

# Stützen aus Buchen-Brettschichtholz mit und ohne Stahlbewehrung

K. Sroka <sup>1) 2)</sup>, P. Palma <sup>1)</sup>, R. Steiger <sup>1)</sup>, T. Ehrhart <sup>3)</sup>, A. Frangi <sup>2)</sup>, T. Strahm <sup>3)</sup>, E. Gehri <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Empa, Abt. 303 Ingenieur-Strukturen

<sup>2)</sup> ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion

<sup>3)</sup> Schnetzer Puskas Ingenieure

<sup>4)</sup> neue Holzbau AG

<sup>5)</sup> 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

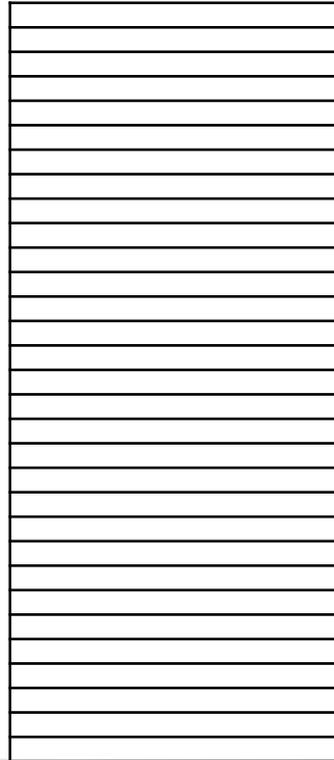
# Potential: Gebäudehöhe

nur basierend auf  
vertikalem Tragwiderstand  
der Stützen

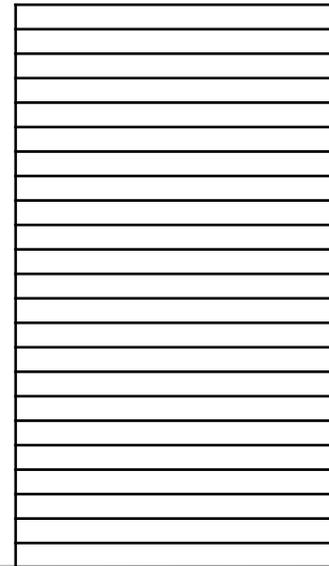
## Annahmen:

- 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)

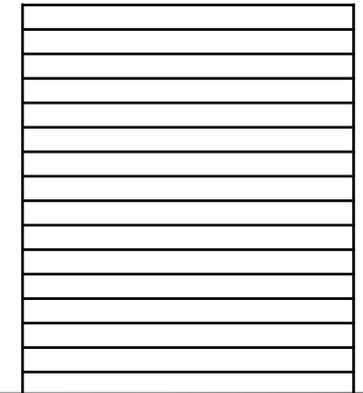
**GL48h + 4 Ø20 mm**  
49 Geschosse



**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 <sup>2</sup> ]	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	<b>14.5</b>
$\delta_{\text{diff}}$ [mm]	<b>+27.2</b>	<b>+16.6</b>	<b>+6.1</b>	-
	<b>100%</b>	<b>61.0%</b>	<b>22.4%</b>	-

## 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!

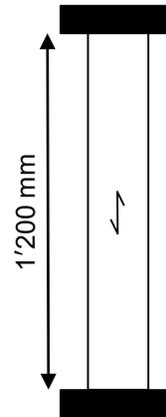
$$f_y > f_{c,0,k} \frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{BSH}}} = 62.5 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{210'000}{15'400} \approx 850 \text{ N/mm}^2$$

*f<sub>c,0,k</sub> und E<sub>BSH</sub>: Ehrhart (2019)*

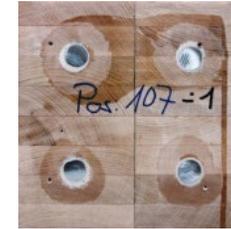
- Wahl von Ankerstahlstäben ST900/1100 bzw. ST950/1050

# Versuche an gedruckenen Stützen

## ■ Druckfestigkeit (EN 408)



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



GL55h  
Eckbewehrung  
 $n = 3$

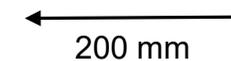


GL55h  
zentrische Bew.  
 $n = 3$



GL40h / GL48h /  
GL55h  
 $n = 7$

*(Versuche an unbewehrten  
Stützen: Ehrhart 2019)*



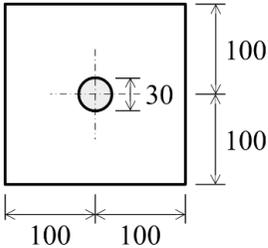
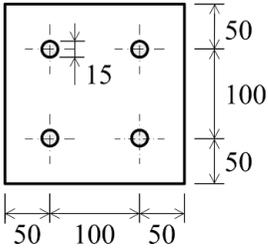
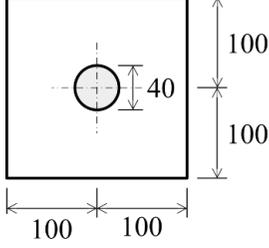
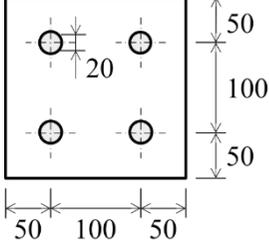
200 mm

# Versuche an gedruckenen Stützen

## ■ idealer Bewehrungsgrad?

Je 3 Prüfkörper

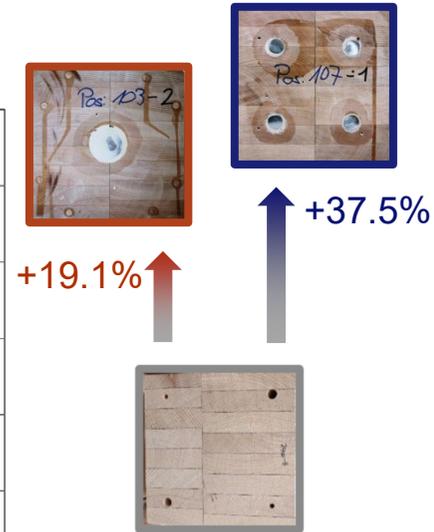
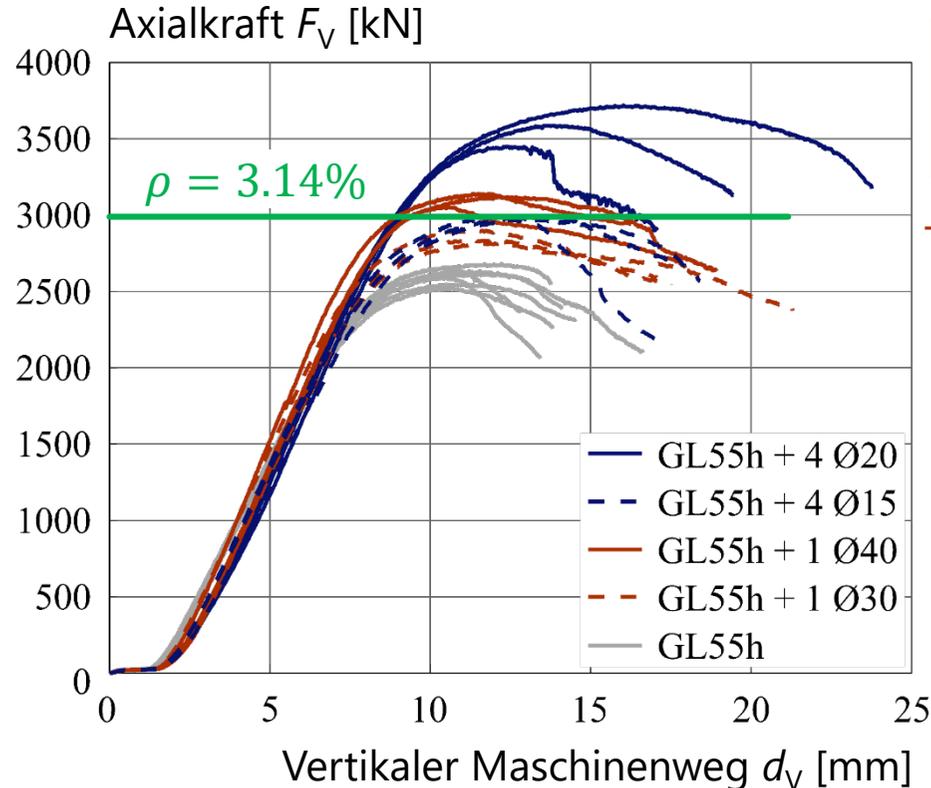


			
			
<p>1 x <math>\varnothing</math> 30 mm  <math>A_{\text{Stahl}} = 707 \text{ mm}^2</math>  <math>\rho = 1.77\%</math></p>	<p>4 x <math>\varnothing</math> 15 mm  <math>A_{\text{Stahl}} = 707 \text{ mm}^2</math>  <math>\rho = 1.77\%</math></p>	<p>1 x <math>\varnothing</math> 40 mm  <math>A_{\text{Stahl}}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

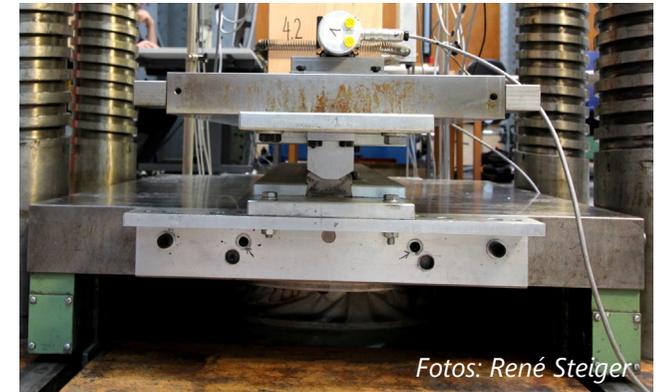
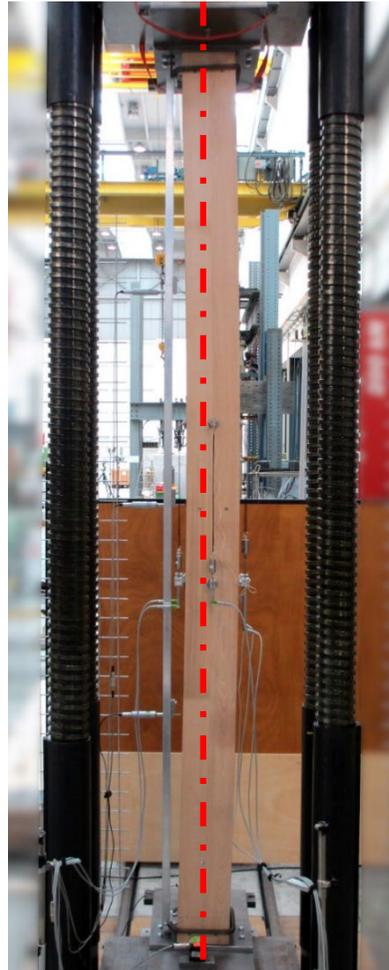
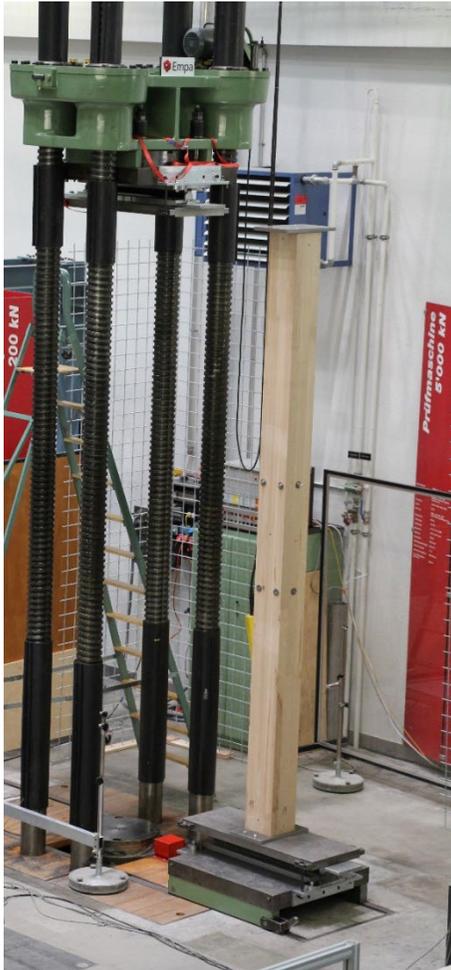
# Versuche an gedruckenen Stützen

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

## ■ idealer Bewehrungsgrad?



# Versuche an schlanken Stützen



Fotos: René Steiger

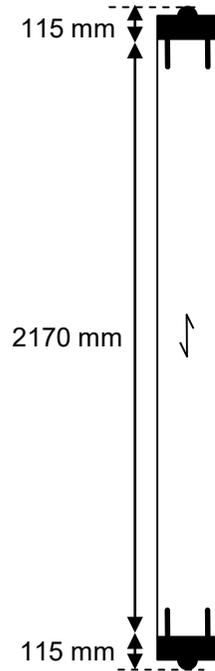
Planmässige Imperfektion:  $L_{\text{eff}}/500$

# Versuche an schlanken Stützen



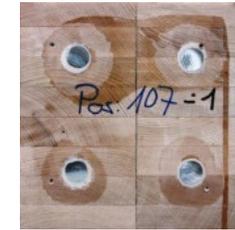
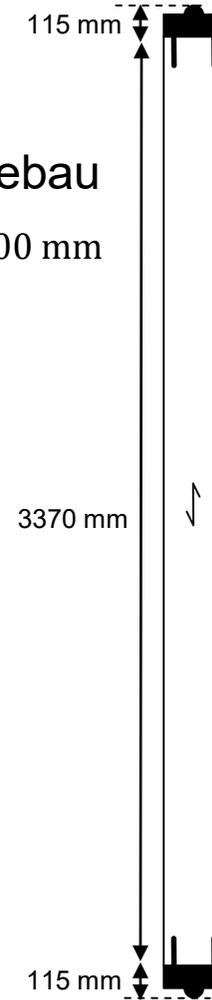
Wohnungsbau

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



Industriebau

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



GL48h  
4 x Ø20  
n = 3

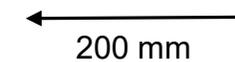


GL48h  
1 x Ø40  
n = 3



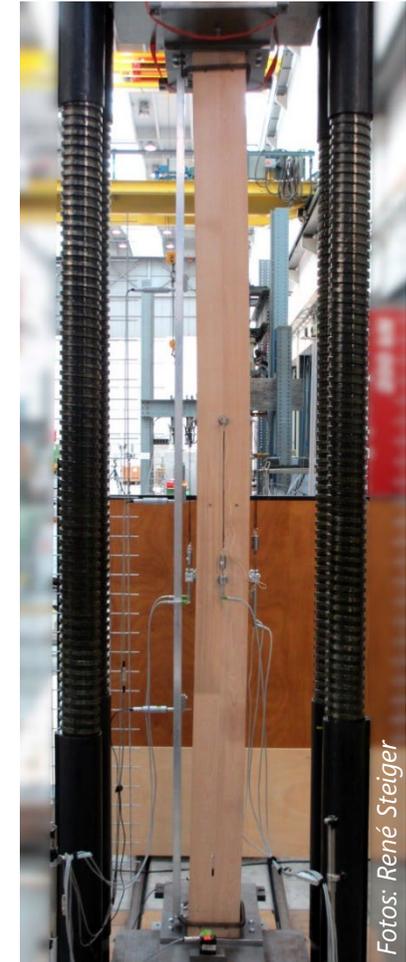
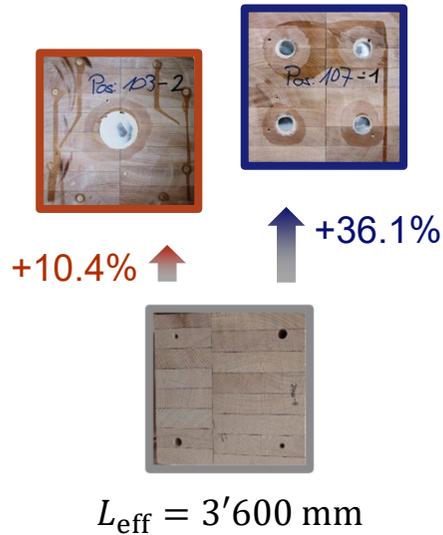
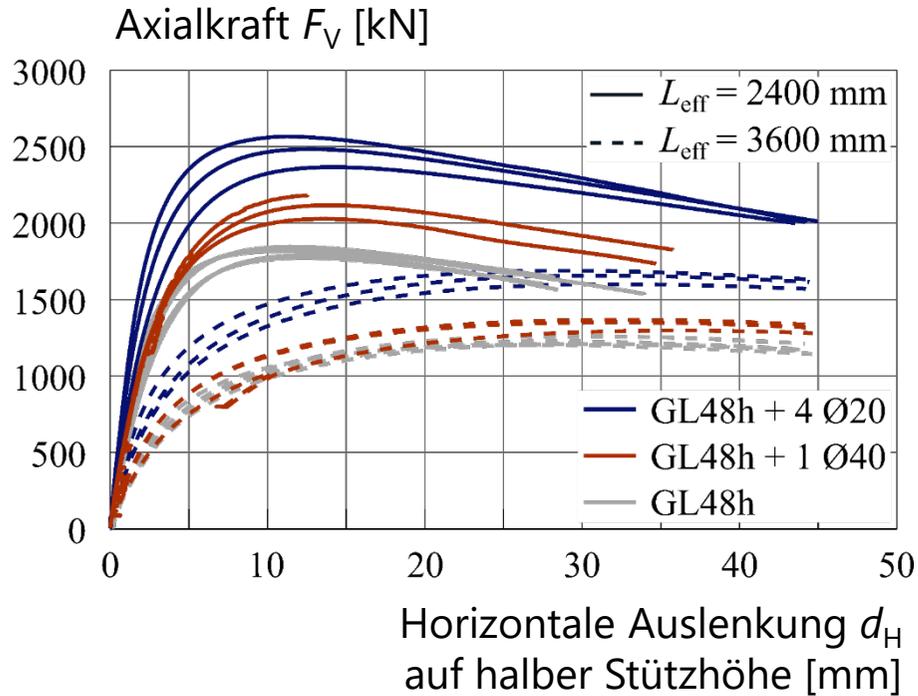
GL48h  
n = 5

*(Versuche an unbewehrten Stützen: Ehrhart 2019)*



# Versuche an schlanken Stützen

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



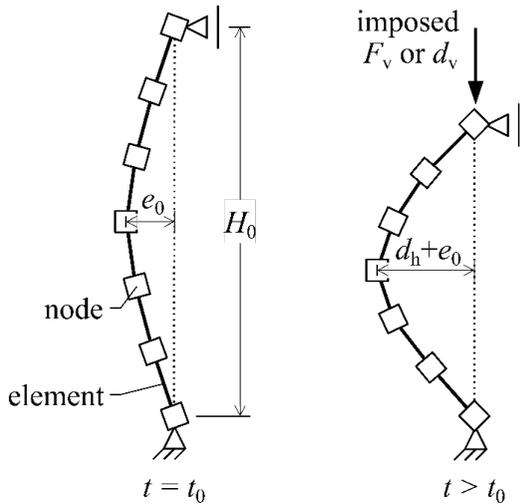
# Numerische Simulationen

# FE-Modell

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

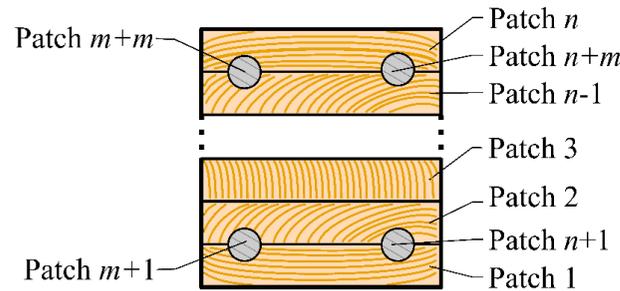
## ■ OpenSees & Python

### Diskretisierung



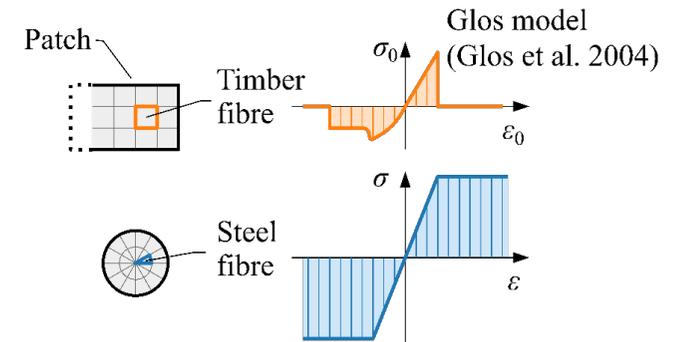
$e_0$  = Anfangsauslenkung  
 $d_h$  = horizontale Auslenkung

### Querschnitt



Patch = Gruppe von fibres

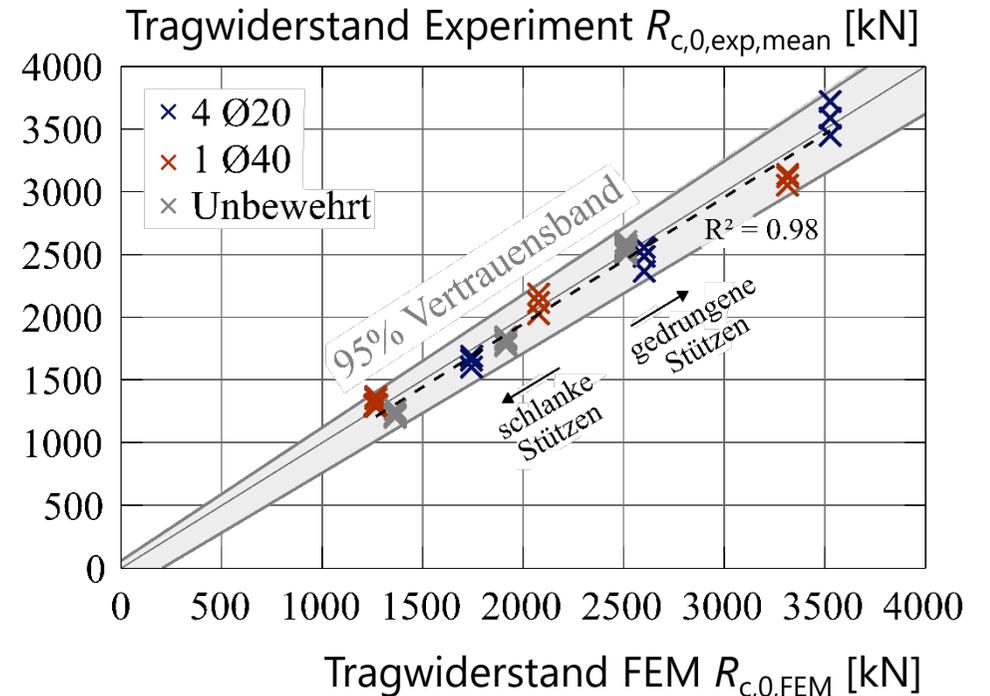
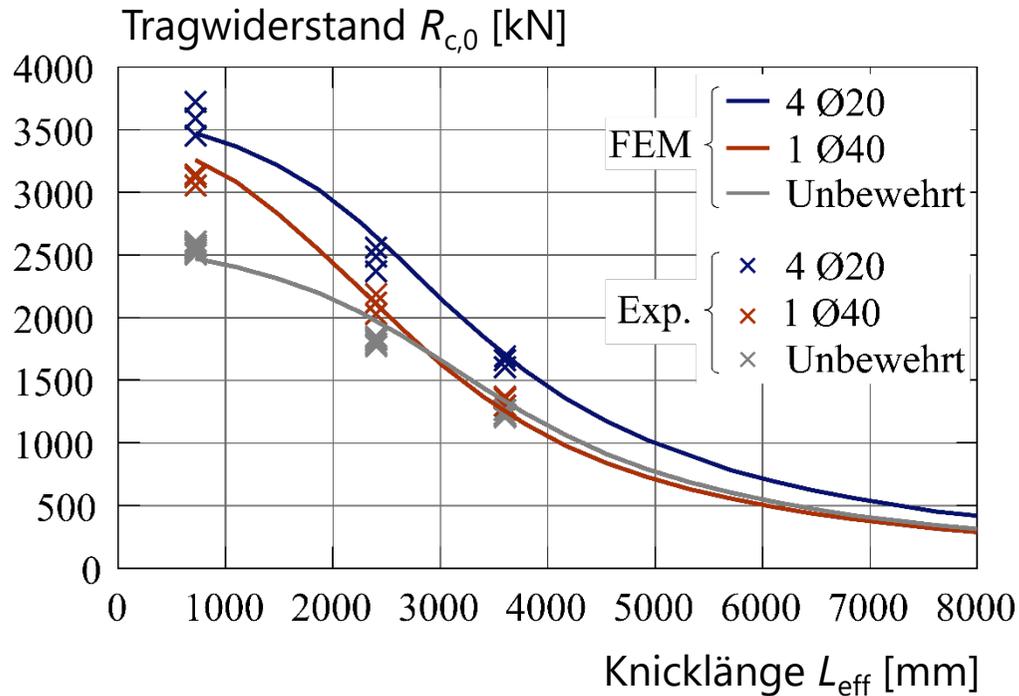
### Meshing & Materialmodelle



Grafik: Pedro Palma

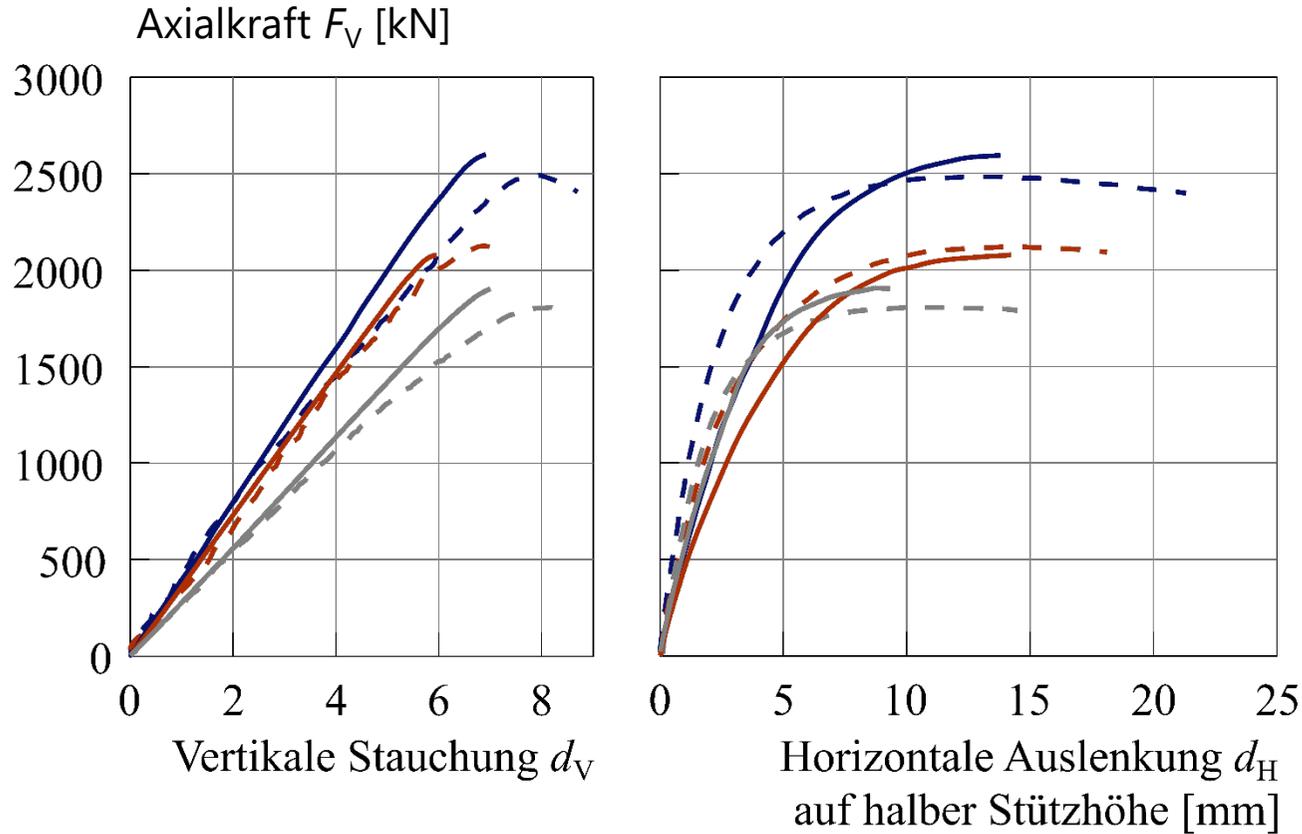
# Vergleich Modell / Experiment

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



# Vergleich Modell / Experiment

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

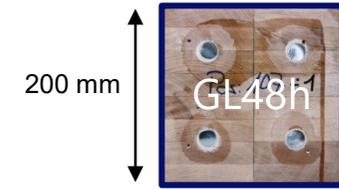
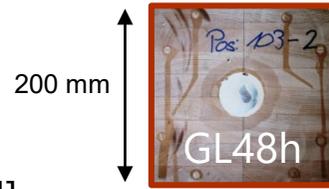


- GL48h
  - GL48h + 1 Ø40
  - GL48h + 4 Ø20
- } FEM
- - - PK-2400-8
  - - - PK-2400-1x40-4.2
  - - - PK-2400-4x20-6.2
- } Exp.

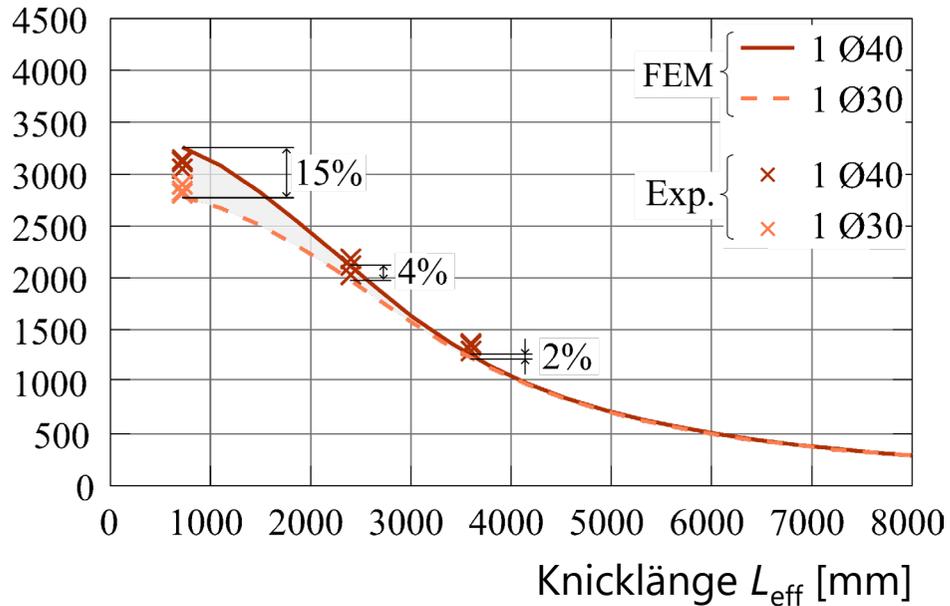
# Parameterstudien

# Bewehrung

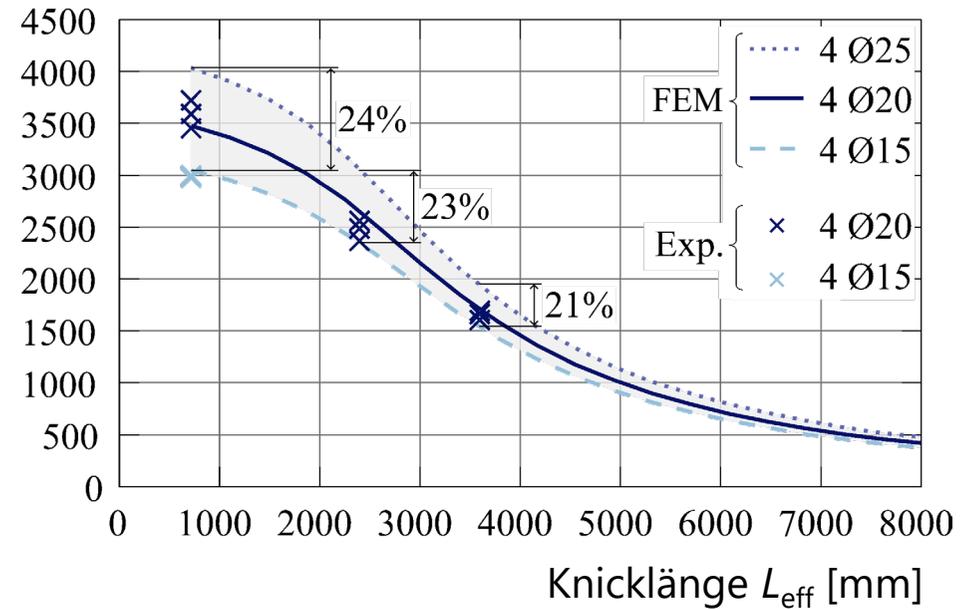
(Sroka et al. 2023a & 2023b)



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

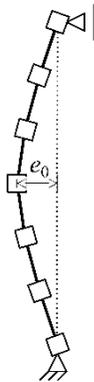


Tragwiderstand  $R_{c,0}$  [kN]

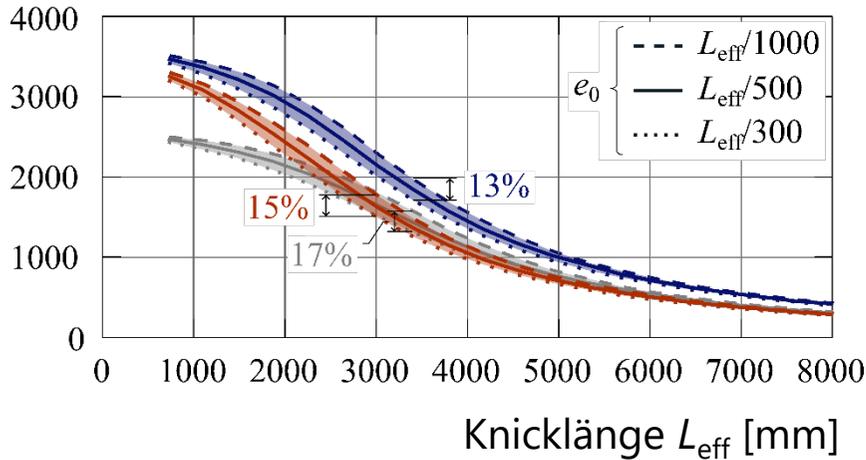


# Anfangsauslenkung & Stützenquerschnitt

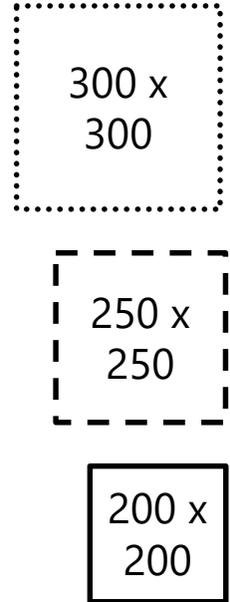
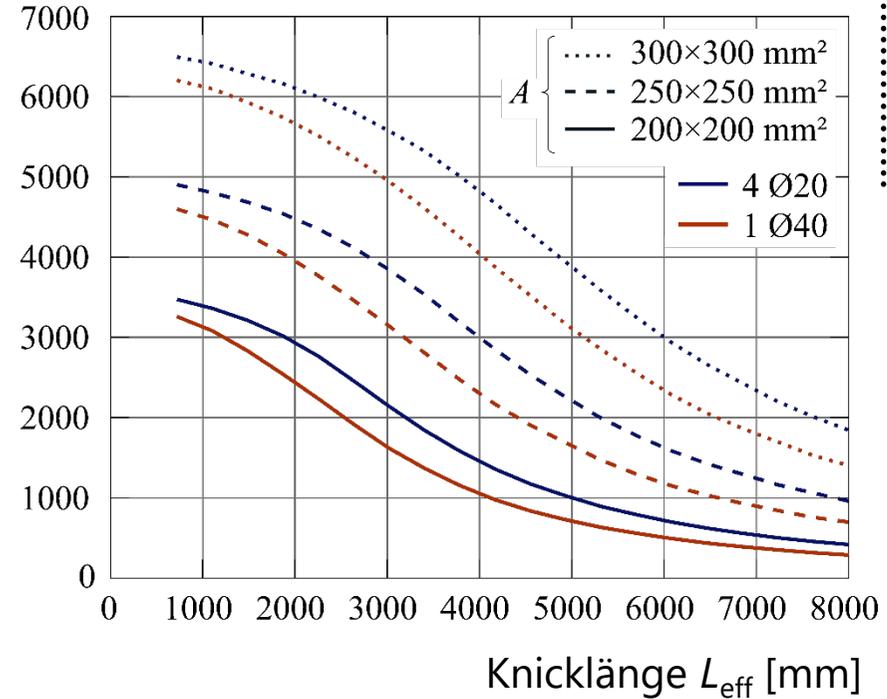
(Sroka et al. 2023a & 2023b)



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

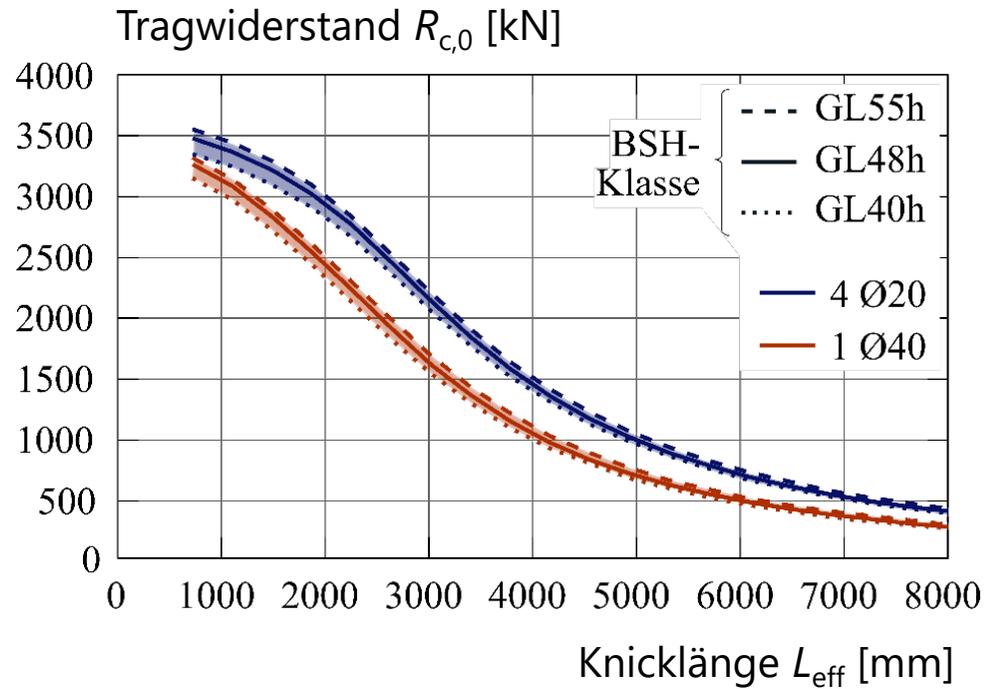


Tragwiderstand  $R_{c,0}$  [kN]



# 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):

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

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

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

- $\beta_C$ : 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:

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

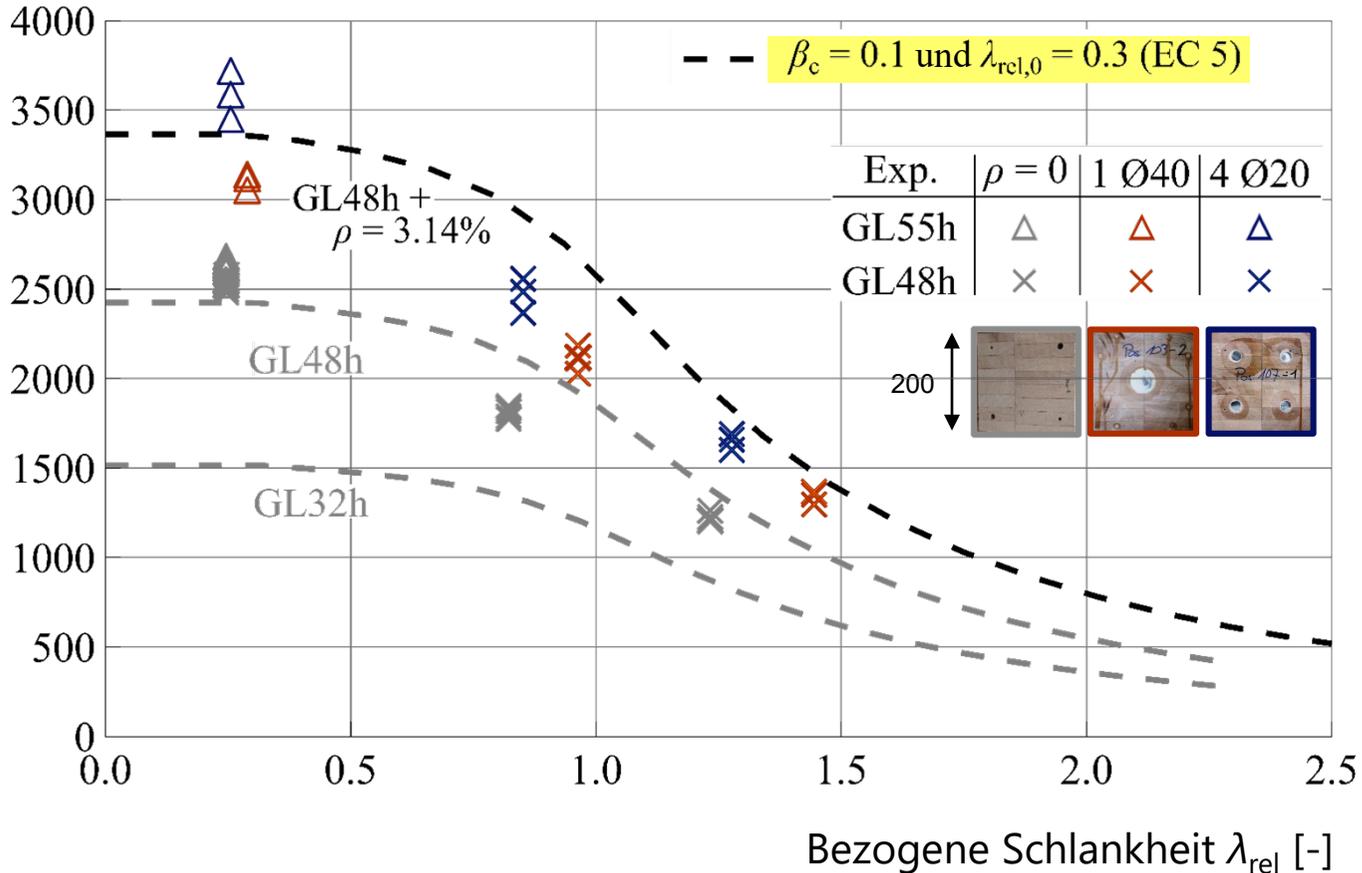
$$i_{\text{hybrid}} = \sqrt{\frac{I_{\text{hybrid}}}{A_{\text{hybrid}}}} = \sqrt{\frac{I_{\text{brutto}} + (n - 1)I_{\text{Stahl}}}{A_{\text{brutto}} + (n - 1)A_{\text{Stahl}}}}$$

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

# Bemessungsmodell

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

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



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

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

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

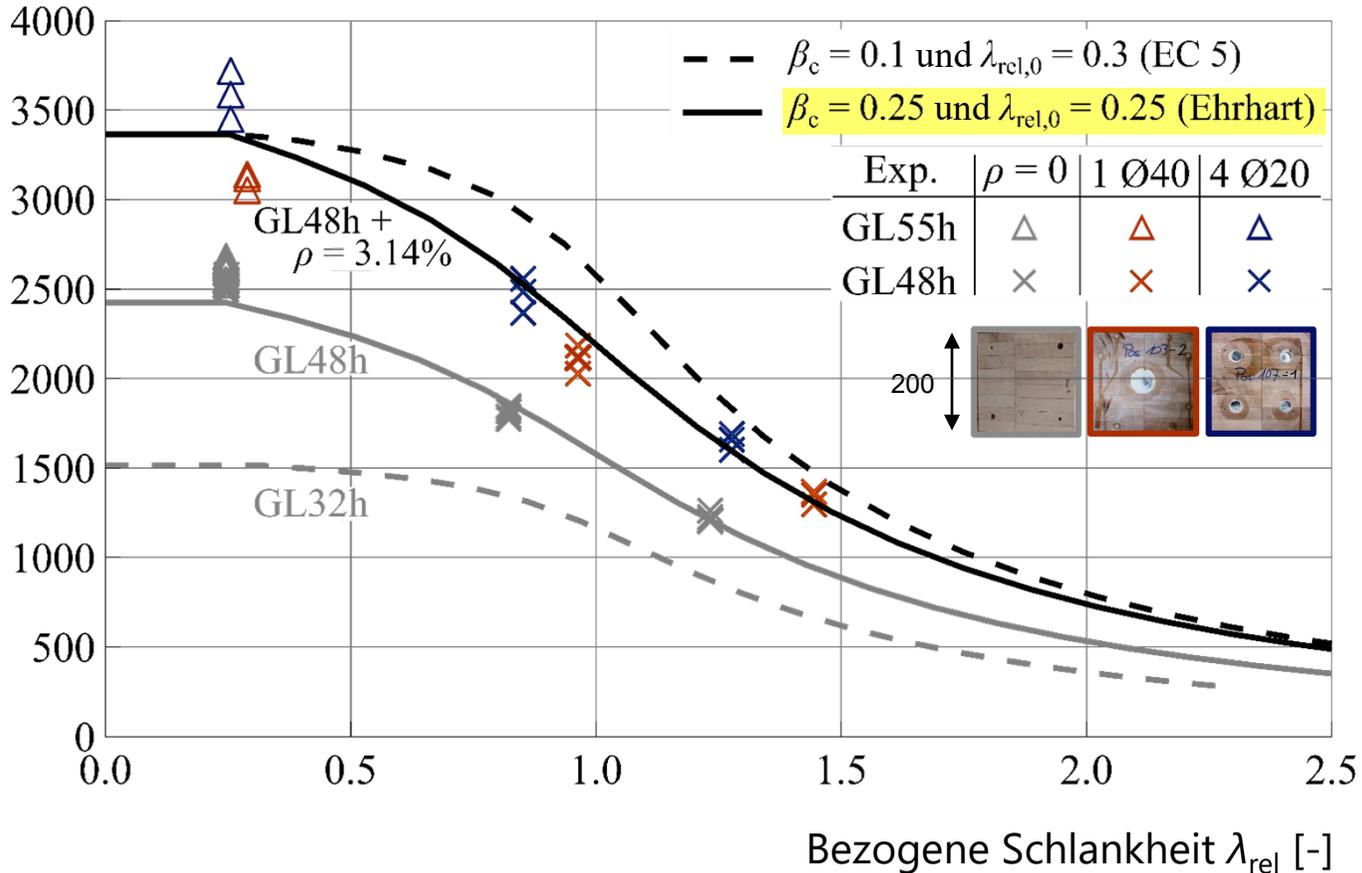
$$k = 0.5 \cdot [1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - \lambda_{rel,0}) + \lambda_{rel}^2]$$

- 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](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](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.