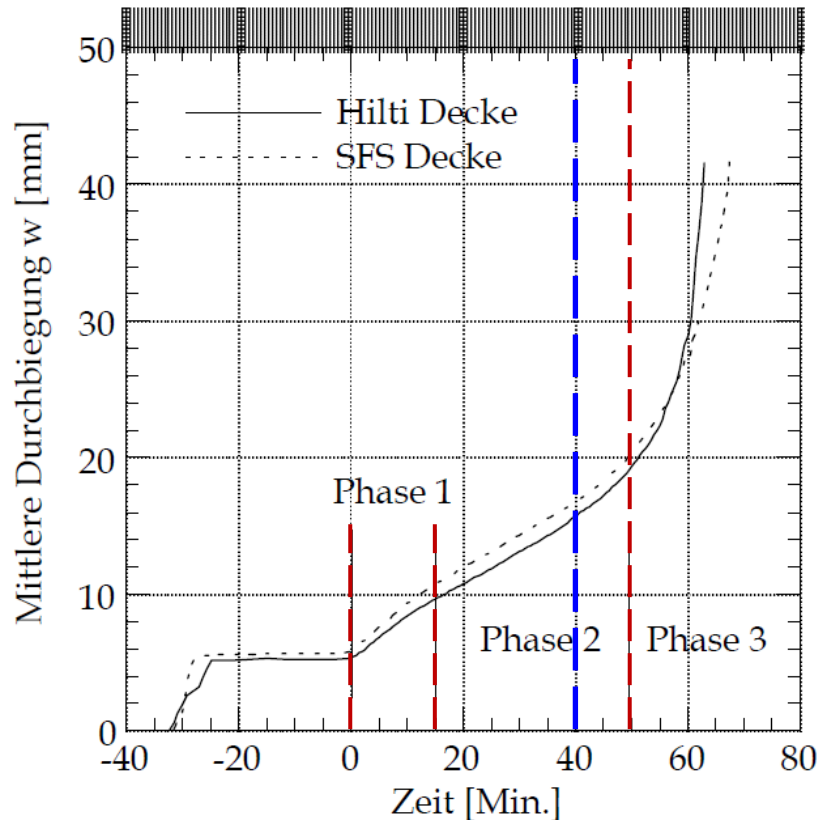


Abb. 14 - Während des Brandversuches gemessene Zunahme der Durchbiegung in der Deckenmitte

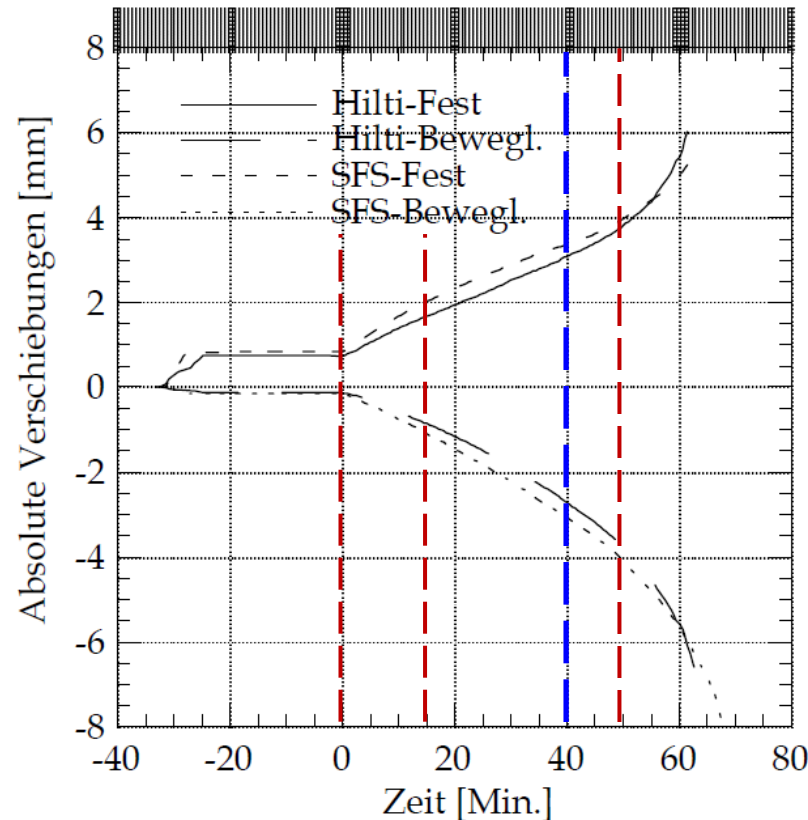


Abb. 15 - Während des Brandversuches gemessene absolute horizontale Verformungen bei den Auflagern

Quelle: M. Fontana „Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken“, ETH Zürich

Offensichtlich ist das Tragverhalten durch die temperaturveränderten Eigenschaften des Betons und der Verbundsteifigkeit – insbesondere bei höherer Branddauer – stark verändert.

Phasen Verformungen

Phase 0

Aufbringen der statischen Last

Phase 1

thermische Krümmung des **Holz**querschnittes

Phase 2

Einfluss Querschnittsverlust infolge Abbrand und temperaturbedingte **Reduktion der Holzsteifigkeit**

Phase 3

Einfluss der **thermischen Krümmung** der **Beton**platte und temp.-bedingte **Reduktion der Verbundsteifigkeit**

Temperaturverläufe im Beton und im Holz

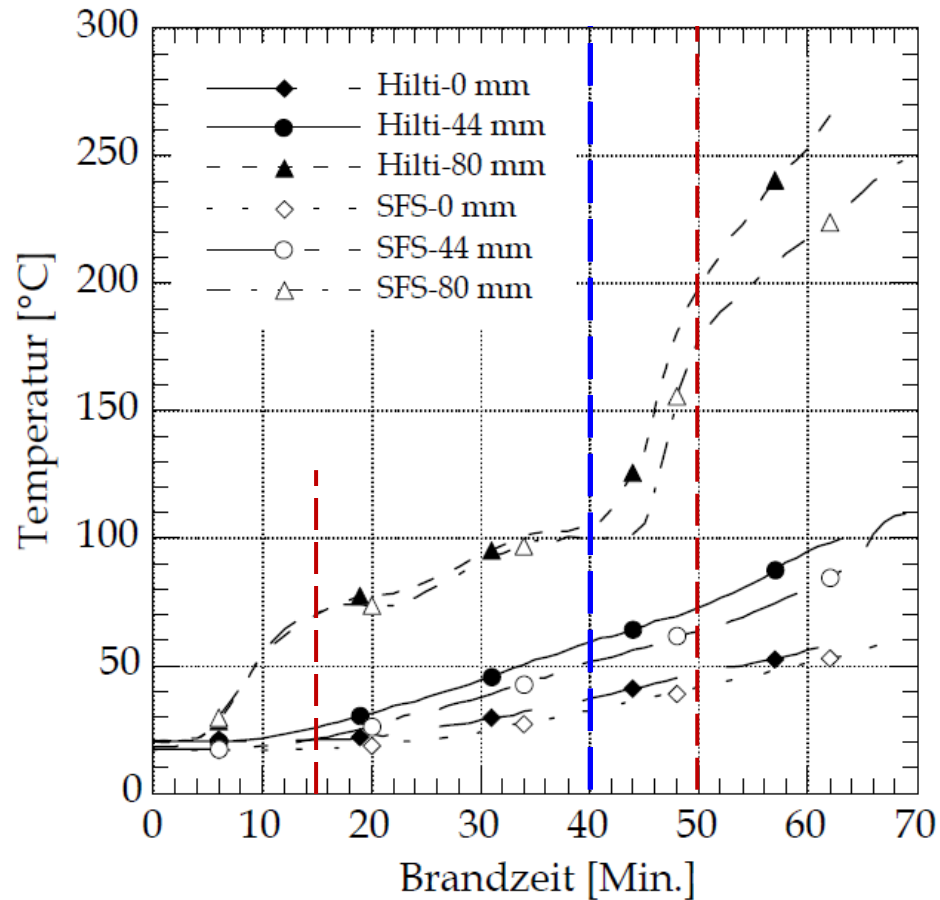


Abb. 22 - Gemessene mittlere Temperaturen in der Betonplatte bei unterschiedlichen Tiefen (0 mm = Oberfläche der Betonplatte)

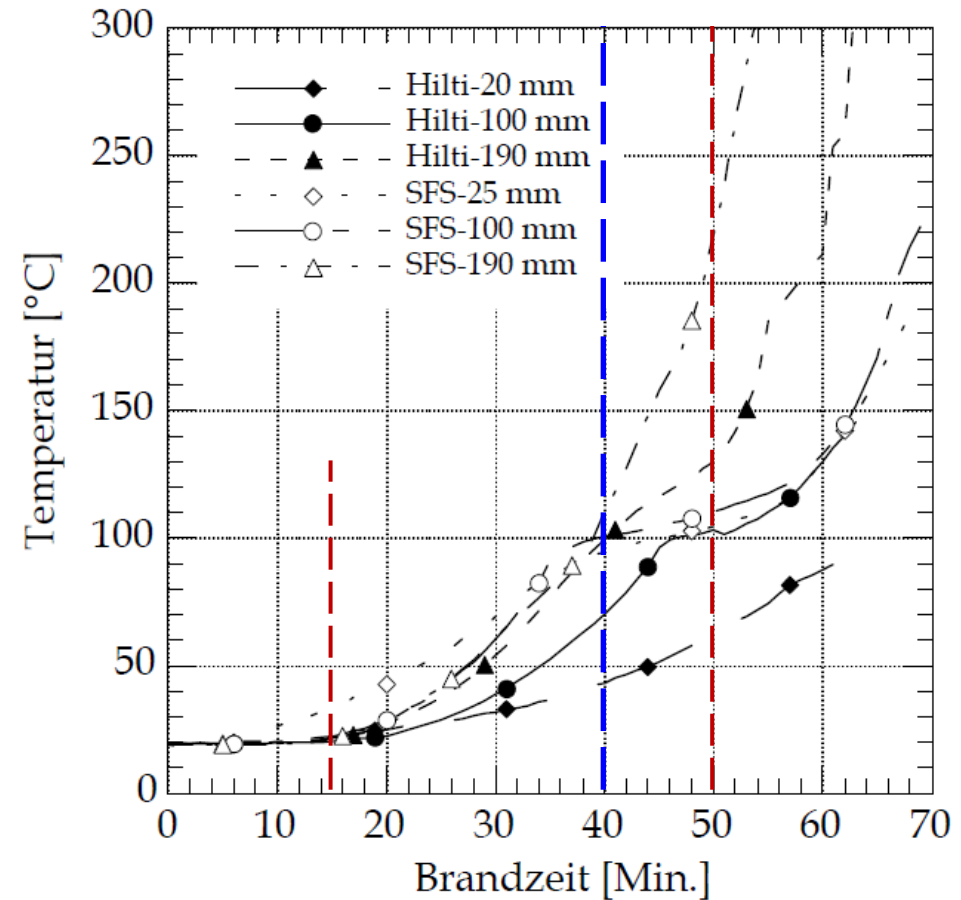
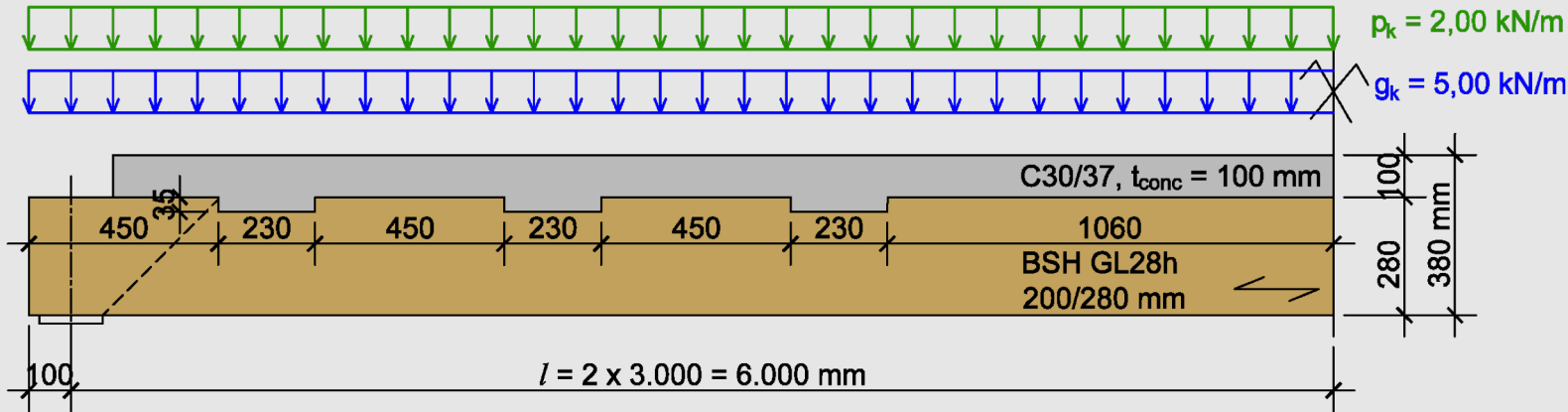


Abb. 23 - Gemessene mittlere Temperaturen im Holz-QS bei unterschiedlichen Tiefen (0 mm = Oberkante der Holzbalken)

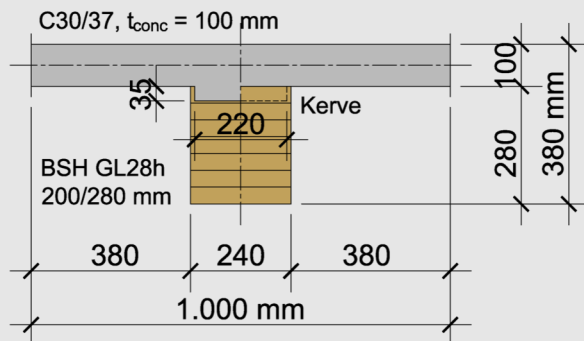
Quelle: A. Frangi „Brandverhalten von Holz-Beton-Verbund Decken“, ETH Zürich, 2001

exemplarisches Rechenbeispiel

Längsschnitt



Querschnitt



Aufgabenstellung

Nachweisführung des Holz-Beton-
Verbund Bauteils für eine
Feuerwiderstandsdauer R 90

Baustoffe/Verbindung

Holz

BSH GL 28h $b/h = 240/280$ mm

NK I, $k_{def} = 0,60$

Abbrandrate $\beta = 0,65$ mm/min

Beton

C 30/37, $b_{conc}/t_{conc} = 1.000/100$ mm

$\phi_0 = 3,00$, $\epsilon_{cs} = 0,45\text{‰}$

Kerven

$b_n/t_n = 220/35$ mm, $l_n = 230$ mm,

$l_a = 450$ mm

Einwirkungen

Eigengewicht

$g_{1,k} = 2,50 \cdot 1,00 + 0,50 = 3,00$ kN/m

Fußbodenaufbau

$g_{2,k} = 2,00 \cdot 1,00 = 2,00$ kN/m

Nutzlast

$p_k = 2,00 \cdot 1,00 = 2,00$ kN/m

Kombinationsbeiwert Brand $\psi_2 = 0,30$

Allgemeine Grundlagen

Einheitstemperaturbrandkurve

$$\theta_G = 20 + 345 \cdot \log_{10} \cdot (8 \cdot t + 1)$$

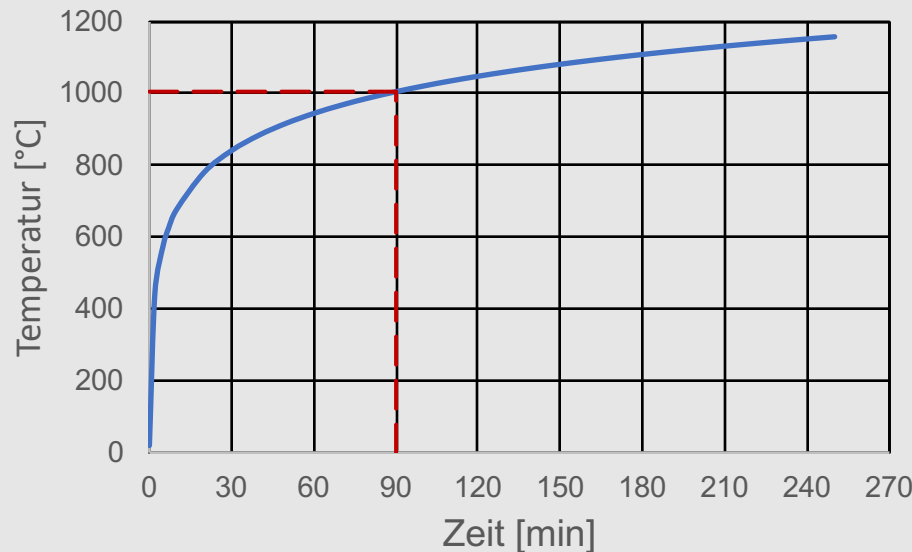
Dabei sind:

θ_G ... Gastemperatur [°C]

t ... Branddauer [min]

z. B. für eine Branddauer von 90 min.

$$\theta_G = 20 + 345 \cdot \log_{10} \cdot (8 \cdot 90 + 1) = 1.006 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Welche „Dehnungsanteile“ sind zu berücksichtigen?

Die Gesamtdehnung ε setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen (Glg. (4.15) in EN 1992-1-2):

$$\varepsilon = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_{tr}$$

Dabei ist:

ε_{σ} ... spannungsabhängige Dehnung;

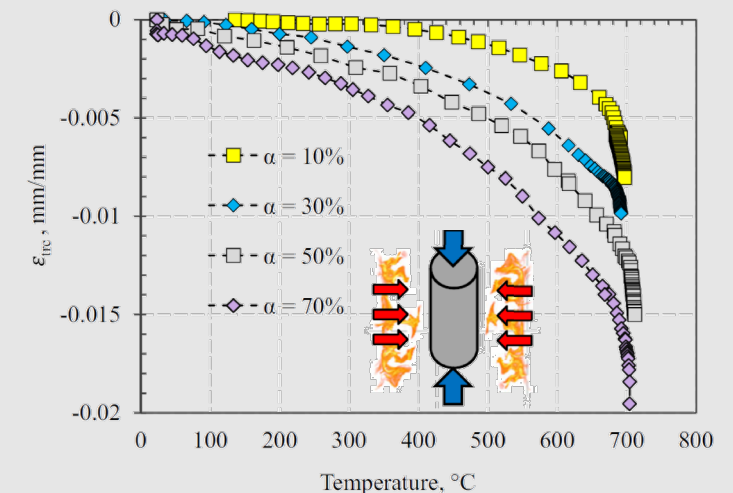
ε_{th} ... thermische Dehnung;

ε_{creep} ... Kriechdehnung (zeitabhängige Dehnung bei konstanter Temperatur und Spannung → wird im Brandfall vernachlässigt)

ε_{tr} ... Kurzzeitdehnung (→ transiente Dehnung)

transiente Dehnung

variieren Temperatur und Spannung verändert sich auch die Dehnung.



(b) Transient creep strain in concrete as a function of temperature at various stress level

Eigenschaften Holz

Anmerkung:

Der Großteil der nachfolgenden Ausführungen bezieht sich auf
J. Schänzlin, „Holz-Beton-Verbund“, Hochschule Biberach, 2023

Temperaturverteilung

- für dreiseitige Abbrandbeanspruchung (A. Frangi, 2001)

$$\alpha = 0,025 \cdot t + 1,75$$

$$\theta_m = \int_{\beta \cdot t}^{b/2} \int_{\beta \cdot t}^h \left(20 + 280 \cdot (\beta \cdot t)^\alpha \cdot \left(x^{-\alpha} + (b-x)^{-\alpha} + y^{-\alpha} \right) \right) \cdot dx \cdot dy =$$

$$= 20 + 280 \cdot (\beta \cdot t)^\alpha \cdot \left(\frac{(b/2)^{1-\alpha} - (\beta \cdot t)^{1-\alpha}}{(1-\alpha) \cdot (b/2 - \beta \cdot t)} + \frac{(b/2)^{1-\alpha} - (b - \beta \cdot t)^{1-\alpha}}{(\alpha - 1) \cdot (b/2 - \beta \cdot t)} + \frac{h^{1-\alpha} - (\beta \cdot t)^{1-\alpha}}{(1-\alpha) \cdot (h - \beta \cdot t)} \right)$$

Anmerkung:

Abbrandgrenze bei A. Frangi: 200°C | hier Anpassung auf 300°C

Längenausdehnung

$$\Delta \varepsilon_{T,Holz} = \alpha_{T,Holz} \cdot \Delta \theta_m$$

Schwinden des Holzes infolge Trocknen

Infolge der Brandbeanspruchung trocknet der Holzquerschnitt aus; der Feuchtetransport läuft allerdings sehr langsam ab und kann für den Brandnachweis vernachlässigt werden

Dabei ist:

θ_m ... mittlere Temperatur im
 Restquerschnitt [°C]

T ... Branddauer [min]

b ... Abbrandrate [mm/min]

b ... Breite des Querschnitts [mm]

h ... Höhe des Querschnitts [mm]

Dabei ist:

$\Delta \varepsilon_{T,Holz}$... Dehnung des Holzes infolge
 Temperaturänderung [-]

$\alpha_{T,Holz}$... Temperatenausdehnungs-
 koeffizient des Holzes [1/°C]
 = $5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

θ_m ... mittlere Temperatur im
 Restquerschnitt [°C]

Eigenschaften Holz

Beispiel

BSH-Querschnitt 240/280 mm für Feuerwiderstandsdauer R90

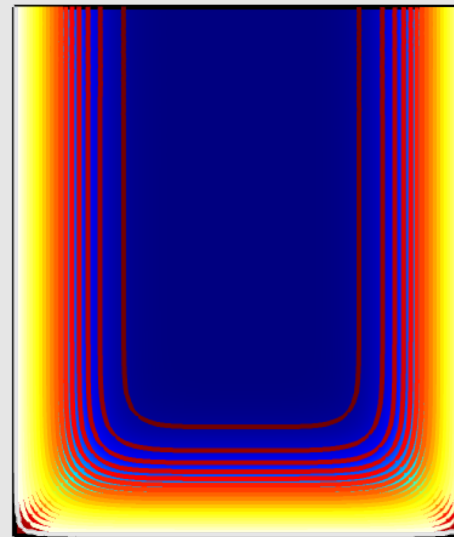
mittlere Temperatur des Restquerschnitts

$$\alpha = 0,025 \cdot 90 + 1,75 = 4,00$$

$$\theta_m = 20 + 280 \cdot (0,65 \cdot 90)^{4,00}$$

$$\left(\frac{(240/2)^{1-4,00} - (0,65 \cdot 90)^{1-4,00}}{(1-4,00) \cdot (240/2 - 0,65 \cdot 90)} + \frac{(240/2)^{1-4,00} - (240 - 0,65 \cdot 90)^{1-4,00}}{(4,00 - 1) \cdot (240/2 - 0,65 \cdot 90)} + \frac{280^{1-4,00} - (0,65 \cdot 90)^{1-4,00}}{(1-4,00) \cdot (280 - 0,65 \cdot 90)} \right) = 130^\circ\text{C}$$

Bild qualitativ



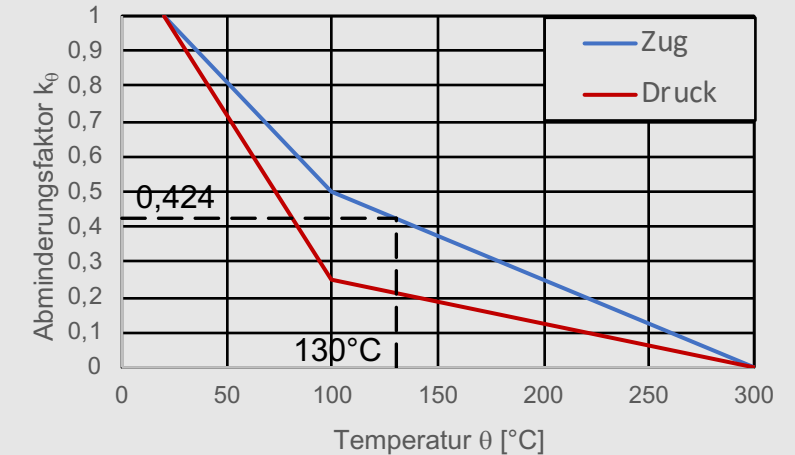
mittlere Temperatureausdehnung Holzquerschnitt

$$\Delta \varepsilon_{T, \text{Holz}} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot (130 - 20) = 0,000550 = 0,550\%$$

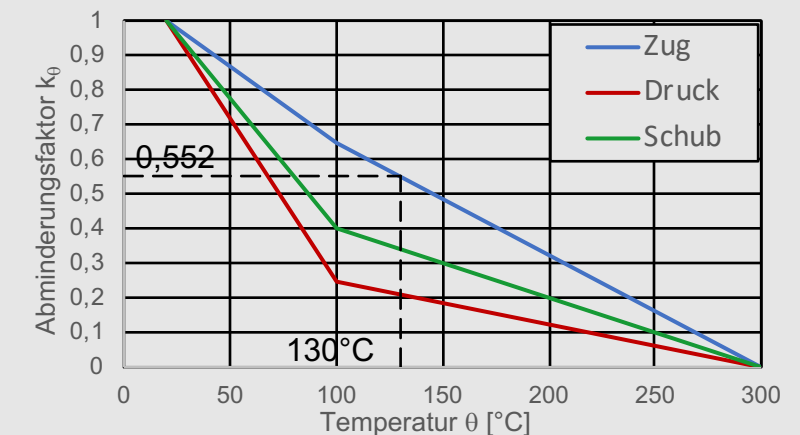
$$\left(\frac{du}{dx} = \varepsilon \rightarrow \Delta u = \varepsilon \cdot \frac{l}{2} = 0,000550 \cdot \frac{6.000}{2} = 1,65 \text{ mm} \right)$$

Physikalische Eigenschaften des Holzes bei erhöhter Temperatur

Einfluss der Temperatur auf die E-Moduln für NH parallel zur Faser



Einfluss der Temperatur auf die Festigkeit für NH parallel zur Faser



Steifigkeiten Holz

wirksamer Restquerschnitt nach Draft EN 1995-1-2

$$A: \quad \beta_n = 1,3 \cdot k_n \cdot \beta_0 = 1,3 \cdot 1,00 \cdot 0,65 = 0,845$$

$$B: \quad \beta_n = 1,1 \cdot k_n \cdot \beta_0 = 1,1 \cdot 1,00 \cdot 0,65 = 0,715$$

$$\text{Biegung dominant: } d_0 = 10,0 \text{ mm}$$

$$b_{fi} = b - 2 \cdot (\beta_n \cdot t + d_0) = 240 - 2 \cdot (0,715 \cdot 90 + 10,0) = \mathbf{91,3 \text{ mm}}$$

$$h_{fi} = h - (\beta_n \cdot t + d_0) = 280 - (0,845 \cdot 90 + 10,0) = \mathbf{194 \text{ mm}}$$

$$A_{fi} = b_{fi} \cdot h_{fi} = 91,3 \cdot 194 = 17.712 \text{ mm}^2$$

$$I_{fi} = \frac{b_{fi} \cdot h_{fi}^3}{12} = \frac{91,3 \cdot 194^3}{12} = 5,56 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$E_{0,mean} = 12.600 \text{ N / mm}^2$$

Anmerkung:
Auf eine Berücksichtigung der Erhöhung des E-Moduls im Brandfall wurde verzichtet!

$$(E \cdot A)_{fi} = 12.600 \cdot 17.712 = \mathbf{2,23 \cdot 10^8 \text{ Nmm}^2}$$

$$(E \cdot I)_{fi} = 12.600 \cdot 5,56 \cdot 10^7 = \mathbf{7,01 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2}$$

verminderte Eigenschaften nach Draft EN 1995-1-2

vereinfacht mit Restquerschnitt (siehe Frangi);

→ korrekt: thermische Analyse mit 300°C Grenze

$$b_{fi} = b - 2 \cdot \beta_n \cdot t = 240 - 2 \cdot 0,715 \cdot 90 = \mathbf{111 \text{ mm}}$$

$$h_{fi} = h - \beta_n \cdot t = 280 - 0,845 \cdot 90 = \mathbf{204 \text{ mm}}$$

$$A_{fi} = b_{fi} \cdot h_{fi} = 111 \cdot 204 = 22.644 \text{ mm}^2$$

$$I_{fi} = \frac{b_{fi} \cdot h_{fi}^3}{12} = \frac{111 \cdot 204^3}{12} = 7,85 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$E_{0,mean} = E(20^\circ\text{C}) = 12.600 \text{ N / mm}^2$$

$$\theta = 130^\circ\text{C} \rightarrow E(\theta) / E(20) = 0,424$$

$$E(130^\circ\text{C}) = 0,424 \cdot 12.600 = \mathbf{5.342 \text{ N / mm}^2}$$

$$(E \cdot A)_{fi} = 5.342 \cdot 22.644 = \mathbf{1,21 \cdot 10^8 \text{ Nmm}^2} \text{ (54,3\%)}$$

$$(E \cdot I)_{fi} = 5.342 \cdot 7,85 \cdot 10^7 = \mathbf{4,19 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2} \text{ (59,8\%)}$$

Eigenschaften Beton

Temperaturverteilung (aus Schänzlin „Holz-Beton-Verbund“, HS Biberach)
für eine einseitige Beflammung (eindimensional)

$$\theta(x) = a \cdot \tanh yp(b \cdot x + c) + d$$

z. B. für R90 in 30 mm Tiefe:

$$\theta(30 \text{ mm}) = 1.234,82 \cdot \tanh yp(-0,0152 \cdot 30,0 + (-0,2882)) + 1.288,94 = 509^\circ\text{C}$$

Parameter zur Ermittlung der Temperaturverteilung

	a	b	c	d
R30	948,13	-0,0264	-0,2879	984,07
R60	1.154,32	-0,0188	-0,3050	1.202,14
R90	1.234,82	-0,0152	-0,2882	1.288,94
R120	1.552,00	-0,0133	-0,4325	1.629,15
R180	1.625,39	-0,0114	-0,4093	1.717,62
R240	1.610,83	-0,0109	-0,4250	1.777,34

Temperaturausdehnung des Betons

- für quarzhaltige Zuschläge

$$\varepsilon(\theta) = \begin{cases} -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 2,3 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3 & \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta < 700^\circ\text{C} \\ 14 \cdot 10^{-3} & \text{für } 700^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases}$$

- mittlere Temperaturdehnung

- Schwerpunktlage

- Krümmung

$$\varepsilon_{m,\theta} = \frac{\int E(\theta) \cdot \varepsilon(\theta) \cdot dA}{\int E(\theta) \cdot dA}$$

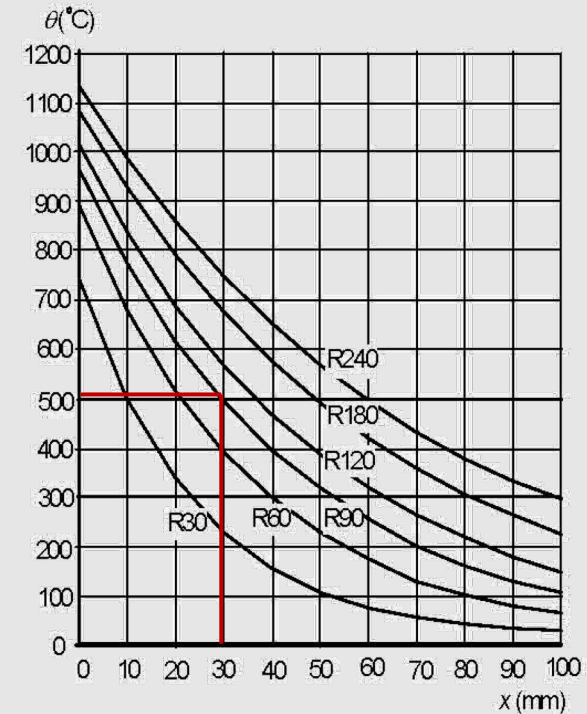
$$z_s = \frac{\int E(\theta) \cdot \varepsilon_{m,\theta} \cdot z \cdot dz}{\int E(\theta) \cdot \varepsilon_{m,\theta} \cdot dz}$$

$$\kappa = \frac{\int_{-z_s}^{h-z_s} E(\theta) \cdot \varepsilon_{m,\theta} \cdot z^2 \cdot dz}{\int_{-z_s}^{h-z_s} E(\theta) \cdot z^2 \cdot dz}$$

- für direkt beflammte Betonoberfläche $t_{\text{conc}} = 100 \text{ mm}$

→ EXCEL : $\varepsilon_{\text{mean},\theta} = 0,00244 = \mathbf{2,44\%}$ → EXCEL : $z_{s,\text{conc},fi} = \mathbf{71,2 \text{ mm}}$ (von unten; Zus tan d I)

Temperaturprofil für
einseitig brandbean-
spruchte Bauteile
(Dicke $h = 200 \text{ mm}$)
(aus ÖNORM EN
1992-1-2:2019)

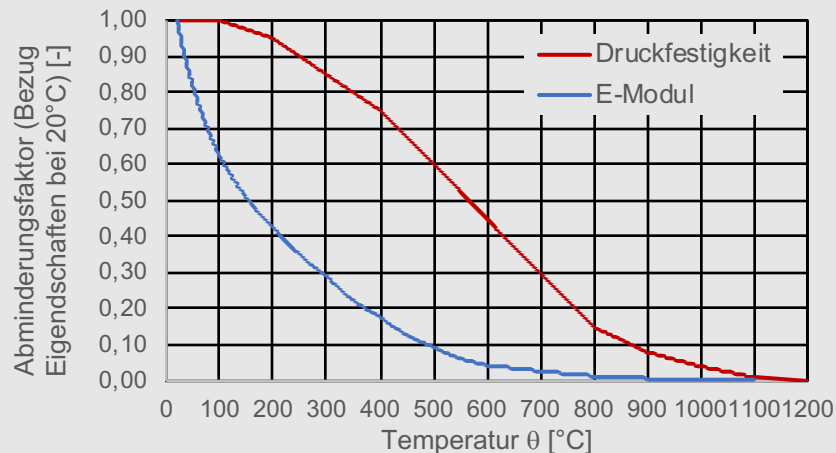


Mechanische Eigenschaften Beton bei erhöhter Temperatur

Gleichung zur Ermittlung des Beton E-Moduls in Abhängigkeit von der Temperatur

$$E(\theta) = \frac{\sigma(\theta)}{\varepsilon} = \frac{3 \cdot f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \cdot \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$$

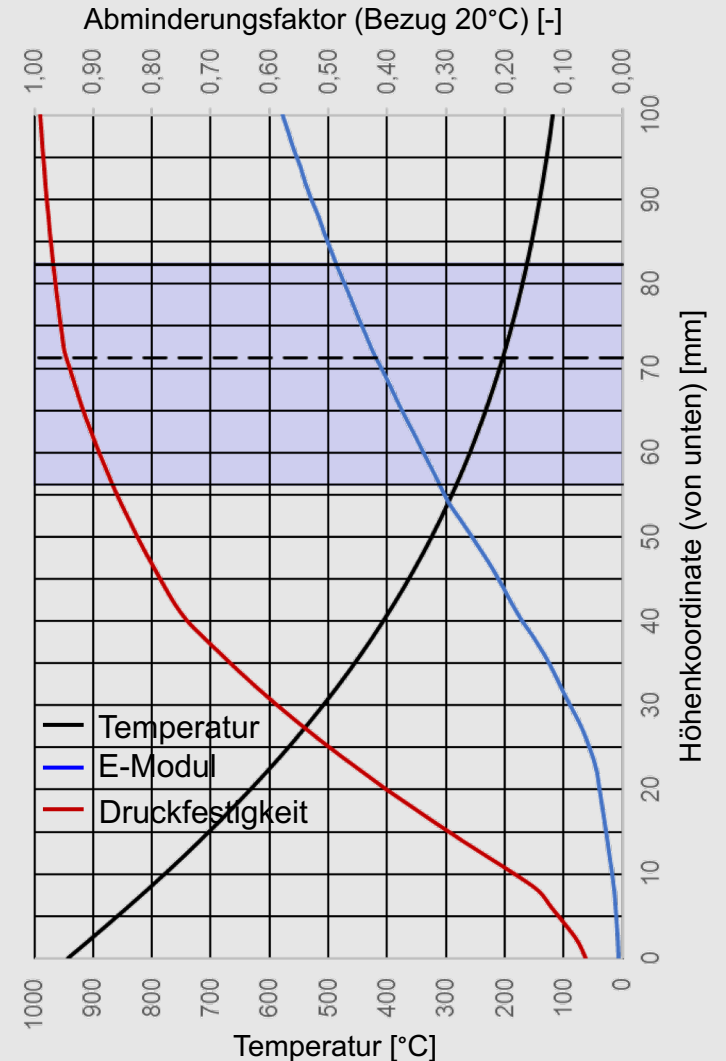
Verlauf des E-Moduls und der Druckfestigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur



angelehnt an J. Schänzlin,
„Holz-Beton-Verbund“, Hochschule Biberach

Temperatur	E(θ) / E(θ = 20°C)	f _c (θ) / f _{ck} (20°C)
	quarzhaltig	quarzhaltig
20	1	1
100	0,625	1
200	0,431	0,95
300	0,303	0,85
400	0,188	0,75
500	0,100	0,60
600	0,045	0,45
700	0,030	0,30
800	0,015	0,15
900	0,008	0,08
1.000	0,004	0,04
1.100	0,001	0,01
1.200	0	0

Verläufe über einen Betonquerschnitt (quarzh. Zuschläge) h = 100 mm für R90



Steifigkeiten Beton

Restquerschnitt nach EN 1992-1-2
500 °C Isotherme (für Zustand I)

$$b_{conc,fi} = b = 1.000 \text{ mm}$$

$$h_{conc,fi} = h - \approx x_{500^\circ C} = 100 - \approx 30,0 = \mathbf{70,0 \text{ mm}}$$

$$A_{conc,fi} = b_{conc,fi} \cdot h_{conc,fi} = 1.000 \cdot 70,0 = 70.000 \text{ mm}^2$$

$$I_{conc,fi} = \frac{b_{conc,fi} \cdot h_{conc,fi}^3}{12} = \frac{1.000 \cdot 70,0^3}{12} = 2,86 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$E_{conc} = 33.000 \text{ N / mm}^2$$

$$(E \cdot A)_{conc,fi} = 33.000 \cdot 70.000 = \mathbf{2,31 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2}$$

$$(E \cdot I)_{conc,fi} = 33.000 \cdot 2,86 \cdot 10^7 = \mathbf{9,44 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2}$$

verminderte Eigenschaften nach EN 1992-1-2

Integration der temperaturbeeinflussten E-Moduln über die Querschnittshöhe (berechnet für Zustand I)

$$h_{conc,fi} = \int E(\theta) \cdot dz \quad z_s = \frac{\int E(\theta) \cdot z \cdot dz}{\int E(\theta) \cdot dz}$$

$$b_{conc,fi} = b = 1.000 \text{ mm}$$

$$\rightarrow \text{EXCEL} : h_{conc,fi} = \mathbf{26,0 \text{ mm}}$$

$$\rightarrow \text{EXCEL} : z_{s,conc,fi} = \mathbf{71,2 \text{ mm (von unten)}}$$

$$\rightarrow \text{Temperatur in } z_s : \theta = \mathbf{204^\circ C} \mid \epsilon_{mean,\theta} = \mathbf{0,00244}$$

$$A_{conc,fi} = b_{conc,fi} \cdot h_{conc,fi} = 1.000 \cdot 26,0 = 26.000 \text{ mm}^2$$

$$\rightarrow \text{EXCEL} : I_{conc,fi} = 1,08 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$E_{conc} = E_{ref} = 33.000 \text{ N / mm}^2$$

$$(E \cdot A)_{fi} = 33.000 \cdot 26.000 = \mathbf{8,58 \cdot 10^8 \text{ Nmm}^2 (37,1\%)}$$

$$(E \cdot I)_{fi} = 33.000 \cdot 1,08 \cdot 10^7 = \mathbf{3,57 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 (37,8\%)}$$

$$\left(\frac{du}{dx} = \epsilon \rightarrow \Delta u = \epsilon \cdot \frac{l}{2} = 0,00244 \cdot \frac{6.000}{2} = \mathbf{7,32 \text{ mm}} \right)$$

Nachweisführung

Nachweisführung loser Verbund (mit wirksamen Restquerschnitt)

→ die gesamte Lastabtragung erfolgt über den Holzbauteil

wirksamer Restquerschnitt: $b_{fi} / h_{fi} = 91,3 / 194 \text{ mm}$

Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall

$$\begin{aligned} q_{fi,d} &= \gamma_{G,fi} \cdot g_k + \gamma_{Q,fi} \cdot \Psi_{2,1} \cdot p_k = \\ &= 1,00 \cdot (5,50 \cdot 0,111 \cdot 0,204 + (25,0 \cdot 0,10 + 2,00) \cdot 1,00) + 1,00 \cdot 0,30 \cdot 2,00 = 5,22 \text{ kN / m} \end{aligned}$$

$$M_{fi,d} = \frac{q_{fi,d} \cdot l^2}{8} = \frac{5,22 \cdot 6,00^2}{8} = 23,5 \text{ kNm}$$

Biegespannung im Brandfall

$$\begin{aligned} W_{fi} &= \frac{b_{fi} \cdot h_{fi}^2}{6} = \frac{91,3 \cdot 194^2}{6} = 5,73 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \\ \sigma_{fi,d} &= \frac{M_{fi,d}}{W_{fi}} = \frac{23,5 \cdot 10^6}{5,73 \cdot 10^5} = 41,0 \text{ N / mm}^2 \end{aligned}$$

Nachweisführung

$$\frac{\sigma_{fi,d}}{f_{m,g,fi,d}} = \frac{41,0}{32,2} = \mathbf{1,27 > 1,00}$$

Biegefestigkeit im Brandfall

$$\begin{aligned} f_{m,g,k} &= 28,0 \text{ N / mm}^2 \\ f_{m,g,fi,d} &= k_{fi} \cdot \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_{M,fi}} \cdot k_{mod,fi} = 1,15 \cdot \frac{28,0}{1,00} \cdot 1,00 = 32,2 \text{ N / mm}^2 \end{aligned}$$

Schnittgrößenverläufe Brandfall

mit Kervensteifigkeit „kalt“

zum Vergleich: mit abgeminderter Kervensteifigkeit im Brandfall ($\approx K_{ser}/3$)

Eigengewicht &
Nutzlast

$K_{ser,fi} = 1.500 \text{ kN/mm/m}$

$K_{ser,fi} \approx 500 \text{ kN/mm/m}$

Schnittgrößen Beton

$\max N_{conc,fi,d} = -109 \text{ kN}$ |

$\max M_{conc,fi,d} = -1,11 \text{ kNm}$

$\max N_{conc,fi,d} = -108 \text{ kN}$ |

$\max M_{conc,fi,d} = -1,05 \text{ kNm}$

Schnittgrößen Holz

$\max N_{conc,fi,d} = +109 \text{ kN}$

$\max M_{conc,fi,d} = +4,10 \text{ kNm}$

$\max N_{conc,fi,d} = +108 \text{ kN}$

$\max M_{conc,fi,d} = +4,36 \text{ kNm}$

Kraft 1. Kerne

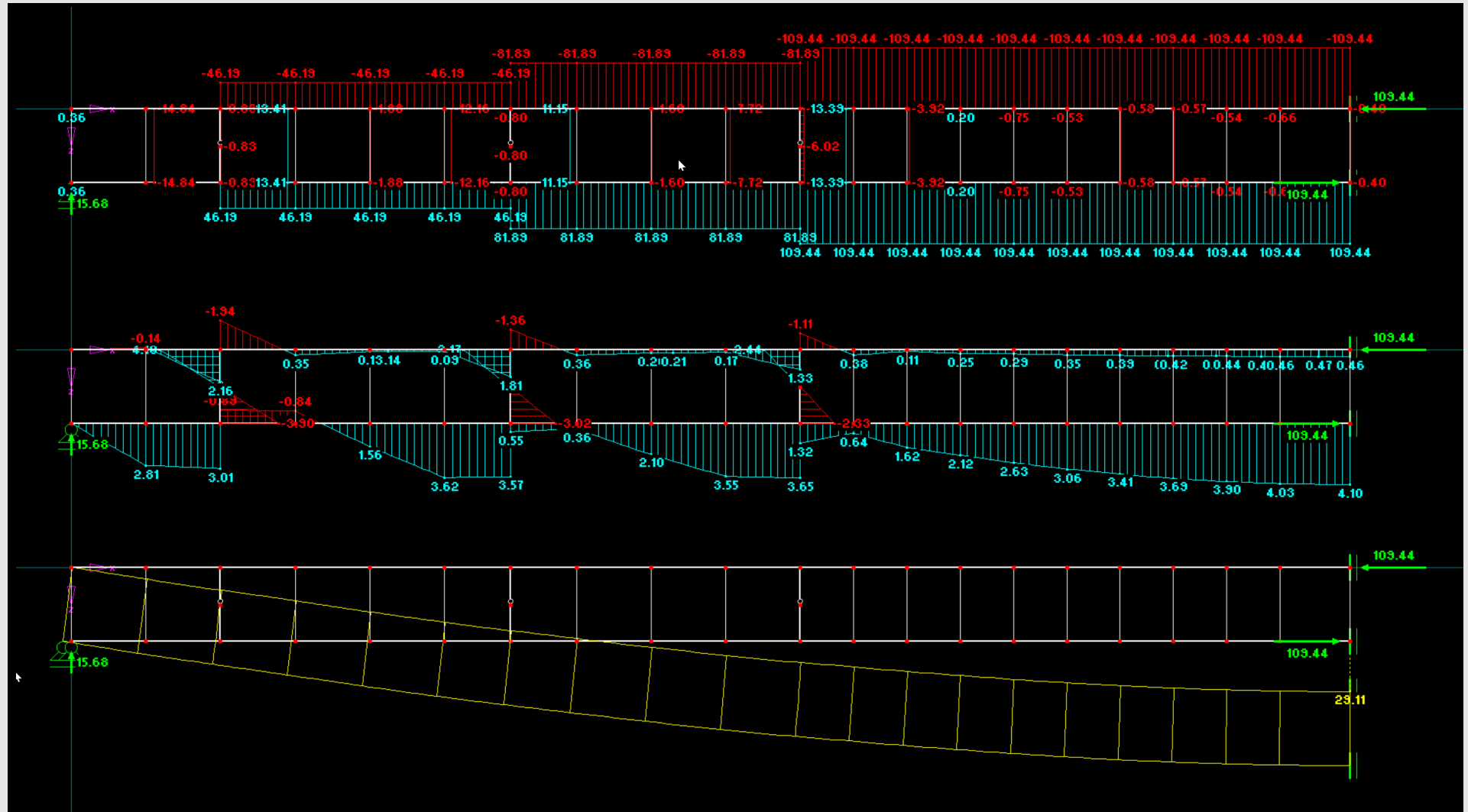
$\max N_{K1,fi,d} = 46,2 \text{ kN}$

$\max N_{K1,fi,d} = 45,2 \text{ kN}$

Durchbiegung

$\max w = 29,1 \text{ mm}$

$\max w = 31,6 \text{ mm}$



Schnittgrößen und Durchbiegung für $K_{ser} = 1.500 \text{ kN/mm/m}$

Schnittgrößenverläufe Brandfall

mit Kervensteifigkeit „kalt“

zum Vergleich: mit abgeminderter Kervensteifigkeit im Brandfall ($\approx K_{ser}/3$)

Temperatur-
ausdehnung

$$K_{ser,fi} = 1.500 \text{ kN/mm/m}$$

$$K_{ser,fi} \approx 500 \text{ kN/mm/m}$$

Schnittgrößen Beton

$$\max N_{conc,fi,d} = -24,3 \text{ kN}$$

$$\max M_{conc,fi,d} = -0,44 \text{ kNm}$$

$$\max N_{conc,fi,d} = -24,3 \text{ kN}$$

$$\max M_{conc,fi,d} = -0,44 \text{ kNm}$$

Schnittgrößen Holz

$$\max N_{conc,fi,d} = +24,3 \text{ kN}$$

$$\max M_{conc,fi,d} = -3,78 \text{ kNm}$$

$$\max N_{conc,fi,d} = +24,3 \text{ kN}$$

$$\max M_{conc,fi,d} = -3,77 \text{ kNm}$$

Kraft 1. Kerne

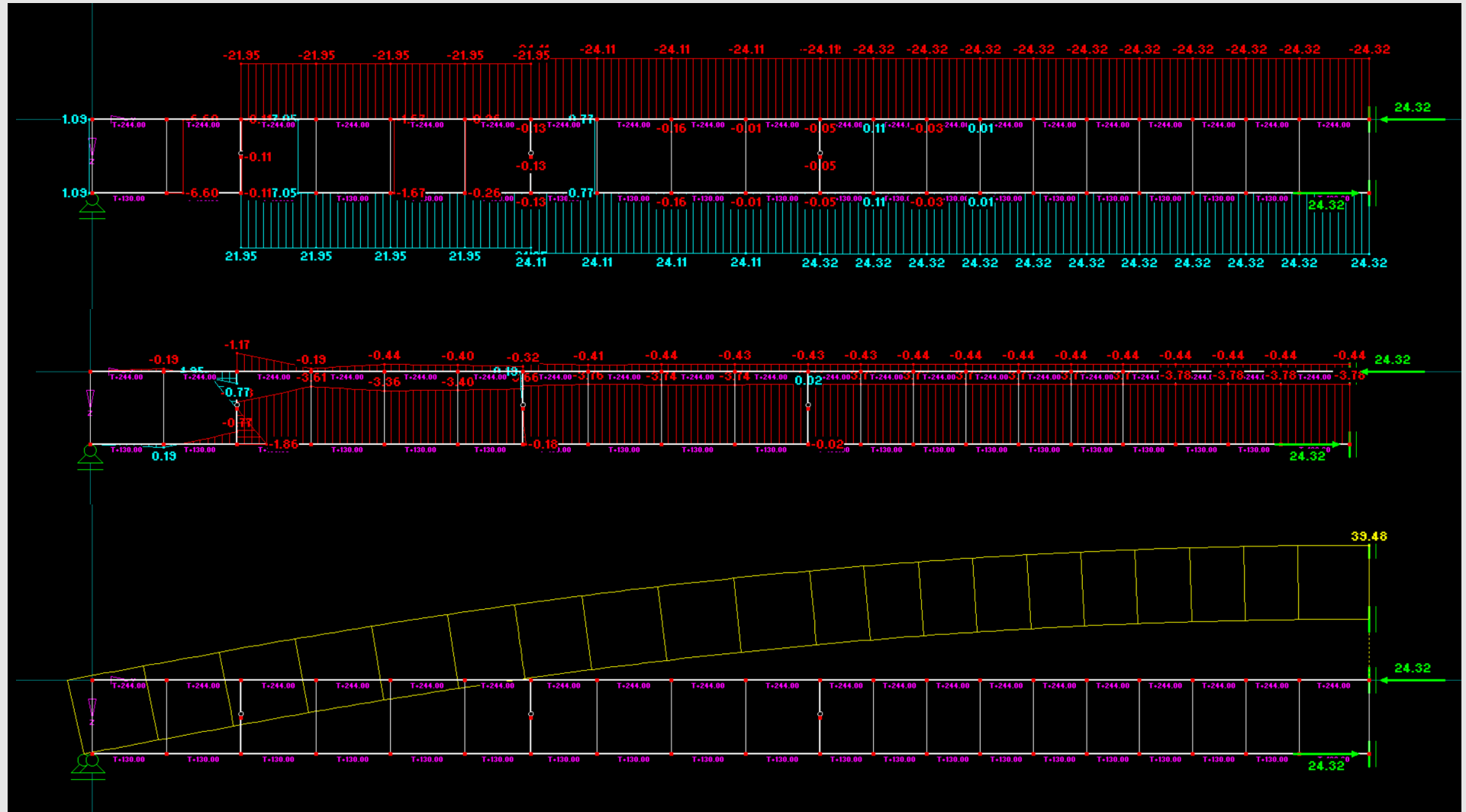
$$\max N_{K1,fi,d} = 22,0 \text{ kN}$$

$$\max N_{K1,fi,d} = 20,3 \text{ kN}$$

Durchbiegung

$$\max w = -39,5 \text{ mm}$$

$$\max w = 31,6 \text{ mm}$$



Schnittgrößen und Durchbiegung für $K_{ser} = 1.500 \text{ kN/mm/m}$

Schnittgrößenverläufe Brandfall

mit Kervensteifigkeit „kalt“

zum Vergleich: mit abgeminderter Kervensteifigkeit im Brandfall ($\approx K_{\text{ser}}/3$)

Summe

$$K_{ser,fi} = 1.500 \text{ kN/mm/m}$$

$$K_{ser,fi} \approx 500 \text{ kN/mm/m}$$

Schnittgrößen Beton

$$\max N_{\text{conc,fi,d}} = -134 \text{ kN} \mid$$

$$\max M_{\text{conc,fi,d}} = -1,56 \text{ kNm}$$

$$\max N_{\text{conc,fi,d}} = -132 \text{ kN} \mid$$

$$\max M_{\text{conc,fi,d}} = -1,51 \text{ kNm}$$

Schnittgrößen Holz

$$\max N_{\text{conc,fi,d}} = +134 \text{ kN}$$

$$\max M_{\text{conc,fi,d}} = -3,14 \text{ kNm}$$

$$\max N_{\text{conc,fi,d}} = +132 \text{ kN}$$

$$\max M_{\text{conc,fi,d}} = -2,86 \text{ kNm}$$

Kraft 1. Kerve

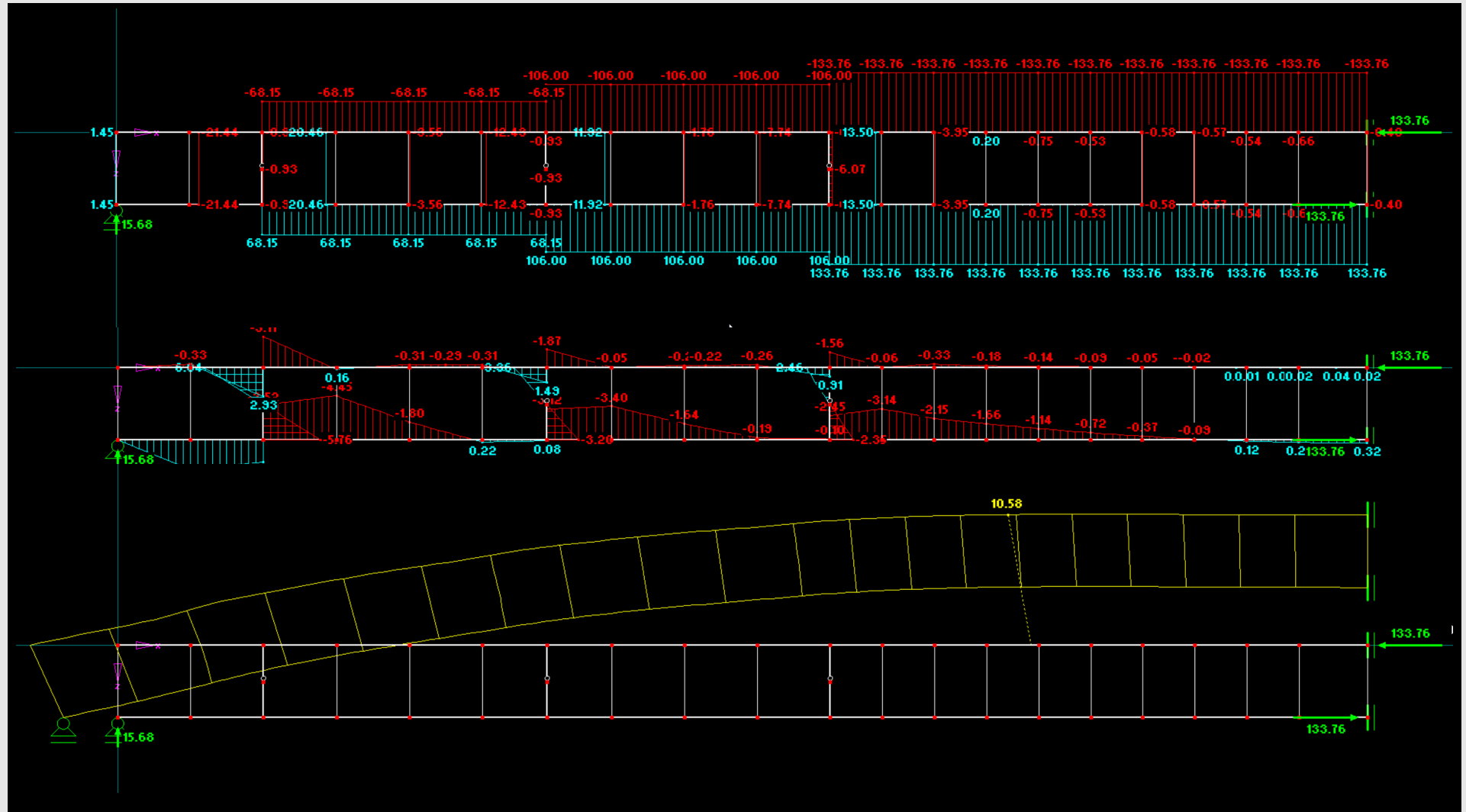
$$\max N_{K1,fi,d} = 68,2 \text{ kN}$$

$$\max N_{K1,fi,d} = 65,4 \text{ kN}$$

Durchbiegung

max w = -10,6 mm

max w = -7,91 mm



Schnittgrößen und Durchbiegung für $K_{ser} = 1.500 \text{ kN/mm/m}$

Nachweisführung Brand

Beton

C30/37

→ $E_c = 33.000 \text{ N/mm}^2$

→ $f_{ck} = 30,0 \text{ N/mm}^2$

$$N_{conc,fi,d} = -134 \text{ kN}$$
$$(E \cdot A)_{fi} = 8,58 \cdot 10^8 \text{ Nmm}^2$$
$$\sigma_{N,conc,fi,d} = E_{fi} \cdot \frac{N_{conc,fi,d}}{(E \cdot A)_{fi}}$$

$$M_{conc,fi,d} = -1,56 \text{ kNm}$$
$$(E \cdot I)_{fi} = 3,57 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$
$$\sigma_{N,conc,fi,d} = E_{fi} \cdot \frac{M_{conc,fi,d}}{(E \cdot I)_{fi}} \cdot z$$

$$\sigma_{N+M,conc,fi,d} = \sigma_{N,conc,fi,d} + \sigma_{M,conc,fi,d}$$

z	T	$k_{E(\theta)}$	$E(\theta)$	σ_N	σ_M	σ_{N+M}	$k_{fc(\theta)}$	$f_c(\theta)$	η
[mm]	[°C]	[-]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[N/mm²]	[-]
0	943	0,00581	192	-0,0300	-0,0597	-0,0897	0,0632	1,90	0,0472
30	509	0,0885	2.921	-0,456	-0,526	-0,982	0,588	17,6	0,0558
71,2	204	0,418	13.794	-2,15	0	-2,15	0,946	28,4	0,0757
100	119	0,577	19.041	-2,97	+2,40	-0,570	0,991	29,7	0,0192

Nachweisführung Brand

Holz

→ näherungsweise wird der Nachweis mit den Kenngrößen der über den Querschnitt gemittelten Temperatur $\theta_m \approx 130^\circ\text{C}$ und dem Holz-Restquerschnitt $b_{fi}/h_{fi} = 111/204 \text{ mm}$ durchgeführt

$$N_{tim,fi,d} = 134 \text{ kN} \quad M_{tim,fi,d} = -3,14 \text{ kNm}$$

$$\theta_m \approx 130^\circ\text{C} \rightarrow k_{E(\theta)} = E(\theta) / E(20) = 0,424$$

$$E_{0,mean} = E(20^\circ\text{C}) = 12.600 \text{ N/mm}^2 \quad E_{fi} = E(130^\circ\text{C}) = 0,424 \cdot 12.600 = 5.342 \text{ N/mm}^2$$

$$(E \cdot A)_{fi} = 1,21 \cdot 10^8 \text{ Nmm}^2$$

$$(E \cdot I)_{fi} = 4,19 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

$$\sigma_{N,tim,fi,d} = E_{fi} \cdot \frac{N_{conc,fi,d}}{(E \cdot A)_{fi}} = 5.342 \cdot \frac{134 \cdot 10^3}{1,21 \cdot 10^8} = 5,92 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{N+M,tim,fi,d|unten} = 5,92 - 4,08 = 1,84 \text{ N/mm}^2$$

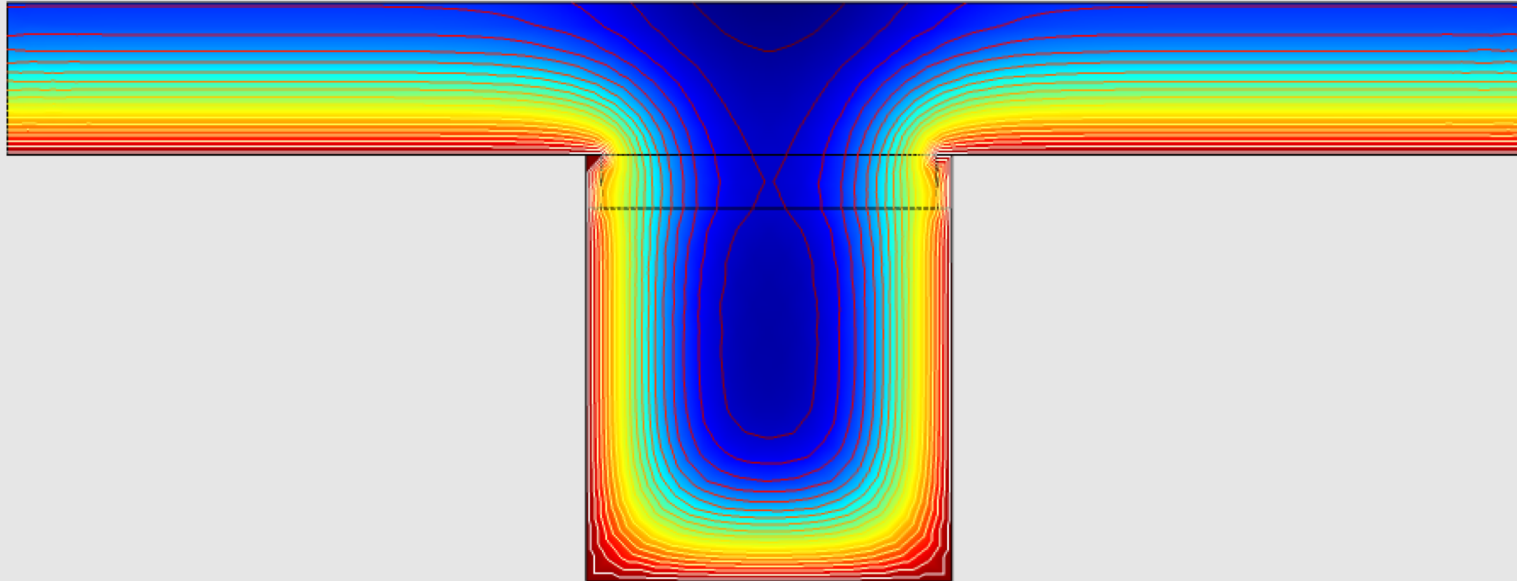
$$\sigma_{M,tim,fi,d} = E_{fi} \cdot \frac{M_{conc,fi,d}}{(E \cdot I)_{fi}} = 5.342 \cdot \frac{3,14 \cdot 10^6}{4,19 \cdot 10^{11}} \cdot 102 = 4,08 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{N+M,tim,fi,d|oben} = 5,92 + 4,08 = 10,0 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,g,fi,d} = AF \cdot \frac{f_{t,g,k} \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} \cdot k_{mod,fi} = 0,552 \cdot \frac{22,3 \cdot 1,15}{1,00} \cdot 1,00 = 14,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\sigma_{N+M,tim,fi,d}}{f_{t,g,fi,d}} = \frac{10,0}{14,2} = 0,70 < 1$$

Temperaturverlauf im Querschnitt (qualitativ ohne Wärmestrahlung)



- für das vorliegende Beispiel ist von einer näherungsweisen Temperaturverteilung im Bereich der Kerve wie im angrenzenden Holzbauteil auszugehen
- die mittlere Temperatur im Kervenbereich wird mit $\theta_m = 110^\circ\text{C}$ geschätzt
- eine detaillierte Ermittlung unter Berücksichtigung des Wärmestrahlungsanteils ist in Bearbeitung

Nachweisführung Brand

Kerve

$$N_{K1,fi,d} = 68,2 \text{ kNm}$$

$$\text{Annahme: } \theta_m \approx 110^\circ\text{C} \rightarrow k_{fc(\theta)} = 0,995$$

$$f_{c,f(\theta)} = k_{fc(\theta)} \cdot f_{ck} \approx 0,995 \cdot 30,0 \approx 29,9 \text{ N / mm}^2$$

(a) Schubversagen Beton

angenommene Druckstrebenneigung : $\Theta = 10,0^\circ$

$$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{30,0}{250}\right) = 0,528$$

$$f_{fi,conc,vcd} \approx k_{fc(\theta)} \cdot \frac{v \cdot f_{conc,c,fi,d}}{\cot \Theta + \tan \Theta} = 0,995 \cdot \frac{0,528 \cdot 30,0}{\cot(10,0) + \tan(10,0)} = 2,70 \text{ N / mm}^2$$

$$F_{fi,Rd;a} = f_{conc,vc,fi,d} \cdot b_n \cdot l_n = 2,70 \cdot 220 \cdot 230 = 136.620 \text{ N} = \mathbf{137 \text{ kN}}$$

(b) Druckversagen Beton (Stirnflächenpressung)

$$F_{fi,Rd;b} = f_{conc,c,fi,d} \cdot b_n \cdot h_n = 29,9 \cdot 111 \cdot 35 = 116.162 \text{ N} = \mathbf{116 \text{ kN}}$$

Nachweisführung Brand

Kerbe

$$N_{K1,fi,d} = 68,2 \text{ kNm}$$

$$\text{Annahme: } \theta_m \approx 110^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow k_{tim,v(\theta)} = 0,380$$

$$\rightarrow k_{tim,c(\theta)} = 0,238$$

(c) Schubversagen Holz

$$f_{v,g,fi,d} = AF \cdot \frac{f_{v,g,k} \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} \cdot k_{mod,fi} = 0,380 \cdot \frac{3,50 \cdot 1,15}{1,00} \cdot 1,00 = 1,53 \text{ N / mm}^2$$

$$l_{v,a,calc} \leq 8 \cdot h_n = 8 \cdot 35,0 = 280 \text{ mm} < \min l_{v,a} = 450 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,fi;c} = k_{cr} \cdot f_{v,g,fi,d} \cdot b_{fi} \cdot l_{v,a,calc} = 1,00 \cdot 1,53 \cdot 111 \cdot 280 = 47.552 \text{ N} = \mathbf{47,6 \text{ kN}}$$

Nachweis Kerbe

$$F_{Rd,fi} = \min \begin{cases} F_{Rd,fi;a} \\ F_{Rd,fi;b} \\ F_{Rd,fi;c} \\ F_{Rd,fi;d} \end{cases} = \min \begin{cases} 137 \\ 116 \\ 47,6 \\ 29,8 \end{cases} = 29,8 \text{ kN}$$

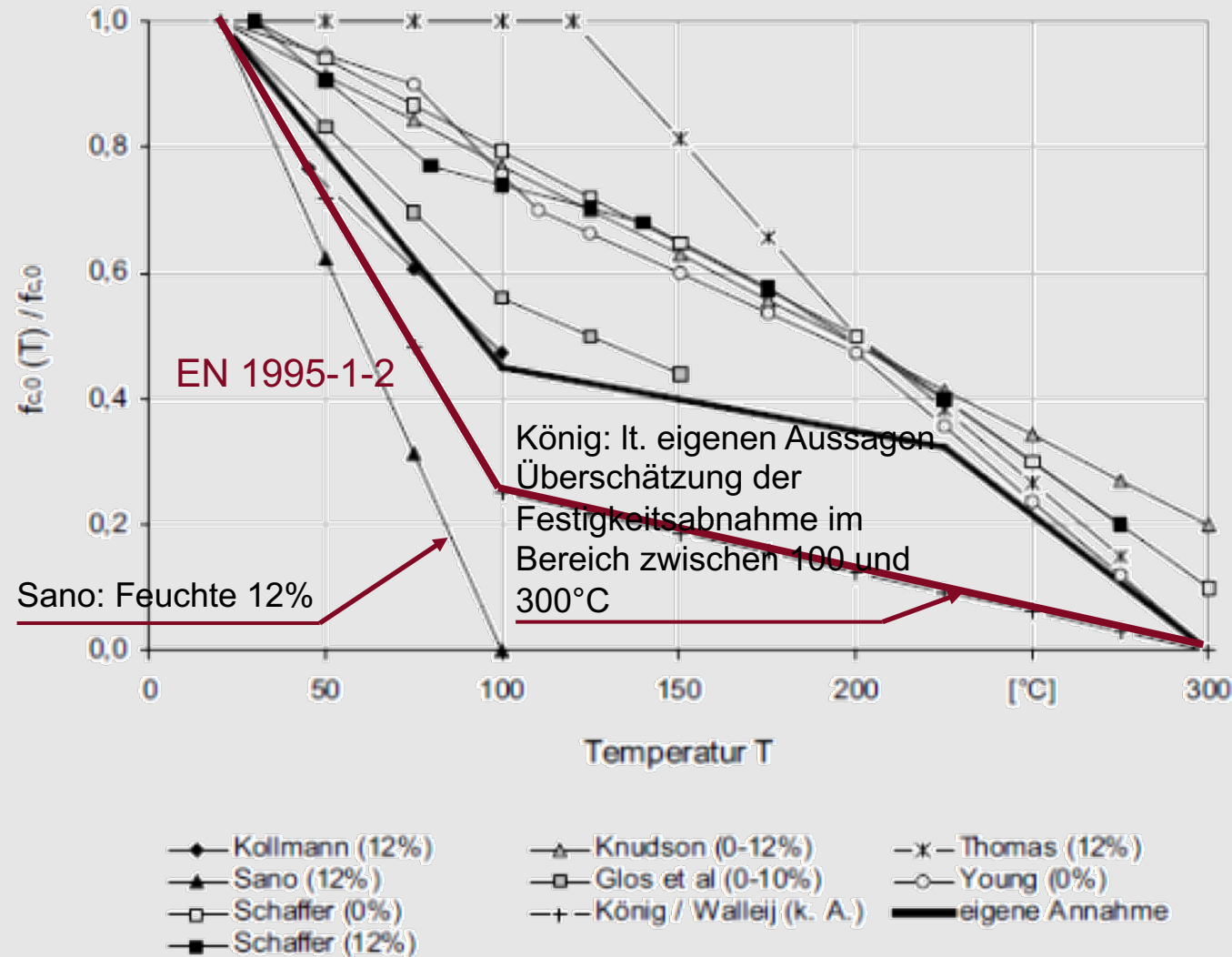
(d) Druckversagen Holz (Stirnholzpressung)

$$f_{c,g,fi,d} = AF \cdot \frac{f_{c,g,k} \cdot k_{fi}}{\gamma_{M,fi}} \cdot k_{mod,fi} = 0,238 \cdot \frac{28,0 \cdot 1,15}{1,00} \cdot 1,00 = 7,66 \text{ N / mm}^2$$

$$F_{Rd,fi;d} = f_{c,0,g,fi,d} \cdot b_{fi} \cdot h_n = 7,66 \cdot 111 \cdot 35,0 = 29.759 \text{ N} = \mathbf{29,8 \text{ kN}}$$

$$\frac{N_{K1,fi,d}}{F_{Rd,fi}} = \frac{68,2}{29,8} = \mathbf{2,29 > 1}$$

mechanische Eigenschaften von Holz bei erhöhter Temperatur - Druckfestigkeit



Quelle:
M. Peter
„Numerische Tragfähigkeitsermittlung
von Holzbauteilen im Brandfall unter
Berücksichtigung des nichtlinearen
Materialverhaltens“,
Dissertation, TU Berlin, 2003

Laut Draft EN 1995-1-2:2023: Nachweisführung Kerve mit Holz-Restquerschnitt

Kerve

$$N_{K1,fi,d} = 68,2 \text{ kNm}$$

(c) Schubversagen Holz

$$f_{v,g,fi,d} = k_{fi} \cdot \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_{M,fi}} \cdot k_{mod,fi} = 1,15 \cdot \frac{3,50}{1,00} \cdot 1,00 = 4,03 \text{ N / mm}^2$$

$$l_{v,a,calc} \leq 8 \cdot h_n = 8 \cdot 35,0 = 280 \text{ mm} < \min l_{v,a} = 450 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,fi;c} = k_{cr} \cdot f_{v,g,fi,d} \cdot b_{fi} \cdot l_{v,a,calc} = 1,00 \cdot 4,03 \cdot 91,3 \cdot 280 = 103.023 \text{ N} = \mathbf{103 \text{ kN}}$$

(d) Druckversagen Holz (Stirnholzpressung)

$$f_{c,g,fi,d} = k_{fi} \cdot \frac{f_{c,g,k}}{\gamma_{M,fi}} \cdot k_{mod,fi} = 1,15 \cdot \frac{28,0}{1,00} \cdot 1,00 = 32,2 \text{ N / mm}^2$$

$$F_{Rd,fi;d} = f_{c,0,g,fi,d} \cdot b_{fi} \cdot h_n = 32,2 \cdot 91,3 \cdot 35,0 = 102.895 \text{ N} = \mathbf{103 \text{ kN}}$$

Nachweis Kerve

$$F_{Rd,fi} = \min \begin{cases} F_{Rd,fi;a} \\ F_{Rd,fi;b} \\ F_{Rd,fi;c} \\ F_{Rd,fi;d} \end{cases} = \min \begin{cases} 137 \\ 116 \\ 103 \\ 103 \end{cases} = 103 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{K1,fi,d}}{F_{Rd,fi}} = \frac{68,2}{103} = \mathbf{0,66 < 1}$$

Zusammenfassung

- Der Draft EN 1995-1-2:2023 enthält erstmals (allgemein gehaltene) normative Festlegungen für die Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen. Die Nachweisführung für stab- und flächenförmige **Holzbauteile** ist grundsätzlich nach **EN 1995-1-2**, jene der **Betonbauteile** nach **EN 1992-1-2** durchzuführen.
- Die Nachweisführung von **HBV-Decken mit flächenförmigem Holzbauteil** (auf der beflamnten Seite) kann, bei ausreichender „Überdeckung“ der Kerve, mit dem **wirksamen (Holz-) Restquerschnitt** und den mechanischen Kenngrößen des Betons und der Kerve im „Kaltzustand“ erfolgen.
- HBV-Decken mit **stabförmigen Holzbauteil** und **direkter Beflammung des Betonbauteils** erfordern eine **detaillierte thermische und mechanische Berechnung** unter Berücksichtigung der mechanischen Kenngrößen bei erhöhten Temperaturen. Die Auswirkungen **thermischer Längenänderungen** sind in der Nachweisführung des Verbundsystems zu **berücksichtigen**.
- Das Tragverhalten von **Kerven bei Brandbeanspruchung** erfordert **zusätzliche Untersuchungen**.
- Die Holzbauteile von **Rippenquerschnitten** sollten **gedrungen** sein und einen **ausreichenden seitlichen Randabstand** aufweisen.

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**



Kontakt

DI Manfred AUGUSTIN

holz.bau forschungs gmbh

Inffeldgasse 24

A-8010 Graz / Austria

+43 (0) 316 / 873 - 4604

manfred.augustin@tugraz.at

www.holzbauforschung.at

**Das Kompetenzzentrum
für Holzbau und Holztechnologie**
im Bautechnikzentrum
der Technischen Universität Graz