

Příloha 1- Výpočet vzpěrné únosnosti CLT panelu 1. řádem Modifikovanou Gama metodou

MATERIÁL

dřevo C 24 $E_{o,mean} = 11\,000 \text{ N/mm}^2$ $G_{mean} = 690 \text{ N/mm}^2$

$G_{R,mean} = 50 \text{ N/mm}^2$

$\rho_m = 420 \text{ kg/m}^3$

CLT PANEL

ROZMĚRY: výška: $l = 2\,930 \text{ mm}$

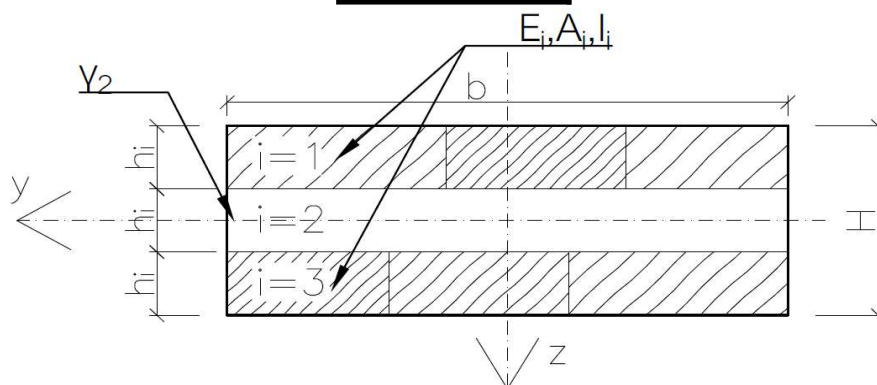
šířka: $b = 1\,500 \text{ mm}$

tloušťka: $H = 81 \text{ mm}$

šířka lamel: $b_{lam} = 200 \text{ mm}$

SKLADBA:

vrstvy:	i	orientace vláken [°]	výška vrstvy h_i [mm]	šířka vrstvy b [mm]	E_i [N/mm ²]	G_i [N/mm ²]
	1	0	27	1 500	11 000	690
	2	90	27		0	50
	3	0	27		11 000	690
	celková výška panelu H			81		



SPOJOVACÍ PROSTŘEDKY

VRUTY

průměr: $d = 5 \text{ mm}$

průměr jádra: $d_{j\acute{a}dro} = 0,7 \cdot d = 0,7 \cdot 5 = 3,50 \text{ mm}$ (1)

efektivní průměr: $d_{ef} = 1,1 \cdot d_{j\acute{a}dro} = 1,1 \cdot 3,50 = 3,85 \text{ mm}$ (2)

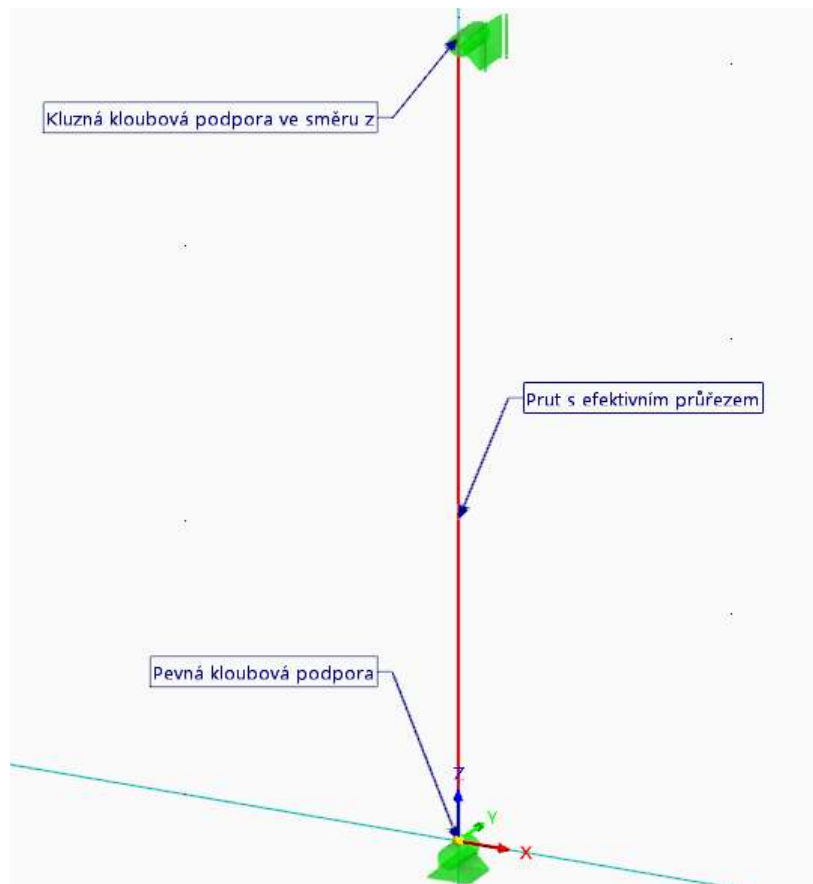
poč. spoj. prostředků

na jedno křížení lamel: $n_s = 2$

vzd. spoj. prostředků podélce prvku:

$$s = \frac{b_{lam}}{(b / b_{lam}) \cdot n_s} [\text{mm}] \quad (3)$$

$$s = \frac{200}{(1\,500 / 200) \cdot 2} = 13,33 \text{ mm}$$



VÝPOČET EFEKTIVNÍCH PRŮŘEZOVÝCH CHARAKTERISTIK

1) Výpočet součinitele γ

$$\gamma_i = [1 + (\pi^2 E_{i,mean} A_i s_i) / (K_i l^2)]^{-1} [-] \quad (4)$$

$$s_i/K_i = \frac{0,5 \cdot h_{90,i}}{G_{R,mean} b} [\text{mm}^2/\text{N}] \quad (5)$$

2. vrstva

$$\text{plocha 2. vrstvy: } A_1 = b \cdot h_1 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2 \quad (6)$$

Poddajnost příčné vrstvy vlivem valivého smyku:

$$s_\gamma/K_\gamma = \frac{0,5 \cdot h_2}{G_{R,mean} b} = \frac{0,5 \cdot 27}{50 \cdot 1\,500} = 0,0002 \text{ mm}^2/\text{N} \quad (7)$$

Poddajnost příčné vrstvy vlivem prokluzu spoje:

Modul prokluzu jednoho jednotřížného spojovacího prostředku:

$$K_{u,1} = \frac{2}{3} \cdot \rho_m^{1,5} \frac{d_{ef}}{23} = \frac{2}{3} \cdot 420^{1,5} \frac{4}{23} = 961 \text{ N/mm} \quad (8)$$

Poddajnost spojovacích prostředků:

$$s/K_u = 2 \cdot \frac{s}{K_{u,n}} = 2 \cdot \frac{13,33}{961} = 0,0278 \text{ mm}^2/\text{N} \quad (9)$$

Celková poddajnost příčné vrstvy

$$s/K = s_\gamma/K_\gamma + s/K_u = 0,0002 + 0,0278 = \boxed{0,0279 \text{ mm}^2/\text{N}} \quad (10)$$

vzdálenost inflexních bodů: $l = 2\,930\text{ mm}$

$$\gamma_2 = [1 + (\pi^2 E_{1,\text{mean}} A_1 s) / (K l^2)]^{-1} \quad [-] \quad (11)$$

$$\gamma_2 = [1 + (3,14^2 \cdot 11\,000 \cdot 40\,500 \cdot 0,0279) / (2\,930^2)]^{-1} \quad [-]$$

$$\gamma_2 = 0,0653 \quad [-]$$

2) Výpočet efektivní ohybové tuhosti průřezu $(EI)_{\text{ef}}$

$$(EI)_{\text{ef}} = \sum (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad [\text{Nmm}^2] \quad (12)$$

$$a_1 = a_1 = \frac{H}{2} - \frac{h_1}{2} = \frac{81}{2} - \frac{27}{2} = 27 \text{ mm} \quad (13)$$

$$a_3 = \frac{H}{2} - \frac{h_3}{2} = \frac{81}{2} - \frac{27}{2} = 27 \text{ mm} \quad (14)$$

$$A_i = b \cdot h_i \quad [\text{mm}^2] \quad (15)$$

$$A_1 = b \cdot h_1 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = b \cdot h_3 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2$$

$$E_i I_i = E_i \frac{b h_i^3}{12} \quad [\text{mm}^3] \quad (16)$$

$$E_1 I_1 = E_1 \frac{b h_1^3}{12} = 11\,000 \cdot \frac{1\,500 \cdot 27^3}{12} = 27\,064\,125\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$E_3 I_3 = E_3 \frac{b h_3^3}{12} = 11\,000 \cdot \frac{1\,500 \cdot 27^3}{12} = 27\,064\,125\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{1. vrstva: } E_1 I_1 + \gamma_2 E_1 A_1 a_1^2 &= 27\,064\,125\,000 + 0,065 \cdot 11\,000 \cdot 40\,500 \cdot \\ &\quad \cdot (27)^2 = \underline{48\,275\,542\,978 \text{ Nmm}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{3. vrstva: } E_3 I_3 + \gamma_2 E_3 A_3 a_3^2 &= 27\,064\,125\,000 + 0,065 \cdot 11\,000 \cdot 40\,500 \cdot \\ &\quad \cdot (27)^2 = \underline{48\,275\,542\,978 \text{ Nmm}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (EI)_{\text{ef}} = \sum (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) &= 48\,275\,542\,978 + 48\,275\,542\,978 \\ &= 96\,551\,085\,956 \text{ Nmm}^2 \end{aligned}$$

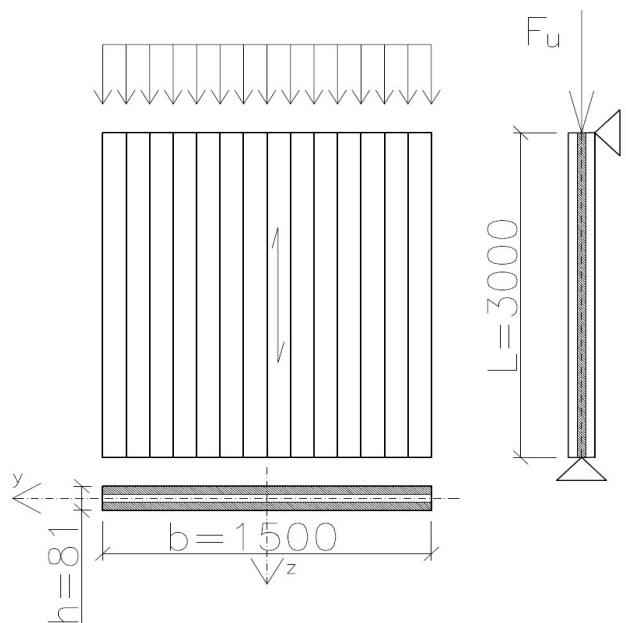
$$(EI)_{\text{ef}} = 96\,551\,085\,956 \text{ Nmm}^2$$

3) Výpočet plochy průřezu přenášejícího normálové síly

$$A_{0,\text{net}} = \sum A_{0,i} \quad [\text{mm}^2] \quad (17)$$

$$A_{0,\text{net}} = A_1 + A_3 = 40\,500 + 40\,500 = 81\,000 \text{ mm}^2$$

VÝPOČET VZPĚRNÉHO SOUČINITELE



vzpěrná délka: $L = 2\,930\text{ mm}$

Průřez: $(EI)_{ef} = 96\,551\,085\,956\text{ Nmm}$

$h = 81\text{ mm}$

$b = 1\,500\text{ mm}$

Materiál:

$E_{0,mean} = 11\,000\text{ N/mm}^2$

$f_{c,0,mena} = 50\text{ N/mm}^2$

Efektivní moment setrvačnosti:

$$I_{ef} = \frac{(EI)_{ef}}{E_{0,mean}} = \frac{96\,551\,085\,956}{11\,000} = 8\,777\,371\text{ mm}^4 \quad (18)$$

Účinná štíhlost:

$$\lambda_{ef} = 1 \cdot \left(\frac{A_{0,net}}{I_{ef}} \right)^{0,5} = 2\,930 \cdot \left(\frac{81\,000}{8\,777\,371} \right)^{0,5} [-] \quad (19)$$

$$\lambda_{ef} = 281,5 [-]$$

Relativní účinná štíhlost:

$$\lambda_{rel,ef} = \frac{\lambda_{ef}}{\pi} \cdot \left(\frac{f_{c,0k}}{E_{0,mean}} \right)^{0,5} = \frac{281}{3,14} \cdot \left(\frac{50}{11\,000} \right)^{0,5} = 6,04 \leq 0,3 \text{ ŠTÍHLÉ} \quad (20)$$

Vzpěrný součinitel:

$$k = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,ef} - 0,3) + \lambda_{rel,ef}^2) \quad (21)$$

$$= 0,5 \cdot (1 + 0,2 \cdot (6,0404 - 0,3) + 6,0404^2) = 19,317$$

$$k_c = \frac{1}{k + (k^2 - \lambda_{rel,ef}^2)^{0,5}} = \frac{1}{19,317 + (19,317^2 - 6,04^2)^{0,5}} = 0,027 \quad (22)$$

Vzpěrná únosnost:

$$F_R = k_c \cdot A_{0,net} \cdot f_{c,0,m} \text{ [kN]} \quad (23)$$

$$F_R = 0,027 \cdot 81\,000 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 107,52\text{ kN}$$

pro šroubované CLT:

$\beta_c = 0,2$

VZPĚRNÁ ÚNOSNOST $F_R = 107,52\text{ kN}$

Příloha 2- Výpočet vzpěrné únosnosti CLT panelu 2. řádem Modifikovanou Gama metodou

MATERIÁL

dřevo C 24 $E_{o,mean} = 11\,000 \text{ N/mm}^2$ $G_{mean} = 690 \text{ N/mm}^2$

$G_{R,mean} = 50 \text{ N/mm}^2$

$\rho_m = 420 \text{ kg/m}^3$

CLT PANEL

ROZMĚRY: vzpěrná délka: $L = 2\,930 \text{ mm}$

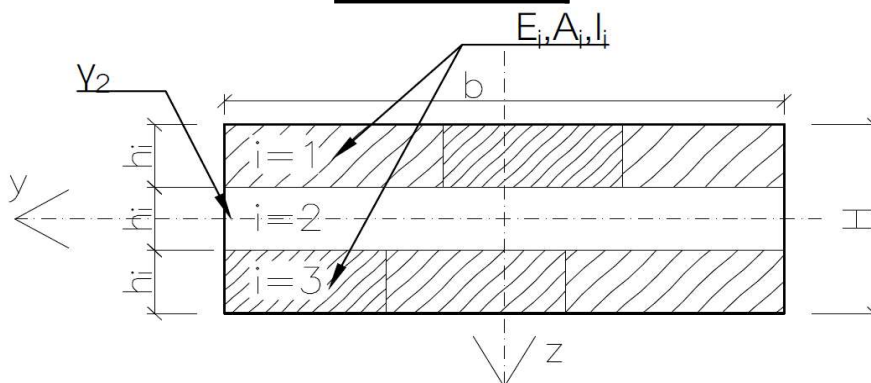
šířka: $b = 1\,500 \text{ mm}$

tloušťka: $h = 81 \text{ mm}$

šířka lamel: $b_{lam} = 200 \text{ mm}$

SKLADBA:

vrstvy:	i	orientace vláken [°]	výška vrstvy h_i [mm]	šířka vrstvy b [mm]	E_i [N/mm ²]	G_i [N/mm ²]
	1	0	27	1 500	11 000	690
	2	90	27		0	50
	3	0	27		11 000	690
	celková výška panelu H			81		



SPOJOVACÍ PROSTŘEDKY

VRUTY průměr: $d = 5 \text{ mm}$

průměr jádra: $d_{jádru} = 0,7 \cdot d = 0,7 \cdot 5 = 3,50 \text{ mm}$ (1)

efektivní průměr: $d_{ef} = 1,1 \cdot d_{jádru} = 1,1 \cdot 3,50 = 3,85 \text{ mm}$ (2)

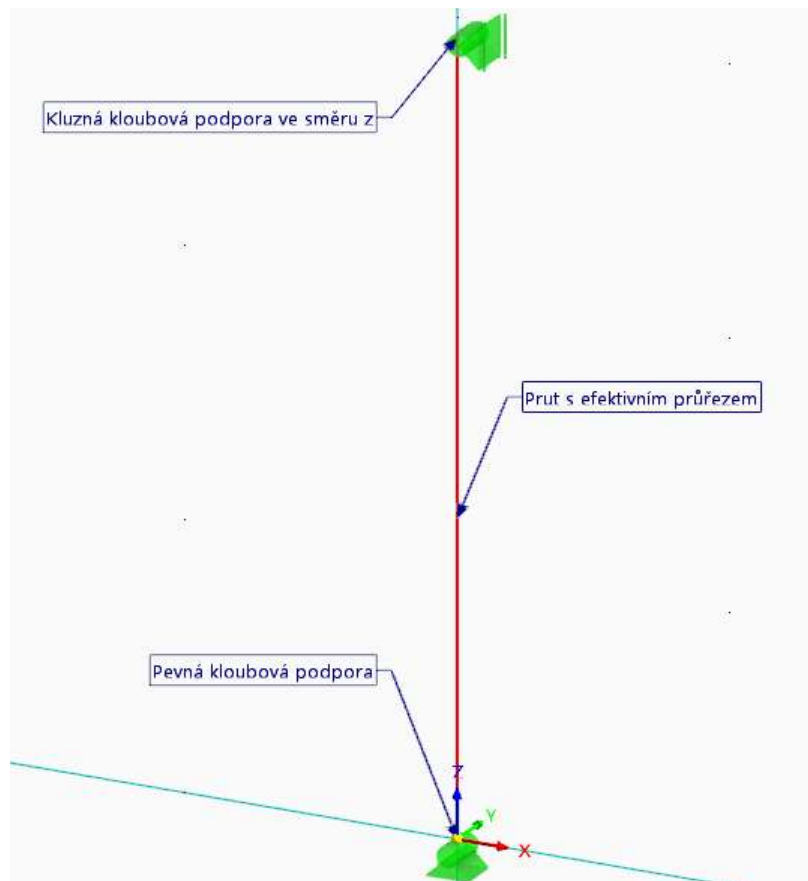
poč. spoj. prostředků

na jedno křížení lamel: $n_s = 2$

vzd. spoj. prostředků podélce prvku:

$$s = \frac{b_{lam}}{(b / b_{lam}) \cdot n_s} [\text{mm}] \quad (3)$$

$$s = \frac{200}{(1\,500 / 200) \cdot 2} = 13,33 \text{ mm}$$



VÝPOČET EFEKTIVNÍCH PRŮŘEZOVÝCH CHARAKTERISTIK

1) Výpočet součinitele γ

$$\gamma_i = [1 + (\pi^2 E_{i,mean} A_i s_i) / (K_i l^2)]^{-1} [-] \quad (4)$$

$$s_i/K_i = \frac{0,5 \cdot h_{90,i}}{G_{R,mean} b} [\text{mm}^2/\text{N}] \quad (5)$$

2. vrstva

$$\text{plocha 1. a 3. vrstvy: } A_1 = A_3 = b \cdot h_1 = 1500 \cdot 27 = 40500 \text{ mm}^2 \quad (6)$$

Poddajnost příčné vrstvy vlivem valivého smyku:

$$s_\gamma/K_\gamma = \frac{0,5 \cdot h_2}{G_{R,mean} b} = \frac{0,5 \cdot 27}{50 \cdot 1500} = 0,0002 \text{ mm}^2/\text{N}$$

Poddajnost příčné vrstvy vlivem prokluzu spoje:

Modul prokluzu jednoho jednostřížného spojovacího prostředku:

$$K_{u,1} = \frac{2}{3} \cdot \rho_m^{1,5} \frac{d_{ef}}{23} = \frac{2}{3} \cdot 420^{1,5} \frac{4}{23} = 961 \text{ N/mm} \quad (7)$$

Poddajnost spojovacích prostředků:

$$s/K_u = 2 \cdot \frac{s}{K_{u,n}} = 2 \cdot \frac{13}{961} = 0,0278 \text{ mm}^2/\text{N} \quad (8)$$

Celková poddajnost příčné vrstvy

$$s/K = s_\gamma/K_\gamma + s/K_u = 0,0002 + 0,0278 = 0,0279 \text{ mm}^2/\text{N} \quad (9)$$

vzdálenost inflexních bodů: $l = 2\,930 \text{ mm}$

$$\gamma_2 = [1 + (\pi^2 E_{1,\text{mean}} A_1 s) / (K l^2)]^{-1} \quad [-] \quad (10)$$

$$\gamma_2 = [1 + (3,14^2 \cdot 11\,000 \cdot 40\,500 \cdot 0,0279) / (2\,930^2)]^{-1} \quad [-]$$

$$\gamma_2 = 0,0653 \quad [-]$$

2) Výpočet efektivní ohybové tuhosti průřezu $(EI)_{\text{ef}}$

$$(EI)_{\text{eff}} = \sum (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad [\text{Nmm}^2] \quad (11)$$

$$a_1 = a_1 = \frac{h_1}{2} - \frac{H}{2} = \frac{27}{2} - \frac{81}{2} = -27 \text{ mm} \quad (12)$$

$$a_3 = \frac{H}{2} - \frac{h_3}{2} = \frac{81}{2} - \frac{27}{2} = 27 \text{ mm} \quad (13)$$

$$A_i = b \cdot h_i \quad [\text{mm}^2] \quad (14)$$

$$A_1 = b \cdot h_1 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = b \cdot h_3 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2$$

$$E_i I_i = E_i \frac{b h_i^3}{12} \quad [\text{mm}^3] \quad (15)$$

$$E_1 I_1 = E_1 \frac{b h_1^3}{12} = 11\,000 \cdot \frac{1\,500 \cdot 27^3}{12} = 27\,064\,125\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$E_3 I_3 = E_3 \frac{b h_3^3}{12} = 11\,000 \cdot \frac{1\,500 \cdot 27^3}{12} = 27\,064\,125\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$1. \text{ vrstva: } E_1 I_1 + \gamma_2 E_1 A_1 a_1^2 = 27\,064\,125\,000 + 0,065 \cdot 11\,000 \cdot 40\,500 \cdot (-27)^2 = 48\,275\,542\,978 \text{ Nmm}^2$$

$$3. \text{ vrstva: } E_3 I_3 + \gamma_2 E_3 A_3 a_3^2 = 27\,064\,125\,000 + 0,065 \cdot 11\,000 \cdot 40\,500 \cdot (27)^2 = 48\,275\,542\,978 \text{ Nmm}^2$$

$$(EI)_{\text{ef}} = \sum (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) = 48\,275\,542\,978 + 48\,275\,542\,978 = 96\,551\,085\,956 \text{ Nmm}^2$$

$$(EI)_{\text{ef}} = 96\,551\,085\,956 \text{ Nmm}^2$$

3) Výpočet plochy průřezu přenášejícího normálovou sílu

$$A_{0,\text{net}} = \sum A_{0,i} \quad [\text{mm}^2] \quad (16)$$

$$A_{0,\text{net}} = A_1 + A_3 = 40\,500 + 40\,500 = 81\,000 \text{ mm}^2$$

$$(EA)_A = E_0 \cdot A_{0,\text{net}} = 11\,000 \cdot 81\,000 = 891\,000\,000 \text{ N} \quad (17)$$

$$(EA)_{\text{ef}} = 891\,000\,000 \text{ N}$$

PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY

$(EI)_{ef}$ [kNm ²]	$(GA)_{ef}$ [kN]	$(EA)_{ef}$ [kN]
96,55	∞	891 000,00

Výpočet imperfekce prutu

vzpěrná délka panelu: $l = 2\,930$ mm

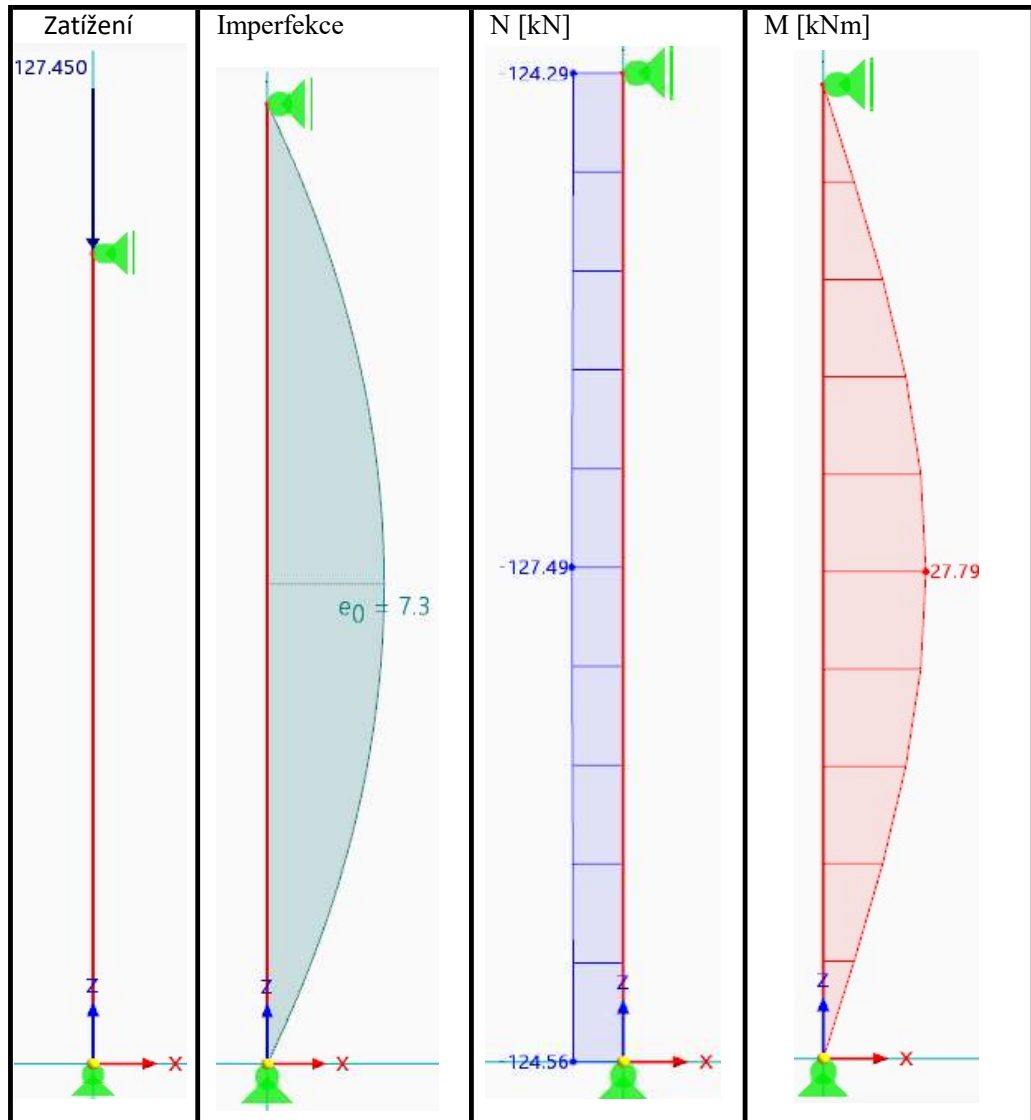
počáteční pootočení:

$$w_{imp} = 0,0025 \cdot h \text{ [mm]}$$

$$= 0,0025 \cdot 2930 = 7,3 \text{ mm}$$

(18)

VNITŘNÍ SÍLY V PRŮŘEZU



N [kN]	M [kNm]
-127,49	27,79

$$F = 127,45 \text{ kN}$$

VÝPOČET NORMÁLOVÉHO NAPĚTÍ V PRŮŘEZU

$$\sigma = \sigma_i + \sigma_{M,i} + \sigma_{N,i}$$

$$[\text{N/mm}^2]$$

(19)

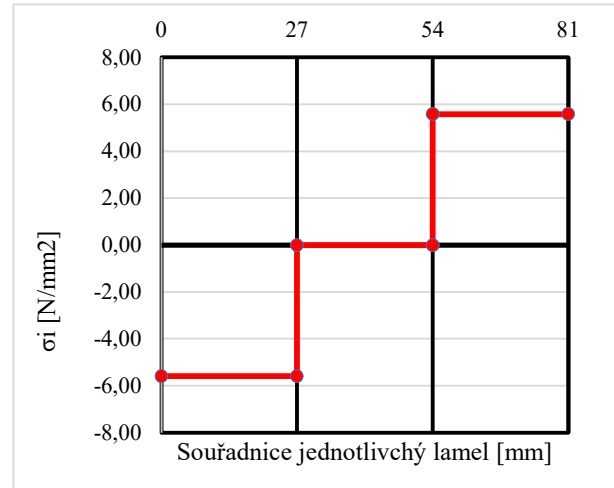
1) Normálové napětí- vliv excentricity jednotlivých vrstev

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M}{(EI)_{ef}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (20)$$

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_2 E_1 a_1 M}{(EI)_{ef}} = \frac{0,065 \cdot 11\,000 \cdot (-27) \cdot 27,79}{96\,551\,085\,956} \cdot 10^6 = -5,58 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_2 E_3 a_3 M}{(EI)_{ef}} = \frac{0,065 \cdot 11\,000 \cdot (27) \cdot 27,79}{96\,551\,085\,956} \cdot 10^6 = 5,58 \text{ N/mm}^2$$

lamela	pozice [mm]	σ_i [N/mm ²]
1	0	-5,58
	27	-5,58
2	27	0,00
	54	0,00
3	54	5,58
	81	5,58



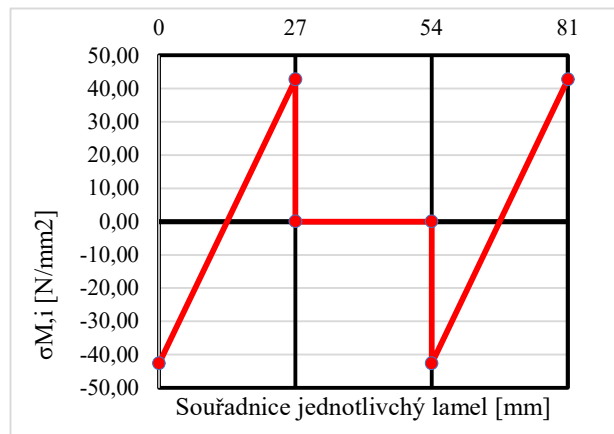
2) Normálové napětí- vliv ohybu jednotlivých vrstev

$$\sigma_{M,i} = \pm \frac{0,5 E_i h_i M}{(EI)_{ef}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (21)$$

$$\sigma_{M,1} = \pm \frac{0,5 E_1 h_1 M}{(EI)_{ef}} = \pm \frac{0,5 \cdot 11\,000 \cdot 27 \cdot 27,79}{96\,551\,085\,956} \cdot 10^6 = \pm 42,74 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{M,3} = \pm \frac{0,5 E_3 h_3 M}{(EI)_{ef}} = \pm \frac{0,5 \cdot 11\,000 \cdot 27 \cdot 27,79}{96\,551\,085\,956} \cdot 10^6 = \pm 42,74 \text{ N/mm}^2$$

lamela	pozice [mm]	$\sigma_{M,i}$ [N/mm ²]
1	0	-42,74
	27	42,74
2	27	0,00
	54	0,00
3	54	-42,74
	81	42,74



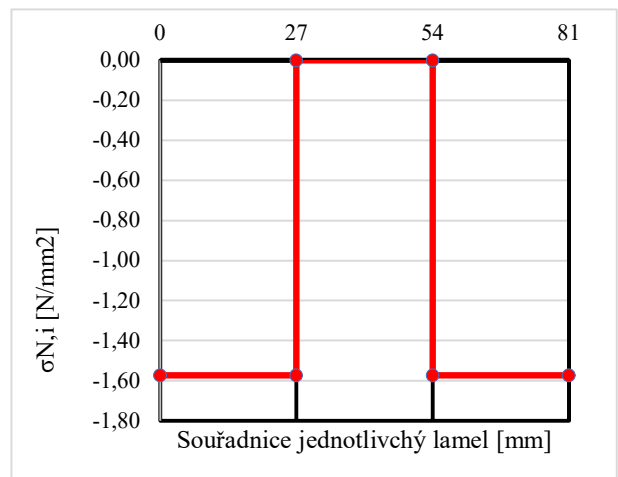
1) Normálové napětí- vliv normálové síly

$$\sigma_{N,i} = \frac{N_{A,i}}{A_i} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (22)$$

$$\sigma_{N,1} = \frac{N}{A_{0,net}} = \frac{-127}{81\,000} \cdot 10^3 = -1,57 \text{ N/mm}^2$$

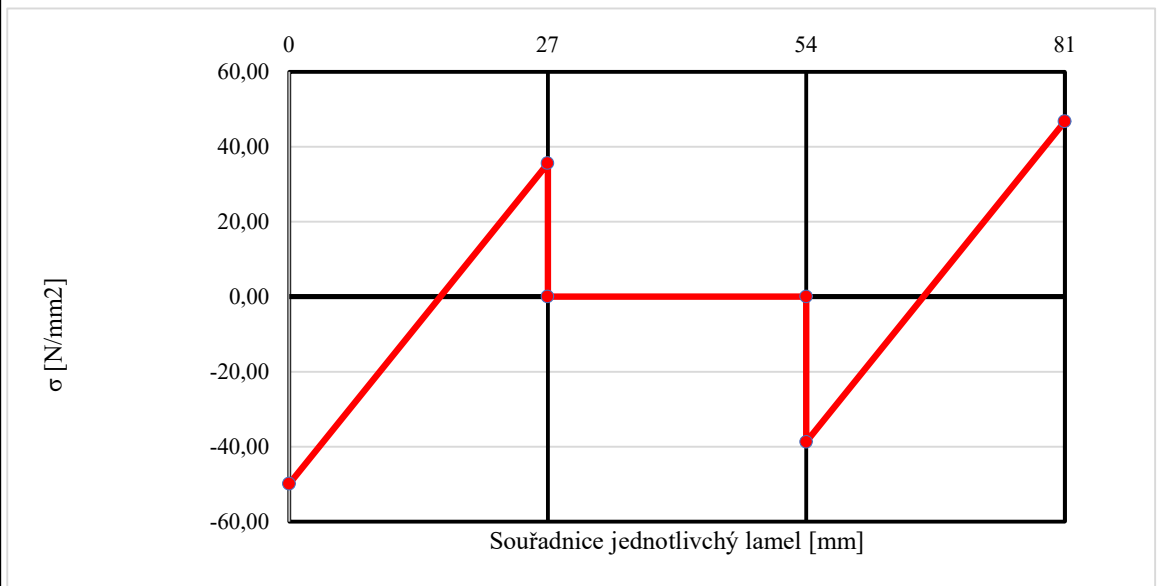
$$\sigma_{N,3} = \frac{N}{A_{0,net}} = \frac{-127}{81\,000} \cdot 10^3 = -1,57 \text{ N/mm}^2$$

lamela	pozice [mm]	$\sigma_{N,i}$ [N/mm ²]
1	0	-1,57
	27	-1,57
2	27	0,00
	54	0,00
3	54	-1,57
	81	-1,57



Celkové normálové napětí v průřezech

lamela	pozice [mm]	$\sigma_{M,i}$ [N/mm ²]	σ_i [N/mm ²]	$\sigma_{N,i}$ [N/mm ²]	σ [N/mm ²]	$f_{c,0,mean}$ [N/mm ²]	OK?
1	0	-42,74	-5,58	-1,57	-49,90	50	OK
	27	42,74	-5,58	-1,57	35,59	50	OK
2	27	-	-	-	0,00	50	OK
	54	-	-	-	0,00	50	OK
3	54	-42,74	5,58	-1,57	-38,73	50	OK
	81	42,74	5,58	-1,57	46,75	50	OK



VZPĚRNÁ ÚNOSNOST $F_R = 127,45$ kN

Příloha 3- Výpočet vzpěrné únosnosti CLT panelu 2. řádem Modifikovanou Gama metodou pro výpočet pomocí MKP

MATERIÁL

dřevo C 24 $E_{o,mean} = 11\,000 \text{ N/mm}^2$ $G_{mean} = 690 \text{ N/mm}^2$

$G_{R,mean} = 50 \text{ N/mm}^2$

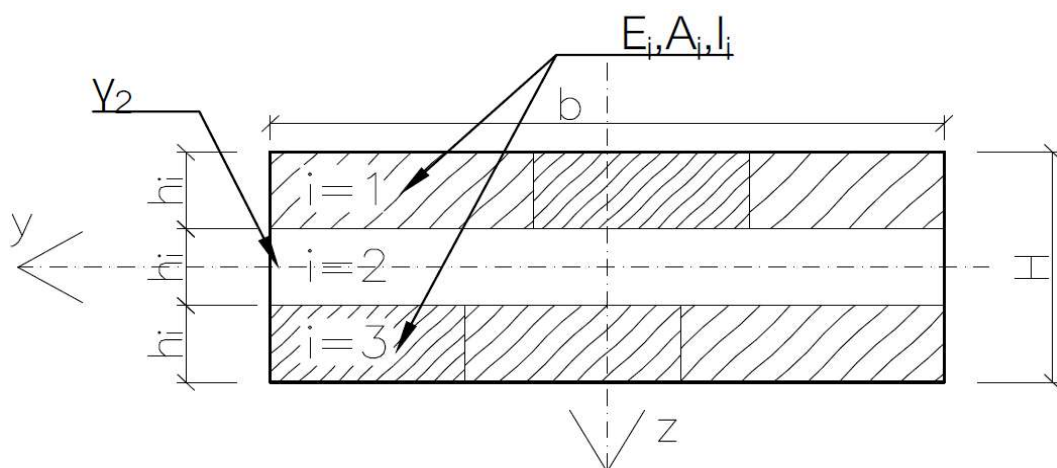
$\rho_m = 420 \text{ kg/m}^3$

CLT PANEL

ROZMĚRY: vzpěrná délka: $L = 2\,930 \text{ mm}$
 šířka: $b = 1\,500 \text{ mm}$
 tloušťka: $h = 81 \text{ mm}$
 šířka lamel: $b_{lam} = 200 \text{ mm}$

SKLADBA:

vrstvy:	i	orientace vláken [°]	výška vrstvy h_i [mm]	šířka vrstvy b [mm]	E_i [N/mm ²]	G_i [N/mm ²]
	1	0	27	1 500	11 000	690
	2	90	27		0	50
	3	0	27		11 000	690
	celková tloušťka panelu H			81		



Plochy průřezů vrstev

$$A_1 = b \cdot h_1 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = b \cdot h_3 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2$$

SPOJOVACÍ PROSTŘEDKY

Rozteč virtuálních spojovacích prostředků: $s_{teor} = 100 \text{ mm}$

$$\text{Délka virtuálních prostředků: } l_{teor} = \frac{h_1 + h_3}{2} + h_2 = \frac{27 + 27}{2} + 27 = 54 \text{ mm} \quad (1)$$

VRUTY

průměr: $d = 5 \text{ mm}$

průměr jádra: $d_{jadro} = 0,7 \cdot d = 0,7 \cdot 5 = 3,50 \text{ mm} \quad (2)$

efektivní průměr: $d_{ef} = 1,1 \cdot d_{jadro} = 1,1 \cdot 3,50 = 3,85 \text{ mm} \quad (3)$

poč. spoj. prostředků

na jedno křížení lamel: $n_s = 2$

vzd. spoj. prostředků podélce prvku:

$$s = \frac{b_{lam}}{(b / b_{lam}) \cdot n_s} [\text{mm}] \quad (4)$$

$$s = \frac{200}{(1500 / 200) \cdot 2} = 13,33 \text{ mm}$$

PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY PODÉLNÝCH VRSTEV

$$W_1 = \frac{b h_1^2}{6} = \frac{1500 \cdot 27^2}{6} = 182\,250 \text{ Nmm}^2 \quad (5)$$

$$W_3 = \frac{b h_3^2}{6} = \frac{1500 \cdot 27^2}{6} = 182\,250 \text{ Nmm}^2 \quad (6)$$

VÝPOČET OHYBOVÉ TUHOSTI VIRTUÁLNÍCH PRUTŮ

Modul prokluzu příčné vrstvy vlivem valivého smyku

Modul prokluzu příčné vrstvy

$$K_R = \frac{G_2 \cdot b}{h_2} = \frac{50 \cdot 1500}{27} = 2\,778 \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

Teoretický modul prokluzu příčné vrstvy

$$K_{R,teor} = K_R \cdot s_{teor} = 2\,778 \cdot 100 = 277\,778 \text{ N/mm} \quad (8)$$

Modul prokluzu spojovacích prostředků

Modul prokluzu jednoho jednostřížného spojovacího prostředku:

$$K_{u,1} = \frac{2}{3} \cdot \rho_m^{1,5} \cdot \frac{d_{ef}}{3} = \frac{2}{3} \cdot 420^{1,5} \cdot \frac{4}{23} = 961 \text{ N/mm} \quad (9)$$

Liniový modul prokluzu jednostřížných spojovacích prostředků:

$$\frac{K_{u,0}}{s_0} = K_{u,n} \cdot \frac{1}{s_0} = 961 \cdot \frac{1}{13} = 72 \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

Modul prokluzu virtuálního spojovacího prostředku

$$K_{u,teor} = \frac{K_{u,0}}{s_0} \cdot s_{teor} = 72 \cdot 100 = 7\,204 \text{ N/mm} \quad (11)$$

Celkový teoretický modul prokluzu virtuálního prutu:

$$K_{90,teor} = \left(\frac{1}{K_{R,teor}} + \frac{2}{K_{u,teor}} \right)^{-1} [\text{N/mm}] \quad (12)$$

$$K_{90,teor} = \left(\frac{1}{277\,778} + \frac{2}{7\,204} \right)^{-1} = 3\,556 \text{ N/mm}$$

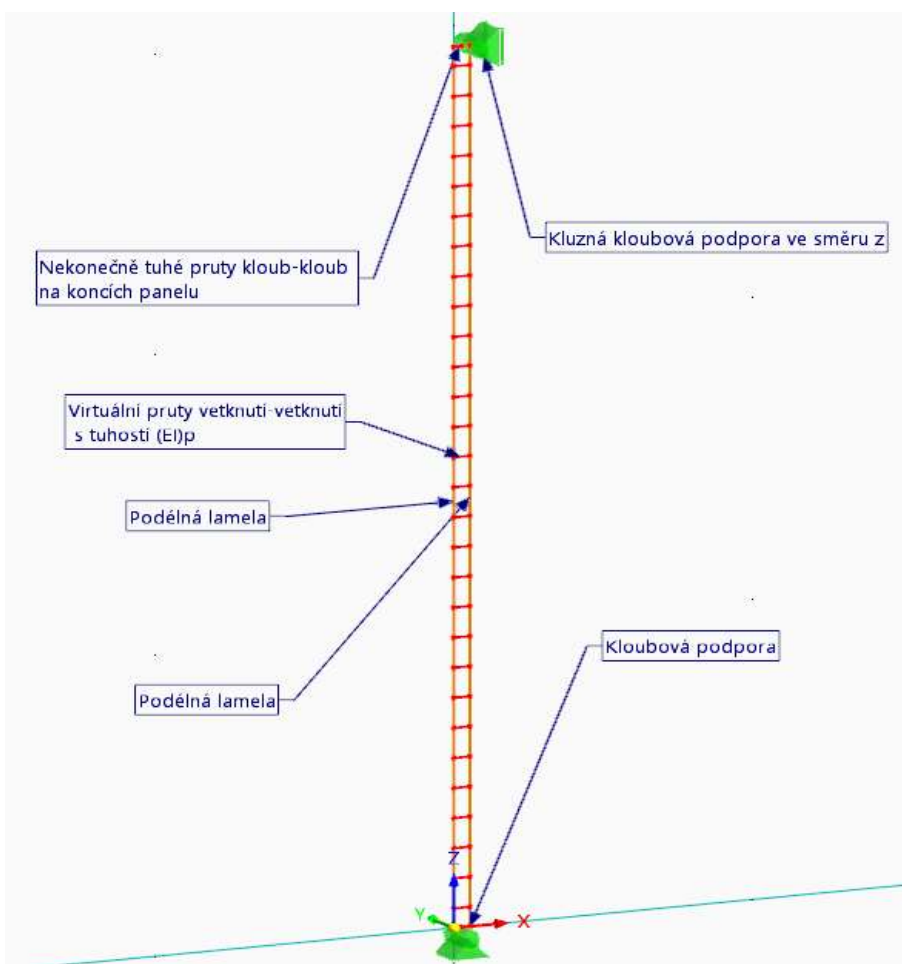
Ohybová tuhost virtuálních prutů

$$(EI)_p = \frac{K_{90,teor}}{24} \cdot \left[(h_1 + h_2)^3 + (h_2 + h_3)^3 \right] [\text{Nmm}^2] \quad (13)$$

$$(EI)_p = \frac{3\,556}{24} \cdot \left[(27 + 27)^3 + (27 + 27)^3 \right] = 46\,660\,721 \text{ Nmm}^2$$

VIRTUÁLNÍ PRUTY:	délka:	$l_{teor} = 54 \text{ mm}$
	rozteč:	$s_{teor} = 100 \text{ mm}$
	ohybová tuhost:	$(EI)_p = 46\,660\,721 \text{ Nmm}^2$
	ohybová tuhost:	$(EI)_p = 0,046661 \text{ kNm}^2$

MODELOVÁNÍ PANELU CLT



Výpočet imperfekce prutu

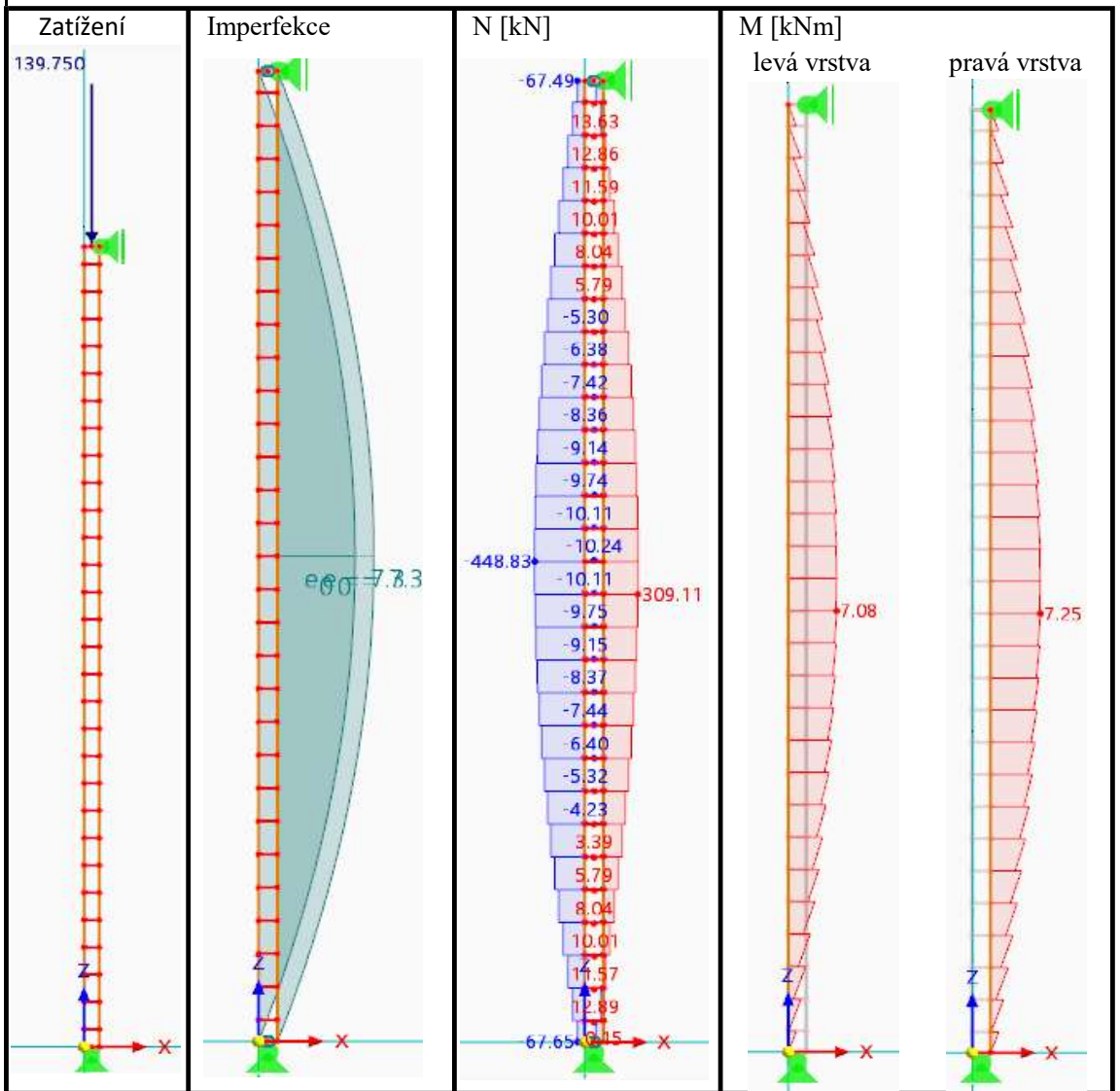
vzpěrná délka panelu: $l = 2\,930\text{ mm}$

počáteční pootočení:

$$\begin{aligned}w_{\text{imp}} &= 0,0025 \cdot h \text{ [mm]} \\ &= 0,0025 \cdot 2930 = \boxed{7,3 \text{ mm}}\end{aligned}$$

(14)

VNITŘNÍ SÍLY V PODÉLNÝCH VRSTVÁCH



Vrstva	N [kN]	M [kNm]
1	-448,83	7,08
3	309,11	7,25

$$F = 139,75 \text{ kN}$$

Normálové napětí ve vrstvách

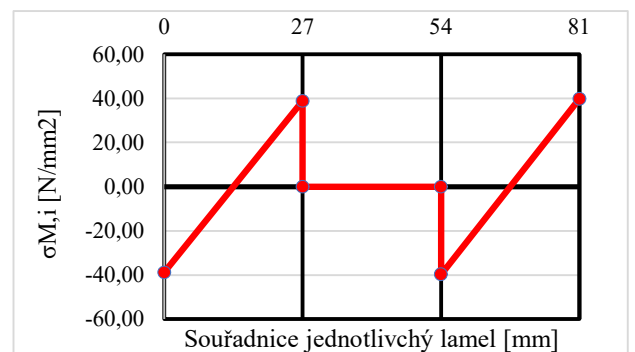
1) Normálové napětí od ohybového momentu

$$\sigma_{M,i} = \frac{M_i}{W_i} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (15)$$

$$\sigma_{M,1} = \pm \frac{M_1}{W_1} = \frac{7}{182\,250} \cdot 10^6 = \pm 38,85 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{M,3} = \pm \frac{M_3}{W_3} = \frac{7}{182\,250} \cdot 10^6 = \pm 39,78 \text{ N/mm}^2$$

lamela	pozice [mm]	$\sigma_{M,i}$ [N/mm ²]
1	0	-38,85
	27	38,85
2	27	0,00
	54	0,00
3	54	-39,78
	81	39,78



2) Normálové napětí od normálové síly

$$\sigma_{N,i} = \frac{N_i}{A_i} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

(16)

$$\sigma_{N,1} = \frac{N_1}{A_1} = \frac{-449}{40\,500} \cdot 10^3 = -11,08 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{N,3} = \frac{N_3}{A_3} = \frac{309}{40\,500} \cdot 10^3 = 7,63 \text{ N/mm}^2$$

lamela	pozice [mm]	$\sigma_{N,i}$ [N/mm ²]
1	0	-11,08
	27	-11,08
2	27	0,00
	54	0,00
3	54	7,63
	81	7,63



Celkové normálové napětí v průřezech

lamela	pozice [mm]	$\sigma_{M,i}$ [N/mm ²]	$\sigma_{N,i}$ [N/mm ²]	σ_i [N/mm ²]	$f_{c,0,mean}$ [N/mm ²]	OK?
1	0	-38,85	-11,08	-49,93	50	OK
	27	38,85	-11,08	27,77	50	OK
2	27	-	-	0,00	50	OK
	54	-	-	0,00	50	OK
3	54	-39,78	7,63	-32,15	50	OK
	81	39,78	7,63	47,41	50	OK



VZPĚRNÁ ÚNOSNOST $F_R = 139,75$ kN

Příloha 4- Výpočet vzpěrné únosnosti CLT panelu 2. řádem Metodou smykové analogie

MATERIÁL

dřevo C 24

$$E_{o,mean} = 11\,000 \text{ N/mm}^2 \quad G_{mean} = 690 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{90,mean} = 370 \text{ N/mm}^2$$

$$G_{R,mean} = 50 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho_m = 420 \text{ kg/m}^3$$

CLT PANEL

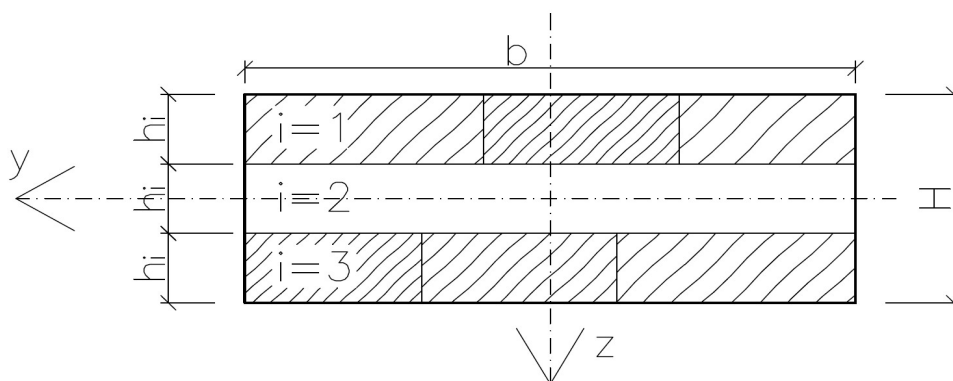
ROZMĚRY:

vzpěrná délka: $L = 2\,930 \text{ mm}$

šířka: $b = 1\,500 \text{ mm}$

tloušťka: $h = 81 \text{ mm}$

šířka lamel: $b_{lam} = 200 \text{ mm}$



vrstvy:

i	orientace vláken [°]	výška vrstvy h_i [mm]	šířka vrstvy b [mm]	E_i [N/mm ²]	G_i [N/mm ²]
1	0	27	1 500	11 000	690
2	90	27		0	50
3	0	27		11 000	690
celková výška panelu H		81			

SPOJOVACÍ PROSTŘEDKY

VRUTY

průměr: $d = 5 \text{ mm}$

průměr jádra: $d_{j\acute{a}dro} = 0,7 \cdot d = 0,7 \cdot 5 = 3,50 \text{ mm} \quad (1)$

efektivní průměr: $d_{ef} = 1,1 \cdot d_{j\acute{a}dro} = 1,1 \cdot 3,50 = 3,85 \text{ mm} \quad (2)$

poč. spoj. prostředků

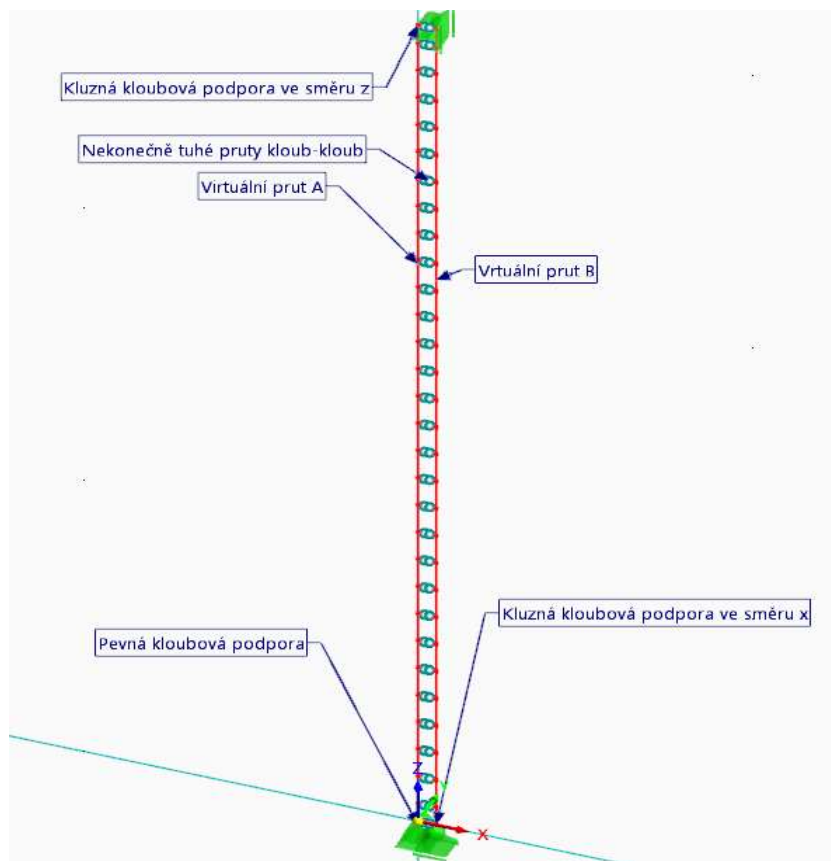
na jedno křížení lamel: $n_s = 2$

vzd. spoj. prostředků podélce prvku:

$$s = \frac{b_{lam}}{(b / b_{lam}) \cdot n_s} [\text{mm}] \quad (3)$$

$$s = \frac{200}{(1\,500 / 200) \cdot 2} = 13,33 \text{ mm}$$

MODELOVÁNÍ CLT PANELU



TUHOST PRŮŘEZU VIRTUÁLNÍHO PRUTU A

NORMÁLOV TUHOST

Plocha podélných vrstev:

$$A_{0,\text{net}} = A_1 + A_3 = 40\,500 + 40\,500 = 81\,000 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

$$(EA)_A = E_0 \cdot A_0 = 11\,000 \cdot 81\,000 = 891\,000\,000 \text{ N} \quad (2)$$

$$(EA)_A = 891\,000\,000 \text{ N}$$

OHYBOVÁ TUHOST

$$(EI)_A = \sum E_i I_i \text{ [Nmm}^2\text{]} \quad (5)$$

$$E_1 I_1 = E_1 \frac{b h_1^3}{12} = 11\,000 \cdot \frac{1\,500 \cdot 27^3}{12} = 27\,064\,125\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$E_2 I_2 = E_2 \frac{b h_2^3}{12} = 0 \cdot \frac{1\,500 \cdot 27^3}{12} = 0 \text{ Nmm}^2$$

$$E_3 I_3 = E_3 \frac{b h_3^3}{12} = 11\,000 \cdot \frac{1\,500 \cdot 27^3}{12} = 27\,064\,125\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$(EI)_A = \sum E_i I_i = 54\,128\,250\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$(EI)_A = 54\,128\,250\,000 \text{ Nmm}^2$$

SMYKOVÁ TUHOST

$$(GA)_A \approx \infty$$

TUHOST PRŮŘEZU VIRTUÁLNÍHO PRUTU B

OHYBOVÁ TUHOST

$$(EI)_B = \sum E_i A_i a_i^2 \text{ [Nmm}^2\text{]} \quad (6)$$

Plochy jednotlivých vrstev

$$A_1 = b \cdot h_1 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = b \cdot h_2 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = b \cdot h_3 = 1\,500 \cdot 27 = 40\,500 \text{ mm}^2$$

$$a_1 = \frac{h_1}{2} - \frac{H}{2} = \frac{27}{2} - \frac{81}{2} = -27 \text{ mm} \quad (7)$$

$$a_2 = h_1 + \frac{h_2}{2} - \frac{H}{2} = 27 + \frac{27}{2} - \frac{81}{2} = 0 \text{ mm} \quad (8)$$

$$a_3 = h_1 + h_2 + \frac{h_3}{2} - \frac{H}{2} = 27 + 27 + \frac{27}{2} - \frac{81}{2} = 27 \text{ mm} \quad (9)$$

$$E_1 A_1 a_1^2 = 11\,000 \cdot 40\,500 \cdot (-27)^2 = 324\,769\,500\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$E_2 A_2 a_2^2 = 0 \cdot 40\,500 \cdot (0)^2 = 0 \text{ Nmm}^2$$

$$E_3 A_3 a_3^2 = 11\,000 \cdot 40\,500 \cdot (27)^2 = 324\,769\,500\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$(EI)_B = \sum E_i A_i a_i^2 = 649\,539\,000\,000 \text{ Nmm}^2$$

$$(EI)_B = 649\,539\,000\,000 \text{ Nmm}^2$$

SMYKOVÁ TUHOSTI

$$\frac{1}{(GA)_B} = \frac{1}{a^2} \left[\sum \frac{1}{k_i} + \frac{h_1}{2 G_1 b_1} + \sum \frac{h_i}{G_i b_i} + \frac{h_n}{2 G_n b_n} \right] [1/N] \quad (10)$$

$$a = H - \frac{h_1}{2} - \frac{h_3}{2} = 81 - \frac{27}{2} - \frac{27}{2} = 54 \text{ mm} \quad (11)$$

PROKLUZ VE SPOJÍCH

Modul prokluzu jednoho jednostřížného spojovacího prostředku:

$$K_{u,1} = \frac{2}{3} \cdot \rho_m^{1,5} \frac{d_{ef}}{23} = \frac{2}{3} \cdot 420^{1,5} \frac{3,85}{23} = 961 \text{ N/mm} \quad (12)$$

Modul prokluzu spojovacích prostředků:

$$k_i = K_{u,1} \cdot \frac{1}{s} = 961 \cdot \frac{1}{13,33} = 72 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

Rozhraní vrstev	modul prokluzu spoje k_i [N/mm ²]	$1/k_i$ [mm ² /N]
1;2	72	0,014
2;3	72	0,014

$$\sum \frac{1}{k_i} = 0,028 \text{ mm}^2/\text{N}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{h_1}{G_1 b_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{27}{690 \cdot 1500} = 0,000013 \text{ mm}^2/\text{N}$$

$$\frac{h_2}{G_2 b_2} = \frac{27}{50 \cdot 1500} = 0,000360 \text{ mm}^2/\text{N}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{h_3}{G_3 b_3} = \frac{27}{690 \cdot 1500} = 0,000013 \text{ mm}^2/\text{N}$$

$$\frac{h_1}{2 G_1 b_1} + \sum \frac{h_i}{G_i b_i} + \frac{h_n}{2 G_n b_n} = 0,000386 \text{ mm}^2/\text{N}$$

$$\frac{1}{(GA)_B} = \frac{1}{a^2} \left[\sum \frac{1}{k_i} + \frac{h_1}{2 G_1 b_1} + \sum \frac{h_i}{G_i b_i} + \frac{h_3}{2 G_3 b_3} \right]$$

$$\frac{1}{(GA)_B} = \frac{1}{54^2} \left[0,028 + 0,000386 \right] = 9,653\text{E-}06 \text{ 1/N}$$

$$(GA)_B = 103\,594 \text{ N}$$

VÝPOČET NÁHRADNÍCH VIRTUÁLNÍCH PRUTŮ PRO STAT. PROGRAM

Prut	(EI) [kNm ²]	(GA) [kN]	(EA) [kN]
A	54,13	$\approx \infty$	891 000,00
B	649,54	103,59	0,00

virtuální materiál:

$$E = E_{0,\text{mean}} = 11\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$G = G_{0,\text{mean}} = 690 \text{ N/mm}^2$$

Výpočet imperfekce

vzpěrná délka panelu: $h = 2\,930 \text{ mm}$

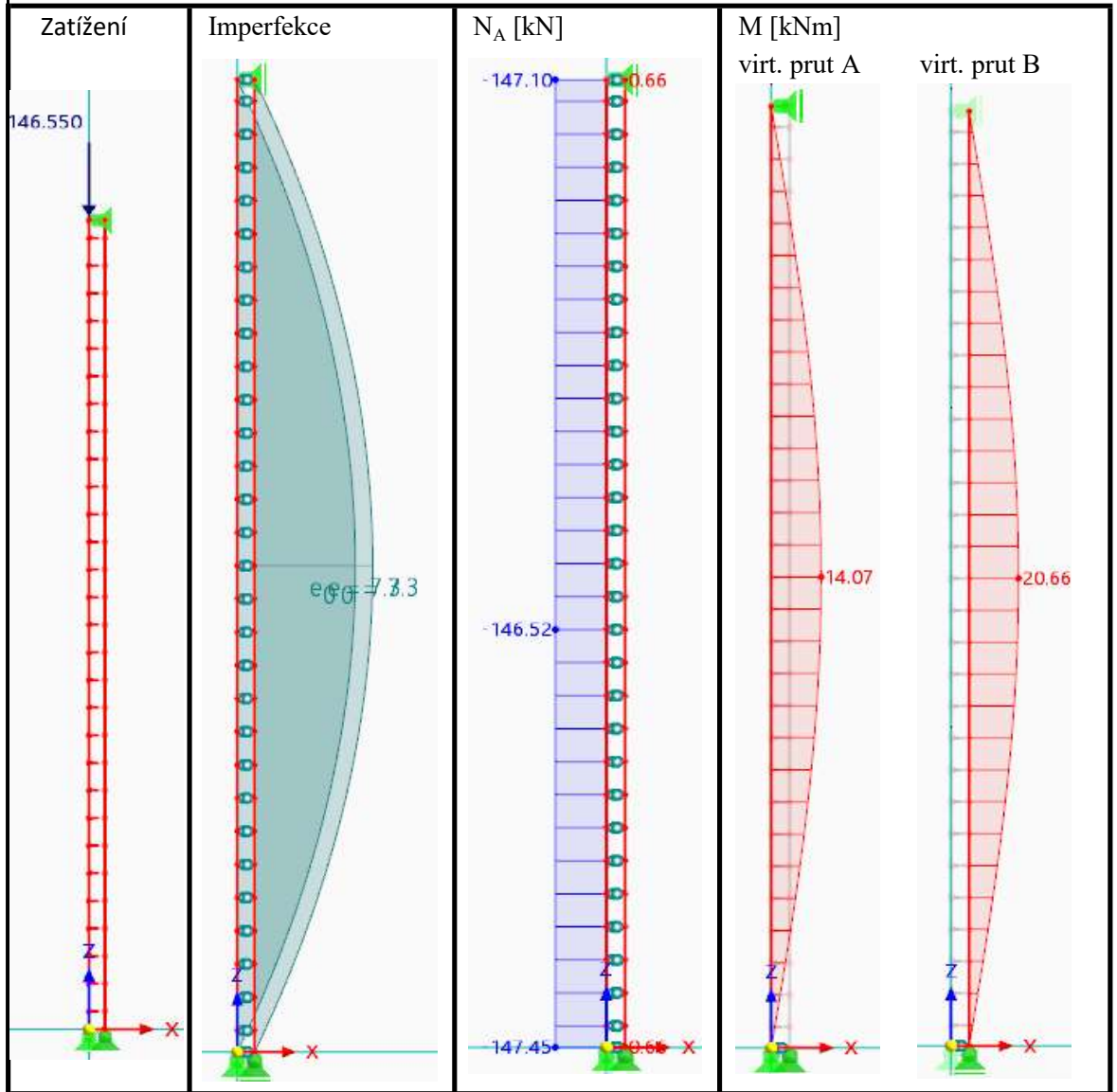
počáteční pootočení:

$$w_{\text{imp}} = 0,0025 h \text{ [mm]}$$

$$= 0,0025 \cdot 2930 = 7,33 \text{ mm}$$

(14)

VNITŘNÍ SÍLY VE VIRTUÁLNÍCH PRUTECH



Síla	Prut A	Prut B
N [kN]	-146,52	-
M [kNm]	14,07	20,66

$$F = 146,55 \text{ kN}$$

1) VNITŘNÍ SÍLY VE VRSTVÁCH PRUTU A

NORMÁLOVÁ SÍLA

$$N_{A,i} = \frac{N_A}{A_0} \cdot A_i \text{ [N]} \quad (15)$$

$$N_{A,1} = \frac{N_A}{A_0} \cdot A_1 = \frac{-146,52}{81\,000} \cdot 40\,500 \cdot 10^3 = -73\,260 \text{ N}$$

$$N_{A,3} = \frac{N_A}{A_0} \cdot A_3 = \frac{-146,52}{81\,000} \cdot 40\,500 \cdot 10^3 = -73\,260 \text{ N}$$

OHYBOVÝ MOMENT

$$M_{A,i} = \frac{E_i I_i}{(EI)_A} M_A \text{ [Nmm]} \quad (16)$$

$$M_{A,1} = \frac{E_1 I_1}{(EI)_A} M_A = \frac{27\,064\,125\,000}{54\,128\,250\,000} \cdot 14,07 \cdot 10^6 = 7\,035\,000 \text{ Nmm}$$

$$M_{A,2} = \frac{E_2 I_2}{(EI)_A} M_A = \frac{0}{54\,128\,250\,000} \cdot 14,07 \cdot 10^6 = 0 \quad \text{Nmm}$$

$$M_{A,3} = \frac{E_3 I_3}{(EI)_A} M_A = \frac{27\,064\,125\,000}{54\,128\,250\,000} \cdot 14,07 \cdot 10^6 = 7\,035\,000 \quad \text{Nmm}$$

NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ

1) Od ohybového momentu

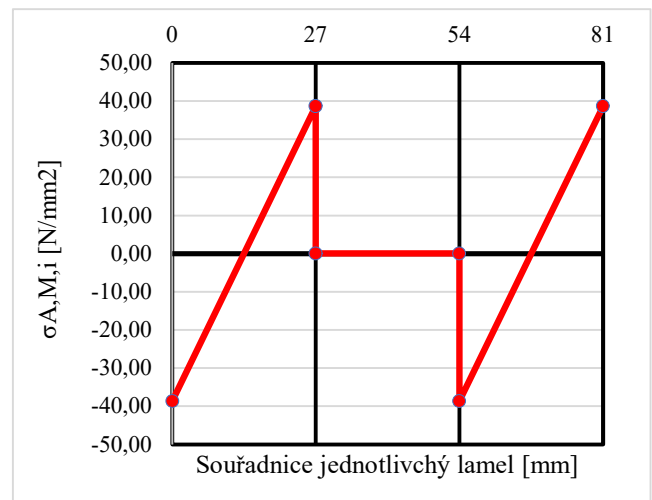
$$\sigma_{A,M,i} = \pm \frac{M_{A,i}}{I_i} \cdot \frac{h_i}{2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (17)$$

$$\sigma_{A,M,1} = \pm \frac{M_{A,1}}{I_1} \cdot \frac{h_1}{2} = \pm \frac{7\,035\,000}{2\,460\,375} \cdot \frac{27}{2} = \pm 38,60 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{A,M,2} = \pm \frac{M_{A,2}}{I_2} \cdot \frac{h_2}{2} = \pm \frac{0}{2\,460\,375} \cdot \frac{27}{2} = \pm 0,00 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{A,M,3} = \pm \frac{M_{A,3}}{I_3} \cdot \frac{h_3}{2} = \pm \frac{7\,035\,000}{2\,460\,375} \cdot \frac{27}{2} = \pm 38,60 \quad \text{N/mm}^2$$

lamela	pozice [mm]	$\sigma_{A,M,i}$ [N/mm ²]
1	0	-38,60
	27	38,60
2	27	0,00
	54	0,00
3	54	-38,60
	81	38,60



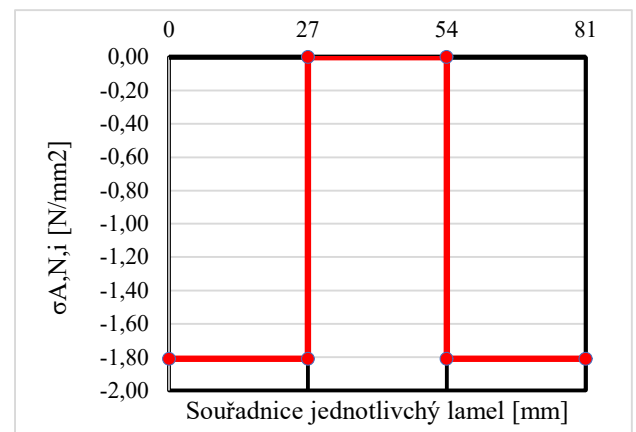
1) Od normálové síly

$$\sigma_{A,N,i} = \frac{N_{A,i}}{A_i} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (18)$$

$$\sigma_{A,N,1} = \frac{N_{A,1}}{A_1} = \frac{-73\,260}{40\,500} = -1,81 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{A,N,3} = \frac{N_{A,3}}{A_3} = \frac{-73\,260}{40\,500} = -1,81 \quad \text{N/mm}^2$$

lamela	pozice [mm]	$\sigma_{A,N,i}$ [N/mm ²]
1	0	-1,81
	27	-1,81
2	27	0,00
	54	0,00
3	54	-1,81
	81	-1,81



1) VNITŘNÍ SÍLY VE VRSTVÁCH PRUTU B

NORMÁLOVÁ SÍLA

$$N_{B,i} = \frac{E_i I_i z_i}{(EI)_B} M_B \text{ [N]} \quad (19)$$

$$N_{B,1} = \frac{E_1 A_1 z_1}{(EI)_B} M_B = \frac{11\,000 \cdot 40\,500 \cdot -27}{649\,539\,000\,000} \cdot 20,66 \cdot 10^6 = -382593 \text{ N}$$

$$N_{B,2} = \frac{E_2 A_2 z_2}{(EI)_B} M_B = \frac{0 \cdot 40\,500 \cdot 0}{649\,539\,000\,000} \cdot 20,66 \cdot 10^6 = 0 \text{ N}$$

$$N_{B,3} = \frac{E_3 A_3 z_3}{(EI)_B} M_B = \frac{11\,000 \cdot 40\,500 \cdot 27}{649\,539\,000\,000} \cdot 20,66 \cdot 10^6 = 382593 \text{ N}$$

NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ

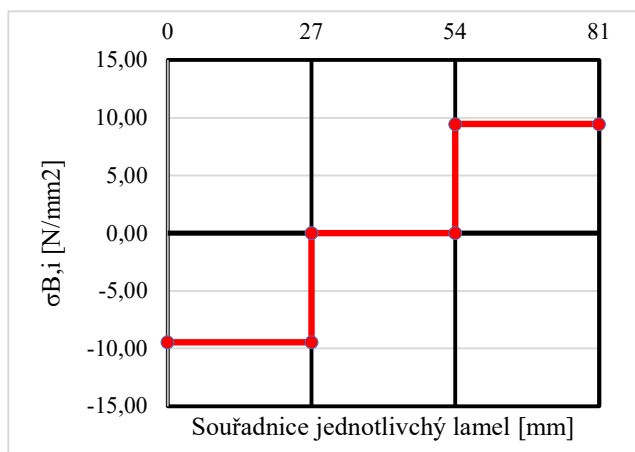
$$\sigma_{B,i} = \frac{N_{B,i}}{b_i h_i} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (20)$$

$$\sigma_{B,1} = \frac{N_{B,1}}{b_1 h_1} = \frac{-382593}{1\,500 \cdot 27} = -9,45 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{B,2} = \frac{N_{B,2}}{b_2 h_2} = \frac{0}{1\,500 \cdot 27} = 0,00 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{B,3} = \frac{N_{B,3}}{b_3 h_3} = \frac{382593}{1\,500 \cdot 27} = 9,45 \text{ N/mm}^2$$

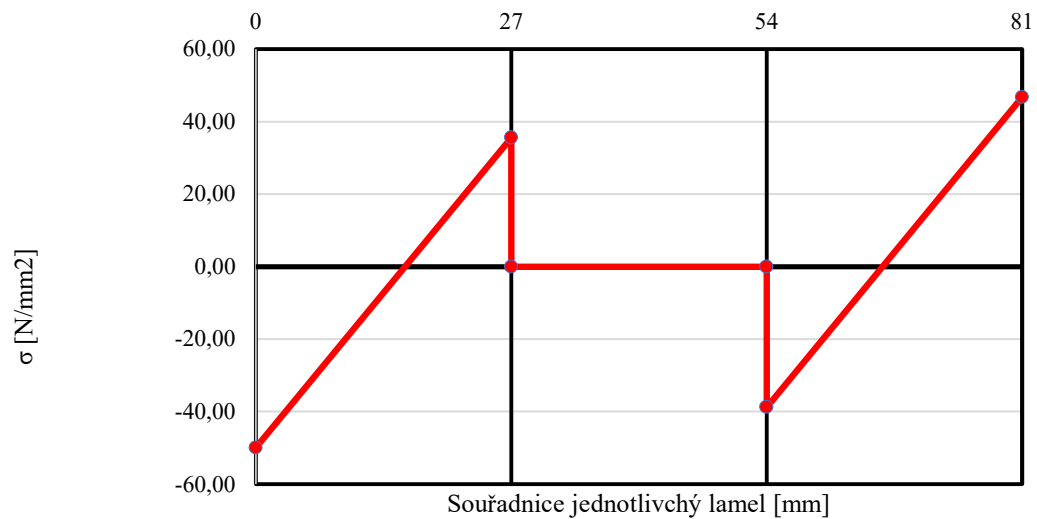
lamela	pozice [mm]	$\sigma_{B,i}$ [N/mm ²]
1	0	-9,45
	27	-9,45
2	27	0,00
	54	0,00
3	54	9,45
	81	9,45



VÝSLEDNÉ NORMÁLOVÉ NAPĚTÍ V PRŮŘEZU

Celkové normálové napětí v průřezech

lamela	pozice [mm]	$\sigma_{A,M,i}$ [N/mm ²]	$\sigma_{A,N,i}$ [N/mm ²]	$\sigma_{B,i}$ [N/mm ²]	σ [N/mm ²]	$f_{c,0,mean}$ [N/mm ²]	OK?
1	0	-38,60	-1,81	-9,45	-49,86	50	OK
	27	38,60	-1,81	-9,45	27,35	50	OK
2	27	0,00	0,00	0,00	0,00	50	OK
	54	0,00	0,00	0,00	0,00	50	OK
3	54	-38,60	-1,81	9,45	-30,96	50	OK
	81	38,60	-1,81	9,45	46,24	50	OK

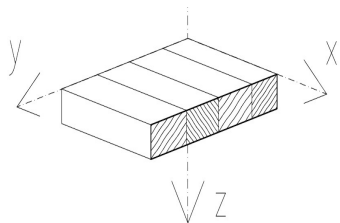


VZPĚRNÁ ÚNOSNOST $F_R = 146,55$ kN

Příloha 5- Výpočet tuhosti příčné vrstvy pomocí numerického programu

1) Materiálové parametry

Dřevo



		Směr						
		x	y	z	xy	yz	xz	-
Veličina	E	11 000	0	0	0	0	0	N/mm ²
		0	370	0	0	0	0	N/mm ²
		0	0	370	0	0	0	N/mm ²
	μ	0	0	0	0,031	0	0	-
		0	0	0	0	0,480	0	-
		0	0	0	0	0,000	0,017	-
	G	0	0	0	690	0	0	N/mm ²
		0	0	0	0	50	0	N/mm ²
		0	0	0	0	0	690	N/mm ²

- lineárně pružné chování do dosažení meze kluzu v tlaku, meze pevnosti v tahu v tlaku je elastické chování následováno ideálně plastickou větví

$$f_{c,0,m} = 50 \text{ N/mm}^2$$

Ocel:

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$G = 80\,700 \text{ N/mm}^2$$

$$\mu = 0,3 \text{ -}$$

$$f_{y,m} = 500 \text{ N/mm}^2$$

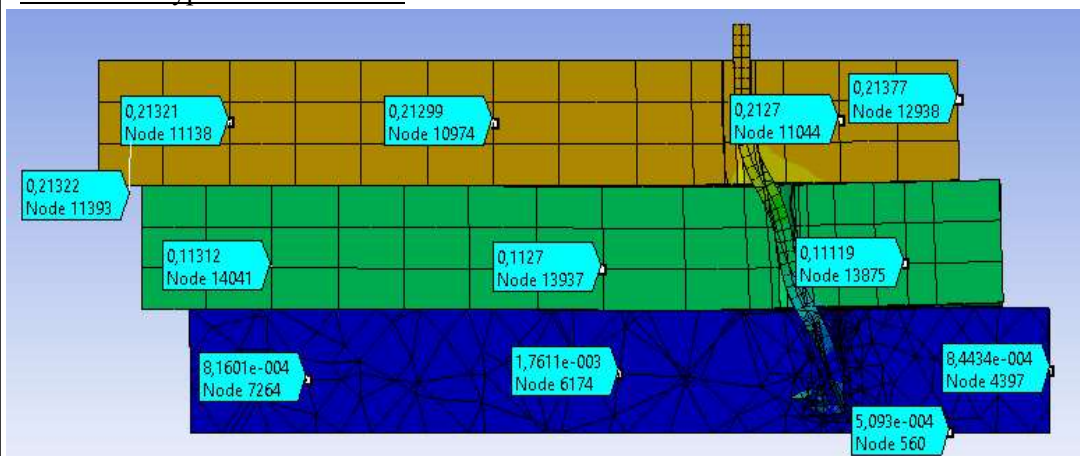
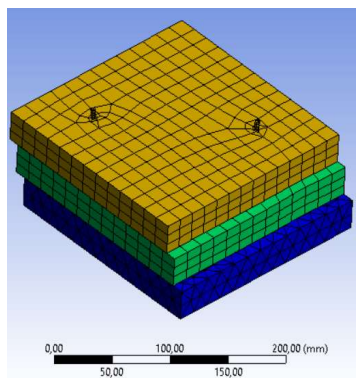
- lineárně pružné přetváření do dosažení meze kluzu, poté ideálně plastické

Součinitele tření:

dřevo-dřevo:	0,65
dřevo-ocel:	0,55

2) Výpočet tuhosti příčné vrstvy panelu

Deformace výpočtového modelu



(štítky obsahují deformaci daného bodu v mm)

Tuhost vymodelovaného elementu

Zatěžovací síla: $F = 1\,000\text{ N}$

Deformace: $v = 0,213\text{ mm}$

$$\text{Tuhost} \quad K_{u,+} = \frac{F}{v} = \frac{1\,000}{0,213} = 4\,690\text{ N/mm} \quad (1)$$

Liniová tuhost spoje:

$$K_{90,num} = \frac{K_{u,+} \cdot b}{b_{lam}^2} = \frac{4\,690 \cdot 1\,500}{200^2} = 176\text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

3) Porovnání výsledků

Liniová tuhost spoje získaná analyticky při výpočtu Gama metodou:

Poddajnost:

$$\frac{1}{K_{90,teor}} = 0,0279\text{ mm}^2/\text{N} \quad (3)$$

(viz. Výpočet
Modifikovanou Gama
metodou str.2)

tuhost: $K_{90,vyp} = 36\text{ N/mm}^2$

$$\text{Porovnání výsledků:} \quad \frac{K_{90,num}}{K_{90,vyp}} = \frac{176}{35,79} \cdot 100\% = 491\%$$