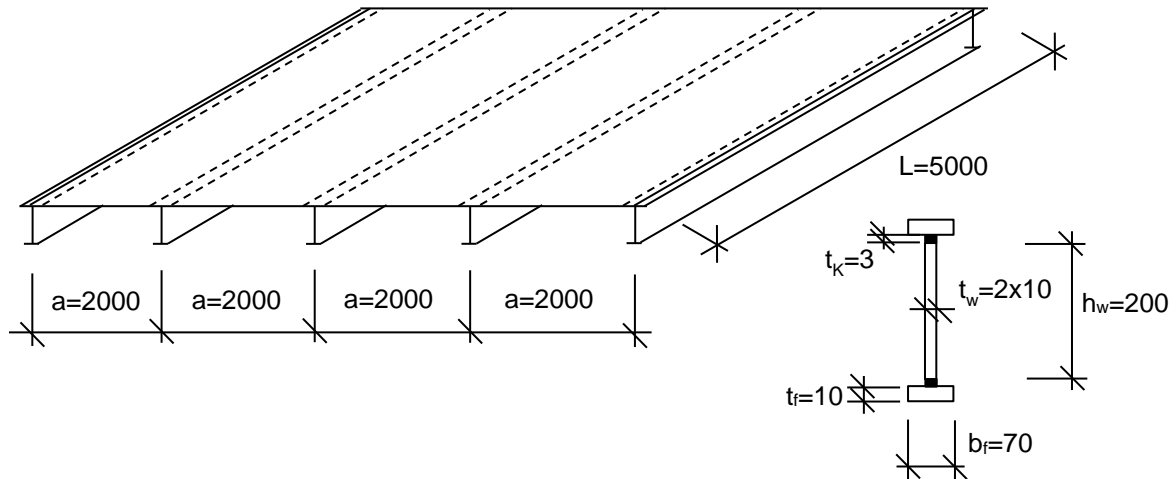


### 3. Hybridní nosník z oceli a skla

Posudte hybridní nosník střešní konstrukce, který je tvořený skleněnou stojinou a ocelovými pánsnicemi. Nosník o délce  $L = 5 \text{ m}$  je prostě podepřený a zatížený vlastní tíhou, tíhou střešního pláště z vrstveného skla o celkové tloušťce  $t_p = 30 \text{ mm}$  ( $\rho_G = 2500 \text{ kg/m}^3$ ) a sněhem. Nosníky podpírající střešní plášť jsou ve vzdálenosti  $a = 2 \text{ m}$ , viz obr. 3.1. Stojina je tvořena dvouvrstvým sklem s PVB folií o celkové tloušťce  $t_w = 2 \times 10 = 20 \text{ mm}$  (tloušťka PVB folie je zanedbána) a výšce  $h_w = 200 \text{ mm}$ , pánsnice byly navrženy o tloušťce  $t_f = 10 \text{ mm}$  a šířce  $b_f = 70 \text{ mm}$  z oceli S235. Pro spojení pánsnic a stojiny bylo použito akrylátové lepidlo o tloušťce  $t_k = 3 \text{ mm}$ .



Obr. 3.1: Schéma konstrukce a příčný řez

#### 3.1 Zatížení

- **Vlastní tíha střechy**

Objemová hmotnost skla činí  $\rho_G = 2500 \text{ kg/m}^3$  ( $25 \text{ kN/m}^3$ ).

Plošné zatížení vlastní tíhou střešní konstrukce se určí jako:

$$g_{1,k} = \rho_G \cdot t_p = 25 \cdot 0,03 = 0,75 \text{ kN/m}^2$$

kde  $g_{1,k}$  je charakteristická hodnota plošného zatížení;

$t_p$  tloušťka střešní konstrukce.

- **Vlastní tíha nosníku**

Nosník je tvořen dvěma ocelovými pánsnicemi a skleněnou stojinou. Objemová hmotnost oceli činí  $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$  ( $78,5 \text{ kN/m}^3$ ).

Liniové zatížení nosníku se určí jako:

$$g_{2,k} = \rho_a \cdot 2 \cdot t_f \cdot b_f + \rho_G \cdot t_w \cdot h_w = 78,5 \cdot 2 \cdot 0,01 \cdot 0,07 + 25 \cdot 0,02 \cdot 0,20 = 0,21 \text{ kN/m}$$

kde  $g_{2,k}$  je charakteristická hodnota liniového zatížení;

$t_f$  tloušťka ocelových pánsnic;

$b_f$  šířka ocelových pánsnic;

$t_w$  tloušťka skleněné stojiny;

$h_w$  výška skleněné stojiny.

- **Zatížení sněhem**

Výpočet je proveden podle normy ČSN EN 1991-1-3 [1], pro sněhovou oblast III. Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi pro tuto oblast činí  $s_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$ . V případě skleněné střechy by bylo možné snížit zatížení sněhem pomocí tepelného součinitele  $C_t$ , v tomto příkladu ale není tato redukce uvažována.

Plošné zatížení ploché střechy sněhem se určí jako:

$$s = s_k \cdot \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 1,2 \text{ kN/m}^2$$

kde	$s$	je	charakteristická hodnota plošného zatížení;
	$s_k$		hodnota zatížení sněhem na zemi;
	$\mu_1$		tvárový součinitel (pro ploché střechy $\mu_1 = 0,8$ );
	$C_e$		součinitel expozice (pro normální typ krajiny $C_e = 1,0$ );
	$C_t$		tepelný součinitel (uvažován jako $C_t = 1,0$ ).

- **Přepočet na liniové zatížení**

Vlastní tíha střechy a zatížení sněhem jsou vyjádřeny jako plošné zatížení a je tedy potřeba je přepočítat na liniové zatížení na nosník. Zatěžovací šířka nosníku odpovídá vzdálenosti nosníků od sebe  $a = 1,8 \text{ m}$ . Výpočet celkového liniového zatížení působícího na nosník je vyjádřen jako:

$$f_d = a \cdot (\gamma_G \cdot g_{1,k} + \gamma_Q \cdot s) + \gamma_G \cdot g_{2,k}$$

kde	$f_d$	je	návrhová hodnota rovnoměrného zatížení na 1 m délky nosníku;
	$a$		zatěžovací šířka;
	$\gamma_G, \gamma_Q$		součinitele spolehlivosti (1,35 pro stálé zatížení, 1,5 pro proměnné);
	$g_{1,k}$		vlastní tíha střešní konstrukce;
	$g_{2,k}$		vlastní tíha nosníku;
	$s$		zatížení sněhem.

Dosažením do rovnice získáme charakteristickou hodnotu zatížení  $f_k$  a návrhovou hodnotu zatížení  $f_d$ :

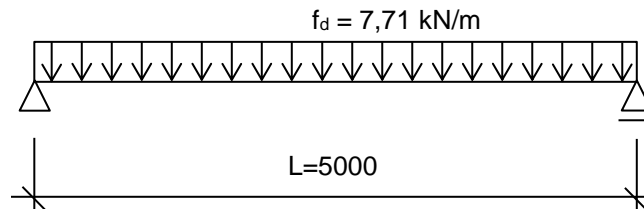
$$f_k = a \cdot (1,0 \cdot g_{1,k} + 1,0 \cdot s) + 1,0 \cdot g_{2,k} = 2 \cdot (1 \cdot 0,75 + 1 \cdot 1,8) + 1 \cdot 0,21 = 5,31 \text{ kN/m}$$

$$f_d = a \cdot (1,35 \cdot g_{1,k} + 1,5 \cdot s) + 1,35 \cdot g_{2,k} = 2 \cdot (1,35 \cdot 0,75 + 1,5 \cdot 1,8) + 1,35 \cdot 0,21 = 7,71 \text{ kN/m}$$

### 3.2 Kombinace zatížení

V tomto příkladu jsou uvažovány pouze dvě kombinace zatížení – KZ1 pro mezní stav únosnosti (zatížení  $f_d$ ) a KZ2 pro mezní stav použitelnosti (zatížení  $f_k$ ).

### 3.3 Výpočet vnitřních sil



Obr. 3.2: Schéma nosníku

Na prostém nosníku zatíženém liniovým zatížením vznikají ohybový moment  $M_{Ed}$  a posouvající síla  $V_{Ed}$ . Tyto vnitřní síly se určí jako:

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} \cdot f_d \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 7,71 \cdot 5^2 = 24,09 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = \frac{1}{2} \cdot f_d \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 7,71 \cdot 5 = 19,28 \text{ kN}$$

### 3.4 Materiálové charakteristiky

- **Materiálové charakteristiky skla**

Skleněné stojina je navržena z vrstveného tepelně tvrzeného skla s PVB folií o celkové tloušťce 20 mm. Minimální charakteristická pevnost v ohybu nezpevněného sodnovápenatého skla je dle ČSN EN 12150-1, [2],  $f_{b,k} = 120 \text{ N/mm}^2$ , Youngův modul pružnosti je  $E = 70 \text{ GPa}$ .

Určení návrhové hodnoty pevnosti skla bylo provedeno pomocí postupu uvedeného v DIN 18008-1 [3]:

$$f_{b,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_c \cdot f_{b,k}}{\gamma_M} = \frac{1,0 \cdot 1,0 \cdot 120}{1,5} = 80 \text{ MPa}$$

kde  $\gamma_M$  je součinitel spolehlivosti materiálu (pro tep. upravované sklo  $\gamma_M = 1,5$ );  
 $k_{mod}$  modifikační součinitel (pro tepelně upravované sklo se neuplatní);  
 $k_c$  konstrukční součinitel (pro tepelně upravované sklo  $k_c = 1,0$ ).

- **Materiálové charakteristiky oceli**

Pro návrh pásnice byla zvolena ocel třídy **S235** s charakteristickou mezí kluzu dle normy ČSN EN 1993-1-1 [4],  $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$ .

Určení návrhové hodnoty meze kluzu oceli bylo provedeno pomocí postupu uvedeného v [4]:

$$f_{yd} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1,0} = 235 \text{ MPa}$$

kde  $f_y$  je charakteristická hodnota meze kluzu;  
 $\gamma_{M1}$  součinitel spolehlivosti materiálu ( $\gamma_{M1} = 1,0$ )

- **Materiálové charakteristiky lepidla**

Pro lepený spoj mezi ocelovými pásnicemi a skleněnou stojinou bylo použito akrylátové lepidlo o tloušťce  $t_k = 3 \text{ mm}$  s charakteristickou pevností ve smyku  $f_{v,k} = 10 \text{ N/mm}^2$  a pružným modulem ve smyku  $G_k = 20 \text{ N/mm}^2$ .

Návrhová hodnota pevnosti lepidla ve smyku se určí jako:

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k}}{\gamma_{M,k}} = \frac{10}{3,0} = 3,33 \text{ MPa}$$

kde  $f_{v,k}$  je charakteristická hodnota pevnosti ve smyku;  
 $\gamma_{M,k}$  součinitel spolehlivosti materiálu ( $\gamma_{M,k} = 3,0$ ).

### 3.5 Výpočet momentu setrvačnosti účinného průřezu

Vzhledem k tomu, že na průřez jsou použity dva různé materiály (ocel a sklo), je třeba určit průřezové charakteristiky pro idealizovaný průřez podle Möhlerovy metody. Spojení ocelových pásnic se skleněnou stojinou je polotuhé, takže se musí při výpočtu momentu setrvačnosti zohlednit tuhost lepeného spoje.

Průměrná tuhost spoje  $K_K$  (po délce spoje) se určí jako:

$$K_K = G \cdot \frac{b_k}{t_k} = 20 \cdot \frac{20}{3} = 133,33 \text{ MPa}$$

kde  $G$  je pružný modul lepidla ve smyku;  
 $b_k$  šířka lepeného spoje (odpovídá tloušťce stojiny  $t_w$ );  
 $t_k$  tloušťka lepeného spoje.

Pracovní součinitel  $n$  vyjadřující poměr modulů skla a oceli se určí ze vztahu:

$$n = \frac{E_G}{E_A} = \frac{70 \cdot 10^3}{210 \cdot 10^3} = \frac{1}{3}$$

kde  $E_G$  je modul pružnosti skla;  
 $E_A$  modul pružnosti oceli.

Koeficient tuhosti  $k$  zohledňující tuhost lepidla a tuhost ocelových pásnic se určí jako:

$$k = \pi^2 \cdot \frac{E_A \cdot A_A}{L^2 \cdot K_K} = \pi^2 \cdot \frac{210 \cdot 10^3 \cdot (10 \cdot 70)}{5000^2 \cdot 133,33} = 0,44$$

kde  $A_A$  je plocha ocelové pásnice.  
 $L$  délka lepeného spoje, resp. délka nosníku.

Součinitel efektivnosti  $\gamma$  se určí jako:

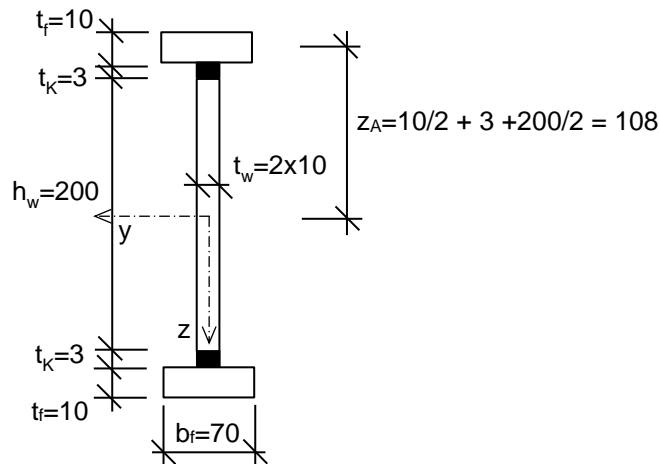
$$\gamma = \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+0,44} = 0,69$$

Moment setrvačnosti účinného průřezu  $I_{y,eff}$  ve směru hlavní osy  $y$  se určí jako:

$$I_{y,eff} = 2 \cdot I_{y,A} + n \cdot I_{y,G} + 2 \cdot \gamma \cdot A_A \cdot z_A^2$$

$$I_{y,eff} = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 70 \cdot 10^3 + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{12} \cdot 20 \cdot 200^3 + 2 \cdot 0,69 \cdot 70 \cdot 10 \cdot 108^2 = 1,57 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

kde  $I_{y,A}$  je moment setrvačnosti ocelové pásnice;  
 $I_{y,G}$  moment setrvačnosti skleněné stojiny;  
 $z_A$  svislá vzdálenost těžiště ocelové pásnice od těžiště průřezu.



Obr. 3.3: Příčný řez s vyznačením vzdálenosti  $z_A$

### 3.6 Výpočet napětí v jednotlivých částech průřezu

- Normálové napětí ve skleněné stojně**

Napětí v nejvíce namáhaném místě na tažené straně skleněné stojiny  $\sigma_G$  se určí jako:

$$\sigma_G = \frac{M_{Ed}}{I_{y,eff}} \cdot \frac{h_w}{2} \cdot n = \frac{24,09 \cdot 10^6}{1,57 \cdot 10^7} \cdot \frac{200}{2} \cdot \frac{1}{3} = 51,15 \text{ MPa}$$

- Normálové napětí v ocelových pásnicích**

Maximální napětí  $\sigma_A$  v ocelové pásnici se určí jako:

$$\sigma_A = \frac{M_{Ed}}{I_{y,eff}} \cdot \left( \gamma \cdot z_A + \frac{t_f}{2} \right) = \frac{24,09 \cdot 10^6}{1,57 \cdot 10^7} \cdot \left( 0,69 \cdot 108 + \frac{10}{2} \right) = 122,02 \text{ MPa}$$

- Smykové napětí v lepeném spoji**

Smykové napětí  $\tau$  v lepeném spoji se určí jako:

$$\tau = \frac{V_{Ed} \cdot \gamma \cdot z_A \cdot A_A}{I_{y,eff} \cdot b_k} = \frac{19,27 \cdot 10^3 \cdot 0,69 \cdot 108 \cdot 70 \cdot 10}{1,57 \cdot 10^7 \cdot 20} = 3,20 \text{ MPa}$$

kde  $b_k$  je šířka lepeného spoje (odpovídá tloušťce stojiny  $t_w$ ).

### 3.7 Mezní stav únosnosti

Posouzení ocelové části průřezu:

$$\sigma_A = 122,02 \text{ MPa} \leq 235 \text{ MPa} = f_{yd} \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Posouzení skleněné části průřezu:

$$\sigma_G = 51,15 \text{ MPa} \leq 80 \text{ MPa} = f_{b,d} \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Posouzení lepidla:

$$\tau = 3,20 \text{ MPa} \leq 3,33 \text{ MPa} = f_{v,d} \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Nosník v mezním stavu únosnosti vyhovuje.

### 3.8 Mezní stav použitelnosti

V mezním stavu použitelnosti se posuzuje svislá deformace nosníku, která je omezena limitní deformací  $w_{lim} = L/250$ .

Svislá deformace řešeného nosníku se vypočte jako:

$$w_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{f_k \cdot L^4}{E_A \cdot I_{y,eff}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{5,31 \cdot 5000^4}{210 \cdot 10^3 \cdot 1,57 \cdot 10^7} = 13,11 \text{ mm}$$

Posouzení:

$$w_{max} = 13,11 \text{ mm} \leq 20 \text{ mm} = L/250 \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Nosník v mezním stavu použitelnosti vyhovuje.

### 3.9 Literatura

- [1] ČSN EN 1991-1-3, *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem*, 2013. Ed. 2. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [2] ČSN EN 12150-1, *Sklo ve stavebnictví – Tepelně tvrzené sodnovápenatokrěmičité bezpečnostní sklo: Část 1: Definice a popis*, 2016. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [3] DIN 18008-1, *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln: Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen*, 2010. Berlin: Deutsches Institut für Normung
- [4] ČSN EN 1993-1-1, *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, 2011. Ed. 2. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví