

Stützen aus Buchen-Brettschichtholz mit und ohne Stahlbewehrung

K. Sroka ^{1) 2)}, P. Palma ¹⁾, R. Steiger ¹⁾, T. Ehrhart ³⁾, A. Frangi ²⁾, T. Strahm ³⁾, E. Gehri ⁴⁾

¹⁾ Empa, Abt. 303 Ingenieur-Strukturen

²⁾ ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion

³⁾ Schnetzer Puskas Ingenieure

⁴⁾ neue Holzbau AG

⁵⁾ ETH Zürich, Prof. emeritus, Dr. h.c.

Inhaltsübersicht

- Anwendungspotential
- Versuche
- FE-Modell
- Parameterstudien
 - Stützen: Schlankheit, Querschnittsabmessungen, BSH-Festigkeitsklasse, Exzentrizität
 - Bewehrung: Anordnung, Bewehrungsgrad
- Bemessung mit dem Ersatzstabverfahren (EN 1995-1-1, SIA 265)
- Schlussfolgerungen

Anwendungspotential

Hochleistungsstützen: Buchen-BSH + Stahlarmierung



Fotos: René Steiger

■ Industriebau

Beispiel: Werkshalle Beer Holzbau

(Abplanalp 20, Beer Holzbau 2016 & 2017)

■ Mehrgeschossiger Hochbau

Verhindern extrem grosser Stützenquerschnitte

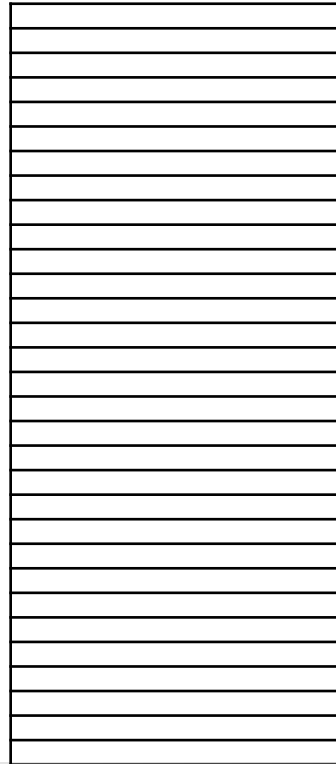
Potential: Gebäudehöhe

nur basierend auf
vertikalem Tragwiderstand
der Stützen

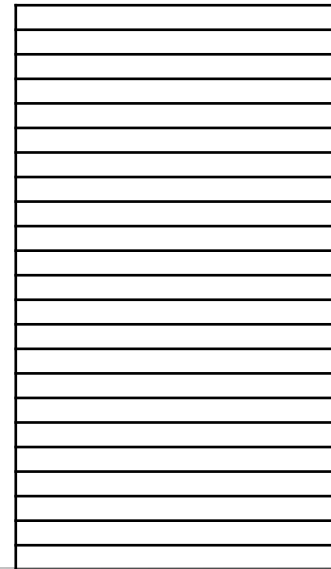
Annahmen:

- Wohnhaus, Holzgebäude mit Betonkern
- Horizontale Lasten: Betonkern (nicht berechnet)
- Stützenraster: 2.85 m x 4.00 m
- $A_{\text{Stütze}} = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, $L_{\text{eff}} = 2'400 \text{ mm}$
- Vertikale Lasten: SIA 260:2013, SIA 261:2014
- Tragwiderstand der Stützen: SIA 265:2012, EN 14080:2013, Ehrhart (2019)

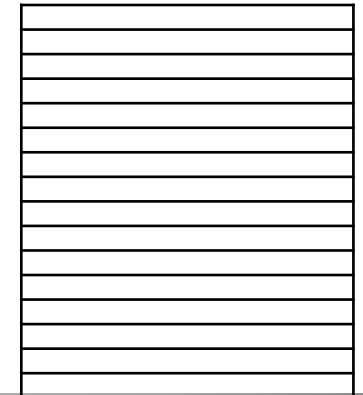
GL48h + 4 Ø20 mm
49 Geschosse



GL48h
36 Geschosse



GL32h
25 Geschosse



$$f_{c,0,k} = 50.0 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{c,0,05} = 14'400 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,0,k} = 32.0 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{c,0,05} = 11'800 \text{ N/mm}^2$$

Potential: Differenzielle Stauchung zum Betonkern

	GL24h	GL48h	GL55h + 4Ø20mm	C30/37
$E_{c,0,mean}$ [N/mm ²]	11'500	15'400	23'300	33'000
$\delta_{\text{Geschoss}} = \frac{NL}{EA}$ [mm]	2.09	1.56	1.03	0.73
$\delta_{20 \text{ Geschosse}}$ [mm]	41.7	31.2	20.6	14.5
δ_{diff} [mm]	+27.2	+16.6	+6.1	-
	100%	61.0%	22.4%	-

Annahmen:

- Holzgebäude mit Betonkern, 20 Geschosse
- $A_{\text{Stütze}} = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, $L = 2'400 \text{ mm}$
- Vertikale Last pro Stütze: $N = 400 \text{ kN}$
- Steifigkeiten: EN 14080:2013, Versuche (Steiger 2018, Ehrhart 2019), EN 1992-1-1:2004

Versuche

- Verhindern von Stahlfließen bevor der maximale Tragwiderstand des Holzquerschnittes erreicht wird:

$$\frac{f_y}{E_{\text{Stahl}}} > \frac{f_{c,0,k}}{E_{\text{BSH}}}$$

Gleiche Dehnungen!

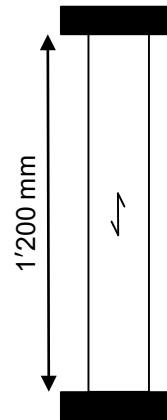
$$f_y > f_{c,0,k} \frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{BSH}}} = 62.5 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{210'000}{15'400} \approx 850 \text{ N/mm}^2$$

f_{c,0,k} und E_{BSH}: Ehrhart (2019)

- Wahl von Ankerstahlstäben ST900/1100 bzw. ST950/1050

Versuche an gedruckenen Stützen

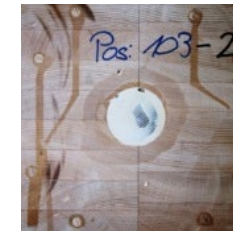
■ Druckfestigkeit (EN 408)



$$L_{\text{eff}} = 0.6 \cdot 1'200 \text{ mm} = 720 \text{ mm}$$



GL55h
Eckbewehrung
 $n = 3$

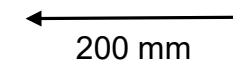


GL55h
zentrische Bew.
 $n = 3$



GL40h / GL48h /
GL55h
 $n = 7$

*(Versuche an unbewehrten
Stützen: Ehrhart 2019)*



200 mm

Versuche an gedruckenen Stützen

■ idealer Bewehrungsgrad?

Je 3 Prüfkörper

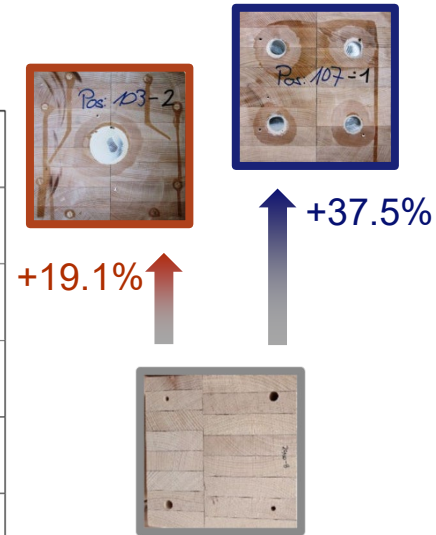
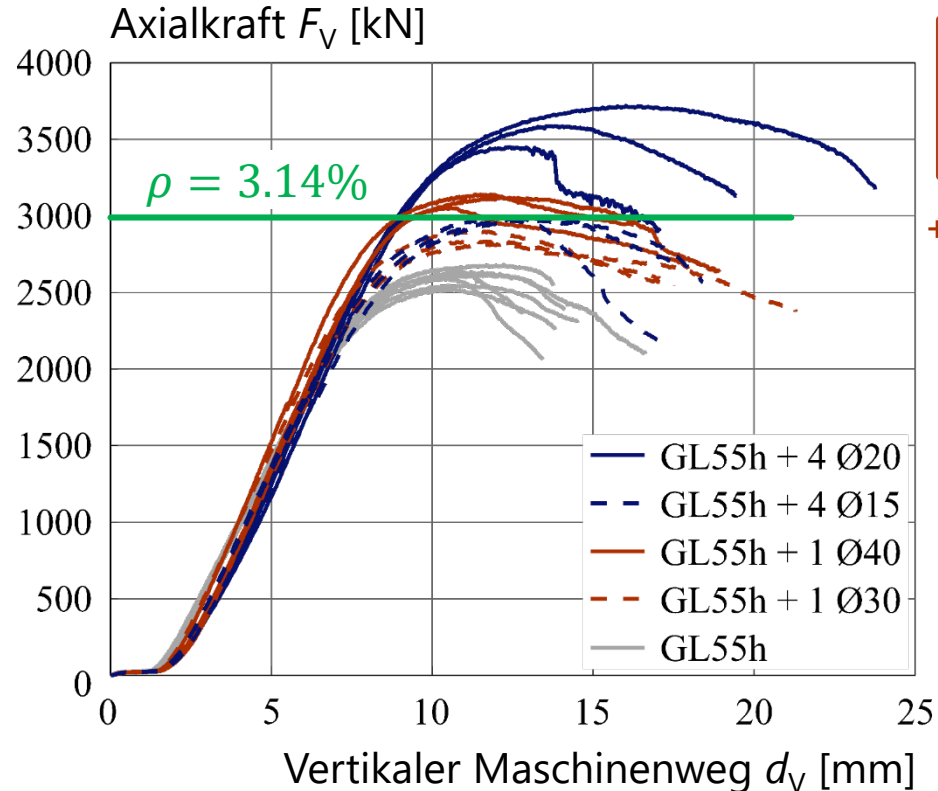


<p>1 x \varnothing 30 mm $A_{\text{Stahl}} = 707 \text{ mm}^2$ $\rho = 1.77\%$</p>	<p>4 x \varnothing 15 mm $A_{\text{Stahl}} = 707 \text{ mm}^2$ $\rho = 1.77\%$</p>	<p>1 x \varnothing 40 mm $A_{\text{Stahl}} = 1'257 \text{ mm}^2$ $\rho = 3.14\%$</p>	<p>4 x \varnothing 20 mm $A_{\text{Stahl}} = 1'257 \text{ mm}^2$ $\rho = 3.14\%$</p>

Versuche an gedruckenen Stützen

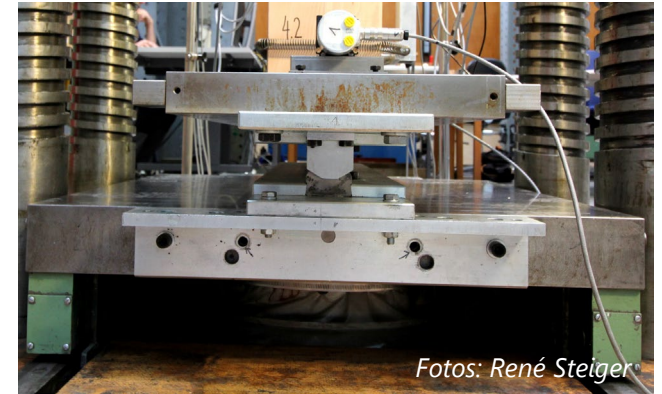
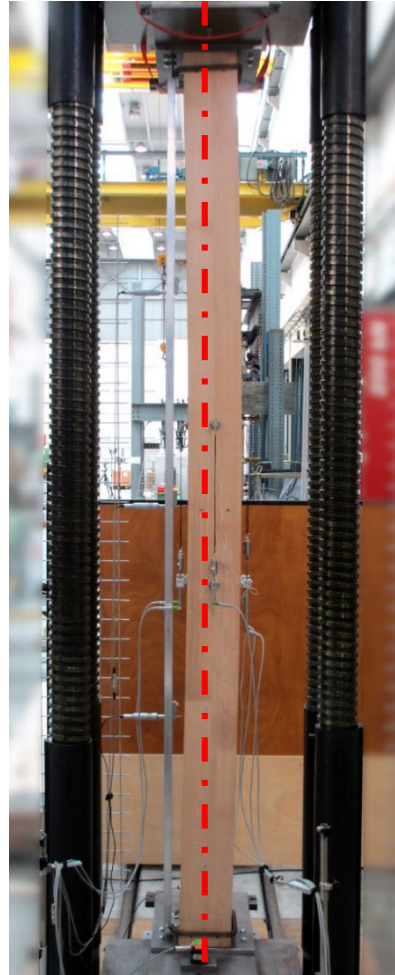
(Ehrhart 2019, Sroka et al. 2023a & 2023b)

■ idealer Bewehrungsgrad?



Fotos: René Steiger

Versuche an schlanken Stützen



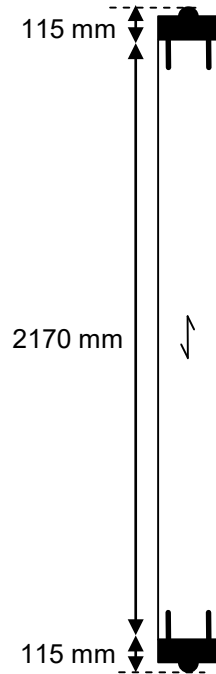
Planmässige Imperfektion: $L_{\text{eff}}/500$

Versuche an schlanken Stützen



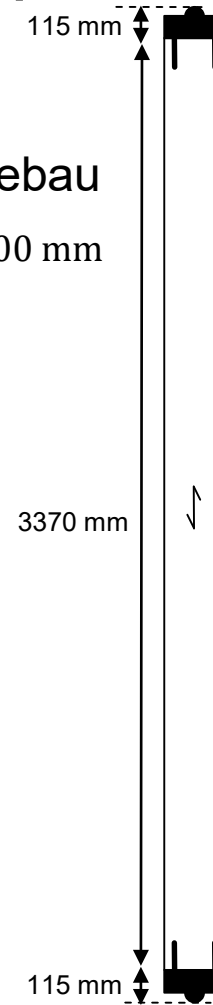
Wohnungsbau

$$L_{\text{eff}} = 2'400 \text{ mm}$$

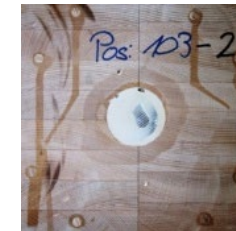


Industriebau

$$L_{\text{eff}} = 3'600 \text{ mm}$$



GL48h
4 x Ø20
n = 3

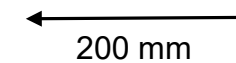


GL48h
1 x Ø40
n = 3



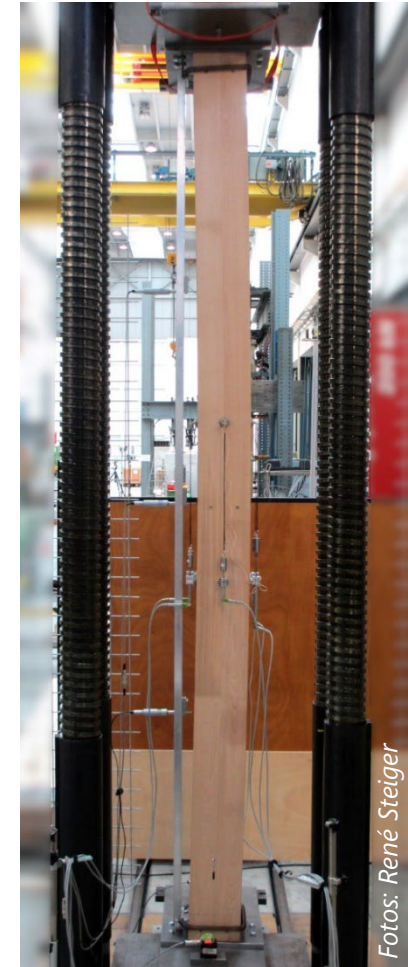
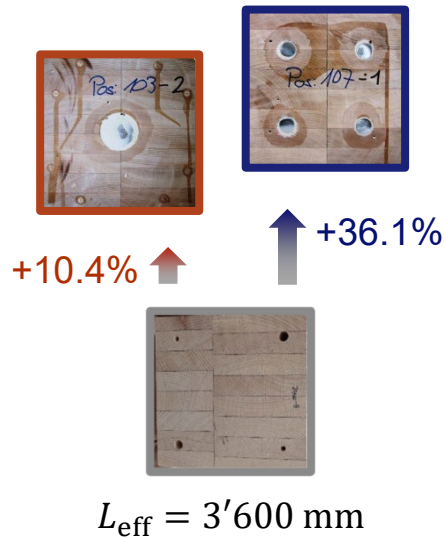
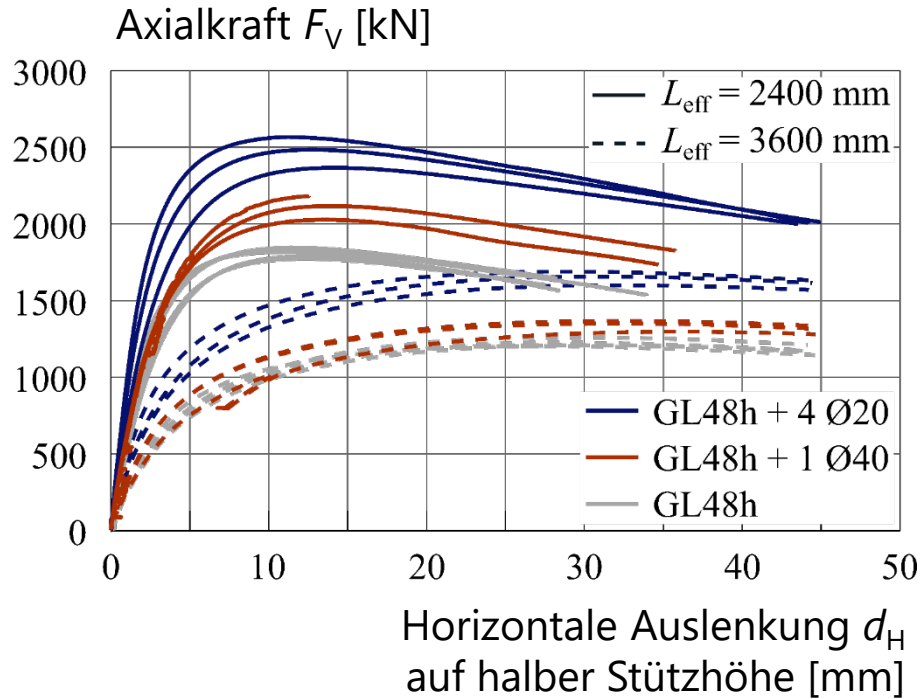
GL48h
n = 5

(Versuche an unbewehrten Stützen: Ehrhart 2019)



Versuche an schlanken Stützen

(Ehrhart 2019, Sroka et al. 2023a & 2023b)



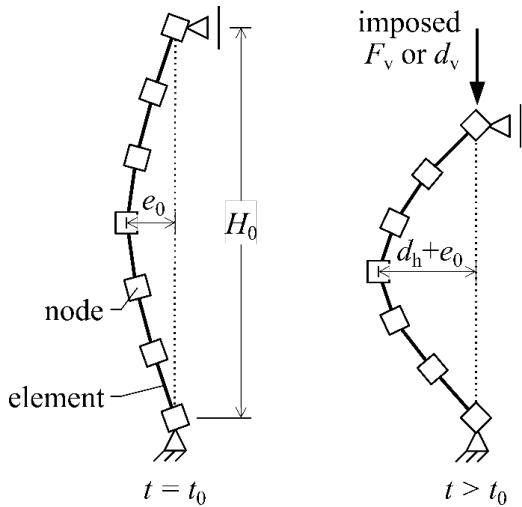
Numerische Simulationen

FE-Modell

(Glos et al. 2004, Sroka et al. 2023a & 2023b)

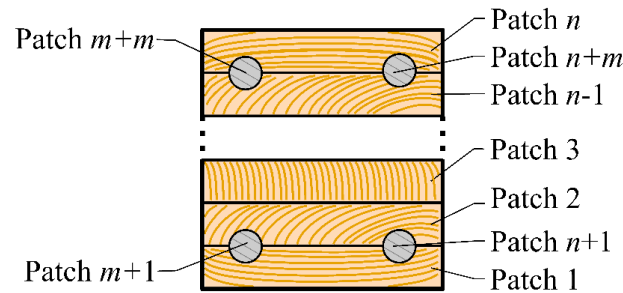
■ OpenSees & Python

Diskretisierung



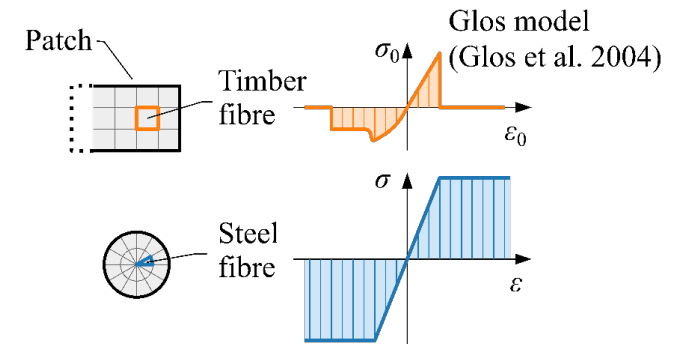
e_0 = Anfangsauslenkung
 d_h = horizontale Auslenkung

Querschnitt



Patch = Gruppe von fibres

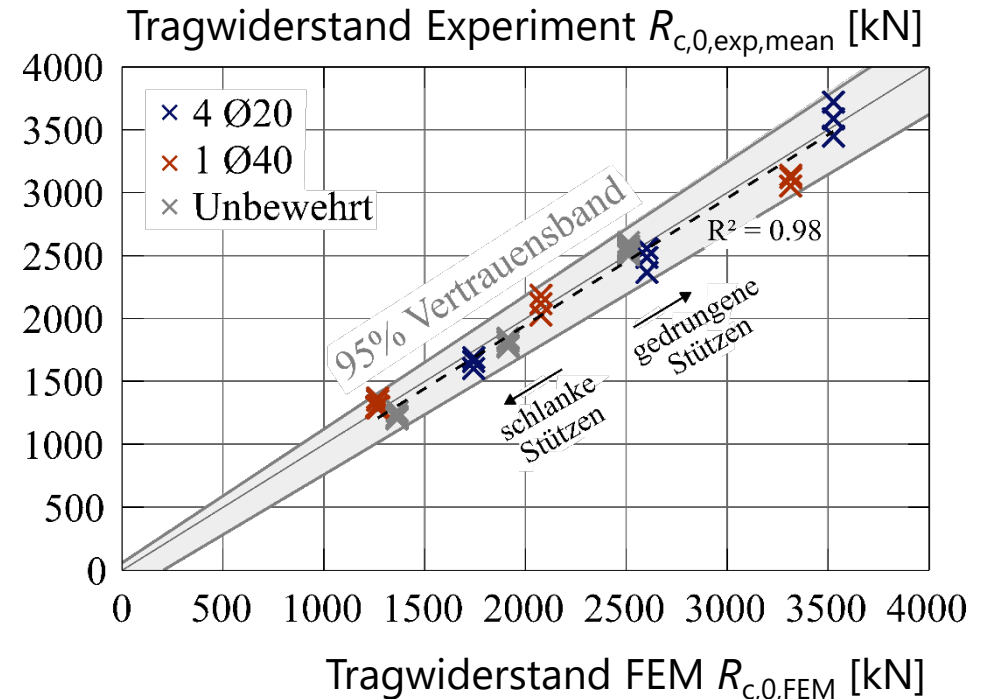
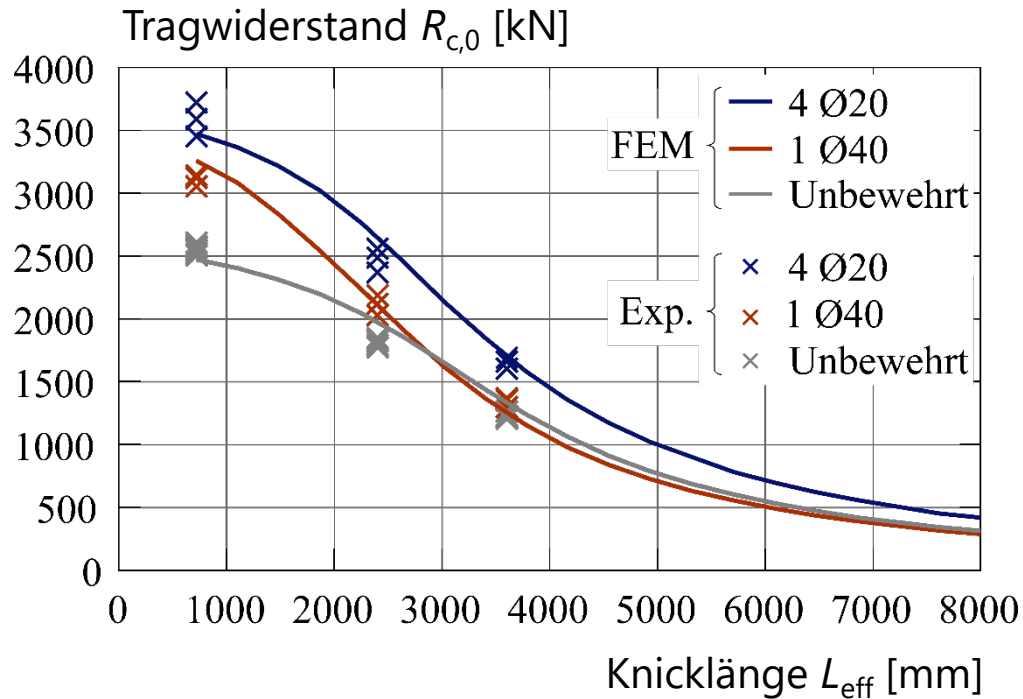
Meshing & Materialmodelle



Grafik: Pedro Palma

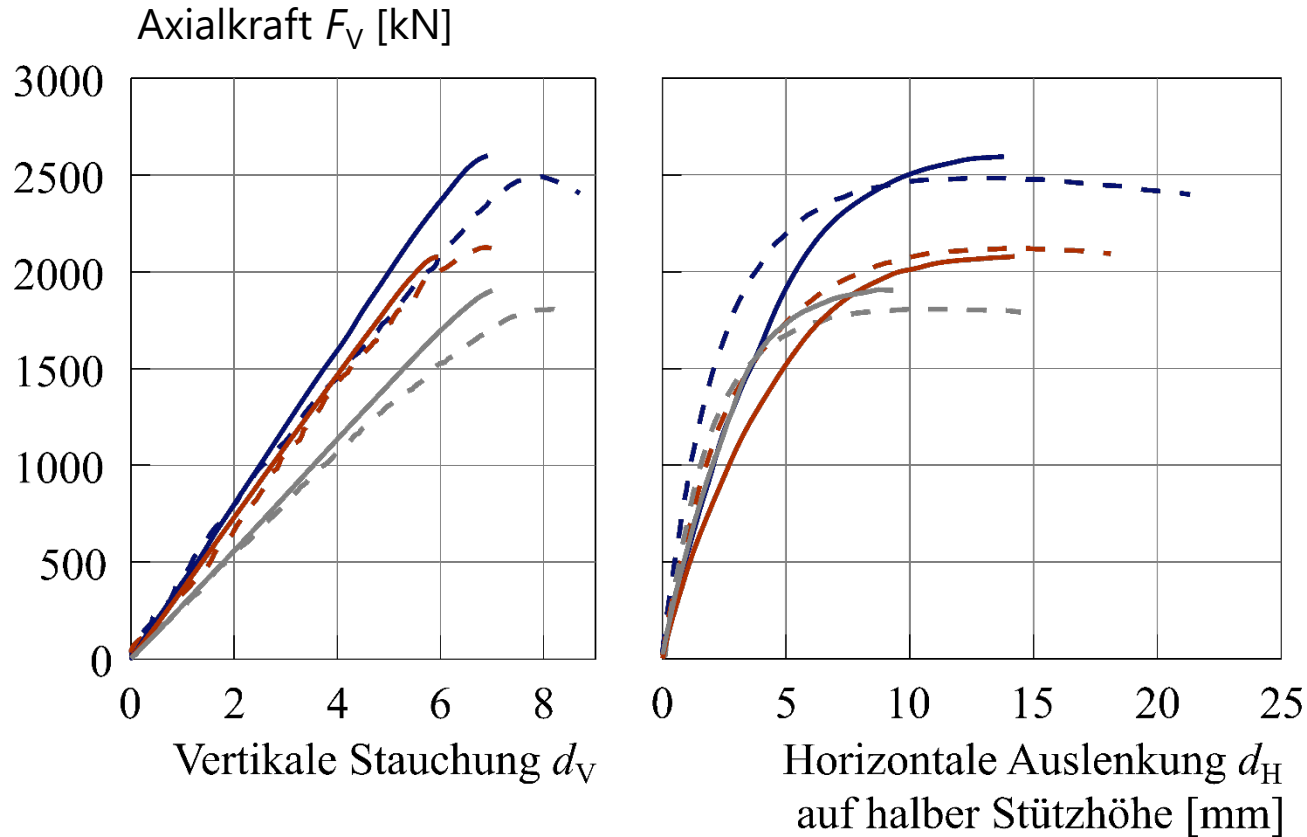
Vergleich Modell / Experiment

(Ehrhart 2019, Sroka et al. 2023a & 2023b)



Vergleich Modell / Experiment

(Ehrhart 2019, Sroka et al. 2023a & 2023b)

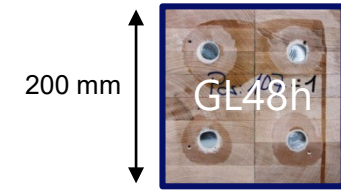
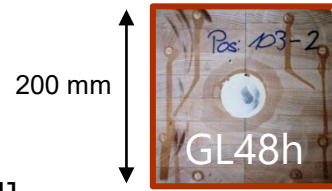


- GL48h
 - GL48h + 1 Ø40
 - GL48h + 4 Ø20
- } FEM
- - - PK-2400-8
 - - - PK-2400-1x40-4.2
 - - - PK-2400-4x20-6.2
- } Exp.

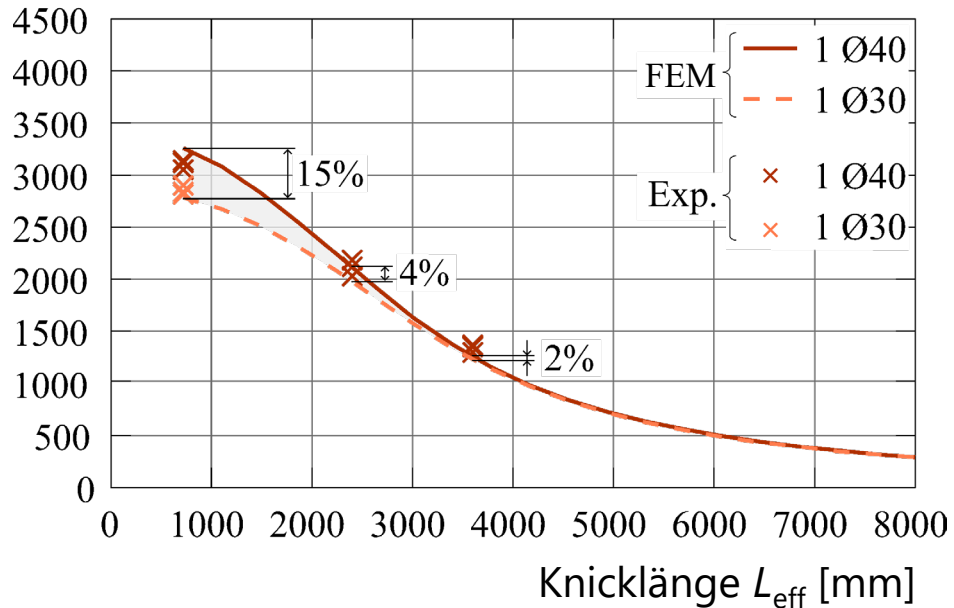
Parameterstudien

Bewehrung

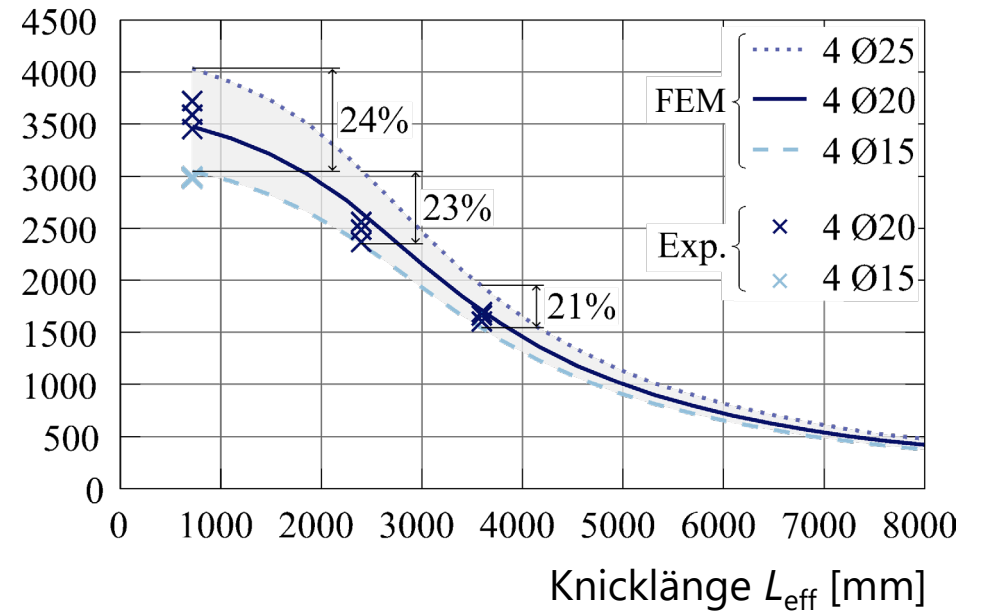
(Sroka et al. 2023a & 2023b)



Tragwiderstand $R_{c,0}$ [kN]

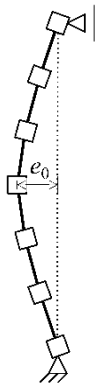


Tragwiderstand $R_{c,0}$ [kN]

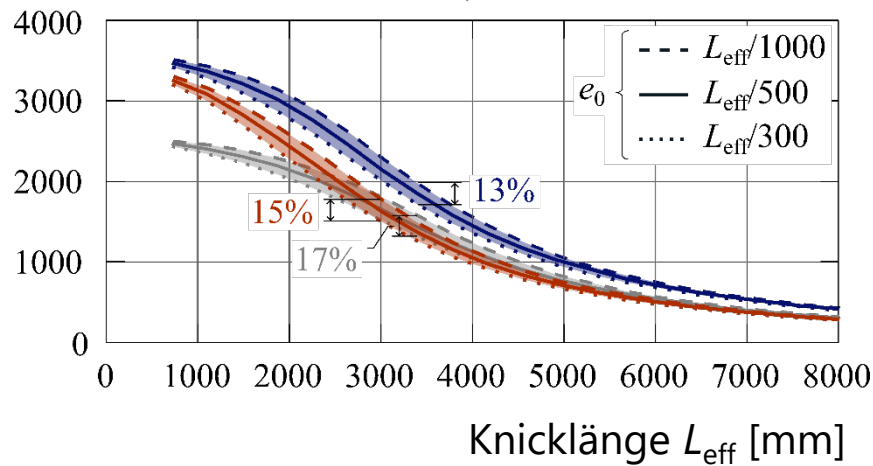


Anfangsauslenkung & Stützenquerschnitt

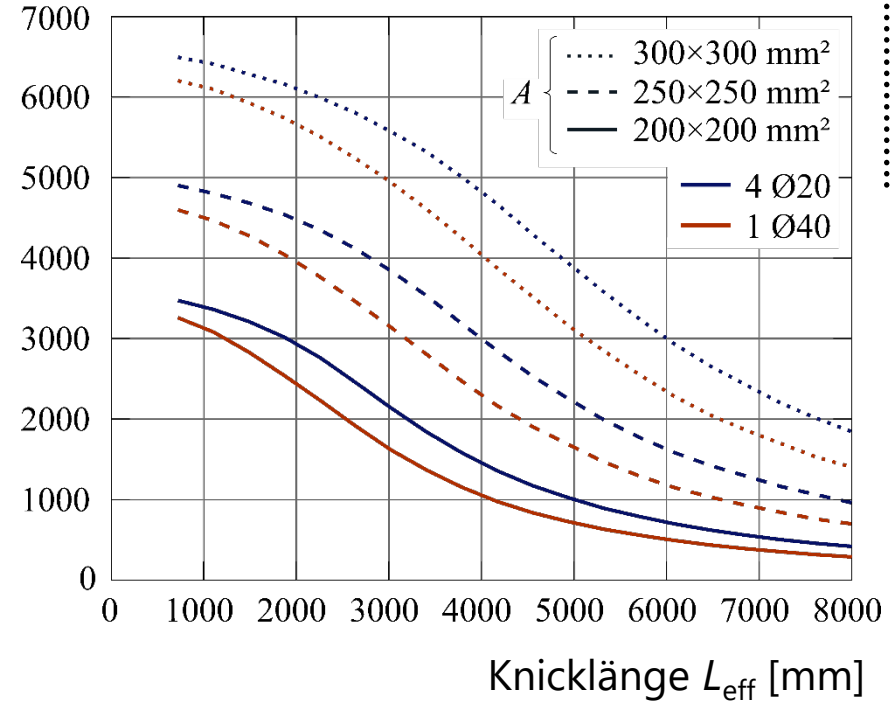
(Sroka et al. 2023a & 2023b)



Tragwiderstand $R_{c,0}$ [kN]

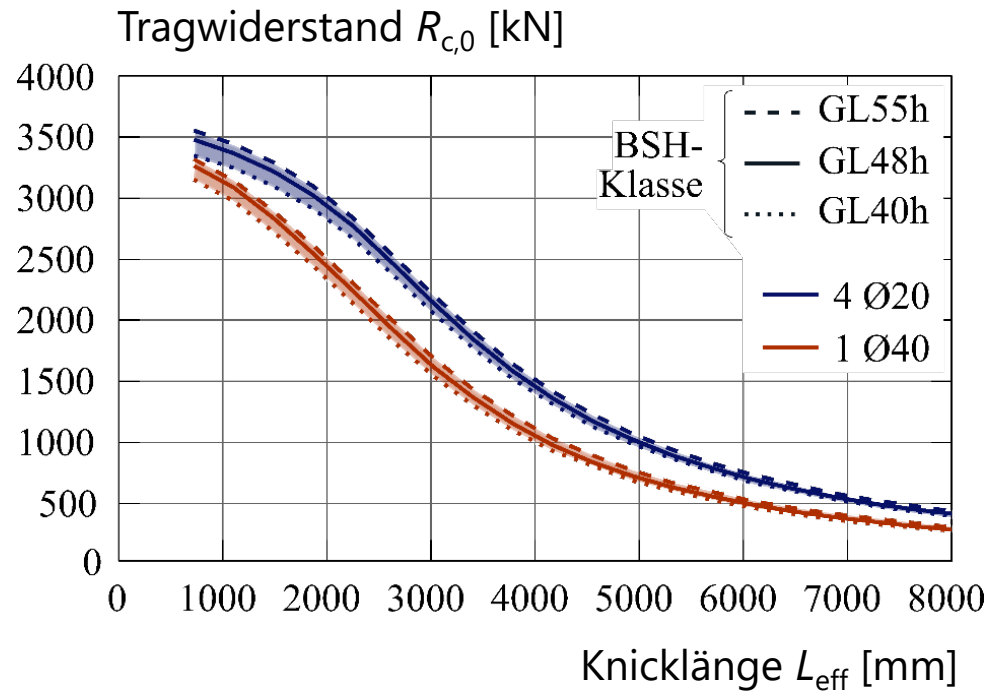


Tragwiderstand $R_{c,0}$ [kN]



BSH-Klasse

(Sroka et al. 2023a & 2023b)



200 x 200

Bemessung: Ersatzstabverfahren (EN 1995-1-1, SIA 265)

Bemessungsmodell

(Ehrhart 2019, Sroka et al. 2023a & 2023b)

Ersatzstabverfahren (EN 1995-1-1:2004):

$$R_{c,0} = k_c \cdot f_{c,0,d} \cdot A_{\text{hybrid}}$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{\text{rel}}^2}}$$

$$k = 0.5 \cdot [1 + \beta_C \cdot (\lambda_{\text{rel}} - \lambda_{\text{rel},0}) + \lambda_{\text{rel}}^2]$$

- β_C : Imperfektionsbeiwert, beeinflusst wie steil die Knickkurve abfällt
- $\lambda_{\text{rel},0}$: kritische bezogene Schlankheit, $k_c < 1.0$ für $\lambda_{\text{rel}} > \lambda_{\text{rel},0}$

Anpassung für hybriden Querschnitt:

$$n = \frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{c,0,\text{mean}}} = \frac{210}{15.7} = 13.4$$

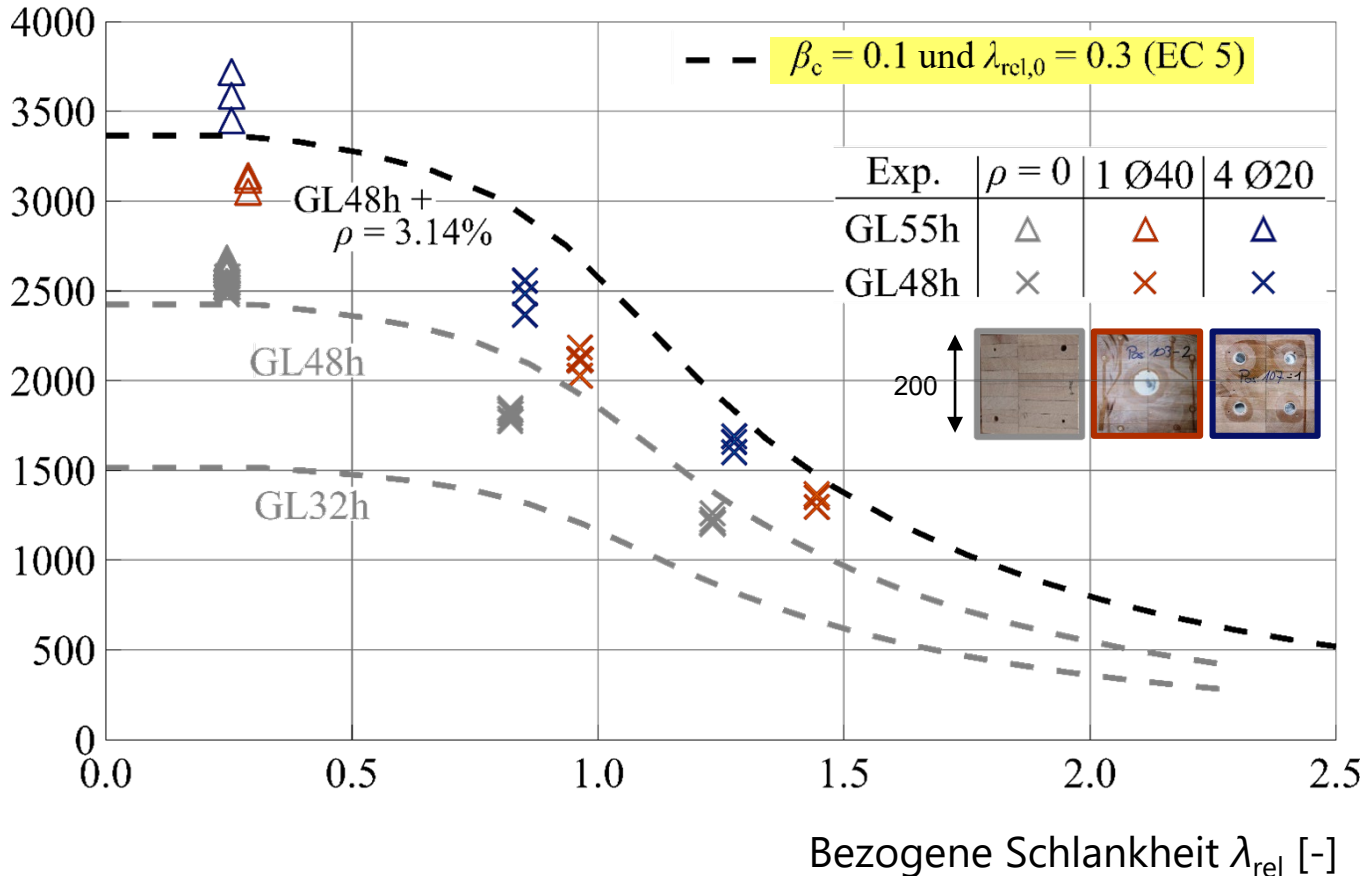
$$i_{\text{hybrid}} = \sqrt{\frac{I_{\text{hybrid}}}{A_{\text{hybrid}}}} = \sqrt{\frac{I_{\text{brutto}} + (n - 1)I_{\text{Stahl}}}{A_{\text{brutto}} + (n - 1)A_{\text{Stahl}}}}$$

$$\lambda_{\text{rel}} = \frac{L_{\text{eff}}}{\pi \cdot i_{\text{hybrid}}} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0}}{E_{c,0}}}$$

Bemessungsmodell

(Ehrhart 2019, Sroka et al. 2023a & 2023b)

Tragwiderstand $R_{c,0}$ [kN]



Ersatzstabverfahren (EN 1995-1-1:2004):

$$R_{c,0} = k_c \cdot f_{c,0,mean} \cdot A_{hybrid}$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}$$

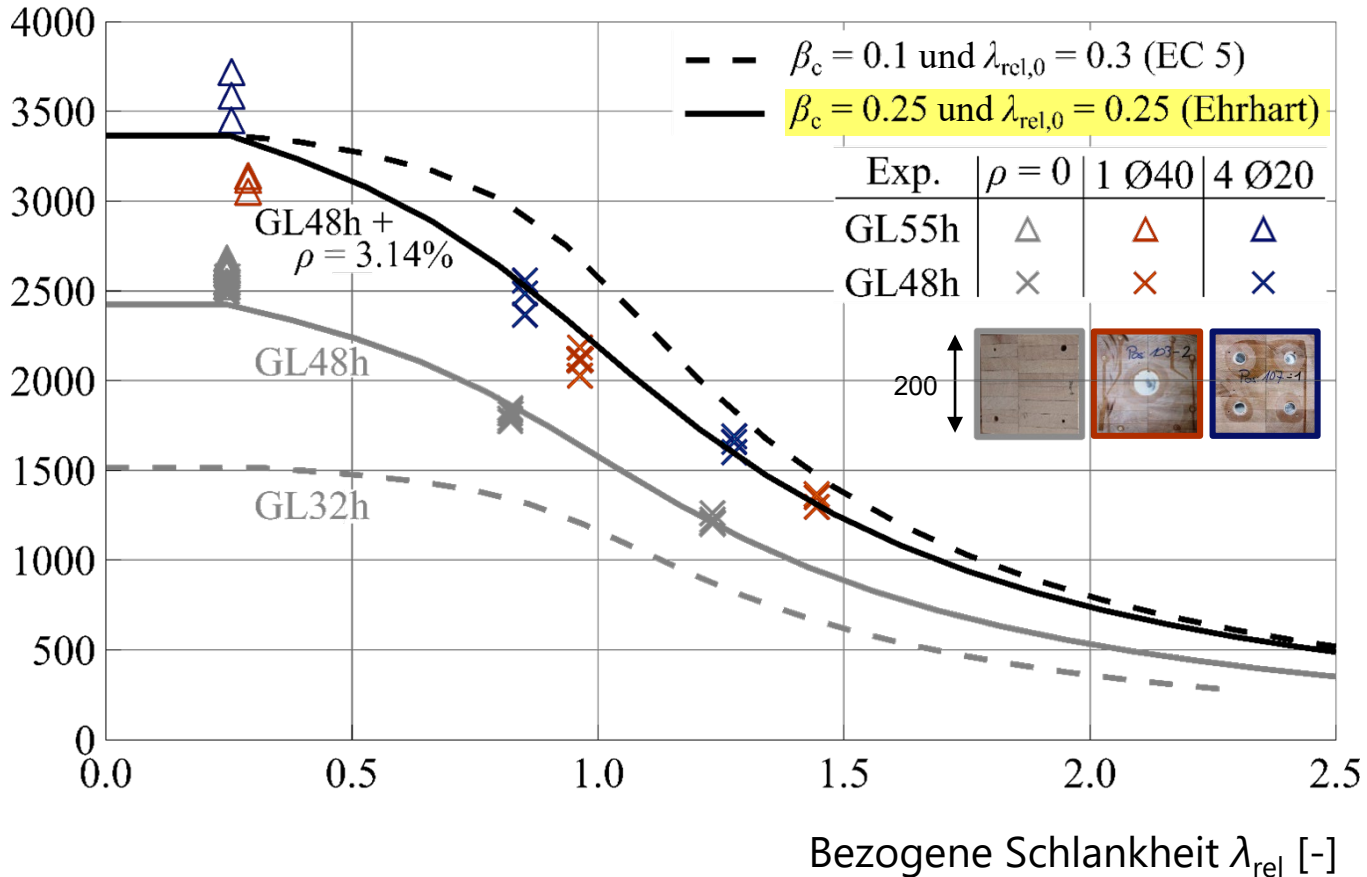
$$k = 0.5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel}^2]$$

- Berechnung auf **Mittelwertsniveau**: Vergleich mit Versuchsergebnissen
- $\beta_c = 0.1$ und $\lambda_{rel,0} = 0.3$: Werte für BSH (EN 1995-1-1:2004), Datengrundlage Nadelholz
- für (un-)bewehrtes Buchen-BSH auf der unsicheren Seite!

Bemessungsmodell

(Ehrhart 2019, Sroka et al. 2023a & 2023b)

Tragwiderstand $R_{c,0}$ [kN]



Ersatzstabverfahren (EN 1995-1-1:2004):

$$R_{c,0} = k_c \cdot f_{c,0,mean} \cdot A_{hybrid}$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}$$

$$k = 0.5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel}^2]$$

- $\beta_c = 0.25$ und $\lambda_{rel,0} = 0.25$:
 vorgeschlagen für Buchen-BSH
 (Ehrhart 2019)

Schlussfolgerungen

- Stahlbewehrung
 - erhöht die Leistung von Buchen-BSH-Stützen nochmals signifikant
 - erhöht Steifigkeit und Duktilität
 - ermöglicht einfache Verbindungen zu anderen Bauteilen
- Zentrische Bewehrung einfach herstellbar, jedoch nicht sehr wirksam
- Eckbewehrung:
 - $\geq 36\%$ mehr Tragwiderstand auch bei schlanken Stützen ($\rho = 3.14\%$)
 - Brandwiderstand beachten!
- FE-Modell liefert gute Schätzungen der Traglasten
- Bemessung von (stahlbewehrten) Buchen-BSH-Stützen mit dem Ersatzstabverfahren möglich, angepasste Parameter: $\beta_c = 0.25$; $\lambda_{rel,0} = 0.25$

- Abplanalp, B., Strahm, T., Rohner, T. (2019) *Einsatz von Buchen-Brettschichtholz in hochbelasteten Anwendungen: Demonstrationsobjekt*. Abschlussbericht für BAFU.
- Beer Holzbau (2016) *Projekt FachWerk Ostermundigen, Baufortschritt Juni 2016*. https://www.beer-holzbau.ch/aktuelles/fachwerk-ostermundigen/tagebuch/event/Fachwerk_Juni [6.7.2023].
- Beer Holzbau (2017) *Projekt FachWerk Ostermundigen, Baufortschritt Mai 2017*. https://www.beer-holzbau.ch/aktuelles/fachwerk-ostermundigen/tagebuch/event/fachwerk_Mai17 [6.7.2023].
- Ehrhart, T. (2019) *European beech glued-laminated timber*. Doctoral Thesis, ETH Zurich.
- Glos, P., Denzler, J.K., Linsenmann, P.W. (2004) *Strength and stiffness behaviour of beech laminations for high strength glulam*. CIB-W18 Meeting 37.
- Sroka, K., Palma, P., Steiger, R., Ehrhart, T., Frangi, A., Strahm, T., Gehri, E. (2023a) *Unreinforced and steel-reinforced columns made of European beech glued-laminated timber*, in: Proceedings of the 2023 World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023). Presented at the 2023 World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), Oslo, Norway.
- Sroka K., Palma P., Steiger R., Strahm T., Gehri E. (2023b) *Steel-reinforced columns made of European beech glued-laminated timber*. Manuscript submitted for publication.