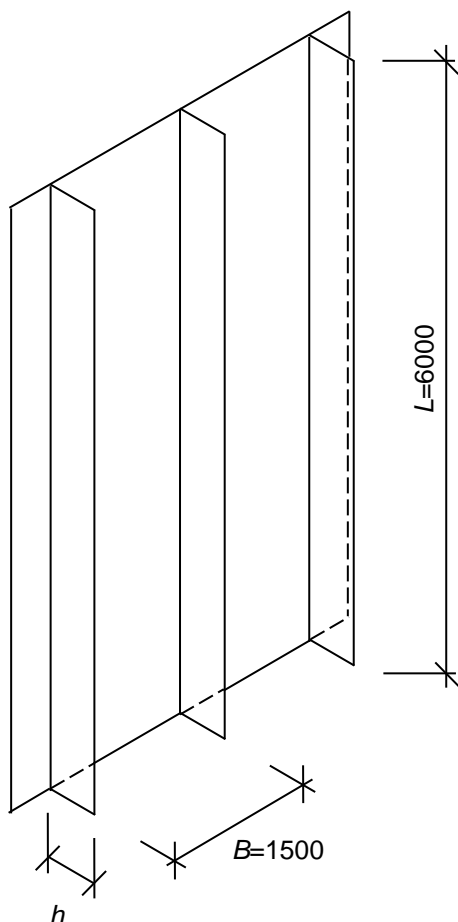


1. Výztužné skleněné žebro fasády

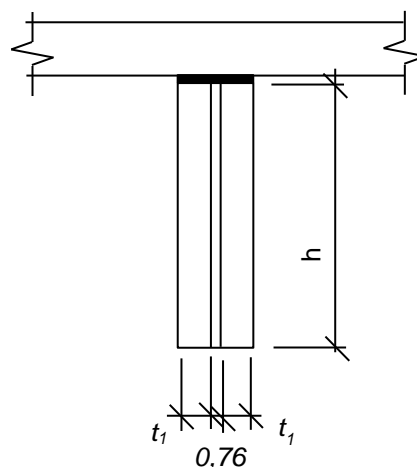
Navrhněte a posuďte skleněné žebro fasády viz obr. 1.1 v mezním stavu únosnosti a mezním stavu použitelnosti. Pro posouzení použijte postupy uvedené v německé normě DIN 18008-1 [1] a v australské normě AS 1288 [2]. Uvažujte rovnoměrné zatížení větrem w_k na fasádní panely které jsou polotuhým lepeným spojem připojené ke skleněnému žebro.



Obr. 1.1: Schéma konstrukce

Žebro je navrženo z dvouvrstvého tepelně tvrzeného skla o tloušťce 2 x 10 mm s PVB fólií o tl. 0,76 mm viz obr. 1.2. Posudek je proveden pro nehodovou situaci, ve které je jedna z tabulí porušena, tj. ve statickém výpočtu se uvažuje pouze působení jedné skleněné tabule. Žebro prostě uložené na horním i dolním okraji působí jako prostý nosník.

Délka žebra	$L = 6000$ mm
Vzdálenost žeber	$B = 1500$ mm
Tloušťka tabule	$t_1 = 10$ mm
Tloušťka žebra	$2 \cdot t_1 + 0,76 = 20,76$ mm
Výška žebra	h



Obr. 1.2: Řez žebrem

1.1 Zatížení

Zatížení fasády se předpokládá větrem pro větrnou oblast II. a kategorii terénu IV dle ČSN EN 1991-1-4, [3]. Charakteristický maximální dynamický tlak větru $q_p(6 m) = 0,46$ kN/m². Součinitel vnějšího tlaku pro návětrnou plochu fasády je (při součiniteli plnosti $\varphi = 1,0$) $c_{pe,10,tlak} = 0,8$. Součinitel vnějšího tlaku pro závětrnou plochu fasády je $c_{pe,10,sání} = -0,7$. Rovnoměrné zatížení fasády od větru je uvažováno charakteristickou hodnotou pro tlak $w_{k,tlak} = 0,36$ kN/m² a pro sání $w_{k,sání} = -0,32$ kN/m².

Na žebro fasády působí kromě zatížení větrem také vlastní tíha žebra, která je zanedbatelná.

Tab. 1.1: Kombinace zatěžovacích stavů

Číslo	Označení	Mezní stav
KZ1	$\gamma_Q \cdot w_{k,tlak}$	MSÚ
KZ2	$\gamma_Q \cdot w_{k,sání}$	
KZ3	$\gamma_Q \cdot w_{k,tlak}$	MSP
KZ4	$\gamma_Q \cdot w_{k,sání}$	

1.2 Materiálové charakteristiky skla

Minimální charakteristická pevnost tepelně tvrzeného sodnovápenatého skla je dle ČSN EN 12150-1, [4] $f_{b,k} = 120 \text{ N/mm}^2$. Norma ČSN EN 572-1, [5] stanoví Youngův modul pružnosti jako $E = 70 \text{ GPa}$. Modul pružnosti skla ve smyku se určí jako:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{70}{2 \cdot (1 + 0,23)} = 28,46 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

kde ν je Poissonův součinitel.

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

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

kde $f_{b,d}$ je návrhová hodnota pevnosti v ohybu;
 $f_{b,k}$ charakteristická hodnota pevnosti v ohybu;
 γ_M součinitel spolehlivosti materiálu (pro tepelně upravované sklo $\gamma_M = 1,5$);
 k_{mod} modifikační součinitel (pro tepelně upravované sklo se neuplatní);
 k_c konstrukční součinitel (pro tepelně upravované sklo $k_c = 1,0$).

1.3 Mezní stav únosnosti

Vzdálenost jednotlivých žebor od sebe odpovídá zatěžovací šířce jednoho žebra a činí $B = 1,5 \text{ m}$, viz obr. 1.1.

Charakteristické hodnoty zatížení pro tlak a pro sání větru:

$$q_{k,tlak} = B \cdot w_k = 1,5 \cdot 0,36 = 0,540 \text{ kN/m}$$

$$q_{k,sání} = B \cdot w_k = 1,5 \cdot 0,32 = 0,480 \text{ kN/m}$$

kde q_k je charakteristická hodnota zatížení větrem;
 w_k plošné zatížení od větru;
 B zatěžovací šířka.

Návrhové hodnoty zatížení:

$$q_{d,tlak} = \gamma_Q \cdot q_{k,tlak} = 1,5 \cdot 0,540 = 0,810 \text{ kN/m}$$

$$q_{d,sání} = \gamma_Q \cdot q_{k,sání} = 1,5 \cdot 0,480 = 0,720 \text{ kN/m}$$

kde q_d je návrhová hodnota zatížení větrem;
 γ_Q dílčí součinitel proměnného zatížení ($\gamma_Q = 1,5$).

Vnitřní síly pro tlakové namáhání:

$$M_{Ed,tlak} = \frac{1}{8} \cdot q_{d,tlak} \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 0,810 \cdot 6000^2 = 3,65 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 3,65 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,tlak} = \frac{1}{2} \cdot q_{d,tlak} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 0,810 \cdot 6000 = 2,43 \cdot 10^3 \text{ N} = 2,43 \text{ kN}$$

a pro sání:

$$M_{Ed,sání} = \frac{1}{8} \cdot q_{d,sání} \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 0,720 \cdot 6000^2 = 3,24 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 3,24 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed,sání} = \frac{1}{2} \cdot q_{d,sání} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 0,720 \cdot 6000 = 2,16 \cdot 10^3 \text{ N} = 2,16 \text{ kN}$$

Pro návrh výšky žebra h využijeme podmínky pro mezní stav únosnosti:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = W_y \cdot \frac{f_{b,k}}{\gamma_M}$$

kde M_{Ed} je ohybový moment od zatížení;
 W_y průřezový modul k ose y ;
 M_{Rd} moment únosnosti v ohybu.

Průřezový modul obdélníkového průřezu se vypočte podle:

$$W_y = \frac{1}{6} \cdot t_1 \cdot h^2$$

kde t_1 je tloušťka posuzované desky;
 h výška žebra.

Dosazením získáme vztah pro výpočet minimální výšky žebra tak, aby byla splněna podmínka únosnosti. Za M_{Ed} dosadíme větší z momentů pro oba zatěžovací stavy, tedy $M_{Ed,tlak}$. Potom se minimální výška žebra určí ze vztahu:

$$h \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M_{Ed} \cdot \gamma_M}{f_{b,k} \cdot t}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 3,55 \cdot 10^6 \cdot 1,5}{120 \cdot 10}} = 163 \text{ mm}$$

Zvolené rozměry:

$$t_1 = 10 \text{ mm}$$

$$h = 200 \text{ mm}$$

Výpočet průřezových charakteristik pro štíhlý obdélníkový průřez:

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot t_1 \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 10 \cdot 200^3 = 6,67 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_z = \frac{1}{12} \cdot h \cdot t_1^3 = \frac{1}{12} \cdot 200 \cdot 10^3 = 1,67 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_k = \frac{1}{3} \cdot h \cdot t_1^3 \cdot \left(1 - 0,63 \cdot \frac{t_1}{h}\right) = \frac{1}{3} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot \left(1 - 0,63 \cdot \frac{10}{200}\right) = 6,46 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

kde I_y je moment setrvačnosti k těžišťové ose y;

I_z moment setrvačnosti k těžišťové ose z;

I_k moment tuhosti v kroucení.

Nosník je k fasádním deskám připojen polotuhým lepeným spojem (viz obr. 1.3), který zabraňuje příčnému posunu nosníku a snižuje tím kritický moment. Výpočet kritického momentu M_{cr} pro nosník pružně liniově podepřený v místě působíště zatížení se podle normy AS 1288, [2] provede jako:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2}{L^2} \cdot \frac{\left[E \cdot I_z \cdot \left(\frac{h^2}{12} + c_z^2 \right) + G \cdot I_k \right]}{2 \cdot c_z + z_a}$$

kde M_{cr} je kritický moment;

c_z vzdálenost příčného držení vzhledem k těžišti, viz obr. 1.4;

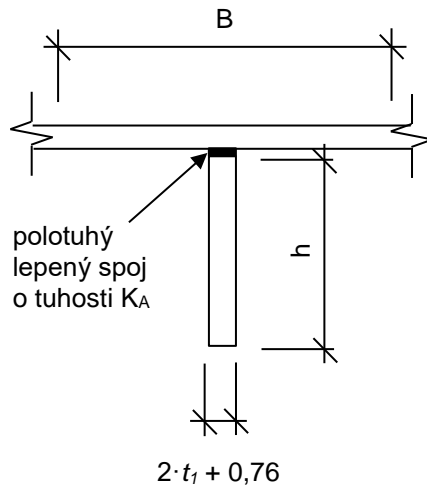
z_a souřadnice působíště zatížení vzhledem k těžišti, viz obr. 1.4;

$$M_{cr,sání} = \frac{\pi^2}{6000^2} \cdot \frac{\left[70 \cdot 10^3 \cdot 1,67 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{200^2}{12} + 100^2 \right) + 28,46 \cdot 10^3 \cdot 6,46 \cdot 10^4 \right]}{2 \cdot 100 + 100} = 6,14 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

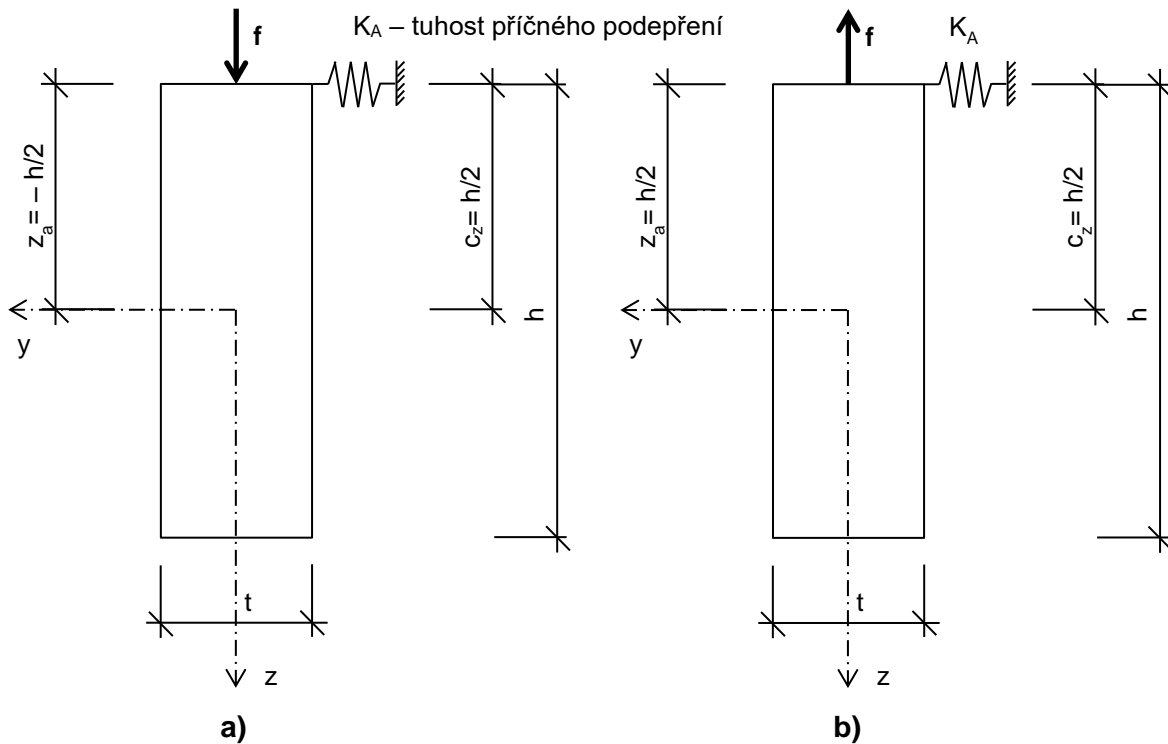
$$M_{cr,sání} = 6,14 \text{ kNm}$$

$$M_{cr,tlak} = \frac{\pi^2}{6000^2} \cdot \frac{\left[70 \cdot 10^3 \cdot 1,67 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{200^2}{12} + 100^2 \right) + 28,46 \cdot 10^3 \cdot 6,46 \cdot 10^4 \right]}{2 \cdot 100 - 100} = 18,57 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{cr,tlak} = 18,57 \text{ kNm}$$



Obr. 1.3: Pružné připojení žebra k fasádě



Obr. 1.4: Určení proměnných z_a a c_z pro zatížení působící směrem do průřezu (tlak větru) (a) a směrem ven z průřezu (sání větru) (b)

Výztužné žebro lze v MSÚ zjednodušeně posoudit na ohyb se ztrátou příčné a torzní stability podle vztahu:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma}$$

kde M_{Rd} je moment únosnosti;
 γ součinitel bezpečnosti ($\gamma = 1,7$).

Výpočet momentu únosnosti pro kombinaci KZ1 – tlak větru je:

$$M_{Rd,tlak} = \frac{18,57}{1,7} = 10,92 \text{ kNm}$$

Výpočet momentu únosnosti pro kombinaci KZ2 – sání větru je:

$$M_{Rd,sání} = \frac{6,19}{1,7} = 3,64 \text{ kNm}$$

Posouzení:

$$M_{Ed,tlak} = 3,65 \text{ kNm} \leq 10,92 \text{ kNm} = M_{Rd,tlak} \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

$$M_{Ed,sání} = 3,24 \text{ kNm} \leq 3,64 \text{ kNm} = M_{Rd,sání} \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Nosník v mezním stavu únosnosti vyhovuje.

1.4 Mezní stav použitelnosti

V mezním stavu použitelnosti budeme posuzovat skleněné žebro na průhyb. Norma ČSN EN 1993-1-1, [6] na navrhování ocelových konstrukcí stanoví pro sloupky a paždíky zasklených stěn maximální vodorovný průhyb jako 1/300 rozpětí.

Návrhové hodnoty zatížení:

$$q_{d,tlak} = \gamma_Q \cdot q_{k,tlak} = 1,0 \cdot 0,540 = 0,540 \text{ kN/m}$$

$$q_{d,sání} = \gamma_Q \cdot q_{k,sání} = 1,0 \cdot 0,480 = 0,480 \text{ kN/m}$$

kde q_d je návrhová hodnota zatížení větrem;
 γ_Q dílčí součinitel proměnného zatížení ($\gamma_Q = 1,0$).

Průhyb prostého nosníku podepřeného kloubově na obou koncích pro kombinaci KZ3 – tlak větru je:

$$\delta_{tlak} = \frac{8}{384} \cdot \frac{q_{d,tlak} \cdot L^4}{E \cdot I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,540 \cdot 6000^4}{70 \cdot 10^3 \cdot 6,67 \cdot 10^6} = 19,52 \text{ mm}$$

Průhyb prostého nosníku podepřeného kloubově na obou koncích pro kombinaci KZ4 – sání větru je:

$$\delta_{sání} = \frac{8}{384} \cdot \frac{q_{d,sání} \cdot L^4}{E \cdot I_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{0,480 \cdot 6000^4}{70 \cdot 10^3 \cdot 6,67 \cdot 10^6} = 17,36 \text{ mm}$$

Posouzení:

$$\delta_{tlak} = 19,52 \text{ mm} \leq \delta_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{6000}{300} = 20 \text{ mm} \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

$$\delta_{sání} = 17,36 \text{ mm} \leq \delta_{lim} = \frac{L}{300} = \frac{6000}{300} = 20 \text{ mm} \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Nosník v mezním stavu použitelnosti vyhovuje.

1.5 Literatura

- [1] DIN 18008-1, *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln: Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen*, 2010. Berlin: Deutsches Institut für Normung
- [2] AS 1288, *Glass in buildings: Section and installation*, 2006. Sydney: Standards Association of Australia
- [3] ČSN EN 1991-1-4, *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*, 2013. Ed. 2. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [4] ČSN EN 12150-1, *Sklo ve stavebnictví – Tepelně tvrzené sodnovápenatokřemičité bezpečnostní sklo: Část 1: Definice a popis*, 2016. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [5] ČSN EN 572-1:2012: *Sklo ve stavebnictví – Základní výrobky ze sodnovápenatokřemičitého skla – Část 1: Definice a obecné fyzikální a mechanické vlastnosti*, 2012. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [6] 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