



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÁ ANALÝZA KONSTRUKCE ROZHLEDNY

STATIC ANALYSIS OF THE LOOKOUT TOWER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Šoupalová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZBYNĚK VLK, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Kristýna Šoupalová
Název	Statická analýza konstrukce rozhledny
Vedoucí práce	Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Norma : ČSN EN 1991-1 – Eurokód 1

ČSN EN 1993-1-1 – Eurokód 3

Bittnar Z., Šejnoha J. – Numerické metody mechaniky 1,2

Kadlčák J., Kytýr J. : Statika stavebních konstrukcí I a II

Manuály k výpočetnímu systému RFEM

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem práce je statická analýza vybrané konstrukce–rozhledny. Podle podkladů k dané konstrukci bude provedeno několik odpovídajících modelů s různým stupněm zjednodušení a s různým využitím 1D, 2D i 3D prvků. Získané výsledky budou vzájemně porovnány. Modelování konstrukce a statická analýza bude proveden v programovém systému RFEM.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Zbyněk Vlk, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá statickou analýzou stávající ocelové konstrukce rozhledny ve tvaru šroubovice.

Dva trojrozměrné modely konstrukce, lišící se způsobem vymodelování sloupů, byly vytvořeny pomocí softwaru RFEM 5.25 od společnosti Dlubal.

Modely jsou zatíženy vypočteným zatížením a následně jsou výsledky obou modelů porovnány.

Byl vytvořen i třetí trojrozměrný model, který je doplněn o plošné prvky. Tento model je umístěn do větrného tunelu pomocí softwaru Dlubal RWIND. Je provedeno porovnání normově spočítaných účinků větru a výsledků RWIND.

KLÍČOVÁ SLOVA

program Dlubal RFEM, metoda konečných prvků, 3D model, zatížení, kombinace, rozhledna, ocelová konstrukce, RWIND, větrný tunel

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the static analysis of the steel construction of the lookout tower in the shape of a helix.

Two 3D models, which differs in the way the columns are modeled, were made with RFEM 5.25 software by Dlubal company.

The models are loaded with the calculated loads and afterwards the results of both models are compared.

There are also a third 3D model, which includes surfaces. This model is put to a wind tunnel through Dlubal RWIND software. Then the comparison of the wind loads calculated according to the valid standard and the RWIND results is made.

KEYWORDS

software Dlubal RFEM, finite element method, 3D model, load, combination, lookout tower, steel construction, RWIND, wind tunnel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Kristýna Šoupalová *Statická analýza konstrukce rozhledny*. Brno, 2021. 72 s., 3 s. příl.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební
mechaniky. Vedoucí práce Ing. Zbyněk Vlček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Statická analýza konstrukce rozhledny* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2021

Kristýna Šoupalová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Statická analýza konstrukce rozhledny* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2021

Kristýna Šoupalová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych z celého srdce poděkovat svým rodičům a prarodičům, kteří mě za každé situace podporovali při cestě za vzděláním, i když někdy kroutili hlavami, co za obor jsem si to (na druhý pokus) vybrala. Největší díky, které posílám do nebe, patří mé babičce Evě, která mi držela palce na každou zkoušku a někdy dokonce i o den dřív.

Dále bych chtěla poděkovat všem svým kamarádům. Ti, co se mnou chodí do školy, sdíleli společná utrpení ale i radosti. Jsem nesmírně ráda, že je mám a že se z nás studiem na VUT stal prvotřídní kolektiv. Ti, co se mnou školní lavice nesdílí, mi naopak pomohli se od školy odreagovat a řešit jiné věci, než jsou chybějící hmatové úpravy chodníků na náhodných místech v Brně a jiná postižení vzniklá studiem na Fakultě stavební. A to je k nezaplacení.

Také mnohokrát děkuji svému vedoucímu Ing. Zbyňku Vlčkovi, Ph.D., který mi vždy všechno ochotně vysvětlil a na cestě k dokončení této práce mě doprovázel s lidským přístupem. A někdy i s kávou.

Aby díků nebylo málo, tak na závěr připojuji poděkování společnosti KEE04DESIGN za poskytnutí podkladů a společnosti Dlubal za udělení licence k programu RWIND, která není pro studenty běžně dostupná.

Děkuji!

OBSAH

1. Úvod.....	10
2. Podklady.....	10
3. Popis konstrukce.....	10
4. Výpočtové modely	11
4.1. Model 1	12
4.2. Model 2	13
4.3. Model 3	13
5. Stálá zatížení.....	14
5.1. Vlastní tíha	14
5.2. Ostatní stálé zatížení.....	15
6. Proměnná zatížení.....	16
6.1. Užité zatížení	16
6.2. Zatížení sněhem.....	16
6.3. Zatížení větrem.....	18
6.3.1. Zatížení větrem jako na klenbové střechy.....	20
6.3.2. Zatížení větrem jako na válec	22
6.3.3. Zatížení větrem spočítáno softwarem RWIND.....	27
6.3.4. Zatížení větrem jako na svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem	34
6.3.5. Zatížení větrem na sloupy	35
7. Zatěžovací stavy	38
7.1. ZS1 – Vlastní tíha ve směru Z	38
7.2. ZS2 – Vlastní tíha ve směru X, ZS3 – Vlastní tíha ve směru Y.....	38
7.3. ZS4 – Podlaha	38
7.4. ZS5 – Zábradlí.....	39
7.5. ZS6 – Sníh.....	39
7.6. ZS7 – ZS15 – Užité zatížení	40
7.6.1. ZS7 – Plné zatížení.....	40
7.6.2. ZS8 – Šach 1, ZS9 – Šach 2	41
7.6.3. ZS10 – Šach 3, ZS11 – Šach 4	42
7.6.4. ZS12 – Vnější strana, ZS13 – Vnitřní strana	42
7.6.5. ZS14 – Vyhlídka.....	43

7.6.6. ZS15 – Horní polovina	44
7.7. ZS16 – ZS27 – Zatížení větrem	44
7.7.1. ZS16 – ZS19 – Vítr – klenbová střecha	45
7.7.2. ZS20 – ZS23 – Vítr – válec	46
7.7.3. ZS24 – ZS27 – Vítr – svislé stěny, pravoúhlý půdorys	46
7.7.4. Porovnání účinků větru v jednotlivých směrech.....	48
7.8. ZS28 – ZS31 – RWIND.....	51
7.8.1. Porovnání deformací od zatížení vygenerované RWINDem a od normově spočtených zatížení, porovnání jednotlivých normových způsobů výpočtu	51
8. Porovnání vybraných výsledků na modelech 1 a 2.....	57
8.1. Shrnutí zjištěných výsledků	61
8.2. Možné příčiny rozdílů	62
9. Kombinace zatížení.....	64
9.1. Vnitřní síly na vybraných prutech a odpovídající kombinace	65
9.1.1. Sloupy.....	65
9.1.2. Podélné pruty	67
10. Závěr	68
11. Seznam použitých zdrojů	69
12. Seznam obrázků	69
13. Seznam tabulek.....	71
14. Seznam příloh	72

1. Úvod

Tato bakalářské práce se bude zabývat statickým posouzením stávající konstrukce rozhledny na Kobylím vrchu nedaleko obce Kobylí.

Budou vytvořeny dva odlišné prutové modely pomocí výpočetního softwaru RFEM, které se budou lišit uspořádáním sloupů. V jednom modelu budou sloupy zjednodušeny a ve druhém modelu bude zohledněna jejich reálná geometrie.

Modely budou zatíženy spočteným zatížením – stálým, ostatním stálým, užitným, sněhem a větrem.

Následně budou porovnány výsledky z obou modelů pomocí deformací vzniklých od jednotlivých zatěžovacích stavů.

Bude vytvořen i třetí model, kde budou vymodelovány i plochy zábradlí a podlahy. Sloupy budou vymodelovány jako v druhém modelu, tj. v jejich reálné geometrii.

Model s plochami bude vystaven účinkům větru ve větrném tunelu. Poté budou porovnány výsledky od normově spočteného zatížení větrem a výsledky ze simulace. K porovnání budou opět sloužit deformace ve vybraném uzlu.

Na závěr se práce bude věnovat kombinacím zatížení a vnitřním silám na vybraných prutech.

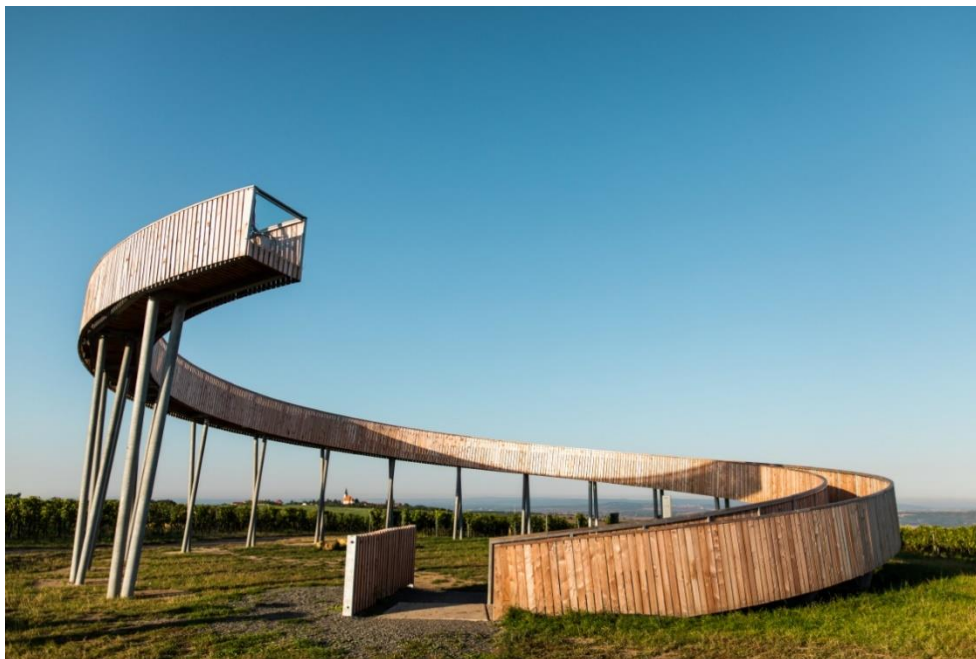
Součástí této práce bude i zpracování vizualizace rozhledny, tj. zhotovení 3D modelu rozhledny a následné úpravy pomocí softwaru Lumion. Výsledky této úlohy lze najít v příloze P1. Vizualizace.

2. Podklady

Jako podklady byla použita projektová dokumentace poskytnutá společností KEO4DESIGN, která konstrukci navrhovala.

3. Popis konstrukce

Rozhledna se nachází ve vinohradech v nadmořské výšce 334 m nad mořem na Kobylím vrchu východně od obce Kobylí na jižní Moravě. Účelem projektu bylo zlepšení turismu v této oblasti.



Obrázek 1 – Rozhledna na Kobylím vrchu [1]

Rozhledna byla navržena v architektonickém ateliéru společnosti Keoo4design. Stavbu prováděla společnost Teplotechna Ostrava od července do října roku 2018. Investorem tohoto projektu byla obec Kobylí.

Jedná se o konstrukci půdorysu tvaru mezikruží se středovým úhlem 334 °. Vnější průměr nosné konstrukce je téměř 24 m. Prostorově se jedná o šroubovicový tvar. Rozhledna nemá žádné schody, jedná se o rampu ve sklonu 5,8 °. Nejvyšší bod podlahy rozhledny se nachází ve výšce 7,5 m.

Pro výstavbu byla použita především ocel. Konstrukci nesou subtilní ocelové sloupy dutého kruhového průřezu, které jsou osazeny vždy ve dvojicích. Tyto sloupy jsou založeny na betonových patkách. Poslední pole sloužící jako hlavní vyhlídka je konstrukčně řešeno jako konzola. Konstrukce rampy a zábradlí tvoří ocelové jákly. Rampa je obložena svislými dřevěnými latěmi a podlahu tvoří dřevěné fošny. Na vrcholu je zábradlí zakončeno průhlednou skleněnou tabulí.

4. Výpočtové modely

Byly vytvořeny tři modely, které jsou trojrozměrné. Dva z nich jsou tvořeny pouze pruty, třetí model byl doplněn plošnými prvky. Sloupy jsou ve všech modelech podepřeny kloubovou neposuvnou podporou. Kloubové spojení prutů není vzhledem ke konstrukčnímu řešení spojů uvažováno.

Půdorysné schéma bylo naimportováno ze systému AutoCAD a poté byla jednotlivým uzlům přiřazena výška. Sloupy a zábradlí byly modelovány už v samotném prostředí softwaru RFEM. Při modelování byl využit manuál k programu [2].

Pruty jsou z oceli S235 s objemovou hmotností 7850 kg/m³.

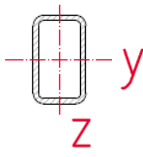
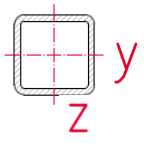
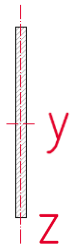
Modely obsahují sedm různých ocelových průřezů.

SEZNAM POUŽITÝCH PRŮŘEZŮ							
1	RO 168,3/10 mm			2	RO 219,1/16 mm		
	A	4970	mm ²		A	10200	mm ²
	I _y	1,56E+07	mm ⁴		I _y	5,30E+07	mm ⁴
	I _z	1,56E+07	mm ⁴		I _z	5,30E+07	mm ⁴
3	QRO 160/4 mm			4	QRO 160/6 mm		
	A	2450	mm ²		A	3600	mm ²
	I _y	9,87E+06	mm ⁴		I _y	1,41E+07	mm ⁴
	I _z	9,87E+06	mm ⁴		I _z	1,41E+07	mm ⁴

Tabulka 1 – Seznam použitých průřezů, část 1

Průřez číslo 1 je použit na sloupy kromě poslední dvojice sloupů, která je zesílená na průřez číslo 2. Příčné prvky hlavní nosné konstrukce jsou průřezu 3. Podélné prvky

hlavní nosné konstrukce jsou až na poslední dvě pole téhož průřezu, tyto poslední pole jsou zesílena na průřez 4.

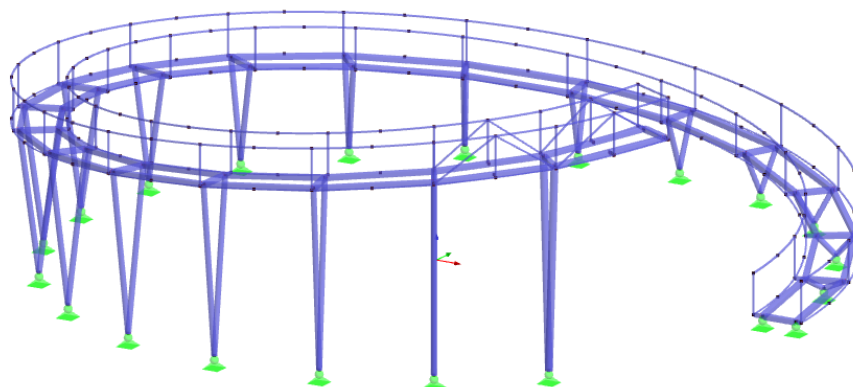
SEZNAM POUŽITÝCH PRŮŘEZŮ										
5		RRO 50/30/3 mm			6		QRO 50/4 mm			
	A	421	mm ²		A	695	mm ²			
	I _y	1,28E+05	mm ⁴		I _y	2,37E+05	mm ⁴			
	I _z	5,70E+04	mm ⁴		I _z	2,37E+05	mm ⁴			
7		Obdélník 8/140 mm								
	A	1120	mm ²							
	I _y	1,83E+06	mm ⁴							
	I _z	5,97E+03	mm ⁴							

Tabulka 2 – Seznam použitých průřezů, část 2

Průřezy 5 a 6 jsou průřezy trubek zábradlí, průřez 7 slouží pro pruty, kterými se kotví konstrukce zábradlí k hlavní nosné konstrukci.

4.1. Model 1

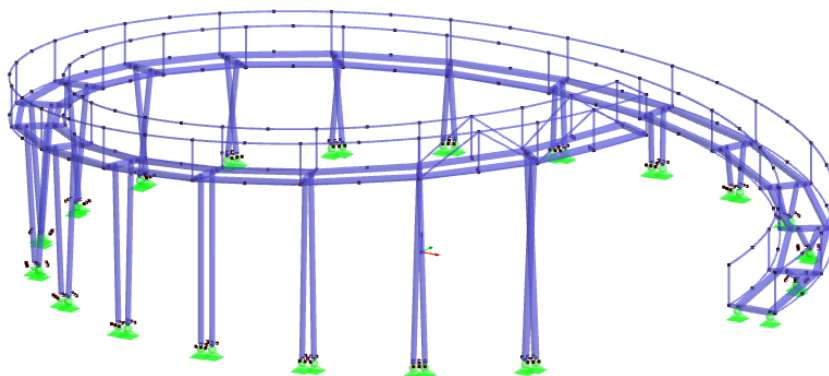
První model je prutový. Je vymodelována hlavní nosná konstrukce a konstrukce zábradlí, která slouží především k roznášení příčných sil od větru. Sloupy mají oproti reálnému řešení zjednodušenou geometrii – dvojice sloupů podepírající daný příčník je vždy v jedné rovině a je uložena na společné podpoře.



Obrázek 2 – Model 1

4.2. Model 2

Druhý model je rovněž prutový. Jediný rozdíl oproti modelu 1 je v geometrii sloupů. V tomto modelu jsou sloupy vymodelovány podle skutečné geometrie – to znamená, že se dvojice sloupů nenachází v jedné rovině, ale sloupy jsou vůči sobě prostorově mimoběžné. Každý ze sloupů je uložen na samostatné podpoře.



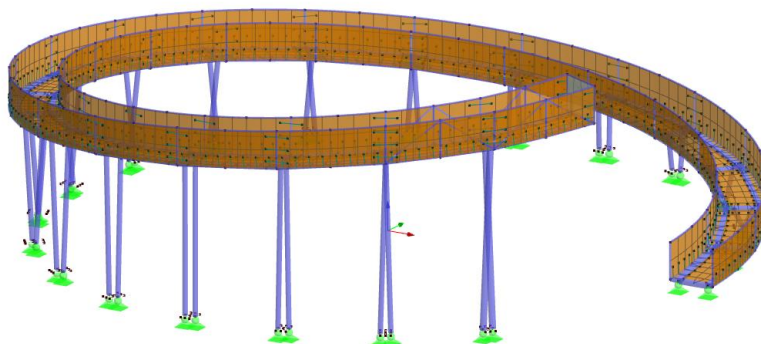
Obrázek 3 – Model 2

4.3. Model 3

Tento model má uspořádání sloupů shodné s modelem 2, ale je doplněn o plošné prvky zábradlí a podlahy. Tyto plochy jsou vymodelovány z jehličnatého modřínového dřeva s objemovou hmotností 570 kg/m^3 . Plocha simulující podlahové fošny má konstantní tloušťku 100 mm, plocha zábradlí má taktéž konstantní tloušťku a to 25 mm. Na vyhlídce je vymodelovaná skleněná tabule tloušťky 20 mm ze skla o objemové hmotnosti 2500 kg/m^3 .

Tento model je především využit pro zkoumání účinků zatížení větrem pomocí programu RWIND 1.25 od společnosti Dlubal.

Použití plošných prvků model ztužuje. Tento jev byl částečně potlačen užitím liniových kloubů na rozhraní jednotlivých ploch, avšak model stále neodráží v uspokojivé míře skutečnost.



Obrázek 4 – Model 3

5. Stálá zatížení

V této kapitole jsou všechna spočtená zatížení uvedena v charakteristických hodnotách.

Toto zatížení je vyvozeno nosnými a nenosnými prvky konstrukce.

5.1. Vlastní tíha

Do vlastní tíhy přispívá nosná konstrukce skládající se ze sloupů a podélných a příčných prvků držících podlahu. Zábradlí je do této kategorie zahrnuto taky, protože je součástí modelu.

Vlastní tíha byla na základě daných průřezů a objemové hmotnosti materiálu vygenerována softwarem.

Pro ověření softwarových výsledků je hmotnost ocelové konstrukce spočítána i ručně. Hmotnosti jednoho metru běžných ocelových profilů jsou převzaty z online katalogu [3].

Model 1

- Příčné pruty – jákl 160x160x4 mm, hmotnost 18,721 kg/m, délka 1,083 m, 21 kusů
 $m = 18,721 \cdot 1,083 \cdot 21 = 425,7717 \text{ kg}$
- Podélné pruty
 - jákl 160x160x4 mm, hmotnost 18,721 kg/m, délka 3,095 m (vnitřní strana) /3,408 m (vnější strana), 18 kusů na každé straně
 $m = 18,721 \cdot (3,095 + 3,408) \cdot 18 = 2191,3679 \text{ kg}$
 - jákl 160x160x6 mm, hmotnost 27,453 kg/m, délka 3,095 m (vnitřní strana) /3,408 m (vnější strana), 2 kusy na každé straně
 $m = 27,453 \cdot (3,095 + 3,408) \cdot 2 = 357,0537 \text{ kg}$
- Podélné pruty zábradlí
 - jákl 50x50x4 mm, hmotnost 5,287 kg/m, délka 3,019 m (vnitřní strana) /3,469 m (vnější strana), 20 kusů na každé straně
 $m = 5,287 \cdot (3,019 + 3,469) \cdot 20 = 686,0411 \text{ kg}$
 - jákl 50x50x4 mm, hmotnost 5,287 kg/m, délka 1,552 m, 1 kus
 $m = 5,287 \cdot 1,552 \cdot 1 = 8,2054 \text{ kg}$
- Sloupky zábradlí – jákl 50x50x4 mm, hmotnost 5,287 kg/m, délka 1,210 m, 46 kusů
 $m = 5,287 \cdot 1,210 \cdot 46 = 297,2744 \text{ kg}$
- Diagonály zábradlí – jákl 50x50x4 mm, hmotnost 5,287 kg/m, průměrná délka 2,023 m, 8 kusů
 $m = 5,287 \cdot 2,023 \cdot 8 = 85,5648 \text{ kg}$
- Plechy kotvicí zábradlí k hlavní nosné konstrukci – čtvercový průřez 140x8mm, průměrná délka 234,5 mm, $\rho_{\text{ocel}} = 7850 \text{ kg/m}^3$, 46 kusů
 $m = 0,140 \cdot 0,2345 \cdot 0,008 \cdot 7850 \cdot 46 = 94,8393 \text{ kg}$
- Sloupy
 - Tr 168,3/10 mm, hmotnost 39,040 kg/m, průměrná délka 3,082 m, 36 kusů
 $m = 39,040 \cdot 3,082 \cdot 36 = 4331,5661 \text{ kg}$
 - Tr 219,1/16 mm, hmotnost 80,140 kg/m, délka 6,098 m, 2 kusy
 $m = 80,140 \cdot 6,098 \cdot 2 = 977,3874 \text{ kg}$

Celková hmotnost ruční výpočet: 9455,07 kg
Celková hmotnost RFEM: 9994,20 kg
Rozdíl: 5,39 %

Model 2

Model 2 se liší pouze hmotností sloupů.

- Sloupy
 - Tr 168,3/10 mm, hmotnost 39,040 kg/m, průměrná délka 3,028 m, 36 kusů
 $m = 39,040 \cdot 3,028 \cdot 36 = 4255,6723 \text{ kg}$
 - Tr 219,1/16 mm, hmotnost 80,140 kg/m, délka 6,081 m, 2 kusy
 $m = 80,140 \cdot 6,081 \cdot 2 = 974,6627 \text{ kg}$

Celková hmotnost ruční výpočet: 9376,45 kg
Celková hmotnost RFEM: 9914,80 kg
Rozdíl: 5,43 %

Rozdíl výpočtů je uspokojivý a můžeme tedy předpokládat, že softwarem vygenerovaná vlastní tíha je správná.

5.2.Ostatní stálé zatížení

Toto zatížení je vyvozeno dřevěnými fošny tvořící podlahu, prvky zábradlí (opláštění a madlo) a úhelníky pro kotvení podlahy. Je zde zahrnuto i zatížení od skleněné tabule ukončující zábradlí v místě vyhlídky.

Zatížení od dřevěných fošen podlahy

Modřínové hranoly rozměru 100x100x1560 mm

$$g_{1k} = \frac{G_{1k}}{2 \cdot l} = \frac{V \cdot \gamma_{\text{modřín}}}{2 \cdot l} = \frac{0,1m \cdot 0,1m \cdot 1,56m \cdot 5,7kN/m^3}{2 \cdot 0,1m} = \mathbf{0,4446 \text{ kN/m}}$$

Zatížení se roznese na oba konce hranolu a dále do nosné konstrukce, proto je hodnota vydělena dvěma.

Zatížení od úhelníků kotvicích podlahové fošny

Úhelník L 50x50x4 mm (tloušťka profilu nebyla součástí projektové dokumentace, proto byla odhadnuta)

$$g_{2k} = \frac{m}{l} \cdot g = \frac{3,06kg}{1m} \cdot 10,0m/s^2 = \mathbf{0,0306 \text{ kN/m}}$$

Zatížení od prkenného opláštění zábradlí

Modřínová prkna rozměru 25x110x1370 mm

$$g_{3k} = \frac{G_{3k}}{l} = \frac{V \cdot \gamma_{\text{modřín}}}{l} = \frac{0,025m \cdot 0,11m \cdot 1,37m \cdot 5,7kN/m^3}{0,11m} = \mathbf{0,1952 \text{ kN/m}}$$

Zatížení od zábradelního madla

Modřínový hranolek průřezu 50x75 mm

$$g_{4k} = \frac{G_{4k}}{l} = \frac{V \cdot \gamma_{modřin}}{l} = \frac{0,050m \cdot 0,075m \cdot 1,0m \cdot 5,7kN/m^3}{1,0m} = \mathbf{0,0214 kN/m}$$

Zatížení od skleněné tabule na vyhlídce

Skleněná tabule rozměru 1150x1550x20 mm (rozměry tabule nejsou součástí projektové dokumentace, výška a šířka je změřena z modelu, tloušťka odhadnuta na základě běžně používaných tloušťek zábradelního skla)

$$g_{5k} = \frac{G_{5k}}{l} = \frac{V \cdot \gamma_{sklo}}{l} = \frac{1,15m \cdot 1,55m \cdot 0,02m \cdot 25kN/m^3}{1,083m} = \mathbf{0,8229 kN/m}$$

Hodnota 1,083 m je délka posledního příčného ocelového prutu, který nese skleněnou tabuli, která je o něco širší než tento prvek.

6. Proměnná zatížení

Uvedené hodnoty zatížení jsou charakteristické.

6.1. Užité zatížení

Rozhlednu jsem zařadila dle normy ČSN EN 1991-1-1 [4] do kategorie C – plochy, kde může docházet ke shromažďování lidí a to konkrétně C5 – plochy, kde může dojít k vysoké koncentraci lidí.

Z tohoto zařazení vyplývá charakteristická hodnota užitého zatížení $q_k = 5 - 7,5 \text{ kN/m}^2$ pro rovnoměrné plošné zatížení a $Q_k = 3,5 - 4,5 \text{ kN}$ pro soustředěné zatížení. Z intervalu pro rovnoměrné zatížení jsem si zvolila hodnotu **7,5 kN/m²**, protože po návštěvě samotné konstrukce jsem dospěla k závěru, že se zde může nahromadit mnoho lidí a tato hodnota je reálná. Soustředěné zatížení není na konstrukci uvažováno.

Dále jsem do této kategorie zatížení uvažovala vodorovné zatížení zábradlí (a dělicích stěn) dle [4], které se má volit pro kategorii C5 v rozmezí $q_k = 3,0 - 5,0 \text{ kN/m}$. Tohle zatížení mi však přijde neadekvátně velké vzhledem ke způsobu užívání konstrukce, a proto jsem využila hodnoty pro kategorie C2 až C4 $q_k = 0,8 - 1,0 \text{ kN/m}$. Z tohoto intervalu jsem zvolila hodnotu **0,8 kN/m**, protože na konstrukci dle mého názoru není dostatečný prostor vyvodit větší vodorovné zatížení.

6.2. Zatížení sněhem

Zatížení sněhem bylo stanoveno v souladu s normou ČSN EN 1991-1-3, ze které vychází všechny níže uvedené vztahy [5].

Bylo uvažováno rovnoměrné zatížení sněhem na celé ploše rampy rozhledny. Návěje sněhu nebyly uvažovány.

Pro trvalou a dočasnou návrhovou situaci se zatížení sněhem určí podle vztahu:

$$s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

kde μ_1 – tvarový součinitel zatížení sněhem bez návěje

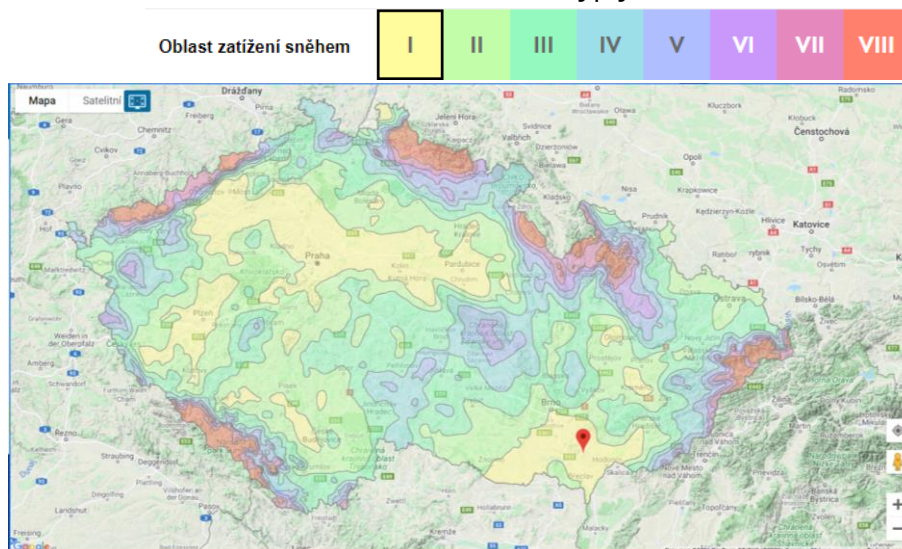
C_e – součinitel expozice

C_t – tepelný součinitel

s_k – charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi

Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi s_k

Rozhledna se nachází ve sněhové oblasti I, z toho vyplývá hodnota $s_k = 0,7 \text{ kN/m}^2$.



Obrázek 5 – Mapa sněhových oblastí [6]

Tvarový součinitel zatížení sněhem bez návějí μ_1

Podélný sklon rampy α je $5,8^\circ$. Hodnota součinitele $\mu_1 = 0,8$.

Tabulka 5.2 – Tvarové součinitele zatížení sněhem

úhel sklonu střechy α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8\alpha/30$	1,6	--

Tabulka 3 – Tvarové součinitele zatížení sněhem [5]

Součinitel expozice C_e

Hodnota tohoto součinitele závisí na typu krajiny. Typ krajiny, kde stojí rozhledna, jsem vyhodnotila jako krajinu otevřenou, která je definovaná normou jako rovná plocha bez překážek, otevřená do všech stran, nechráněná nebo jen málo chráněná terénem, vyššími stavbami nebo stromy [5].

Z toho vyplývá, že $C_e = 0,8$.

Tepelný součinitel C_t

Tepelný součinitel C_t se má použít tam, kde je možné vzít v úvahu snížení zatížení sněhem na střeše, která má vysokou tepelnou prostupnost ($> 1 \text{ W/m}^2\text{K}$), zejména u některých skleněných střech, kde dochází k tání sněhu vlivem prostupu tepla střechou.

Pro všechny ostatní případy je $C_t = 1,0$ [5].

Tepelný součinitel C_t uvažují hodnotou 1,0.

Vypočtená hodnota zatížení sněhem s v charakteristické hodnotě

$$s = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,7 \text{ kN/m}^2 = \mathbf{0,4480 \text{ kN/m}^2}$$

6.3. Zatížení větrem

Zatížení větrem bylo stanoveno v souladu s normou ČSN EN 1991-1-4, ze které pochází všechny níže uvedené vztahy [7].

Základní rychlost větru v_b

Vypočte se z výrazu:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

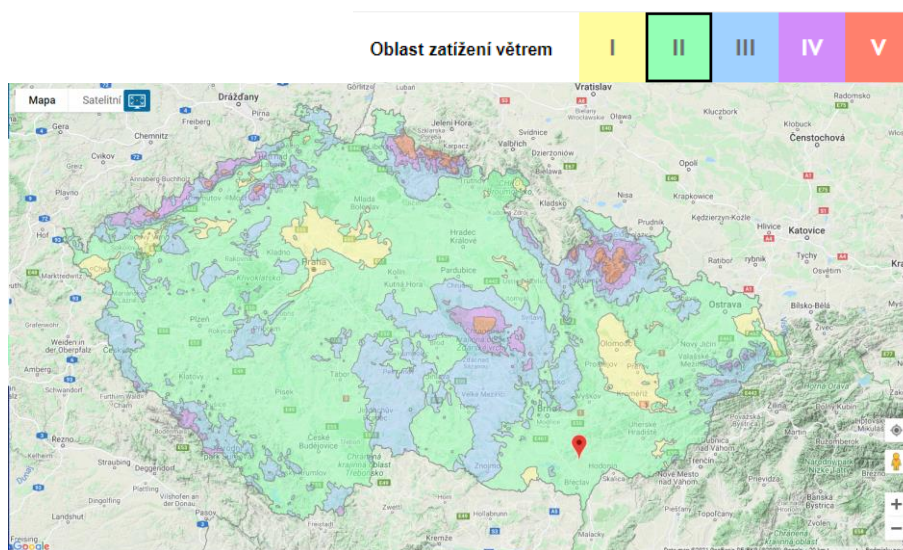
kde

c_{dir} – součinitel směru větru, doporučená hodnota je 1,0

c_{season} – součinitel ročního období, doporučená hodnota je 1,0

$v_{b,0}$ – základní rychlost větru ve výšce 10 m nad zemí v terénu kategorie II, definovaná jako funkce směru větru a ročního období

Stavba se nachází ve 2. větrné oblasti, výchozí hodnota základní rychlosti větru je tedy $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$.



Obrázek 6 – Mapa větrných oblastí [6]

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25 \text{ m/s} = 25 \text{ m/s}$$

Střední rychlost větru $v_m(z)$

Jedná se o střední rychlost větru ve výšce z nad terénem. V tomto případě je výška $z = 7,695 \text{ m}$, což je nejvyšší bod zábradlí rozhledny.

Terén odpovídá kategorii II – oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, sloupy), jejichž vzdálenost je větší než 20násobek výšky překážek [7]. Z tohoto zatřídění vyplývají hodnoty minimální výšky $z_{min} = 2,0 \text{ m}$ a parametr drsnosti terénu $z_0 = 0,05 \text{ m}$.

Stanoví se dle vztahu:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

kde $c_r(z)$ – součinitel drsnosti terénu

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ pro } z_{\min} = 2,0 \text{ m} \leq z = 7,695 \text{ m} \leq z_{\max} = 200 \text{ m}$$

kde k_r – součinitel terénu, který závisí na uvažovaném parametru drsnosti terénu z_0

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

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,19 \cdot \ln\left(\frac{7,695}{0,05}\right) = \mathbf{0,9569}$$

$c_0(z)$ – součinitel orografie, roven 1,0

v_b – základní rychlost větru

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0,9569 \cdot 1,0 \cdot 25 \text{ m/s} = \mathbf{23,9224 \text{ m/s}}$$

Maximální dynamický tlak $q_p(z)$

Zahrnuje střední a krátkodobé fluktuace větru a je dán vztahem:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$$

kde $I_v(z)$ – intenzita turbulence ve výšce z

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \text{ pro } z_{\min} = 2,0 \text{ m} \leq z = 7,695 \text{ m} \leq z_{\max} = 200 \text{ m}$$

kde k_I – součinitel turbulence, doporučená hodnota 1,0

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln\left(\frac{7,695}{0,05}\right)} = \mathbf{0,1986}$$

ρ – měrná hmotnost vzduchu, která závisí na nadmořské výšce, teplotě a barometrickém tlaku, který je v oblasti očekáván při silné vichřici, doporučená hodnota 1,25 kg/m³

$$\begin{aligned} q_p(z) &= [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = \\ &= [1 + 7 \cdot 0,1986] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \text{ kg/m}^3 \cdot 23,9224^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 = \mathbf{854,9166 \text{ Pa}} \end{aligned}$$

Stanovení povrchových tlaků

Jelikož má konstrukce atypický tvar, není jednoduché vybrat nejvhodnější postup pro stanovení intenzity povrchových tlaků dle normy. Zatížení větrem proto bylo stanoveno třemi různými způsoby, které jsou rozebrány níže a na závěr porovnány.

Normový výpočet je porovnán i s výsledky programu RWIND, který simuluje zatížení větrem pomocí větrného tunelu.

6.3.1. Zatížení větrem jako na klenbové střechy

První způsob výpočtu je proveden jako by se jednalo o klenbovou střechu. Konstrukce rozhledny má oblý tvar, dalo by se tedy zjednodušeně předpokládat, že vítr na ni bude působit jako na klenbovou střechu, kdybychom ji prostorově otočili o 90 ° „na bok“.

Vstupní údaje:

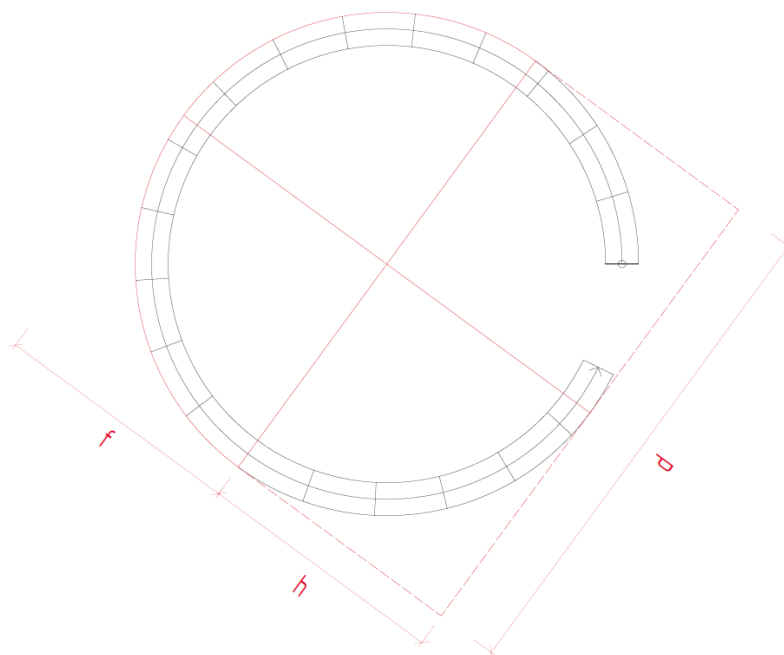
$$d = 23,702 \text{ m}$$

$$h = f = 11,851 \text{ m}$$

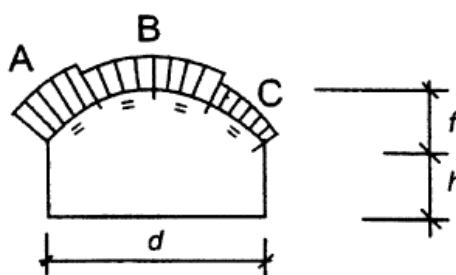
$$\Rightarrow \frac{h}{d} = \frac{f}{d} = \frac{11,851}{23,702} = 0,5$$

Oblast	c_{pe} [-]	w_e [kN/m ²] = $c_{pe} \cdot q_p(z_e)$
A	0,8	0,6839 (tlak)
B	-1,2	-1,0259 (sání)
C	-0,4	-0,3420 (sání)

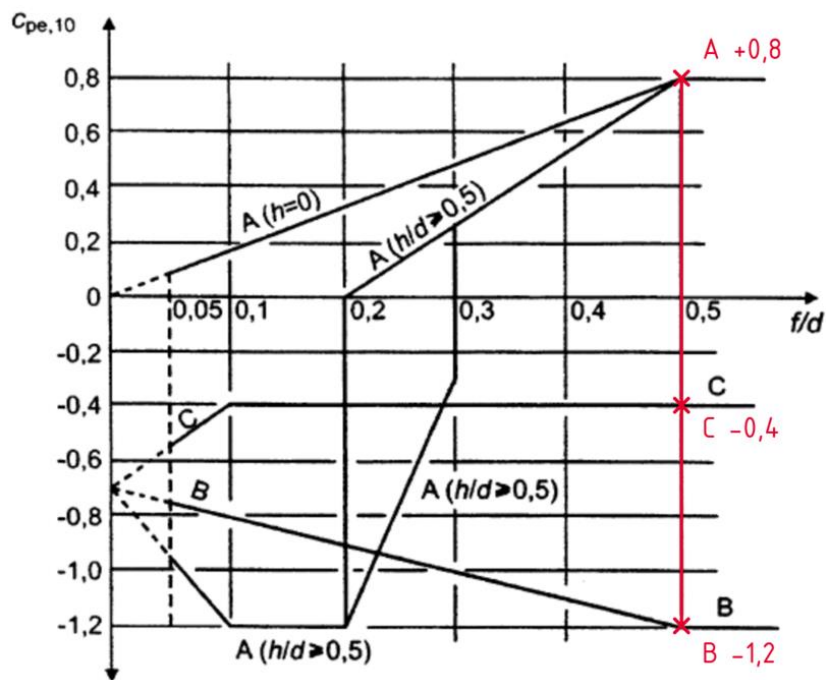
Tabulka 4 - Výsledné hodnoty vnějších tlaků - klenbová střecha



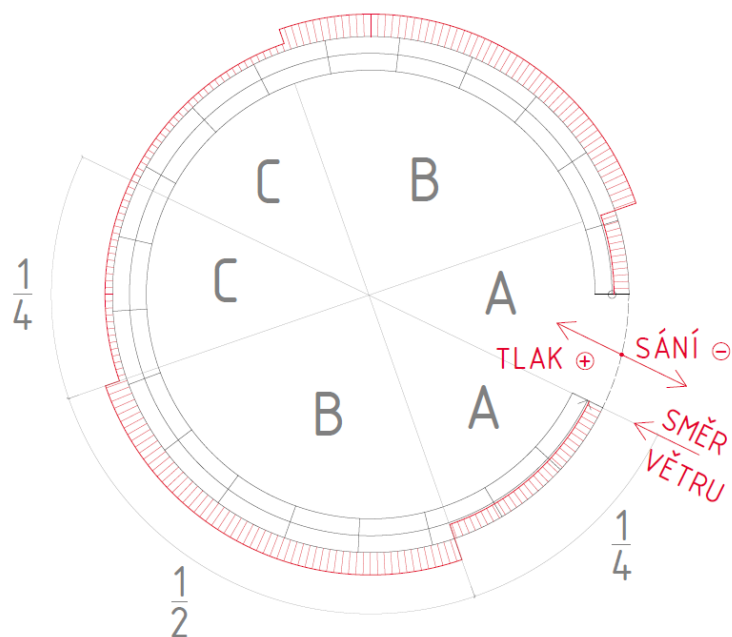
Obrázek 7 - Základní rozměry - klenbová střecha



Obrázek 8 - Rozdělení na oblasti - klenbová střecha [7]



Obrázek 9 – Stanovení $c_{pe,10}$ pro klenbové střechy [7]



Obrázek 10 – Vykreslení povrchových tlaků – klenbová střecha

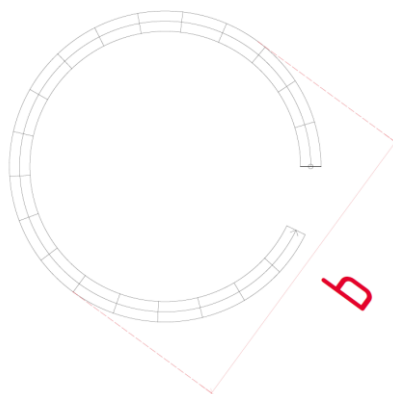
6.3.2. Zatížení větrem jako na válec

Další způsob výpočtu využívá toho, že bychom mohli říct, že rozhledna je válec. Přesněji řečeno pouze výseč válce.

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} = \frac{23,703m \cdot 36,985m/s}{15 \cdot 10^{-6}m^2/s} = 5,84 \cdot 10^7$$

kde b – průměr válce



Obrázek 11 – Průměr válce b

$v(z_e)$ – maximální rychlost větru ve výšce z_e

$$v(z_e) = \sqrt{2 \cdot \frac{q_p}{\rho}} = \sqrt{2 \cdot \frac{854,9166 [Pa = \frac{kg \cdot s^{-2}}{m^2}]}{1,25 kg/m^3}} = 36,985 m/s$$

q_p – maximální dynamický tlak

ρ – měrná hmotnost vzduchu, doporučená hodnota
1,25 kg/m³

ν – kinematická viskozita vzduchu, $\nu = 15 \cdot 10^{-6} m^2/s$

Ekvivalentní drsnost povrchu

$$\frac{k}{b} = \frac{0,5mm}{23702mm} = 2,11 \cdot 10^{-5}$$

kde hodnota k je ekvivalentní drsnost povrchu zábradlí tvořící opláštění konstrukce

Tabulka 7.13 – Ekvivalentní drsnost povrchu k

Druh povrchu	Ekvivalentní drsnost k [mm]	Druh povrchu	Ekvivalentní drsnost k [mm]
sklo	0,0015	hladký beton	0,2
leštěný kov	0,002	hoblované dřevo	0,5
jemný nátěr	0,006	drsňý beton	1,0
stříkaný nátěr	0,02	neopracované řezivo	2,0
lesklá ocel	0,05	rez	2,0
šedá litina	0,2	cihelne stěny	3,0
pozinkovaná ocel	0,2		

Tabulka 5 – Ekvivalentní drsnost povrchu k [7]

Efektivní štíhlost

$\ell = 37,231$ m (polovina vnějšího obvodu rozhledny)

$b = 1,21$ m (výška konstrukce zábradlí)

Tabulka 7.16 – Doporučené hodnoty λ pro válce, mnohoúhelníkové průřezy, obdélníkové průřezy, otevřené konstrukční průřezy a příhradové konstrukce

Č.	Poloha konstrukce, vítr kolmý k rovině strany	Efektivní štíhlost λ
1		Pro mnohoúhelníkové, obdélníkové a ostrohranné průřezy a příhradové konstrukce: pro $\ell \geq 50$ m, menší z hodnot $\lambda = 1,4\ell/b$ nebo $\lambda = 70$;
2		Pro $\ell < 15$ m, menší z hodnot $\lambda = 2\ell/b$ nebo $\lambda = 70$. Pro válce s kruhovým průřezem: pro $\ell \geq 50$ m, menší z hodnot $\lambda = 0,7\ell/b$ nebo $\lambda = 70$; pro $\ell < 15$ m, menší z hodnot $\lambda = \ell/b$ nebo $\lambda = 70$.
3		Pro mezilehlé hodnoty ℓ se doporučuje použít lineární interpolaci.
4		Pro $\ell \geq 50$ m, menší z hodnot $\lambda = 0,7\ell/b$ nebo $\lambda = 70$. Pro $\ell < 15$ m, menší z hodnot $\lambda = \ell/b$ nebo $\lambda = 70$. Pro mezilehlé hodnoty ℓ se doporučuje použít lineární interpolaci.

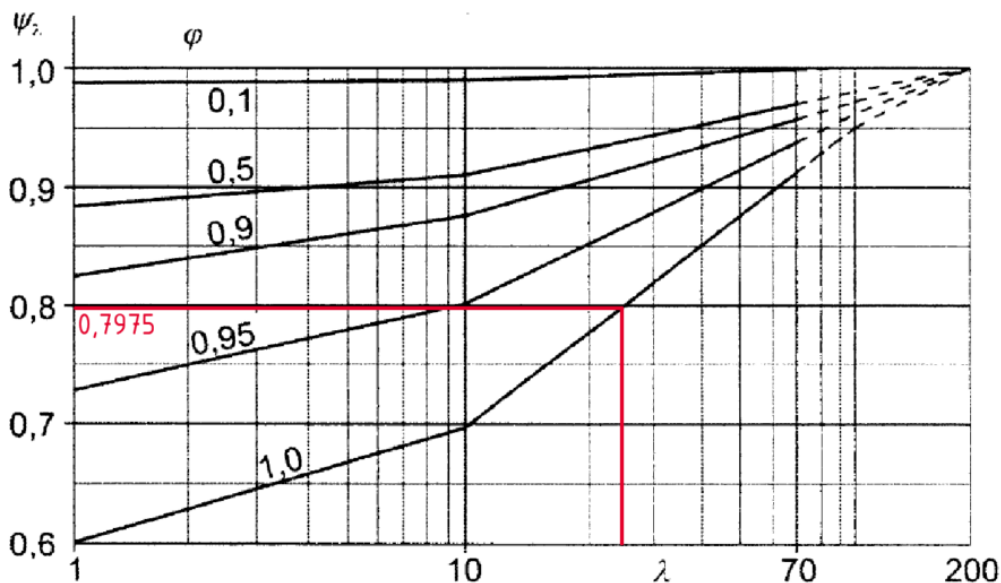
Tabulka 6 – Doporučené hodnoty efektivní štíhlosti, stanovení pro celou konstrukci [7]

Jelikož je hodnota ℓ větší než 15 m a menší než 50 m, tak před výpočtem efektivní štíhlosti byla provedena lineární interpolace.

$$\lambda = \min \left\{ 0,8094 \cdot \frac{\ell}{b}; 70 \right\} = \min \left\{ 0,8094 \cdot \frac{37,231 \text{ m}}{1,21 \text{ m}}; 70 \right\} = \min \{ 24,905; 70 \} = 24,905$$

Součinitel plnosti je uvažován jako $\varphi = 1,0$, protože opláštění je z prken, které mají mezi sebou zanedbatelné mezery.

⇒ Součinitel koncového efektu $\psi_\lambda = 0,7975$



Obrázek 12 – Stanovení součinitele koncového efektu ψ_λ pro celou konstrukci [7]

Součinitelé vnějších tlaků c_{pe}

Tyto součinitele závisí na součiniteli koncového efektu $\psi_{\lambda\alpha}$, který je definován v závislosti na poloze:

$$\begin{aligned} \psi_{\lambda\alpha} &= 1 && \text{pro } 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{min} \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_\lambda + (1 - \psi_\lambda) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{min}}{\alpha_A - \alpha_{min}}\right)\right) && \text{pro } \alpha_{min} < \alpha < \alpha_A \\ \psi_{\lambda\alpha} &= \psi_\lambda && \text{pro } \alpha_A \leq \alpha \leq 180^\circ \end{aligned}$$

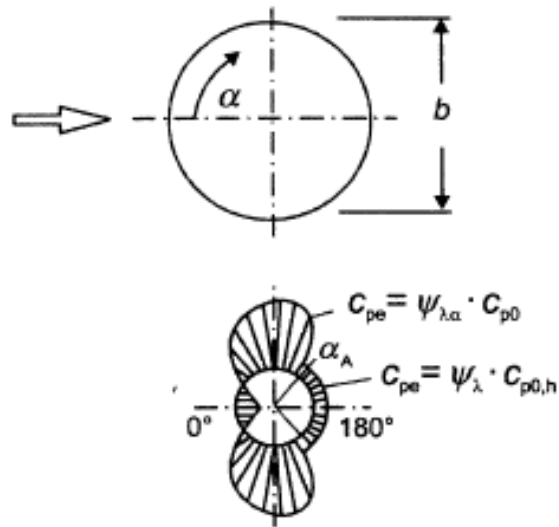
kde α_{min} – místo minimálního tlaku ve [°]
 α_A – poloha bodu oddělení proudu ve [°]

Tabulka 7.12 – Typické hodnoty pro rozdělení tlaku na kruhových válcích pro různé hodnoty Reynoldsova čísla bez vlivu proudění kolem volných konců

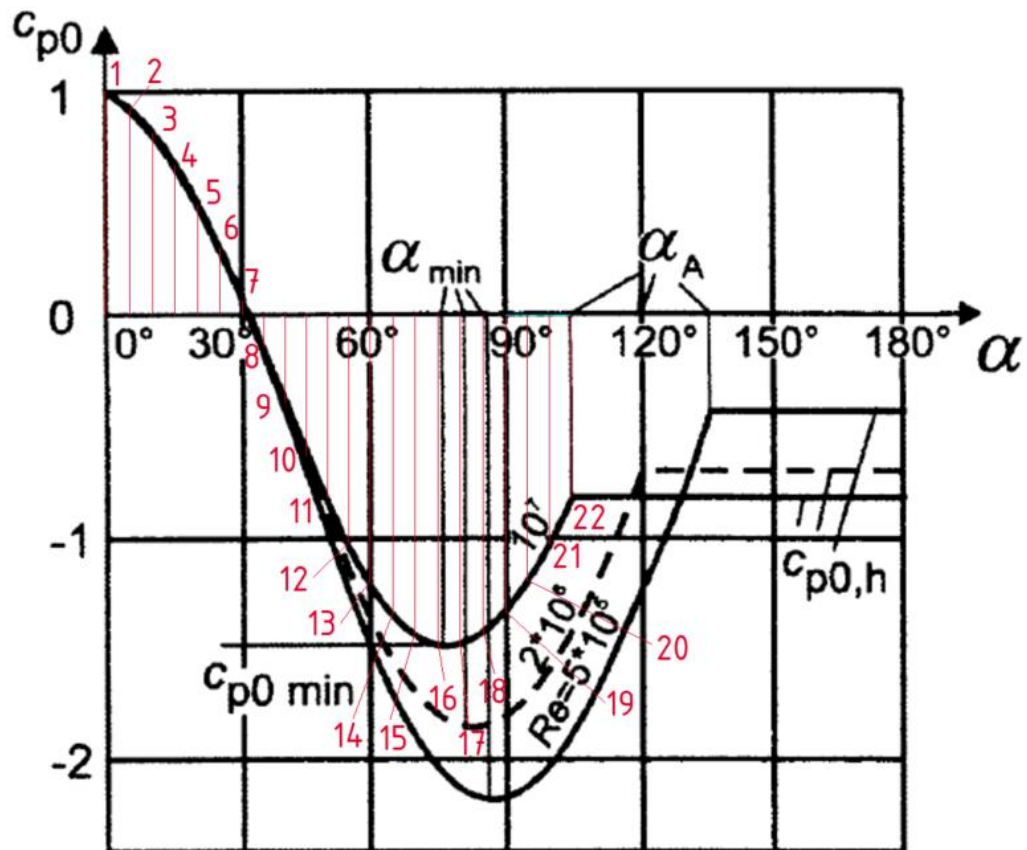
Re	α_{min}	$c_{p0,min}$	α_A	$c_{p0,h}$
$5 \cdot 10^5$	85	-2,2	135	-0,4
$2 \cdot 10^6$	80	-1,9	120	-0,7
10^7	75	-1,5	105	-0,8

Kde α_{min} je místo minimálního tlaku ve [°];
 $c_{p0,min}$ hodnota součinitele minimálního tlaku;
 α_A poloha bodu oddělení proudu ve [°];
 $c_{p0,h}$ součinitel tlaku na závětrné straně válce.

Tabulka 7 – Typické hodnoty pro rozdělení tlaku na kruhových válcích [7]



Obrázek 13 – Rozdělení tlaku pro válce s kruhovým průřezem [7]



Obrázek 14 – Stanovení součinitele vnějšího tlaku bez vlivu proudění kolem volných konců [7]

Součinitele vnějšího tlaku c_{pe} jsou poté definované vztahem:

$$c_{pe} = c_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha}$$

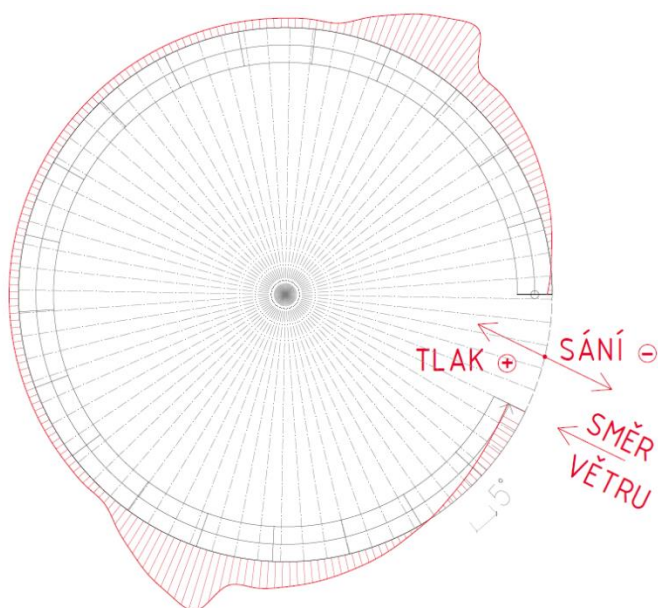
Vnější tlak větru w_e je potom dán jako:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

Výsledné hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce.

STANOVENÍ TLAKU VĚTRU NA POVRCHY					
č. bodu	α [°]	$\psi_{\lambda\alpha}$ [-]	c_{p0} [-]	c_{pe} [-]	w_e [kN/m ²]
1	0	1,000	1,000	1,000	0,855
2	5	1,000	0,925	0,925	0,791
3	10	1,000	0,822	0,822	0,703
4	15	1,000	0,675	0,675	0,577
5	20	1,000	0,496	0,496	0,424
6	25	1,000	0,304	0,304	0,260
7	30	1,000	0,060	0,060	0,051
8	35	1,000	-0,142	-0,142	-0,121
9	40	1,000	-0,392	-0,392	-0,335
10	45	1,000	-0,631	-0,631	-0,539
11	50	1,000	-0,825	-0,825	-0,705
12	55	1,000	-1,024	-1,024	-0,875
13	60	1,000	-1,196	-1,196	-1,022
14	65	1,000	-1,340	-1,340	-1,146
15	70	1,000	-1,433	-1,433	-1,225
16	75	1,000	-1,500	-1,500	-1,282
17	80	2,534	-3,737	-3,195	-2,932
18	85	2,354	-3,341	-2,856	-2,621
19	90	2,069	-2,761	-2,361	-2,166
20	95	1,696	-2,020	-1,727	-1,585
21	100	1,263	-1,307	-1,117	-1,025
22	105-180	0,798	-0,638	-0,545	-0,501

Tabulka 8 - Výsledné hodnoty vnějších tlaků - kruhový válec



Obrázek 15 - Vykreslení povrchových tlaků - válec

Součinitel konstrukce $c_s c_d$

Součinitel konstrukce je uvažován hodnotou 1,0, protože se zde jedná o pozemní stavbu menší než 15 m [7].

6.3.3. Zatížení větrem spočítáno softwarem RWIND

Při zpracování této práce jsem narazila na možnost simulovat proudění větru pomocí softwaru. Cílem bylo zjistit, zda vítr na konstrukci opravdu působí tak, jak bylo uvažováno ve výpočtech výše.

Představení možností programu RWIND

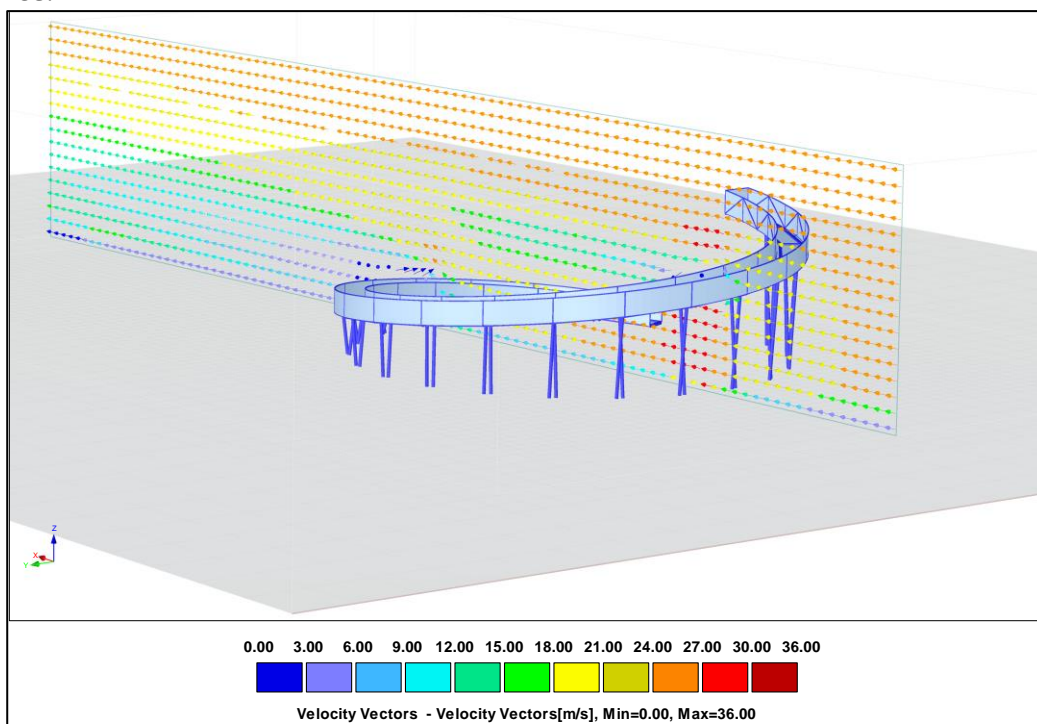
Software RWIND je velmi šikovný nástroj, kterým se dá modelovat pomocí numerické simulace zatížení větrem na konstrukcích rozmanitých tvarů. Pro výpočet se používá numerický řešič pro nestlačitelné turbulentní proudění. Tento produkt nabízí dvě možnosti použití, buď slouží jako nástavba k programu RFEM a „pouze“ vygeneruje zatížení ve směrech dle zadání uživatele bez možnosti zobrazení podrobnějších výsledků, nebo lze spustit jako samostatný program.

Při druhé možnosti použití programu uživatel nejprve definuje vstupní parametry jako je rychlost větru, kinematická viskozita a hustota vzduchu, zda má program do výpočtu zahrnout vliv turbulence a další. Po proběhnutí výpočtu program zobrazí na konstrukci barevně odlišené výsledky – a to buď plošné nebo „liniové“.

V této práci jsou využity oba způsoby použití tohoto softwaru.

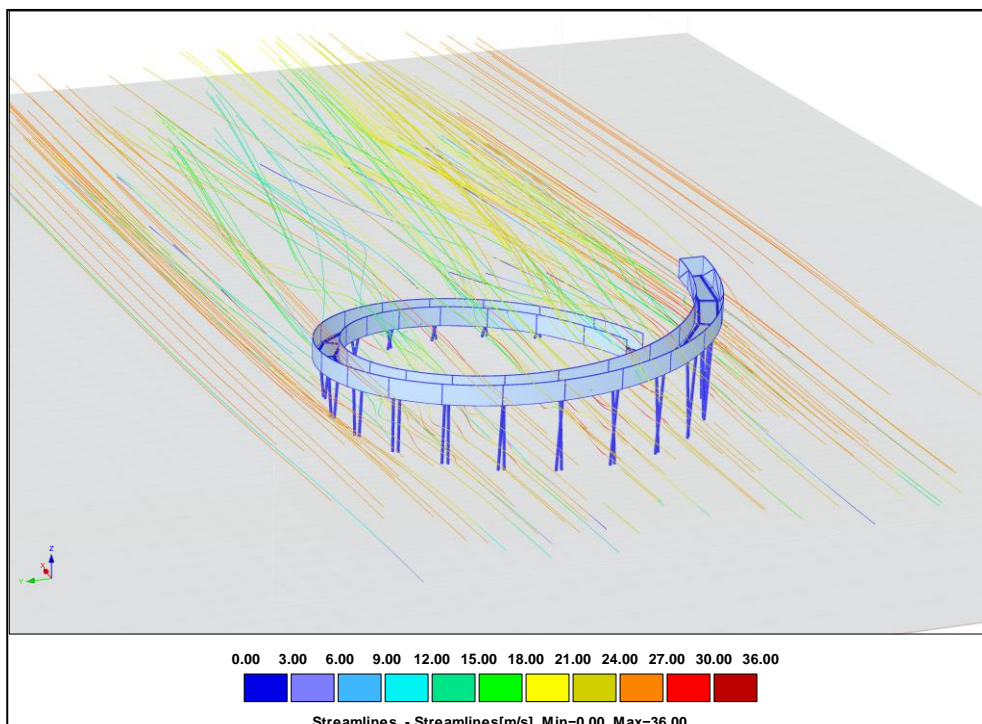
V plošných výsledcích může uživatel zjistit rozdělení tlaků po konstrukci (bude dále v tomto oddíle rozebíráno) a hodnoty součinitelů c_{pe} .

V „liniových“ výsledcích se zobrazují pole vektorů rychlosti nebo tlaku. S tímto polem lze posouvat v rámci šířky konstrukce a zjistit tedy průběh těchto veličin v různých řezech konstrukce.



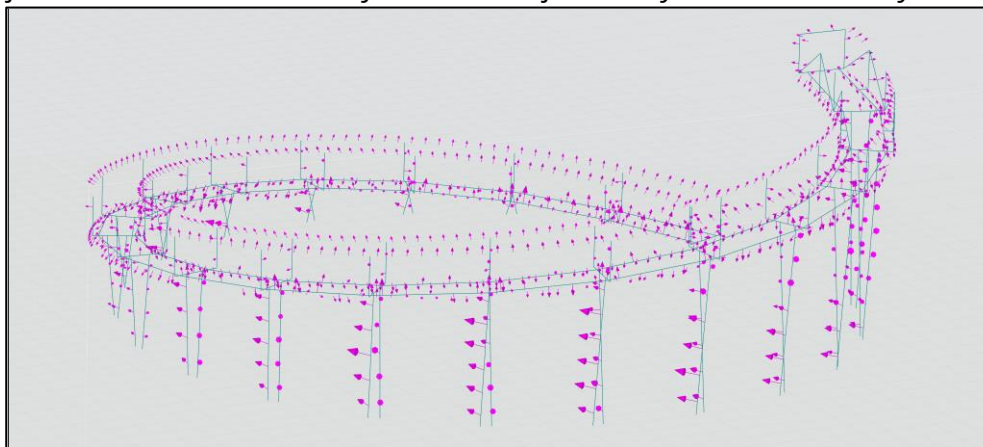
Obrázek 16 – Ukázka vykreslení výsledků RWIND – pole vektorů rychlosti

Dále lze v sekci výsledků zobrazit linie jednotlivých proudů – staticky, nebo také jako animaci.



Obrázek 17 – Ukázka vykreslení výsledků RWIND – linie jednotlivých proudů

Existuje zde i možnost zobrazit výslednice sil v jednotlivých bodech mřížky konstrukce.



Obrázek 18 – Ukázka vykreslení výsledků RWIND – výslednice sil

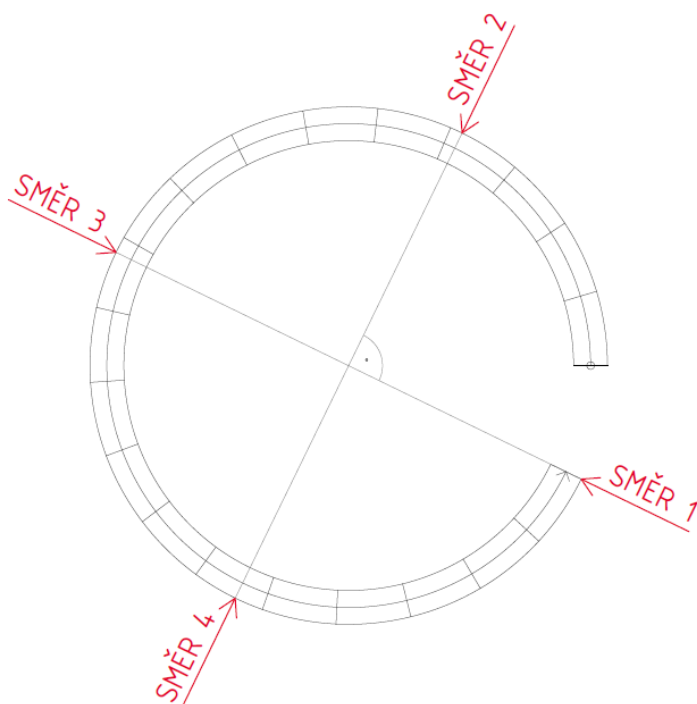
Při seznamování se s programem mi pomáhal uživatelský manuál [8].

Využití při zpracování této práce

Pro vyobrazení působení větru je vytvořen model 3 s plošnými prvky. Model byl importován do softwaru RWIND, kde byl umístěn do větrného tunelu a obtékán větrným proudem. Rychlost větru je uvažována hodnotou $v = 25 \text{ m/s}$, v simulaci se uvažuje s vlivem turbulence.

Na následujících obrázcích je vidět rozložení tlaků a sání na konstrukci ve čtyřech směrech větru. Směry působení větru jsou vybrány v návaznosti na ostatní zatěžovací stavy (které jsou popsány níže v kapitole 7), aby pokud možno vyvodily co nejnepříznivější

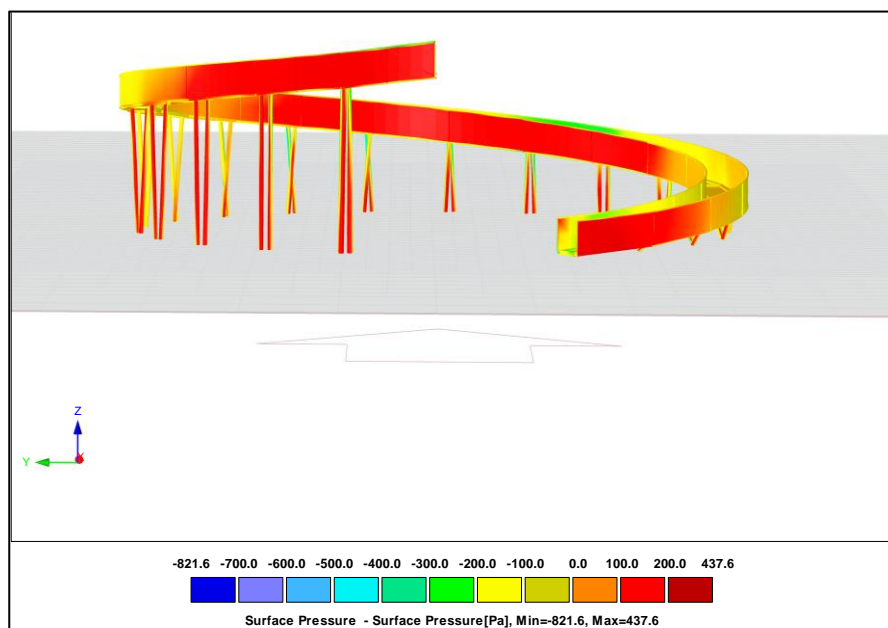
kombinaci zatížení. Konstrukce se deformuje pod působícím zatížením převážně směrem ke středu půdorysu a to nejvíce v místě konzoly. Proto byl směr 1 zvolen tak, aby tlak větru působil právě zde na vnější stranu vyhlídky. Další tři směry jsou odstupňovány po 90°.



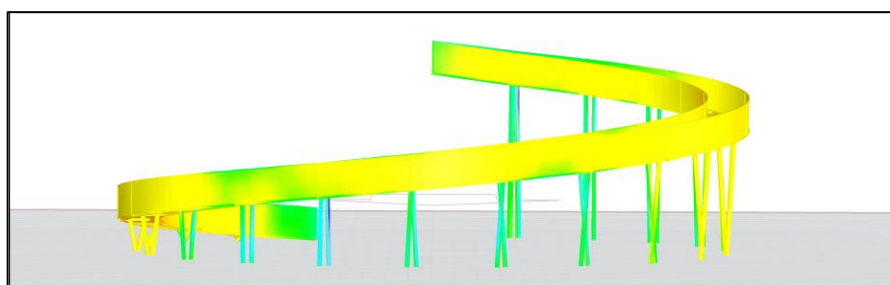
Obrázek 19 – Zvolené směry větru

Červená barva značí tlak. Postupně přes žlutou a zelenou přecházíme do sání. Tmavě modrá barva značí největší sání. U bočních pohledů je pro přehlednost červenou šipku naznačen směr větru.

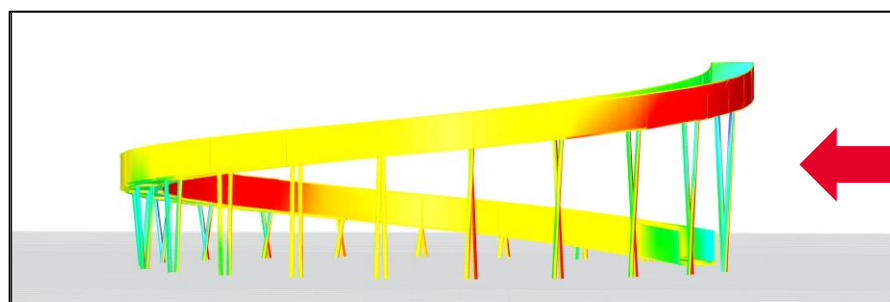
Směr 1



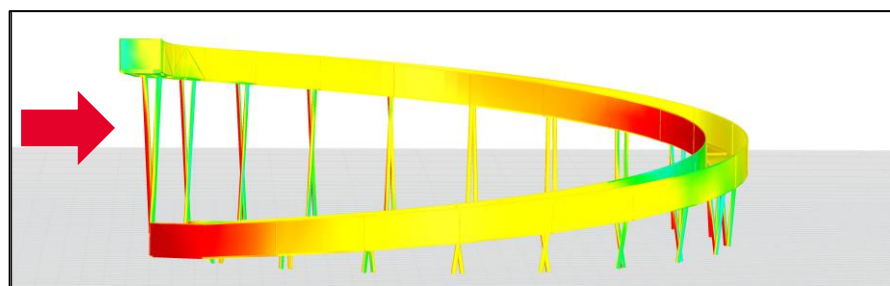
Obrázek 20 – RWIND – povrchové tlaky, směr 1, návětrná strana



Obrázek 21 – RWIND – povrchové tlaky, směr 1, závětrná strana

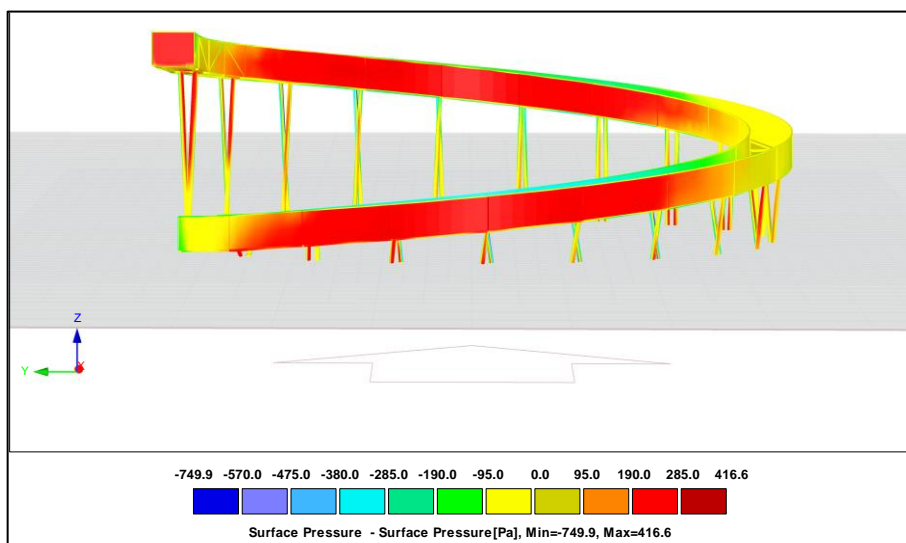


Obrázek 22 – RWIND – povrchové tlaky, směr 1, boční strana 1

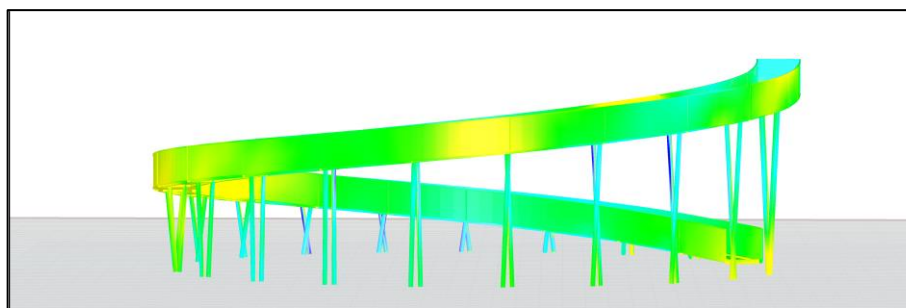


Obrázek 23 – RWIND – povrchové tlaky, směr 1, boční strana 2

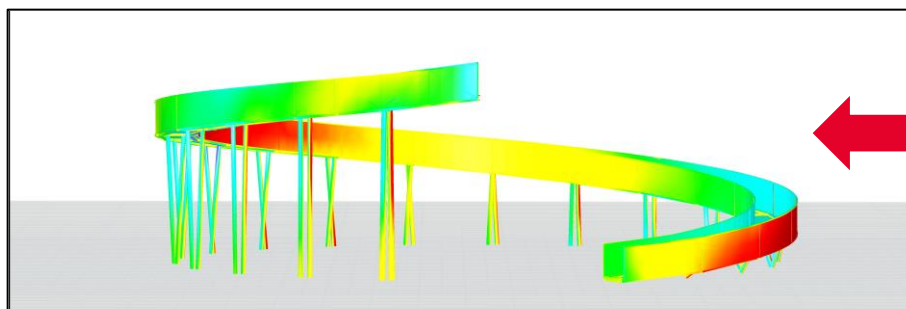
Směr 2



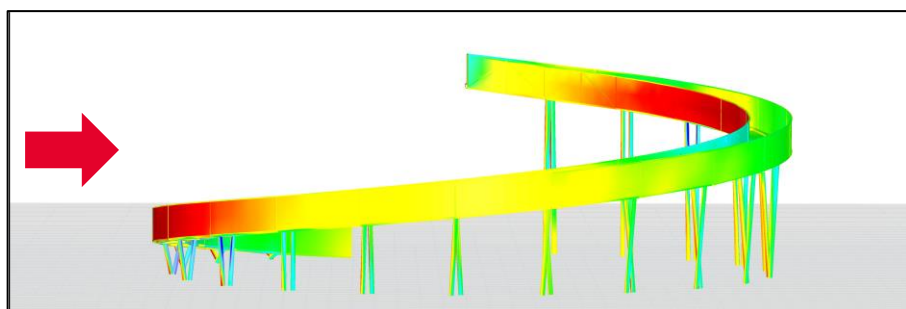
Obrázek 24 - RWIND - povrchové tlaky, směr 2, návětrná strana



Obrázek 25 - RWIND - povrchové tlaky, směr 2, závětrná strana

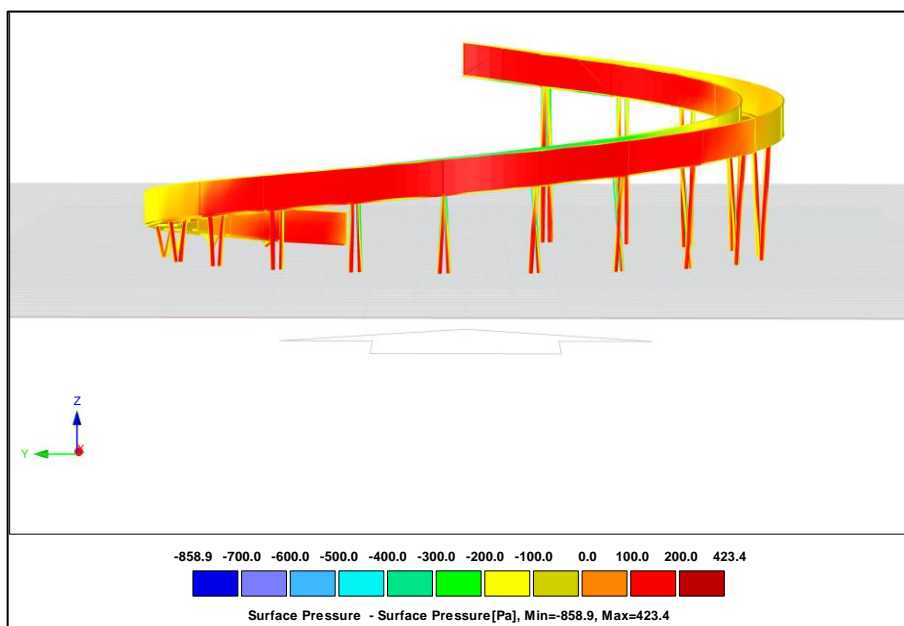


Obrázek 26 - RWIND - povrchové tlaky, směr 2, boční strana 1

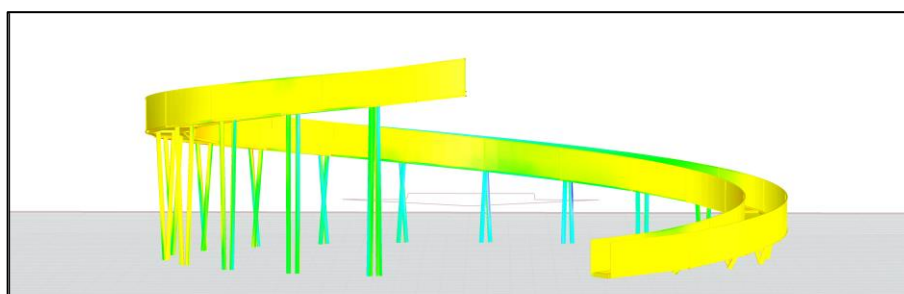


Obrázek 27 - RWIND - povrchové tlaky, směr 2, boční strana 2

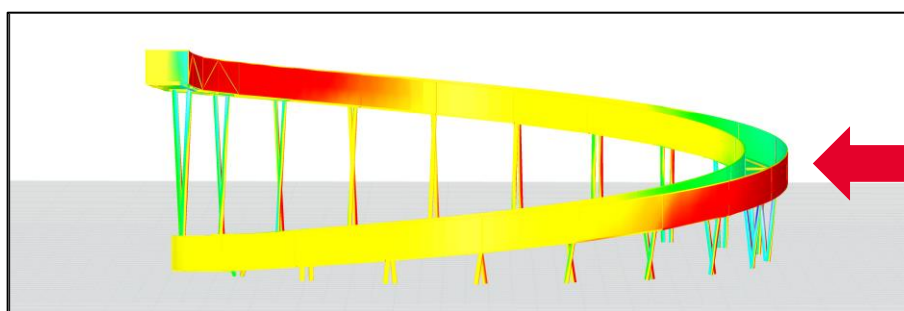
Směr 3



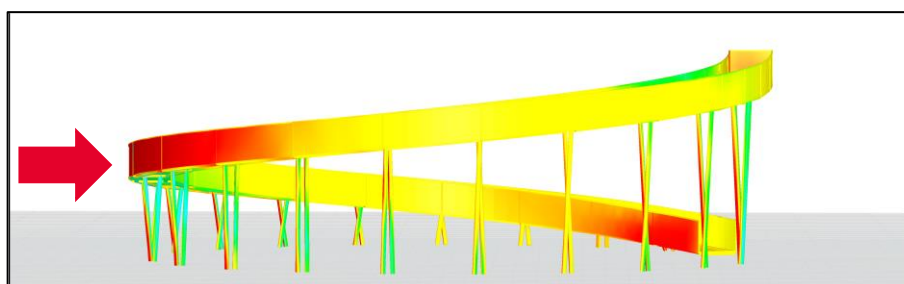
Obrázek 28 – RWIND – povrchové tlaky, směr 3, návětrná strana



Obrázek 29 – RWIND – povrchové tlaky, směr 3, závětrná strana

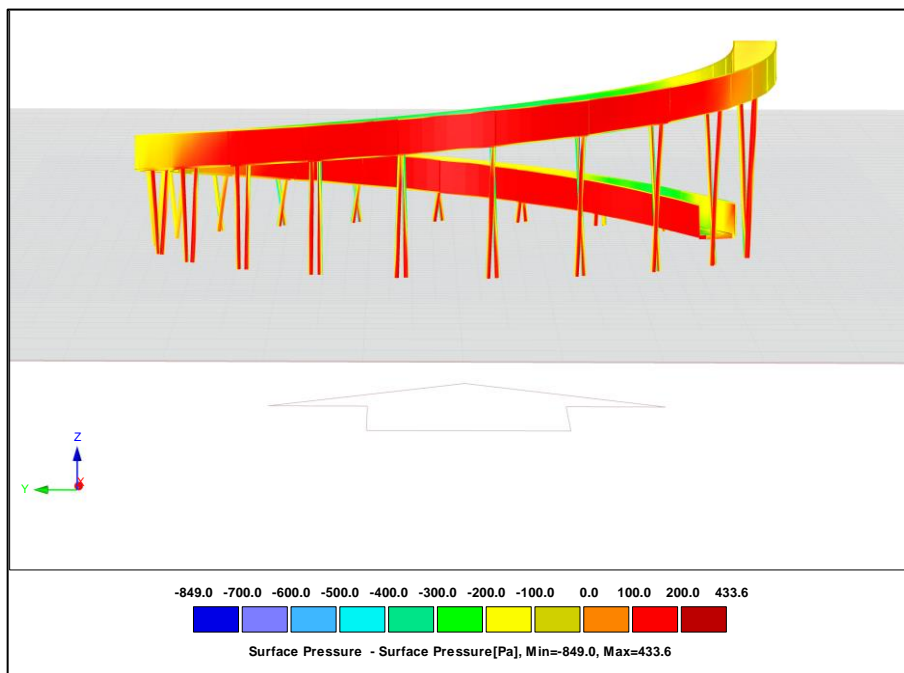


Obrázek 30 – RWIND – povrchové tlaky, směr 3, boční strana 1

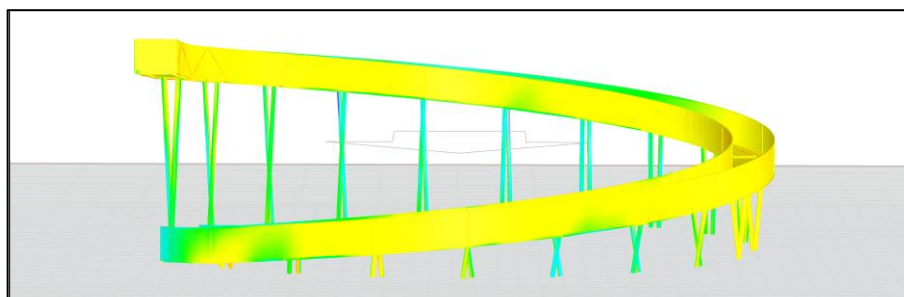


Obrázek 31 – RWIND – povrchové tlaky, směr 3, boční strana 2

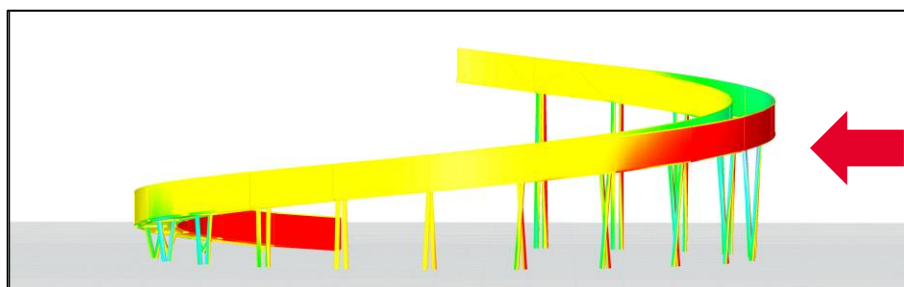
Směr 4



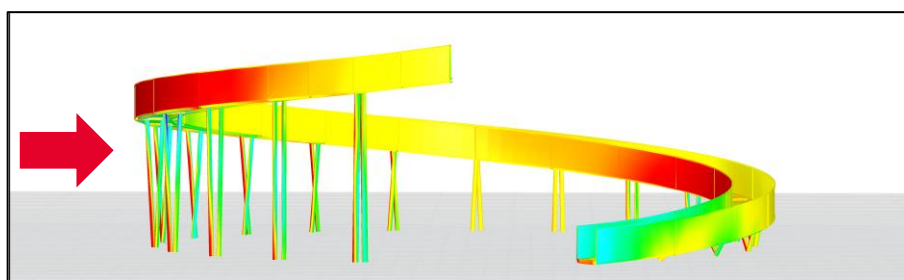
Obrázek 32 – RWIND – povrchové tlaky, směr 4, návětrná strana



Obrázek 33 – RWIND – povrchové tlaky, směr 4, závětrná strana



Obrázek 34 – RWIND – povrchové tlaky, směr 4, boční strana 1



Obrázek 35 – RWIND – povrchové tlaky, směr 4, boční strana 2

6.3.4. Zatížení větrem jako na svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem

Z výsledků výpočetního programu RWIND se ukázalo, že výpočet jako na klenbové střechy a jako na válec není zcela vhodný. Ze simulace se jeví, že blíže realitě je postup v souladu s kapitolou 7.2.2 Svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem normy ČSN EN 1991-1-4 [7]. Proto je proveden výpočet i tímto způsobem.

Na základě simulace byla konstrukce rozhledny rozdělena na oblasti dle normy a bylo přidáno zatížení i na vnitřní stěny konstrukce, které jsou vlivem geometrie volně vystavené účinkům větru. Rozdělení povrchových tlaků je zřejmé z ilustrace a snaží se co nejvíce napodobit výsledky z RWIND a zároveň respektovat normu.

Vstupní údaje:

$$h = 7,695 \text{ m}$$

$$d = 14,198 \text{ m}$$

$$b = 18,979 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \frac{h}{d} = \frac{7,695}{14,198} = 0,5420$$

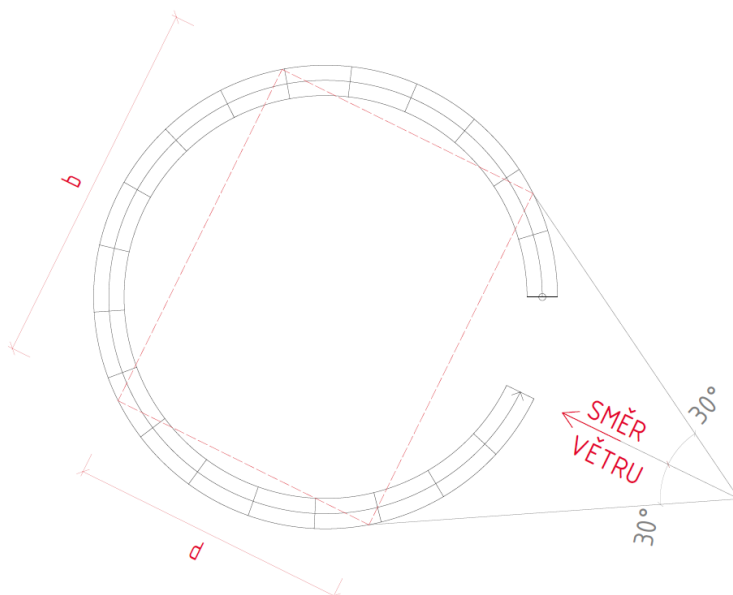
$$\Rightarrow e = \min\{b; 2h\} = \min\left\{18,979; \left\{2 \cdot 7,695\right\}\right\} =$$

$$\min\left\{18,979; \left\{15,390\right\}\right\} = 15,390 \text{ m}$$

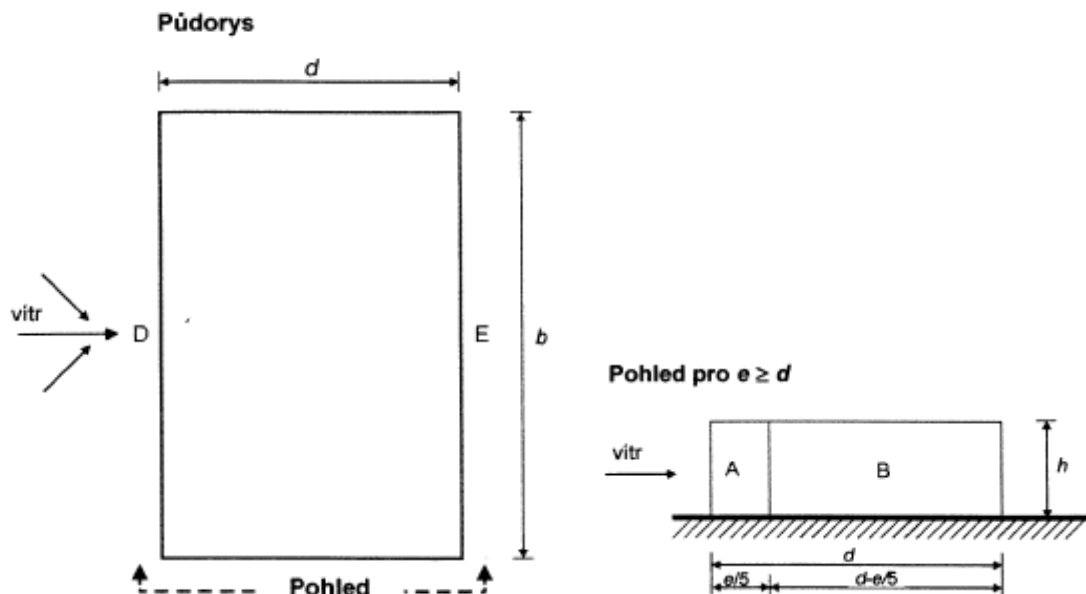
$$e = 15,390 \text{ m} \geq d = 14,198 \text{ m}$$

Oblast	c_{pe} [-]	w_e [kN/m ²] = $c_{pe} \cdot q_p(z_e)$
A	-1,2	-1,0259 (sání)
B	-1,0336	-0,8836 (sání)
D	0,7389	0,6317 (tlak)
E	-0,3779	-0,3231 (sání)

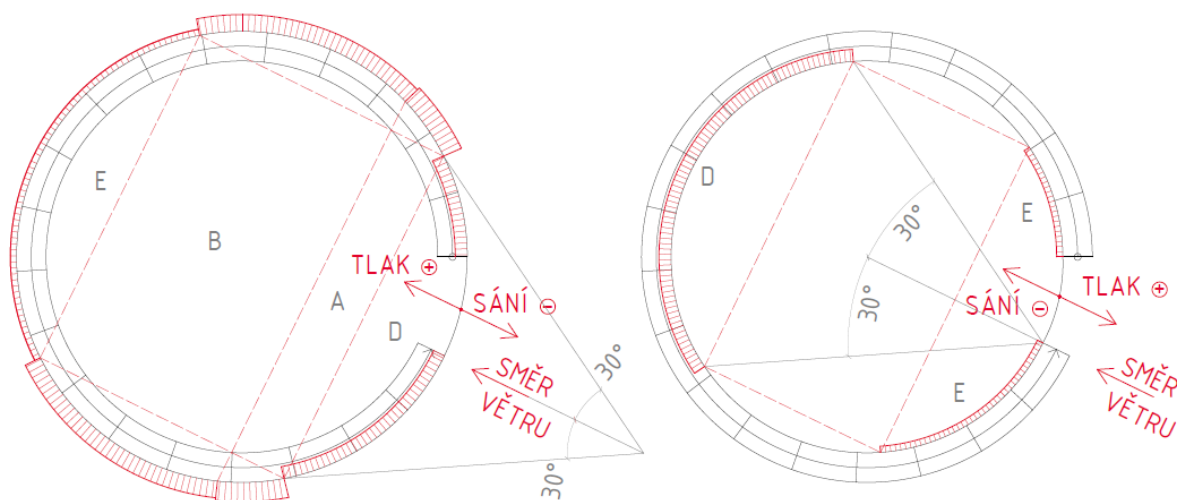
Tabulka 9 – Výsledné hodnoty vnějších tlaků – svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem



Obrázek 36 – Základní rozměry – svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem



Obrázek 37 – Rozdělení konstrukce se svislými stěnami a pravoúhlým půdorysem na oblasti [7]



Obrázek 38 – Vykreslení povrchových tlaků – svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem

6.3.5. Zatížení větrem na sloupy

Dále bylo stanoveno zatížení větrem na sloupy. Sloupy jsou kruhového průřezu, zatížení větrem tedy bylo spočítáno jako na válec.

Sloupy jsou profilu o průměru 168,3 mm a poslední dvojice sloupů je zesílena na profil 219,1 mm.

Hodnota maximálního dynamického tlaku je uvažována pro zjednodušení stejná jako v předcházejících případech, i přes to, že vrchol nejvyššího sloupu je v menší výšce, než je uvažovaná referenční výška z_e .

1. Sloupy Tr 168,3/10 mm

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} = \frac{0,1683\text{m} \cdot 36,985\text{m/s}}{15 \cdot 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}} = 4,15 \cdot 10^5$$

kde b – průměr válce (= průměr sloupu)
 $v(z_e)$ – maximální rychlost větru ve výšce z_e

$$v(z_e) = \sqrt{2 \cdot \frac{q_p}{\rho}} = \sqrt{2 \cdot \frac{854,9166[\text{Pa} = \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{m}}]}{1,25\text{kg}/\text{m}^3}} = 36,985\text{m/s}$$

q_p – maximální dynamický tlak

ρ – měrná hmotnost vzduchu, doporučená hodnota
1,25 kg/m³

ν – kinematická viskozita vzduchu

Efektivní štíhlost

$\ell = 5,754$ m (délka nejvyššího sloupu profilu Tr 168,3/10 mm)

$b = 0,1683$ m (průměr sloupu)

Tabulka 7.16 – Doporučené hodnoty λ pro válce, mnohoúhelníkové průřezy, obdélníkové průřezy, otevřené konstrukční průřezy a příhradové konstrukce

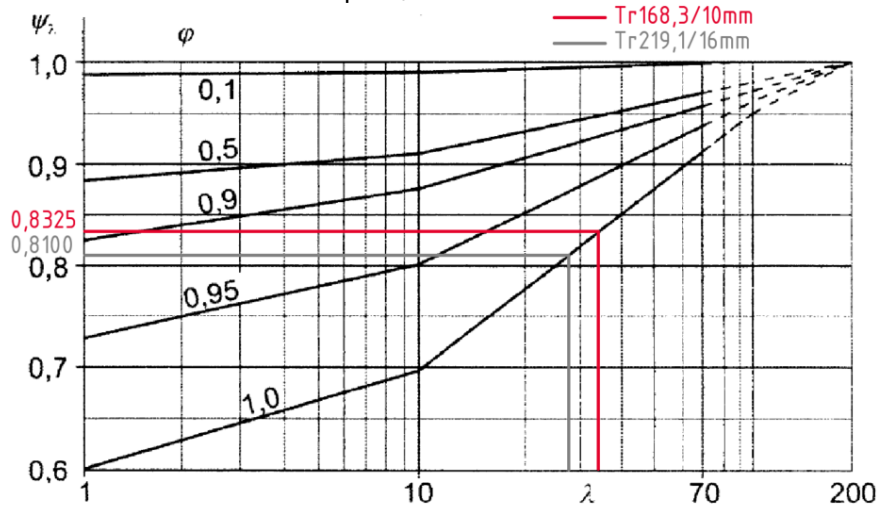
Č.	Poloha konstrukce, vítr kolmý k rovině strany	Efektivní štíhlost λ
1		Pro mnohoúhelníkové, obdélníkové a ostrohranné průřezy a příhradové konstrukce: pro $\ell \geq 50$ m, menší z hodnot $\lambda = 1,4\ell/b$ nebo $\lambda = 70$;
2		pro $\ell < 15$ m, menší z hodnot $\lambda = 2\ell/b$ nebo $\lambda = 70$. Pro válce s kruhovým průřezem: pro $\ell \geq 50$ m, menší z hodnot $\lambda = 0,7\ell/b$ nebo $\lambda = 70$; pro $\ell < 15$ m, menší z hodnot $\lambda = \ell/b$ nebo $\lambda = 70$.
3		Pro mezilehlé hodnoty ℓ se doporučuje použít lineární interpolaci.
4		Pro $\ell \geq 50$ m, menší z hodnot $\lambda = 0,7\ell/b$ nebo $\lambda = 70$. Pro $\ell < 15$ m, menší z hodnot $\lambda = \ell/b$ nebo $\lambda = 70$. Pro mezilehlé hodnoty ℓ se doporučuje použít lineární interpolaci.

Tabulka 10 – Doporučené hodnoty efektivní štíhlosti, stanovení pro sloupy [7]

$$\lambda = \min\left\{\frac{l}{b}; 70\right\} = \min\left\{\frac{5,754m}{0,1683m}; 70\right\} = \min\{34,1889; 70\} = 34,1889$$

Součinitel plnosti je uvažován jako $\varphi=1,0$, protože se jedná o plný průřez.

⇒ Součinitel koncového efektu $\psi_\lambda=0,8325$



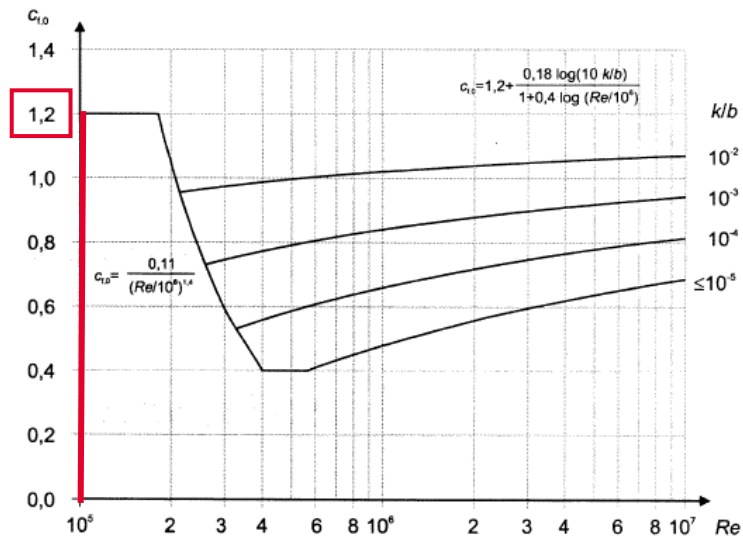
Obrázek 39 – Stanovení součinitele koncového efektu ψ_λ pro sloupy [7]

Součinitel síly c_f

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 1,2 \cdot 0,8325 = 0,9990$$

kde

$c_{f,0}$ – součinitel síly pro válce bez vlivu proudění kolem volných konců, který je závislý na hodnotě Reynoldsova čísla (případně i na ekvivalentní drsnosti k/b)



Obrázek 40 – Stanovení součinitele síly pro válce bez vlivu proudění kolem volných konců $c_{f,0}$ [7]

2. Sloupy Tr 219,1/16 mm – výpočet je analogický jako pro předchozí menší profil sloupů, nejsou zde tedy znovu vysvětlovány jednotlivé značky

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} = \frac{0,2191m \cdot 36,985m/s}{15 \cdot 10^{-6}m^2/s} = 5,40 \cdot 10^5$$

Efektivní štíhlost

$\ell = 6,074$ m (délka nejvyššího sloupu)

$b = 0,2191$ m (průměr sloupu)

$$\lambda = \min\left\{\frac{\ell}{b}; 70\right\} = \min\left\{\frac{6,074m}{0,2191m}; 70\right\} = \min\{27,7225; 70\} = 27,7225$$

⇒ Součinitel koncového efektu $\psi_\lambda = 0,8100$ (viz. Obrázek 39 – Stanovení součinitele koncového efektu ψ_λ , pro sloupy)

Součinitel síly c_f

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 1,2 \cdot 0,8100 = 0,9720$$

Poznámka: hodnota $c_{f,0}$ je stejná jako pro sloupy menšího profilu, jelikož je jejich Reynoldsovo číslo stejného řádu, viz. Obrázek 40 – Stanovení součinitele síly pro válce bez vlivu proudění kolem volných konců

7. Zatěžovací stavy

V této kapitole jsou popsány zatěžovací stavy, kterými jsou zatíženy jednotlivé modely. Zatížení je zobrazeno na modelu 2, avšak naprosto stejné zatížení je umístěno i na ostatní modely.

7.1. ZS1 – Vlastní tíha ve směru Z

Tento zatěžovací stav je generovaný softwarem, jak je již zmíněno výše. Jedná se o vlastní tíhu prvků proti směru osy Z (osa Z je v modelu orientovaná směrem vzhůru).

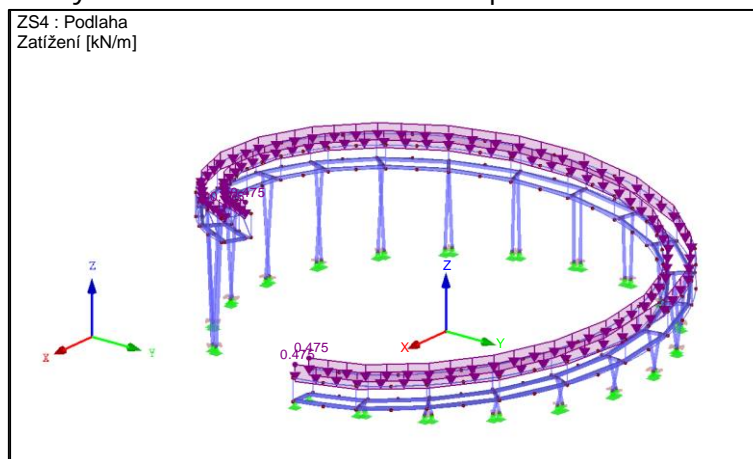
7.2. ZS2 – Vlastní tíha ve směru X, ZS3 – Vlastní tíha ve směru Y

Tyto dva zatěžovací stavy jsou pouze kontrolní, aby bylo ověřeno, že jsou všechny prvky modelu správně propojeny. Stejně jako ZS1 jsou tyto zatěžovací stavy generovány softwarem. Dále v kombinacích se samozřejmě s těmito stavy nepočítá.

7.3. ZS4 – Podlaha

Tento zatěžovací stav zahrnuje zatížení od dřevěných fošen podlahy a tíhu úhelníků kotvicích tyto fošny.

Zatížení je v hodnotě 0,475 kN/m umístěno na podélné nosné prvky konstrukce, a to proti směru globální osy Z na skutečnou délku těchto prvků.



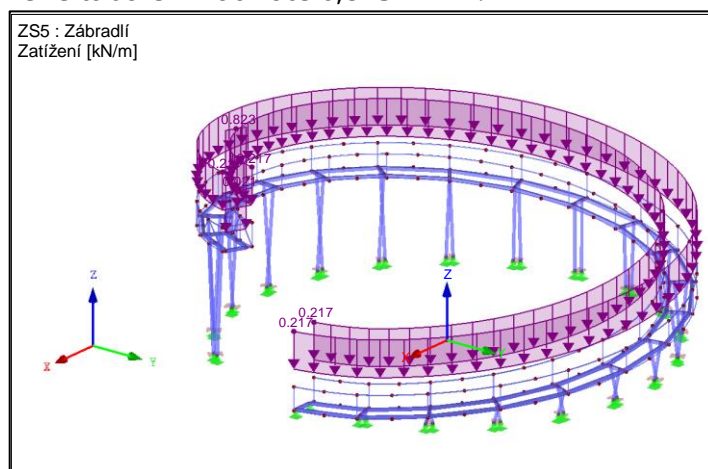
Obrázek 41 – ZS4 – Podlaha

7.4.ZS5 – Zábradlí

Zde je na podélné prvky zábradlí umístěno spojitě rovnoměrné zatížení v hodnotě 0,217 kN/m proti směru globální osy Z na skutečnou délku prvků. Toto zatížení představuje tíhu prken, tvořící opláštění, a tíhu dřevěného madla.

Na poslední příčném prutu zábradlí je pouze zatížení od tíhy dřevěného madla – 0,021 kN/m.

Na konci konzoly na příčném prutu hlavní nosné konstrukce je umístěno zatížení vyvozené tíhou skleněné tabule v hodnotě 0,823 kN/m.



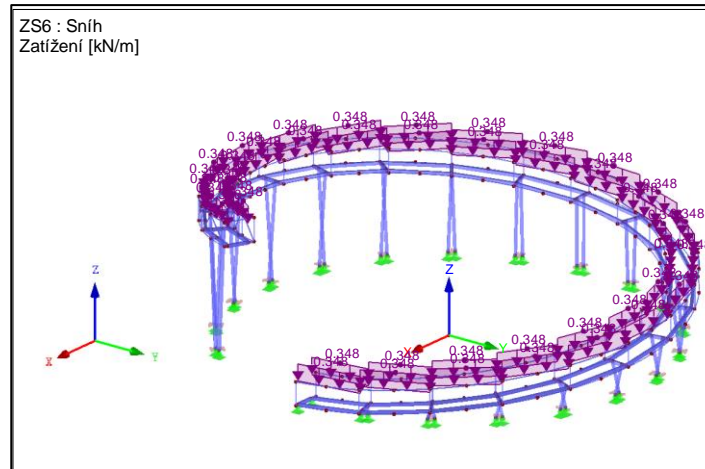
Obrázek 42 – ZS5 – Zábradlí

7.5.ZS6 – Sníh

Je zde uvažováno pouze zatížení sněhem rovnoměrně na celé ploše rampy rozhledny.

Plošné zatížení sněhem bylo přepočteno na liniové zatížení, které je umístěno na podélné prvky hlavní nosné konstrukce proti směru globální osy Z na průmět těchto prutů.

$$s = \frac{0,448 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,552 \text{ m}}{2} = 0,3476 \text{ kN/m} , \text{ kde } 1,552 \text{ m je zatěžovací šířka (délka fošen podlahy)}$$



Obrázek 43 – ZS6 – Sníh

7.6. ZS7 – ZS15 – Užité zatížení

Tyto zatěžovací stavy simulují různé varianty zatížení konstrukce užitným zatížením, tedy návštěvníky.

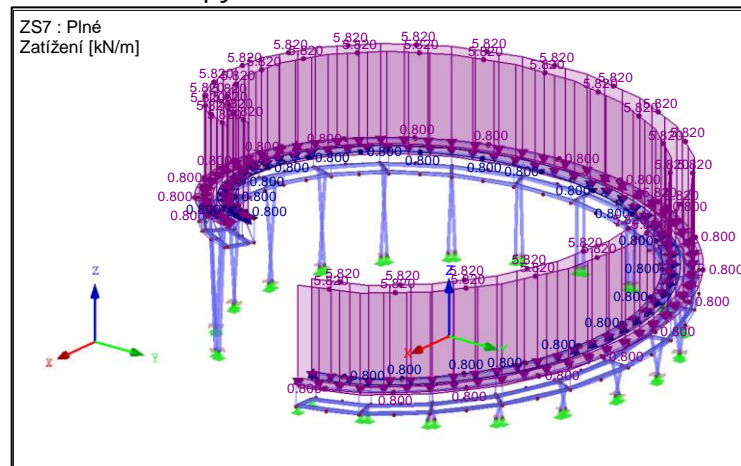
Hodnota plošného zatížení byla opět přepočítána na spojitě liniové zatížení, kterým jsou v různém uspořádání zatíženy podélné pruty. Zatížení působí proti směru globální osy Z na skutečnou délku prutů.

$$q_k = \frac{7,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,552 \text{ m}}{2} = 5,82 \text{ kN/m} , \text{ kde } 1,552 \text{ m je zatěžovací šířka (délka fošen podlahy)}$$

V těchto zatěžovacích stavech rovněž působí vodorovné zatížení na zábradlí v hodnotě 0,8 kN/m. Toto zatížení působí v lokálních vodorovných osách horních podélných prutů zábradlí.

7.6.1. ZS7 – Plné zatížení

V tomto stavu uvažujeme plné zatížení celé konstrukce rozhledny – tj. vodorovné i svislé zatížení po celé délce rampy.

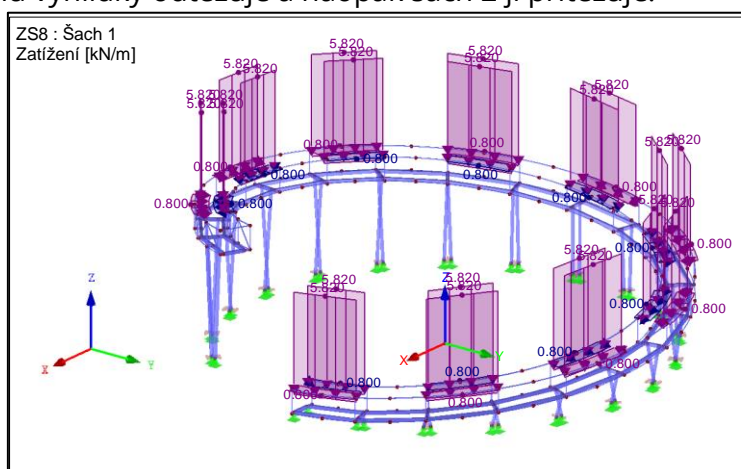


Obrázek 44 – ZS7 – Plné užité zatížení

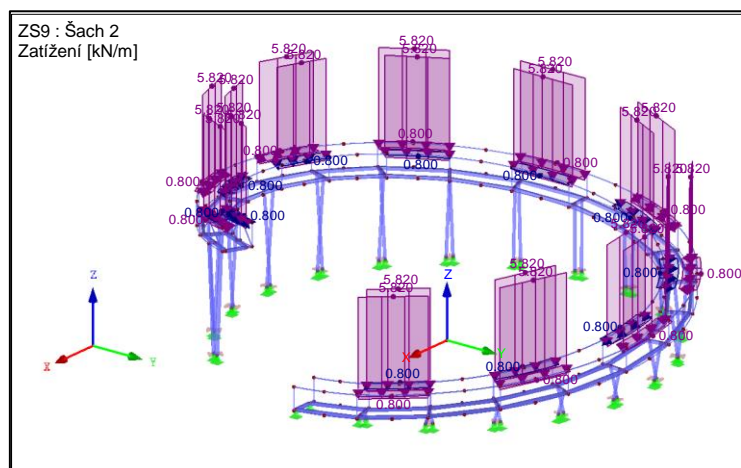
7.6.2. ZS8 – Šach 1, ZS9 – Šach 2

V těchto stavech je konstrukce zatížena ob pole svislým i vodorovným užitným zatížením.

Šach 1 konzolu vyhlídky odtěžuje a naopak šach 2 ji přitěžuje.



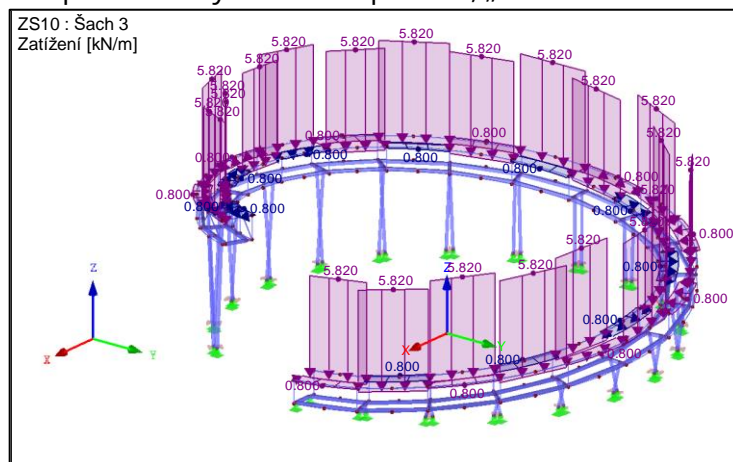
Obrázek 45 – ZS8 – Šach 1



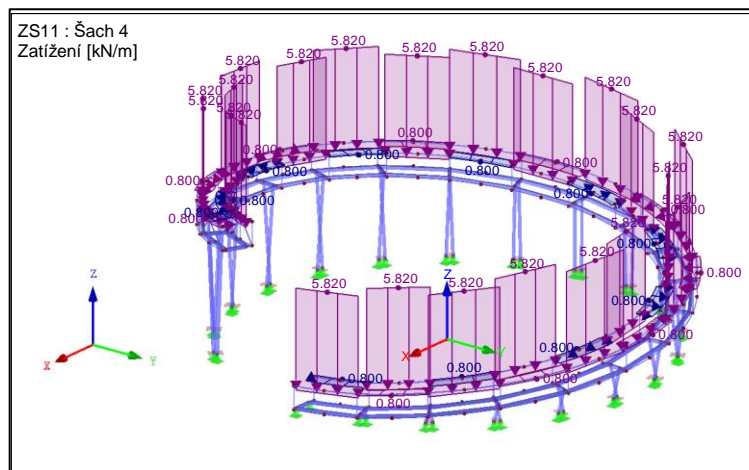
Obrázek 46 – ZS9 – Šach 2

7.6.3. ZS10 – Šach 3, ZS11 – Šach 4

Tyto zatěžovací stavy jsou opět k sobě doplňkové. Zde je vždy v jednom poli svislým i vodorovným zatížením zatížena vnější strana a v dalším poli naopak vnitřní strana konstrukce. Jednotlivá pole se tedy vůči sobě pootáčí, „kroutí“.



Obrázek 47 – ZS10 – Šach 3

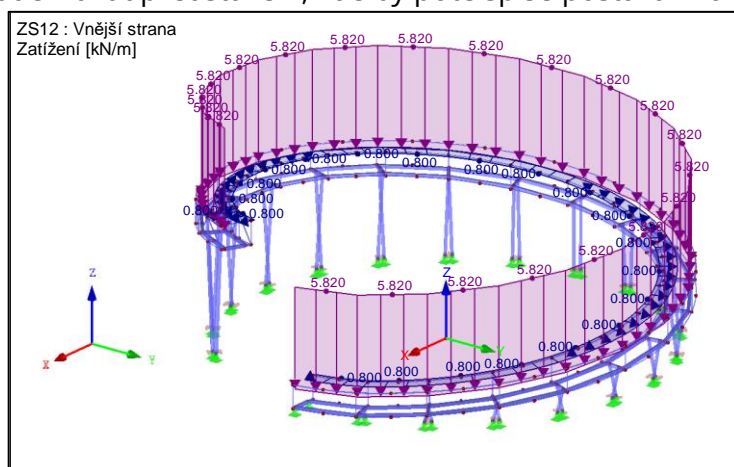


Obrázek 48 – ZS11 – Šach 4

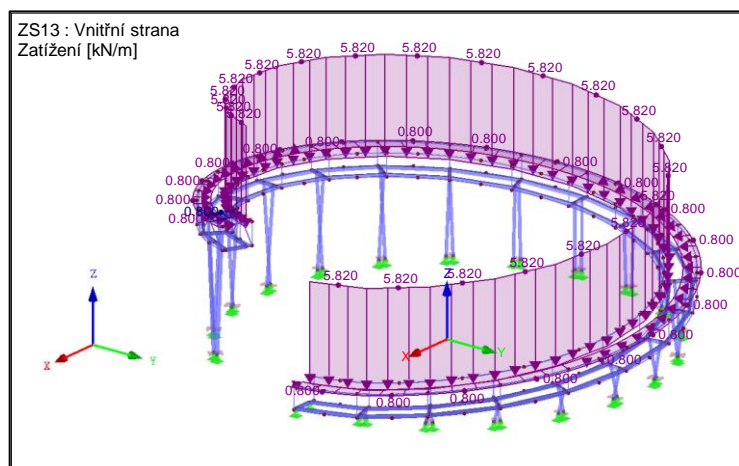
7.6.4. ZS12 – Vnější strana, ZS13 – Vnitřní strana

Zde je uvažováno, že všichni návštěvníci rozhledny se nahnou buď na vnitřní nebo na vnější stranu rozhledny. Je tedy aplikováno zatížení na vnitřní, respektive vnější stranu rampy.

Zatížení vnější strany mi přijde pravděpodobnější, protože návštěvníci chtějí z podstaty účelu konstrukce rozhledny vidět do okolní krajiny, avšak zahrnula jsem i zatížení obrácené v případě např. kulturní akce, kde by se v prostoru ohraničeném konstrukcí mohlo odehrávat představení, lidé by poté spíše postávali na vnitřní straně.



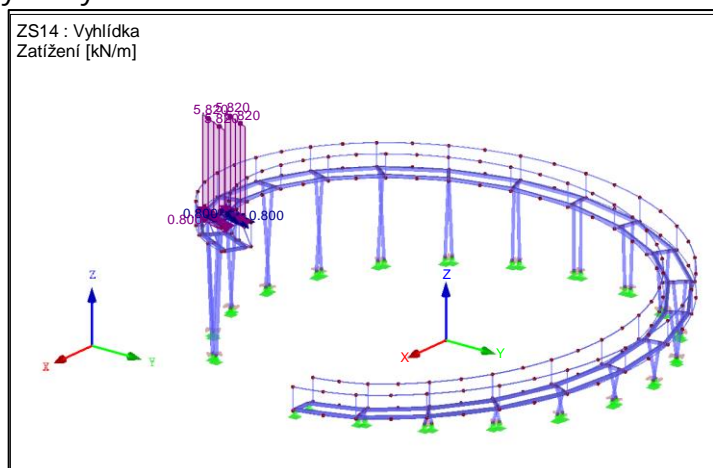
Obrázek 49 – ZS12 – Vnější strana



Obrázek 50 – ZS13 – Vnitřní strana

7.6.5. ZS14 – Vyhlídka

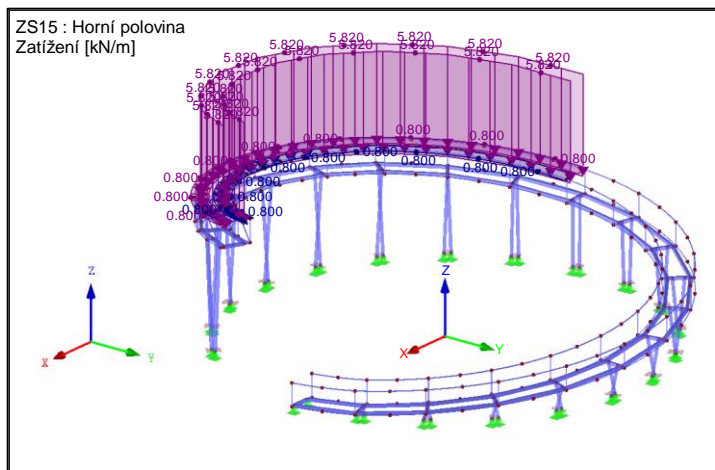
Tento zatěžovací stav uvažuje s tím, že veškerí návštěvníci se nahnou na poslední dvě pole rozhledny, tedy na vyhlídku.



Obrázek 51 – ZS14 – Vyhlídka

7.6.6. ZS15 – Horní polovina

Tato varianta byla uvážena až po samotné návštěvě rozhledny. Bylo totiž patrné, že většinu času je zatížení uspořádáno takto, protože většina návštěvníků se chce vyfotografovat na vrcholku rozhledny. Ostatní návštěvníci čekají zhruba v horní polovině rozhledny, než přijdou na řadu.



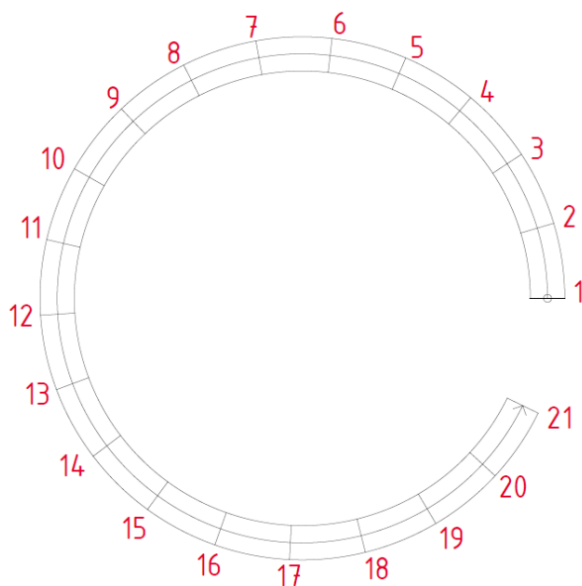
Obrázek 52 – ZS15 – Horní polovina

7.7. ZS16 – ZS27 – Zatížení větrem

Tyto zatěžující stavy zobrazují účinky větru.

V rámci porovnání jsem ve zvolených čtyřech směrech (viz. Obrázek 19 – Zvolené směry větru) zadala zatížení účinky větru spočítané všemi třemi způsoby, které jsou popsány v 6.3.

Zatížení je umístěno na konstrukci zábradlí v místech, kde jsou příčné pruty hlavní nosné konstrukce. Tyto body jsou očíslovány.



Obrázek 53 – Číslování bodů pro zatížení větrem

Následující zatížení působí v obecném směru vůči globálnímu souřadnému systému modelu, proto byly před vložením na konstrukci rozděleny do globálních směrů X a Y.

Zatížení větrem na sloupy

Ve všech následujících zatěžovacích stavech jsou zatíženy i sloupy. Dle následujícího vzorce [7] bylo spočítáno liniové zatížení sloupů v jednotlivých směrech větru.

$$f_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot b$$

kde $c_s c_d$ – součinitel konstrukce
 c_f – součinitel síly
 $q_p(z_e)$ – maximální dynamický tlak
 b – průměr válce

1. Tr 168,3/10 mm

$$f_w = 1,0 \cdot 0,9990 \cdot 0,8549 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,1683 \text{ m} = 0,1437 \text{ kN/m}$$

2. Tr 219,1/16 mm

$$f_w = 1,0 \cdot 0,9720 \cdot 0,8549 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,2191 \text{ m} = 0,1821 \text{ kN/m}$$

7.7.1. ZS16 – ZS19 – Vítr – klenbová střecha

Hodnoty v následujících tabulkách představují zatížení jednotlivých bodů. Hodnoty byly získány podle následujícího vztahu:

$$F_w = w_{e,i} \cdot A$$

kde $w_{e,i}$ – tlak větru na vnější povrchy konstrukce,
viz. Tabulka 4 – Výsledné hodnoty vnějších tlaků – klenbová střecha
A – zatěžovací plocha, na kterou působí vítr; v tomto případě to je od uvažovaného bodu vždy polovina pole na obě strany, tedy plocha jednoho pole

$$A = l_{pole} \cdot h_{pole} = 3,454 \text{ m} \cdot 1,210 \text{ m} = 4,1793 \text{ m}^2$$

Zatížení je v modelu rozděleno na horní a dolní styčník zábradlí, proto byla před zadáním do RFEMu každá hodnota vydělena dvěma.

VÍTR - KLENBOVÁ STŘECHA										
bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	[kN]									
směr 1	1,429	0,270	-4,288	-4,288	-4,288	-4,288	-4,288	-1,506	-1,429	-1,429
směr 2	-2,144	-1,699	2,858	2,858	2,858	2,858	2,858	-4,095	-4,288	-4,288
směr 3	-0,715	-2,464	-4,288	-4,288	-4,288	-4,288	-4,288	2,666	2,858	2,858
směr 4	-2,144	-3,252	-1,429	-1,429	-1,429	-1,429	-1,429	-4,211	-4,288	-4,288

Tabulka 11 – Zatížení větrem – klenbová střecha, část 1

VÍTR - KLENBOVÁ STŘECHA											
bod	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	[kN]										
směr 1	-1,429	-1,429	-3,098	-4,288	-4,288	-4,288	-4,288	-2,897	2,858	2,858	1,429
směr 2	-4,288	-4,288	-2,618	-1,429	-1,429	-1,429	-1,429	-1,985	-4,288	-4,288	-2,144
směr 3	2,858	2,858	-1,315	-4,288	-4,288	-4,288	-4,288	-3,731	-1,429	-1,429	-0,715
směr 4	-4,288	-4,288	-0,115	2,858	2,858	2,858	2,858	1,468	-4,288	-4,288	-2,144

Tabulka 12 – Zatížení větrem – klenbová střecha, část 2

7.7.2. ZS20 – ZS23 – Vítr – válec

V tomto případě je problémem značně proměnná intenzita zatížení na povrch konstrukce. Intenzita je tedy vynesena v jednotlivých bodech do prostředí systému AutoCAD, následně spojena spline křivkou a poté jsou odměřeny plochy. Plochy představují součin intenzity zatížení a zatěžovací délky (polovina pole na každou stranu od vyšetřovaného bodu). Tyto hodnoty jsou následně vynásobeny výškou pole, součinitelem síly a součinitelem konstrukce. Zapišeme-li tento postup rovnicí, vypadá následovně:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_{pe} \cdot q_p(z_e) \cdot A$$

Všechny veličiny jsou definovány výše. Hodnoty c_{pe} viz. Tabulka 8 – Výsledné hodnoty vnějších tlaků – kruhový válec.

Stejně jako v předcházející podkapitole jsou hodnoty před vložením do RFEMu vyděleny dvěma.

VÍTR - VÁLEC										
bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	[kN]									
směr 1	0,107	-1,861	-4,338	-8,338	-7,510	-1,901	-1,772	-1,772	-1,776	-1,762
směr 2	-2,210	-2,618	0,157	2,416	3,201	1,772	-0,779	-3,463	-5,654	-10,193
směr 3	-0,886	-1,772	-1,774	-2,897	-10,066	-5,872	-3,589	-0,931	1,644	3,185
směr 4	-0,885	-1,772	-1,772	-1,773	-1,766	-1,772	-1,772	-1,772	-1,840	-7,060

Tabulka 13 – Zatížení větrem – válec, část 1

VÍTR - VÁLEC											
bod	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	[kN]										
směr 1	-1,845	-1,700	-1,772	-1,775	-4,072	-10,328	-5,037	-3,053	-0,306	2,114	1,618
směr 2	-3,214	-1,702	-1,772	-1,772	-1,771	-1,768	-1,772	-1,772	-1,771	-2,286	-3,428
směr 3	2,556	0,249	-2,473	-4,757	-9,503	-5,700	-1,749	-1,772	-1,772	-1,772	-0,883
směr 4	-8,914	-4,192	-2,011	0,725	2,766	3,045	1,263	-1,396	-3,969	-7,170	-5,439

Tabulka 14 – Zatížení větrem – válec, část 2

7.7.3. ZS24 – ZS27 – Vítr – svislé stěny, pravoúhlý půdorys

Zde jsou zatížení na jednotlivé body spočítány analogicky jako v 7.7.1.

Stejně jako v předcházejících podkapitolách jsou hodnoty před vložením do RFEMu vyděleny dvěma.

VÍTR - SVISLÉ STĚNY - VNĚJŠÍ STRANA										
bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	[kN]									
směr 1	1,320	2,640	-3,395	-3,779	-3,693	-3,693	-2,606	-1,350	-1,350	-1,350
směr 2	-2,144	1,623	2,640	2,640	2,640	2,640	2,640	-0,699	-4,010	-3,693
směr 3	-0,675	-1,350	-3,391	-3,693	-3,693	-3,978	-1,072	2,640	2,640	2,640
směr 4	-1,846	-1,694	-1,350	-1,350	-1,350	-1,350	-1,350	-2,480	-3,693	-3,693

Tabulka 15 – Zatížení větrem – svislé stěny, vnější strana, část 1

VÍTR - SVISLÉ STĚNY - VNĚJŠÍ STRANA											
bod	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	[kN]										
směr 1	-1,350	-1,350	-1,568	-3,693	-3,693	-3,693	-4,110	0,462	2,640	2,640	1,320
směr 2	-3,693	-3,518	-1,350	-1,350	-1,350	-1,350	-1,350	-1,350	-2,998	-3,693	-1,846
směr 3	2,640	2,640	1,996	-4,242	-3,693	-3,693	-3,693	-2,087	-1,350	-1,350	-0,675
směr 4	-3,748	-3,770	2,640	2,640	2,640	2,640	2,640	2,640	-2,234	-3,879	-1,846

Tabulka 16 – Zatížení větrem – svislé stěny, vnější strana, část 2

VÍTR - SVISLÉ STĚNY - VNITŘNÍ STRANA										
bod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	[kN]									
směr 1	-0,587	-1,174	-0,629	-	-	-	1,999	2,295	2,295	2,295
směr 2	-0,306	-1,174	-1,174	-1,174	-1,174	-1,174	-1,174	-1,086	-	-
směr 3	1,147	2,295	1,230	-	-	-	-1,022	-1,174	-1,174	-1,174
směr 4	0,598	2,295	2,295	2,295	2,295	2,295	2,295	2,123	-	-

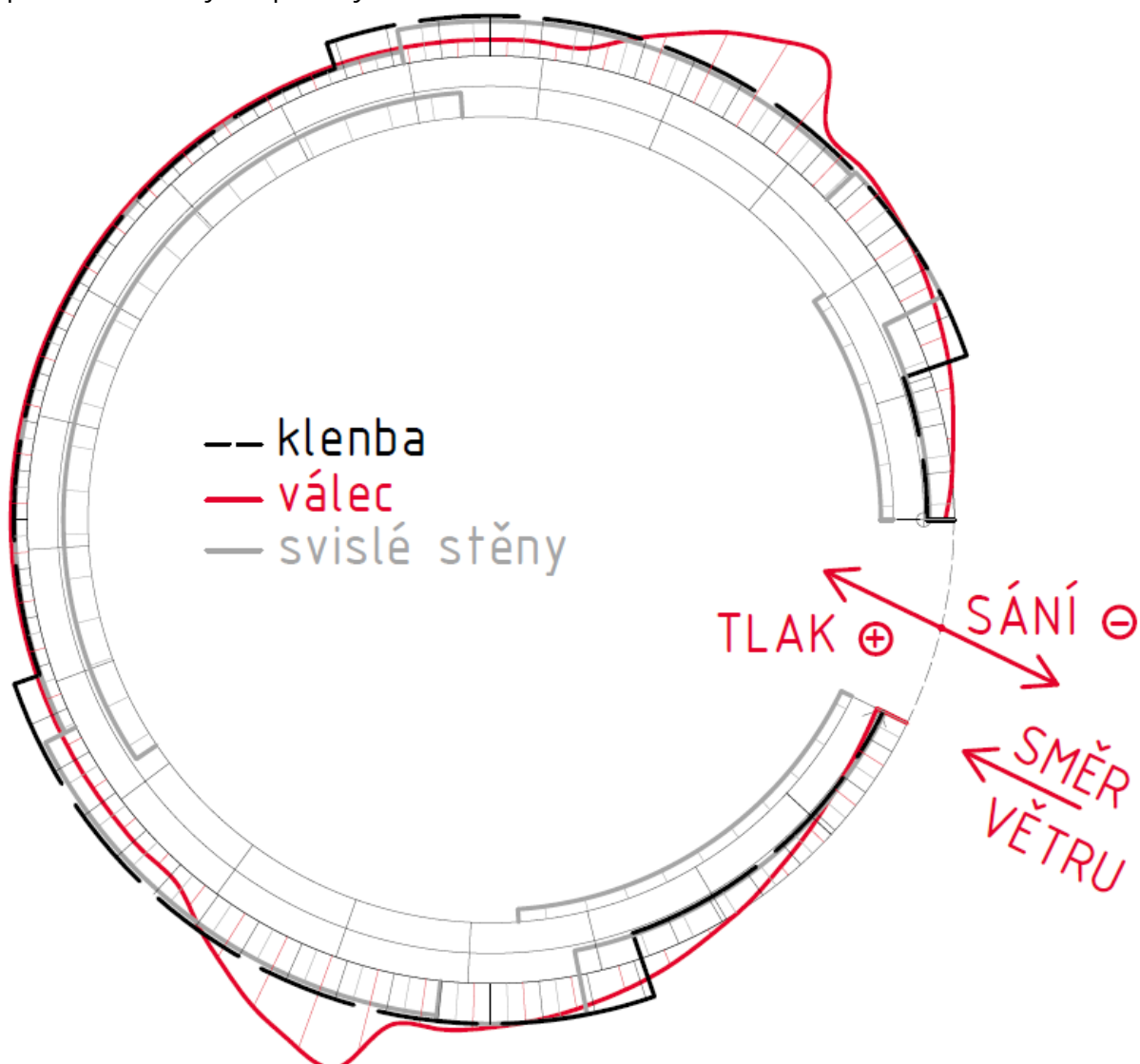
Tabulka 17 – Zatížení větrem – svislé stěny, vnitřní strana, část 1

VÍTR - SVISLÉ STĚNY - VNITŘNÍ STRANA											
bod	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	[kN]										
směr 1	2,295	2,295	2,295	0,722	-	-	-0,109	-1,174	-1,174	-1,174	-0,587
směr 2	-	1,106	2,295	2,295	2,295	2,295	2,295	2,295	1,614	-	-
směr 3	-1,174	-1,174	-1,174	-0,369	-	-	0,213	2,295	2,295	2,295	1,147
směr 4	-	-0,566	-1,174	-1,174	-1,174	-1,174	-1,174	-1,174	-0,826	-	-

Tabulka 18 – Zatížení větrem – svislé stěny, vnitřní strana, část 2

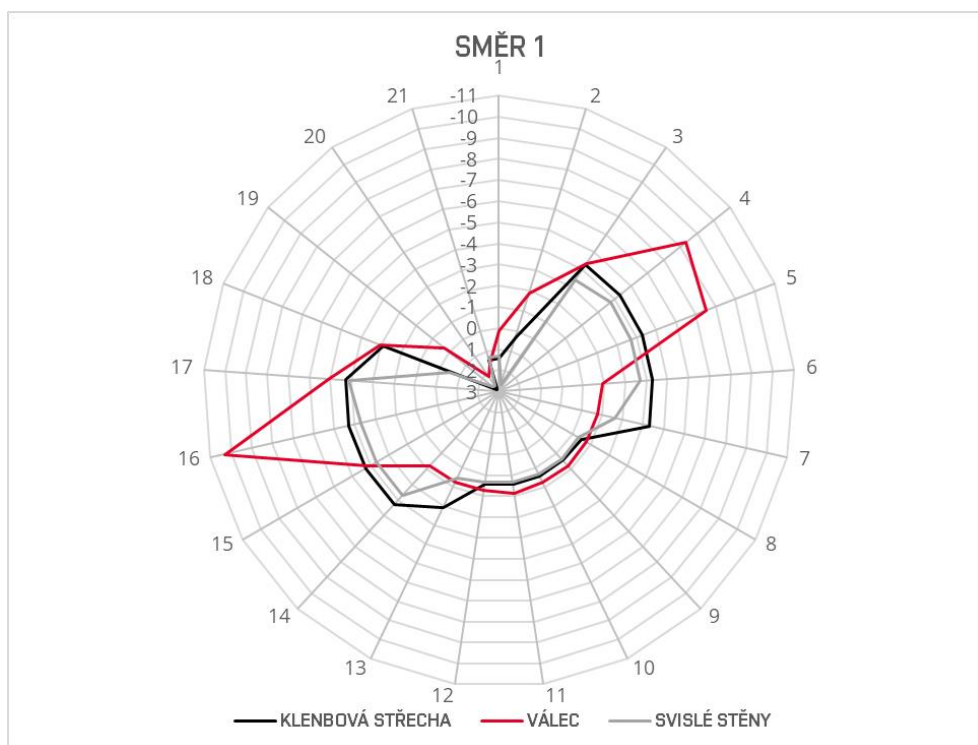
7.7.4. Porovnání účinků větru v jednotlivých směrech

V této podkapitole jsou graficky srovnány účinky větru v jednotlivých směrech spočítané odlišnými způsoby.

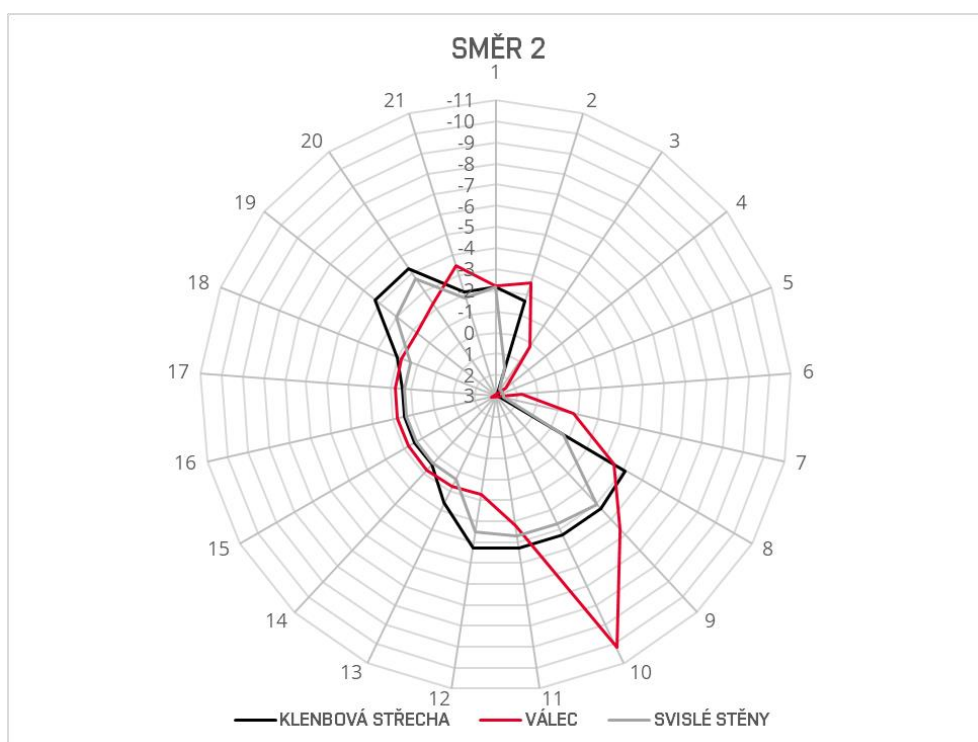


Obrázek 54 – Vnější tlaky od jednotlivých způsobů normového výpočtu, směr 1

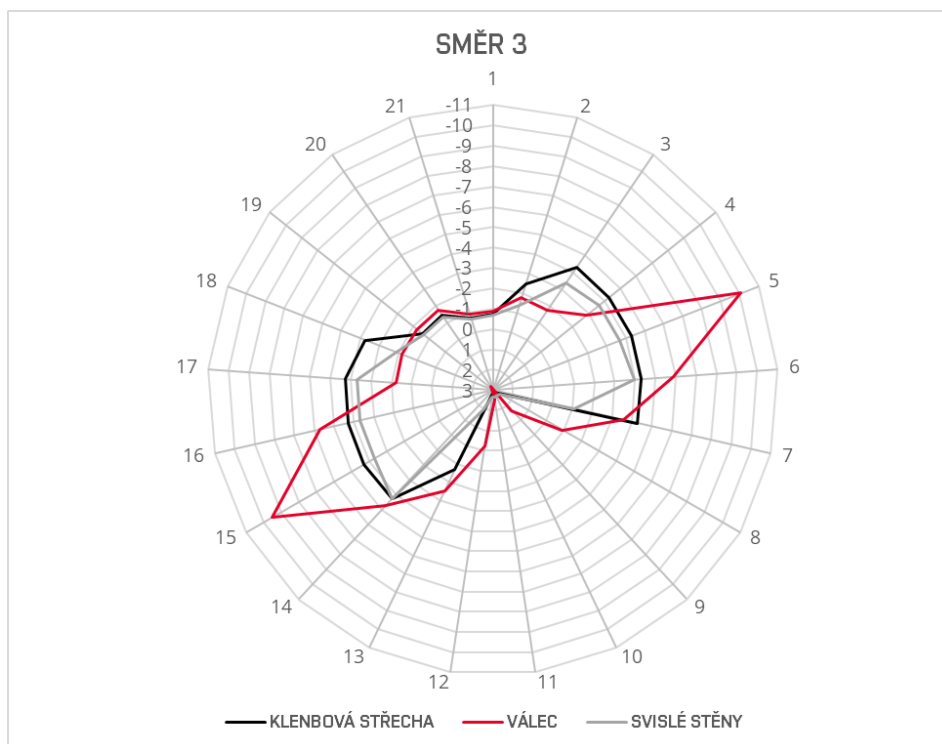
Hodnoty v grafech jsou uvedeny v kN. Kladné hodnoty představují tlak, záporné sání. U způsobu jako na svislé stěny jsou uvažovány pouze tlaky na vnější část konstrukce.



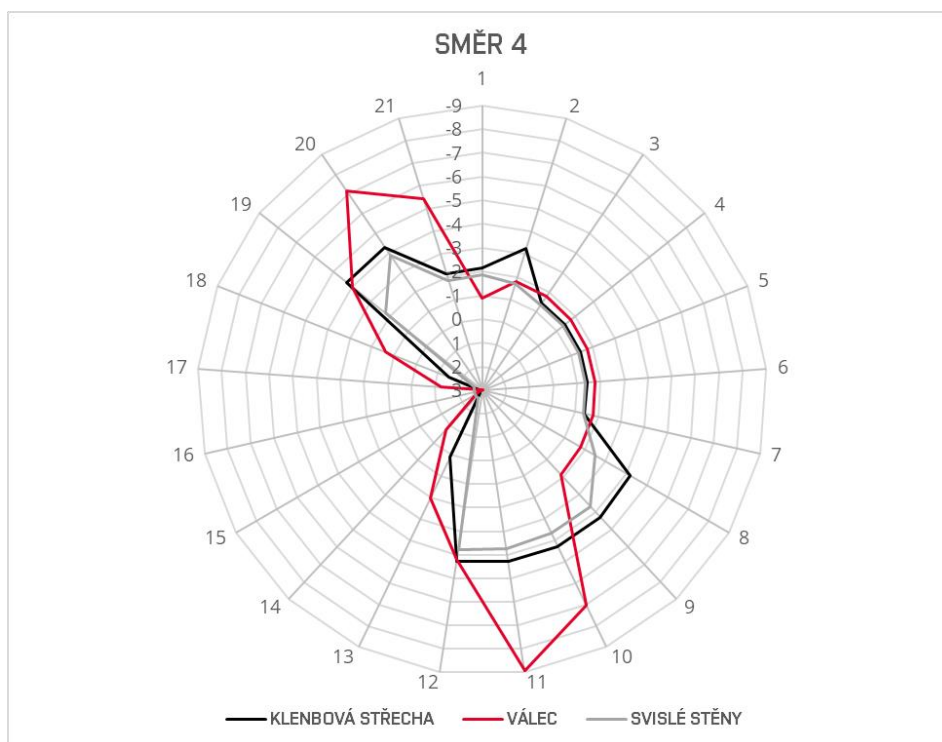
Obrázek 55 – Porovnání účinků větru, směr 1



Obrázek 56 – Porovnání účinků větru, směr 2



Obrázek 57 - Porovnání účinků větru, směr 3



Obrázek 58 - Porovnání účinků větru, směr 4

Z grafů vyplývá, že nejpodobnější hodnoty jsou na závětrné straně, kde na konstrukci působí sání. Naopak největší rozdíly můžeme vidět na bocích konstrukce, kde rovněž působí sání. Nejvíce se v těchto místech odchyľují hodnoty spočítané způsobem předpokládající válcový tvar rozhledny. Je to zapříčiněno způsobem obtékání větrného proudu kolem válcových těles, kde v místě oddělení proudu nastává velké sání. Místo, kde se proud oddělí závisí na hodnotě Reynoldsova čísla.

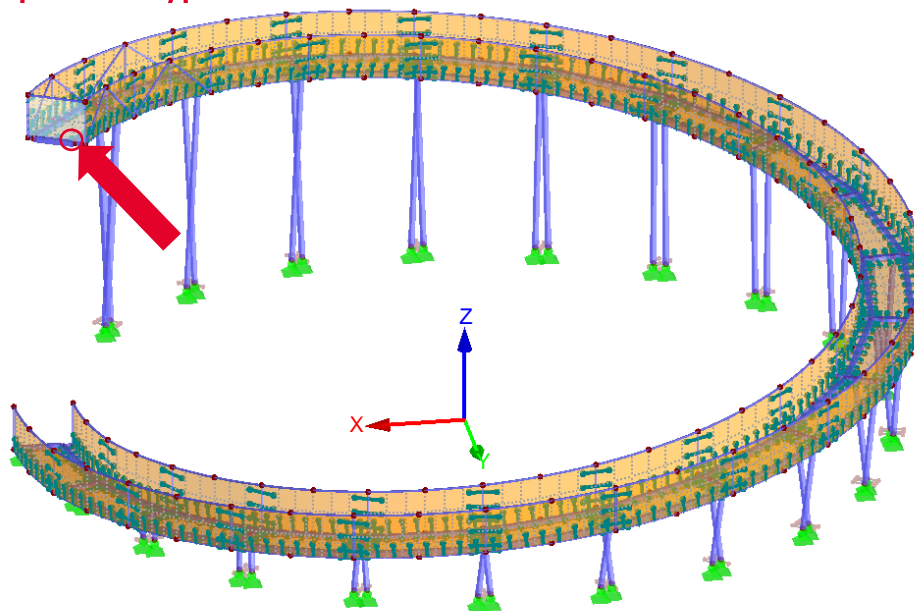
Je zřejmé, že největší problémy nastávají mezi bodem 1 a 21, protože zde je konstrukce „vynechána“. Proto jsou zde křivky zdeformované.

7.8. ZS28 – ZS31 – RWIND

Na modelu číslo 3, kde jsou vytvořeny plochy, byla využita možnost nastavbové funkce RFEMu – generování zatížení větrem pomocí softwaru RWIND. Tyto zatěžovací stavy považují pouze za informativní, protože se jejich správnost nedá jednoduše ověřit, a slouží k porovnání s normově spočítanými účinky větru.

Porovnání je shrnuto v následujících grafech. Zde nebylo možné jednoduše porovnat silové účinky, protože RWIND vygeneruje velké množství sil na mnoho uzlů, zatímco normovým výpočtem jsou zatíženy jen vybrané uzly. Proto jsem porovnávala pootočení a posunutí ve vybraném uzlu.

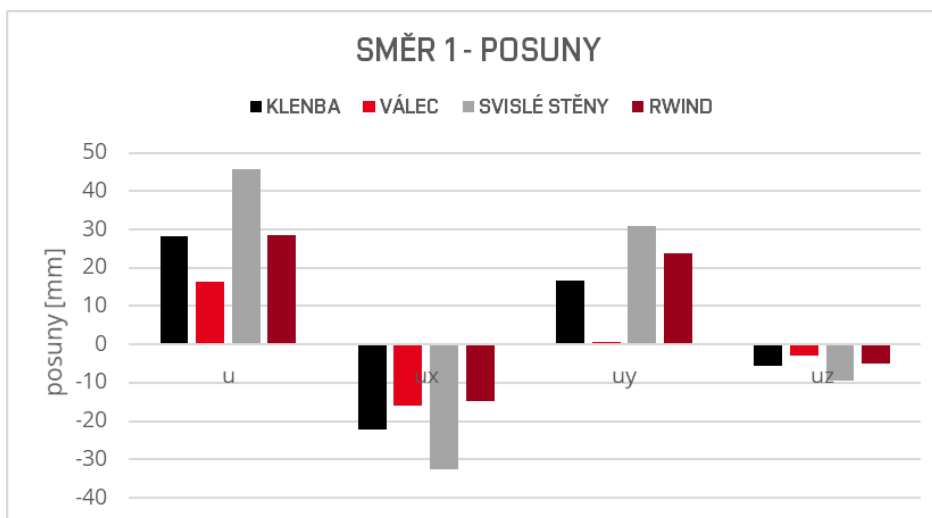
7.8.1. Porovnání deformací od zatížení vygenerované RWINDem a od normově spočtených zatížení, porovnání jednotlivých normových způsobů výpočtu



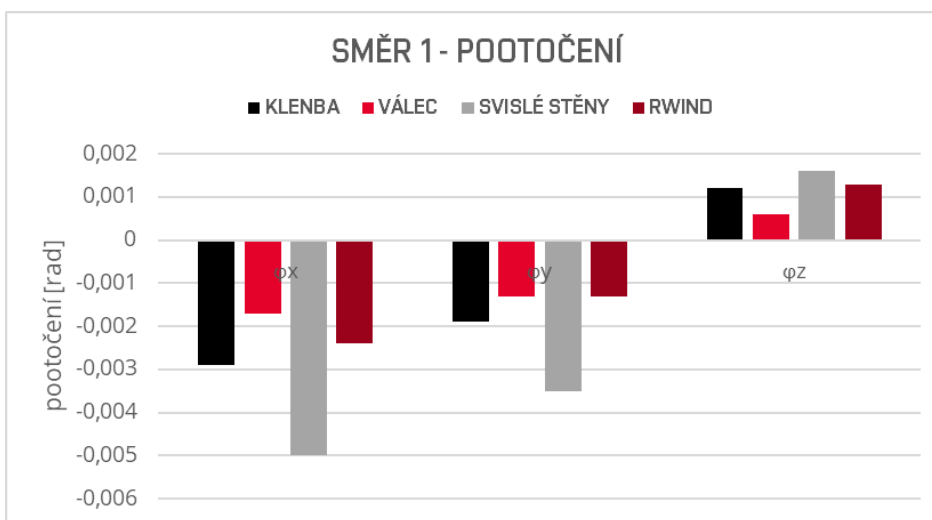
Obrázek 59 – Uzel pro porovnání účinků větru normovým výpočtem a RWINDem

Tento uzel byl vybrán, protože se nachází na hlavní nosné konstrukci, která nás zajímá více než konstrukce zábradlí, a jsou zde deformace největší.

Směr 1

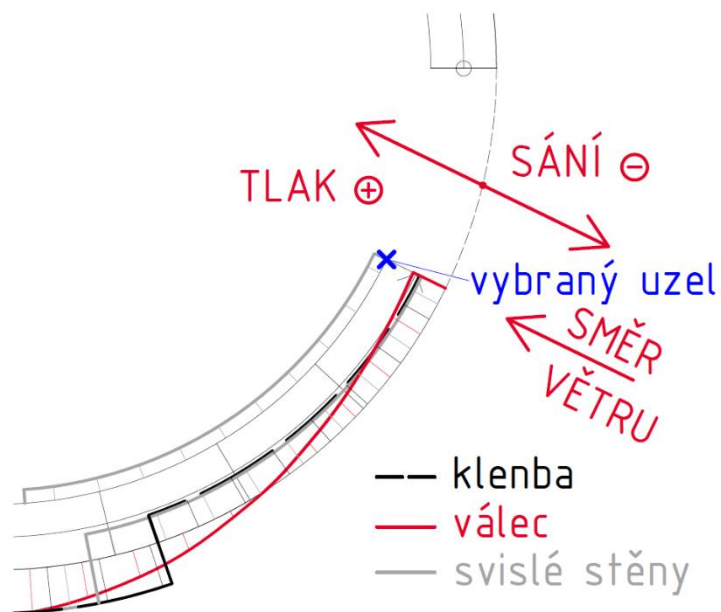


Obrázek 60 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 1 – posuny



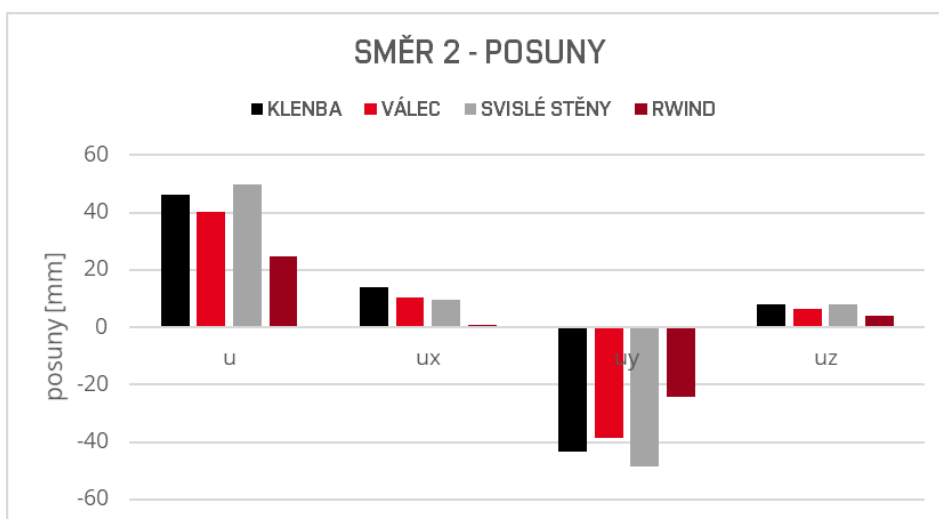
Obrázek 61 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 1 – pootočení

Ve směru větru 1 jsou deformace z RWINDu nejpodobnější deformacím ze způsobu výpočtu klenbové střechy a válce. Prozkoumáme-li průběh vnějších tlaků na konstrukci, tak je zřejmé, proč deformace od výpočtu pro válec budou nejmenší, od klenby větší a od svislých stěn největší. Jsou zde rozdílné plochy, na které tlak působí a liší se nepatrně i intenzita. U svislých stěn je přídavné zatížení i na vnitřní straně konstrukce, proto hodnoty deformací od tohoto způsobu vychází největší. Pokud bychom porovnali pouze tlaky na vnější povrch, vycházela by větší deformace od klenbové střechy.

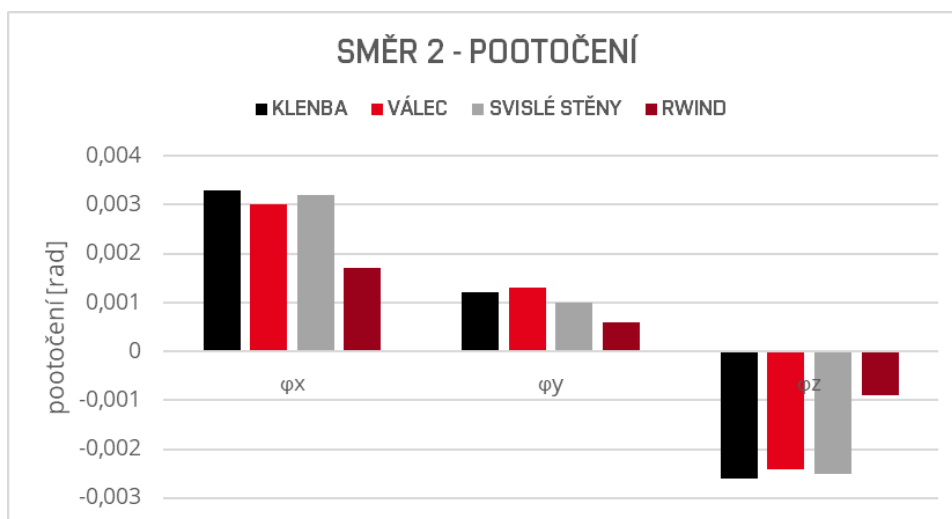


Obrázek 62 - Porovnání vnějších tlaků, detail vyhlídky, směr 1

Směr 2

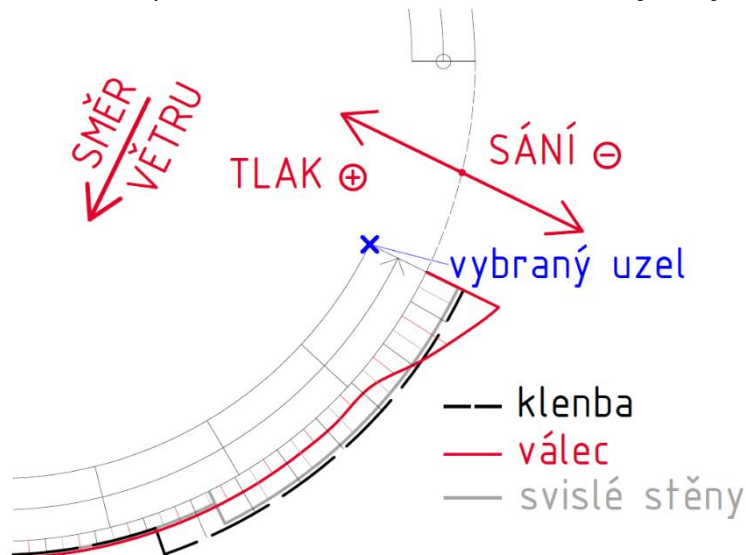


Obrázek 63 - Porovnání normového výpočtu s RWINDem - směr 2 - posuny



Obrázek 64 - Porovnání normového výpočtu s RWINDem - směr 2 - pootočení

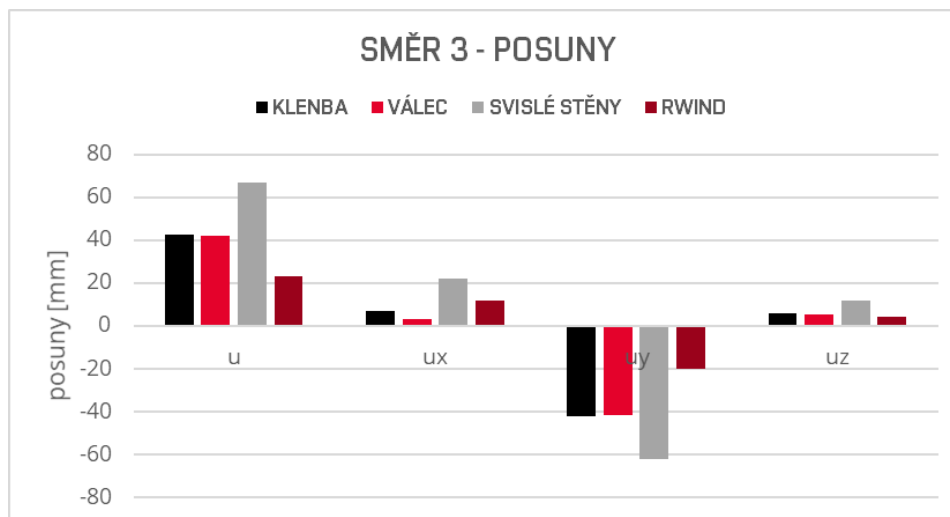
Ve směru 2 jsou deformace od RWINDu výrazně menší než od normově spočítaných hodnot. Za to jednotlivé způsoby normového výpočtu jsou si navzájem velmi podobné. Je to způsobeno tím, že na boční straně vůči směru působení větru, kde se nachází vyšetřovaný bod, jsou součinitele pro sání pro všechny tři způsoby výpočtu velmi podobné. Proto jsou si velmi podobné i deformace. Velikost sání je zřejmá z ilustrace.



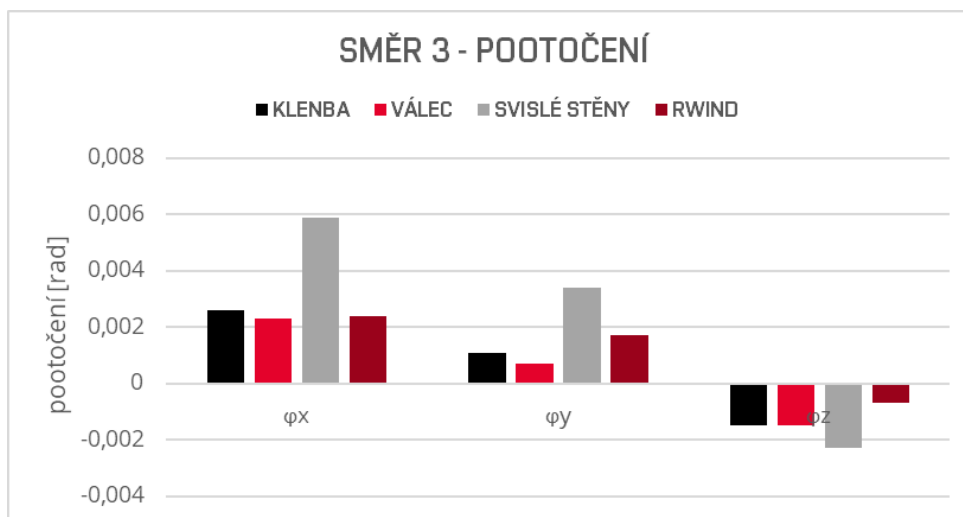
Obrázek 65 – Porovnání vnějších tlaků, detail vyhlídky, směr 2

V těchto místech nebyly uvažovány přídavné síly na vnitřní stranu konstrukce u způsobu výpočtu jako na svislé stěny, proto jsou si normové výsledky mnohem podobnější.

Směr 3

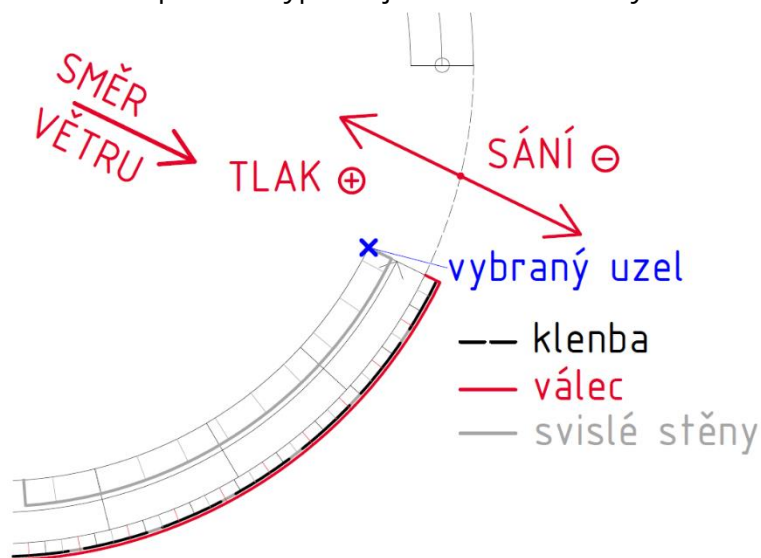


Obrázek 66 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 3 – posuny



Obrázek 67 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 3 – pootočení

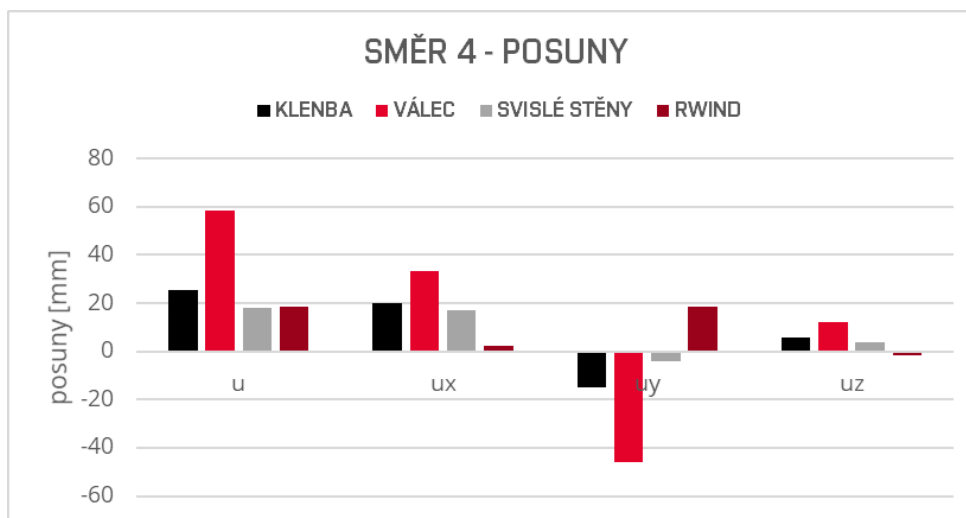
Ve směru 3 jsou si nejvíce podobné deformace od způsobu výpočtu klenbové střechy a válce. V některých kategoriích jsou dokonce menší než deformace z RWINDu. Největší deformace opět pochází od způsobu výpočtu jako na svislé stěny.



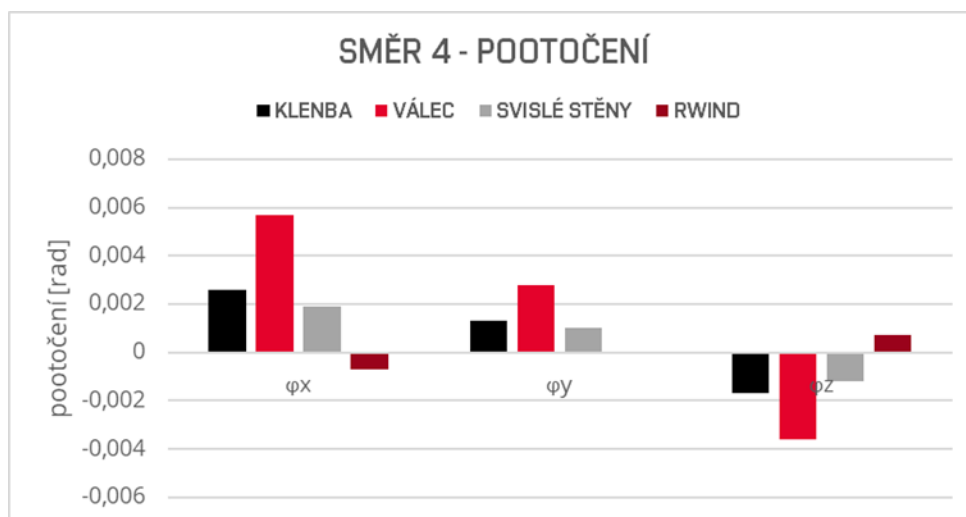
Obrázek 68 – Porovnání vnějších tlaků, detail vyhlídky, směr 3

Součinitele vnějšího tlaku na závětrné straně jsou pro všechny tři způsoby normového výpočtu téměř shodné. Pro klenbu a svislé stěny jsou dokonce zcela stejné. Rozdíl je jen v tom, že u svislých stěn jsem uvažovala přídavné zatížení na vnitřní straně konstrukce.

Směr 4



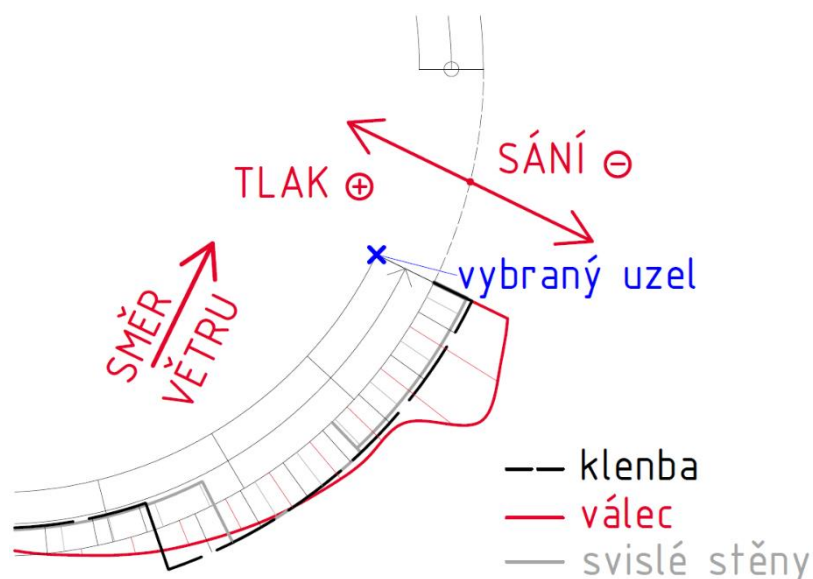
Obrázek 69 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 4 – posuny



Obrázek 70 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 4 – pootočení

Ve směru 4 se výrazně odchyľuje deformace od výpočtu pro válec. Je to způsobeno tím, že v tomto směru vychází místo odtržení větrného víru, a tedy i největší sání, do místa vyhlídky, kde se nachází zkoumaný bod.

Zajímavé také je, že v některých kategoriích jsou deformace z RWINDu na opačnou stranu než od normově spočtených účinků. Tento fakt připisuji nepravidelnosti tvaru konstrukce. Zatímco při normovém výpočtu jsem v místech vyhlídky uvažovala sání, tak z výsledků RWINDu je zřejmé, že software v těchto místech uvažoval tlak. Navíc v místě vyhlídky je vždy při normových výpočtech část zatížení „uříznuta“, protože konstrukce dál nepokračuje.



Obrázek 71 – Porovnání vnějších tlaků, detail vyhlídky, směr 4

Shrnutí

Obecně jsou deformace od zatížení generované RWINDem menší než deformace z normových výpočtů. Tento fakt, si myslím, je způsoben zjednodušeními využitými při normovém výpočtu (např. použití jednotného maximálního dynamického tlaku spočítaného pro nejvyšší bod konstrukce po celé výšce konstrukce), snahou přizpůsobit atypicky tvarovanou konstrukci předpisům z normy, použitím konzervativních hodnot součinitelů povrchových tlaků atd.

Proto se i výpočet jako na svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem obecně odchyluje deformacemi nejvíce, i když měl vycházet právě ze simulace RWINDu. Rozdělení oblastí se provádělo poněkud špatně, protože konstrukce je zaoblená, a byly použity konzervativní hodnoty součinitelů vnějších tlaků. I přes to si myslím, že tento způsob je nejvhodnější. Co bych změnila, jsou hodnoty součinitelů c_{pe} – zvolila bych je o něco nižší.

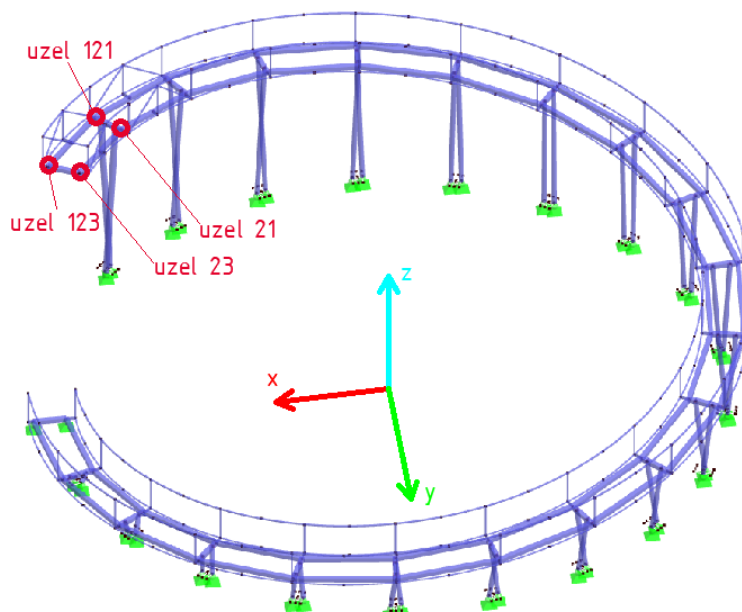
Průběh deformací od zatížení RWINDem je také plynulejší, protože RWIND vygeneruje velké množství sil na mnoho bodů konstrukce, za to při normovém výpočtu je zatížen menší počet hlavních styčníků.

8. Porovnání vybraných výsledků na modelech 1 a 2

Budou porovnány posunutí a pootočení uzlů.

Pro porovnání byly vybrány 4 uzly – uzel, kde je připojen sloup na vnitřní straně konstrukce, poté uzel, kde je také připojen sloup, ale na vnější straně, poslední dva uzly jsou na konci vyložené konzoly, která slouží jako vyhlídka, jeden na vnější a jeden na vnitřní straně.

Lze tedy vyzorovat, jaký vliv má uspořádání sloupů – a to jak v místě jejich připojení, tak i na volném konci. Všechny uzly jsou v nejvyšší části rozhledny, protože jsou zde největší posuny a pootočení.



Obrázek 72 – Uzly k porovnání výsledků na modelech 1 a 2, souřadný systém

Uzly jsou v obou modelech očíslovány stejně.

V modelu 1 jsou sloupy připojeny přímo v uzlech 21 a 121, v modelu 2 jsou sloupy o něco blíže k sobě, jsou tedy připojeny v jiných uzlech – pro porovnání jsou uvažovány ale stejné uzly jako v modelu 1.

Ve všech těchto uzlech byly porovnány posuny z jednotlivých zatěžovacích stavů. Jako výchozí byl zvolen model číslo 1, tedy ten, kde jsou vymodelovány sloupy zjednodušeně. Jsou tedy zkoumány procentuální rozdíly vztahované k tomuto modelu.

V následujících podkapitolách jsou vždy na začátek uvedeny průměrné rozdíly hodnot deformací pro daný uzel od všech zatěžovacích stavů a dále jsou uvedeny pouze ty stavy, které se nejvíce odchylovaly.

Uzel 21 – připojení sloupu, vnitřní strana konstrukce

PRŮMĚRNÉ ROZDÍLY DEFORMACÍ V UZLU 21 MEZI MODELEM 1 A 2							
posuny				pootočení			
u	u_x	u_y	u_z	φ_x	φ_y	φ_z	
	-21%	2%	-25%	-34%	-15%	-9%	-12%

Tabulka 19 – Průměrné rozdíly deformací – uzel 21

	DEFORMACE V UZLU 21 OD ZS20						
	posuny [mm]				pootočení [rad]		
	u	u_x	u_y	u_z	φ_x	φ_y	φ_z
MODEL 1	31,0	-27,9	13,1	-2,6	-0,0031	-0,0035	0,0015
MODEL 2	31,2	-28,1	13,2	-2,6	-0,0035	-0,0033	0,0017
% rozdíl modelu 2 od modelu 1		1%	1%	0%	13%	-6%	13%

Tabulka 20 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 21 od ZS20

Zatěžovací stav, který se nejvíce odchyloje od ostatních je ZS20 – Vítr, směr 1 – válec. V tomto stavu, na rozdíl od ostatních, totiž skoro ve všech kategoriích vychází lépe model 1.

Uzel 23 – konec konzoly, vnitřní strana konstrukce

PRŮMĚRNÉ ROZDÍLY DEFORMACÍ V UZLU 23 MEZI MODELEM 1 A 2						
posuny				pootočení		
u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
-16%	-12%	-19%	-17%	-19%	-24%	-13%

Tabulka 21 – Průměrné rozdíly deformací – uzel 23

	DEFORMACE V UZLU 23 OD ZS10						
	posuny [mm]				pootočení [rad]		
	u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
MODEL 1	9,2	7,2	1,1	-5,6	-0,0004	0,0033	-0,0002
MODEL 2	9,5	7,2	-1,6	-5,9	-0,0004	0,0034	-0,0003
% rozdíl modelu 2 od modelu 1	3%	0%	45%	5%	0%	3%	50%

Tabulka 22 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 23 od ZS10

	DEFORMACE V UZLU 23 OD ZS20						
	posuny [mm]				pootočení [rad]		
	u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
MODEL 1	38,0	-33,2	17,3	-6,6	-0,0039	-0,0032	0,0012
MODEL 2	38,3	-33,7	17,7	-7,2	-0,0041	-0,0031	0,0013
% rozdíl modelu 2 od modelu 1	1%	2%	2%	9%	5%	-3%	8%

Tabulka 23 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 23 od ZS20

Zde stojí za zmínku zatěžovací stavy ZS10 – Šach 3 a opět ZS20 – Vítr, směr 1 – válec, kde netypicky vychází lépe model 1.

Uzel 121 – připojení sloupu, vnější strana konstrukce

PRŮMĚRNÉ ROZDÍLY DEFORMACÍ V UZLU 121 MEZI MODELEM 1 A 2						
posuny				pootočení		
u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
-21%	1%	-23%	-43%	-31%	-33%	-5%

Tabulka 24 – Průměrné rozdíly deformací – uzel 121

	DEFORMACE V UZLU 121 OD ZS10						
	posuny [mm]				pootočení [rad]		
	u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
MODEL 1	5,0	4,8	1,5	-0,3	-0,0008	0,0012	-0,0004
MODEL 2	4,5	4,4	-1,1	-0,6	-0,0005	0,0020	-0,0005
% rozdíl modelu 2 od modelu 1	-10%	-8%	-27%	100%	-38%	67%	25%

Tabulka 25 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 121 od ZS10

	DEFORMACE V UZLU 121 OD ZS20						
	posuny [mm]				pootočení [rad]		
	u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
MODEL 1	30,7	-27,2	14,0	2,6	-0,0032	-0,0037	0,0013
MODEL 2	30,9	-27,3	14,1	2,8	-0,0037	-0,0037	0,0015
% rozdíl modelu 2 od modelu 1	1%	0%	1%	8%	16%	0%	15%

Tabulka 26 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 121 od ZS20

	DEFORMACE V UZLU 121 OD ZS27						
	posuny [mm]				pootočení [rad]		
	u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
MODEL 1	37,3	29,1	-23,1	-3,3	0,0045	0,0043	-0,0021
MODEL 2	37,1	29,9	-21,7	-3,3	0,0046	0,0041	-0,0023
% rozdíl modelu 2 od modelu 1	-1%	3%	-6%	0%	2%	-5%	10%

Tabulka 27 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 121 od ZS27

Pro tento uzel se od ostatních odchylojí tři zatěžovací stavy – ZS10 – Šach 3, ZS20 – Vítr, směr 1 – válec a také ZS27 – Vítr, směr 4 – Svislé stěny.

Uzel 123 – konec konzoly, vnější strana konstrukce

PRŮMĚRNÉ ROZDÍLY DEFORMACÍ V UZLU 123 MEZI MODELEM 1 A 2						
posuny				pootočení		
u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
-16%	-11%	-19%	-12%	-28%	-22%	-14%

Tabulka 28 – Průměrné rozdíly deformací – uzel 123

	DEFORMACE V UZLU 123 OD ZS20						
	posuny [mm]				pootočení [rad]		
	u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
MODEL 1	37,5	-32,7	18,4	-1,7	-0,0039	-0,0032	0,0012
MODEL 2	38,2	-33,2	18,8	-2,3	-0,0041	-0,0031	0,0013
% rozdíl modelu 2 od modelu 1	2%	2%	2%	35%	5%	-3%	8%

Tabulka 29 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 123 od ZS20

	DEFORMACE V UZLU 123 OD ZS27						
	posuny [mm]				pootočení [rad]		
	u	u _x	u _y	u _z	φ _x	φ _y	φ _z
MODEL 1	47,8	37,3	-29,8	3,7	0,0052	0,0036	-0,0020
MODEL 2	47,8	38,2	-28,5	4,0	0,0050	0,0032	-0,0020
% rozdíl modelu 2 od modelu 1	0%	2%	-4%	8%	-4%	-11%	0%

Tabulka 30 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 123 od ZS27

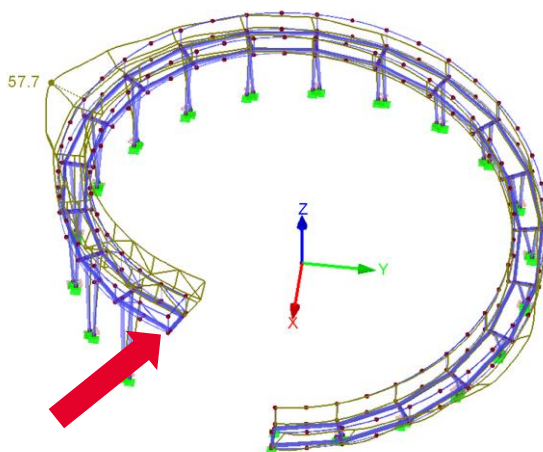
V deformacích tohoto uzlu se opět jako ve všech předcházejících případech odchylojí ZS20 – Vítr, směr 1 – válec a potom také ZS27 – Vítr, směr 4 – svislé stěny.

8.1. Shrnutí zjištěných výsledků

Jak se dalo očekávat, uspořádání sloupů má větší vliv v místě připojení sloupů. Celkové deformace v místě připojení sloupů jsou v modelu 2 o 21 % nižší. Na volném konci je vliv geometrie sloupů menší, zde je model 2 lepší o 16 % v kategorii celkových deformací.

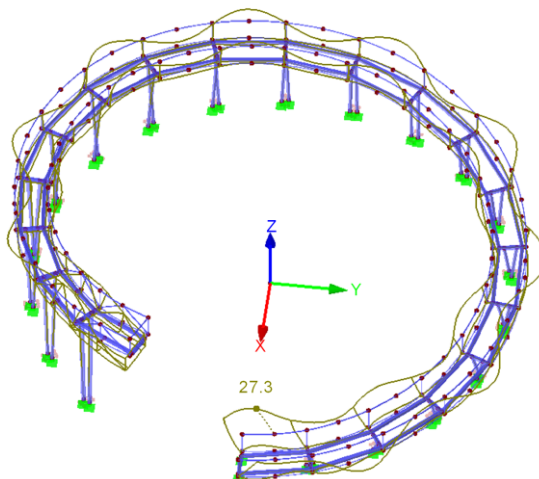
Zatěžovací stavy, kde model 1 vykazuje menší deformace, jsou pro všechny čtyři uzly téměř shodné.

Pro všechny uzly se odchyluje zatěžovací stav, kde působí vítr spočítaný způsobem jako na válec ve směru 1, což je kolmo na nejvyšší bod vyhlídky. Směr větru je v obrázku naznačen šipkou.



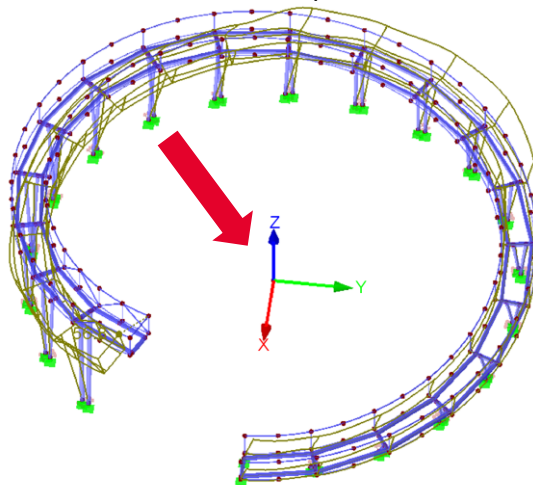
Obrázek 73 – Deformace od ZS20 – Vítr, směr 1 – válec

Dále se třikrát vyskytl zatěžovací stav šach 3, kde je ob pole zatížena buď vnitřní nebo vnější strana rozhledny užitným zatížením.



Obrázek 74 – Deformace od ZS10 – Šach 3

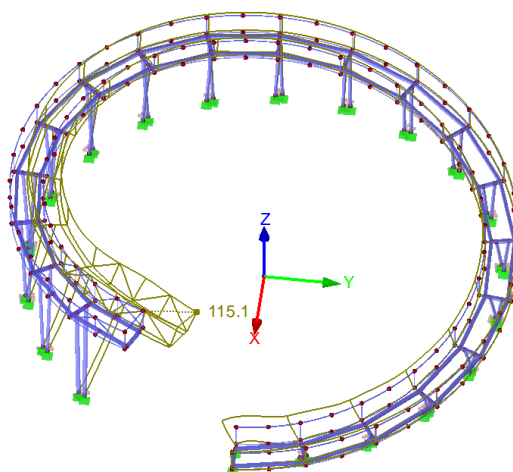
Pro body na konci konzoly se odchyloval stav, kdy působí vítr jako na svislé stěny ve směru 4. Směr větru je v obrázku naznačen šipkou.



Obrázek 75 – Deformace od ZS27 – Vítr, směr 4 – svislé stěny

Pro tyto zatěžovací stavy je podobné, že deformace ve sledovaném místě probíhají více méně v jedné rovině. Vyhlídka se tedy pohybuje pouze doprava a doleva.

Podíváme-li se na deformace z jiných zatěžovacích stavů – pro ukázkou např. ZS13 – Vnitřní strana, zjistíme, že vyhlídka se vyklání i směrem dopředu.



Obrázek 76 – Deformace od ZS13 – Vnitřní strana

Deformuje se tedy prostorově. Obdobně je tomu i v jiných zatěžovacích stavech. Naklonění probíhá jak směrem dopředu, tak i směrem dozadu.

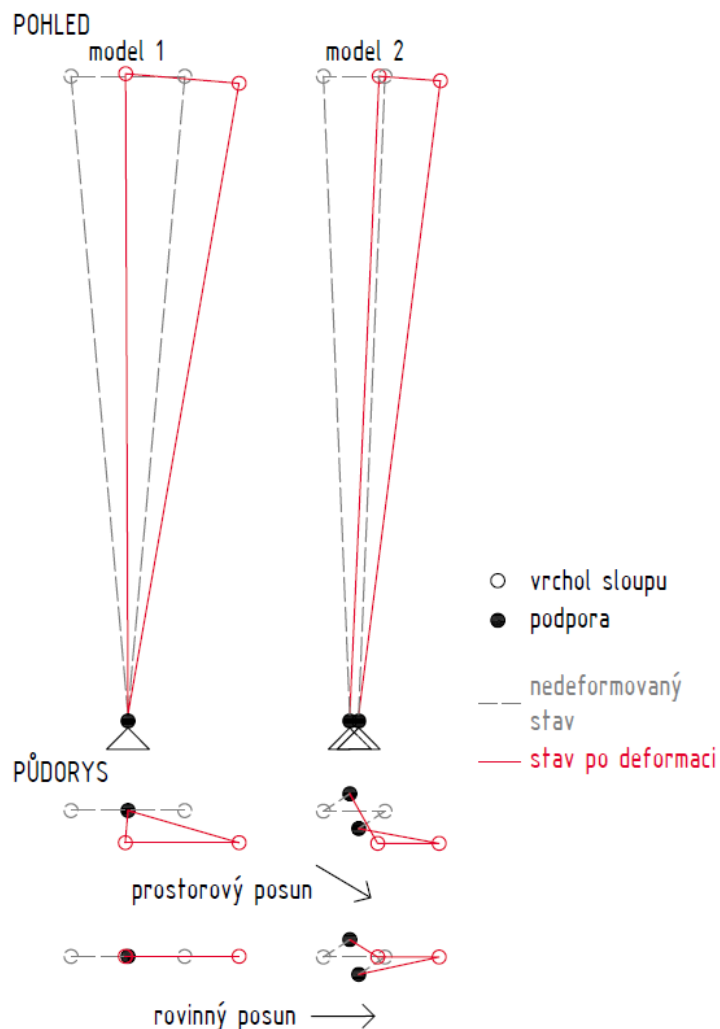
8.2. Možné příčiny rozdílů

V modelu 1 tvoří sloupy a příčný prut trojúhelník, který se chová, co se týče posunů, přibližně jako jeden celek. V modelu 2 tvoří sloupy a příčný prut lichoběžník, kde se jednotlivé body posouvají nezávisleji na sobě než v předchozí trojúhelníkové variantě.

Vliv má také to, že v modelu 1 se sloupy sbíhají do jednoho bodu – podpory, sloupy jsou v jedné rovině. V modelu 2 jsou sloupy uloženy na samostatných podporách, sloupy jsou navíc prostorově mimoběžné.

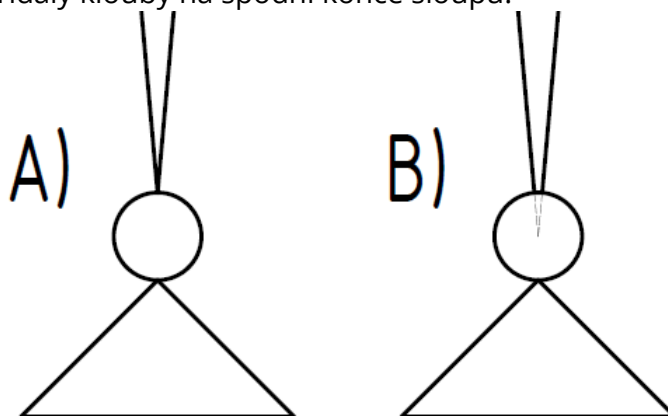
Dá se tedy vyvodit, že vlivem uspořádání sloupů v modelu 1, tento model hůře vzdoruje posunům. To se však týká pouze posunů prostorových, jak ukázaly výsledky výše.

Pokud budeme uvažovat pouze posun v rovině, chová se výhodněji model 1 – vykazuje menší deformace.



Obrázek 77 – Schéma geometrie sloupů, posun sloupů

Co také stojí za povšimnutí je způsob podepření sloupů v modelu 1. V modelu je uvažována varianta A) viz. Obrázek 78, kde jsou sloupy tuze spojeny a jako jeden celek uloženy na podporu. Více skutečnosti však odpovídá varianta B), kdy jsou sloupy spojeny kloubově a pak až uloženy na podporu. Vhodné by tedy bylo tento fakt zohlednit tím, že by se do modelu 1 přidaly klouby na spodní konce sloupů.



Obrázek 78 – Detail podepření sloupů v modelu 1

Avšak ohybový moment, který v tomto místě vzniká, je zanedbatelný. Jeho hodnota se pohybuje do 5 kNm. Rozdíl mezi variantou A) a B) je tedy minimální.

9. Kombinace zatížení

Na závěr byly vygenerovány kombinace dle kombinačních pravidel (6.10a) a (6.10b), které jsou v ČSN EN 1990 [9] definovány následovně:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10a) \\ \sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (6.10b) \end{array} \right.$$

kde

“+ “ – značí „kombinovaný s“

Σ – značí „kombinovaný účinek“

Zatížení

$G_{k,j}$ – charakteristická hodnota j-tého stálého zatížení

P – příslušná reprezentativní hodnota zatížení od předpětí

$Q_{k,1}$ – charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení, 1

$Q_{k,i}$ – charakteristická hodnota vedlejšího i-tého proměnného zatížení

Součinitele

$\gamma_{G,j}$ – dílčí součinitel j-tého stálého zatížení, v němž jsou uváženy modelové nejistoty a proměnnost rozměrů

$$\gamma_{G,j,\text{sup}} = 1,35$$

$$\gamma_{G,j,\text{inf}} = 1,00 \text{ (není zde uvažováno)}$$

$\gamma_{G,j}$ – dílčí součinitel zatížení od předpětí

$\gamma_{Q,i}$ – dílčí součinitel i-tého proměnného zatížení, v němž jsou uváženy modelové nejistoty a proměnnost rozměrů

$$\gamma_{Q,i} = 1,50 \text{ pro nepříznivé (0 pro příznivé)}$$

ξ – redukční součinitel pro nepříznivá stálá zatížení G

$$\xi = 0,85 \text{ (takže } \xi \cdot \gamma_{G,j,\text{sup}} = 0,85 \cdot 1,35 \cong 1,15)$$

$\psi_{0,i}$ – součinitel pro kombinační hodnotu proměnného zatížení

ZATÍŽENÍ	ψ_0
Kategorie C: shromažďovací plochy	0,7
Zatížení sněhem	0,5
Ostatní členové CEN, pro stavby umístěné ve výšce $H \leq 1000$ m.n.m.	
Zatížení větrem	0,6

Tabulka 31 – Vybrané hodnoty součinitele $\psi_{0,i}$ pro kombinační hodnotu [9]

Z těchto dvou výrazů se vybere méně příznivá kombinace jako rozhodující.

V softwaru jsem ověřila tabulky s vygenerovanými kombinacemi, zda splňují tyto kombinační pravidla a obsahují správné součinitele.

Uvažované zatěžovací stavy v kombinacích

Do kombinací byly zahrnuty všechny dříve popsané zatěžovací stavy s výjimkou těch, které jsou považovány za kontrolní a to ZS2 – Vlastní tíha X a ZS3 – Vlastní tíha Y.

Je vytvořena skupina pro užitná zatížení a další skupiny pro jednotlivé způsoby výpočtu zatížení větrem, aby byl do kombinace vždy vybrán právě jeden zatěžovací stav ze skupiny užitého zatížení a právě jeden zatěžovací stav ze skupiny zatížení větrem.

9.1. Vnitřní síly na vybraných prutech a odpovídající kombinace

Zde jsou uvedeny maximální vnitřní síly na vybraných prutech hlavní nosné konstrukce. Je i uvedeno, z jaké kombinace byla tato síla zjištěna.

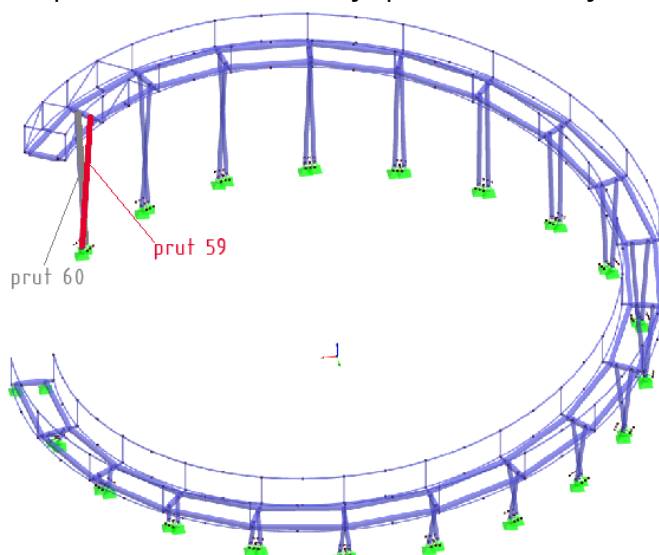
Jelikož jsou průřezy prvků hlavní nosné konstrukce dvojose symetrické, je vždy vybrána největší ze sil působících ve směru Y a ve směru Z lokálního souřadného systému prutu.

Všechny maximální vnitřní síly vyšly v koncových uzlech zkoumaných prutů.

Jsou zde porovnány hodnoty z modelu 1 a z modelu 2.

9.1.1. Sloupy

Nejvíce namáhaná je poslední dvojice sloupů před vyhlídkou. Tomu odpovídají pruty číslo 59 a 60. Zde rovněž platí, že toto číslování je pro oba modely shodné.



Obrázek 79 – Vybraná dvojice sloupů pro stanovení maximálních vnitřních sil

MAXIMÁLNÍ VNITŘNÍ SÍLY									
PRUT 59					PRUT 60				
MODEL 1									
	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	Kombinace		N [kN]	V [kN]	M [kNm]	Kombinace
max N	17,731	-5,189	36,046	ZS1,4,5,12,25	max N	2,213	-3,375	-21,793	ZS1,4,5,26
min N	-108,294	1,869	5,573	ZS1,4-6,13,24	min N	-61,382	0,568	-1,514	ZS1,4-6,15,27
max V	11,402	-6,033	-3,646	ZS1,4,5,12,26	max V	-21,991	-7,146	39,133	ZS1,4,5,12,26
max M	16,995	-6,031	38,746	ZS1,4,5,12,26	max M	-23,330	-6,740	-40,546	ZS1,4-6,12,26
MODEL 2									
	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	Kombinace		N [kN]	V [kN]	M [kNm]	Kombinace
max N	155,415	-7,585	-48,629	ZS1,4,5,12,26	max N	139,953	5,370	33,407	ZS1,4,5,13,24
min N	-242,775	3,916	0,415	ZS1,4-6,13,24	min N	-191,036	-8,106	0,466	ZS1,4-6,12,26
max V	147,133	-8,322	-0,359	ZS1,4-6,12,26	max V	-190,465	-8,120	0,468	ZS1,4,5,12,26
max M	152,726	-7,619	-48,830	ZS1,4-6,12,26	max M	-184,872	-7,327	-46,500	ZS1,4,5,12,26

Tabulka 32 – Maximální vnitřní síly na sloupech – pruty 59 a 60

LEGENDA ZATĚŽOVACÍCH STAVŮ	
ZS1	Vlastní tíha ve směru Z
ZS4	Podlaha
ZS5	Zábradlí
ZS6	Sníh
ZS12	Vnější strana
ZS13	Vnitřní strana
ZS24	Vítr, směr 1 - svislé stěny
ZS25	Vítr, směr 2 - svislé stěny
ZS26	Vítr, směr 3 - svislé stěny
ZS27	Vítr, směr 4 - svislé stěny

Tabulka 33 – Legenda zatěžovacích stavů, sloupy

Jak lze vidět, tak sloupy jsou namáhány jak tlakem, tak tahem. Sloup na vnitřní straně je více namáhán než sloup na straně vnější.

Také je zřejmé, že sloupy v modelu 2 – tedy reálné uspořádání sloupů – jsou namáhány mnohem více. Souvisí to s fakty popsány v 8.2. V modelu 2 jsou tedy menší deformace, ale naopak větší vnitřní síly.

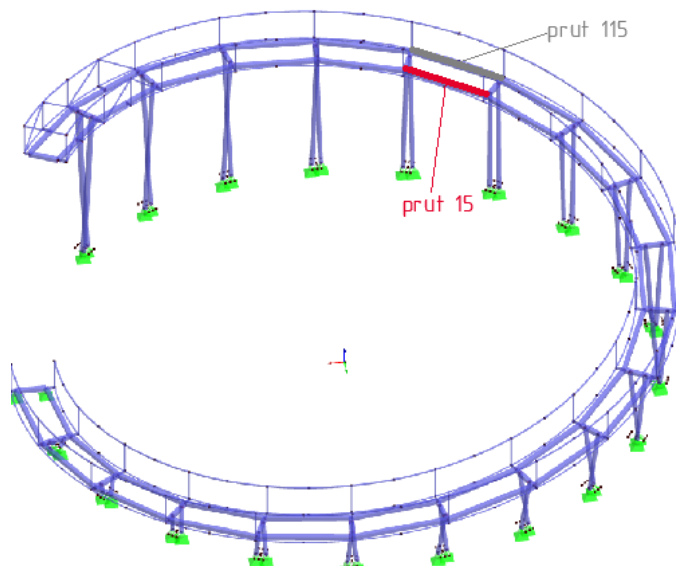
Při prozkoumání zatěžovacích stavů jednotlivých kombinací si můžeme povšimnout, že pro model 1 a 2 není vždy rozhodující stejný směr větru. Ve všech kombinacích figuruje pouze zatížení větrem spočítané jako na svislé stěny pozemních staveb s pravouhlým půdorysem. Nejčastěji rozhoduje ZS26 – Vítr, směr 3 – svislé stěny. Tento fakt je poněkud překvapující, jelikož bylo předpokládáno, že v těchto místech bude rozhodující vítr ve směru číslo 1, který tlačí vyhlídku směrem ke středu půdorysu.

V kategorii užitných zatížení rozhoduje stav, kdy je zatížena buď vnější nebo vnitřní strana konstrukce.

Ke kombinacím bych chtěla podotknout, že jsou vytvořeny na stranu bezpečnou. Nedá se totiž předpokládat, že by působil vítr vypočtené intenzity a zároveň by konstrukce byla plná lidí.

9.1.2. Podélné pruty

Nejvíce namáhané podélné pruty jsou nečekaně pruty číslo 15 a 115, jak lze vidět na obrázku. Můžeme to ale vysvětlit tím, že v těchto místech je pomyslně „vetknutá“ horní část rozhledny, takže obdobně jako na konzole vznikají největší vnitřní síly v místě vetknutí.



Obrázek 80 – Vybrané podélné pruty pro stanovení maximálních vnitřních sil

MAXIMÁLNÍ VNITŘNÍ SÍLY									
PRUT 15					PRUT 115				
MODEL 1									
	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	Kombinace		N [kN]	V [kN]	M [kNm]	Kombinace
max N	199,788	-5,124	-5,566	ZS1,4,5,12,23	max N	146,741	1,910	5,124	ZS1,4-6,13,24
min N	-174,339	18,158	-17,145	ZS1,4-6,13,24	min N	-173,027	10,571	-4,136	ZS1,4,5,12,23
max V	-163,850	20,131	-15,405	ZS1,4-6,13,24	max V	1,877	19,392	-15,167	ZS1,4-6,12,24
max M	-174,339	18,158	-17,145	ZS1,4-6,13,24	max M	1,877	19,392	-15,167	ZS1,4-6,12,24
MODEL 2									
	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	Kombinace		N [kN]	V [kN]	M [kNm]	Kombinace
max N	185,812	-1,669	5,239	ZS1,4,5,12,23	max N	129,178	1,671	5,092	ZS1,4-6,13,24
min N	-153,015	16,358	-13,531	ZS1,4-6,13,24	min N	-161,689	10,034	-3,520	ZS1,4,5,12,23
max V	-139,259	19,118	-13,294	ZS1,4-6,13,24	max V	72,048	18,712	-11,177	ZS1,4-6,11,24
max M	-153,015	16,358	-13,531	ZS1,4-6,13,24	max M	-68,581	-18,309	-13,718	ZS1,4-6,12,26

Tabulka 34 – Maximální vnitřní síly na podélných prutech – pruty 15 a 115

LEGENDA ZATĚŽOVACÍCH STAVŮ	
ZS1	Vlastní tíha ve směru Z
ZS4	Podlaha
ZS5	Zábradlí
ZS6	Sníh
ZS12	Vnější strana
ZS13	Vnitřní strana
ZS23	Vítr, směr 4 - válec
ZS24	Vítr, směr 1 - svislé stěny
ZS26	Vítr, směr 3 - svislé stěny

Tabulka 35 – Legenda zatěžovacích stavů, podélné pruty

Zde jsou rozhodující stavy z kategorie užitných zatížení opět stavy ZS12 – Vnější strana a ZS13 – Vnitřní strana.

Co se týče větru, tak nejčastěji rozhoduje ZS24, což je vítr jako na svislé stěny ve směru 1. Tady je splněn původní předpoklad, že tento směr větru bude rozhodující. Myslela jsem si ovšem, že bude rozhodující pouze v místech samotné vyhlídky, ne takto poměrně daleko od ní. Bude to dáno výše popsanou domněnkou o horní části rozhledny uvažované jako konzoly vetknuté v místech zkoumaných prutů 15 a 115. Tento stav narozdíl od ostatních směrů větru deformuje vyhlídku směrem ke středu půdorysu.

V některých kombinacích dokonce figuruje způsob výpočtu větru pro kruhový válec. Konkrétně se jedná o směr 4. Dalo by se to zdůvodnit porovnáním v 7.8.1, kde se ukázalo, že ve směru 4 jsou deformace na konci konzoly od tohoto způsobu největší.

Také zde vůbec nefiguruje směr větru 2, který působí tak, že ve zkoumaných prutech nevyvolává téměř žádné deformace.

Vnitřní síly na těchto prutech jsou pro model 1 i 2 mnohem podobnější, než co se týkalo sloupů popsaných výše. Dalo by se tedy říct, že vliv uspořádání sloupů je na podélné pruty zanedbatelný.

10. Závěr

Zvolit správný model, který nejvíce odpovídá skutečnému chování konstrukce není vůbec jednoduchý úkol. Jak jsem zjistila v této práci, tak i nepatrnými úpravami se může změnit mnoho. Měl by se tedy dávat pozor na to, jaká zjednodušení budou do modelu zadána a jakým způsobem ovlivní výsledky. V tomto případě je dle mého názoru nevhodné zjednodušovat geometrii sloupů. Pro dimenzování konstrukce rozhledny by měl být použit model 2, kde jsou výrazně větší vnitřní síly ve sloupech než v modelu 1.

Dalším důležitým bodem je správně spočítat zatížení, vhodně stanovit kategorii konstrukce, kategorii terénu atp. Také z intervalů daných normou zvolit nejvíce vypovídající intenzitu působícího zatížení nebo hodnoty součinitelů (např. vnějších tlaků, co se týče zatížení větrem). Tyto volby by měly být provedeny s ohledem jednak na bezpečnost, ale také hospodárnost konstrukce. Jelikož za sebou nemám žádné praktické zkušenosti, v této práci jsem volila hodnoty konzervativní, abych si byla jistá, že se pohybují na straně bezpečné.

Tím, že je rozhledna velmi atypického tvaru, tak jsem měla možnost si vyzkoušet různé metody a postupy, co se týče jak modelování, tak právě počítání zatížení. Podrobně jsem se seznámila s normami, které tuto problematiku řeší. Nejkritičtější zajisté bylo stanovení účinků větru.

Při řešení tohoto problému jsem se snažila najít různé možnosti, až jsem se dostala k simulaci proudění větru ve větrném tunelu. Pomohlo mi to lépe pochopit, jak se proud větru chová a jakým způsobem obtéká a působí na konstrukci. Myslím si, že je to velmi dobrý nástroj, ale těžko se ověřuje, zda jsou výsledky správné či nikoliv.

Tím se dostávám k tomu, že i když je software velmi mocný nástroj, tak je stěžejní umět ověřit, jestli opravdu počítá to, co chceme.

11. Seznam použitých zdrojů

- [1] Kudy z nudy. *Kudy z nudy* [online]. Praha: Česká centrála cestovního ruchu – CzechTourism, 2018 [cit. 2021–5–14]. Dostupné z: <https://www.kudyznudy.cz/aktivity/unikatni-spiralova-rozhledna-v-kobyli>
- [2] Uživatelský manuál RFEM 5. *Dlubal* [online]. Praha: Dlubal Software, 2020 [cit. 2021–5–14]. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/-/media/Files/website/documents/manuals/rfem-fea-software/rfem-5/rfem-5-manual-cs.pdf?la=cs&mlid=40621BBE737344C1AD800822BCB17F29&hash=8302CB77D6D7E325A50941953FABC0C46C9BB05E>
- [3] Feron a.s. *Feron a.s.* [online]. Praha: Feron, 2017 [cit. 2021–5–14]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>
- [4] ČSN EN 1991–1–1: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1–1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [5] ČSN EN 1991–1–3: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1–3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [6] Oblasti zatížení sněhem, větrem a zemětřesením. *Dlubal* [online]. Praha: Dlubal, 2021 [cit. 2021–5–14]. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs/reseni/online-sluzby/oblasti-zatizeni-snehem-vetrem-a-zemetresenim>
- [7] ČSN EN 1991–1–4: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1–4: Obecná zatížení – Zatížení větrem. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [8] User Manual RWIND Simulation. *Dlubal* [online]. Philadelphia: Dlubal Software, 2020 [cit. 2021–5–14]. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/-/media/Files/website/documents/manuals/stand-alone-programs/rwind-simulation/rwind-simulation-manual-en.pdf?la=cs&mlid=B8828DD3F8ED48FDAA7BB9F82681B724&hash=1F8762BC00D2EBBE00AFFDEA5336EA4EB7A563A4>
- [9] ČSN EN 1990: Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. 2. vydání. Praha: Český normalizační institut, 2021.

12. Seznam obrázků

Obrázek 1 – Rozhledna na Kobylím vrchu [1]	10
Obrázek 2 – Model 1	12
Obrázek 3 – Model 2	13
Obrázek 4 – Model 3	13
Obrázek 5 – Mapa sněhových oblastí [6]	17
Obrázek 6 – Mapa větrných oblastí [6].....	18
Obrázek 7 – Základní rozměry – klenbová střecha	20
Obrázek 8 – Rozdělení na oblasti – klenbová střecha [7]	20
Obrázek 9 – Stanovení $c_{pe,10}$ pro klenbové střechy [7]	21
Obrázek 10 – Vykreslení povrchových tlaků – klenbová střecha	21
Obrázek 11 – Průměr válce b	22
Obrázek 12 – Stanovení součinitele koncového efektu ψ_λ , pro celou konstrukci [7]..	24

Obrázek 13 – Rozdělení tlaku pro válce s kruhovým průřezem [7]	25
Obrázek 14 – Stanovení součinitele vnějšího tlaku bez vlivu proudění kolem volných konců [7]	25
Obrázek 15 – Vykreslení povrchových tlaků – válec	26
Obrázek 16 – Ukázka vykreslení výsledků RWIND – pole vektorů rychlosti	27
Obrázek 17 – Ukázka vykreslení výsledků RWIND – linie jednotlivých proudů	28
Obrázek 18 – Ukázka vykreslení výsledků RWIND – výslednice sil	28
Obrázek 19 – Zvolené směry větru	29
Obrázek 20 – RWIND – povrchové tlaky, směr 1, návětrná strana	30
Obrázek 21 – RWIND – povrchové tlaky, směr 1, závětrná strana	30
Obrázek 22 – RWIND – povrchové tlaky, směr 1, boční strana 1	30
Obrázek 23 – RWIND – povrchové tlaky, směr 1, boční strana 2	30
Obrázek 24 – RWIND – povrchové tlaky, směr 2, návětrná strana	31
Obrázek 25 – RWIND – povrchové tlaky, směr 2, závětrná strana	31
Obrázek 26 – RWIND – povrchové tlaky, směr 2, boční strana 1	31
Obrázek 27 – RWIND – povrchové tlaky, směr 2, boční strana 2	31
Obrázek 28 – RWIND – povrchové tlaky, směr 3, návětrná strana	32
Obrázek 29 – RWIND – povrchové tlaky, směr 3, závětrná strana	32
Obrázek 30 – RWIND – povrchové tlaky, směr 3, boční strana 1	32
Obrázek 31 – RWIND – povrchové tlaky, směr 3, boční strana 2	32
Obrázek 32 – RWIND – povrchové tlaky, směr 4, návětrná strana	33
Obrázek 33 – RWIND – povrchové tlaky, směr 4, závětrná strana	33
Obrázek 34 – RWIND – povrchové tlaky, směr 4, boční strana 1	33
Obrázek 35 – RWIND – povrchové tlaky, směr 4, boční strana 2	33
Obrázek 36 – Základní rozměry – svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem	34
Obrázek 37 – Rozdělení konstrukce se svislými stěnami a pravoúhlým půdorysem na oblasti [7]	35
Obrázek 38 – Vykreslení povrchových tlaků – svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem	35
Obrázek 39 – Stanovení součinitele koncového efektu ψ_λ , pro sloupy [7]	37
Obrázek 40 – Stanovení součinitele síly pro válce bez vlivu proudění kolem volných konců $c_{f,0}$ [7]	37
Obrázek 41 – ZS4 – Podlaha	39
Obrázek 42 – ZS5 – Zábradlí	39
Obrázek 43 – ZS6 – Sníh	40
Obrázek 44 – ZS7 – Plné užité zatížení	40
Obrázek 45 – ZS8 – Šach 1	41
Obrázek 46 – ZS9 – Šach 2	41
Obrázek 47 – ZS10 – Šach 3	42
Obrázek 48 – ZS11 – Šach 4	42
Obrázek 49 – ZS12 – Vnější strana	43
Obrázek 50 – ZS13 – Vnitřní strana	43
Obrázek 51 – ZS14 – Vyhlídka	43
Obrázek 52 – ZS15 – Horní polovina	44
Obrázek 53 – Číslování bodů pro zatížení větrem	44

Obrázek 54 – Vnější tlaky od jednotlivých způsobů normového výpočtu, směr 1	48
Obrázek 55 – Porovnání účinků větru, směr 1	49
Obrázek 56 – Porovnání účinků větru, směr 2	49
Obrázek 57 – Porovnání účinků větru, směr 3	50
Obrázek 58 – Porovnání účinků větru, směr 4	50
Obrázek 59 – Uzel pro porovnání účinků větru normovým výpočtem a RWINDem ...	51
Obrázek 60 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 1 – posuny	52
Obrázek 61 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 1 – pootočení	52
Obrázek 62 – Porovnání vnějších tlaků, detail vyhlídky, směr 1	53
Obrázek 63 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 2 – posuny	53
Obrázek 64 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 2 – pootočení	53
Obrázek 65 – Porovnání vnějších tlaků, detail vyhlídky, směr 2	54
Obrázek 66 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 3 – posuny	54
Obrázek 67 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 3 – pootočení	55
Obrázek 68 – Porovnání vnějších tlaků, detail vyhlídky, směr 3	55
Obrázek 69 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 4 – posuny	56
Obrázek 70 – Porovnání normového výpočtu s RWINDem – směr 4 – pootočení	56
Obrázek 71 – Porovnání vnějších tlaků, detail vyhlídky, směr 4	57
Obrázek 72 – Uzly k porovnání výsledků na modelech 1 a 2, souřadný systém	58
Obrázek 73 – Deformace od ZS20 – Vítr, směr 1 – válec	61
Obrázek 74 – Deformace od ZS10 – Šach 3	61
Obrázek 75 – Deformace od ZS27 – Vítr, směr 4 – svislé stěny	62
Obrázek 76 – Deformace od ZS13 – Vnitřní strana	62
Obrázek 77 – Schéma geometrie sloupů, posun sloupů	63
Obrázek 78 – Detail podepření sloupů v modelu 1	63
Obrázek 79 – Vybraná dvojice sloupů pro stanovení maximálních vnitřních sil	65
Obrázek 80 – Vybrané podélné pruty pro stanovení maximálních vnitřních sil	67

13. Seznam tabulek

Tabulka 1 – Seznam použitých průřezů, část 1	11
Tabulka 2 – Seznam použitých průřezů, část 2	12
Tabulka 3 – Tvarové součinitele zatížení sněhem [5]	17
Tabulka 4 – Výsledné hodnoty vnějších tlaků – klenbová střecha	20
Tabulka 5 – Ekvivalentní drsnost povrchu k [7]	22
Tabulka 6 – Doporučené hodnoty efektivní štíhlosti, stanovení pro celou konstrukci [7]	23
Tabulka 7 – Typické hodnoty pro rozdělení tlaku na kruhových válcích [7]	24
Tabulka 8 – Výsledné hodnoty vnějších tlaků – kruhový válec	26
Tabulka 9 – Výsledné hodnoty vnějších tlaků – svislé stěny pozemních staveb s pravoúhlým půdorysem	34
Tabulka 10 – Doporučené hodnoty efektivní štíhlosti, stanovení pro sloupy [7]	36
Tabulka 11 – Zatížení větrem – klenbová střecha, část 1	45
Tabulka 12 – Zatížení větrem – klenbová střecha, část 2	45
Tabulka 13 – Zatížení větrem – válec, část 1	46
Tabulka 14 – Zatížení větrem – válec, část 2	46
Tabulka 15 – Zatížení větrem – svislé stěny, vnější strana, část 1	46

Tabulka 16 – Zatížení větrem – svislé stěny, vnější strana, část 2.....	47
Tabulka 17 – Zatížení větrem – svislé stěny, vnitřní strana, část 1.....	47
Tabulka 18 – Zatížení větrem – svislé stěny, vnitřní strana, část 2.....	47
Tabulka 19 – Průměrné rozdíly deformací – uzel 21	58
Tabulka 20 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 21 od ZS20	58
Tabulka 21 – Průměrné rozdíly deformací – uzel 23.....	59
Tabulka 22 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 23 od ZS10	59
Tabulka 23 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 23 od ZS20	59
Tabulka 24 – Průměrné rozdíly deformací – uzel 121	59
Tabulka 25 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 121 od ZS10.....	59
Tabulka 26 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 121 od ZS20.....	60
Tabulka 27 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 121 od ZS27	60
Tabulka 28 – Průměrné rozdíly deformací – uzel 123.....	60
Tabulka 29 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 123 od ZS20.....	60
Tabulka 30 – Porovnání modelu 1 a 2 – deformace v uzlu 123 od ZS27	60
Tabulka 31 – Vybrané hodnoty součinitele $\psi_{0,i}$ pro kombinační hodnotu [9].....	64
Tabulka 32 – Maximální vnitřní síly na sloupech – pruty 59 a 60.....	65
Tabulka 33 – Legenda zatěžovacích stavů, sloupy	66
Tabulka 34 – Maximální vnitřní síly na podélných prutech – pruty 15 a 115.....	67
Tabulka 35 – Legenda zatěžovacích stavů, podélné pruty	67

14. Seznam příloh

P1. Vizualizace