

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra konstrukce výrobních strojů a zařízení

**Konstrukční návrh horizontálního stínícího  
systému venkovních prostor**

**Design of Horizontal Shading System for  
Outdoor Space**

Student:

Jiří Pustka

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tomáš Kubín, Ph.D.

Ostrava 2019

# Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Pustka**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení

Specializace: 21 Konstrukce výrobních strojů a zařízení

Téma: **Konstrukční návrh horizontálního stínicího systému venkovních  
Design of Horizontal Shading System for Outdoor Space**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Navrhnete systém montované konstrukce stínění venkovních prostor. Stíněným prostorem je myšleno zejména odpočinkové posezení u rodinných domů a obdobné konstrukce. Požadavky na tento systém jsou, aby bylo možné 80% stíněného prostoru zcela odkrýt. V případě celoplošného stínění je požadavek na regulaci množství prostupujícího světla (případně přímých slunečních paprsků). Krajní polohou je úplné zastínění, které zároveň bude prostor chránit proti dešti. Maximální rozměr stíněného prostoru je 6000x4000mm. Další požadavky na konstrukci pramení z ergonomie a požadavku na design. Ovládání regulace zastínění bude řešeno v plně elektrickém provedení. Zpracujte variantní řešení jednotlivých uzlů konstrukce. Vytvořte kompletní 3D model výsledné varianty v maximálních rozměrech. Do výkresové části zpracujte celkovou sestavu a dílčí podsestavy. Přesnější rozsah výkresové dokumentace určí vedoucí práce.

## Seznam doporučené odborné literatury:

- KALAB, K.: *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: Části pohonu strojů*. 1. vydání VŠB-TU Ostrava, 2007, 91s. ISBN 978-80-248-1860-3
- DEJL, Z.: *Konstrukce strojů a zařízení I. Spojovací části strojů. Návrh. Výpočet. Konstrukce*. Montanex a.s. Ostrava, 2000, ISBN 80-7225-018-3
- MORAVEC, V., HAVLÍK, J.: *Výpočet a konstrukce strojních dílů*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0878-1
- NĚMČEK, M.: *Řešené příklady ČaMS Spoje*. 2. vydání. Skripta VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1782-8

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Kubín, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



---

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář  
vedoucí katedry



---

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci, včetně příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20.5.2019


A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Jiri Melka", written over a horizontal dotted line.

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3). • souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Jiří Pustka

Adresa trvalého pobytu autora práce: Školská čtvrť 1348, Frenštát pod Radhoštěm

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

PUSTKA, J. *Konstrukční návrh horizontálního stínícího systému venkovních prostor: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2019, 82 s. Vedoucí práce: Kubín T.

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem horizontálního stínícího systému přesněji bioklimatické pergoly. Začátek práce se zabývá rozdělením stínící techniky dostupné na trhu. Další část práce se zabývá popisem variant konstrukčního řešení. Pro zvolené řešení byl vypracován podrobný popis. Část bakalářské práce se zabývá zatížením pergoly větrem. Je zde uveden výpočet podle normy ČSN EN 1991-1-4 a simulace větru v programu CFD Autodesk. Zbytek bakalářské práce se zabývá kontrolními výpočty. Kontrolován je mechanismus a nosná konstrukce pergoly. Součástí kontroly jsou simulace metodou konečných prvků, analytické výpočty a kontrola hliníkové konstrukce podle normy.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

PUSTKA, J. *Design of Horizontal Shading System for Outdoor Space: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and design, 2019, 82 p. Thesis head: Kubín T.

The bachelor thesis deals with the structural design of a horizontal shading system more precisely with a bioclimatic pergola. Beginning with the division of shading techniques available on the market. The next part of the thesis deals with the description of the design solution. A detailed description has been prepared for the chosen solution. Part of the bachelor thesis focused on the pergola load by wind. There is a calculation according to ČSN EN 1991-1-4 and wind simulation in CFD Autodesk. The rest of the thesis deals with control calculations. The mechanism and supporting structure of the pergola are controlled. Inspections Controls include finite element simulations, analytical calculations, and inspection of the aluminum structure according to the standard.

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| Seznam použitých značek a symbolů .....                | 9  |
| Úvod.....  | 12 |
| 1. Druhy stínící techniky .....                        | 13 |
| 2. Návrh variantních řešení.....                       | 20 |
| 2.1 Varianta A .....                                   | 20 |
| 2.2 Varianta B .....                                   | 21 |
| 2.3 Varianta C .....                                   | 23 |
| 2.4 Hodnocení variant .....                            | 24 |
| 3. Vlastní konstrukční řešení .....                    | 25 |
| 3.1 Mechanismus roztažení lamel .....                  | 26 |
| 3.2 Mechanismus roztažení lamel .....                  | 30 |
| 3.3 Popis rámu pergoly .....                           | 33 |
| 4. Zatížení větrem .....                               | 36 |
| 4.1 Zatížení střechy pergoly při uzavřené poloze ..... | 37 |
| 4.2 Zatížení nosné konstrukce pergoly větrem .....     | 41 |
| 4.3 Simulace zatížení lamel.....                       | 44 |
| 5. Kontrola mechanismu.....                            | 50 |
| 5.1 Kontrolní výpočty lamely a hřídele.....            | 50 |
| 5.2 Kontrola lineárního ložiska .....                  | 58 |
| 5.3 Kontrola lanka .....                               | 60 |
| 5.4 Kontrola spoje lanka experimentem.....             | 61 |
| 5.5 Volba řemene a kontrola motoru.....                | 64 |
| 5.6 Kontrola natáčecího mechanismu .....               | 67 |
| 5.7 Výpočet časů .....                                 | 72 |
| 6. Kontrola nosné konstrukce .....                     | 73 |
| 6.1 Analýza rámové konstrukce .....                    | 73 |
| 6.2 Kontrola sloupku na kombinaci vzpěru a ohybu.....  | 77 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 7. Závěr.....                      | 79 |
| 8. Seznam použité literatury ..... | 80 |
| 9. Seznam příloh.....              | 83 |



## Seznam použitých značek a symbolů

|                      |  |                      |
|----------------------|--|----------------------|
| A                    | plocha   | [m <sup>2</sup> ]    |
| A <sub>c</sub>       | celková plocha   | [m <sup>2</sup> ]    |
| a <sub>p</sub>       | rozměr polygonového spoje  | [mm]                 |
| a <sub>sv</sub>      | účinná tloušťka koutového svaru  | [mm]                 |
| b                    | šířka  | [mm]                 |
| b <sub>ř</sub>       | šířka řemene   | [mm]                 |
| C <sub>0</sub>       | součinitel ortografie  | [-]                  |
| C <sub>dir</sub>     | součinitel směru   | [-]                  |
| C <sub>e</sub>       | součinitel expozice  | [-]                  |
| c <sub>f</sub>       | součinitel síly  | [-]                  |
| C <sub>f,0</sub>     | součinitel síly pro konstrukce nebo nosné prvky bez vlivu koncového efektu | [-]                  |
| C <sub>p,net</sub>   | součinitel výsledného tlaku  | [-]                  |
| C <sub>prob</sub>    | součinitel pravděpodobnosti  | [-]                  |
| C <sub>r</sub>       | součinitel drsnosti  | [-]                  |
| C <sub>s</sub>       | součinitel bezpečnosti řemene  | [-]                  |
| C <sub>season</sub>  | součinitel ročního období  | [-]                  |
| d                    | průměr   | [mm]                 |
| D <sub>p</sub>       | roztečný průměr řemenice   | [mm]                 |
| E                    | modul pružnosti v tahu   | [MPa]                |
| F <sup>-</sup>       | síla s působením vzhůru  | [N]                  |
| F <sup>+</sup>       | síla s působením dolů  | [N]                  |
| f <sub>0</sub>       | mez úměrnosti  | [MPa]                |
| F <sub>celk</sub>    | celková síla v laně  | [N]                  |
| F <sub>D_tah</sub>   | dovolená síla v tahu řemene  | [N]                  |
| F <sub>Mk_celk</sub> | celková síla v laně od kroutícího momentu                                  | [N]                  |
| F <sub>p</sub>       | předpětí řemene  | [N]                  |
| F <sub>reak</sub>    | reakční síla (v MKP)   | [N]                  |
| f <sub>stat</sub>    | statický součinitel tření  | [-]                  |
| F <sub>t_celk</sub>  | celková třecí síla   | [N]                  |
| F <sub>u</sub>       | síla v řemenu  | [N]                  |
| F <sub>x</sub>       | síla v ose X   | [N]                  |
| F <sub>x_celk</sub>  | celková síla v laně od síly ve směru X                                     | [N]                  |
| F <sub>y</sub>       | síla v ose Y   | [N]                  |
| F <sub>z</sub>       | síla v ose Z   | [N]                  |
| g                    | gravitační zrychlení   | [m*s <sup>-2</sup> ] |
| h <sub>max</sub>     | maximální vzdálenost od krajního vlákna                                    | [mm]                 |
| I <sub>v</sub>       | intenzita turbulence   | [-]                  |
| I <sub>x</sub>       | moment setrvačnosti k ose X  | [mm <sup>4</sup> ]   |

|                  |   |                       |
|------------------|---|-----------------------|
| $I_y$            | moment setrvačnosti k ose Y   | [mm <sup>4</sup> ]    |
| $k_l$            | součinitel turbulence   | [-]                   |
| $k_r$            | součinitel terénu   | [-]                   |
| $l$              | délka   | [mm]                  |
| $L_{cr}$         | vzpěrná délka prutu   | [mm]                  |
| $l_{lam}$        | délka lamely  | [mm]                  |
| $l_p$            | délka polygonového spoje  | [mm]                  |
| $M_{ed}$         | navrhovaná hodnota největšího momentu                                 | [Nm]                  |
| $M_k$            | kroucí moment   | [Nm]                  |
| $M_{k_{motor}}$  | kroucí moment motoru  | [Nm]                  |
| $m_{lam}$        | hmotnost lamely   | [kg]                  |
| $M_o$            | ohybový moment  | [Nm]                  |
| $M_{y,Rd}$       | návrhová únosnost v ohybu k ose y-y                                   | [Nm]                  |
| $n$              | otáčky  | [min <sup>-1</sup> ]  |
| $N_{cr}$         | pružná kritická síla  | [N]                   |
| $N_{ed}$         | navrhovaná osová síla   | [N]                   |
| $n_p$            | počet funkčních ploch polygonního spoje                               | [-]                   |
| $N_{Rd}$         | návrhová únosnost při působení osově síly                             | [N]                   |
| $p$              | měrný tlak  | [MPa]                 |
| $p_D$            | dovolený měrný tlak   | [MPa]                 |
| $q$              | spojité zatížení  | [N*mm <sup>-1</sup> ] |
| $q_b$            | referenční (základní) dynamický tlak (pro střední rychlost)           | [N*m <sup>-2</sup> ]  |
| $q_p$            | maximální hodnota dynamického tlaku (dynamický tlak při nárazu větru) | [N*m <sup>-2</sup> ]  |
| $R_a$            | reakce v podpoře A  | [N]                   |
| $R_b$            | reakce v podpoře B  | [N]                   |
| $S$              | plocha  | [mm <sup>2</sup> ]    |
| $s$              | dráha   | [m]                   |
| $S_{lam}$        | plocha lamely na kterou působí tlak                                   | [m <sup>2</sup> ]     |
| $t_{\zeta}$      | šířka plochy čepu namáhané na otláčení                                | [mm]                  |
| $t_p$            | rozměr zaoblení zasahující do funkční plochy polygonového spoje       | [mm]                  |
| $t_{roztáhnutí}$ | čas k roztažení lamel   | [s]                   |
| $v$              | rychlost posuvu   | [m*s <sup>-1</sup> ]  |
| $v_b$            | základní rychlost   | [m*s <sup>-1</sup> ]  |
| $v_{b,0}$        | výchozí hodnota základní rychlosti                                    | [m*s <sup>-1</sup> ]  |
| $v_m$            | střední rychlost  | [m*s <sup>-1</sup> ]  |
| $w$              | tlak větru  | [N*m <sup>-2</sup> ]  |
| $W_{el,y}$       | elastický modul průřezu v ohybu                                       | [mm <sup>3</sup> ]    |
| $W_k$            | průřezový modul v krutu   | [mm <sup>3</sup> ]    |
| $w_n$            | posunutí  | [mm]                  |

|                     |  |                       |
|---------------------|--|-----------------------|
| $w_n'$              | natočení   | [rad]                 |
| $W_o$               | průřezový modul v ohybu  | [mm <sup>3</sup> ]    |
| $x$                 | vzdálenost v úseku   | [mm]                  |
| $z_0$               | parametr drsnosti terénu   | [m]                   |
| $z_e$               | referenční výška pro zatížení vnějšího nebo vnitřního povrchu větrem | [m]                   |
| $z_L$               | počet zubů v záběru v levé řemenici                                  | [-]                   |
| $z_m$               | počet zubů v záběru  | [-]                   |
| $z_{min}$           | minimální výška  | [m]                   |
| $z_{min_ř}$         | mezní počet zubů v záběru řemenice                                   | [-]                   |
| $z_s$               | počet zubů v záběru v pravé řemenici                                 | [-]                   |
| $\alpha$            | součinitel vlivu imperfekce při vzpěru                               | [-]                   |
| $\alpha_k$          | tvarový součinitel v krutu   | [-]                   |
| $\alpha_o$          | tvarový součinitel v ohybu   | [-]                   |
| $\beta$             | hranice štíhlosti  | [-]                   |
| $\gamma_{M1}$       | součinitel spolehlivosti   | [-]                   |
| $\Delta l/00$       | prodloužení při dynamickém namáhání                                  | [mm*m <sup>-1</sup> ] |
| $\varepsilon$       | součinitel $\sqrt{250/f_0}$  | [-]                   |
| $\kappa$            | součinitel vzpěrnosti  | [-]                   |
| $\lambda$           | efektivní štíhlost   | [-]                   |
| $\lambda_{nadtr}$   | poměrná štíhlost   | [-]                   |
| $\lambda_0_{nadtr}$ | omezení vodorovné části křivky vzpěrnosti                            | [-]                   |
| $\rho$              | hustota  | [kg*m <sup>3</sup> ]  |
| $\sigma_o$          | napětí v ohybu   | [MPa]                 |
| $\sigma_{red}$      | redukované napětí  | [MPa]                 |
| $\tau_k$            | napětí v ohybu   | [MPa]                 |
| $\tau^{Mk}_{//}$    | napětí v krutu svaru   | [MPa]                 |
| $\emptyset$         | součinitel pro výpočet součinitele vzpěrnosti                        | [-]                   |
| $\varphi$           | součinitel plnosti   | [-]                   |
| $\varphi_p$         | koeficient maximálního vzrůstu napětí                                | [-]                   |
| $\psi_c$            | součinitel pro výpočet vzpěrného tlaku a ohybu                       | [-]                   |
| $\psi_r$            | redukční součinitel pro čtvercové průřezy se zaoblenými rohy         | [-]                   |
| $\psi_\lambda$      | redukční součinitel pro nosné prvky s koncovými efekty               | [-]                   |

# Úvod

Nápad na téma konstrukční návrh horizontálního stínícího systému venkovních prostor mi byl nabídnut panem doktorem Kubínem, kdy v době výběru zadání pracoval na konstrukčním řešení zatahovací pergoly s natáčecími lamelami.

V dnešní době známe mnoho druhů zastíňovací techniky. Mohli bychom je rozdělit podle druhů použití. Na stínění průmyslových prostor a na stínění společenských prostor, kterým se budu zabývat v bakalářské práci.

V bakalářské práci jsem vybral variantu konstrukčního návrhu stínícího systému, kterému říkáme pergola. Patří mezi nejrozšířenější zastíňování společenských prostor.

Slovo pergola pochází z latinského slova “pergula“, které znamená v překladu přístřešek. Historie pergol sahá až do období starověkého Egypta asi 1400 př. n. l., kdy není znám přesný účel těchto pergol, zdali jestli se jednalo o estetickou stavbu nebo jejich účel byl právě zastínění. První pergoly nebyly tvořeny žádnými mechanismy, ale většinou byly zarostlé rostlinami, které chránily právě před slunečními paprsky především bohatou společenskou vrstvu. Jednalo se o stínění, které je podobné pergolám s názvem Cedar. Velkou změnu přinesla italská renesance v 17. století. U těchto pergol se dbalo na design, kdy funkčnost šla stranou. V současnosti jsou pergoly navrhovány tak, aby splňovaly stínící vlastnosti, ale taky aby nenarušovaly svým vzhledem okolí, kterému se dokážou přizpůsobit zvolením správného druhu pergoly a vhodnou kombinací barev. [1]

# 1. Druhy stínící techniky

Hlavním úkolem stínící techniky je zamezení nebo omezení přístupu slunečních paprsků. Je celá řada druhů stínících systému od interiérových až po venkovní. Níže jsou popsány jednotlivé druhy venkovního stínění, které jsou dostupné na trhu.

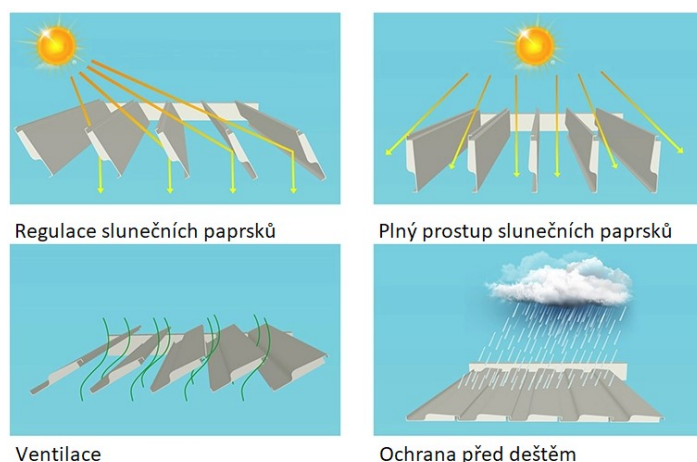
## Bioklimatické pergoly

Bioklimatické stavby v architektuře označujeme takové, které vytvářejí vhodné (komfortní) mikroklima. [2]

Bioklimatické pergoly se přizpůsobují vnějšímu klimatu natáčením lamel, popřípadě jejich stažením. Při slunečném počasí nám poskytují námi požadovaný stín a upravují množství prostupujících slunečních paprsků. Lamely také zachycují vítr a natočením poskytují ventilaci i v zastíněném prostoru, na rozdíl od baldachýnových pergol. Obvykle pergoly nabízejí natočení lamel o 140°, což umožňuje regulaci větru a slunečních paprsků v obou směrech, viz. Obr. 1.1. Součástí pergol může být také snímač větru, který zabraňuje poškození lamel nebo mechanismu z důvodu silného větru. Ve vodorovné poloze lamely poskytují plné krytí prostoru a zabraňují prostupu deště. Dešťová voda je odváděna tvarovanými lamelami do okapu v horní konstrukci pergoly a následně v nosné noze pergoly odkud vytéká ven. Některé pergoly jsou natolik robustní, že dokáží odolávat zatížení sněhem. Standardním zatížením u těchto pergol je 900 N/m<sup>2</sup>. Pohon pergol může být ruční nebo nejčastěji pomocí elektromotoru. Ovládání elektromotoru pak může být dálkovým ovladačem nebo také chytrým telefonem a počítačem. Obchody nabízejí k pergolám příslušenství, které zkvalitňuje pobyt pod pergolou. Jedná se o infračervené topení, RGB barevné podsvícení, či dešťový senzor, který nám automaticky natočí lamely do vodorovné polohy a ochrání prostor pod pergolou, i když zrovna nejsme nablízku. Další příslušenstvím je osvětlení na lamelách nebo po bocích pergoly. Součástí pergol bývá také boční roletové krytí a zasklení bočních stěn, viz. Obr. 1.2.

Pergoly mohou být montovány v kombinacích velké pergoly s malou pergolou, což nám zajišťuje zakrytí prostor s náročnými požadavky, které by jinou stínící technikou nebyly, tak lehce ochráněny před vlivy slunce, deště a sněhu.

Dostupné jsou také pergoly se stažitelnými lamelami. Výhoda těchto pergol je, že lze prostor osvětlit slunečními paprsky bez lamel, které by narušovaly světlost prostoru. Tyto pergoly většinou neposkytují ochranu před sněhem nebo snáší menší tíhu sněhu.



Obr. 1.1 Režimy bioklimatické pergoly [3]

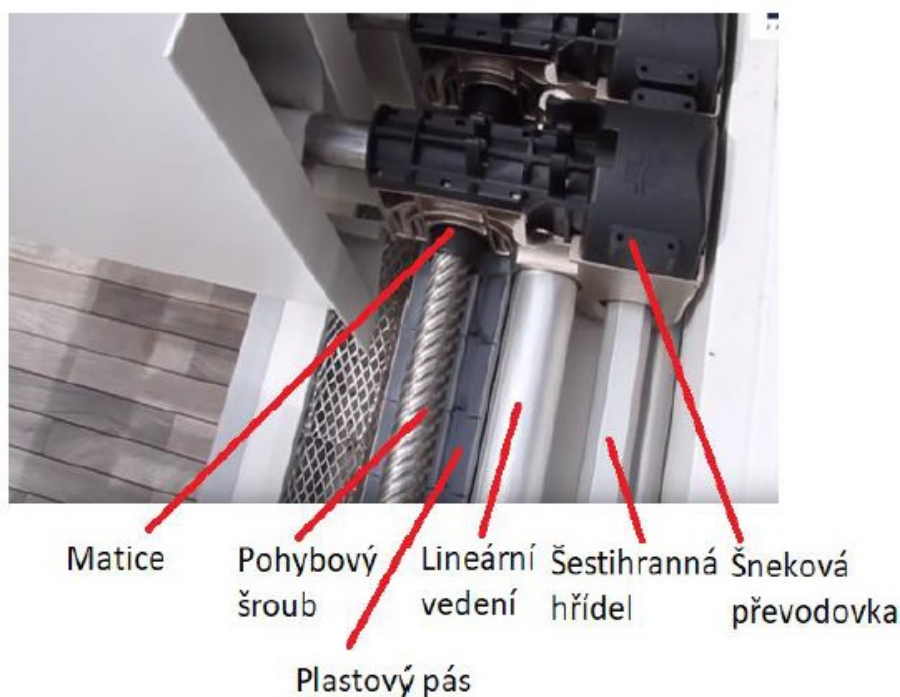
Konstrukce pergol je tvořena hliníkovými profily uchycených k zemi nebo na zeď domu. Profily jsou chemicko-tepelně upravovány eloxováním k ochraně před vnějším vlivy, kdy by mohlo dojít k oxidaci hliníku. Povrch pergoly je dále lakován do různých barevných provedení. Především ve stupnici barevných odstínů RAL. Běžně se prodávají pergoly v rozměrech od 3,5 m x 2,4 m až po rozměry 6 m x 4 m. [4]



Obr. 1.2 Kombinování stažitelných pergol s osvětlením a s bočními skly - stažená poloha (vlevo) a roztáhnutá poloha (vpravo) [5]

Mechanismus pergol jenom s natáčecími lamelami je poháněn ve většině případů aktuátorem, který je připevněn k hliníkové konstrukci pergoly a k táhlu lamel. Všechny lamely jsou na svých vzdálených koncích od středu otáčení připevněny k táhlu pomocí čepů. Následným vysouváním a zasouváním aktuátoru dochází k přenosu pohybu z táhla na čepy, které svým umístěním na lamele převádí posuvný pohyb (táhla) na rotační pohyb (lamel). U pergol, kde dochází navíc k stáhnutí lamel, se mi podařilo najít pergolu Renson Skye. Tato

pergola využívá technologii S-Drive, viz. Obr. 1.3. K posouvání lamel dochází pomocí otáčejícího se pohybového šroubu, ke kterému jsou připojeny matice, které obsahuje každá lamela. Matice jsou postupně uváděny do chodu, tak aby mezi lamelami byla potřebná mezera. Nejdřív se pohybují přední lamely až postupně dojde k pohybu zadních lamel. Když je potřeba, aby zadní lamely stály na místě, tak se matice protáčí. To, aby se matice začaly posouvat postupně a vznikala mezi maticemi mezera, zajišťuje velmi pomalu posouvající se plastový pás se speciálním tvarem, který zapříčiní, že se postupně matice přestanou protáčet. Natáčení lamel k regulaci stínění a ventilace je pomocí šnekové převodovky. Každá lamela je tedy navíc připojena nejen ke své dvojici matic, ale taky ke dvojici šnekových převodovek, které jsou připojeny k šestihřanné hřídeli. Šneková převodovka zajišťuje pomalé natáčení lamel a samosvornost pro udržení lamely v dané poloze. Jakmile dojde k roztáhnutí lamel do požadované polohy, můžeme natáčet s lamelami pomocí šnekových převodovek. Celý mechanismus se skládá ze 4 elektromotorů. Dva pro pohon dvou šestihřanných hřídelí a dva pro pohon dvou pohybových šroubů. [6]



Obr. 1.3 Mechanismus bioklimatické pergoly Renson Skye [6]

## Baldachýnové pergoly

Pojem baldachýn můžeme znát pod známějším označením jako nebesa. Původně se jednalo o pevný látkový závěs. Účel byl převážně ceremoniální, ale i praktický jako ochrana před sluncem. Název baldachýn původně vznikl podle typu luxusní látky z Bagdádu. [7]

Jedná se o jednoduchou a dynamickou pergolu, která ochrání prostory před sluncem nebo i před deštěm. Některé konstrukce těchto pergol jsou natolik jednoduché, že se dokáží přizpůsobit libovolnému prostoru. Stínící část pergoly je látka libovolné barvy nebo vzoru. Proti bioklimatickým pergolám mají výhodu, že při staženém stavu shrnutá látka zabírá méně místa a do prostoru proniká více světla.

Nejjednodušší způsob používá pergola Infinity Canopy. Jedná se o pergolu, která slouží pouze k zastínění. Pergola se skládá z nosné konstrukce, přes kterou jsou nataženy ocelová lana. Na tyto lana jsou zavěšeny příčníky se závěsnými očky. Do příčníků se zasune látka. Jednotlivé části baldachýnu jsou navíc spojeny látkovými proužky. Tím, že jsou části spojeny proužky, je způsobeno to, že látka není plně napnutá. Jelikož jsou části jednoduše nasunuty na příčníky lze rychle vyměnit barvu látky nebo změnit vzor celého baldachýnu. Látku je možné sundat a jednoduše vyčistit. Díky ručnímu roztažení a jednoduché konstrukci má výhodu nízké ceny. [8]



Obr. 1.4 Pergola Infinity Canopy (nahore) a mechanismus pergoly s napnutou látkou (dole) [8] [9]

O něco složitější jsou baldachýnové pergoly s napnutou látkou. Tyto pergoly nejen dokážou zastínit prostor, ale také ho ochránit před deštěm. Baldachýn tvoří PVC tkanina, která chrání i před UV zářením a dokáže odolat i povětrnostním vlivům. Jelikož se jedná o PVC, tak je lehce omyvatelná. Pergola se hodí pro zastřešení větších prostor. Její konstrukce



je tvořena rámem, na kterém se jsou vodící lišty. Látka je upevněna v příčnicích, které jsou zavěšeny na vozíčkách pohybujících se ve vodících lištách, viz. Obr. 1.4.

Pohon pergoly je pak řešen elektromotorem, jehož úkolem je roztáhnout látku nejen nad celým prostorem, který potřebuje zastínit, ale také předeprnout tuto látku. Protože je látka předeprnuta a je pevně umístěna v tuhých příčnicích, dokáže odolávat dešti a větru. Často se tyto pergoly montují se sklonem pro lepší odvod vody. Voda stéká po nepromokavé látce do žlábků, který může být součástí jednoho z příčniců.

## Markýzy

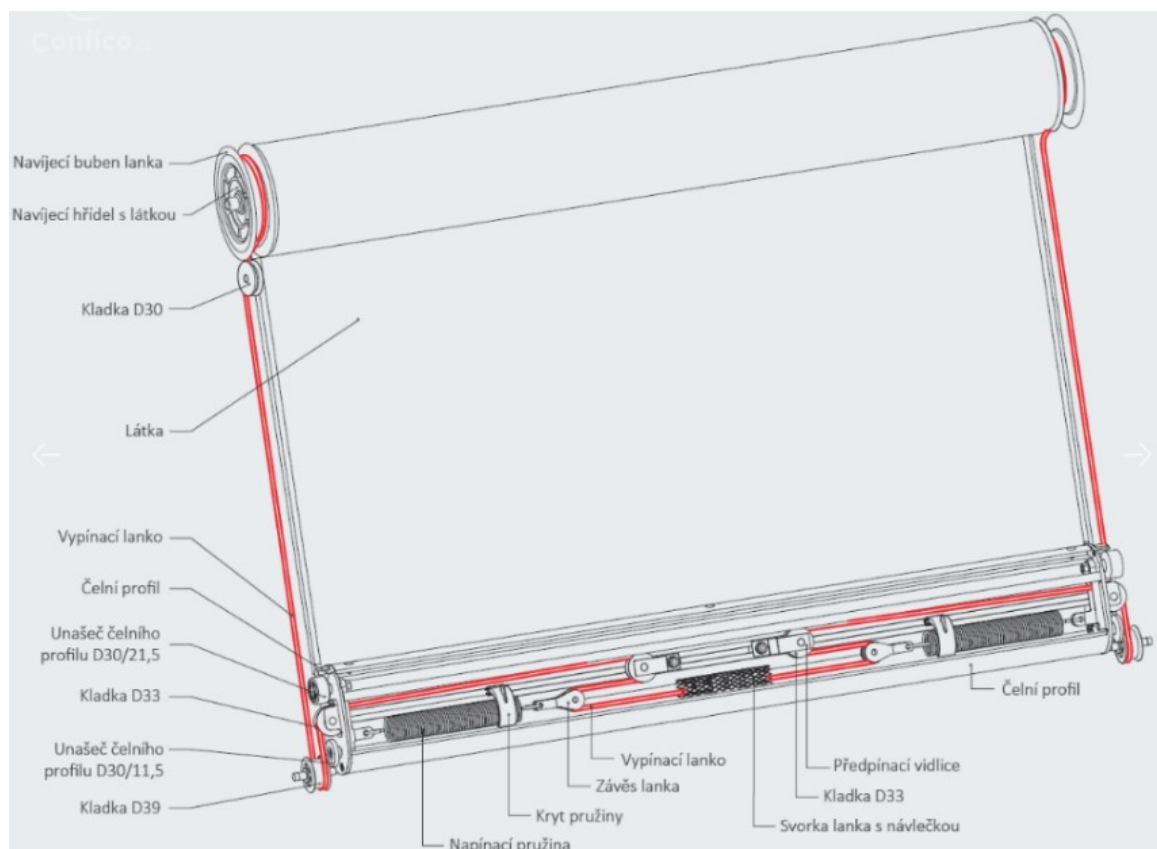
Markýzy jsou v současné době často vidět především na restauračních terasách. Jejich výhodou je malý zástavbový prostor, viz. Obr. 1.5. Plní především stínicí funkci, ale existují i markýzy, které dokážou odolat větru a dešti.



Obr. 1.5 Standardní markýza (vlevo) a markýza Luxaflex Sunrain (vpravo) [10] [11]

Konstrukce markýzy je připevněna ke zdi domu a nepotřebuje další nosné nohy. Tento způsob šetří prostor a umožňuje ho využít pro účely, kde by jinak překážely. Látka je navinuta na trubkový elektromotor, který se nachází v nosné trubici, která je uložena v ložiskách. Trubice je zatížena ohybovým momentem od navinuté látky a chrání elektromotor, který musí být zatížen pouze kroučícím momentem. Předeprnutí látky je pak zajištěno řetězovým ramenem. Čím je úhel rozevření ramena menší, tím je odpor větší. Uvnitř ramena se nachází na obou stranách pružiny, které jsou spojeny řetězem. Elektromotor pak jenom odvíjí látku a je zajištěn v poloze, aby byla předeprnuta. Dešti odolává například markýza Luxaflex Sunrain. Tato markýza obsahuje navíc uprostřed natažené látky rameno, které nadzvedává nataženou látku tak, aby byl spád dešťové vody co největší. Navíc zabraňuje propadnutí látky, jak tomu dochází u standardních markýz. [11]

Markýzy lze použít i pro zimní zahrady. Používá se skleněná konstrukce, která umožňuje vstup slunečních paprsků. Markýza je uchycena v konstrukci ve vodících lištách pod nebo nad skleněným stropem. Mechanismus je tvořen elektromotorem, ocelovými lankami, pružinami a kladkami, které umožňují pohyb příčnicku natahujícího látku a předepnutí látky, viz. Obr. 1.6. Prosklená konstrukce chrání markýzu a prostor před vnějšími vlivy jako jsou vítr, déšť a sníh. Účel markýzy je pouze zastínit prostor.



Obr. 1.6 Mechanismus markýzy pro zastínění zimních zahrad [12]

## **Stínící plachty**

Mezi nejjednodušší stínící systém patří stínící plachty. Jedná se o nataženou plachtu z netrhavé látky, která ochrání prostor i před UV zářením. Stínící plachty po natažení tvoří nejčastěji čtverec nebo trojúhelník, viz. Obr. 1.7. Plachta však není přizpůsobená silnějšímu větru a déle trvajícím deštím. Plachty jsou umístěny na sloupcích, nebo na fasádních kotvách. Ty lze pomocí mechanismu ve sloupcích naklánět a polohovat podle potřeby zastínění. Stínící plachty nejen, že ochrání prostor před sluncem a deštěm, ale taky fungují jako designový prvek do zahrady nebo na terasu. [13]

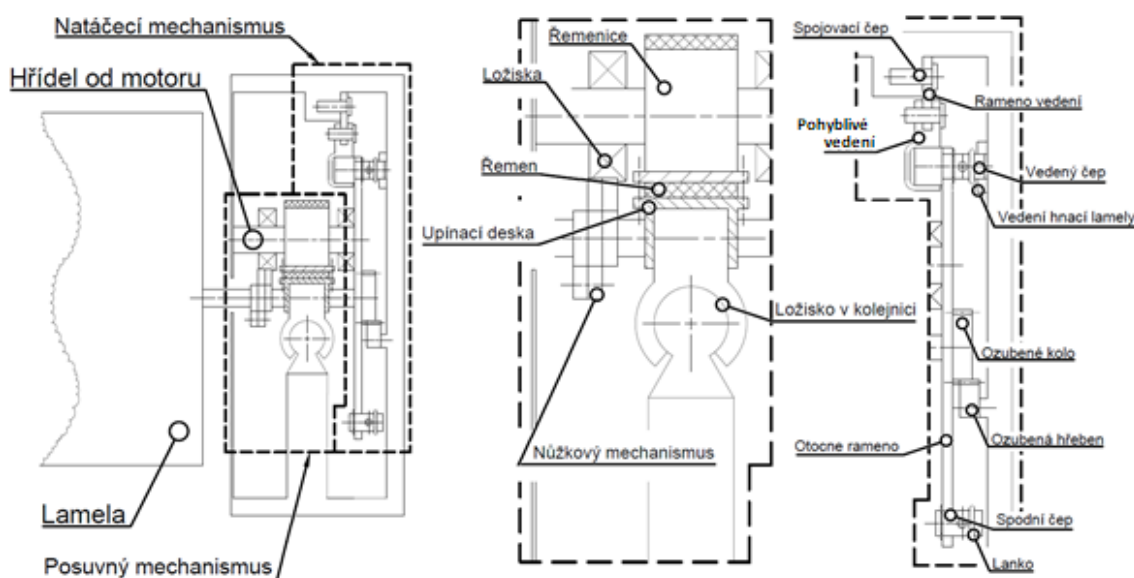


*Obr 1.7 Stínící plachta [13]*

## 2. Návrh variantních řešení

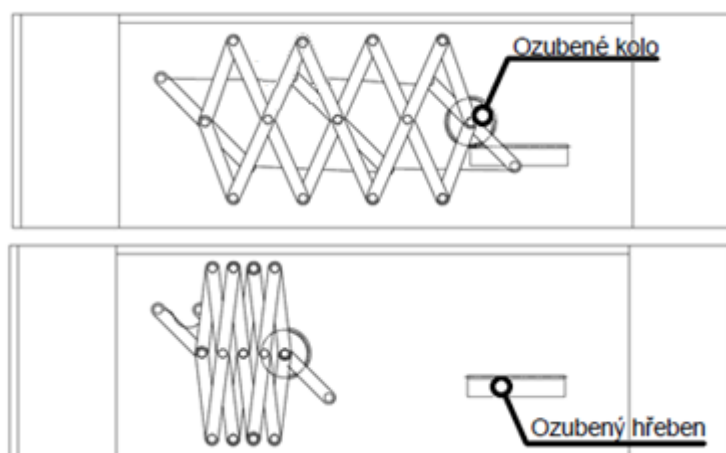
### 2.1 Varianta A

Princip stínění je stejný, jako je využíván u bioklimatických pergol. Mechanismus dokáže lamely nejen natáčet, ale také stáhnout. Jedná se o mechanismus pouze s jedním hnacím motorem. Ten přenáší kroutící moment na řemenový převod. Pomocí řemenového převodu je poháněná první hnací lamela, která pohybuje s dalšími hnanými lamelami. Hřídele lamel jsou upevněny k lineárnímu ložisku pohybujícímu se v kolejnici, viz. Obr. 2.1.

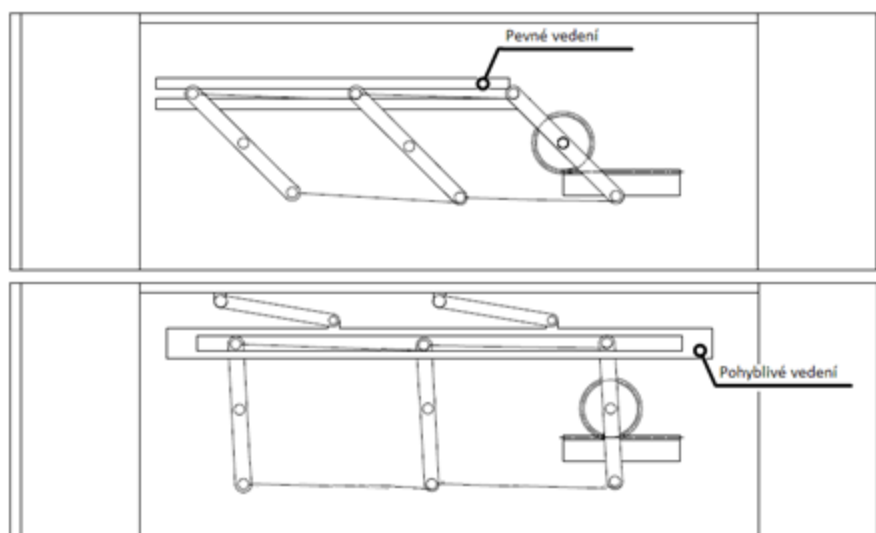


Obr. 2.1 Popis částí mechanismu

Hnací lamela při pohybu vpřed roztahuje další lamely rovnoměrně pomocí nůžkového mechanismu. Aby nedošlo k různému natočení lamel, je otočné rameno na hřídeli hnací lamely vedeno čepem v pevném vedení, které je pevně připevněno na rámu pergoly. Ostatní otočné ramena jsou přidržována hnací lamelou pomocí pohyblivého vedení, viz. Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Roztažený a stažený nůžkový mechanismus s detailem na čep s lanky

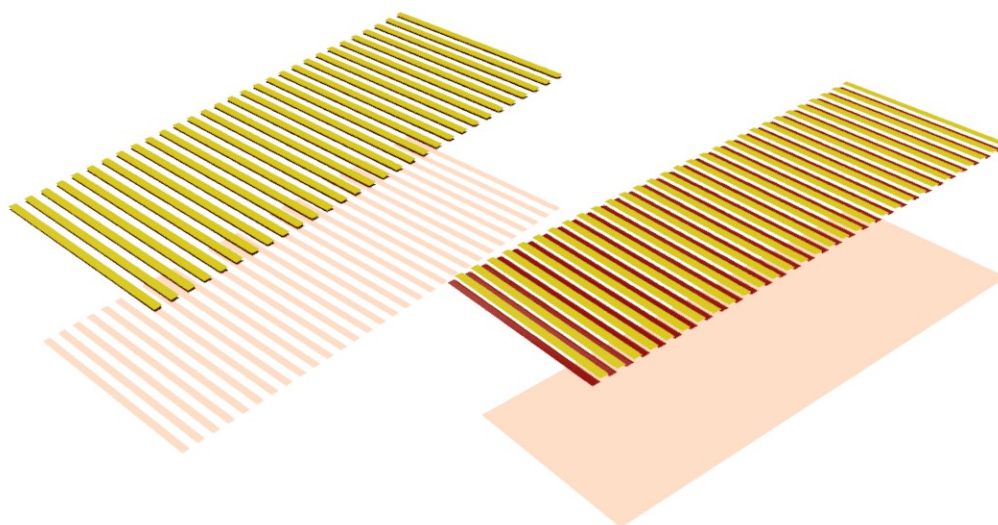


Obr. 2.3 Vyjždění čepu z pevného vedení (nahore) a čepu v pohyblivém vedení (dole)

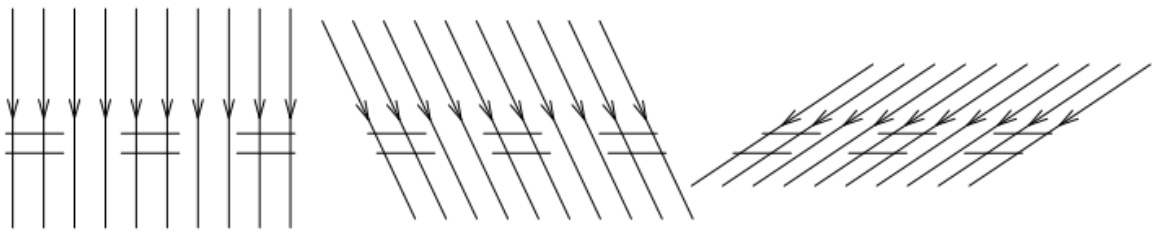
Jakmile hnací lamela dojde do určité vzdálenosti, dojde k napnutí lanek. V této poloze začíná najíždět ozubeným kolem na ozubený hřeben. Aby se hnací lamela mohla otáčet, musí její čep vyjet z pevného vedení. Otočné rameno hnací lamely, pak pohybuje ostatními lamelami pomocí lanek, uchycených na čepch. Lamely se musí posouvat vpřed, aby došlo k natáčení.

## 2.2 Varianta B

Tato varianta se dost liší od ostatních. Místo lamel jsou použity látkové pruhy. Látkové pruhy jsou spojeny do jednoho plátna, aby se daly navíjet. Plátna překrýváním mění velikost prostupu světla, viz. Obr. 2.4 a Obr. 2.5. K ochraně proti dešti je pak použit princip baldachýnové pergoly.

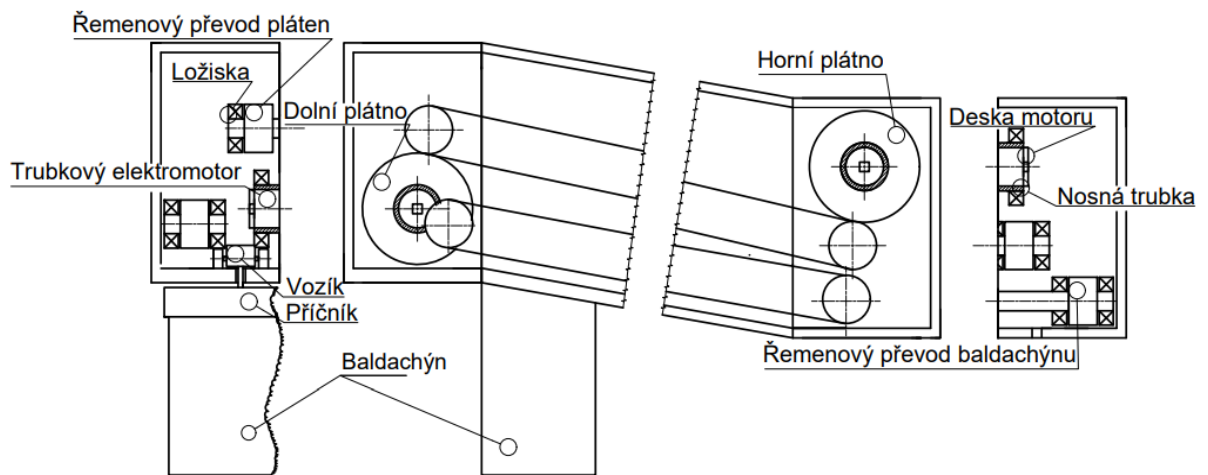


Obr. 2.4 Princip překrývání pruhů (sledování paprsků v programu Inventor)



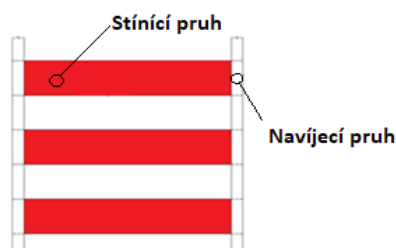
Obr. 2.5 Nastavení pláten pro maximální prostup slunečních paprsků

Mechanismus se skládá ze 4 motorů. Dva motory jsou trubkové a další dva motory jsou standardní motory s upevněným tělem k rámu a s otáčející se hřídeli. Trubkové motory se od standardních liší tím, že jejich výstupní hřídel je v takovém tvaru, aby ji bylo možno uchytit k rámu a umožňovala tělu motoru přenášet pouze kroučící moment. V našem případě je motor uložen v nosné trubce, která je uložena v radiálních ložiscích a přenáší ohybový moment od navinutého plátna. Motor je uchycen ve čtyřhranném otvoru v desce motoru. Deska motoru musí být pevně připevněna k rámu. Plátno je odvíjeno pomocí řemenového převodu pláten standardním motorem, viz. Obr. 2.6. Trubkové motory se nachází v obou rolích pláten a jejich účelem je předepnout plátno, a tím zvýšit tuhost látkových pruhů. Čtvrtý motor je použit pro rozvinutí baldachýnu, který chrání prostor proti dešti. Baldachýn je uchycen v příčnicích. Příčnický zamezují propad baldachýnů při dešti, a tím zlepšují odvod vody. Každý příčník má pak své vozíky na každé straně, které se pohybují v rámu nebo kolejničích.



Obr. 2.6 Mechanismus varianty B

Aby bylo možné látkové pruhy navíjet, musí být spojeny do jednoho plátna. Stínící pruhy jsou sešity k navíjecím pruhům, viz. Obr. 2.7.

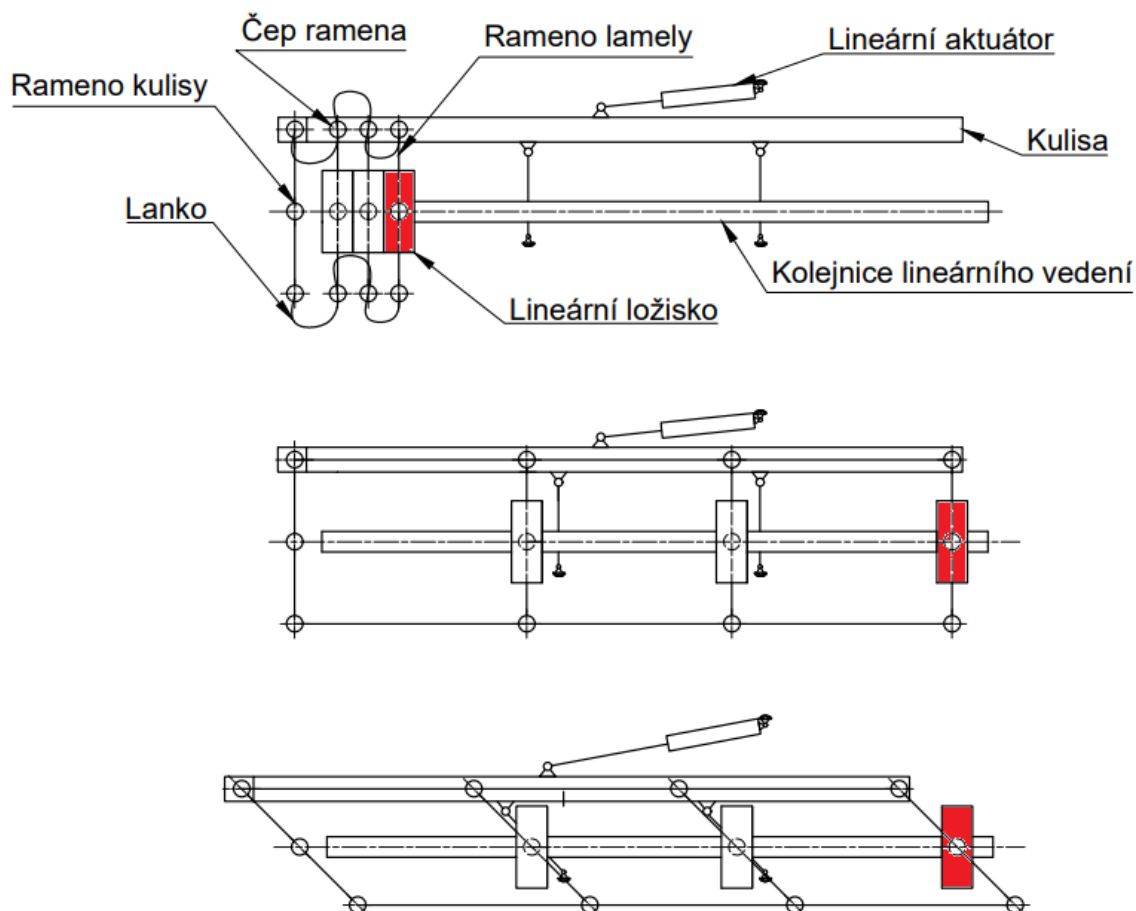


Obr. 2.7 Sešití stínících pruhů

## 2.3 Varianta C

Hlavní výhodou této varianty je její jednoduchost. Varianta pracuje na klasickém principu bioklimatických pergol s lamelami, stejně jako varianta A.

Mechanismus stejně jako u varianty A roztahuje lamely pomocí řemenového převodu, ke kterému je připojena hnací lamela. Na obrázku 2.8 je označena červeně. Při přechodu ze stažené do roztažené fáze, jsou lamely vedeny v kulise. Následně dojde k napnutí lanek a lamely jsou pevně ustaveny. Pohybem aktuátoru se přenáší posuvný pohyb na rameno kulisy, které mění pohyb na rotační pomocí lanek, viz. Obr. 2.8.



Obr. 2.8 Princip mechanismu varianty C



## 2.4 Hodnocení variant

### Varianta A

Mezi výhody patří:

- Výhodou této varianty oproti variantě B je lepší ventilace. Ventilaci lze řídit natáčením lamel, což u plátna nelze.
- Rovnoměrné roztažení lamel.
- Je možné vynechání lineárního aktuátoru.

Mezi nevýhody patří:

- Vyšší cena z důvodu použití nůžkového mechanismu.
- Předpokládám, že mezi čepy bude vznikat velké napětí při stahování lamel a zároveň působení větru na lamely.

### Varianta B

Mezi výhody patří:

- Použití poměrně levné stínicí technologie pomocí plátna.
- Lze použít širokou škálu barev a motivů na pruhy.

Mezi nevýhody patří:

- Pro ochranu proti dešti je třeba použít navíc mechanismus s baldachýnem.
- S rostoucí délkou potřebným zastíněním plochy, je potřeba větší množství plátna. S tímto množstvím také roste velikost role a potřebný prostor při zatažené poloze.
- Špatná ventilace.

### Varianta C

Mezi výhody patří:

- Poměrně jednoduchá konstrukce
- Dobrá ventilace, pomocí lamel.
- Mechanismus zabere malý prostor.

Mezi nevýhody patří:

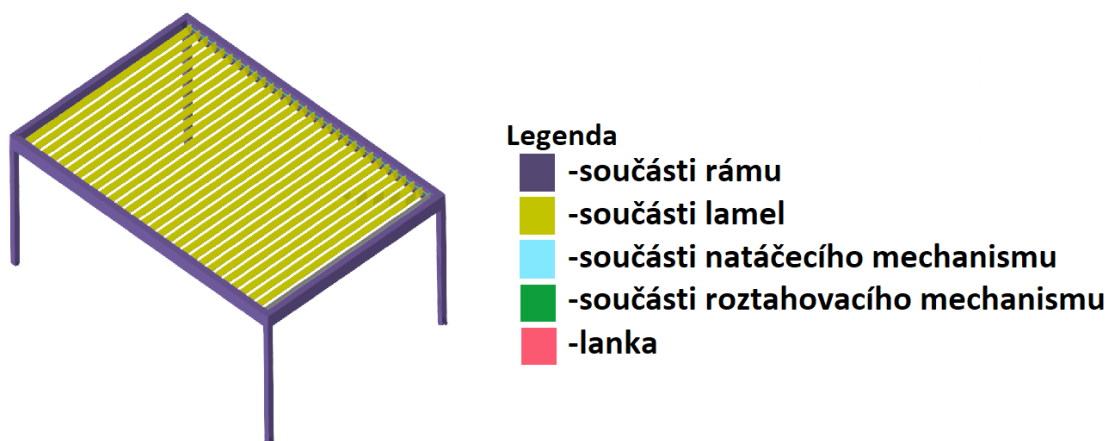
- Nerovnoměrné rozestupy a natočení lamel při roztahování lamel.



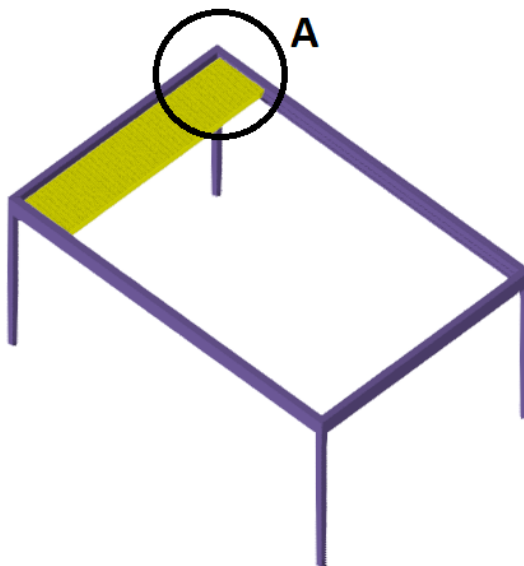
### 3. Vlastní konstrukční řešení

Pro konstrukci mechanismu pergoly jsem si vybral variantu C. Vybral jsem si tuto variantu, protože jednoduchostí mechanismu by mohla konkurovat složitějším pergolám, které se objevují na trhu.

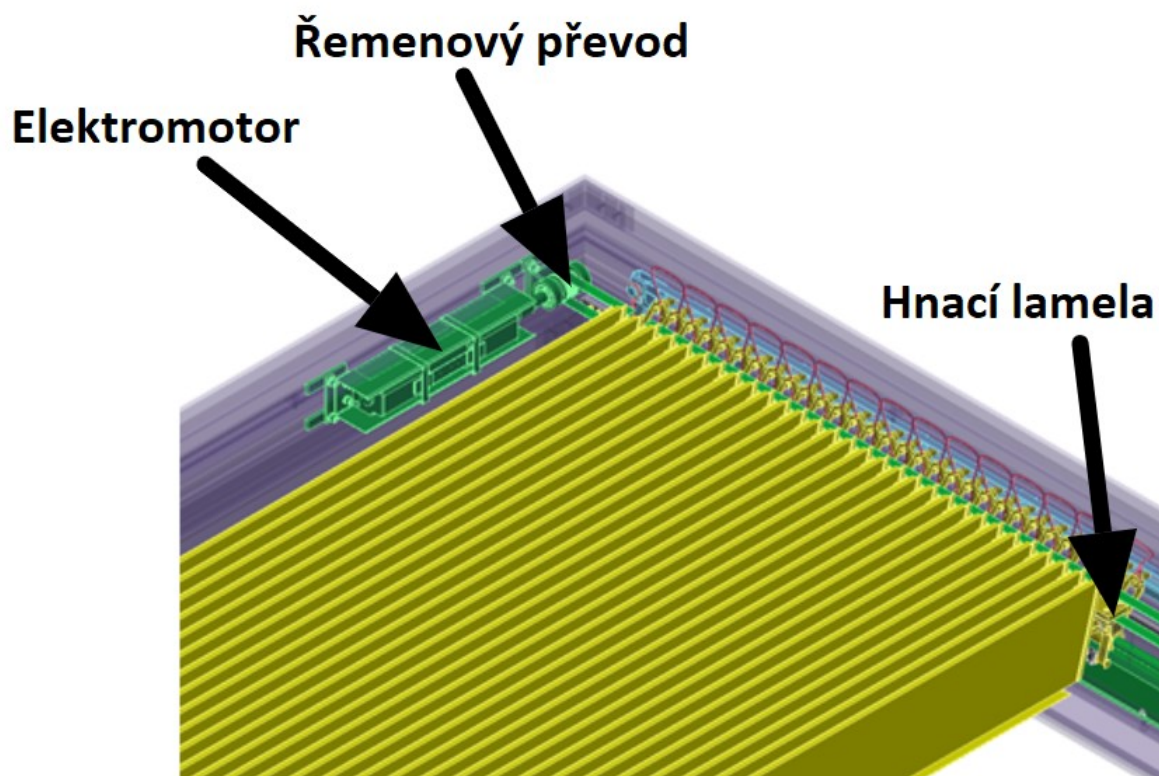
Mechanismus se nachází v obou rámech pergoly. Lze jej rozdělit na dvě části. Na mechanismus pro roztažení nebo pro natáčení lamel. Na obrázku 3.1 je přítomná legenda, kterou se řídím na obrázcích níže.



Obr. 3.1 Pergola v roztaženém stavu s legendou



Obr. 3.2 Pergola ve staženém stavu s označením detailu A

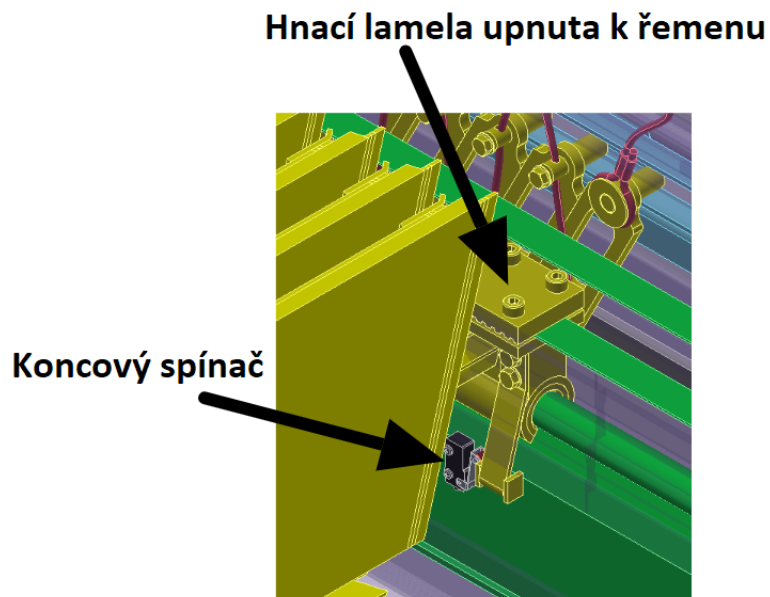


Obr. 3.3 Detail A se záběrem na mechanismus pergoly

### 3.1 Mechanismus roztažení lamel

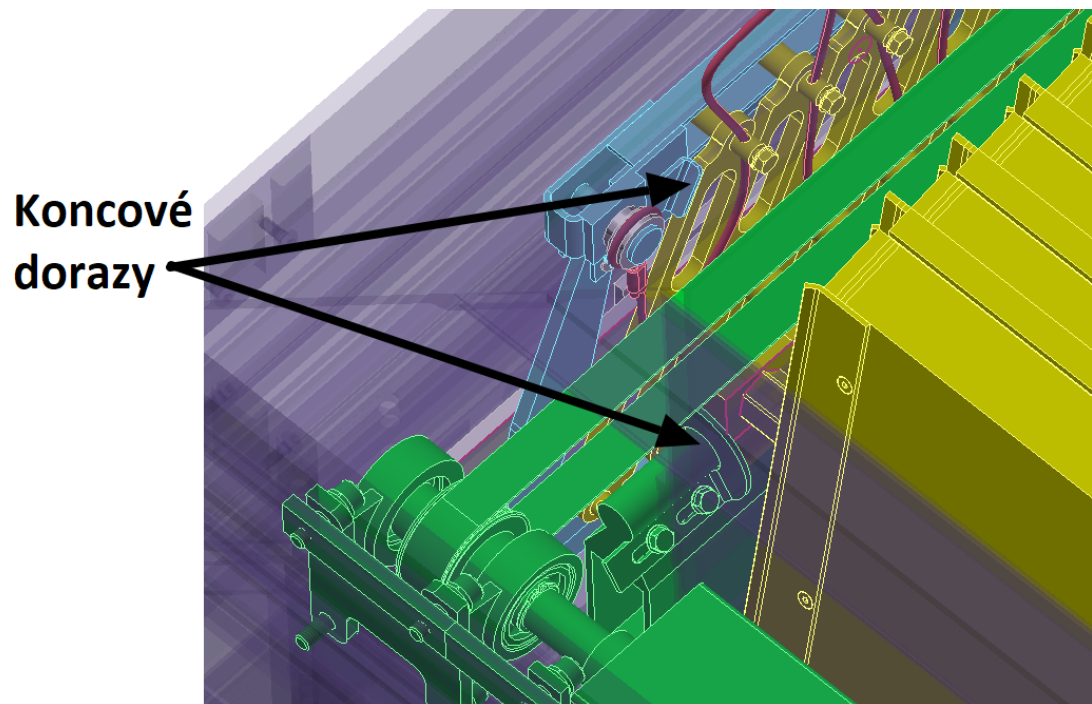
Mechanismus pro roztažení lamel je založen na řemenovém převodu, ke kterému je upnuta hnací lamela pomocí upínací desky. Řemenový převod je poháněn elektromotorem Somfy J410 io o výkonu 25 W s 24 otáčkami za minutu, viz. Obr. 3.3.

Hnací lamela při pohybu pomocí lanek posouvá ostatními lamelami. Jakmile hnací lamela dojde na konec posuvu, dojde pomocí koncového senzoru k vypnutí motoru, viz. Obr. 3.4. Výhodou tohoto motoru je cena a možnost použití v technologii io-homecontrol ovládání domácnosti. Výhodou této technologie je zpětná vazba a vytváření scénářů. Systém dokáže odesílat informace o tom, v jaké poloze jsou lamely a lze ho připojit ke spotřebičům v domácnosti, které jsou ovládány pomocí této technologie. Nevýhodou motoru je, že jej lze nepřetržitě používat jen po dobu 6-ti minut. [29]



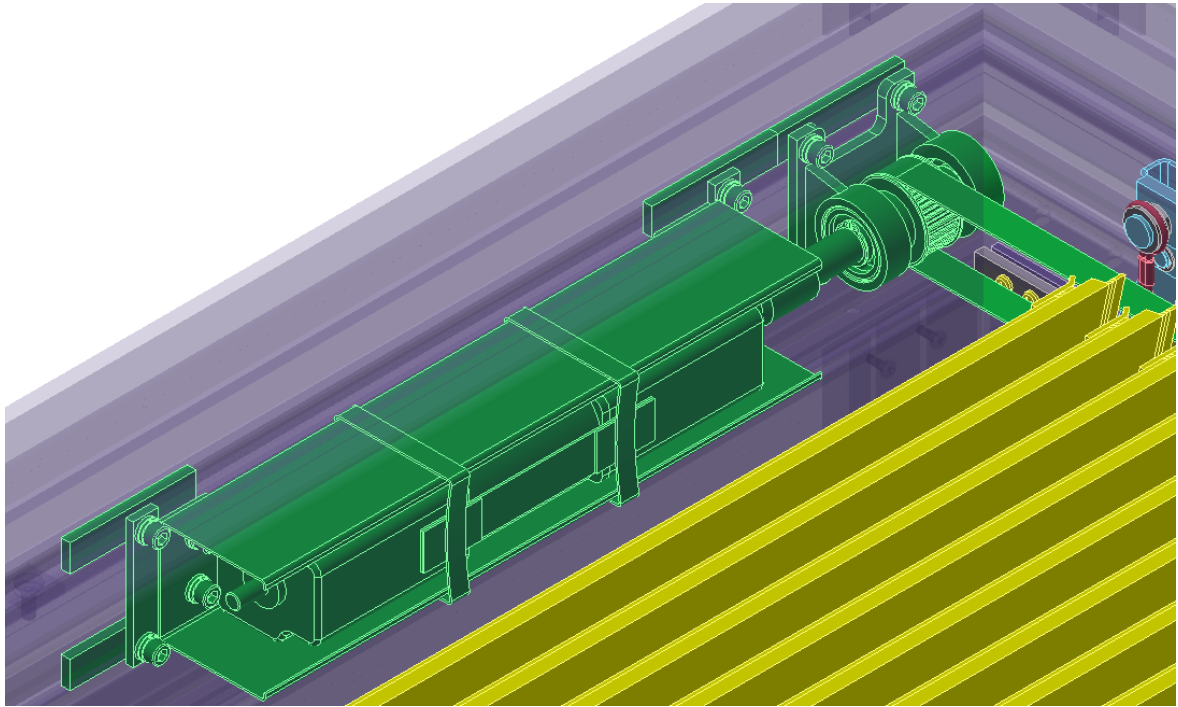
*Obr. 3.4 Hnací lamela*

Při stažené poloze, aby nedocházelo k natáčení a posouvání lamel, jsou lamely přitlačeny k poslední lamele, která je přitlačena ke koncovým dorazům, viz. Obr. 3.6.

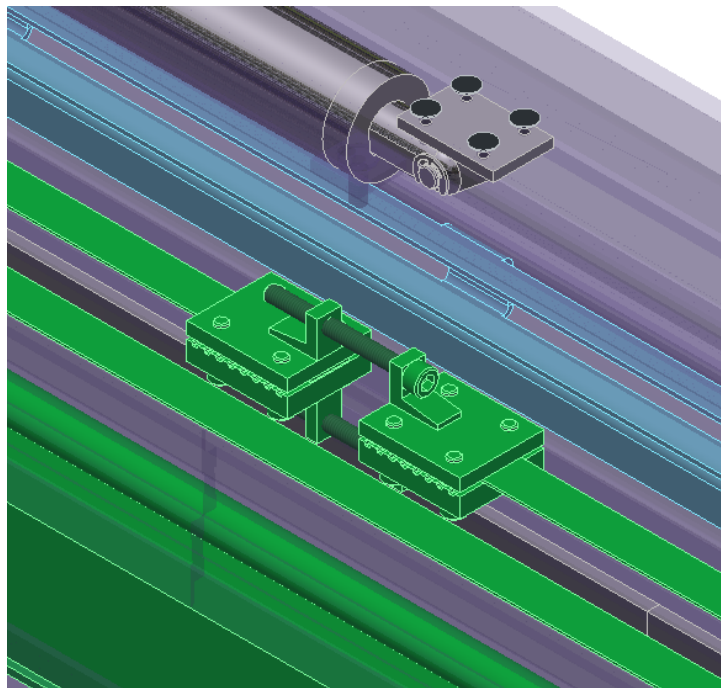


*Obr. 3.6 Koncové dorazy*

Řemenový převod je tvořen polyuretanovým ozubeným řemenem, který je v metráži. Předepnutí řemene zajišťují dvě upínací desky, které spojují oba konce řemene k sobě, viz. Obr. 3.8. Dotahování řemene je řešeno imbusovými šrouby, které spojují desky k sobě.

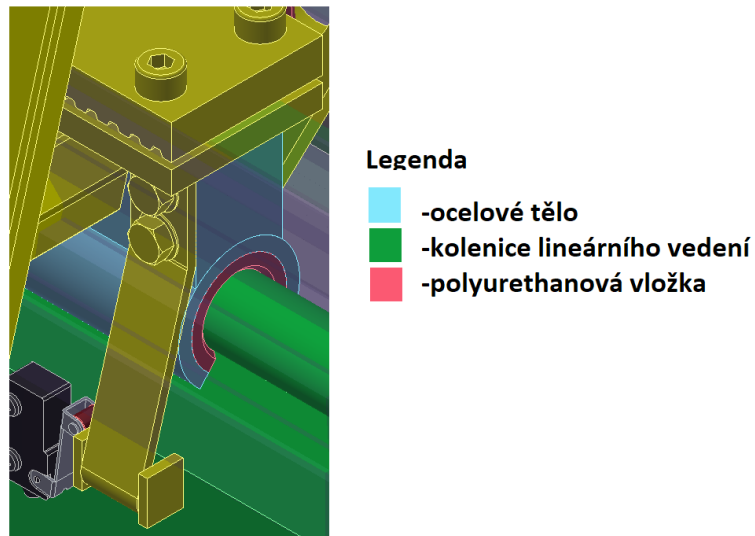


Obr. 3.7 Přenos otáček z motoru na řemen



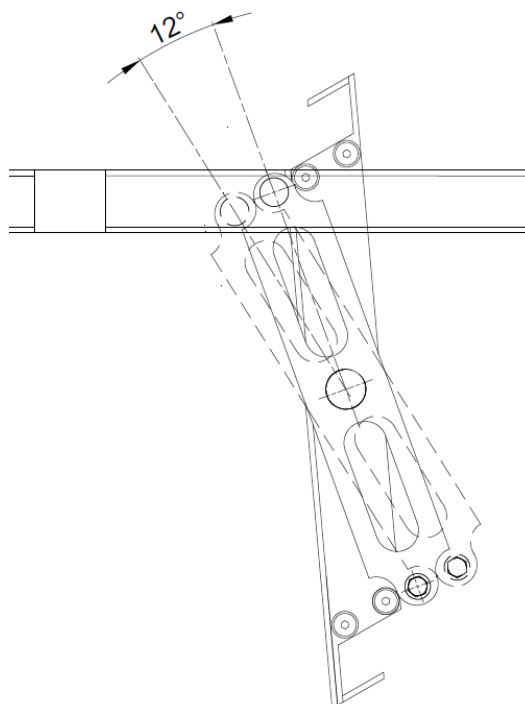
Obr. 3.8 Napínání řemene

Hřídele lamel jsou uloženy v lineárních ložiscích. Ložisko se skládá z ocelového těla, ve kterém je uložena hřídel lamely a z polyuretanové vložky, která byla použita pro své dobré kluzné vlastnosti.



Obr. 3.9 Ložisko

Aby nedocházelo k natáčení lamel, jsou lamely vedeny pomocí vodících čepů v kulise. Čepy jsou v kulise vedeny s vůlí, protože při zatížení lamely vznikají velké průhyby, které způsobují natáčení čepu a mohlo by dojít k poruše čepu a kulisy. Jelikož je zde vůle 4 mm, tak může docházet vlivem působení větru k natáčení lamely při roztahování o  $12^\circ$ , viz. Obr. 3.9.

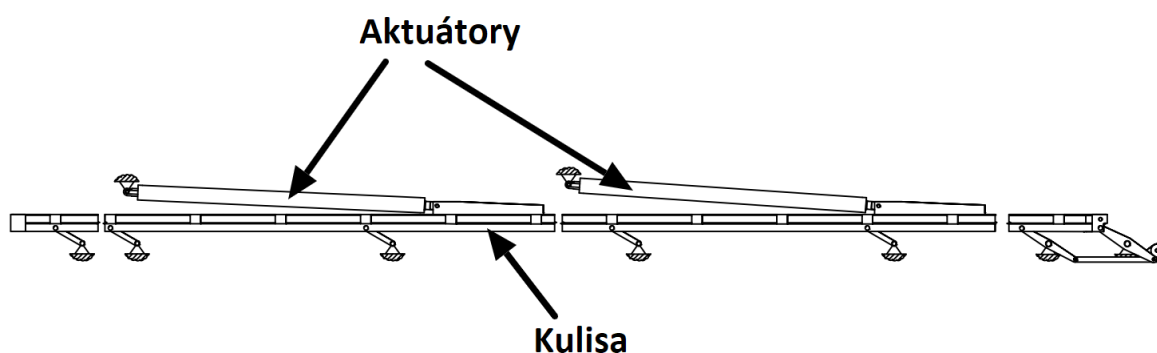


Obr. 3.10 Nepřesnost během roztahování lamel

## 3.2 Mechanismus roztažení lamel

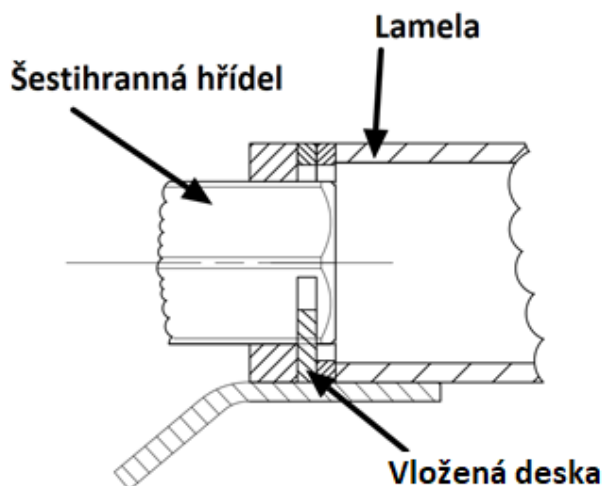
Mechanismus natáčení funguje na principu žaluzií. Lamely jsou natáčeny pouze pomocí lanek. Čepy se kulisy nedotýkají. Na kulise a na rameni hnací lamely se nachází kladky, na které je uchyceno lanko. Ostatní lamely mají ramena s uchycením lana skrz čep. Lanko je pak v čepu přitlačováno šroubem.

Mechanismus pro natáčení je součástí kulisy. Kulisou pak pohybují dva lineární aktuátory Pico 0 se silou zdvihu 900 N, viz. Obr. 3.10. Aktuátory dokáží natáčet lamely až o 135°. Z důvodu malé rychlosti aktuátoru o síle 1800 N, která dosahovala pouze rychlosti 2 m/s, byly použity dva aktuátory s rychlostí 4,5 m/s s poloviční silou zdvihu. [28]



Obr. 3.11 Schéma mechanismu

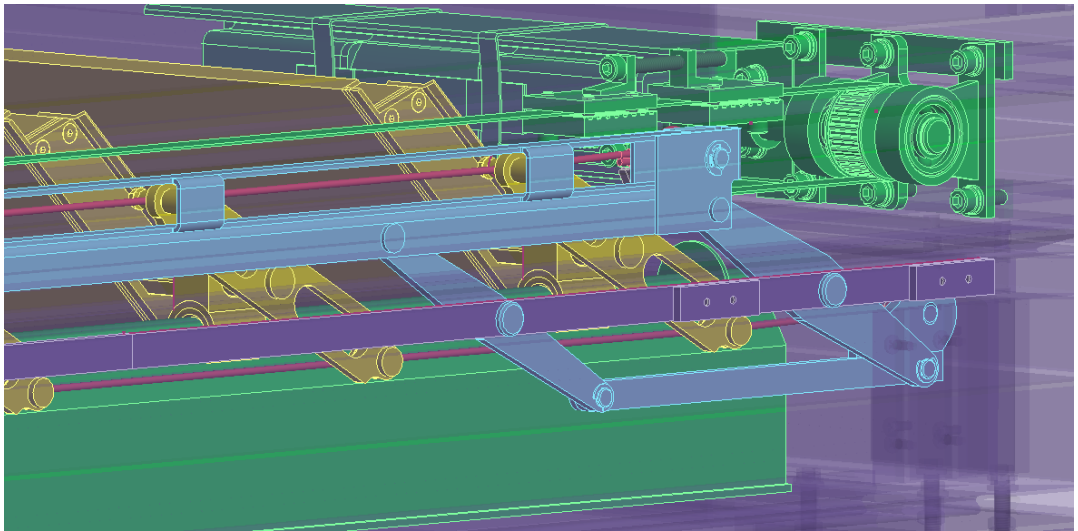
Kroutící moment je přenášen z čepu na lamelu pomocí ramena. Rameno je svařeno s hřídelí se šestihranem. Šestihran tvarovým stykem přenáší moment na lamelu. Lamela musí být zajištěna i v axiálním směru. Kvůli velkému napětí v hřídeli jsem musel přejít z původního pojištění pomocí pojistného kroužku na spojení s vloženou deskou v hřídeli za oblast působení ohybu, viz. Obr. 3.11.



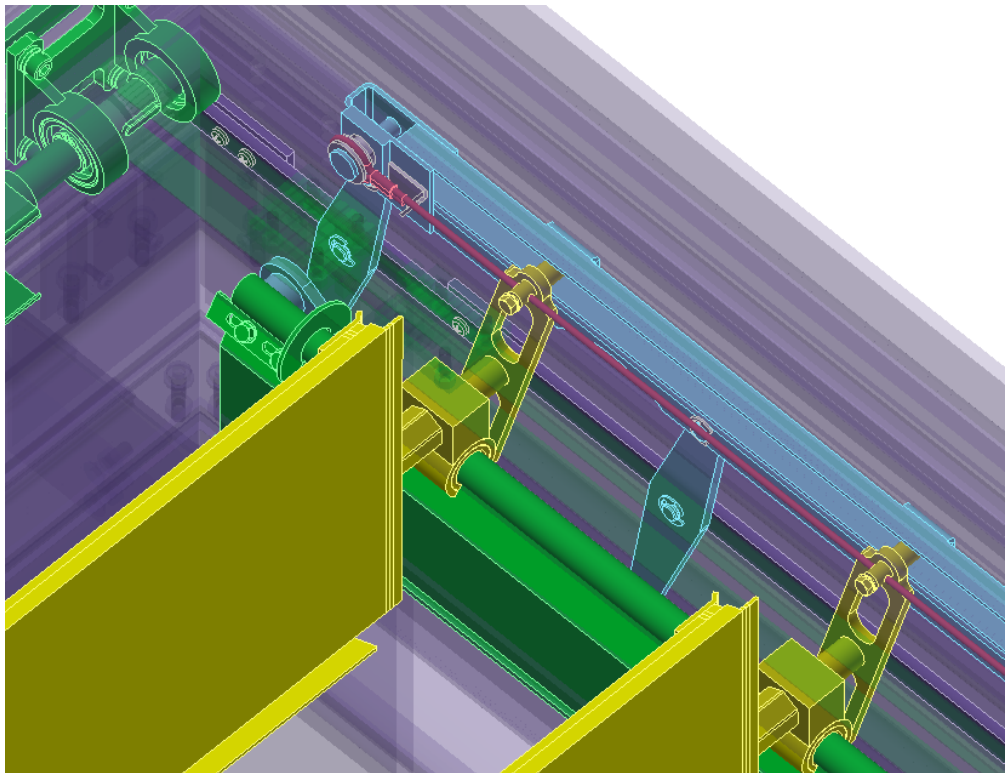
Obr. 3.12 Uložení hřídele v lamele



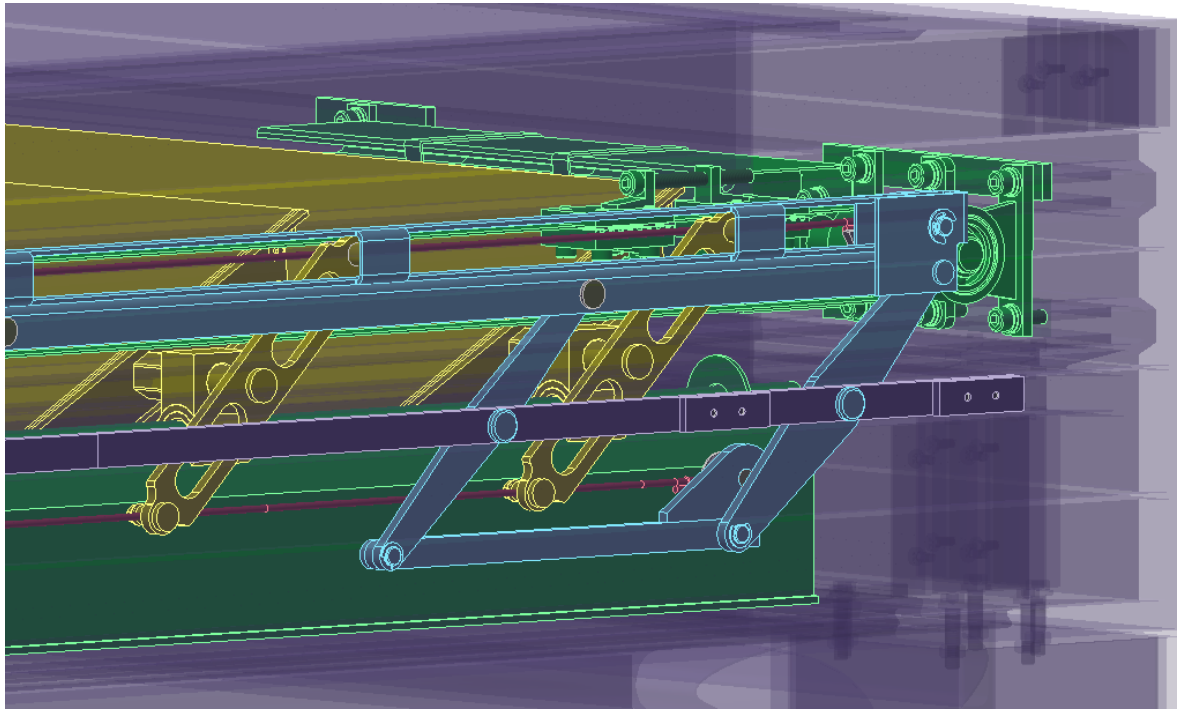
Níže jsou uvedeny obrázky mechanismu, při různých natočení lamely.



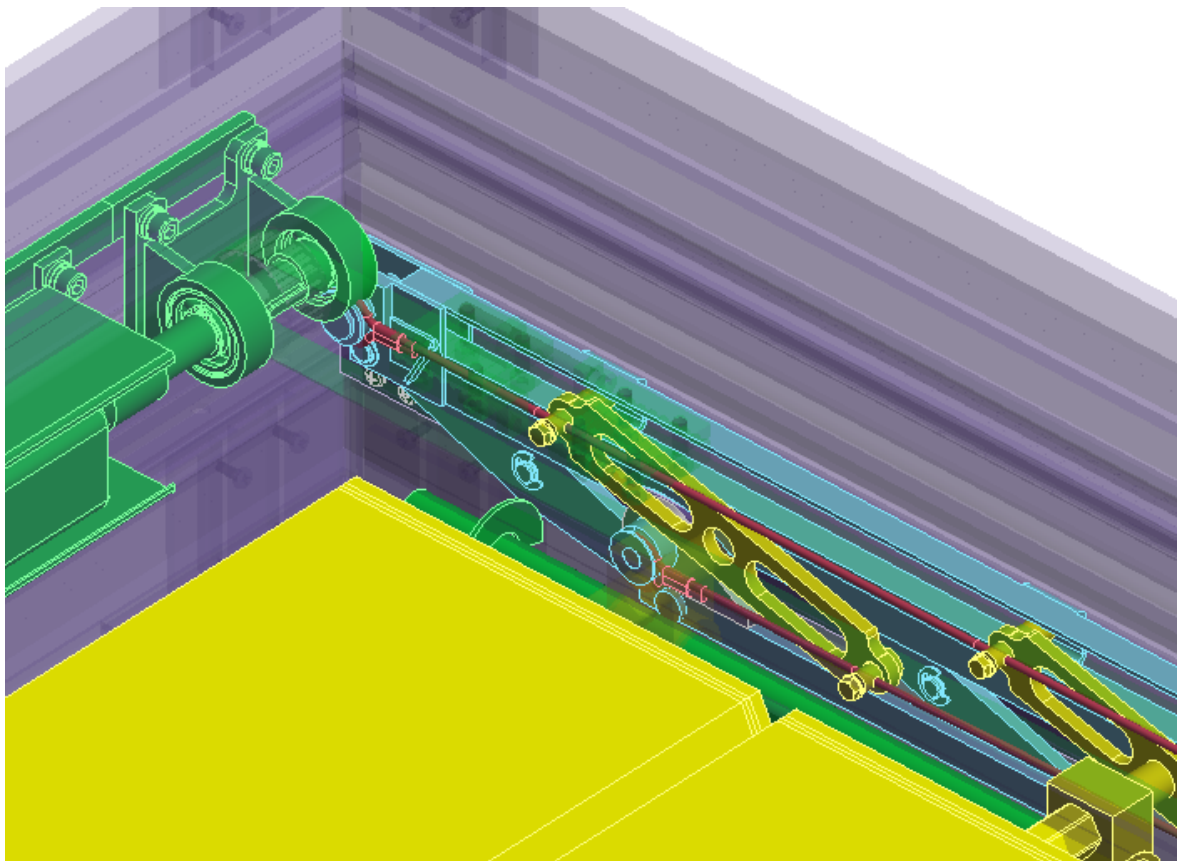
Obr. 3.13 Úhel natočení lamel 135°



Obr. 3.14 Úhel natočení lamel 90°



Obr. 3.15 Úhel natočení lamel 45°

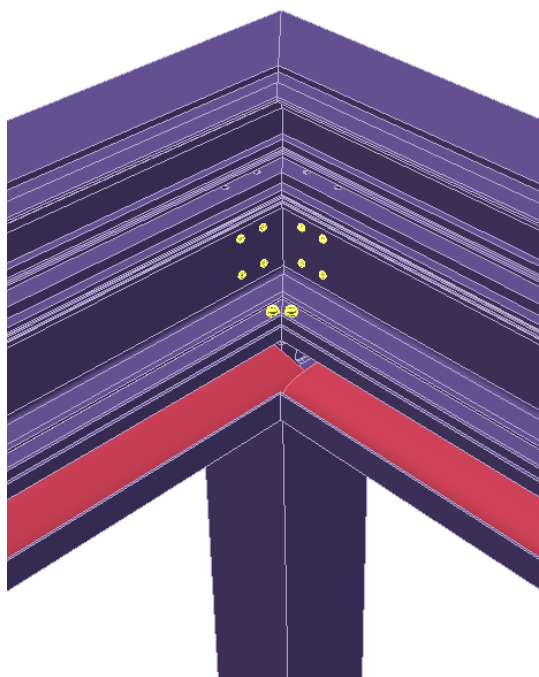


Obr. 3.16 Úhel natočení lamel 0°

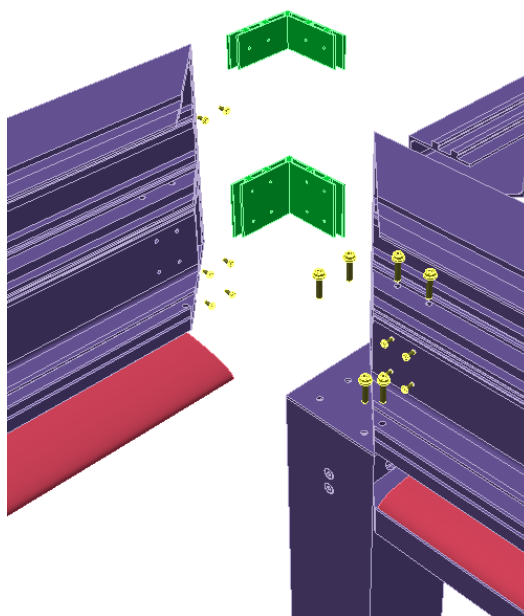


### 3.3 Popis rámu pergoly

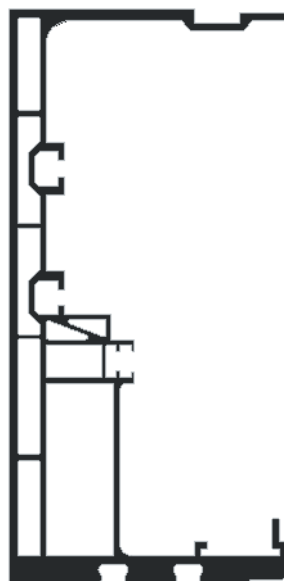
Rám pergoly se skládá z hliníkových extrudovaných profilů. Profily jsou z eloxovaného hliníku EN AW 6082 T6. Vybral jsem si tuto slitinu hliníku, protože profily musí vydržet velké namáhání. Profily jsou k sobě sešroubovány (Obr. 2.19) a místa, kde hrozí zatékání nebo kde by se mohla udržet voda je třeba zatmelit.



*Obr. 3.17 Roh nosné konstrukce*



*Obr. 3.18 Rozpad rohu nosné konstrukce*



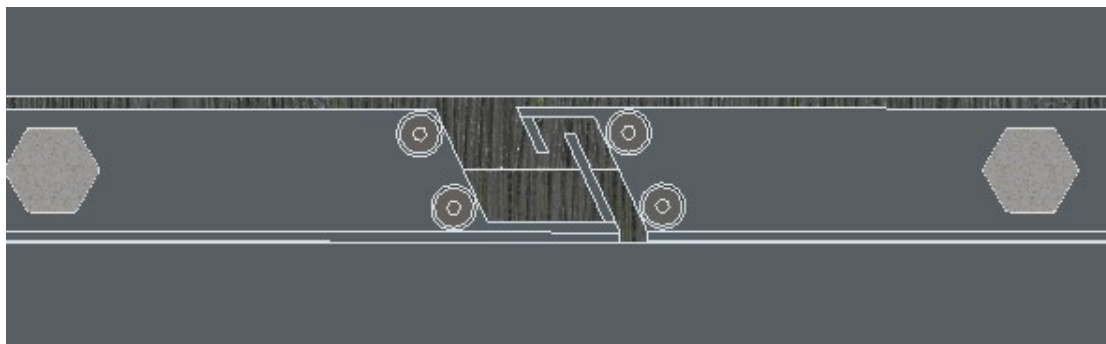
Obr. 3.19 Profil horizontálního rámu



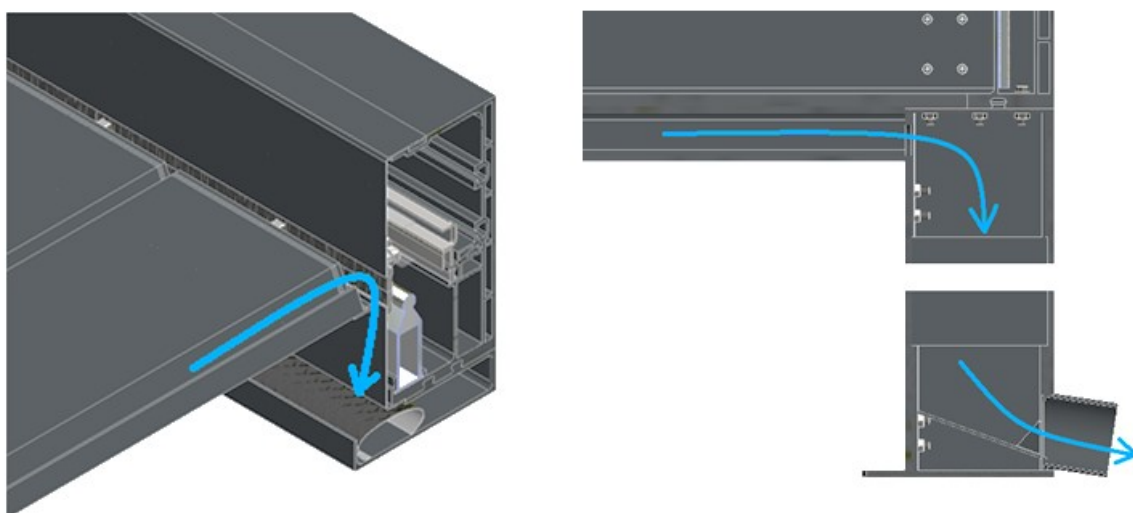
Obr. 3.20 Profil lamely

## Odtok vody

Odtok vody je řešen pomocí žlábků na lamelách. Voda poté stéká do okapu a dírou v noze odtéká z pergoly ven. V okapu se nachází síťka pro zabránění vniknutí nečistot do odtoku. V pergole jsou odtoky v obou nohách, což zajišťuje odtok vody i při větších deštích. Pod odtok z nohy se dá vybudovat žlab nebo lapač pro odvod dešťové vody do kanálu.

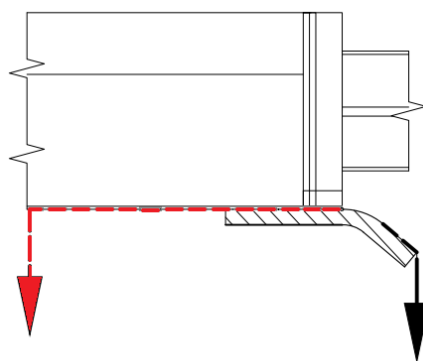


Obr. 3.21 Zapadnutí lamel



Obr. 3.22 Odtok vody

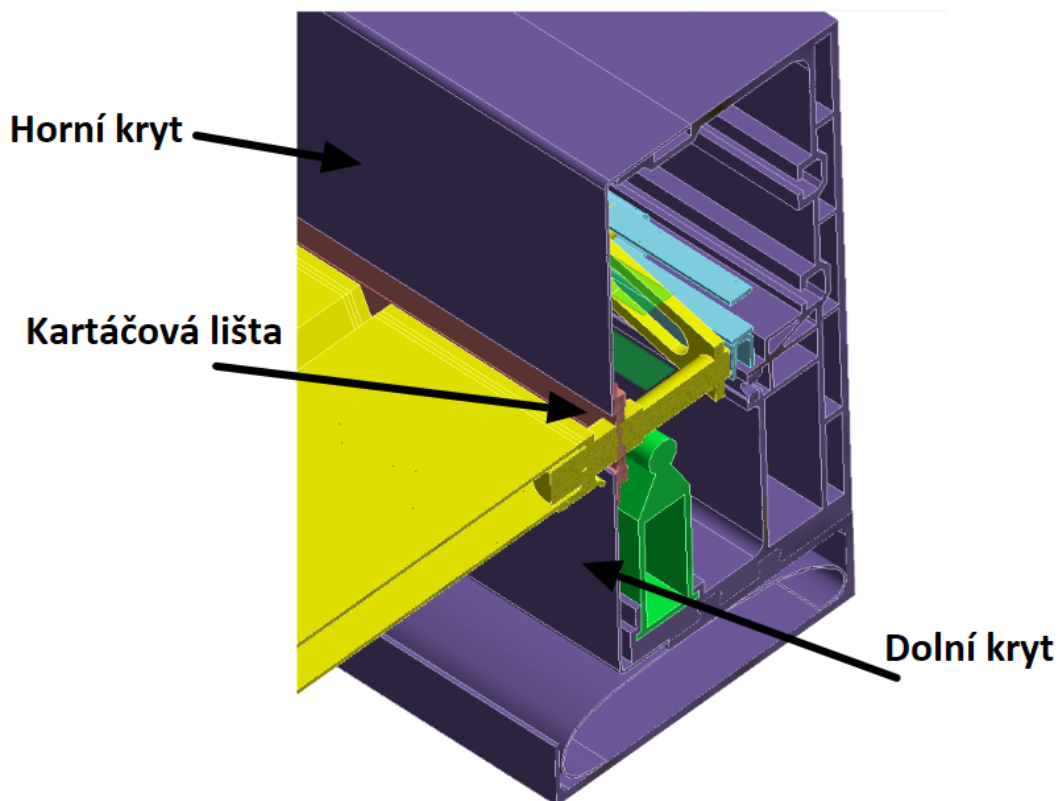
Správné zakrytí prostoru navíc zajišťuje lamela, která má na sobě namontovaný okap, který zabraňuje tomu, aby se voda dostala do krytého prostoru.



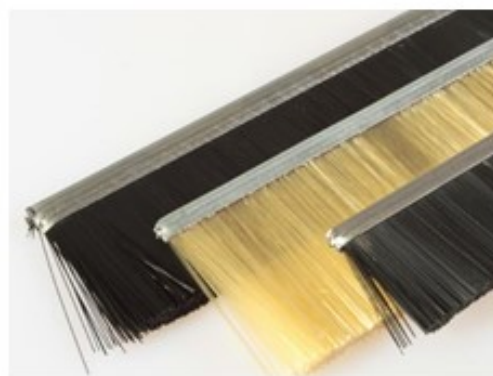
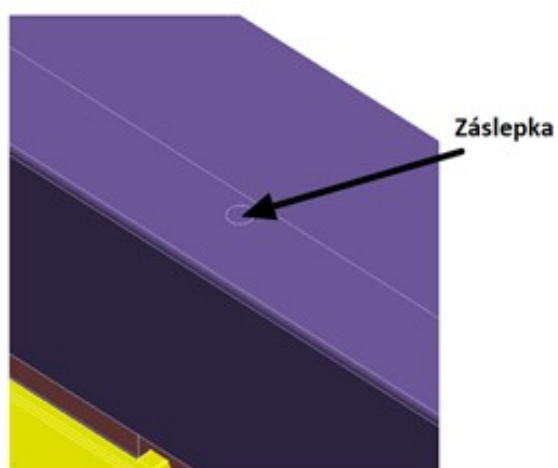
Obr. 3.23 Stékání vody bez okapu (červeně) a s okapem (černě)

## Krytování

Mechanismus je kryt ohýbanými plechy. Plechy jsou přišroubovány k hliníkovému rámu. Aby se hřídele mohly pohybovat, a přitom nedocházelo k odkrytí mechanismu, tak jsou na krytu přivařeny kartáčové lišty, viz. Obr. 3.24. Aby šrouby nenarušovaly vzhled pergoly, tak jsou zakryty záslepkami, viz. Obr. 3.25.



Obr. 3.24 Krytování pergoly



Obr. 3.25 Zakrytí šroubu záslepkou (vlevo) a ukázka kartáčových lišt (vpravo)

## 4. Zatížení větrem

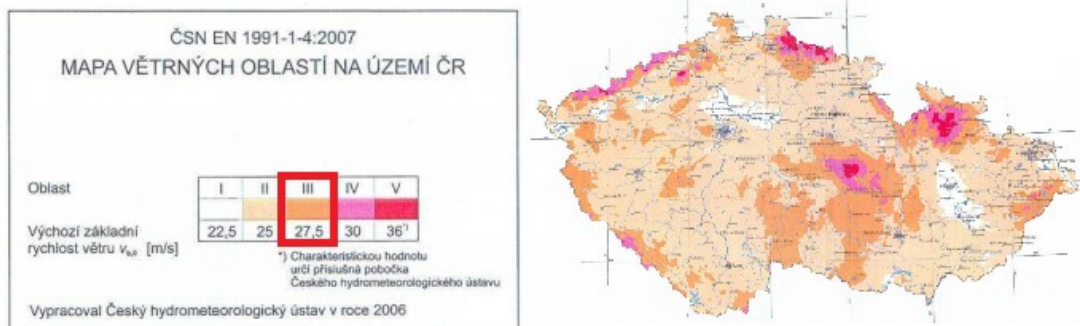
### 4.1 Zatížení střechy pergoly při uzavřené poloze

Při proudění větru pod a nad pergolou dochází ke změně tlaku. To způsobuje namáhání konstrukce. Výpočet byl proveden podle příruček [14, 15, 16] k normě ČSN EN 1991-1-4, která se zabývá zatížením konstrukcí větrem.

#### Předpoklady výpočtu

##### Výchozí základní rychlost větru

Výchozí základní rychlost byla určena z mapy větrných oblastí. Zvolil jsem větší rychlost, která umožňuje použít pergolu do většiny oblastí ČR, viz. Obr. 4.1. Výchozí základní rychlost byla zvolena  $v_{b,0} = 27,5$  m/s.



Obr. 4.1 Mapa větrných oblastí na území ČR dle ČSN EN 1991-1-4 (červeně označena zvolená oblast) [15]

##### Základní rychlost větru

V běžných případech v ČR se volí součinitele směru a ročního období  $c_{dir} = c_{season} = 1$ . Součinitel pravděpodobnosti pro pravděpodobnost  $p = 0,02$  překročení základní rychlosti větru je  $c_{prob} = 1$ .

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_{dir} \cdot c_{season} \cdot c_{prob} = v_{b,0} = 27,5 \text{ m/s} \quad (4.1)$$

##### Základní dynamický tlak větru

Hustota vzduchu se volí  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ .

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 27,5^2 = 473 \text{ N/m}^2 \quad (4.2)$$

## Střední rychlost větru

Pro správné pochopení jednotlivých druhů rychlostí jsou zde uvedeny následující definice:

„Výchozí základní rychlost větru je desetiminutová střední rychlost s roční pravděpodobností překročení  $p = 0,02$  nezávisle na směru větru ve výšce 10 m nad plochým terénem bez překážek (kategorie II), která podle národní přílohy normy zahrnuje vliv nadmořské výšky“ [14]

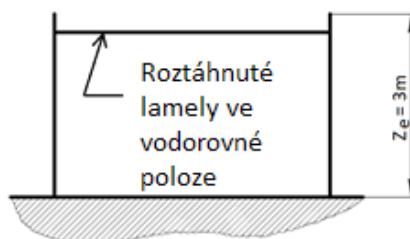
„Střední rychlost větru je definována v příručce jako rychlost větru ve výšce  $z$ , zahrnující vliv drsnosti terénu a ortografie.“ [14]

### Součinitel ortografie

Součinitel ortografie zohledňuje okolní prostředí, ve kterém může dojít k nárůstu střední rychlosti větru. Mezi útvary, které jej ovlivňují patří například kopce, hřebeny a útesy. V praxi se jedná o železnice, dálnice, lanovky a závodní sjezdovky. Pro případ pergoly uvažuju, že bude umístěna v oblastech, kde průměrný sklon návětrného svahu nebude větší než  $3^\circ$ . Součinitel ortografie volím  $c_0(z_e) = 1$ .

### Součinitel drsnosti terénu

Součinitel drsnosti terénu závisí na kategorii terénu a na následně na podmínce mezi referenční výškou a minimální výškou. Kategorie terénu byla zvolena pro příměstský terén a vesnice. Referenční výška byla zvolena  $z_e = 3$  m k hornímu okraji nosného rámu, viz. Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Volba referenční výšky

| Kategorie terénu   | $z_0$ [m] | $z_{min}$ [m] |
|--|-----------|---------------|
| 0 Moře nebo pobřežní oblasti vystavené otevřenému moři   | 0,003     | 1             |
| I Jezera nebo vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací a bez překážek   | 0,01      | 1             |
| II Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenost je větší než 20násobek výšky překážek   | 0,05      | 2             |
| III Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami nebo s izolovanými překážkami, jejichž vzdálenost je maximálně 20násobek výšky překážek (jako jsou vesnice, předměstský terén, souvislý les) | 0,3       | 5             |
| IV Oblasti, ve kterých je nejméně 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška je větší než 15 m  | 1,0       | 10            |

Obr. 4.3 Zvolená kategorie terénu a jejich parametry [16]

$$c_r(z_e) = c_r(z_{min}) \text{ pro } z_e \leq z_{min} \quad (4.3)$$

$$c_r(z_e) = k_r \cdot \ln \frac{z_{min}}{z_0} = 0,215 \cdot \ln \frac{5}{0,3} = 0,605 \quad (4.4)$$

Výška terénu kategorie II  $z_{0,II} = 0,05\text{m}$ .

$$k_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left( \frac{0,3}{0,05} \right)^{0,07} = 0,215 \quad (4.5)$$

Střední rychlost větru

$$v_m(z_e) = c_r(z_e) \cdot c_0(z_e) \cdot v_b = 0,605 \cdot 1 \cdot 27,5 = 16,64 \text{ m/s} \quad (4.6)$$

## **Charakteristický maximální dynamický tlak**

Intenzita turbulence

$$I_v(z_e) = I_v(z_{min}) \text{ pro } z_e \leq z_{min} \quad (4.7)$$

Součinitel turbulence se běžně volí  $k_I = 1$ .

$$I_v(z_e) = \frac{k_I}{c_0(z_e) \cdot \ln \frac{z_{min}}{z_0}} = \frac{1}{1 \cdot \ln \frac{5}{0,3}} = 0,355 \quad (4.8)$$

Součinitel expozice

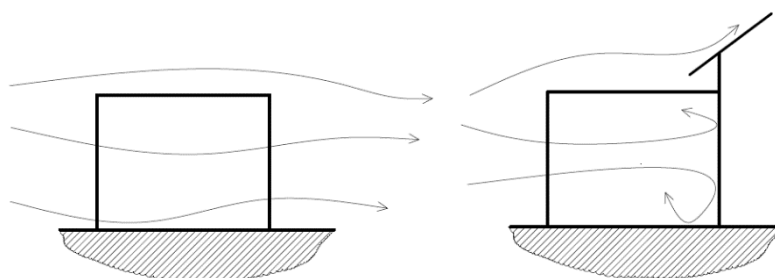
$$\begin{aligned} c_e(z_e) &= [1 + 7 \cdot I_v(z_e)] \cdot c_0(z_e)^2 \cdot c_r(z_e)^2 \\ c_e(z_e) &= [1 + 7 \cdot 0,355] \cdot 1^2 \cdot 0,605^2 = 1,276 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Charakteristický maximální dynamický tlak

$$q_p(z_e) = c_e(z_e) \cdot q_b = 1,276 \cdot 0,473 = 0,604 \text{ kN/m}^2 \quad (4.10)$$

## Výpočet výsledných tlaků

Při výpočtu výsledných sil a určení součinitelů konstrukce vycházím z toho, že pergolu hodnotím jako přístřešek. U přístřešků závisí výsledná síla na součiniteli plnosti podle, kterého se určuje součinitel výsledného tlaku. V případě, kdy za pergolou nestojí překážka, která by uzavírala zadní stranu pergoly je součinitel plnosti  $\varphi = 0$ . Při této hodnotě součinitele plnosti jsou tlaky daleko menší než, když za pergolou stojí překážka uzavírající zadní stranu. Pro přístřešek uzavřený na závětrné straně je součinitel plnosti  $\varphi = 1$ . Nejčastěji touto překážkou je zeď domu, vedle které je pergola postavena, viz. Obr. 4.4.



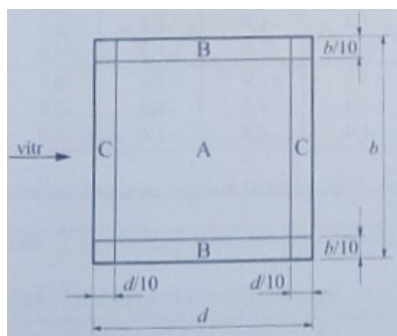
Obr. 4.4 Příklad  $\varphi = 0$  (vlevo) a  $\varphi = 1$  (vpravo)

Přístřešky jsou v příručce řešeny pro různé typy střech a podle toho se liší jejich součinitel. Vybral jsem pultovou střechu při úhlu sklonu  $0^\circ$ , což odpovídá pergole při roztáhnutí a natočení lamel do vodorovné polohy. Hodnoty se záporným znaménkem značí směr zatížení větrem nahoru. Kladné hodnoty značí zatížení směrem dolů.

| Úhel sklonu střechy $\alpha$ | Součinitel plnosti $\varphi$ | Součinitel celkové síly $c_f$ | Oblast A | Oblast B | Oblast C |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------|----------|----------|
| $0^\circ$                    | Maximum - všechna $\varphi$  | +0,2                          | +0,5     | +1,8     | +1,1     |
|                              | Minimum pro $\varphi = 0$    | -0,5                          | -0,6     | -1,3     | -1,4     |
|                              | Minimum pro $\varphi = 1$    | -1,3                          | -1,5     | -1,8     | -2,2     |

Obr. 4.5 Hodnoty součinitelů  $c_{p,net}$  a  $c_f$  pro pultové přístřešky [14]

Tabulka se součiniteli  $c_{p,net}$  se dále dělí na oblasti a podle toho se také mění síly působící v různých oblastech střechy pergoly. Součinitel rozdílu tlaků taky udává rozdílné působení síly v kladném a záporném směru, viz. Obr. 4.5.



Obr. 4.6 Oblasti střechy [14]



Výpočet pro různé oblasti je pro pergolu s uzavřenou zadní stranou. Jedná se o horší případ zatížení.

#### Výpočet tlaků v různých oblastech

$$w_{net}(z_e)^{-A} = q_p(z_e) \cdot c_{p,net}^{-A} = 0,604 \cdot 1,5 = 0,906 \text{ kN/m}^2 \quad (4.11)$$

$$w_{net}(z_e)^{-B} = q_p(z_e) \cdot c_{p,net}^{-B} = 0,604 \cdot 1,8 = 1,087 \text{ kN/m}^2 \quad (4.12)$$

$$w_{net}(z_e)^{-C} = q_p(z_e) \cdot c_{p,net}^{-C} = 0,604 \cdot 2,2 = 1,329 \text{ kN/m}^2 \quad (4.13)$$

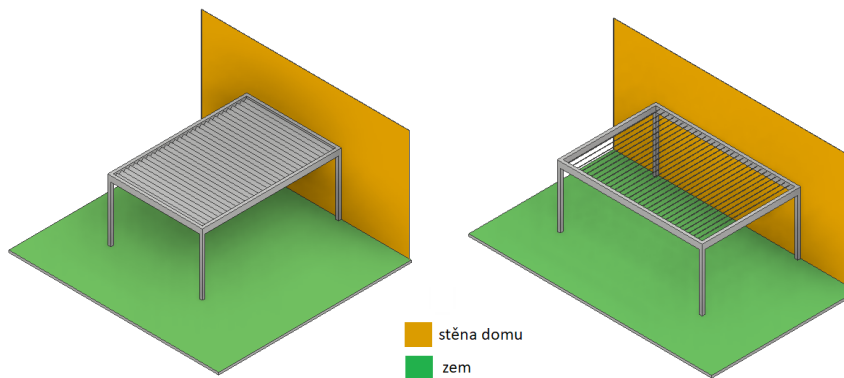
$$w_{net}(z_e)^{+A} = q_p(z_e) \cdot c_{p,net}^{+A} = 0,604 \cdot 0,5 = 0,302 \text{ kN/m}^2 \quad (4.14)$$

$$w_{net}(z_e)^{+B} = q_p(z_e) \cdot c_{p,net}^{+B} = 0,604 \cdot 1,8 = 1,087 \text{ kN/m}^2 \quad (4.15)$$

$$w_{net}(z_e)^{+C} = q_p(z_e) \cdot c_{p,net}^{+C} = 0,604 \cdot 1,1 = 0,664 \text{ kN/m}^2 \quad (4.16)$$

Z vypočtených tlaků je jasné, že největší zatížení bude v záporném směru. To způsobuje zatížení pergoly vztlakem. Ale výsledné zatížení lamely bude ovlivňovat i její samotná tíha.

## 4.2 Zatížení nosné konstrukce pergoly větrem



Obr. 4.7 Zatížení ze strany A (vlevo) a zatížení ze strany B (vpravo)

### Zatížení ze strany A

Při výpočtech uvažují, že směr působení větru bude kolmo na stěnu domu, viz. Obr. 4.7. Toto působení větru způsobuje největší celkové zatížení pergoly. Abychom zjistili sílu zatěžující nosnou konstrukci, potřebujeme určit součinitele tvaru konstrukce. V tomto případě potřebují určit součinitele pro horizontální, vertikální část rámu a okap, viz. Obr. 4.8.



Obr. 4.8 Části konstrukce a vyznačení oblastí, s kterými počítám v následujících výpočtech

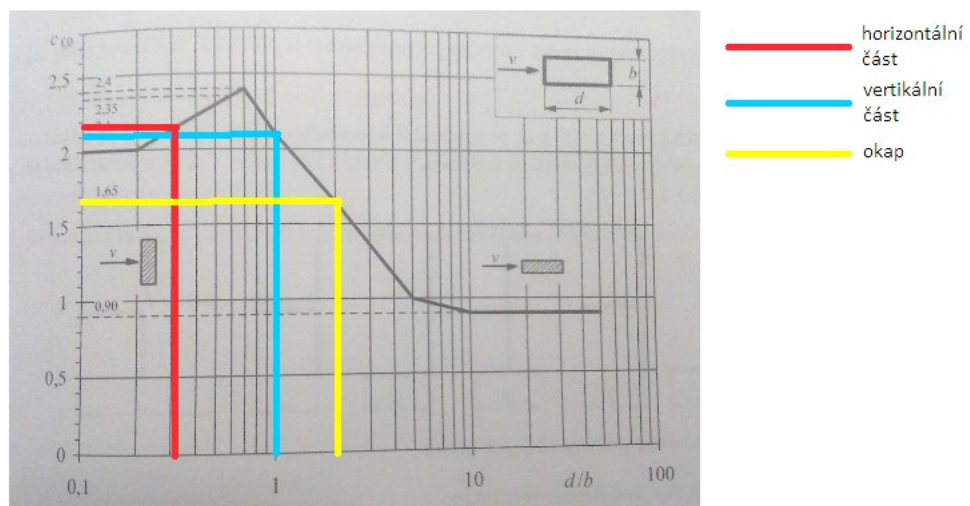
### Určení součinitele $c_{f,0}$

Zvolené součinitele  $c_{f,0}$

-horizontální část  $c_{f,0} = 2,15$

-vertikální část  $c_{f,0} = 2,1$

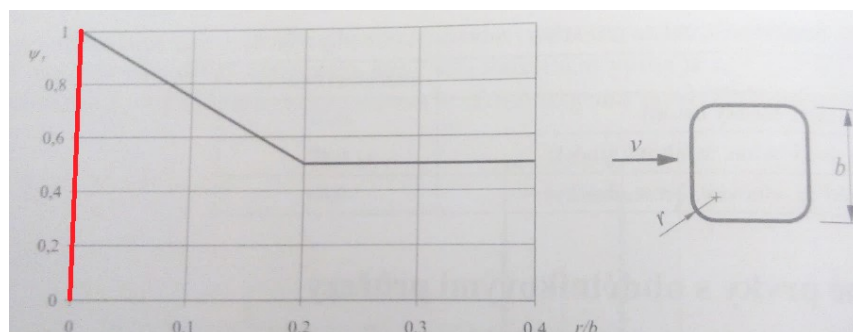
-okap  $c_{f,0} = 1,65$



Obr. 4.8 Součinitele síly  $c_{f,0}$  pro obdélníkové průřezy s ostrými rohy bez vlivu proudění kolem volných konců [14]

### Určení součinitele $\psi_r$

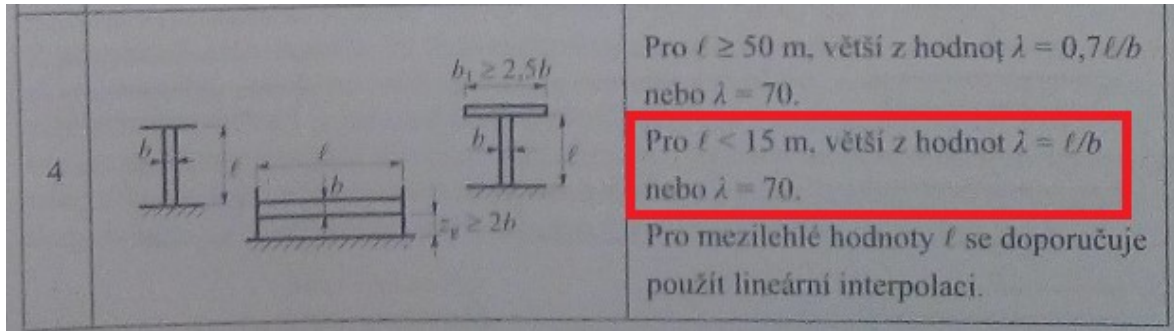
Pro všechny části uvažuju zaoblení profilu  $r = 0$ . Redukční součinitel se rovná pro všechny části  $\psi_r = 1$ , viz. Obr. 4.9.



Obr. 4.9 Redukční součinitel  $\psi_r$  pro čtvercový průřez se zaoblenými rohy [14]

## Určení součinitele $\psi_\lambda$

Pro určení součinitele  $\psi_\lambda$  musela být vypočítána efektivní štíhlost. Efektivní štíhlost se počítá podle druhu konstrukce. Byl zvolen druh konstrukce, jejíž výška je menší než 15 m s polohou konstrukce číslo 4, viz. Obr. 4.10.



Obr. 4.10 Doporučené hodnoty  $\lambda$  pro válce, mnohoúhelníkové průřezy, obdélníkové průřezy, otevřené konstrukční průřezy a příhradové konstrukce [14]

## Výpočet efektivní štíhlosti

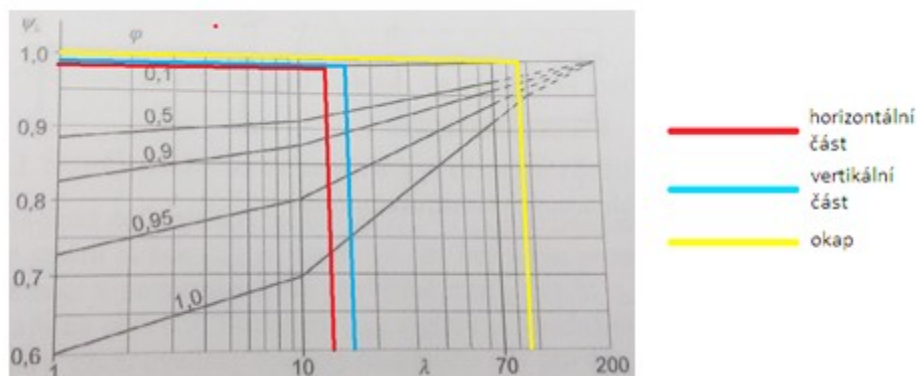
-horizontální část 
$$\lambda = \frac{l}{b} = \frac{4240}{250} = 16,96 \quad (4.17)$$

-vertikální část 
$$\lambda = \frac{l}{b} = \frac{2750}{120} = 22,98 \quad (4.18)$$

-okap 
$$\lambda = \frac{l}{b} = \frac{4000}{42} = 95,23 \quad (4.19)$$

Pro zvolení součinitele koncového efektu  $\psi_\lambda$  musíme vypočítat součinitel plnosti.

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{(2 * (2750 * 120) + (4240 * 250) + (4000 * 42))}{(3008 * 4240)} = 0,15 \quad (4.20)$$



Obr. 4.11. Směrné hodnoty součinitele koncového efektu  $\psi_\lambda$  jako funkce součinitele plnosti  $\varphi$  v závislosti na štíhlosti  $\lambda$  [14]

## Zvolené součinitele $\psi_\lambda$

-horizontální část  $\psi_\lambda = 0,99$

-vertikální část  $\psi_\lambda = 0,99$

-okap  $\psi_\lambda = 1$

### Výpočet součinitele síly $c_f$

$$\text{-horizontální část} \quad c_f = c_{f,0} * \psi_r * \psi_\lambda = 2,15 * 1 * 0,99 = 2,13 \quad (4.21)$$

$$\text{-vertikální část} \quad c_f = c_{f,0} * \psi_r * \psi_\lambda = 2,1 * 1 * 0,99 = 2,08 \quad (4.22)$$

$$\text{-okap} \quad c_f = c_{f,0} * \psi_r * \psi_\lambda = 1,65 * 1 * 1 = 1,65 \quad (4.23)$$

### Výpočet zatížení jednotlivých částí

$$\text{-horizontální část} \quad w = q_p(z_e) * c_f = 0,604 * 2,13 = 1,29 \text{ kN/m}^2 \quad (4.24)$$

$$\text{-vertikální část} \quad w = q_p(z_e) * c_f = 0,604 * 2,08 = 1,26 \text{ kN/m}^2 \quad (4.25)$$

$$\text{-okap} \quad w = q_p(z_e) * c_f = 0,604 * 1,65 = 1 \text{ kN/m}^2 \quad (4.26)$$

## **Zatížení ze strany B**

Při výpočtu zatížení ze strany B je součinitel síly pro obdélníkové průřezy a redukční součinitel stejný jako pro zatížení ze strany A. Efektivní štíhlost zatížení neovlivní. Zatížení ovlivní pouze součinitel plnosti. Ten však zatížení nepatrně zmenší. Z toho důvodu uvažují, že zatížení je stejné jako v případě zatížení ze strany A.

## **4.3 Simulace zatížení lamel**

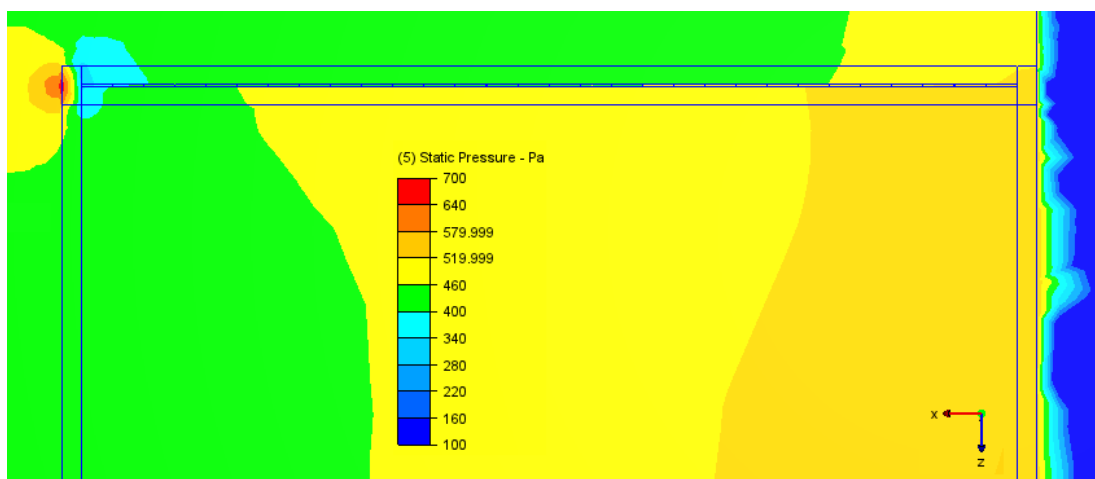
Lamely jsou zatěžovány větrem proměnlivě podle úhlu natočení. V programu CFD Autodesk jsem udělal simulaci zatížení lamel při úhlu natočení  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $135^\circ$ . Z tohoto zatížení jsem získal síly zatěžující mechanismus. Jedná se o síly snažící se lamely posunout a síly, které vytvářejí krut.

Při simulaci byla nastavená okrajová podmínka na začátku simulované oblasti rychlost  $17 \text{ m/s}$ . Velikost rychlosti je stejná jako střední rychlost, která byla vypočtena podle normy. Další okrajovou podmínkou byl nastavený nulový přetlak na výstupu simulované oblasti. Program konvergoval hodnoty do doby, než byla detekována plochá křivka. V průměru se jednalo přibližně o 450 opakování na jednu simulaci.

V obrázcích simulace představuje červená šipka osu X, modrá šipka osu Z a zelená šipka osu Y. V příloze A jsou dostupné obrázky vektorů větru pro jednotlivé případy natočení lamel. Vektorové zobrazení větru nám ukazuje obtékání pergoly.

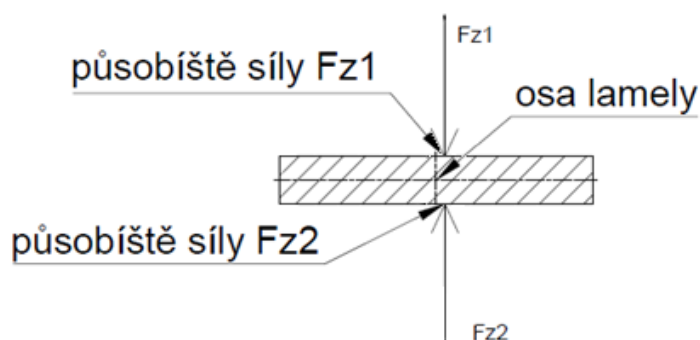
## Úhel natočení lamel - 0°

Při úhlu natočení 0° je zatížená lamela pouze v ose Z. Zatížení vzniká od změny tlaku. Tyto změny tlaků vyvozují sílu směrem nahoru (proti směru osy Z). Tlak se postupně zvyšuje od přední části k zadní části pergoly, viz. Obr. 4.12. Nad pergolou působí menší tlak než pod pergolou. Na pravé straně se nachází zeď domu. Pergola s uzavřenou stěnou je více namáhána než pergola s průchozími stěnami. Zatížení pergoly s průchozími stěnami je až několikanásobně menší.



Obr. 4.12 Oblastí tlaků po simulaci (úhel 0°)

Po simulaci jsem použil funkci kalkulace plochy. Tato funkce mi vypočítala velikost síly působící na plochu lamely a působiště této síly. Jelikož působiště není přímo v ose lamely, tak síla zatěžující lamelu vytváří kroutící moment. Velikost ramena kroutícího momentu je vzdálenost působiště od osy lamely.

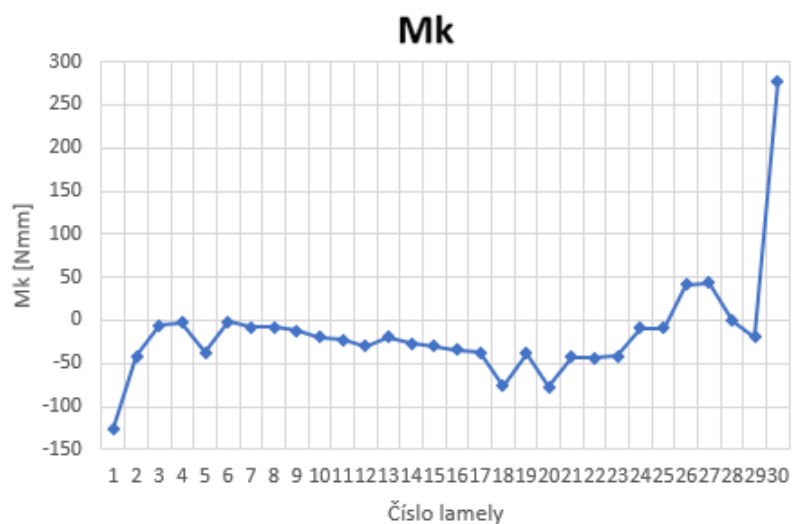


Obr. 4.13 Působení sil na 1. lamelu pergoly

Na obrázku 4.13 jsem zakreslil příklad působení sil na první lamelu. Na obou stranách působí tlak. Vznikají tedy síly s působením směrem do lamely. Síla  $Fz1$  o velikosti 300 N působí od osy lamely ve vzdálenosti 1,5 mm. Síla  $Fz2$  se rovná -307 N a působí na druhé straně 1,9 mm od osy lamely. Výsledný kroutící moment bude rozdíl momentu od síly  $Fz1$  a  $Fz2$ .

Z grafu působících kroutících momentů můžeme vidět, že největší zatížení lamely je na konci pergoly. Zde je největší síla a kvůli rozdílným působišťům se momenty od síly  $Fz1$  a  $Fz2$  sčítají. Žádný z kroutících momentů se nerovná nule, jak by se mohlo zdát.

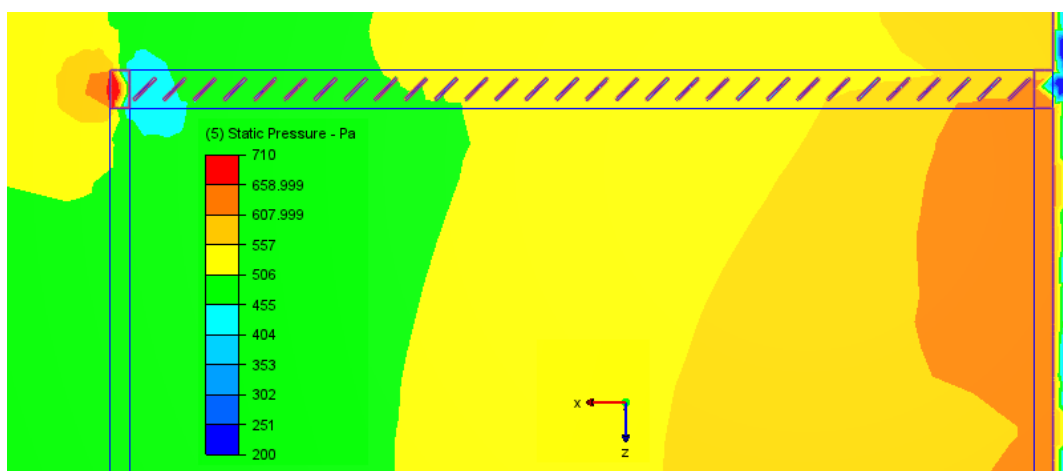
Na obrázku 4.14 je vidět velikost kroutícího momentu na jednotlivých lamelách. Největší kroutící moment je na poslední lamelě. V místě poslední lamely dochází ke stáčení větru, které lze vidět ve vektorovém zobrazení rychlosti větru v příloze A.



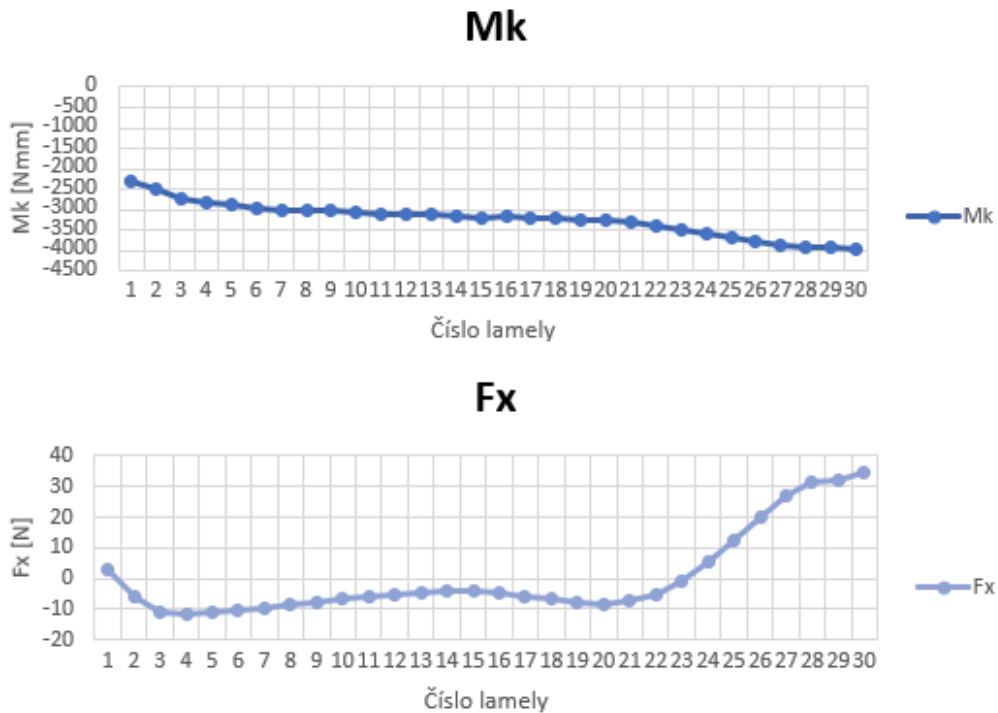
Obr. 4.14 Hodnoty kroutících momentů na lamelách (úhel 0°)

## Úhel natočení lamel - 45°

Při úhlu natočení 45° vzniká větší namáhání co se týče kroutícího momentu než u předchozí simulace. Ačkoliv velikost sil v ose X se mění, kroutící moment roste rovnoměrně od první lamely. Na obrázku 4.15 si můžeme všimnout, že tlak není rozdělen lamelami horizontálně, jak tomu bylo při úhlu natočení 0°, ale pouze postupně narůstá směrem k zadní části pergoly. Tak tomu bude i v nadcházejících případech.



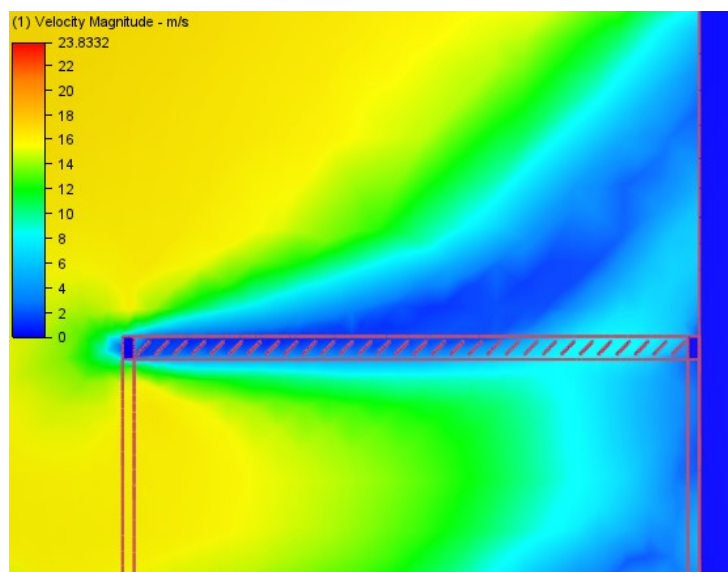
Obr. 4.15 Oblasti tlaků po simulaci (úhel 45°)



Obr. 4.16 Hodnoty kroutících momentů a sil v ose X na lamelách (úhel 45°)

V tomto případě na lamelu působí navíc síla v ose X. Tato síla nejen, že vyvozuje moment, ale taky se snaží lamely posunout směrem dozadu. Za a pod posledními lamelami se postupně zvyšuje tlak, což způsobuje, že jsou tlačeny směrem dopředu. Velikost celkové síly  $F_x$  je spolu s kroutícím momentem zaznačena na obrázku 4.16.

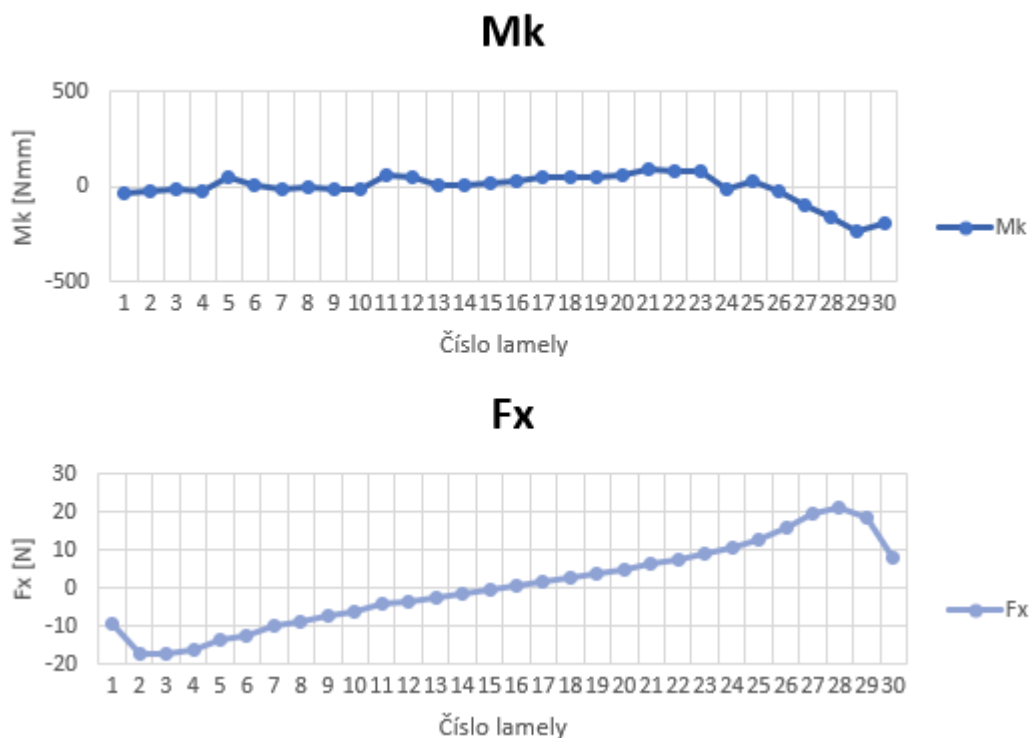
Na obrázku 4.17 je vidět, že rychlost větru se mění hned za předním rámem. Rám rychlost větru snižuje až pod rychlost 3 m/s, což ovlivňuje namáhání lamel.



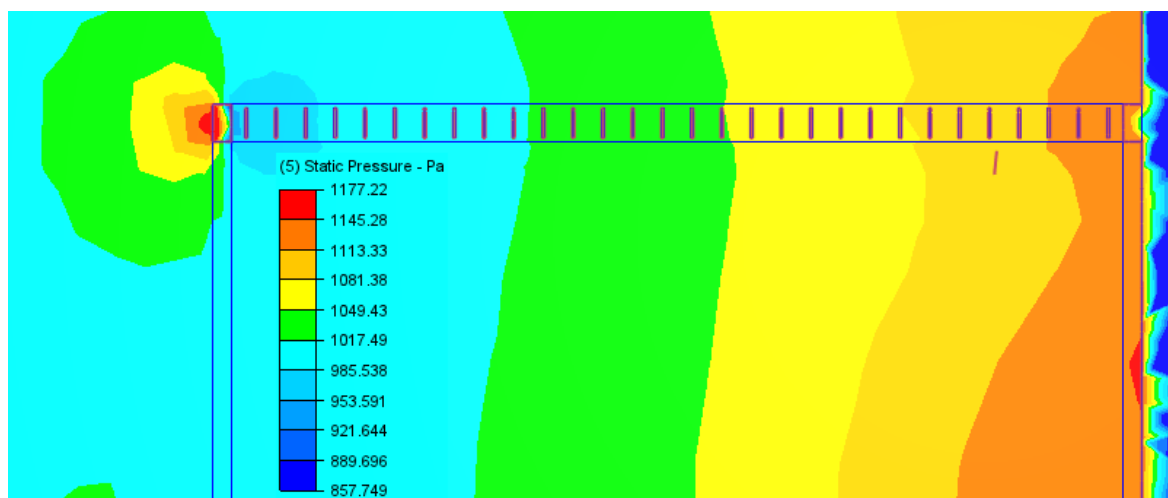
Obr. 4.17 Obtékání pergoly (úhel 45°)

## Úhel natočení lamel - 90°

Výsledné zatížení na lamely otočené pod úhlem 90° je menší než v ostatních případech. Síla  $F_x$  sice dosahuje v některých případech velikosti až 900 N na jednu lamelu, což je nejvíc ze všech simulovaných případů, ale je vyrovnávána skoro stejně velkou silou v opačném směru. Z průběhu kroutících momentů můžeme vidět, že i působíště těchto sil je podobné. Zvýšení síly  $F_x$  lze vyvodit i z velkého statického tlaku, který zde dosahuje hodnot 1100 Pa, viz. Obr. 4.19.



Obr. 4.18 Hodnoty kroutících momentů a sil v ose X na lamelách (úhel 90°)



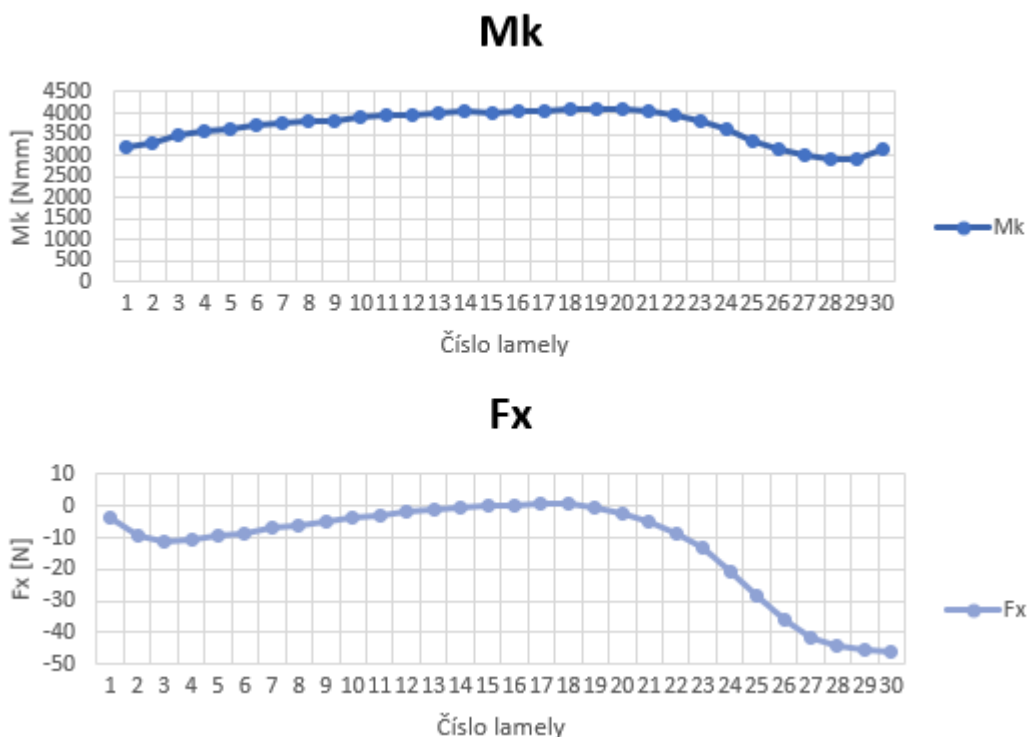
Obr. 4.19 Oblastí tlaků po simulaci (úhel 90°)



## Úhel natočení lamel - 135°

Při úhlu natočení 135° je krutem nejvíce namáhána 12. lamela a to kroutícím momentem o velikosti 4115 Nmm. Největší namáhání v ose X je pak na poslední lamelě o velikosti celkové síly 46 N. Tyto hodnoty jsou největší ze všech simulovaných případů a budou použity v následujících kontrolních výpočtech. Kroutící moment a síla ve směru X působí na mechanismus tak, že se síly sčítají, jak je zaznačeno na obrázku 4.8.

Jelikož jsou lamely otočeny zrcadlově k natočení 45°, tak zvyšující tlak tlačí i poslední lamely směrem dozadu.



Obr. 4.19 Hodnoty kroutících momentů a sil v ose X na lamelách (úhel 90°)



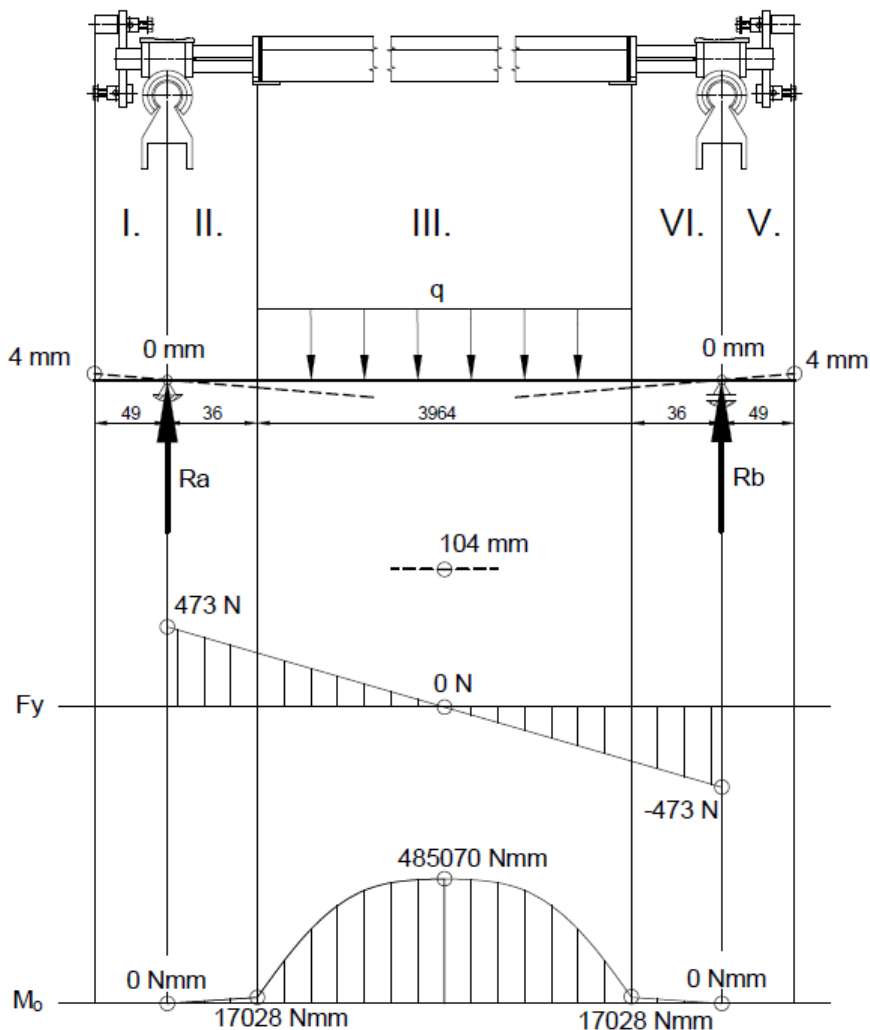
Obr. 4.20 Hodnoty kroutících momentů a sil v ose X na lamelách (úhel 90°)

## 5. Kontrola mechanismu

### 5.1 Kontrolní výpočty lamely a hřídele

Výpočty zahrnují kontrolu na ohyb poslední lamely při natočení  $0^\circ$  s výpočtem průhybu celého nosníku. Dále kontrolu redukovaného napětí hřídele, kontrolu polygonového spoje na maximální krut a výpočet délky svaru ramene na hřídeli, který je zatěžován také krutem.

S krutem ve výpočtech pracuji pouze v kruhových průřezech. A však v tomto nosníku dochází hlavně ke kroucení nekruhových průřezů. Při výpočtu tohoto typu namáhání by byl výpočet značně náročný a převyšuje znalosti z předmětu „Pružnost a pevnosti 1 a 2“. Z tohoto důvodu se snažím u důležitých součástí dosáhnout větší bezpečnosti. Nejmenší bezpečnost vyšla u lamely. Lamela je v případě přetížení lehce vyměnitelná. Navíc je rychlost větru, z které je vypočítáno zatížení pergoly, získána z měření a pravděpodobnost překročení je  $p = 0,02$ . Z toho důvodu je nepravděpodobné, že dojde k tak velkému zatížení. [14]



Obr. 5.1 Grafický rozbor nosníku

## Výpočet průhybu

Nosník se skládá z různých materiálů a různých průřezů. Pro výpočet nosníku jsem použil metodu řešení nosníku pomocí diferenciálních rovnic ohybové čáry. Výhodou této metody je vykreslení ohybové čáry, a tedy lepší představa o deformaci nosníku.

Pro výpočet bylo použito zatížení větrem z normy. V části zabývající se výpočtem zatížení větrem podle normy jsem se zmiňoval, že je třeba určit výsledné zatížení, kde bude třeba počítat s váhou lamely. Vybral jsem tedy dva kritické případy. Jedná se o zatížení lamely směrem dolů v oblasti B a zatížení lamely směrem nahoru v oblasti C.

Jelikož je výsledkem zatížení větrem tlak, je třeba vypočítat sílu na lamelu pomocí plochy, na kterou působí tlak. Velikost plochy je  $0,75 \text{ m}^2$ .

### Výpočet výsledného zatížení

$$\begin{aligned} F^+ &= (w_{net}(z_e)^{+B} * S_{lam}) + (m_{lam} * g) \\ F^+ &= (1087 * 0,75) + (13,1 * 9,81) = 946 \text{ N} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} F^- &= (w_{net}(z_e)^{-C} * S_{lam}) - (m_{lam} * g) \\ F^- &= (1329 * 0,75) - (13,1 * 9,81) = 865 \text{ N} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Výpočtem jsem zjistil, že největší zatížení je směrem dolů.

### Výpočet konstanty rovnoměrného zatížení

$$q = \frac{F^+}{l_{lam}} = \frac{946}{3964} = 0,239 \text{ N/mm} \quad (5.3)$$

Před výpočtem nosníku je potřeba si jej rozdělit na úseky a provést uvolnění. Rozdělení nosníku na úseky a jejich délky jsou zaznačeny na obrázku 5.1. Hřídel jsem rozdělil na dva úseky, aby byla započítána změna průřezu s tím, že malá část kruhového průřezu v podpoře je započítána jako šestihranný průřez. To má však minimální vliv na konečný výsledek a dojde ke zjednodušení výpočtu.

### Výpočet reakcí z rovnic statické rovnováhy

$$\begin{aligned} \sum Fy = 0 &= Ra + Rb - q * l_{lam} \\ Ra = Rb &= \frac{q * l_{lam}}{2} = \frac{0,239 * 3964}{2} = 473 \text{ N} \end{aligned} \quad (5.4)$$

### Vnitřní statické účinky

$$x_1 \in < 0; 49 >$$

$$M_{o_1} = 0 \quad (5.5)$$

$$x_2 \in < 49; 85 >$$

$$M_{o_2} = Ra * (x - 49) \quad (5.6)$$

$$x_3 \in < 85; 4049 >$$

$$M_{o_3} = Ra * (x - 49) - q * \frac{(x - 85)^2}{2} \quad (5.7)$$

$$x_4 \in < 4049; 4085 >$$

$$M_{o_4} = Ra * (x - 49) - q * (4049) * \left(x - \left(\frac{4049}{2} + 85\right)\right) \quad (5.8)$$

$$x_5 \in < 4085; 4134 >$$

$$M_{o_5} = Ra * (x - 49) - q * (4049) * \left(x - \left(\frac{4049}{2} + 85\right)\right) + Rb * (x - 4085) \quad (5.9)$$

### Okrajové deformační podmínky

$$W_{n(x_1 = 49)} = 0$$

$$W_{n(x_4 = 4085)} = 0$$

$$W_{n(x_1 = 49)} = W_{n(x_2 = 49)}$$

$$W_{n'(x_1 = 49)} = W_{n'(x_2 = 49)}$$

$$W_{n(x_2 = 85)} = W_{n(x_3 = 85)}$$

$$W_{n'(x_2 = 85)} = W_{n'(x_3 = 85)}$$

$$W_{n(x_3 = 4049)} = W_{n(x_4 = 4049)}$$

$$W_{n'(x_3 = 4049)} = W_{n'(x_4 = 4049)}$$

$$W_{n(x_4 = 4085)} = W_{n(x_5 = 4085)}$$

$$W_{n'(x_4 = 4085)} = W_{n'(x_5 = 4085)}$$

Následně byly zjištěny parametry jednotlivých částí nosníku. Parametry jsou vidět v tabulce 5.1. Rovnice a hodnoty byly sepsány do softwaru Matlab. Zde byl vytvořen script, který je k dispozici v příloze B v textové formě. Pomocí softwaru jsem spočítal rovnice ohybových křivek, vykreslil křivku ohybu a vypočítal hodnoty průhybu v požadovaných místech. Křivka ohybu je zakreslena přerušovanou čarou na obrázku 5.1 s hodnotami. Největší průhyb je 104 mm uprostřed lamely.

|                                    | Hřídél - ocel 11 343 |                      | Lamela - hliník EN AW 6082 T6 |
|------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|
|                                    | Kruhová část         | Šestihranná část     |                               |
| Modul pružnosti                    | 210 GPa              | 210 GPa              | 70 GPa                        |
| Moment setrvačnosti                | 1886 mm <sup>4</sup> | 4974 mm <sup>4</sup> | 113392 mm <sup>4</sup>        |
| $h_{\max}$                         | 7 mm                 | 8,5 mm               | 12,5 mm                       |
| Dovolené napětí v ohybu - střídavé | 70 MPa               | 70 MPa               | 55 MPa                        |

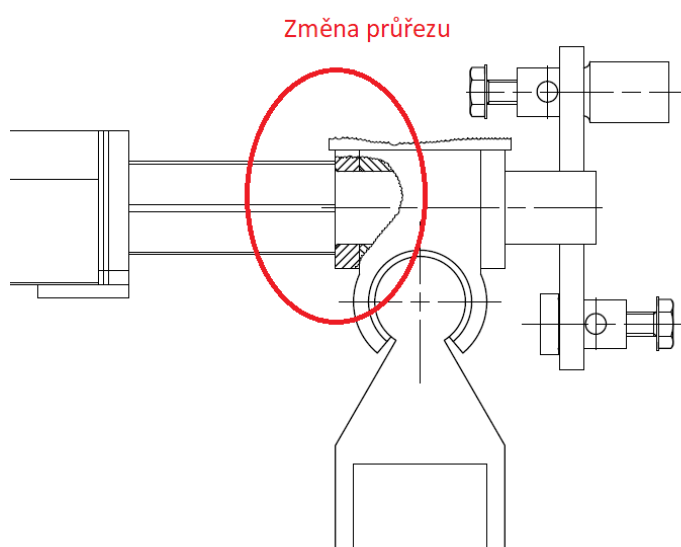
Tab. 5.1 Parametry nosníku [17], [18]

|              | Úsek I. a V. | Úsek II. a IV.                       | Úsek III.                            |
|--------------|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Křivky ohybu | Přímka       | Polynom 3. stupně (s menší křivostí) | Polynom 4. stupně (s větší křivostí) |

Obr. 5.2 Tvary ohybových křivek

## Kontrola napětí v ohybu

Ohyb byl vypočten z vnitřních statických účinků v jednotlivých úsecích. Dále byl vypočten v místě extrému. Za extrém je považována prostřední část lamely. Jak je vidět na průběhu posouvajících sil, tak v tomto místě dochází k protnutí přímky s nulovou osou. To dokazuje, že zde bude extrém. Vypočten byl i v místě koncentrace napětí na hřídeli, kde dochází ke změně průřezu. Místo zápichu jde vidět na obrázku 5.3.



Obr. 5.3 Místo zápichu

### Výpočet ohybových momentů

$$Mo_{(x1 = 49)} = 0 \quad (5.10)$$

$$Mo_{zm\_pr(x2 = 64)} = Ra * (x - 49) = 473 * (64 - 49) = 7095 \text{ Nmm} \quad (5.11)$$

$$Mo_{(x2 = 85)} = Ra * (x - 49) = 473 * (85 - 49) = 17028 \text{ Nmm} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} Mo_{ex(x3 = 2067)} &= Ra * (x - 49) - q * \frac{(x - 85)^2}{2} \\ Mo_{ex(x3 = 2067)} &= 473 * (2067 - 49) - 0,239 * \frac{(2067 - 88)^2}{2} \\ Mo_{ex(x3 = 2067)} &= 485070 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Nosník je symetrický a je i symetricky zatěžován. Z toho důvodu dále ve výpočtech nepokračuji, protože hodnoty se dále opakují.

### Výpočet napětí a kontrola v kritických místech

Kritickým místem je oblast největšího ohybového momentu, místo změny průřezu a místo největšího napětí na hřídeli. Kontrola je vypočtena pouze v extrému a v místě největšího napětí na hřídeli. Místo změny průřezu kontroluji níže z redukovaného napětí.

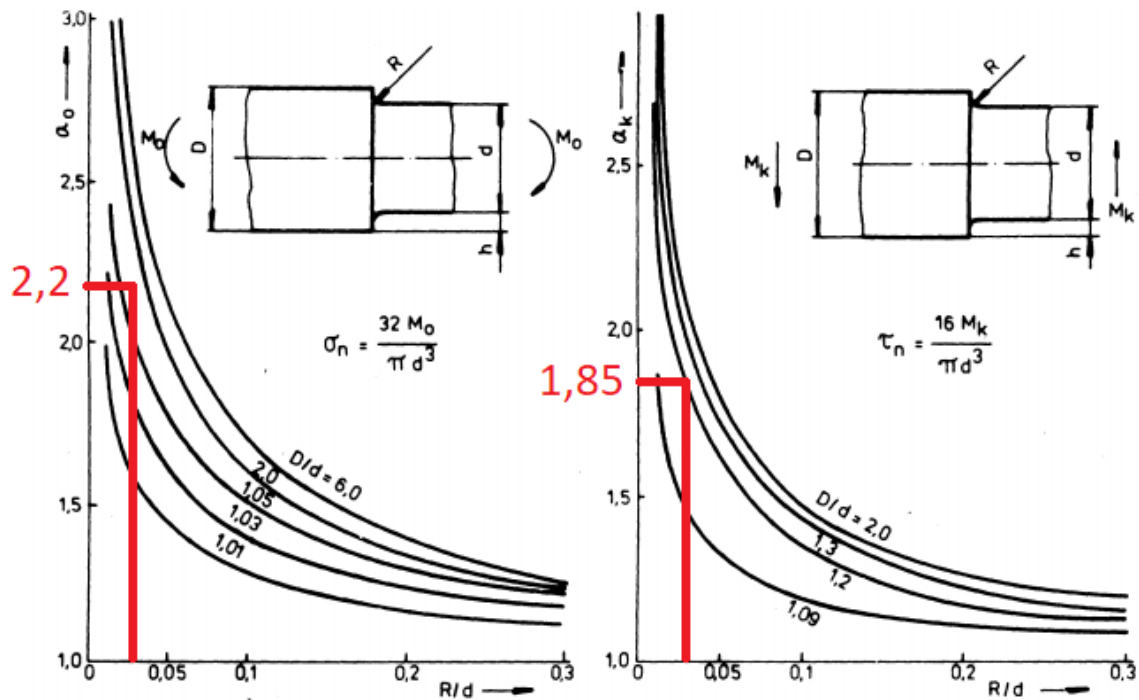
U výpočtu napětí ohybu ve změně průřezu jsem zvolil tvarový součinitel z diagramu, která je na obrázku 5.4.

$$\begin{aligned} \sigma_{o_{zm\_pr(x2 = 56)}} &= \frac{Mo_{zm\_pr(x2 = 56)}}{Wo_{zm\_pr(x2 = 56)}} * \alpha_o = \frac{Mo_{zm\_pr(x2 = 56)}}{\frac{Iy_{zm\_pr(x2 = 56)}}{h_{\max\_zm\_pr}}} * \alpha_o \\ \sigma_{o_{zm\_pr(x2 = 56)}} &= \frac{7095}{\frac{1886}{7}} * 2,2 = 58 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{o_{(x2 = 88)}} &= \frac{Mo_{(x2 = 88)}}{Wo_{(x2 = 88)}} = \frac{Mo_{(x2 = 88)}}{\frac{Iy_{(x2 = 88)}}{h_{\max}}} \\ \sigma_{o_{(x2 = 88)}} &= \frac{17028}{\frac{4974}{8,5}} = 29 \text{ MPa} \leq 70 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\sigma_{o_{ex(x3=2070)}} = \frac{M_{o_{ex(x3=2070)}}}{W_{o_{ex(x3=2070)}}} = \frac{M_{o_{ex(x3=2070)}}}{\frac{I_{y_{ex(x3=2070)}}}{h_{max\_ex}}} \quad (5.16)$$

$$\sigma_{o_{ex(x3=2070)}} = \frac{485070}{\frac{113392}{12,5}} = 53 \text{ MPa} \leq 55 \text{ MPa}$$



Obr. 5.4 Tvarový součinitel  $\alpha_o$  v osazení hřídele, ohyb a krut (Peterson) [19]

## Kontrola redukovaného napětí

Předtím než budu počítat výsledné redukované napětí potřebuju znát všechny složky napětí. Je potřeba vypočítat ještě napětí v krutu. Při volbě zatížení v krutu vycházím ze simulace větru při poloze lamel  $0^\circ$ . Pro výpočet redukovaného napětí byla použita hypotéza HMM.

$$\tau k_{zm\_pr(x2=56)} = \frac{M k_{zm\_pr(x2=56)}}{W k_{zm\_pr(x2=56)}} * \alpha_k = \frac{M k_{zm\_pr(x2=56)}}{\frac{\pi * d^3}{16}} * \alpha_k \quad (5.17)$$

$$\tau k_{zm\_pr(x2=56)} = \frac{300}{\frac{\pi * 14^3}{16}} * 1,85 = 1 \text{ MPa}$$

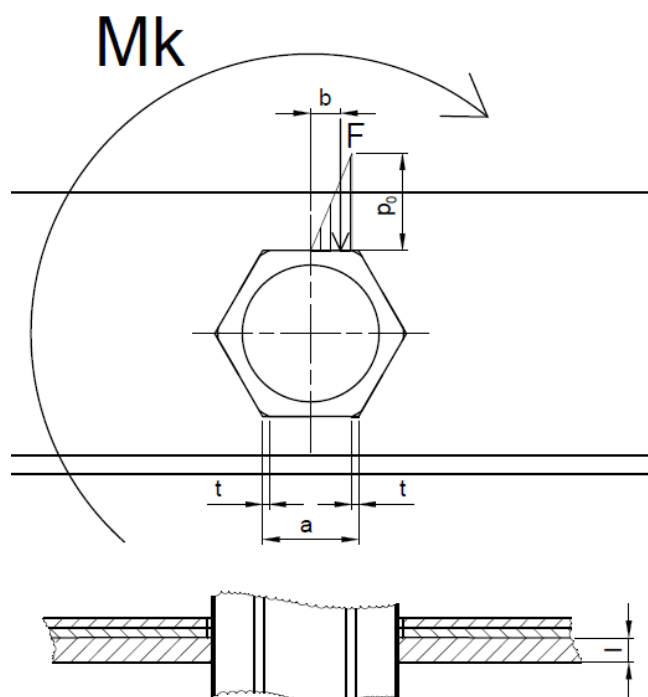
$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 4 * \tau k^2} \quad (5.18)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{58^2 + 4 * 1^2} = 58 \text{ MPa} \leq 65 \text{ MPa} - \text{střídavý tah [18]}$$

Ke kontrole jsem použil hodnoty dovoleného napětí pro střídavé namáhání, ke kterému může dojít při změnách působení větru. Z kontroly na střídavé namáhání plyne, že by kontrolované části mechanismu, kromě lamely měly vydržet i takto velké namáhání. Při dalších polohách se sice navyšuje kroutící moment, ale klesá zatížení vyvolávající ohyb. Navíc kroutící moment dosahuje pouze hodnot 4115 Nmm. Z tohoto důvodu další polohy nekontroluji. V praxi by však bylo zapotřebí zkontrolovat i další polohy natočení lamel pro ujištění se, že nedojde k nepředvídatelnému jevu, při kterém by došlo k poškození důležitých částí.

## Výpočet polygonového spoje

Polygonový spoj přenáší kroutící moment pomocí šestihranu, který se nachází na hřídeli, viz. Obr. 5.5. Díra polygonového spoje je vypálena v plechu tloušťky 5 mm, který je přišroubován k lamele. Spoj je kontrolován na otlačení ploch šestihranu. Jako zatížení byl zvolen maximální krut 4115 Nmm. Tento krut vzniká při úhlu natočení 135°.



Obr. 5.5 Namáhání šestihranného spoje

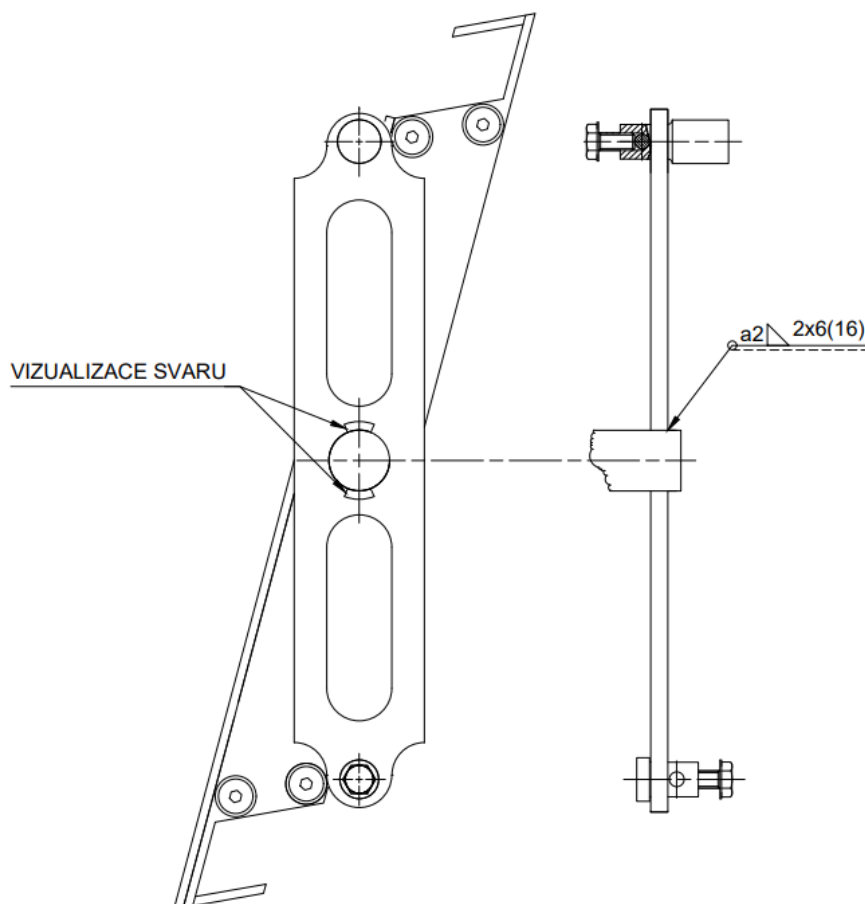
Dovolený měrný tlak pro pevné uložení s netvrzenými boky zatížených proměnlivě je  $p_D = 60 \text{ MPa}$ . Koeficient maximálního vzrůstu napětí se volí v rozmezí 1,3 až 2,0. Přičemž nižší hodnota se volí pro spoje, kde náboj je menší než charakteristický rozměr šestihranu. Zvolil jsem hodnotu  $\varphi_p = 1,4$ . [20]

$$p = \frac{12 * Mk * \varphi_p}{l_p * n_p * (a_p - 2 * t_p)^2} = \frac{12 * 4115 * 1,4}{5 * 6 * (17 - 2 * 1,3)^2} = 11 \text{ MPa} \leq 60 \text{ MPa} \quad (5.19)$$



## Výpočet svarového spoje

Svar je zatížen maximálním kroutícím momentem o velikosti 4115 Nmm. Svary jsou dlouhé 6 mm a nachází se naproti sobě, viz. Obr. 5.6. Celková délka svaru se rovná 12 mm, což je  $\frac{1}{4}$  obvodu hřídele. Proto je modul průřezu v krutu svaru dělen 4. Vypočítané napětí pak bylo porovnáno s dovoleným napětím základního materiálu pro střídavý krut.



Obr. 5.6 Zobrazení svaru

$$\tau_{//}^{Mk} = \frac{Mk}{\frac{Wk_{sv}}{4}} = \frac{Mk * 4}{\frac{\pi}{32} * [(d + 2 * a_{sv})^4 - d^4]} \cdot \frac{d}{\frac{d}{2} + a_{sv}}$$

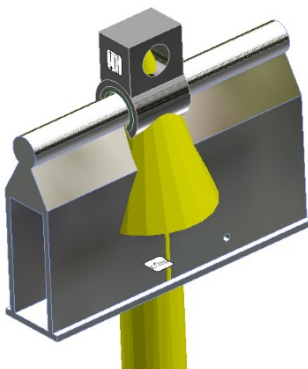
$$\tau_{//}^{Mk} = \frac{4115 * 4}{\frac{\pi}{32} * [(14 + 2 * 2)^4 - 14^4]} \cdot \frac{14}{\frac{14}{2} + 2} = 22 \text{ MPa} \leq 40 \text{ MPa} \quad (5.20)$$

## 5.2 Kontrola lineárního ložiska

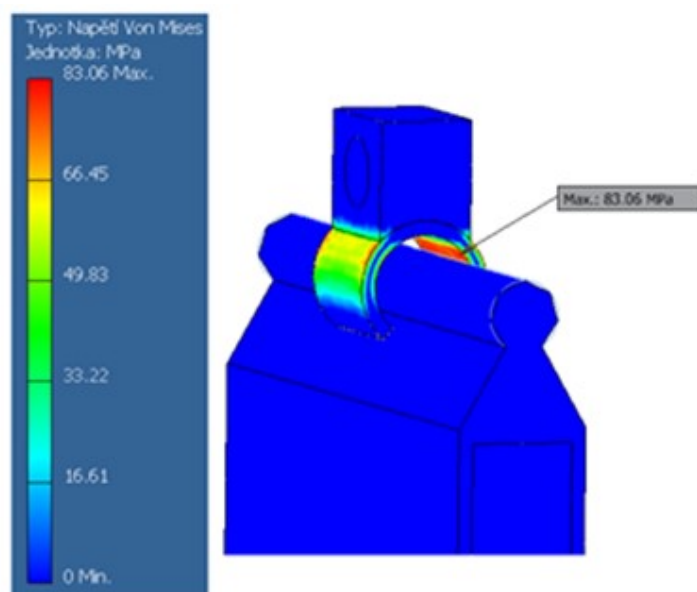
Při působení vztlaku dochází k zatěžování ložiska směrem nahoru. Tento stav je pro ložisko nepříznivý, protože síly se snaží ložisko vytrhnout z vedení. Proto jsem tento stav zkontroloval pomocí MKP analýzy.

Jako zatěžovací sílu jsem použil sílu  $F^- = 865 \text{ N}$ , která byla vypočítána v kapitole 5.1 v části výpočtu výsledného zatížení. Síla působící v ložisku je pak podělena dvěma, protože zatěžující síla je jedna ze dvou stejně velkých reakcí.

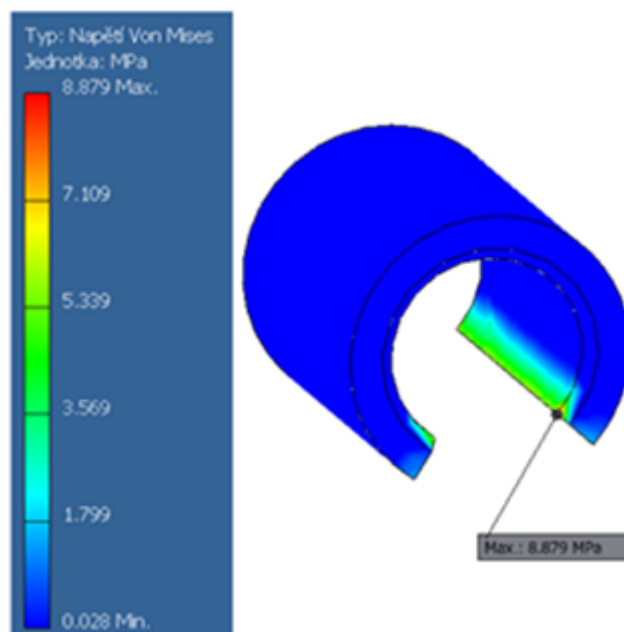
Na lineární vedení byla použita pevná vazba odebírající všechny stupně volnosti. Dále byla použita ideální vazba zamezující posuv lineárního ložiska. Mezi lineárním ložiskem, přesněji mezi polyethylenovou vložkou z PE 1000, byl použit dotyk separace. Polyethylenová vložka je přilepena k válcové části, a proto na ní byl použit vázaný dotyk. Válcová část je spojena s ložiskem pro hřídel také vázaným dotykem. Válcová část a ložisko hřídele je z materiálu 11 343.



Obr. 5.7 Okrajové podmínky simulace zatížení lineárního ložiska



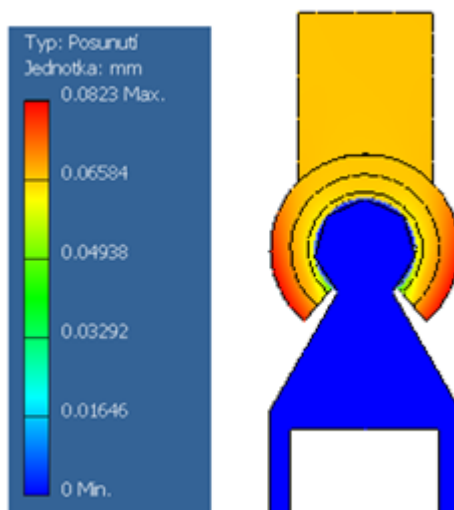
Obr. 5.8 Napětí ve válcové části a ložisku hřídele



Obr. 5.9 Napětí v polyurethanové vložce

Součásti jsou namáhány míjivým napětím. Pro součásti z materiálu 11 343 bylo použito dovolené napětí v míjivém tahu 100 MPa. Největší napětí 83 MPa je ve válcové části (Obr. 5.8), které je menší než dovolené, součásti vyhovují. [18]

Napětí v polyuretanové vložce 9 MPa (Obr. 5.9) bylo porovnáno s mezí kluzu PE 1000, které je 20 MPa. Protože se jedná o míjivé namáhání bylo poníženo na 15 MPa. Dovolené napětí je větší, lze tedy uzнат součást jako vyhovující. [27]



Obr. 5.10 Posunutí částí lineárního ložiska

Důležitou částí je posunutí. Ze simulace lze vidět, že posunutí je v řádech setin milimetru, viz. Obr. 5.10. Ložisko tedy vyhovuje zatížení.

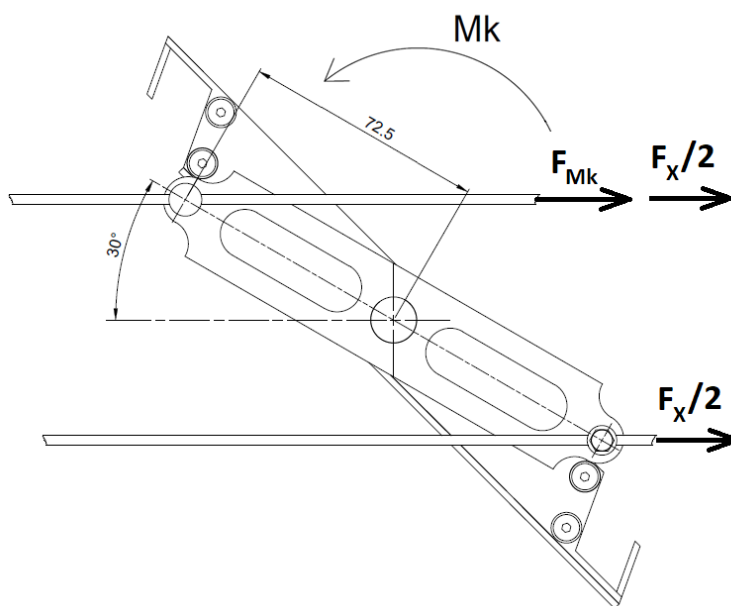
### 5.3 Kontrola lanka

Lanko je kontrolováno na přetržení. Nejvíce dochází k zatěžování při úhlu natočení 135°. Zde musí přenášet sílu od kroutícího momentu a sílu v ose X.

Síla v laně od kroutícího momentu byla vypočítána rozkladem sil v jednotlivých lamelách a následně součtem všech sil. Síla  $F_x$  byla v každé lamelě dělena dvěma, protože tuto sílu přenáší obě lana. Celková síla pak byla vypočtena součtem všech sil v nejméně zatíženém laně, jak je zaznačeno na obrázku 5.11. Celková síla je dělená dvěma, protože ji přenášejí dva mechanismy.

$$F_{Mk\_celk} = \sum \frac{Mk}{\sin 30^\circ * 72,5} = 3054 \text{ N} \quad (5.21)$$

$$F_{X\_celk} = \sum F_x = 420 \text{ N} \quad (5.22)$$



Obr. 5.11 Síly v laněch

$$F_{celk} = \frac{F_{Mk\_celk} + F_{X\_celk}}{2} = \frac{3054 + 420}{2} = 1737 \text{ N} \quad (5.23)$$

Následně byla síla porovnána s minimální pevností v tahu 4,9 kN pro lano 6x19+FC o průměru 3 mm s pevností 1770 MPa. Minimální pevnost lana v tahu je třikrát větší než zatížení lana. Vlivem použití spojek únosnost lana klesá. Pro přesný výpočet by se snížení únosnosti muselo konzultovat s výrobcem. Lano i tak hodnotím, že vyhovuje. [22]

## 5.4 Kontrola spoje lanka experimentem

Čepem ramena prochází lanko, které je připevněno k čepu šroubem. Natažené lanko udržuje lamely v určité poloze.

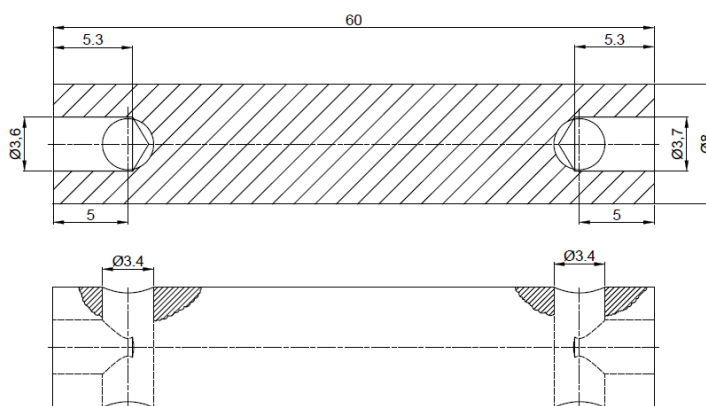
### Výroba vzorku

Pro experiment jsem vyrobil vzorek z nerez oceli 1.4301. Z této oceli je i čep ramena. Vybral jsem tento materiál, protože dokáže odolávat korozi a opotřebení při pohybu v kulise. Dále má materiál dobrou obrobitelnost, která je vyžadována při větším množství těchto čepů, které jsou v mechanismu použity. [21]

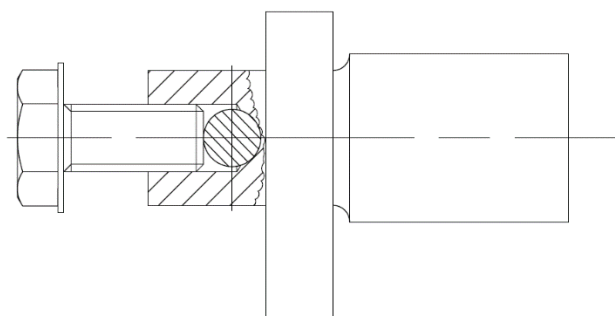
Vzorek o průměru 8 mm byl na řezán na délku 65 mm. Dále byl upnut na soustruh, kde byly srovnány čela vzorku na délku 60 mm. Poté byly navrtány díry v ose z obou stran o průměru 3,6 mm a 3,7 mm. Následně byl vzorek přesunut na vrtačku, kde byly vrtané díry kolmo na osu s průměry 3,4 mm, viz. Obr. 5.12. Celkem byly vyrobeny 3 vzorky.

Pro spoj byly použity závitorezné a závitotvářecí šrouby. Nejprve byl použit závitorezný šroub DIN 7516 D. Byl otestován pro díru 3,6 mm (díra 3,7 mm byla pro něj příliš velká), ale po zavrtání do určité hloubky došlo k poškození závitu a šroub nešel hlouběji zavrtat. Proto bylo použití tohoto šroubu vyloučeno. Dále byl použit šroub DIN 7500 D. Tento šroub byl zavrtán do díry 3,7 mm. Šroub vytvořil do vzorku závit, který splňoval požadavky k upevnění lanka.

Následně bylo dírou 3,4 mm prostrčeno ocelové lanko DIN 3060 6x19+FC o průměru 3,15 mm. Toto lanko má větší ohebnost. Nejprve bylo použito lanko DIN 3055 6x7+FC, ale z důvodu velké tuhosti lanka v ohybu nebylo použito. Poté bylo prostrčené lanko přitlačeno šroubem, viz. Obr. 5.13. Šroub je potřeba utahovat s citem, aby nedošlo k poškození lanka.



Obr. 5.12 Rozměry vzorku



*Obr. 5.13 Zobrazení spoje v mechanismu*

## **Testování spoje**

Spoj byl testován na statické namáhání, viz. Obr. 5.14. Velikost zátěže byla 200 N při délce zatížení 20 hodin. Doba zatížení byla zvolena orientačně, aby bylo zjištěno, jestli může takto zkonstruovaný spoj fungovat. Velikost je třikrát větší pro nedostatek prostředku na testování proměnlivého namáhání. V praxi by však bylo zapotřebí otestovat spoj na střídavé namáhání a zjistit počet cyklů, které vydrží. Dále by bylo potřeba zjistit požadovaný krouticí moment k utáhnutí šroubu při zatížení, aby nedošlo k poškození lana vlivem velkého utahovacího momentu nebo k jeho uvolnění. K uvolnění by mohlo dojít při nedostatečném utažení šroubu nebo při zmenšení průřezu lana při zatížení.



*Obr. 5.14 Testování spoje*



Pro kontrolu, jestli nedošlo k povolení spoje jsem nalepil pásku na horní konec lanka, viz. Obr. 5.15. Před zatížením jsem posuvným měřítkem naměřil hodnotu 15,21 mm mezi páskou a spojem. Po 20 hodinách jsem změřil ten samý rozměr s hodnotou 15,24 mm, viz. Obr. 5.16. Z těchto informací plyne, že spoj dokáže fungovat.



*Obr. 5.15 Testování spoje - detail*



*Obr. 5.16 Kontrola posunutí - před zatížením (vlevo) a po testování (vpravo)*

## 5.5 Volba řemene a kontrola motoru

Pro kontrolu motoru a řemene potřebuji znát zatížení, které vychází ze zatížení lamel od síly  $F_x$  a od síly, která je potřebná k překonání tření v lineárních ložiscích.

Největší zatížení v ose X je při úhlu natočení lamely  $135^\circ$ . Zde působí všechny síly ve stejném směru. Pro kontrolu tedy nevyházím z maximální síly, ale ze součtu sil, který se rovná 420 N.

Třecí síla závisí na dynamickém součiniteli tření mezi materiálem ložiska, které je z PE 1000 a lineárního vedení z hliníku. Součinitel tření volím pro tření mezi nylonem a hliníkem se suchým povrchem. Vycházím z toho, že součinitel tření bude podobný jako pro PE 1000. Dále třecí síla závisí na velikosti přitlačné síly, která vzniká od tíhy lamely. Celková třecí síla je pak součtem všech třecích sil. Vypočítal jsem také sílu, která je potřeba k posunutí všech lamel najednou z klidové polohy. Toto zatížení vzniká zatažením lamel do stažené polohy. V tomto případě však působí vítr jen na krajní lamely a po porovnání se silou, která vzniká při pohybu lamel jsem se rozhodl nekontrolovat řemen na tuto sílu, protože je menší. [25]

### Výpočet zatížení řemene při pohybu lamel

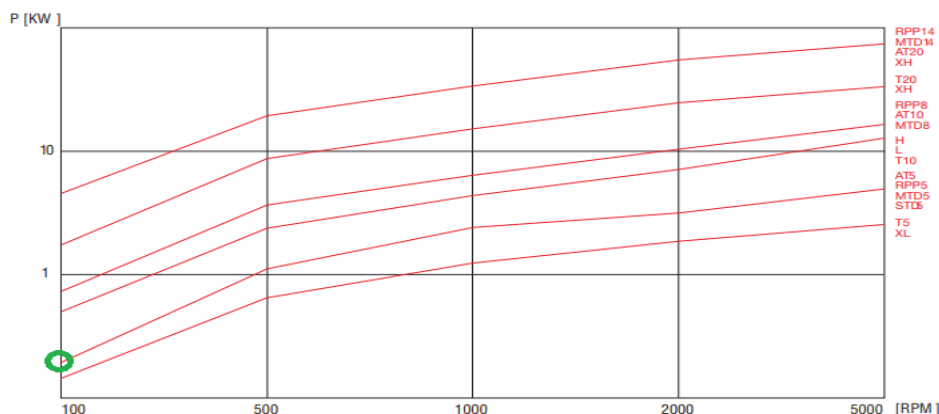
$$F_{t\_celk\_1} = (f_{dyn} * F_{g\_lam}) * 30 = (0,06 * 130) * 30 = 234 \text{ N} \quad (5.24)$$

$$F_{u\_1} = \frac{F_{x\_celk} + F_{t\_celk\_1}}{2} = \frac{420 + 234}{2} = 327 \text{ N} \quad (5.25)$$

### Výpočet zatížení řemene při posunutí lamel

$$F_{t\_celk\_2} = (f_{stat} * F_{g\_lam}) * 30 = (0,1 * 130) * 30 = 390 \text{ N} \quad (5.26)$$

$$F_{u\_2} = \frac{F_{t\_celk\_2}}{2} = \frac{390}{2} = 195 \text{ N} \quad (5.27)$$



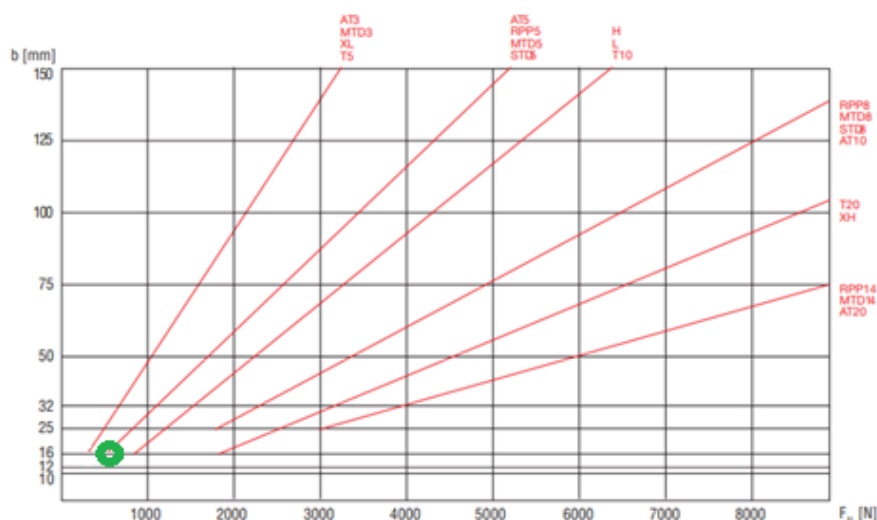
Obr. 5.17 Volba řemene podle výkonu a otáček [23]



## Volba řemene

Rozhodl jsem se použít polyurethanový nespojený řemen, který je vhodný pro řemenové převody s velkou osovou vzdáleností. Řemen jsem volil podle katalogu od výrobce Megadyne. [23]

První volba řemenu byla z diagramu pro zvolení optimální rozteče řemene a šířky řemene. V pergole je použit motor s 24 ot/min s kroutícím momentem 10 Nm. Výkon tohoto motoru vychází velice malý. Z tohoto důvodu jsem zvolil variantu řemene pro nejmenší výkon a otáčky. Zvolené hodnoty jsou zaznačeny v obrázcích 5.17 a 5.18 zeleně.



Obr. 5.18 Volba šířky řemene [23]

Z diagramů byl předběžně zvolen řemen AT5 - 16.

### Výpočet počtu zubů v záběru

Před výpočtem byla zvolena řemenice s 24 zuby.

$$z_m = \left[ 0.5 - \frac{4 * p}{79 * c} (z_L - z_S) \right] * z_S = \left[ 0.5 - \frac{4 * p}{79 * c} (30 - 30) \right] * 30 = 12 \quad (5.28)$$

### Výpočet šířky řemenice

|                             |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| RPM (1/min)                 | 0  | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 750 | 1000 | 1500 | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 | 8000 |
| $F_{p \text{ spec}}$ (N/cm) | 35 | 35 | 35 | 34 | 34 | 34  | 32  | 31  | 30  | 29  | 27  | 26   | 24   | 22   | 19   | 18   | 16   | 13   |

Obr. 5.19 Velikosti síly přenášející jeden zub [23]

Součinitel bezpečnosti byl zvolen pro středně rázové zatížení  $C_s = 1,7$ .

$$b_{\check{r}} = \frac{F_{u_1} * C_s * 10}{F_{p \text{ spec}} * z_m} = \frac{327 * 1,7 * 10}{35 * 12} = 13 \text{ mm} \quad (5.29)$$

Požadovaná šířka řemene je menší než při předběžné volbě. Nechávám zvolenou šířku.

### Výpočet předpětí

$$F_p = 2 * F_{u_1} = 2 * 327 = 654 \text{ N} \quad (5.30)$$

### Kontrola kordu na tah

Materiál kordu byl zvolen vysoce flexibilní. Hodnota dovolené síly v tahu zde odpovídá síle 950 N.

$$F_{D\_tah} > \frac{F_p}{2} + (F_{u_1} * C_s) = \frac{654}{2} + (327 * 1,7) \quad (5.31)$$
$$950 \text{ N} > 883 \text{ N}$$

| Belt width (mm)          | 6 | 10   | 16   | 25   | 32    | 50    | 75 | 100 |
|--------------------------|---|------|------|------|-------|-------|----|-----|
| HP Max Traction Load (N) | - | 795  | 1395 | 2290 | 2890  | 4785  | -  | -   |
| Breaking Strength (N)    | - | 3190 | 5585 | 9175 | 11570 | 19150 | -  | -   |
| Elongation at MTL (mm/m) | - | 4    | 4    | 4    | 4     | 4     | -  | -   |
| HF Max Traction Load (N) | - | 590  | 950  | 1600 | 2015  | 3325  | -  | -   |
| Breaking Strength (N)    | - | 2375 | 3800 | 6410 | 8075  | 13300 | -  | -   |
| Elongation at MTL (mm/m) | - | 5    | 5    | 5    | 5     | 5     | -  | -   |

Obr. 5.20 Dovolena síla v tahu řemene [23]

### Kontrola pružnosti kordu



|                           | Z min |
|---------------------------|-------|
| Standard steel cords      | 15    |
| Kevlar cords              | 15    |
| High Power cords          | 25    |
| High Flexibility cords    | 12    |
| High Power Flexible cords | 20    |
| Stainless steel cords     | 15    |

Obr. 5.21 Mezní počet zubů řemenice [23]

$$z_m \leq z_{\min\_ř} \quad (5.32)$$
$$12 \leq 12$$

### Výpočet prodloužení při dynamickém namáhání

$$\Delta l / l_0 = \frac{F_{u_1} * 4}{F_{D\_tah}} = \frac{327 * 4}{950} = 1,4 \text{ mm/m} \quad (5.33)$$

Vypočtené prodloužení při dynamickém namáhání neovlivní funkčnost mechanismu.

## Kontrola motoru

### Výpočet kroutícího momentu

Roztečný průměr pro zvolenou řemenici s 24 zuby je 38,2 mm.

$$Mk = \frac{F_{u_1} * D_p}{2} = \frac{327 * 38,2}{2} = 6,3 Nm \quad (5.34)$$

### Kontrola únosnosti motoru

$$\begin{aligned} Mk &\leq Mk_{motor} \\ 6,3 Nm &\leq 10 Nm \end{aligned} \quad (5.35)$$

Řemen AT5 - 16 splňuje všechny podmínky.

## 5.6 Kontrola natáčecího mechanismu

Pomocí simulace natáčecího mechanismu potřebuj zjistit sílu přenášenou na lanka. A následně síly, které zatěžují čepy. V těchto místech budu čepy kontrolovat na otláčení. V čepích vzniká i ohybové napětí, ale vzhledem k poměrně velkým rozměrům čepu je napětí malé. Kontrola na otláčení bude provedena při úhlu natočení lamel 135°. Ostatní natočení nevykazují tak velké kroutící momenty. Při úhlu natočení 0° se sice zmenšuje síla od aktuátorů přenášená na lamely, ale hodnoty kroutících momentů jsou při tomto natočení příliš malé.

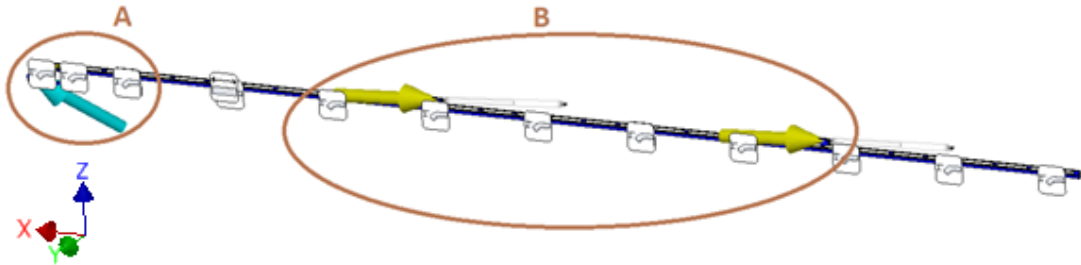
Pevné vazby omezující pohyb ve všech směrech byly použity na čepy, které budou uchyceny v rámu. Navíc byla přidána posuvná vazba, která zamezuje pohyb v jednom směru, aby nedocházelo k posunutí součásti do boku z důvodu absence pojistných kroužků, viz. Obr. 5.22.

### Výpočet zatížení dolního čepu

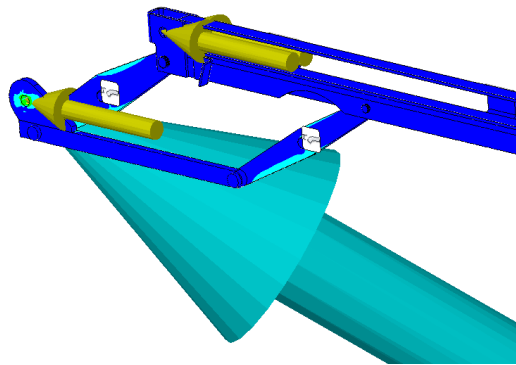
V tomto případě největší zatížení přenáší dolní lanko. Pro zjištění přenášené síly byla v místě uložení čepu použita pevná vazba omezující pohyb pouze ve směru X. Tuto vazbu znázorňuje tyrkysová šipka. Jako síly zatěžující mechanismus byly použity síly  $F_x$  v horním a dolním uložení čepu. Síly  $F_x$  jsou rozděleny. Rozbor sil lze vidět na obrázku 5.11 v kapitole 5.3. Další síly zatěžující mechanismus byly použity maximální síly od aktuátorů.

Největší napětí je v místě uložení čepu kladky, která je zatěžována lankem. V tomto místě dosahuje velikost napětí až 210 MPa, viz. Obr. 5.26. V místě vzniká otláčení, které řeším v části kontroly na otláčení čepu. Proto s tímto napětím neuvažuji v této části při kontrole. Vysokých napětí dosahují ohyby kulisy, které se nacházejí pod úchytem aktuátoru. Zde dosahuje napětí hodnot 103 MPa, viz. Obr. 5.25. Toto místo by mělo být porovnáno

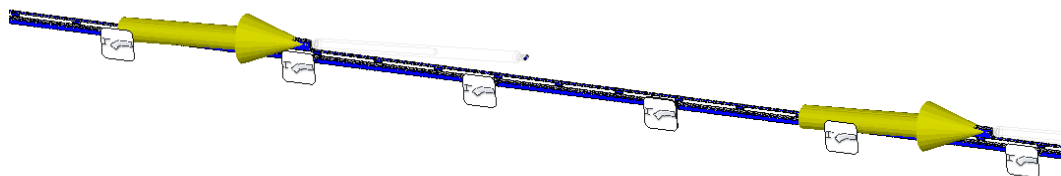
s dovoleným napětím při střídavém namáhání. Vzhledem velikosti meze kluzu 350 MPa uvažují, že by kulisa měla vydržet toto namáhání bez trvalé deformace. Další významně namáhanou součástí je rameno kulisy, viz. Obr. 5.26. Rameno je z materiálu 11 343. Rameno je namáháno mříjivě. Dovolené napětí pro mříjivé zatížení v tahu je 90 MPa. Po porovnání s napětím 54 MPa rameno vyhovuje. [18] [26]



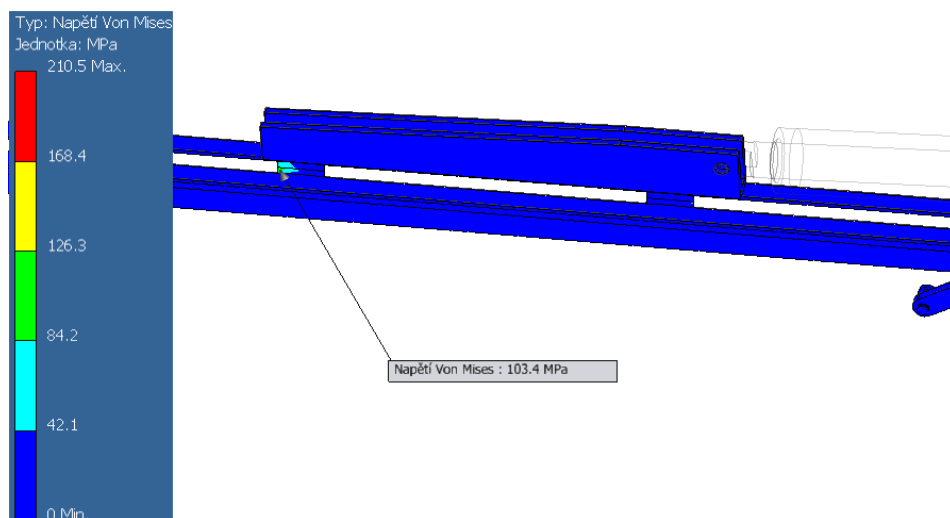
Obr. 5.22 Simulace natáčecího mechanismu



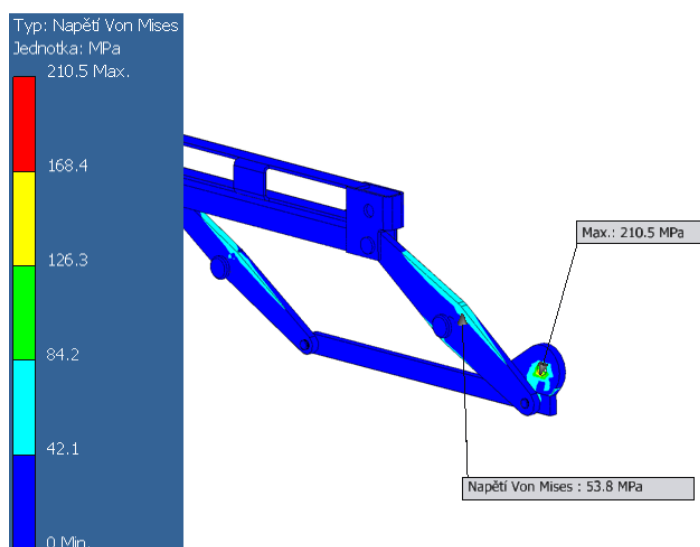
Obr. 5.23 Simulace natáčecího mechanismu - detail A síl  $F_x$  a pevné vazby omezující pohyb ve směru  $X$



Obr. 5.24 Simulace natáčecího mechanismu - detail B síly od aktuátorů



Obr. 5.25 Oblasti velkých napětí pod uchycením aktuátoru



Obr. 5.26 Oblasti velkých napětí při simulaci natáčeního mechanismu

Důležitou částí bylo zjistit, jestli aktuátory dokážou vyvinout dostatečnou sílu k natáčení lamely v úhlu 135° při rychlosti větru 17 m/s. Při tomto zatížení je třeba potřeba překonat sílu 1527 N (vycházím ze síly  $F_{Mk}$ ). Velikost reakční síly je 1587 N, je tedy možno pohnout lamelou i při tak velkém zatížení.

| Reakční síly |              |                |
|--------------|--------------|----------------|
|              | Reakční síla | Reakční moment |
| Celkem       | 1587 N       | 2.483e+04 N mm |
| X            | -1587 N      | 0 N mm         |
| Y            | 0 N          | 2.441e+04 N mm |
| Z            | 0 N          | -4565 N mm     |

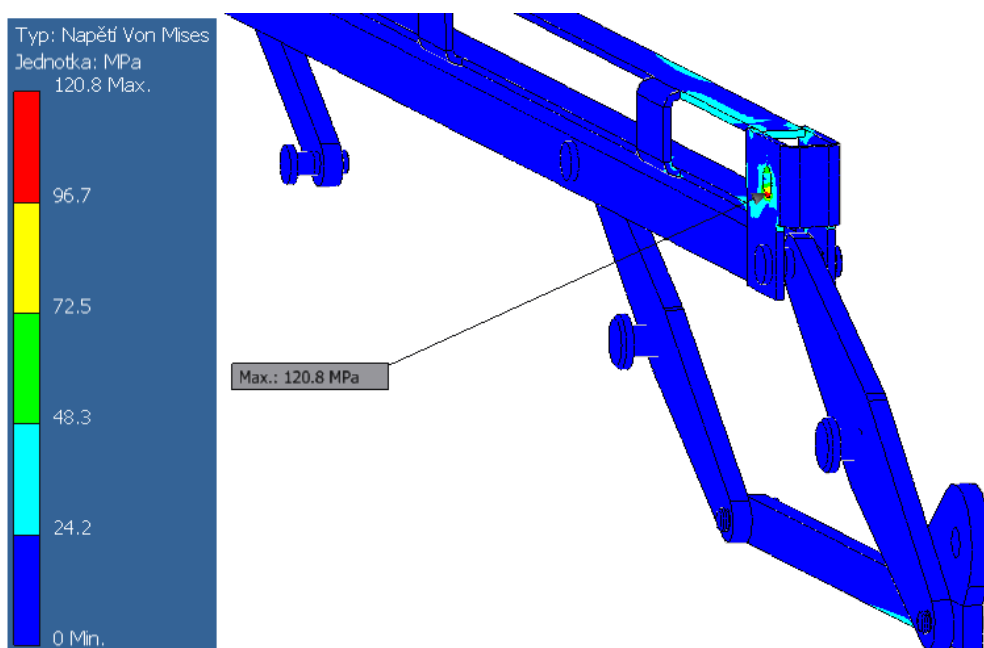
Obr. 5.27 Velikost reakční síly v dolním čepu

## Výpočet zatížení horního čepu

Při kontrole horního čepu jsou okrajové podmínky totožné. Jedinou změnou je změna pevné vazby zachycující pohyb ve směru X do umístění horního čepu.

Maximální napětí zde nedosahuje tak velkých hodnot, jak tomu bylo u simulace kontroly dolního čepu. Největší napětí bylo zjištěno v místě horního čepu. Toto místo bude kontrolováno na měrný tlak v části kontroly čepu na otláčení.

Bylo zjištěno, že aktuátory dokážou vyvinout v horním čepu sílu 1615 N. Při porovnání reakční síly se silou k překonání odporu větru 1527 N, aktuátory vyhovují i v tomto případě.



Obr. 5.28 Oblast velkého napětí při simulaci zatížení horního čepu

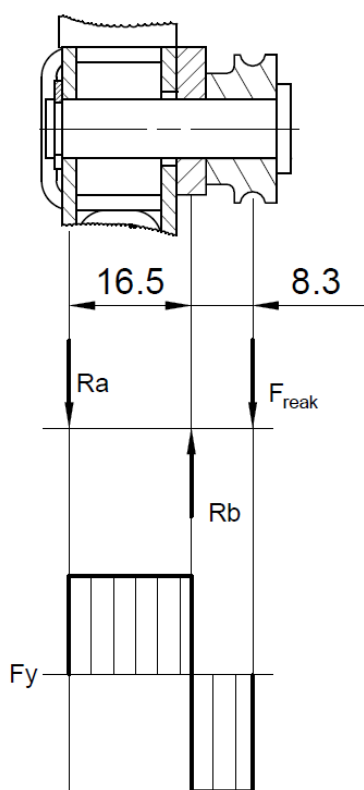
| Reakční síly |              |                |
|--------------|--------------|----------------|
|              | Reakční síla | Reakční moment |
| Celkem       | 1615 N       | 8885 N mm      |
| X            | 1615 N       | 0 N mm         |
| Y            | 0 N          | -8854 N mm     |
| Z            | 0 N          | -739.5 N mm    |

Obr. 5.29 Velikost reakční síly v horním čepu

## Kontrola čepů na otláčení

Kontrolu dolního čepu neprovádím. Zde uvažuji, že čep vydrží namáhání, protože uložení čepu vyvozuje menší tlak a je zatěžován menší silou.

Kontrolovat budu uložení horního čepu, které je vyrobeno z materiálu 11 343. Materiál čepu je 11 373, u kterého uvažuji stejné dovolené otláčení jako u plechu, ve kterém je uložen. Na pravé straně blíže k lanku byl přivařen plech s tloušťkou 4 mm. Toto místo je nejvíce zatěžováno. Na levé straně je plech uložen v plechu o tloušťce 2 mm. Průměr čepu je 8 mm.



Obr. 5.30 Velikost reakční síly v horním čepu

### Výpočet reakcí

$$\sum M_{O_y} = 0 = F_{reak} * (8,3 + 16,5) - R_b * 16,5 \quad (5.36)$$
$$R_b = \frac{F_{reak} * (8,3 + 16,5)}{16,5} = \frac{1615 * (8,3 + 16,5)}{16,5} = 2427 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0 = -R_a - F_{reak} + R_b \quad (5.37)$$
$$R_a = R_b - F_{reak} = 2427 - 1615 = 812 \text{ N}$$

### Výpočet otláčení pod reakcí Ra

$$p_1 = \frac{Ra}{t_{\check{c}} * d} = \frac{812}{2 * 8} = 51 \text{ MPa} \quad (5.38)$$

### Výpočet otláčení pod reakcí Rb

$$p_2 = \frac{Rb}{t_{\check{c}} * d} = \frac{2427}{4 * 8} = 76 \text{ MPa} \quad (5.39)$$

### Kontrola otláčení

Pro materiál 11 373 je dovolené otláčení pro neotáčející se čep 100 MPa. Při střídavém namáhání se doporučuje volit poloviční hodnotu. Z důvodu míjivého namáhání ponížuju dovolené otláčení na hodnotu 80 MPa. [20]

$$\begin{aligned} p_2 &\leq p_D \\ 76 \text{ MPa} &\leq 80 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (5.40)$$

Kontrola byla provedena pro otláčení pod reakcí Rb. Zde vychází největší napětí. Napětí je menší než dovolené. Spoj vyhovuje.

## 5.7 Výpočet časů

### Čas roztáhnutí lamel

Budu vycházet z parametrů elektromotoru, jehož rychlost je 24 otáček za minutu a roztečného průměru řemenice  $D_p = 38,2 \text{ mm}$ .

#### Výpočet rychlosti posuvu:

$$v = \pi * D_p * n = \pi * 38,2 * 24 = 2880 \text{ mm/min} \quad (5.41)$$

#### Výpočet času pro roztáhnutí lamel:

Délka dráhy hnací lamely je 5030 mm.

$$t_{\text{roztáhnutí}} = \frac{s}{v} = \frac{5030}{2800} = 1 \text{ min } 48 \text{ s} \quad (5.42)$$

### Čas otočení lamel o 135°

Vycházím z dráhy 133 mm, kterou urazí aktuátor během natáčení o 135° a z rychlosti aktuátoru 4,5 mm/s.

$$t_{135^\circ} = \frac{s}{v} = \frac{133}{4,5} = 30 \text{ s} \quad (5.43)$$



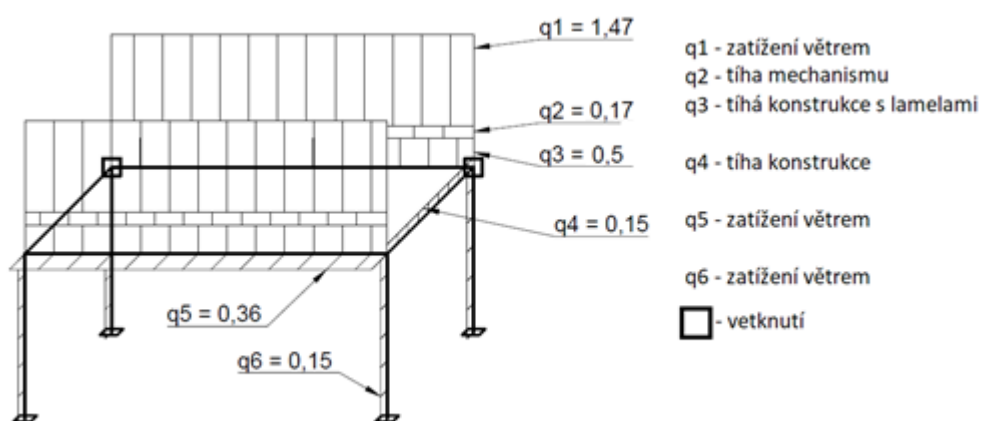
## 6. Kontrola nosné konstrukce

Nosná konstrukce je tvořena vytlačenými hliníkovými profily. Tyto profily jsou zatěžovány na ohyb a tlak. Kritickým místem konstrukce jsou nosné sloupky, které jsou kvůli svojí délce a tenkým stěnám zatíženy na kombinaci ohybu a vzpěru.

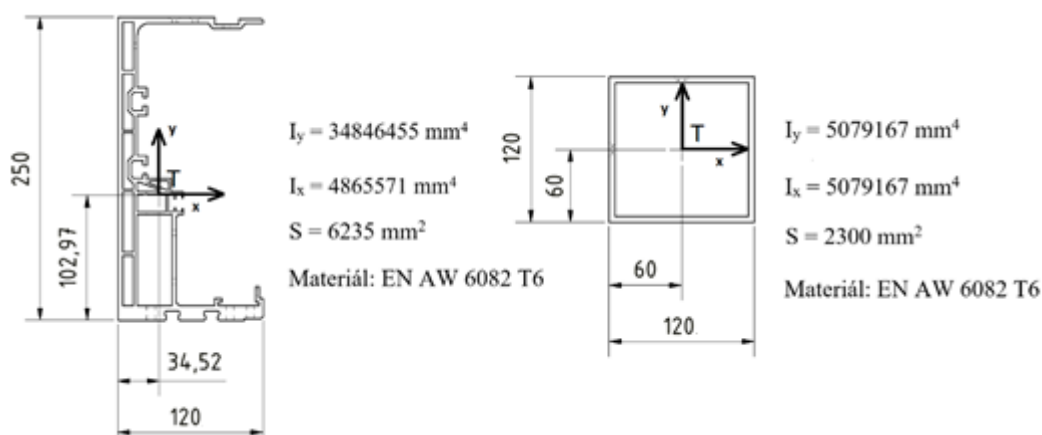
### 6.1 Analýza rámové konstrukce

V programu Inventor byl vytvořen zjednodušený rám, na kterém byly simulovány síly zatěžující konstrukci větrem a svou vlastní tíhou. Simulována byla konstrukce s uzavřenou zadní stranou. Simulace byla provedena v případech, kdy pergola je a není ukotvena ke zdi domu.

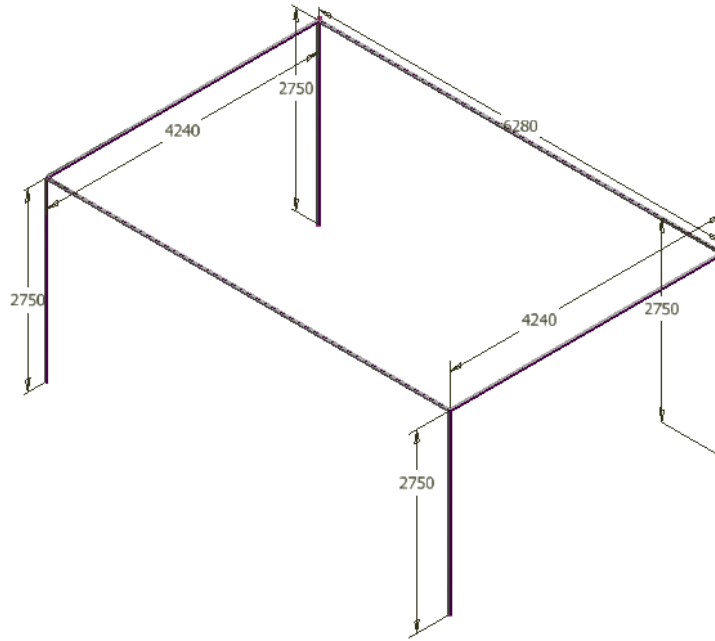
Velikosti zatížení jsou zakresleny na obrázku 5.1. Bylo zvoleno předpokládané největší zatížení větrem směrem dolů ze strany B. Bylo provedeno zjednodušení, že reakční síly od lamely, které působí na kolejnici, byly převedeny na spojité zatížení. Dále nebyla započítána síla na horizontální část v zadní části pergoly, protože zde dochází k velkému poklesu rychlosti větru.



Obr. 6.1 Příklad modelu zatížení pergoly s ukotvením ke zdi domu

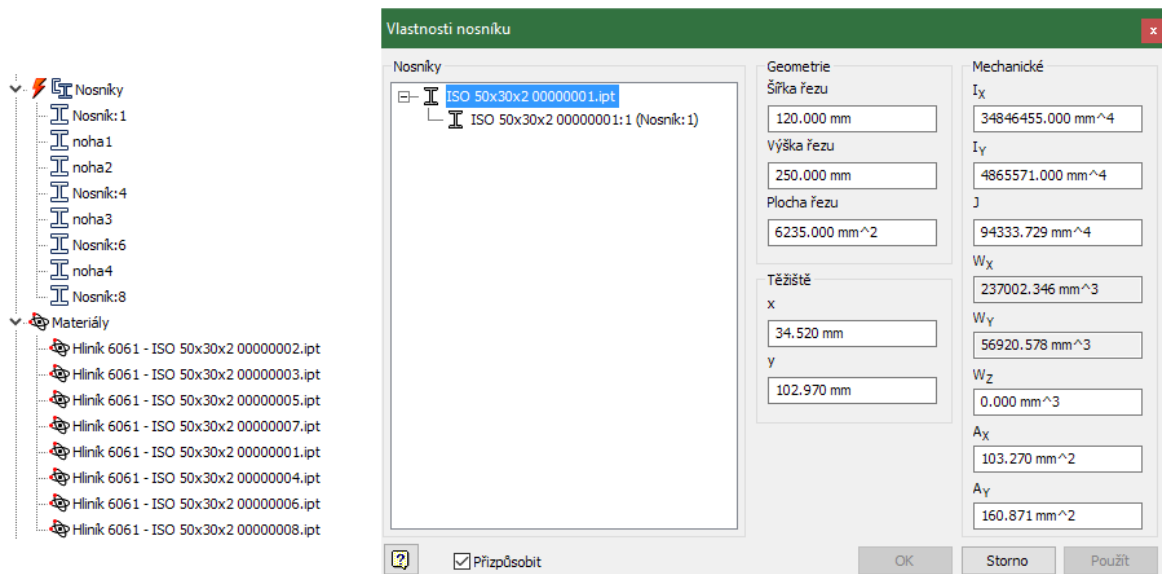


Obr. 6.2 Vlastnosti profilů - horizontální část (vlevo) a noha (vpravo)



Obr. 6.3 Rozměry simulované konstrukce

Předtím než byla provedena simulace, musely být nastaveny parametry jednotlivých profilů. To jsem udělal tak, že jsem si konstrukci vytvořil z libovolných profilů. Tyto profily jsem poté upravil na požadované parametry v analýze rámových konstrukcí, viz. Obr. 6.4.

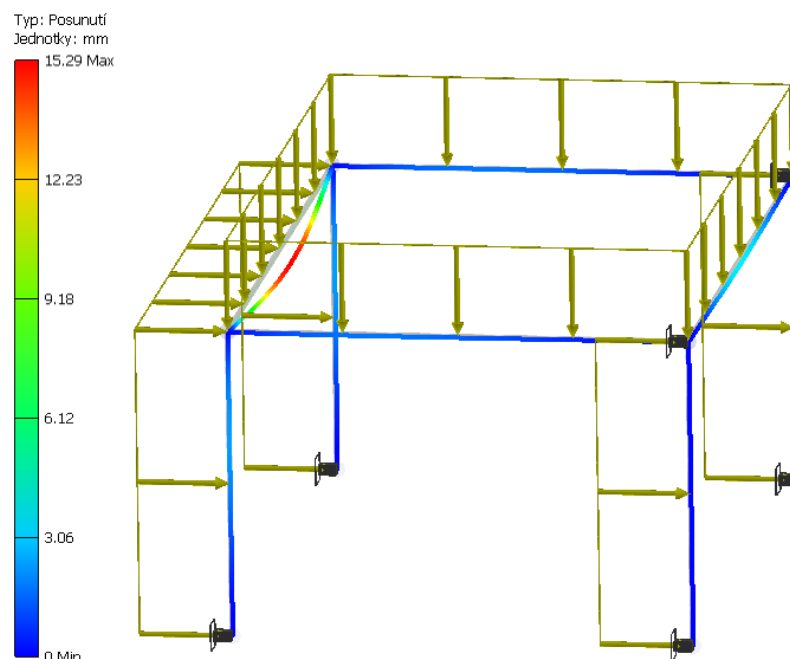


Obr. 6.4 Nastavení parametrů nosníků

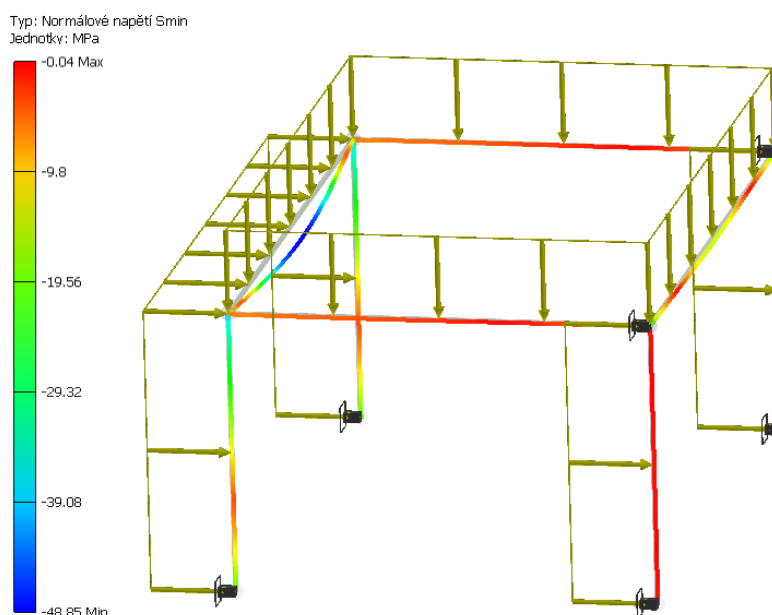
## Pergola ukotvena ke zdi domu

K největšímu posunutí dojde v přední horizontální část. Zde dochází k průhybu až 15 mm. Rozložení posunutí vychází na 9 mm v ose X a 12 mm v ose Y. Posunutí v ose X je však jen orientační, protože v těchto místech bude rám vyztužen lamelami.

Důležitou částí simulace bylo zjištění napětí. Největší napětí 49 MPa se nachází v horizontální části konstrukce v místě největšího posunutí, viz. Obr. 6.5 a 6.6. Místo při porovnání s dovoleným napětím ve střídavém ohybu 55 MPa vyhovuje. [18]



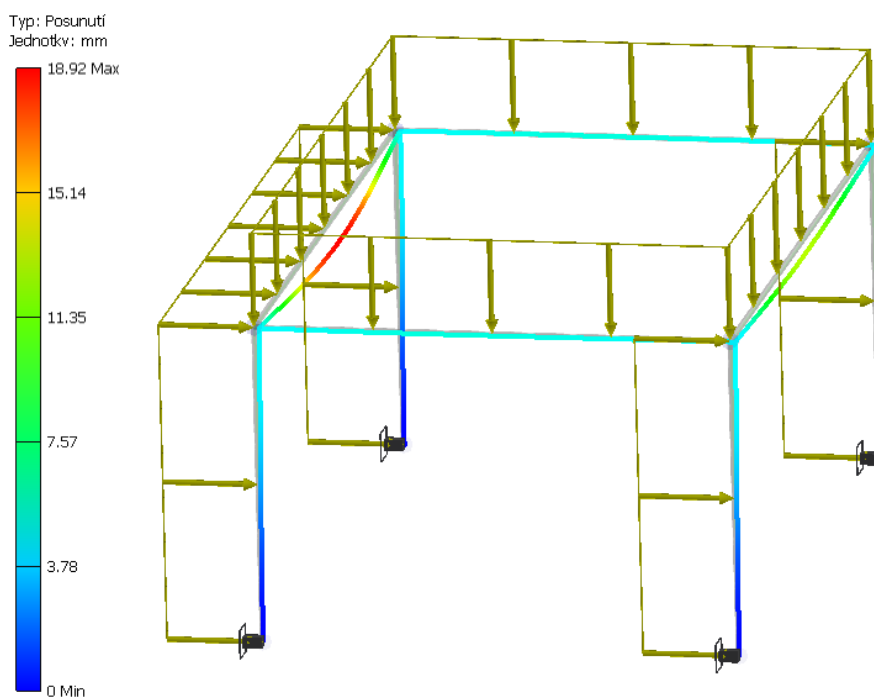
Obr. 6.5 Posunutí (pergola ukotvena ke zdi)



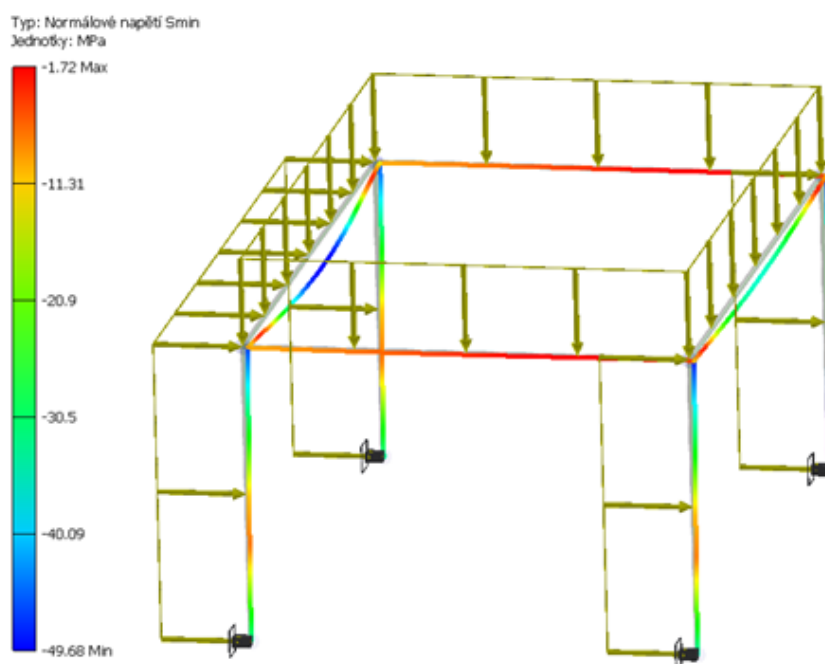
Obr. 6.6 Maximální normálové napětí (pergola ukotvena ke zdi)

## Pergola bez ukotvení ke zdi

V tomto dochází ke snížení tuhosti pergoly. Celkové posunutí naroste vlivem menší tuhosti horní části pergoly o 4 mm a napětí nepatrně vzroste na 50 MPa, viz. Obr. 6.8. Po porovnání s dovoleným napětí 55 MPa konstrukce vyhovuje. [18]



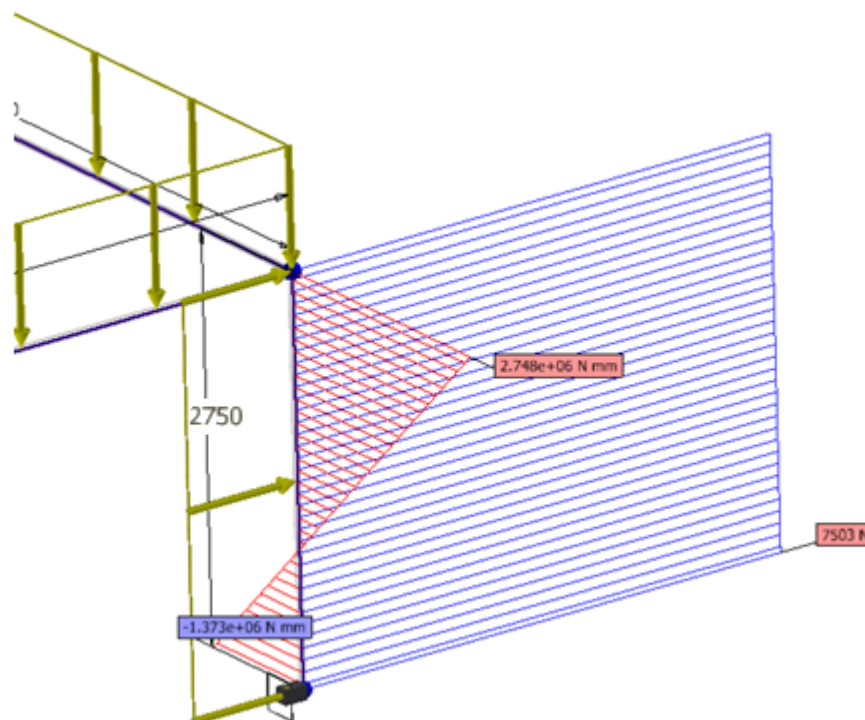
Obr. 6.7 Posunutí (pergola bez ukotvení ke zdi)



Obr. 6.8 Maximální normálové napětí (pergola bez ukotvení ke zdi)

## 6.2 Kontrola sloupku na kombinaci vzpěru a ohybu

Sloupek byl kontrolován dle normy ČSN EN 1999-1-1 navrhováním hliníkových konstrukcí [24]. Kontrolován bude zadní sloupek bez ukotvení, který je nejvíce zatížen, viz. Obr. 6.9. Výška sloupku je 2750 mm. Velikost osové síly zde dosahuje  $N_{ed} = 7500$  N a velikost maximálního ohybového momentu  $M_{ed} = 2,75$  kNm.



Obr. 6.9 Průběh vnitřních sil sloupku

Pro protlačovaný dutý profil z materiálu EN AW 6082 T6 o tloušťce 5 mm je mez úměrnosti  $f_0 = 250$  MPa. Materiál je zařazen do třídy A. Při posuzování stability prutů se součinitel spolehlivosti volí  $\gamma_{M1} = 1,1$ . Modul pružnosti pro hliník je  $E = 70\,000$  MPa.

### Klasifikace průřezu

Pro vnitřní část s nerovnoměrným napětím a neutrální osou ve středu byl použit pro zařazení následující vzorec.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = \sqrt{\frac{250}{250}} = 1 \quad (6.1)$$

$$\beta = 0,4 * \frac{b}{t} = 0,4 * \frac{110}{5} = 8,8 \quad (6.2)$$

Pro třídu materiálu A bez svaru byly zvoleny parametry štíhlosti  $\beta_1 = 11$ .

$$\beta \leq \beta_1 - \text{profil je třídy 1} \quad (6.3)$$

Protože je profil třídy 1 není třeba počítat efektivní průřez a lze přejít hned na posouzení mezního stavu únosnosti.

## Posouzení mezního stavu únosnosti

Při posuzování mezního stavu budu počítat s elastickým modulem průřezu.

$$W_{el,y} = \frac{I_y}{h_{max}} = \frac{5079167}{60} = 84653 \text{ mm}^3 \quad (6.4)$$

Únosnost průřezu v ohybu pro tř. 1

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{el,y} * f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{84653 * 250}{1,1} = 19,2 \text{ kNm} \quad (6.5)$$

Únosnost průřezu v prostém tlaku

$$N_{Rd} = \frac{A * f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{2300 * 250}{1,1} = 523 \text{ kN} \quad (6.6)$$

Výpočet kritické síly

Při vetknutí sloupku na jedné straně a zatížení volnou silou na druhé straně je vzpěrná délka dvakrát větší než délka sloupku.

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 * 70000 * 5079167}{(2 * 2750)^2} = 116 \text{ kN} \quad (6.7)$$

Výpočet poměrné štíhlosti

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_0}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{2300 * 250}{116000}} = 2,2 \quad (6.8)$$

Výpočet součinitele vzpěrnosti

Pro materiál třídy A byly zvoleny hodnoty  $\alpha = 0,2$  a  $\bar{\lambda}_0 = 0,1$ .

$$\phi = 0,5 * (1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 * (1 + 0,2(2,2 - 0,1) + 2,2^2) = 3,1 \quad (6.9)$$

$$\kappa = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{3,1 + \sqrt{3,1^2 - 2,2^2}} = 0,19 \quad (6.10)$$

Kombinace vzpěrného tlaku a ohybu

Součinitel  $\psi_c$  se určí z podmínky  $\max(0,8; 1,3 * \kappa_{min}) = \max(0,8; 1,3 * 0,19) = 0,8$ .

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\kappa * N_{Rd}}\right)^{\psi_c} + \frac{M_{Ed}}{M_{y,Rd}} = \left(\frac{7500}{0,19 * 523000}\right)^{0,8} + \frac{2750000}{19200000} = 0,27 < 1,00 \quad (6.11)$$

Sloupek vyhovuje tomuto zatížení.

## 7. Závěr

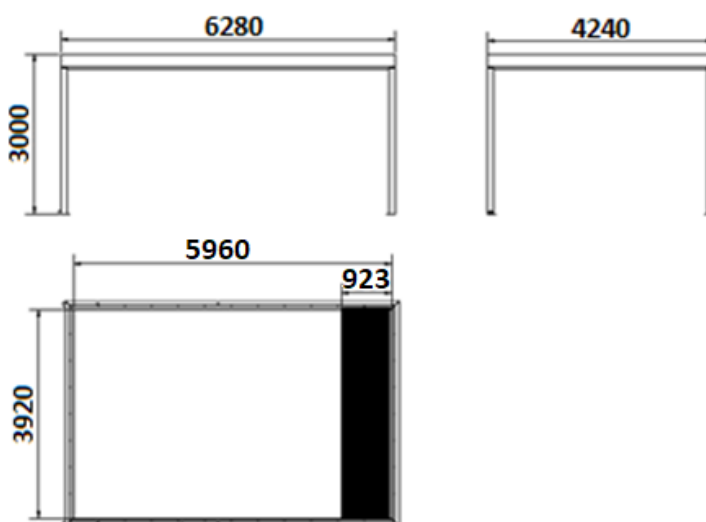
Cílem bylo navrhnout funkční horizontální stínící systém, který by splňoval zadané požadavky.

Byl navrhnout stínící systém, který se nazývá pergola. Pergola by měla fungovat i při velkých zatíženích. Slabinou návrhu je část při roztahování lamel. Tato část může působit nevzhledně, protože při roztahování nejsou lamely pevně uchyceny a může zde docházet k náhodnému natáčení o  $12^\circ$  a k nerovnoměrným vzdálenostem mezi lamelami. Při průzkumu trhu jsem viděl i pergoly, které tyto nežádoucí jevy dokázaly eliminovat. Tyto nedostatky jsem se snažil kompenzovat jednoduchostí konstrukce.

Část bakalářské práce jsem se zabýval výpočtem větru. Vypočítal jsem zatížení podle normy pro použití pergoly do většiny oblastí. Vypočtené hodnoty jsem pak používal ke kontrole lamely a hřídele. Zde dosahuje napětí kritických hodnot a součásti se při tak velkém zatížení nachází na hranici únosnosti. Z normy jsem také vypočítal zatížení konstrukce, která byla analyzována pomocí softwaru a následně byla část rámu kontrolována na kombinaci vzpěru a ohybu. Konstrukce by měla vydržet i takto velké zatížení a nezáleží na tom, jestli je ukotvena ke zdi domu.

Zatížení větrem jsem počítal také pomocí simulace. Z těchto simulací jsem čerpal zatížení na krut a od síly ve směru větru. Na tyto zatížení byl zkontrolován mechanismus pergoly. Mechanismus vyhovoval ve všech situacích.

Pergola splňuje zadané a vypočtené požadavky. Při optimalizaci pergoly bych zvažil použití naklápěcí lineárních ložisek s kulisou.



Obr. 7.1 Rozměry pergoly

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu doktoru Kubínovi za cenné rady v oblasti konstrukce pergoly. Dále bych chtěl poděkovat paní docentce Drábkové za pomoc při simulaci větru. A chtěl bych také poděkovat panu inženýrovi Dobešovi za pomoc s výpočtem kontroly sloupku.*



## 8. Seznam použité literatury

- [1] History of Pergolas. *Gazebocreations* [online]. [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: <https://www.gazebocreations.com/cs/InfoPages.aspx?CategoryID=4328>
- [2] Bioclimatic. Wiktionary [online]. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://en.wiktionary.org/wiki/bioclimatic>
- [3] Modern Aluminum Motorized Louvre Roof Sun Bioclimatic Pergola. Alibaba [online]. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/Modern-Aluminum-Motorized-Louvre-Roof-Sun\\_60759501362.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Modern-Aluminum-Motorized-Louvre-Roof-Sun_60759501362.html)
- [4] Bioklimatické pergoly. *Al-pergoly* [online]. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://www.al-pergoly.cz/pergoly/bioklimaticke-pergoly-3/>
- [5] Automatic Bioclimatic Pergola And Roof System. *Albayrak* [online]. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <http://albayrak.com/en/the-first-full-automatic-bioclimatic-pergola-and-roof-system-of-the-world/>
- [6] Renson Skye Sdrive. In: Youtube [online]. 22.3.2017 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=-VyxFXIDQOs>. Kanál uživatele [archishade](#)
- [7] Baldachin. *Wikipedia* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Baldachin>
- [8] *Infinity canopy* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.infinitycanopy.com>
- [9] Pergola solid. *Iwaniczek* [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <http://iwaniczek.pl/pergola-solid/>
- [10] Retractable Awning Canopy. India mart [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/retractable-awning-canopy-14608319912.html>
- [11] SUNRAIN® Awnings. *Suttle Shades* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <http://www.suttleshades.com/products-sunrain.html>
- [12] Stínící prvky - markýzy zastřešení Terrazza. *Confico* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <http://www.confico.cz/zastreseni-terasy-terazza/markyzy-zastreseni-terazza>
- [13] Stínící plachta Ingenua. *Stiniciplachty* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.stiniciplachty.cz/plachty>
- [14] KRÁL, Jaromír. *Navrhování konstrukcí na zatížení větrem: příručka k ČSN EN 1991-1-4*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010. Technická knihovna (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-05-3.
- [15] Zatížení klimatická – zatížení větrem. VŠB-fast [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/sera/Zatizeni%20vetrem%20-%20teorie%20+%20norma.pdf>
- [16] Zatížení větrem. VUTbr [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/BZK/svarickova.i/pdf/BL05/zatizeni%20vetrem.pdf>
- [17] Mechanické a technologické vlastnosti nabízených slitin hliníku. *Alunet* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-6082>
- [18] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *STROJNICKÉ TABULKY: Pomocná učebnice pro školy technického zaměření. Třetí doplněné vydání*. Úvaly: Albrapedagogické nakladatelství, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
- [19] Tvarové soucinitele. *VŠB* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~fol20/Konstrukci\\_cviceni\\_II](http://homel.vsb.cz/~fol20/Konstrukci_cviceni_II)

- [20] KALÁB, Květoslav. *ČÁSTI A MECHANISMY STROJŮ: pro 2. a 3. ročník bakalářského studia* [online]. VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA STROJNÍ, KATEDRA ČÁSTÍ A MECHANISMŮ STROJŮ, 2016 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [https://lms.vsb.cz/pluginfile.php/760201/mod\\_resource/content/1/E-PDF\\_HESLO%20od%2026.1.2018.pdf](https://lms.vsb.cz/pluginfile.php/760201/mod_resource/content/1/E-PDF_HESLO%20od%2026.1.2018.pdf)
- [21] Materialove-normy. *Ferona* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/materialove-normy/>
- [22] Ocelová lana. Steeltrading [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.steeltrading.cz/index.php/ocelova-lana/lano-ocelove-csn-024322-6x19-fc>
- [23] Megadyne megalinear. *Řemeny* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.remeny.cz/data/web/upload/44-megadyne-12-2017/06-megalinear-web-0.pdf>
- [24] MACHÁČEK, Josef. Navrhování ocelových konstrukcí: příručka k ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8 ; Navrhování hliníkových konstrukcí : příručka k ČSN EN 1999-1. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Technická knižnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87093-86-3.
- [25] Mechanika\_vms\_ADAMS. Autorizované školiace stredisko pre MSC.ADAMS [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: [http://atc.sjf.stuba.sk/files/mechanika\\_vms\\_ADAMS/Contact\\_Table.pdf](http://atc.sjf.stuba.sk/files/mechanika_vms_ADAMS/Contact_Table.pdf)
- [26] UOsortiment. *Unionocel* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://www.unionocel.cz/files/downloads/download11/135-uosortiment-plus.pdf>
- [27] PE\_1000. *Plastum* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: [https://plastum.cz/download/matlist/PE\\_1000\(CZ\).pdf](https://plastum.cz/download/matlist/PE_1000(CZ).pdf)
- [28] Picolo-0. Elero-linear [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.elero-linear.com/en/products/linear-actuators/picolo-0/>
- [29] J410io-pohon-somfy. *Zaluzie24* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.zaluzie24.eu/J410io-pohon-somfy>

## 9. Seznam příloh

Příloha A – Vektory rychlosti větru

Příloha B – Script Matlab

Příloha C – CD - obsahuje: -kompletní výkresovou dokumentaci

-textovou část bakalářské práce

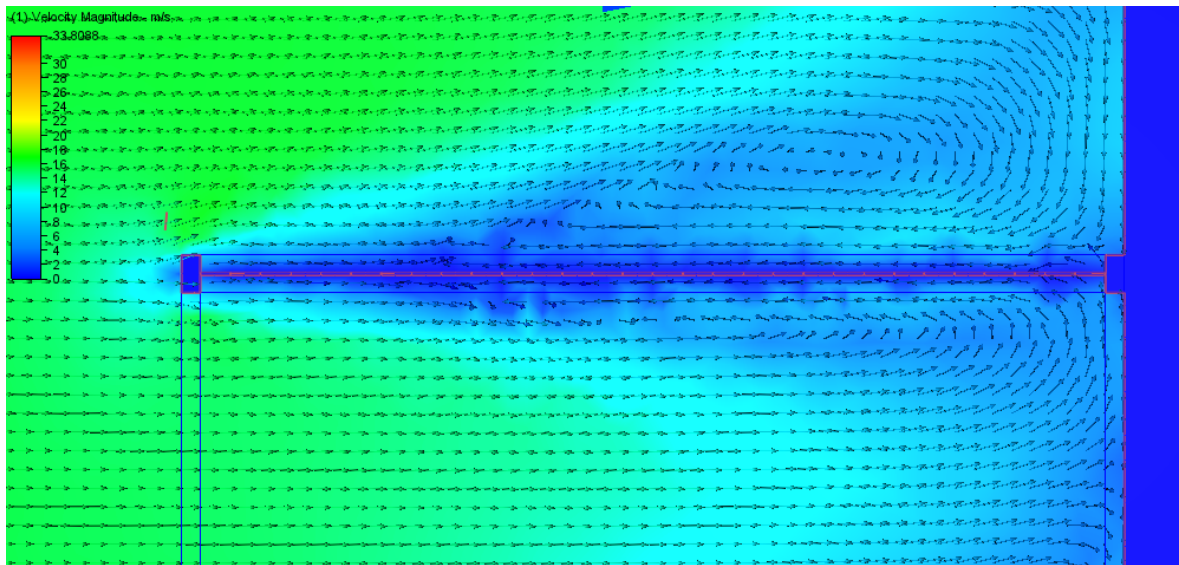
Příloha D – Výkresová dokumentace: PUS0061-001    PERGOLA

PUS0061-002    DOMEK

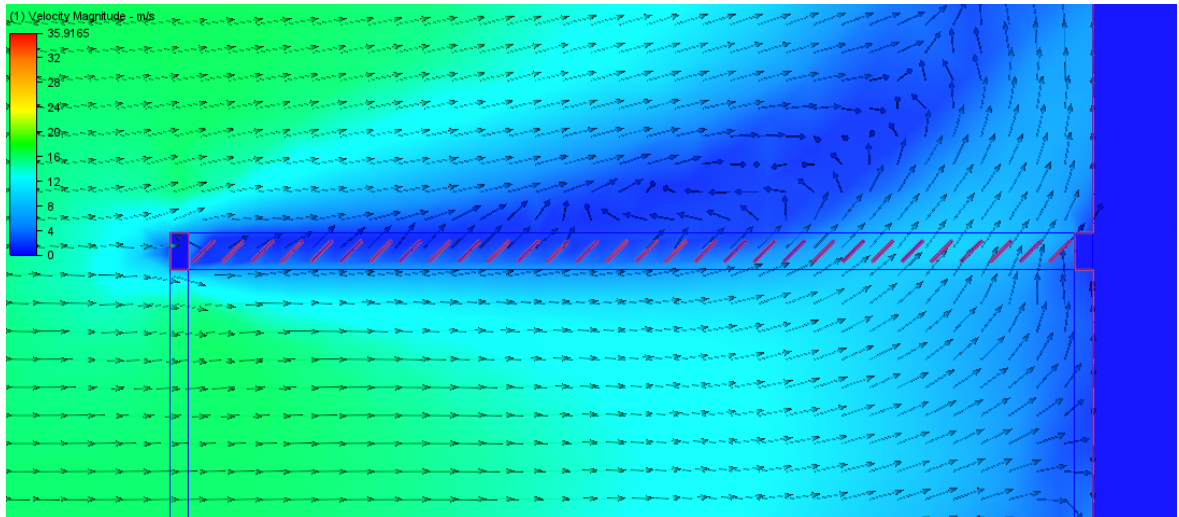
PUS0061-003    VEDENÍ KULISY

PUS0061-004    KULISA

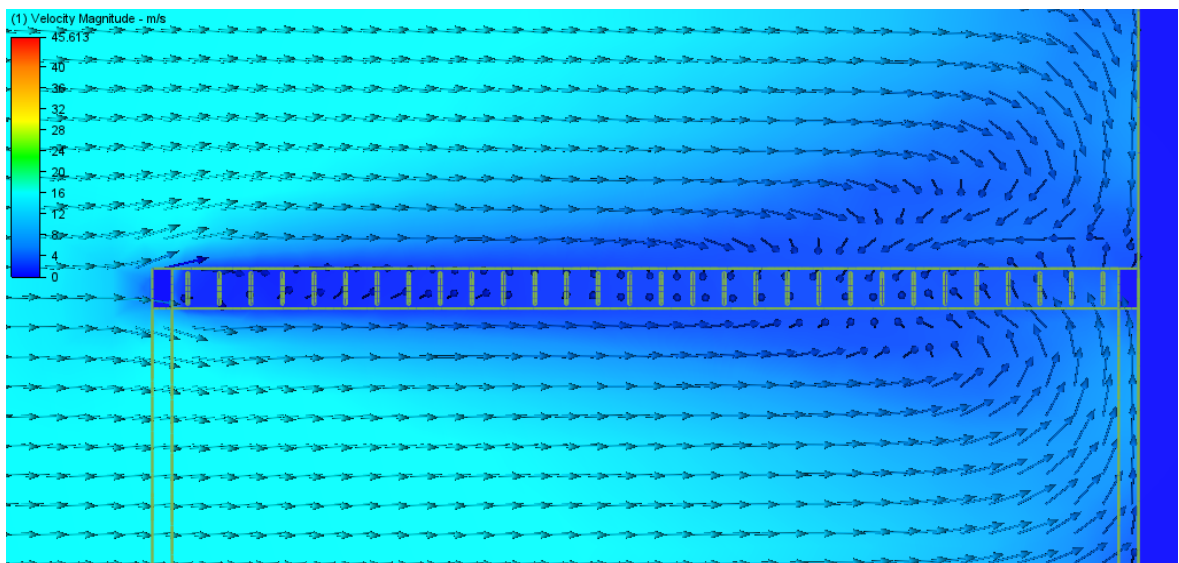
# Příloha A



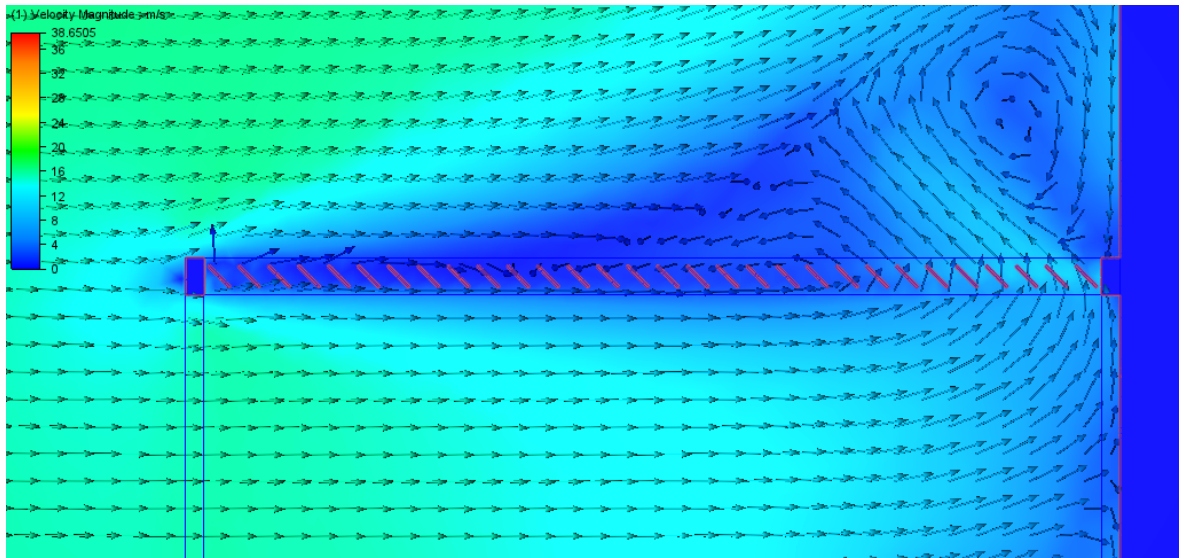
Obtékání větru (úhel 0°)



Obtékání větru (úhel 45°)



Obtékání větru (úhel 90°)



*Obtékání větru (úhel 135°)*

## Příloha B

```
clear all
clc
close all

syms q a b h FA MA x FB Iy w(x) Mo E RA RB Mo1 Mo2 Mo3 Mo4 Mo5 E1 E2 E3
Iy1 Iy2 Iy3

Mo1=0
Mo2=RA*(x-49)
Mo3=RA*(x-49)-q*((x-85)^2)/2
Mo4=RA*(x-49)-(q*(4049)*(x-((4049/2)+85)))
Mo5=RA*(x-49)-(q*(4049)*(x-((4049/2)+85)))+RB*(x-4085)

ode1=diff(w,x,2)==-Mo1/(E1*Iy1)
ode2=diff(w,x,2)==-Mo2/(E1*Iy2)
ode3=diff(w,x,2)==-Mo3/(E3*Iy3)
ode4=diff(w,x,2)==-Mo4/(E1*Iy2)
ode5=diff(w,x,2)==-Mo5/(E1*Iy1)

pruhyb1(x)=dsolve(ode1)
pruhyb2(x)=dsolve(ode2)
pruhyb3(x)=dsolve(ode3)
pruhyb4(x)=dsolve(ode4)
pruhyb5(x)=dsolve(ode5)

natoc1(x)=diff(pruhyb1,x)
natoc2(x)=diff(pruhyb2,x)
natoc3(x)=diff(pruhyb3,x)
natoc4(x)=diff(pruhyb4,x)
natoc5(x)=diff(pruhyb5,x)

syms C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7 C8 C9 C10

OP1 = pruhyb1(49) == 0
OP2 = pruhyb4(4085) == 0

OP3 = pruhyb1(49)==pruhyb2(49)
OP4 = natoc1(49)==natoc2(49)

OP5 = pruhyb2(85)==pruhyb3(85)
OP6 = natoc2(85)==natoc3(85)

OP7 = pruhyb3(4049)==pruhyb4(4049)
OP8 = natoc3(4049)==natoc4(4049)

OP9 = pruhyb4(4085)==pruhyb5(4085)
OP10 = natoc4(4085)==natoc5(4085)

[Q Res]=equationsToMatrix([OP1 OP2 OP3 OP4 OP5 OP6 OP7 OP8 OP9
OP10],[C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10])

E1=210000;
E3=70000;

q=0.238407;
RA=473;
```

```

RB=473;

Iy1=1886;
Iy2=4974;
Iy3=113392;

Q=subs(Q);
Res=subs(Res);
sol=linsolve(Q,Res)

C1=sol(1,1)
C2=sol(2,1)
C3=sol(3,1)
C4=sol(4,1)
C5=sol(5,1)
C6=sol(6,1)
C7=sol(7,1)
C8=sol(8,1)
C9=sol(9,1)
C10=sol(10,1)

pruhyb1=subs(pruhyb1)
pruhyb2=subs(pruhyb2)
pruhyb3=subs(pruhyb3)
pruhyb4=subs(pruhyb4)
pruhyb5=subs(pruhyb5)

fplot(pruhyb1,[0 49])
hold on
fplot(pruhyb2,[49 85])
fplot(pruhyb3,[85 4049])
fplot(pruhyb4,[4049 4085])
fplot(pruhyb5,[4085 4134])

%pruhyb zacatek 1. useku
x1=0
pruhyb_1=vpa(subs(pruhyb1,x,x1),5)

%pruhyb konec 1. useku
x2=49
pruhyb_2=vpa(subs(pruhyb2,x,x2),5)

%pruhyb konec 2. useku
x3=85
pruhyb_3=vpa(subs(pruhyb3,x,x3),5)

%pruhyb uprostred lamely
x4=2067
pruhyb_4=vpa(subs(pruhyb3,x,x4),5)

%ohybový moment konec 1. useku
x5=85
Mo2_v=vpa(subs(Mo2,x,x5),5)

%ohybový moment uprostřed lamely
x6=2067
Mo3_v=vpa(subs(Mo3,x,x6),5)

%ohybový moment v osazení
x7=64
Mo2_v2=vpa(subs(Mo2,x,x7),5)

```