



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## TELESKOPICKÁ VĚŽ SAMOJÍZDNÉ VRTNÉ SOUPRAVY

TELESCOPIC TOWER OF MOBILE DRILLING RIG

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Hájek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.

BRNO 2017



## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Bc. Ondřej Hájek**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Teleskopická věž samojízdné vrtné soupravy

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vzhledem k velmi přísným bezpečnostním limitům kladeným na výrobu vrtných souprav, dochází k enormnímu nárůstu hmotnosti a rozměrů jednotlivých komponent. Jedním z nejrozměrnějších a nejtěžších dílů samojízdné vrtné soupravy je její teleskopická dvoudílná věž.

Maximální nosnost soupravy 150 t.

#### Cíle diplomové práce:

- konstrukční návrh dvoudílné teleskopicky vysouvané věže včetně konstrukce připojení k podvozku soupravy
- definice zatížení a okrajových podmínek pro řešení
- popis výpočtového MKP modelu
- pevnostní analýza
- celkový výkres sestavy

#### Seznam literatury:

JURÁŠEK, O. Teorie nosných konstrukcí. 1. vyd. Praha: VN MON, 1989.

MICHALÍČEK, M. Dynamika stavebních strojov. 2. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1996. Edícia skript. ISBN 80-227-0879-8.

AZAR, J. J. a ROBELLO, G. S. Drilling engineering. Tulsa, Okla.: PennWell Corp., c2007.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 3. 11. 2016



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katořícký, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem věže vrtné soupravy. Úkolem řešené diplomové práce, jenž je tvořena ve spolupráci s firmou MND, a.s., je provést návrh ocelové konstrukce. Následně provést analýzu zatěžovacích stavů. Dále provést analýzu konstrukce pomocí metody konečných prvků a na jejím základě konstrukci optimalizovat.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Věž, ocelová, příhradová, konstrukce, vrtná, souprava, MKP, optimalizace

## ABSTRACT

The thesis deals with the design of the drilling rig tower. The goal of the diploma thesis, which is created in cooperation with MND, a.s., is to design a steel structure. Then perform a load analysis. Further, to perform a structural analysis using the Finite Element Method and to optimize the design.

## KEYWORDS

Tower, steel, truss, construction, drilling, set, FEM, optimization

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÁJEK, O. *Teleskopická věž samojízdné vrtné soupravy*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 50 s. Vedoucí diplomové práce Přemysl Pokorný

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Bc. Ondřej Hájek

## PODĚKOVÁNÍ

Především děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Přemyslu Pokornému, Ph.D. za odborné vedení, cenné informace, připomínky a věnování velkého množství času při tvorbě diplomové práce.

Také děkuji Ing. Lukáši Zeizingerovi za rady a přátelský přístup při konzultacích diplomové práce.

Dále děkuji firmě MND a.s. za zadání práce, informace a za možnost navštívení vrtné soupravy při provozu.

Hlavně děkuji rodičům za podporu a za jejich trpělivost po dobu studia na VUT FSI v Brně.

A v neposlední řadě svojí přítelkyni Marii Cedivodové za pomoc s úpravou diplomové práce a za trpělivost po dobu vypracování.

## OBSAH

|   |    |
|---|----|
| Úvod.....   | 10 |
| 1 Charakteristika úkolu.....                              | 11 |
| 2 Přiblížení problematiky .....                           | 12 |
| 2.1 Soupravy s rotačními stoly .....                      | 12 |
| 2.2 Soupravy s posuvnou rotační hlavou (top drive).....   | 12 |
| 2.3 Úprava soupravy BIR 7585 .....                        | 14 |
| 3 Konstrukční řešení věže.....                            | 15 |
| 3.1 Problematika otevřené konstrukce.....                 | 15 |
| 3.2 Rozvaha nad možnostmi profilů jednotlivých prutů..... | 15 |
| 3.3 Zvolená geometrie a výběr profilů.....                | 16 |
| 4 Předběžný návrh konstrukce.....                         | 18 |
| 4.1 Sestavení numerického výpočtu .....                   | 18 |
| 5 MKP model .....   | 21 |
| 5.1 Tvorba 3D modelu .....                                | 21 |
| 5.2 Tvorba MKP modelu .....                               | 21 |
| 5.3 Finální MKP model .....                               | 23 |
| 5.4 Definice zatížení MKP modelu.....                     | 28 |
| 5.5 Zatěžovací stavy .....                                | 32 |
| 6 Posouzení konstrukce na základě MKP.....                | 33 |
| 7 Konečný návrh věže .....                                | 39 |
| 7.1 Parametry spodní a horní věže.....                    | 40 |
| 7.2 Vedení.....   | 40 |
| 7.3 Příčky.....   | 40 |
| 7.4 Boční zavětrování spodní věže .....                   | 41 |
| 7.5 Zadní zavětrování spodní věže.....                    | 41 |
| 7.6 Přední hlavní pás spodní věže.....                    | 41 |
| 7.7 Zadní hlavní pás spodní věže.....                     | 42 |
| 7.8 Boční zavětrování horní věže.....                     | 42 |
| 7.9 Zadní zavětrování horní věže.....                     | 42 |
| 7.10 Přední hlavní pás horní věže .....                   | 43 |
| 7.11 Zadní hlavní pás horní věže .....                    | 43 |
| 7.12 Styčnickový plech pro spodní i horní věž.....        | 43 |
| 7.13 Úhly zavětrování .....                               | 44 |
| 7.14 Křížení zadního zavětrování.....                     | 44 |
| Závěr.....  | 45 |

---

|  |    |
|--|----|
| Seznam použitých zkratek a symbolů ..... | 47 |
| Seznam příloh .....                      | 50 |

## ÚVOD

Konstrukcí vrtných souprav je obrovské množství – od pár tun vážících samohybných až po ty největší, několika set tunové. Jednotlivé provedení se liší dle potřebných požadavků, avšak všechny spojuje nehostinné pracovní prostředí. Konstrukce vrtných souprav se řadí do skupiny nejvíce zatěžovaných na světě. Důvodů je hned několik: nepřetržitý provoz, chemické prostředí a silné zatížení klimatickými vlivy (vítr, sníh, led, prach), a proto jsou na tyto konstrukce kladeny velmi vysoké požadavky.

V této diplomové práci se pojednává o návrhu konstrukce příhradové věže pro samohybnou vrtnou soupravu, jež je tvořena ve spolupráci s firmou MND, a.s. Ta má k požadavkům kladených na konstrukci, které vyplívají z předešlého odstavce, požadavek navíc. Tím je navržení co nejnižší možné hmotnosti za předpokladu, že bude vyhovovat všem normám.

Obecně u všech ocelových konstrukcí je velmi obtížné nalézt tu nejoptimálnější. Proč tomu tak je? Důvod je jednoduchý. Ze stejného množství materiálu jsem schopen zkonstruovat desítky, stovky možná i tisíce konstrukcí, ale jen jedna z nich bude ta správná.

# 1 CHARAKTERISTIKA ÚKOLU

Cílem diplomové práce je návrh a optimalizace konstrukce dvoudílné teleskopické věže samojízdné vrtné soupravy včetně připojení k podvozku.

## **Zatížení konstrukce jsou daná:**

- nosností soupravy ... 150 t
- krouticím momentem od vrtáku ... 30000 Nm
- silami vyvolanými přírodními vliv (vítr, námraza)

## **Zástavbové a hmotnostní omezení:**

- maximální hmotnost věže ... 15 t
- výška konstrukce ... 33 m
- další vnější rozměry jsou dané podvozkem soupravy (přesněji v další kapitole)

## 2 PŘIBLÍŽENÍ PROBLEMATIKY

Druhů a způsobů dělení vrtných souprav je velké množství. Popis všech je pro tuhle práci nepotřebný, proto se nadále zabývám jen soupravami pojízdnými, které dále omezím na dva typy podle způsobu přenosu krouticího momentu do vrtné kolony:

1. přenos pomocí rotačního stolu
2. přenos pomocí posuvné rotační hlavy (top drive)

### 2.1 SOUPRAVY S ROTAČNÍMI STOLY

Systém rotačního stolu je charakteristický tím, že vrtná kolona s ním není pevně spojena. Kolona je zavěšená na spodním bloku kladkostroje a její svislý pohyb je zcela volný. K předání krouticího momentu od stolu do kolony dochází pomocí čtyřhranných vložek rotačního stolu na čtyřhranný unášec kolony. Lze je použít jen pro vrtání svislých vrtů směrem dolů. [1]



Obr. 1 Rotační stůl [2]

Při tomhle způsobu vrtání je veškerý krouticí moment zachycen rámem rotačního stolu soupravy. Věž je zatížena pouze silami vyvolanými hmotností vrtné kolony a silami způsobenými přírodními vlivy. Ocelové věže takovýchto souprav jsou navrženy s ohledem na tuto zatížení. Z tohoto důvodu jsou absolutně nevhodné pro způsoby vrtání, při kterých je krouticí moment zachycen konstrukcí věže.

### 2.2 SOUPRAVY S POSUVNOU ROTAČNÍ HLAVOU (TOP DRIVE)

V posledních letech se pro plnoprofilové rotační vrtání stále více užívá systému s posuvnou rotační hlavou, tak zvaný top drive. Užití této metody má oproti rotačním stolům mnoho výhod. Jednou z hlavních je možnost užití různých typů vrtných trubek a možnost regulace přítlaču na vrták ve větším rozsahu než u systémů využívajících rotačních stolů. Systém vrtání top drive je považovaný za jeden z nejvýznamnějších pokroků v technologii plnoprofilového rotačního vrtání od zavedení rotačního stolu. Jeho užití zajistí rychlejší, snadnější a bezpečnější vrtání. [1]



Obr. 2 Systém top drive [3]

### 2.2.1 POPIS MECHANIKY VRTÁNÍ TOP DRIVE A DEFINICE PROBLÉMU S NÍM SPOJENY

Funkční prvky, typ věže a její vnější rozměry zůstávají stejné, jako v případě užití rotačních stolů. Funkčními prvky je myšlen kladkostroj, systém vkládání trubního materiálu a v pozměněné podobě i “rotační stůl“. Vložení pojmu rotační stůl do uvozovek má své odůvodnění - že v systému top drive ztrácí stůl přídomek rotační. Mluví se o něm už jen jako o stole, který v systému slouží k zachycení (zaklínování) vrtné kolony při odpojení od top drive z důvodu vložení nové vrtné trubky. Slouží také jako plošina pro pohyb obsluhy a jsou zde umístěny ovládací prvky soupravy.

Oproti předešlému systému do konstrukce přibývá samotný pohon top drive a vedení pro něj, tak zvaný torque beam. Top drive je umístěn mezi spodní blok kladkostroje a vrtnou kolonu, je s nimi pevně spojen a dodává koloně krouticí moment a potřebný přítlak nutný k vrtání. Jelikož je pohon zavěšen na lanech kladkostroje, je nutné zamezit jeho rotaci kolem vlastní osy. K tomu slouží vedení (torque beam). Jedná se o kolejnici pevně připojenou ke konstrukci věže, po které pojíždí top drive. Je mu tak zamezen pohyb ve všech osách kromě osy svislé. Právě zde vzniká problém. Tím je, že veškerý krouticí moment potřebný k vrtání je zachycen konstrukcí věže. Jedná se o jedinou nevýhodu oproti systémům využívajících rotačních stolů.

Vzhledem k tomu, že věže samohybných vrtných souprav jsou konstruovány jako otevřené, má na ně namáhání krutem obrovský vliv. Proto věže určené k vrtání pomocí top drive, potřebují konstrukci s větší torzní tuhostí, aby nedošlo k jejímu zhroucení.

Z tohoto faktu vyplývá druhý problém, který nastává jen u samohybných vrtných souprav. Tím je omezená nosnost podvozku soupravy, z čehož je zřejmé, že k navýšení

tuhosti konstrukce není možné využít většího množství materiálu. Požadovaných vlastností je nutné dosáhnout správně zvolenou konstrukcí.

### 2.3 ÚPRAVA SOUPRAVY BIR 7585

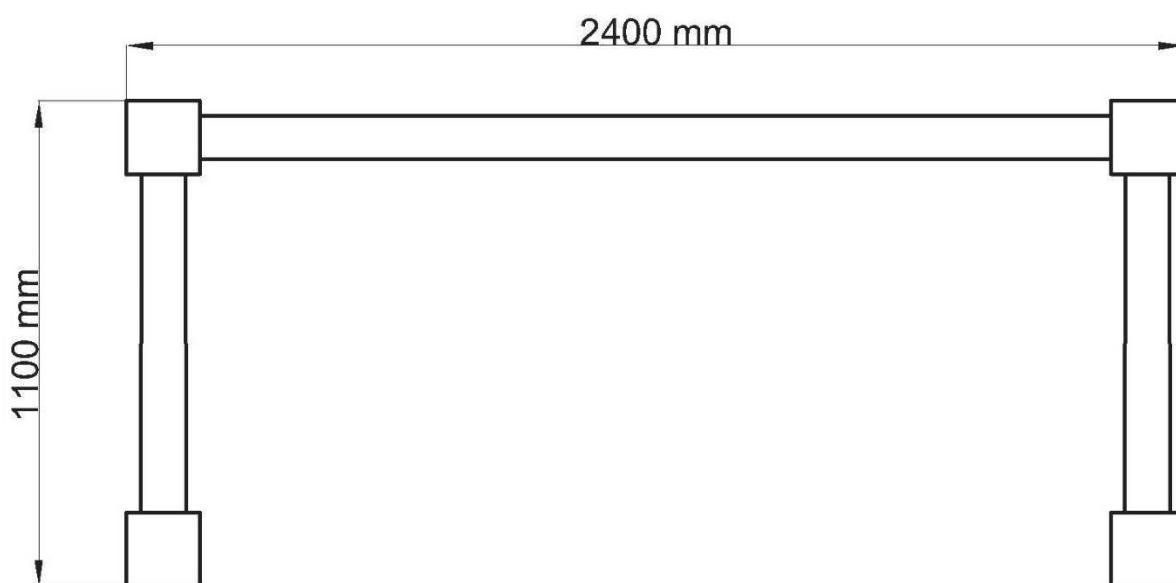
Jedná se o soupravu, u níž má být navržena náhrada současné věže.



Obr. 3 Vrtná souprava BIR 7585 [1]

Věž soupravy je navržena pro přenos krouticího momentu do kolony pomocí rotačního stolu. Tato věž je schopna vrtat do hloubky cca 3500 m s maximálním zatížením 160 t. Vzhledem k její velikosti a nosnosti šestinápravového podvozku se společnost MND, a.s. rozhodla pro její přestavbu na vrtnou soupravu využívající systému top drive, čímž se více využije její potenciál.

Z důvodů uvedených v podkapitole 2.1 a 2.2 plyne, že pro změnu systému vrtání je nutný návrh nové konstrukce věže. Aby bylo možné zachování stávajícího podvozku, je nutné konstrukci navrhnout s podobnými vnějšími rozměry jako má současná konstrukce.

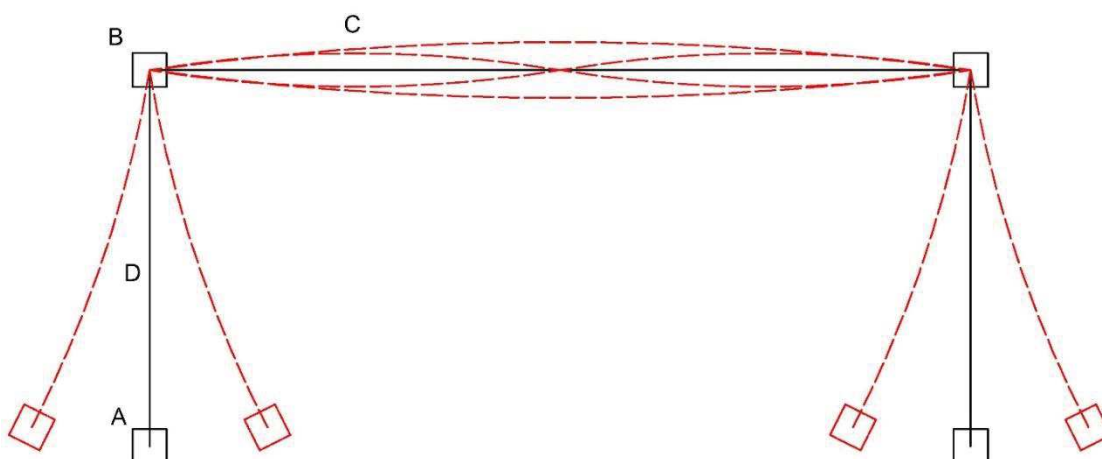


Obr. 4 Vnější rozměry profilu spodního dílu věže BIR 7585

### 3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ VĚŽE

#### 3.1 PROBLEMATIKA OTEVŘENÉ KONSTRUKCE

Věž je navrhována jako otevřená příhradová konstrukce. Samotný otevřený profil věže je problematický kvůli volným koncům na bočních stěnách. Tyto stěny mají sníženou stabilitu, což při špatném návrhu nebo při přetížení snadno vede k nežádoucím deformacím viz. Obr. 5.



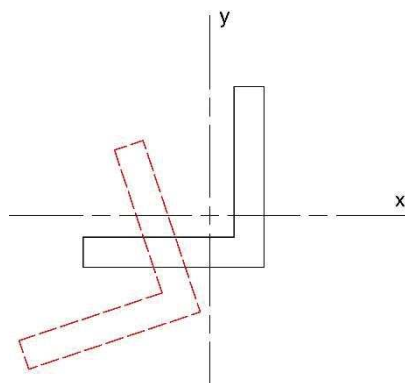
Obr. 5 Možné deformace profilu věže

Z toho důvodu je nutné zajistit dostatečnou tuhost hlavních pásů (B) a zavětrování (C, D) a zároveň zajistit, že ohybová tuhost zavětrování (C, D) bude ekvivalentní torzní tuhosti hlavních pásů (B).

#### 3.2 ROZVAHA NAD MOŽNOSTMI PROFILŮ JEDNOTLIVÝCH PRUTŮ

Prvním kritériem výběru je snaha o použití otevřených profilů, a to pro jejich snadnou údržbu, jako jsou ochranné nátěry po určité době provozu.

Dalším kritériem je vyškrtnutí profilů, které jsou nesymetrické vůči hlavnímu souřadnému systému. Sem spadají L profily, které při zatížení ohybem mají jen jeden způsob ztráty stability, který v profilu vytváří krouticí moment, jak je zobrazeno na obr. 6. U konstrukcí namáhaných krutem by se tenhle efekt mohl s vytvořeným momentem sečíst, proto je v našem případě tento profil nevhodný.

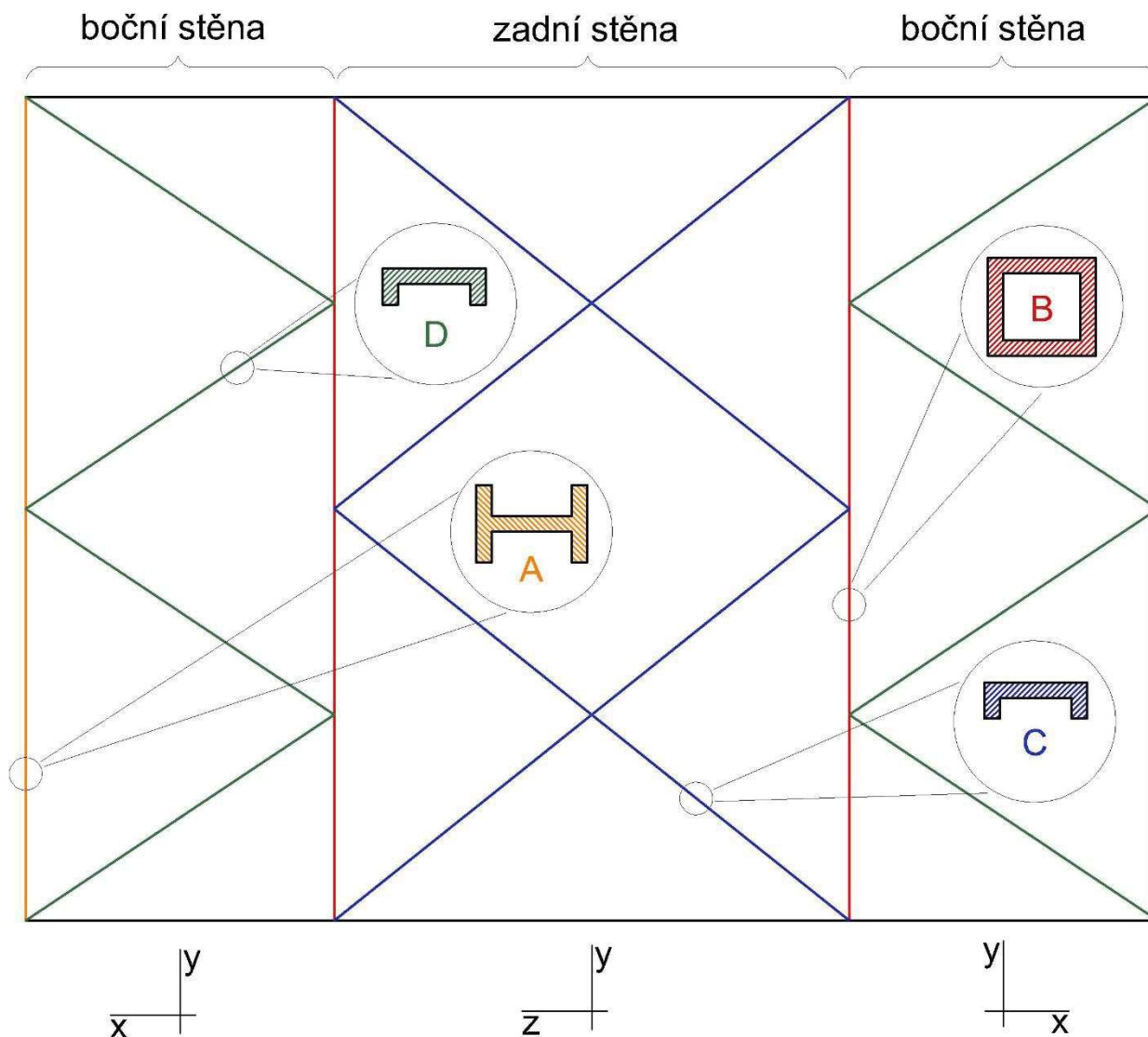


Obr. 6 Efekt namáhání ohybem L profilu

Posledním kritériem je zvolení takových profilů, které nejsou náchylné k zachytávání nečistot nebo by jejich použití vedlo k zvýšené akumulaci sněhu, ledu, bláta nebo prachu na konstrukci.

### 3.3 ZVOLENÁ GEOMETRIE A VÝBĚR PROFILŮ

Pro lepší přehlednost je v následujícím obrázku konstrukce věže rozvinuta do roviny.



Obr. 7 Zvolená geometrie zavětrování a profily jednotlivých skupin prutů

#### 3.3.1 GEOMETRIE ZAVĚTROVÁNÍ

Z Obr. 7 je zřejmé, že zavětrování boční (D) a zadní (C) stěny není spojeno do jednoho styčnicku. Výhodou takového uspořádání je, že krouticí moment od top drive je zachycen ohybovou tuhostí zavětrování (D, C) a torzní tuhostí hlavního pásu (B). Také se tak vyhneme vzniku příliš tuhých styčnicků, kde by docházelo ke koncentraci napětí. Navíc musí být zajištěno, aby styčnický bočního zavětrování přesně půlili vzdálenost mezi styčnický zadního zavětrování (C) na hlavním pásu (B).

### 3.3.2 ZVOLENÉ PROFILY

#### PRUT (A)

U prutu A je zvolen I nebo H profil, protože nejlépe vyhovuje výše uvedeným kritériím.

#### PRUT (B)

Zde je zvolen uzavřený čtvercový profil (jäckel). Důvodem použití jáckelu je jeho velká torzní tuhost.

#### PRUTY (C A D)

U těchto prutů je zvolen profil U jako nejlépe vyhovující daným požadavkům.

Aby bylo možné dosáhnout co nejnižší hmotnosti, předpokládá se, že na konstrukci nebudou použity normované profily. Jednotlivé profily budou buďto tvořeny jako svařence, válcované nebo jako ohýbané. Důvodem je dosažení přesných hodnot kvadratických momentů průřezů vůči hlavním souřadným osám profilů.

Přiřazené označení jednotlivých prutů A, B, C a D bude dodržováno v celém dokumentu.

## 4 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH KONSTRUKCE

Výška a vnější rozměry konstrukce věže jsou předem stanoveny. Jedinými parametry, kterými se dají ovlivnit vlastnosti konstrukce, jsou úhly bočního a zadního zavětrování, plochy jednotlivých průřezů a rozměry stojin a pásnic jednotlivých profilů, které nám dají potřebné kvadratické momenty v daných směrech.

Vzhledem k velkému množství kombinací není snadné odhadnout, která sada parametrů je ta neoptimalnější, a proto pro výpočet je použit software pro numerické výpočty. V našem případě se jedná o program Scilab 6.0.0.

### 4.1 SESTAVENÍ NUMERICKÉHO VÝPOČTU

Sestavení numerického výpočtu je provedeno na základě norem ČSN EN 1991-1-4 Zatížení konstrukcí větrem [6], ČSN ISO 12494 Zatížení konstrukcí námrazou [7] a ČSN EN 1993-1-1. Navrhování ocelových konstrukcí: Obecná pravidla pro pozemní stavby. [8]

Pro sestavení skriptu jsou využity následující informace z norem:

- Posouzení prutu na smyk.
- Posouzení prutu na tlak.
- Posouzení prutu na krut.
- Posouzení vzpěrné únosnosti.
- Imperfekce prutů.
- Globální imperfekce prutových konstrukcí.

K návrhu je přistupováno inverzním postupem. Tedy jsou definovány hodnoty posudků, případně koeficientů v posudcích vystupujících, kterých se má dosáhnout. Následně jsou jednotlivé posudky, nebo jejich části upraveny tak, aby pro počáteční výsledky vypočítaly vstupní hodnoty. Takhle upravenými posudky prošla každá kombinace parametrů konstrukce.

Protože rovnice v normách nejsou uzpůsobeny k tomuhle postupu a ve většině případu to vede ke stavu, kdy je více neznámých než rovnic, jsou některé parametry voleny odhadem, anebo je počítána jen jejich přibližná hodnota. Z tohoto důvodu nejsou výsledky výpočtu přesné. Jedinou přesnou hodnotou jsou výsledky minimálních ploch vycházející z prutového modelu. Určí minimální plochu, aby prut vyhověl na tlak. Tuto hodnotu není možné snížit.

K částečné optimalizaci a určení téměř přesných rozměrových hodnot povede až analýza metodou konečných prvků, dále jen MKP.

Z MKP analýzy není možné posoudit vzpěrnou stabilitu jednotlivých prutů, proto pro konečnou optimalizaci je nutné jednotlivé pruty posoudit na tuto stabilitu podle normy [8]. V případě nevyhovění některého prutu se postup MKP analýzy a následného posouzení opakuje. Postup se provádí opakovaně, dokud není dosaženo požadovaných výsledků.

Vzhledem k povaze výpočtu, je tvorba skriptu popsána jen ve stručnosti.

#### 4.1.1 TVORBA PROGRAMU CHRONOLOGICKY V BODECH

- Definice zatížení a jeho následné navýšení o bezpečnost.
- Definice vlastností oceli (moduly pružnosti, mez kluzu, měrná hmotnost).
- Sestavení intervalů velikostí úhlů bočního a zadního zavětrování.
- Sestavení rovnic určujících délku prutů na základě úhlu zavětrování.
- Vytvoření prutového modelu, jehož výpočtem je dosaženo normálové síly v jednotlivých prutech pro každou kombinaci, z nichž je možné určit minimální plochy průřezů.
- Plochy byly poté upravovány tak, aby pruty měly dostatečnou ohybovou a torzní tuhost a nedošlo k překročení předem definovaného maximálního natočení. Tenhle výpočet nám dal některé kvadratické momenty profilů. Zbylé kvadratické momenty profilů byly určeny pomocí vzpěrné stability tak, aby vyhovovaly předem definované bezpečnosti.
- Sestavení vzorce pro výpočet hmotnosti celé věže pro každou kombinaci.
- Zohlednění zatížení od vlastní hmotnosti i její případné navýšení vlivem námrazy.
- Sestavení rovnic určujících plochu vystavenou větru pro každou kombinaci
- Zohlednění zatížení od větru.

Po dokončení výpočtu je vybrána kombinace, která vedla k nejnižší hodnotě hmotnosti věže.

#### 4.1.2 VÝSLEDKY

Hodnoty vypočtené numerickým výpočtem slouží jako odrazové hodnoty pro sestavení MKP modelu.

Vypočtené hodnoty je nutné upravit, aby bylo možné vsunutí horního dílu věže do spodního. Dále se upraví úhly zavětrování, aby byla dodržena geometrická podmínka daná v podkapitole 3.3.1.

Kvůli dodržení navržených úhlů není možné dosáhnout stejných délek spodního a horního dílu jako u současné věže. Rozdíly v délkách jsou kompenzovány vhodnou úpravou přesahu horní a spodní věže při vysunutí, a tím zajištěna celková výška 33 m.

Při úpravě hodnot daných numerickým výpočtem, kvůli důvodům popsaným výše, je vždy brán ohled na vliv jednotlivých parametrů na konstrukci a dle toho jsou upravovány.

Tab. 1 Vypočtené hodnoty z programu Scilab

|                       | Horní díl | Spodní díl |                    | Horní díl | Spodní díl |
|-----------------------|-----------|------------|--------------------|-----------|------------|
| $m_{\text{vysl}} [t]$ | 10,9216   | 9,87258    | $J_{uu\_C} [mm^4]$ | 1,65E+07  | 1,15E+07   |
| $Alf1 [^\circ]$       | 30,6901   | 36,2538    | $J_{vv\_C} [mm^4]$ | 87686     | 61202,1    |
| $Alf2 [^\circ]$       | 33,6901   | 38,6598    | $h\_C [mm]$        | 139,679   | 127,671    |
| $A\_A [mm^2]$         | 4711,61   | 4539,69    | $b\_C [mm]$        | 27,9359   | 25,5341    |
| $A\_B [mm^2]$         | 10686,4   | 9474,48    | $J_{uu\_D} [mm^4]$ | 3,30E+07  | 2,43E+07   |
| $A\_C [mm^2]$         | 1365,72   | 1140,99    | $J_{vv\_D} [mm^4]$ | 1,52E+06  | 1,12E+06   |
| $A\_D [mm^2]$         | 3362,12   | 2886,94    | $h\_D [mm]$        | 129,656   | 120,144    |
| $J_{uu\_A} [mm^4]$    | 1,83E+07  | 1,70E+07   | $b\_D [mm]$        | 64,8278   | 60,0722    |
| $J_{vv\_A} [mm^4]$    | 1,37E+06  | 1,28E+06   | $dh\_A [mm]$       | 26,9233   | 26,4275    |
| $h\_A [mm]$           | 67,3082   | 66,0688    | $db\_A [mm]$       | 8,07698   | 7,92826    |
| $b\_A [mm]$           | 134,616   | 132,138    | $d\_B [mm]$        | 11,5577   | 10,8826    |
| $Jk\_B [mm^4]$        | 1,43E+08  | 1,12E+08   | $d\_C [mm]$        | 6,98397   | 6,38353    |
| $J\_B [mm^4]$         | 3,82E+08  | 3,00E+08   | $d\_D [mm]$        | 12,9656   | 12,0144    |
| $a\_B [mm]$           | 231,154   | 217,652    |                    |           |            |

### Vysvětlení zkratk

Písmena za podtržítkem přiřazují profil, jak bylo uvedeno na Obr. 7.

|                   |   |
|-------------------|---|
| $m_{\text{vysl}}$ | celková hmotnost věže při délce 33m                             |
| $Alf1$            | úhel bočního zavětrování (menší úhel svírající s hlavním pásem) |
| $Alf2$            | úhel zadního zavětrování (menší úhel svírající s hlavním pásem) |
| $A$               | plocha průřezu  |
| $J_{uu}$          | kvadratický moment průřezu v ohybu (tužší směr)                 |
| $J_{vv}$          | kvadratický moment průřezu v ohybu (měkčí směr)                 |
| $Jk$              | kvadratický moment průřezu v krutu                              |
| $J$               | kvadratický moment průřezu v ohybu (osově souměrný profil)      |
| $h$               | výška pásnice průřezu   |
| $b$               | výška stojiny průřezu   |
| $a$               | výška hrany osově souměrného průřezu                            |
| $dh$              | tloušťka pásnice profilu  |
| $db$              | tloušťka stojiny profilu  |
| $d$               | tloušťka profilu (při stejné tloušťce pásnice i stojiny)        |

## 5 MKP MODEL

Pro pevnostní kontrolu a zpřesnění hodnot z numerického výpočtu je vytvořen a spočítán MKP model. Pro tvorbu a výpočet modelu slouží program NX I-deas 6.1.

Model je tvořen jako skořepinový. Síť je umístěna na jednotlivé střednicové plochy připraveného 3D modelu pomocí prvků Thin-shell. Takhle vytvořená síť nemá oproti objemové síti žádnou tloušťku, tudíž se musí jednotlivým plochám nadefinovat v Physical Property.

Při srovnání 2D (shell mesh) a 3D (solid mesh) sítí, kdy je modelována tenkostěnná konstrukce, se dospěje k velmi podobným výsledkům, avšak při použití 2D sítě za mnohonásobně kratší dobu.

Nejprve je vytvořen model na základě vypočtených hodnot z předchozí kapitoly a po analýze výsledků postupně upravován až do konečné podoby. V dokumentu nejsou popsány jednotlivé kroky, které vedly ke konečnému návrhu. K popisu a následné analýze je využit jen finální model.

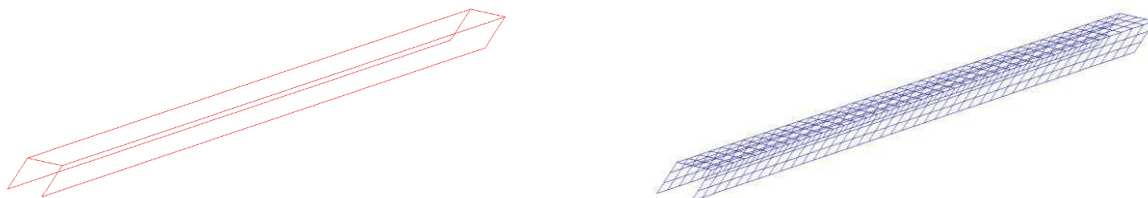
### 5.1 TVORBA 3D MODELU

3D model slouží jen jako šablona pro vytvoření MKP modelu.

Model je vytvořen spojením několika objemů pomocí funkce Join Partition ve volbě Extrude. Do vzniklého objemu jsou poté vyřezány střednicové plochy funkcí partition ve volbě extrude. Vlastností funkce partition je rozdělení jednoho objemu na dva, přičemž nově vzniklé objemy mají společnou dělicí plochu. Tímhle postupem je vytvořen celý model spodního dílu věže. Model je vytvořen tak, že je snadno modifikovatelný. Díky tomuto postupu stačila k vytvoření modelu horního dílu prostá kopie již vytvořeného dílu a následná úprava rozměrů.

### 5.2 TVORBA MKP MODELU

Nejprve jsou plochy rozděleny do skupin podle jednotlivých prvků konstrukce věže. K tomu slouží volba Groups. Tohle rozdělení velice usnadní nasíťování, protože je možné zobrazit si jen danou skupinu, jak je zobrazeno na Obr. 8.



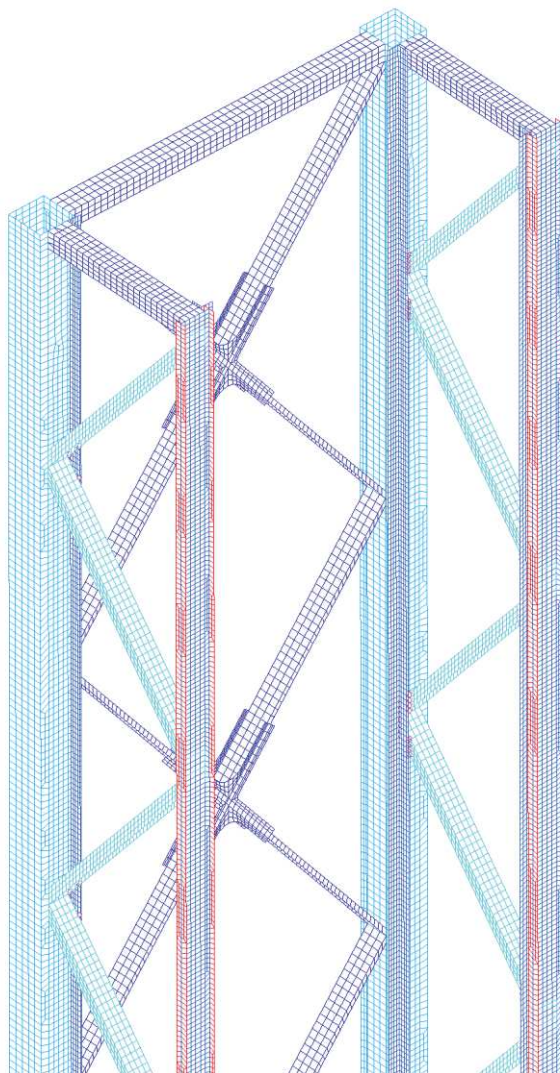
Obr. 8 Zobrazení bočního U profilu a jeho nasíťování

Síťování jednotlivých skupin je tvořeno volbou Define Shell Mesh. Tam, kde to plocha umožňovala, je síť vytvořena jako mapovaná, zbylé plochy jako volná síť. Velikost prvků se pohybuje v rozmezí 30 – 40 mm. Prvky jsou čtyřhranného, nejlépe čtvercového tvaru.

Po vytvoření je síť takzvaně přichycena k jednotlivým plochám následujícím postupem.: Groups -> Quick Filter -> Elements and Nodes (rolovací menu) -> Surface on

group (rolovací menu) -> Add to Group. Tenhle postup je postupně proveden na každou součást. Aby postup fungoval musí být každá součást nastavena jako aktivní pomocí volby Set Current Groupv taktéž ve volbě Groups. Díky provedení těchto kroků se při zobrazení zvolené součásti ze seznamu Groups, zobrazí i její síť.

Stejný postup je aplikován na oba díly věže.



*Obr. 9 Část MKP modelu spodní věže*

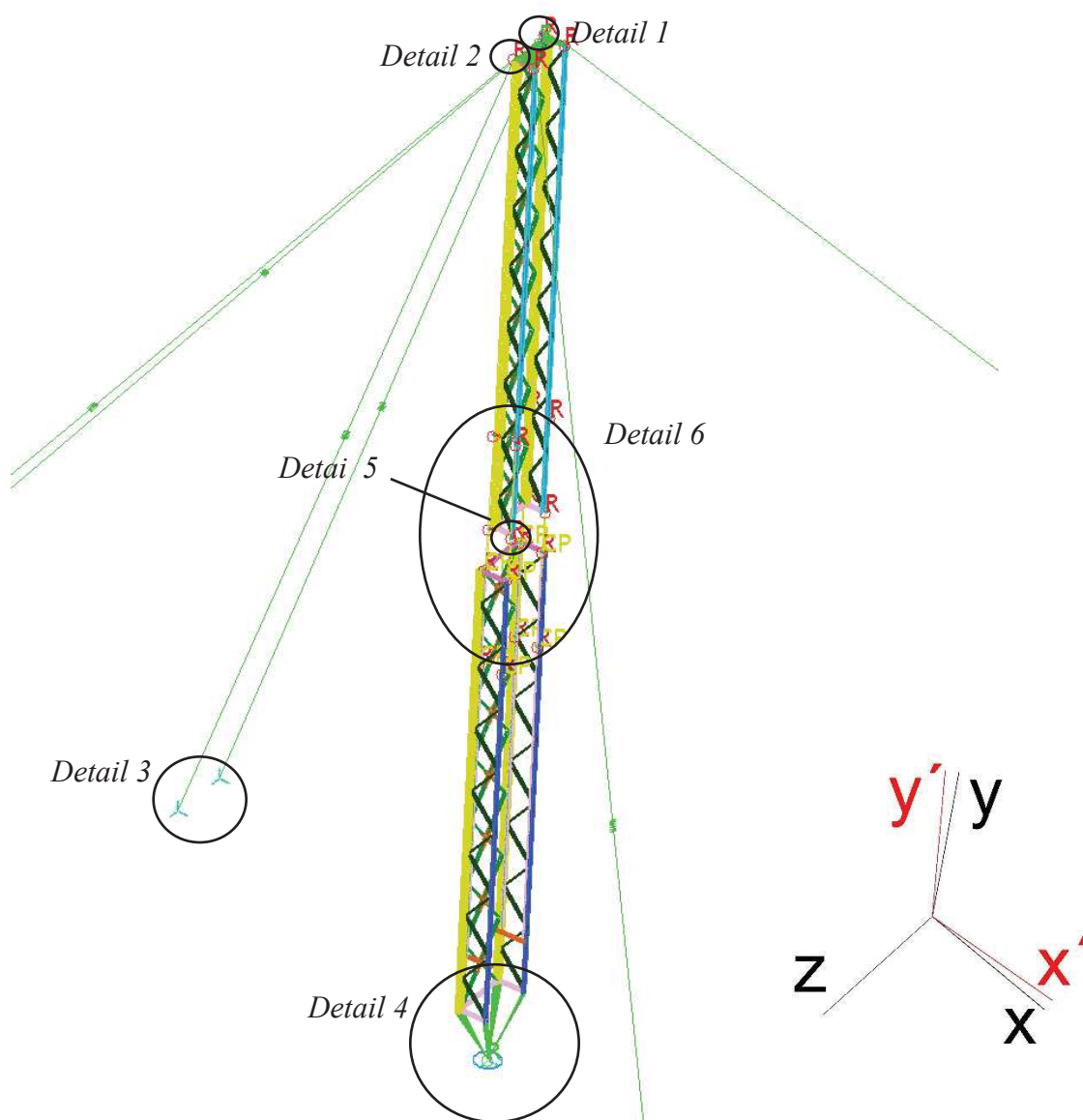
Na obr. 9 je viditelné, že síť nemá žádnou tloušťku ani po přiřazení Physical Property jednotlivým plochám. Jediná vizuální kontrola správného přiřazení tloušťky je zaškrtnutí položky Element Thickness ve volbě Model Check Options a jeho následné aktivování volbou Model Check Display On/Off. Různé tloušťky jsou po tomhle nastavení reprezentovány odlišnými barvami. V případě obrázku výše je nejtenší plocha reprezentována tmavě modrou barvou a nejsilnější červenou.

### 5.3 FINÁLNÍ MKP MODEL

Po vytvoření sítě je z dílů v prostředí Master Assembly vytvořena sestava. Jednotlivé díly jsou od sebe odsazeny z důvodu snadnějšího propojení věží v místech dotyku a lepší analýzy výsledků po provedení výpočtů.

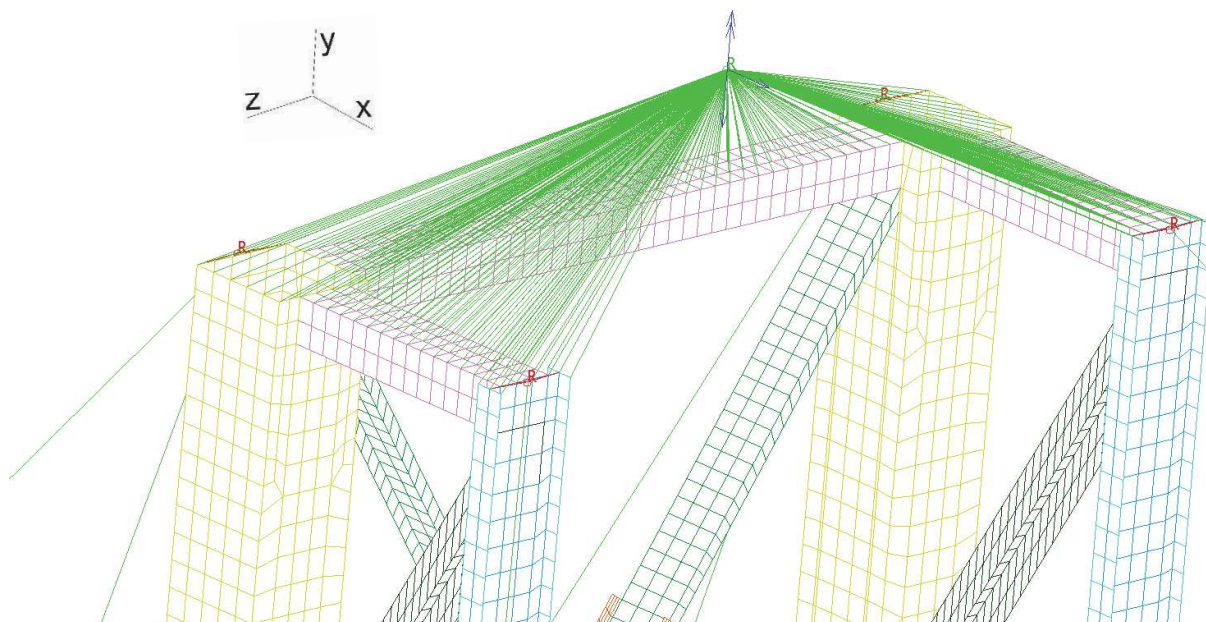
Věž je při provozu nahnutá pod úhlem  $5^\circ$ , to je nutné nasimulovat i v modelu. Toho je dosaženo vytvořením pomocného souřadného systému (červeného), který je natočen o  $5^\circ$ . Vůči pomocnému souřadnicovému systému bylo nadefinováno gravitační zrychlení ( $g=9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ). Souřadný systém věže zůstává totožný s hlavním souřadným systémem.

Na následujícím obrázku je zobrazen finální model věže. Detaily v něm označené jsou zobrazeny a popsány na následujících stránkách.



Obr. 10 Finální MKP model

### 5.3.1 UMÍSTĚNÍ ZATÍŽENÍ OD BŘEMENE A KROUTICÍHO MOMENTU (DETAIL 1)

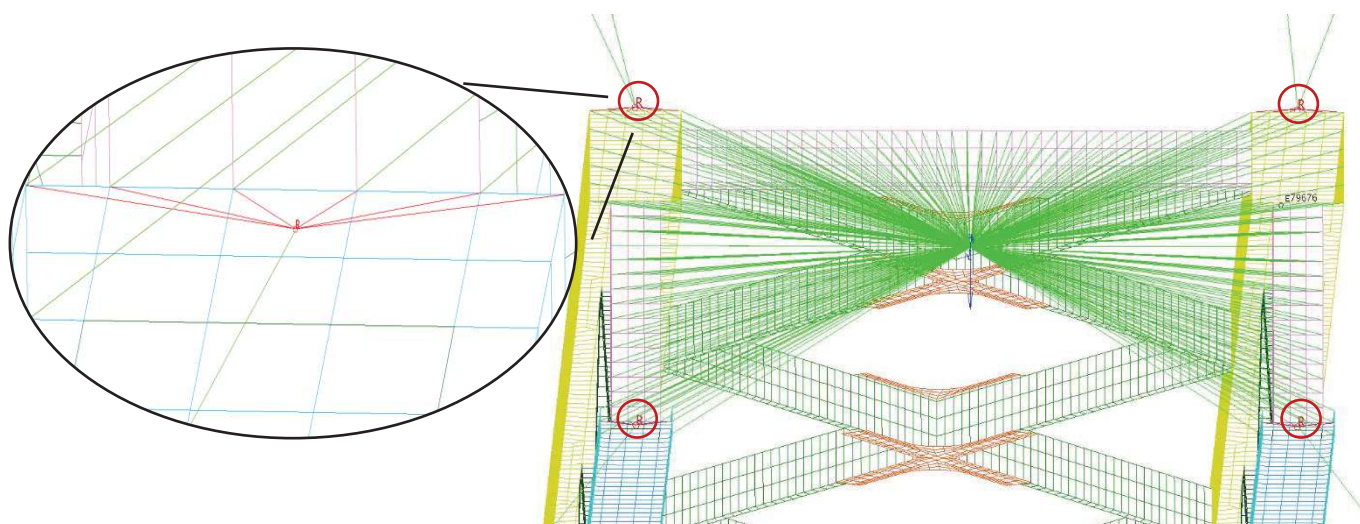


Obr. 11 Detail 1 - vstup zatížení do modelu

Pro umístění zatížení od břemene a od top drive je vytvořen těsně nad konstrukcí uzel. Je umístěn ve středu profilu věže v přibližném místě os kladkostroje. Síla od zatížení vstupuje do konstrukce pod úhlem  $5^\circ$ , proto musí být rozložena do dvou složek ve směru  $x$  a  $-y$ . Moment je vložen ve směru osy  $y$ . Uzel byl s konstrukcí spojen prvkem Rigid. Ten je absolutně tuhý a rozvádí zatížení do daných uzlů modelu.

### 5.3.2 UCHYCENÍ KOTVICÍCH LAN (DETAIL 2 A 3)

#### UCHYCENÍ LAN KE KONSTRUKCI (DETAIL 2)



Obr. 12 Detail 2 - Uchycení lan ke konstrukci

Lana jsou ke konstrukci uchycena ve čtyřech místech (červené kruhy). Pro náhradu jejich uchycení je vytvořen uzel ve vzdálenosti tloušťky materiálu v daném místě a pozice odpovídá ukotvení současné věže. Uzel je s konstrukcí spojen prvkem Rigid a rozvádí reakční síly do daných uzlů. Náhrada lana je vedena přímo do vytvořeného uzlu. Druh náhrady lana je popsán níže.

### UKOTVENÍ LAN K ZEMI (DETAIL 3)



Obr. 13 Detail 3 - Ukotvení lan

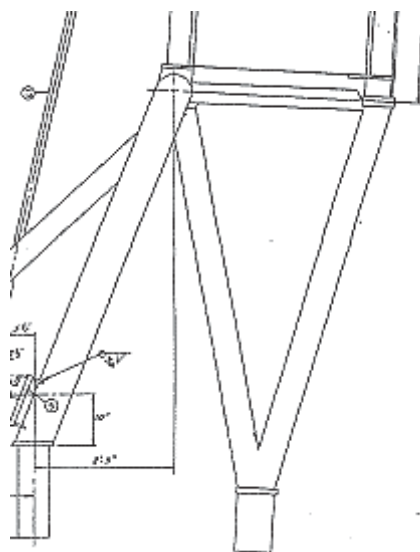
K náhradě ukotvení lan je vytvořen uzel, jehož pozice odpovídá polohám kotvení současné věže. Uzlům je pomocí funkce Displacement Restrain omezen pohyb a rotace ve všech osách. Náhrada lana je vedena do vytvořeného uzlu.

### NÁHRADA LANA

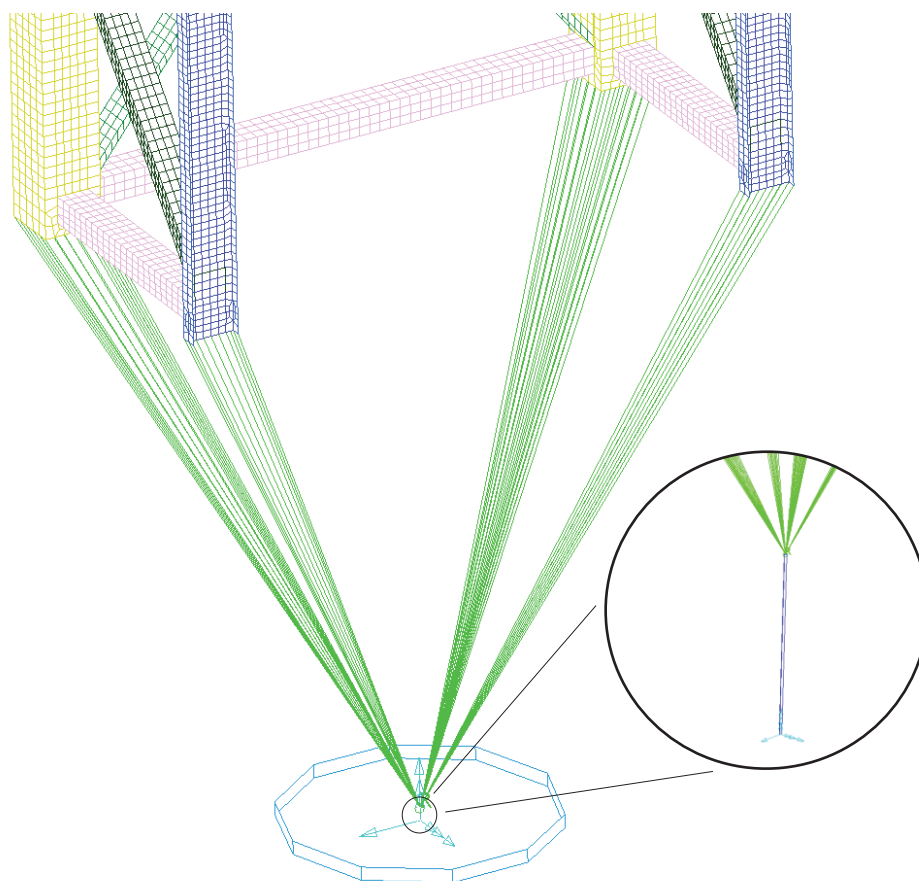
Náhrady lan jsou vytvořeny pomocí pružin prvkem Spring. Umístění, typ a počet lan je totožný se současnou věží. Tuhost pružiny je nastavena podle tuhosti odpovídající lanům.

#### 5.3.3 NÁHRADA ULOŽENÍ VĚŽE (DETAIL 4)

Současná konstrukce je uložena na čtyřbokém jehlanu, viz obr. 14. Podstavy se dotýká jen hlavními pásy věže.



Obr. 14 uložení současné věže [4]

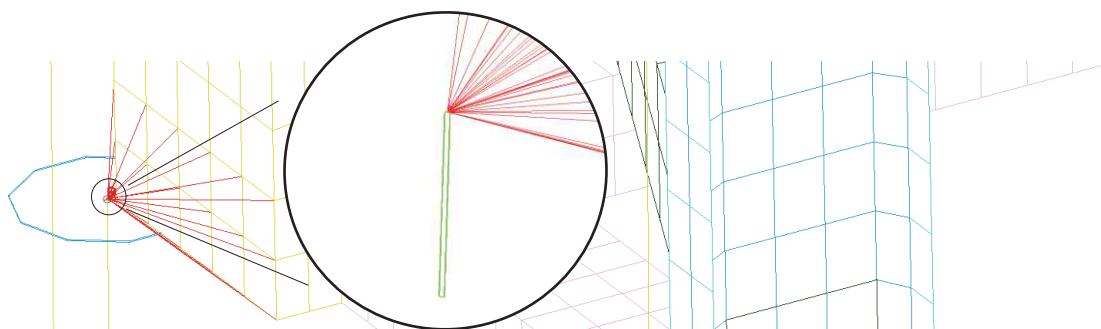


Obr. 15 Detail 4 - Náhrada uložení věže

V místě vrcholu jehlanu je vytvořen krátký prut obsahující na každém konci uzel. Prutu je přidělen profil o průměru dostatečně velkém, aby měl velkou tuhost, a tím neovlivnil výsledky. Spodnímu uzlu je omezen pohyb a rotace ve všech osách pomocí funkce Displacement Restrain. Horní uzel je svázán s konstrukcí pomocí prvku Rigid, který rozvádí reakční síly do jednotlivých uzlů viz. obr. 15.

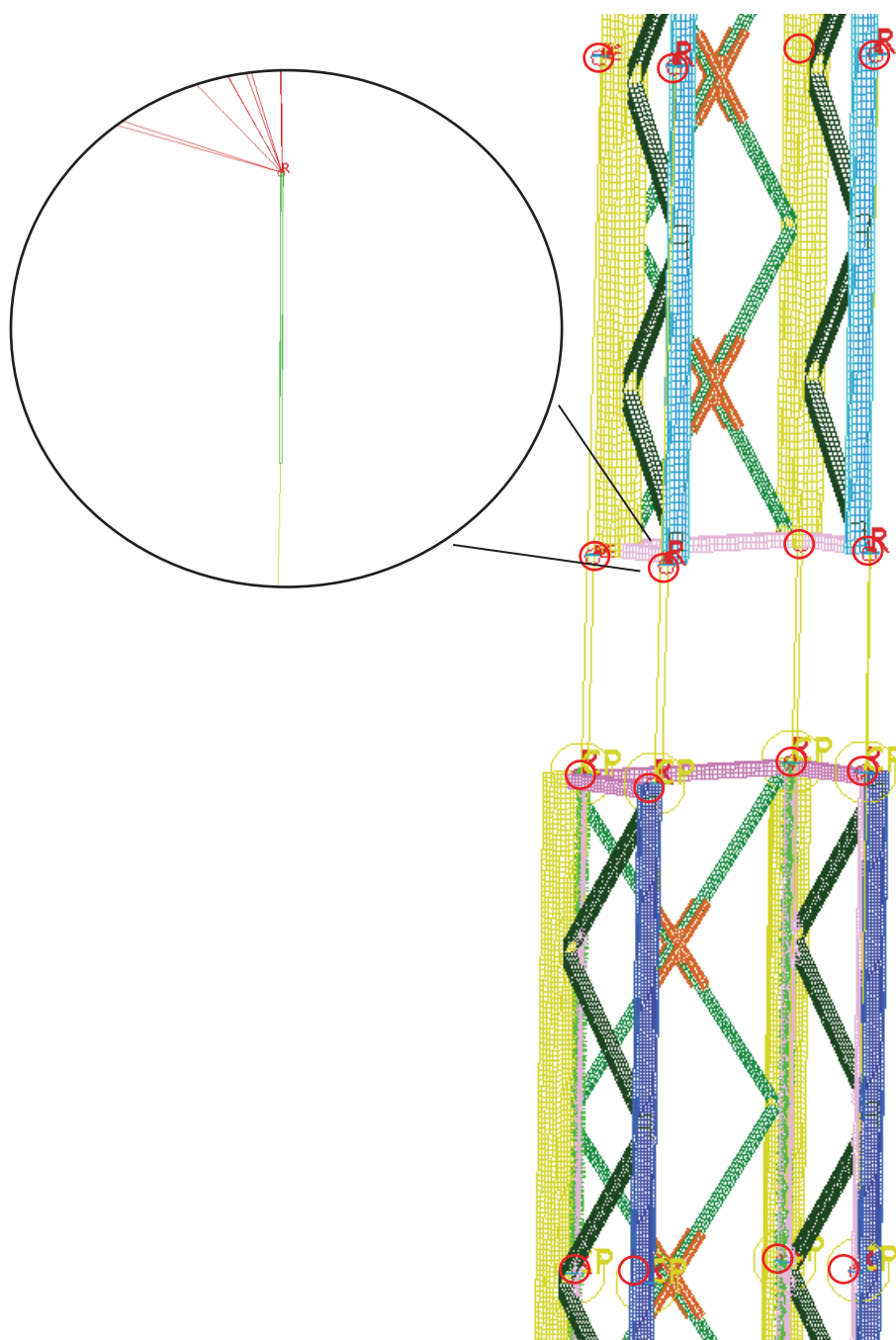
#### 5.3.4 NÁHRADA SPOJENÍ SPODNÍ A HORNÍ ČÁSTI VĚŽE (DETAIL 5 A 6)

Pro zajištění spojení je vytvořeno 16 náhrad dotyku. Každá z nich byla tvořena krátkým prutem obsahujícím na každém konci uzel. Prut je umístěn v poloviční vzdálenosti vzniklé mezi profily horní a dolní části věže při zasunutí. Prutu je přiřazen profil, jehož plocha odpovídá přibližné ploše dotyku. Jeden uzel každého prutu je svázán s konstrukcí pomocí prvku Rigid, jež je zobrazeno na Obr. 16.



Obr. 16 Detail 5 - Náhrada dotyku

Konečné spojení obou částí je realizováno pomocí prvku couple DOF, který přenáší zatížení mezi vzájemně svázanými rovinami. Prvek je připojen na volné konce vytvořených prutů. Jsou spojeny dvojce náhrad, které by sobě odpovídaly při vysunutí věže.

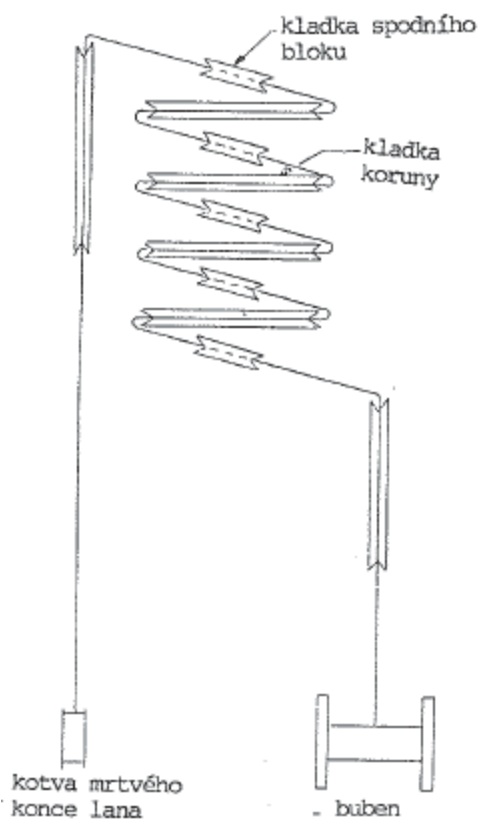


Obr. 17 Detail 6 - Umístění náhrad dotyku

## 5.4 DEFINICE ZATÍŽENÍ MKP MODELU

### 5.4.1 ZATÍŽENÍ OD BŘEMENE

Věž má být navržena s nosností 150 t. To odpovídá zatížení  $Q = 1473$  kN. Kotva mrtvého konce lana a navíjecí buben kladkostroje věže je umístěn na podvozku věže, proto se k zatížení musí přičíst i síly v obou koncích lana. Při výpočtu síly v mrtvém a tažném konci lana je zohledněn převodový poměr kladkostroje.



Obr. 18 Schéma kladkostroje [4]

#### VÝPOČET SKUTEČNÉHO ZATÍŽENÍ:

$$F_m = F_t = \frac{Q}{2 * k} = \frac{1473}{2 * 5} = 147,3 \text{ kN} \quad (1)$$

kde:  $F_m$  ... síla v mrtvém konci lana [kN]  
 $F_t$  ... síla v tažném konci lana [kN]  
 $Q$  ... síla od zatížení [kN]  
 $k$  ... počet kladek ve spodním bloku kladkostroje [-]

$$R = Q + F_m + F_t = 1473 + 147,3 + 147,3 = 1767,6 \text{ kN} \quad (2)$$

kde:  $R$  ... skutečné zatížení v koruně věže [kN]

### VÝPOČET ZATÍŽENÍ DLE NORMY

V následujících výpočtech je určeno zatížení pro ověření návrhu dle normy pro naftový a plynárenský průmysl ČSN EN ISO 13535. [5]

$$SF_D = 3,00 - \left( 0,75 * \frac{R - 1334}{3114} \right) \quad (3)$$

$$SF_D = 3,00 - \left( 0,75 * \frac{1767,6 - 1334}{3114} \right) = 2,895568$$

kde:  $SF_D$  ... bezpečnostní faktor pro rozmezí zatížení 1334 kN až 4448 kN [-]

$$R_N = 0,8 * R * SF_D = 0,8 * 1767,6 * 2,895568 = 4094,565 \text{ kN} \quad (4)$$

Tato vypočtená hodnota  $R_N$  je použita v MKP modelu jako zatížení od břemene.

#### 5.4.2 ZATÍŽENÍ OD TOP DRIVE

Maximální krouticí moment zařízení top drive je 28472 Nm. Pro zatížení modelu je použita hodnota  $M_k = 30000\text{Nm}$ .

#### 5.4.3 ZATÍŽENÍ VĚTREM

Od společnosti MND, a.s. byly obdrženy hodnoty maximálních rychlostí větru při provozu  $v = 22 \text{ m/s}$  a při mimoprovozním stavu  $v_{\max} = 40 \text{ m/s}$ .

#### VÝPOČET TLAKU OD VĚTRU:

$$P = \frac{v^2 * \rho_v}{2} = \frac{22^2 * 1,29}{2} = 312,18 \text{ Pa} \quad (4)$$

$$P_{\max} = \frac{v_{\max}^2 * \rho_v}{2} = \frac{40^2 * 1,29}{2} = 1032 \text{ Pa} \quad (5)$$

kde:  $P$  ... tlak od větru při provozu [Pa]

$P_{\max}$  ... tlak od větru při mimo provozu (maximální tlak) [Pa]

$\rho_v$  ... měrná hmotnost vzduchu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

Pro zatížení modelu je použit tlak od větru při provozu  $P = 350 \text{ Pa}$ . Pro mimoprovozní stav je tlak větru upraven dle normy pro zatížení konstrukcí – zatížení větrem ČSN EN 1991-1-4 ed.2., podle které je maximální možná hodnota tlaku od větru na území ČR  $P_{\max} = 1200 \text{ Pa}$ . [6]

Při výpočtu celkové plochy vystavené větru jsou zahrnuty veškeré plochy ve směru působení větru i ty, které jsou v zákrytu.

#### 5.4.4 ZATÍŽENÍ LEDOVKOU

Konstrukce může být zatížena sněhem, námrazou anebo ledovkou, z nichž ledovka je kvůli hmotnosti a navýšení plochy vystavené větru nejhorší, proto se budeme zabývat jen jí.

Podle normy pro zatížení konstrukcí námrazou ČSN ISO 12494 OPRAVA 1. je maximální možná tloušťka námrazy  $t = 50 \text{ mm}$  a její hustota  $\rho_l = 900 \text{ kg.m}^{-3}$ . [7]  
Při zatížení námrazou se musí uvažovat s navýšením hmotnosti konstrukce a také se zvětšením plochy vystavené větru.

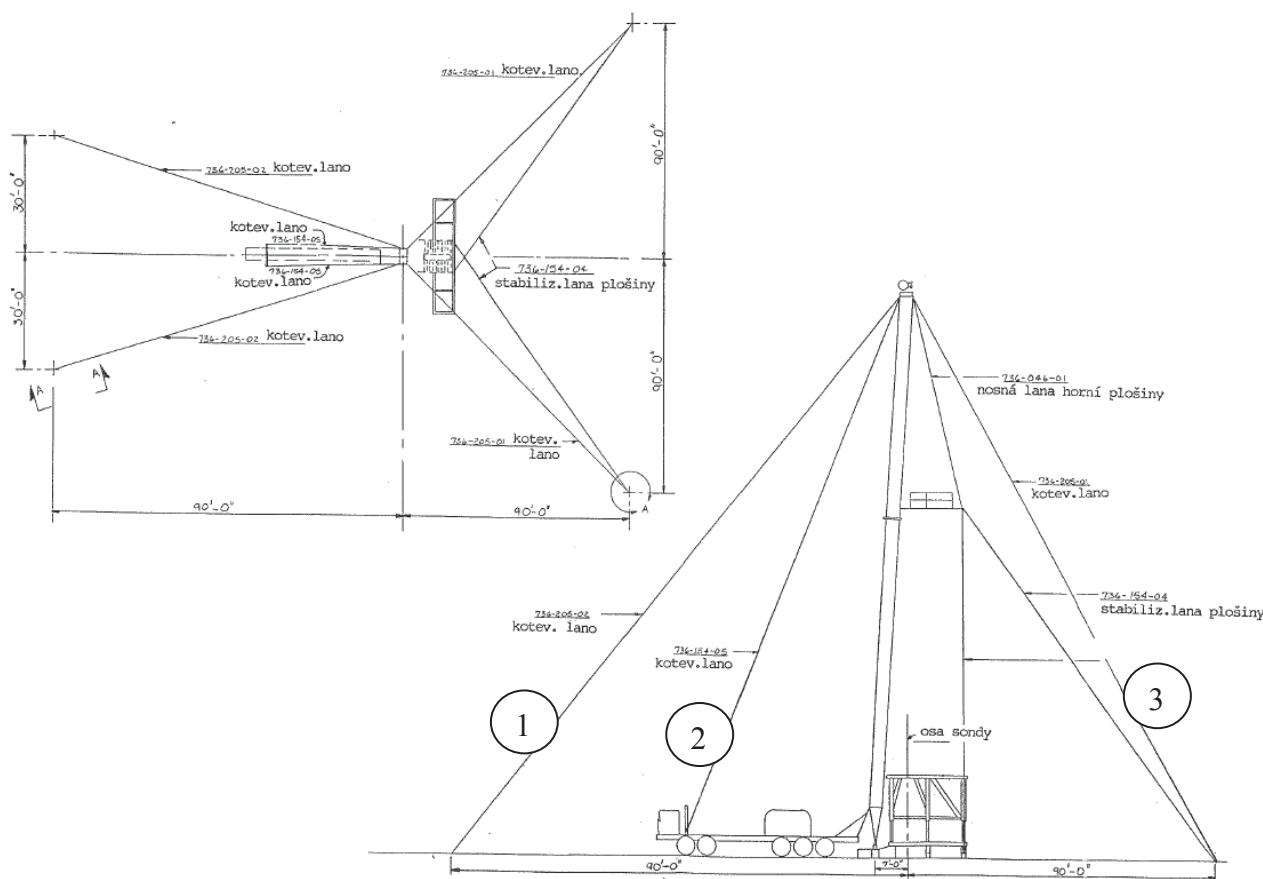
#### VÝPOČET HMOTNOSTI LEDU:

$$m_l = s * t * \rho_l = 290,467 * 0,05 * 900 = 13071 \text{ kg} \quad (6)$$

kde:  $m_l$  ... hmotnost ledu na konstrukci [kg]  
 $s$  ... celková obnažená plocha konstrukce [ $\text{m}^2$ ]

Z výpočtu je viditelné, že maximální námraza je schopna snadno navýšit hmotnost konstrukce na dvojnásobek. Zda bude při takhle extrémní námraze možné soupravu používat, bude rozhodnuto na základě posudků.

#### 5.4.5 URČENÍ TUHOS TI PRUŽIN PRO NÁHRADY KOTVÍCÍCH LAN



Obr. 19 Schema umístění kotvících lan [4]

Rozmístění, typ a předpětí kotevních lan je zachováno jako u původní věže. Jako náhrady lan jsou v modelu použity prvky spring (pružina) a pro ty je nutné spočítat odpovídající tuhost. Délky lan jsou následující:  $l_1 = 44 \text{ m}$ ,  $l_2 = 35 \text{ m}$ ,  $l_3 = 50 \text{ m}$ . Předpětí lan:  $F_1 = 5,8 \text{ kN}$ ,  $F_2 = 18 \text{ kN}$ ,  $F_3 = 5 \text{ kN}$ . Plochy lan:  $S_1 = S_2 = 283 \text{ mm}^2$ ,  $S_3 = 177 \text{ mm}^2$ . Modul pružnosti  $E_L = 150000 \text{ MPa}$ .

**Tuhost lan.**

$$k_1 = \frac{E_L * S_1}{l_1} = \frac{150000 * 283}{44} = 964772,7 \text{ N.m}^{-1} \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{E_L * S_2}{l_2} = \frac{150000 * 283}{35} = 1212857,1 \text{ N.m}^{-1} \quad (8)$$

$$k_3 = \frac{E_L * S_3}{l_3} = \frac{150000 * 177}{50} = 531000 \text{ N.m}^{-1} \quad (9)$$

kde:  $k_1$  ... tuhost lana 1 [N.m<sup>-1</sup>]  
 $k_2$  ... tuhost lana 2 [N.m<sup>-1</sup>]  
 $k_3$  ... tuhost lana 3 [N.m<sup>-1</sup>]

Síly od předpětí lan jsou rozloženy do hlavních os pomocného souřadného systému. Pomocný souřadný systém je znázorněn na Obr. 10 červenou barvou.

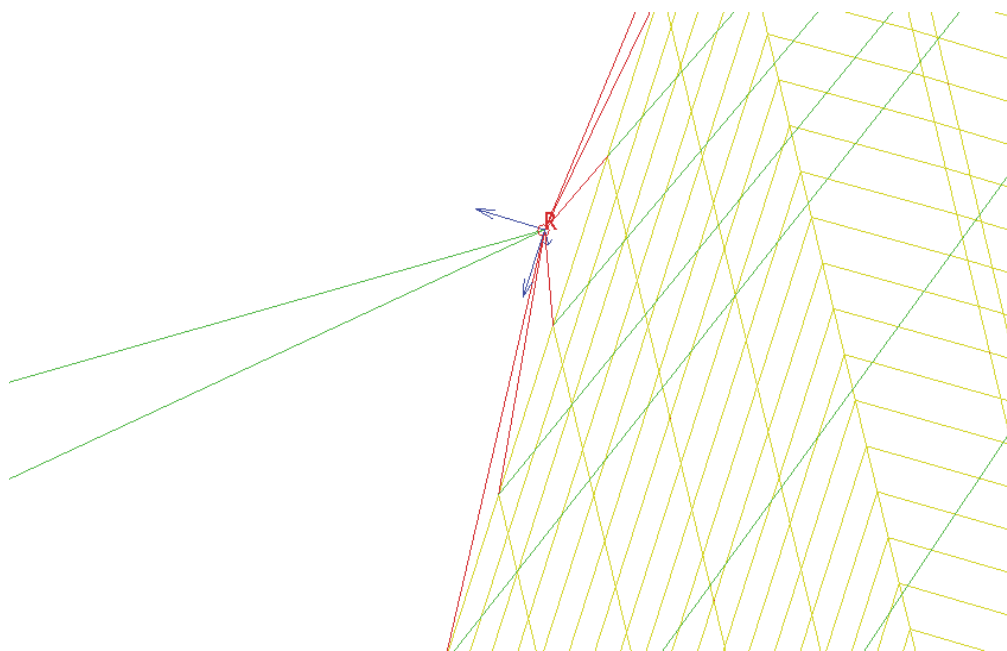
**Složky sil od lan**

Lana 1 :  $F_{1x} = -3,6$  kN,  $F_{1y} = -4,4$  kN,  $F_{1z} = \pm 1,2$  kN

Lana 2 :  $F_{2x} = -4,35$  kN,  $F_{2y} = -17,47$  kN,

Lana 3 :  $F_{3x} = 2,68$  kN,  $F_{3y} = -3,28$  kN,  $F_{3z} = \pm 2,67$  kN

Síly byly umístěny v MKP modelu do uzlů tvořících náhradu uchycení jednotlivých lan. Síly jsou zobrazeny modrými šipkami na obr. 20.



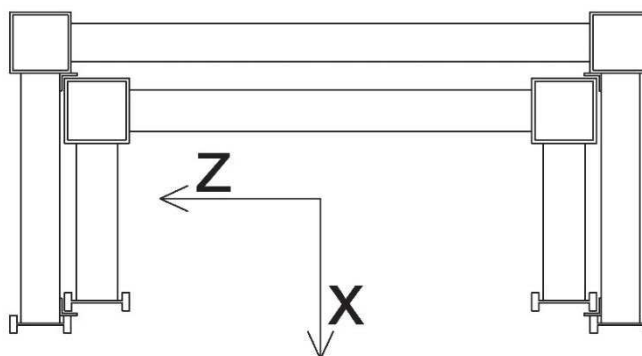
Obr. 20 Složky sil od lan

## 5.5 ZATĚŽOVACÍ STAVY

Tab. 2 Zatěžovací stavy

| Název        | Břemeno | Krut | Vítr (v) | Vítr (v <sub>max</sub> ) | Námraza |
|--------------|---------|------|----------|--------------------------|---------|
| Provoz_1     | 1       | 1    | x+       | 0                        | 0       |
| Provoz_2     | 1       | 1    | x-       | 0                        | 0       |
| Provoz_3     | 1       | 1    | z+       | 0                        | 0       |
| Provoz_4     | 1       | 1    | z-       | 0                        | 0       |
| Provoz_5     | 1       | 1    | x+       | 0                        | 1       |
| Provoz_6     | 1       | 1    | x-       | 0                        | 1       |
| Provoz_7     | 1       | 1    | z+       | 0                        | 1       |
| Provoz_8     | 1       | 1    | z-       | 0                        | 1       |
| Mimoprovoz_1 | 0       | 0    | 0        | x+                       | 0       |
| Mimoprovoz_2 | 0       | 0    | 0        | x-                       | 0       |
| Mimoprovoz_3 | 0       | 0    | 0        | z+                       | 0       |
| Mimoprovoz_4 | 0       | 0    | 0        | x+                       | 1       |
| Mimoprovoz_5 | 0       | 0    | 0        | x-                       | 1       |
| Mimoprovoz_6 | 0       | 0    | 0        | z+                       | 1       |

Zatížení, která jsou v daném stavu aktivní, mají hodnotu 1, naopak neaktivní hodnotu 0. U větru byl namísto hodnoty 1 použit identifikátor určující směr větru vůči souřadnému systému věže viz. Obr. 21.

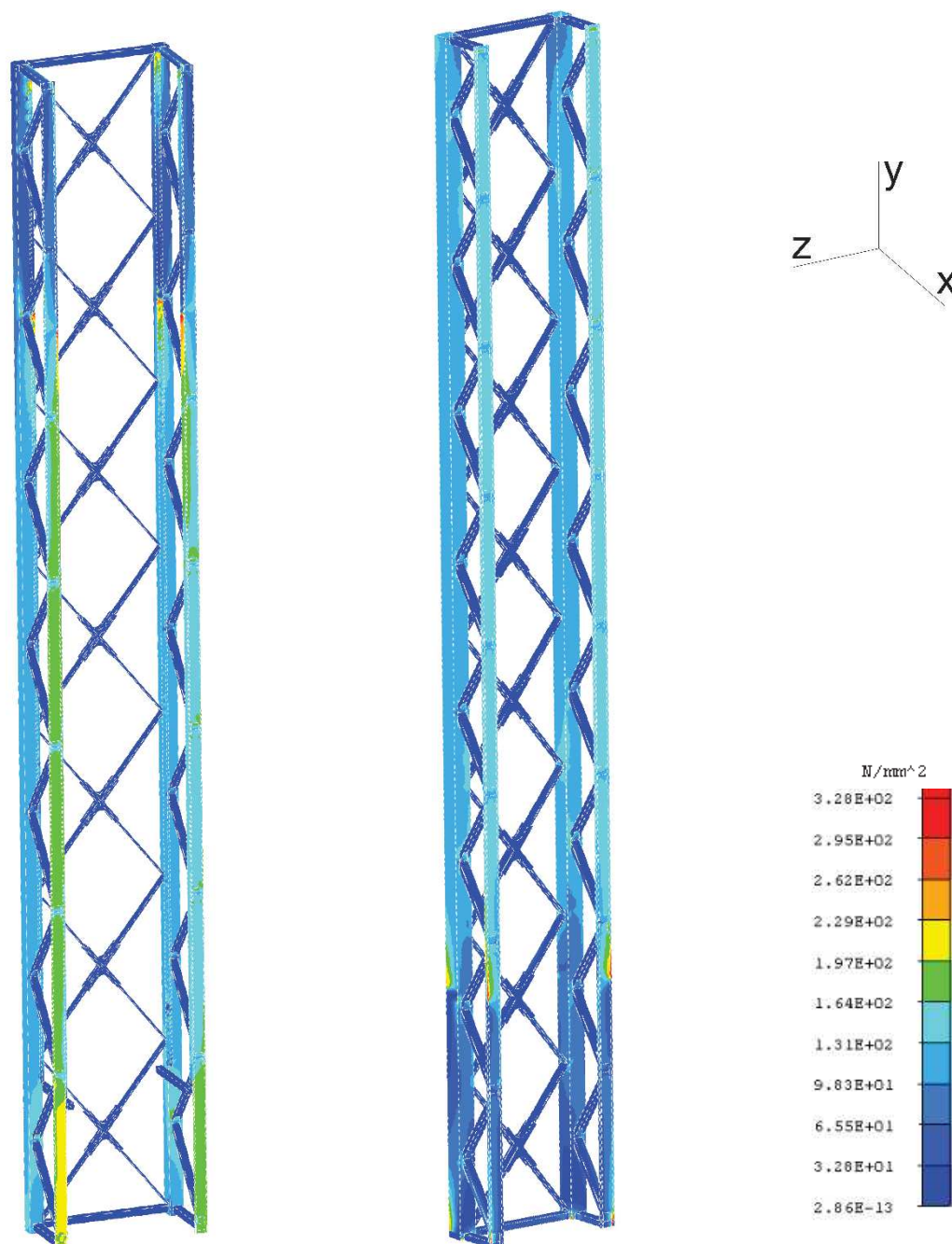


Obr. 21 Souřadný systém věže

## 6 POSOUZENÍ KONSTRUKCE NA ZÁKLADĚ MKP

Po analýze výsledků všech zatěžovacích stavů byl vyhodnocen jako nejvíce nepříznivý zatěžovací stav - Provoz\_7. Pro posouzení konstrukce se vycházelo jen z jeho výsledků, což zajistí, že pro ostatní stavy bude konstrukce vyhovující. Pro mimo provozní stavy byly hodnoty napětí přibližně o řád nižší.

**Zatěžovací stav Provoz\_7:** věž zatížena břemenem, vektor momentu směřuje v kladném směru osy y, konstrukce je pokryta ledovkou a fouká na ni vítr v kladném směru osy z.



Obr. 22 Výsledná napětí Von Mises pro zatěžovací stav - Provoz\_7. Spodní díl v levo. Rozsah napětí 0 – 328 MPa.

Červeně zbarvená místa jsou ovlivněná náhradami a jejich výsledek je zkruslený. Maximální napětí vzniká na levém předním I profilu (profil A viz. Obr. 7), jehož místu je na Obr. 22 přiřazena žlutá barva. Maximální hodnota napětí v tomhle místě je 190 MPa.

### VZPĚRNÁ ÚNOSNOST PRUTŮ

Následující posouzení bylo provedeno dle normy pro navrhování ocelových konstrukcí ČSN EN 1993-1-1 ed. 2.[8]

Jako materiál konstrukce je zvolena ocel S460 NL EN 10025-3 s následujícími vlastnostmi: mezi pevnosti v kluzu  $f_y = 460$  MPa, modul pružnosti v tahu a tlaku  $E = 210000$  N.mm<sup>-2</sup>.

Ze skupin stejných prutů byl vybrán ten s nejvíce nepříznivými hodnotami a ten byl následně posouzen.

#### Vzpěrná únosnost: [8]

Tlačené pruty se posuzují na vzpěr podle následující podmínky:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (10)$$

kde:  $N_{Ed}$  ... je hodnota tlakové síly [N]  
 $N_{b,Rd}$  ... návrhová vzpěrná únosnost tlačeného prutu [N]

Návrhová vzpěrná únosnost tlačeného prutu je pak definována vztahem:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * S_A * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (11)$$

kde:  $\chi$  ... součinitel vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení [-]  
 $S_A$  ... plocha průřezu [mm<sup>2</sup>]  
 $f_y$  ... mez kluzu [MPa]  
 $\gamma_{M1}$  ... dílčí součinitel únosnosti průřezu při posuzování stability prutů [-]

Vzorec pro výpočet součinitele vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení je následující:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (12)$$

$$\text{kde: } \phi = 0,51 + \alpha * \bar{\lambda} - 0,2 + \bar{\lambda}^2 \quad (13)$$

kde:  $\bar{\lambda}$  ... poměrná štíhlost [-]  
 $\alpha$  ... součinitel imperfekce [-]

Poměrná štíhlost je definována:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} * \frac{1}{\lambda_1} \quad (14)$$

kde:  $L_{cr}$  ... vzpěrná délka [mm]  
 $i$  ... poloměr setrvačnosti plného průřezu k příslušné ose [mm]

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (15)$$

kde:  $E$  ... modul pružnosti v tahu a tlaku [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]

a poloměr setrvačnosti:

$$i = \sqrt{\frac{J_{min}}{A}} \quad (16)$$

kde:  $J_{min}$  ... minimální kvadratický moment [ $\text{mm}^4$ ] [10]

### Tlaková síla

Pro zjištění tlakové síly  $N_{Ed}$  [N] je nutné každé skupině prutů v MKP modelu vytvořit souřadný systém. Jednotlivé souřadné systémy jsou vytvořeny tak, že osa (z) je totožná s osou prutů. Směr osy (z) je zvolen tak, aby hodnoty napětí v tlaku byly kladné. Následně jsou vypsány veškeré hodnoty napětí v ose (z) pro každý zatěžovací stav. Pro každý prut je zvolena nejvíce nepříznivá hodnota a ta je následně vydělena plochou profilu daného prutu. Výsledkem je hodnota tlakové síly  $N_{Ed}$  [N].

### POSOUZENÍ HLAVNÍHO PÁSU DOLNÍ VĚŽE – I PROFIL

Tab. 3 Vstupní hodnoty – I profil

| $N_{Ed}$        | A                          | $f_y$        | $\gamma_{M1}$ | $\alpha$    | $L_{cr}$     | E               | $J_{min}$                    |
|-----------------|----------------------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|------------------------------|
| 854627,6<br>[N] | 10564<br>[ $\text{mm}^2$ ] | 460<br>[MPa] | 1<br>[-]      | 0,13<br>[-] | 2300<br>[mm] | 210000<br>[MPa] | 5035040<br>[ $\text{mm}^4$ ] |

Tab. 4 Výsledky – I profil

| $i$               | $\lambda_1$      | $\bar{\lambda}$  | $\phi$           | $\chi$           | $N_{b,Rd}$       | POSUDEK   |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 21,831685<br>[MM] | 67,115157<br>[-] | 1,5697119<br>[-] | 2,9780581<br>[-] | 0,1815266<br>[-] | 882117,45<br>[N] | 0,9688365 |

Prut dle normy [8] vyhovuje.

**POSOUZENÍ HLAVNÍHO PÁSU DOLNÍ VĚŽE – UZAVŘENÝ ČTVERCOVÝ PROFIL (JÄCKEL)***Tab. 5 Vstupní hodnoty - čtvercový profil*

| $N_{Ed}$       | A                          | $f_y$        | $\gamma_{M1}$ | $\alpha$    | $L_{cr}$     | E               | $J_{min}$                      |
|----------------|----------------------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|--------------------------------|
| 1390840<br>[N] | 9592<br>[mm <sup>2</sup> ] | 460<br>[MPa] | 1<br>[-]      | 0,49<br>[-] | 2300<br>[mm] | 210000<br>[MPa] | 76168473<br>[mm <sup>4</sup> ] |

*Tab. 6 Výsledky - čtvercový profil*

| i                 | $\lambda_1$      | $\bar{\lambda}$  | $\phi$          | $\chi$           | $N_{b,Rd}$       | POSUDEK   |
|-------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------|
| 89,111353<br>[mm] | 67,115157<br>[-] | 0,3845689<br>[-] | 0,646332<br>[-] | 0,8577766<br>[-] | 3784784,9<br>[N] | 0,3674819 |

Prut dle normy [8] vyhovuje.

**POSOUZENÍ BOČNÍHO ZAVĚTROVÁNÍ DOLNÍ VĚŽE – U PROFIL***Tab. 7 Vstupní hodnoty - U profil*

| $N_{Ed}$       | A                          | $f_y$        | $\gamma_{M1}$ | $\alpha$    | $L_{cr}$     | E               | $J_{min}$                    |
|----------------|----------------------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|------------------------------|
| 81993,6<br>[N] | 2880<br>[mm <sup>2</sup> ] | 460<br>[MPa] | 1<br>[-]      | 0,49<br>[-] | 1520<br>[mm] | 210000<br>[MPa] | 819832<br>[mm <sup>4</sup> ] |

*Tab. 8 Výsledky - U profil*

| i                 | $\lambda_1$      | $\bar{\lambda}$  | $\phi$           | $\chi$           | $N_{b,Rd}$       | POSUDEK   |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 16,871985<br>[mm] | 67,115157<br>[-] | 1,3423223<br>[-] | 2,7695669<br>[-] | 0,1926003<br>[-] | 255156,82<br>[N] | 0,3213459 |

Prut dle normy [8] vyhovuje.

**POSUDEK ZADNÍHO ZAVĚTROVÁNÍ DOLNÍ VĚŽE – U PROFIL***Tab. 9 Vstupní hodnoty - U profil*

| $N_{Ed}$        | A                          | $f_y$        | $\gamma_{M1}$ | $\alpha$    | $L_{cr}$     | E               | $J_{min}$                   |
|-----------------|----------------------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|-----------------------------|
| 40611,76<br>[N] | 1316<br>[mm <sup>2</sup> ] | 460<br>[MPa] | 1<br>[-]      | 0,49<br>[-] | 1179<br>[mm] | 210000<br>[MPa] | 70263<br>[mm <sup>4</sup> ] |

Tab. 10 Výsledky - U profil

| i                 | $\lambda_1$      | $\bar{\lambda}$  | $\phi$           | $\chi$           | $N_{b,Rd}$       | POSUDEK   |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 7,3069376<br>[mm] | 67,115157<br>[-] | 2,4041292<br>[-] | 7,2678604<br>[-] | 0,0707886<br>[-] | 42852,569<br>[N] | 0,9477089 |

Prut dle normy [8] vyhovuje.

#### POSOUZENÍ HLAVNÍHO PÁSU HORNÍ VĚŽE – I PROFIL

Tab. 11 Vstupní hodnoty - I profil

| $N_{Ed}$         | A                           | $f_y$        | $\gamma_{M1}$ | $\alpha$    | $L_{cr}$     | E               | $J_{min}$                       |
|------------------|-----------------------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|---------------------------------|
| 938616,66<br>[N] | 11178<br>[mm <sup>2</sup> ] | 460<br>[MPa] | 1<br>[-]      | 0,13<br>[-] | 2150<br>[mm] | 210000<br>[MPa] | 5259353,3<br>[mm <sup>4</sup> ] |

Tab. 12 Výsledky - I profil

| i                 | $\lambda_1$      | $\bar{\lambda}$ | $\phi$           | $\chi$           | $N_{b,Rd}$       | POSUDEK   |
|-------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 21,691227<br>[mm] | 67,115157<br>[-] | 1,476841<br>[-] | 2,6830486<br>[-] | 0,2031253<br>[-] | 1044446,1<br>[N] | 0,8986741 |

Prut dle normy [8] vyhovuje.

#### POSOUZENÍ HLAVNÍHO PÁSU HORNÍ VĚŽE – UZAVŘENÝ ČTVERCOVÝ PROFIL (JÄCKEL)

Tab. 13 Vstupní hodnoty - čtvercový profil

| $N_{Ed}$         | A                           | $f_y$        | $\gamma_{M1}$ | $\alpha$    | $L_{cr}$     | E               | $J_{min}$                      |
|------------------|-----------------------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|--------------------------------|
| 1611219,5<br>[N] | 11088<br>[mm <sup>2</sup> ] | 460<br>[MPa] | 1<br>[-]      | 0,49<br>[-] | 2150<br>[mm] | 210000<br>[MPa] | 98877240<br>[mm <sup>4</sup> ] |

Tab. 14 Výsledky - čtvercový profil

| i                 | $\lambda_1$      | $\bar{\lambda}$  | $\phi$           | $\chi$           | $N_{b,Rd}$     | POSUDEK   |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|-----------|
| 94,432516<br>[mm] | 67,115157<br>[-] | 0,3392316<br>[-] | 0,5913016<br>[-] | 0,9297007<br>[-] | 4741920<br>[N] | 0,3397821 |

Prut dle normy [8] vyhovuje.

**POSOUZENÍ BOČNÍHO ZAVĚTROVÁNÍ HORNÍ VĚŽE – U PROFIL**

Tab. 15 Vstupní hodnoty - U profil

| $N_{Ed}$      | A                          | $f_y$        | $\gamma_{M1}$ | $\alpha$    | $L_{cr}$     | E               | $J_{min}$                     |
|---------------|----------------------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-----------------|-------------------------------|
| 280540<br>[N] | 3380<br>[mm <sup>2</sup> ] | 460<br>[MPa] | 1<br>[-]      | 0,49<br>[-] | 1250<br>[mm] | 210000<br>[MPa] | 1128660<br>[mm <sup>4</sup> ] |

Tab. 16 Výsledky - U profil

| i                 | $\lambda_1$      | $\bar{\lambda}$  | $\phi$           | $\chi$          | $N_{b,Rd}$       | POSUDEK   |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------|
| 18,273562<br>[mm] | 67,115157<br>[-] | 1,0192159<br>[-] | 1,8482168<br>[-] | 0,294985<br>[-] | 458642,67<br>[N] | 0,6116744 |

Prut dle normy [8] vyhovuje.

**POSUDEK ZADNÍHO ZAVĚTROVÁNÍ HORNÍ VĚŽE – U PROFIL**

Tab. 17 Vstupní hodnoty - U profil

| $N_{Ed}$        | A                          | $f_y$        | $\gamma_{M1}$ | $\alpha$     | $L_{cr}$    | E               | $J_{min}$                   |
|-----------------|----------------------------|--------------|---------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------------------|
| 58212,28<br>[N] | 1498<br>[mm <sup>2</sup> ] | 460<br>[MPa] | 1<br>[-]      | 0,49 [-<br>] | 992<br>[mm] | 210000<br>[MPa] | 71802<br>[mm <sup>4</sup> ] |

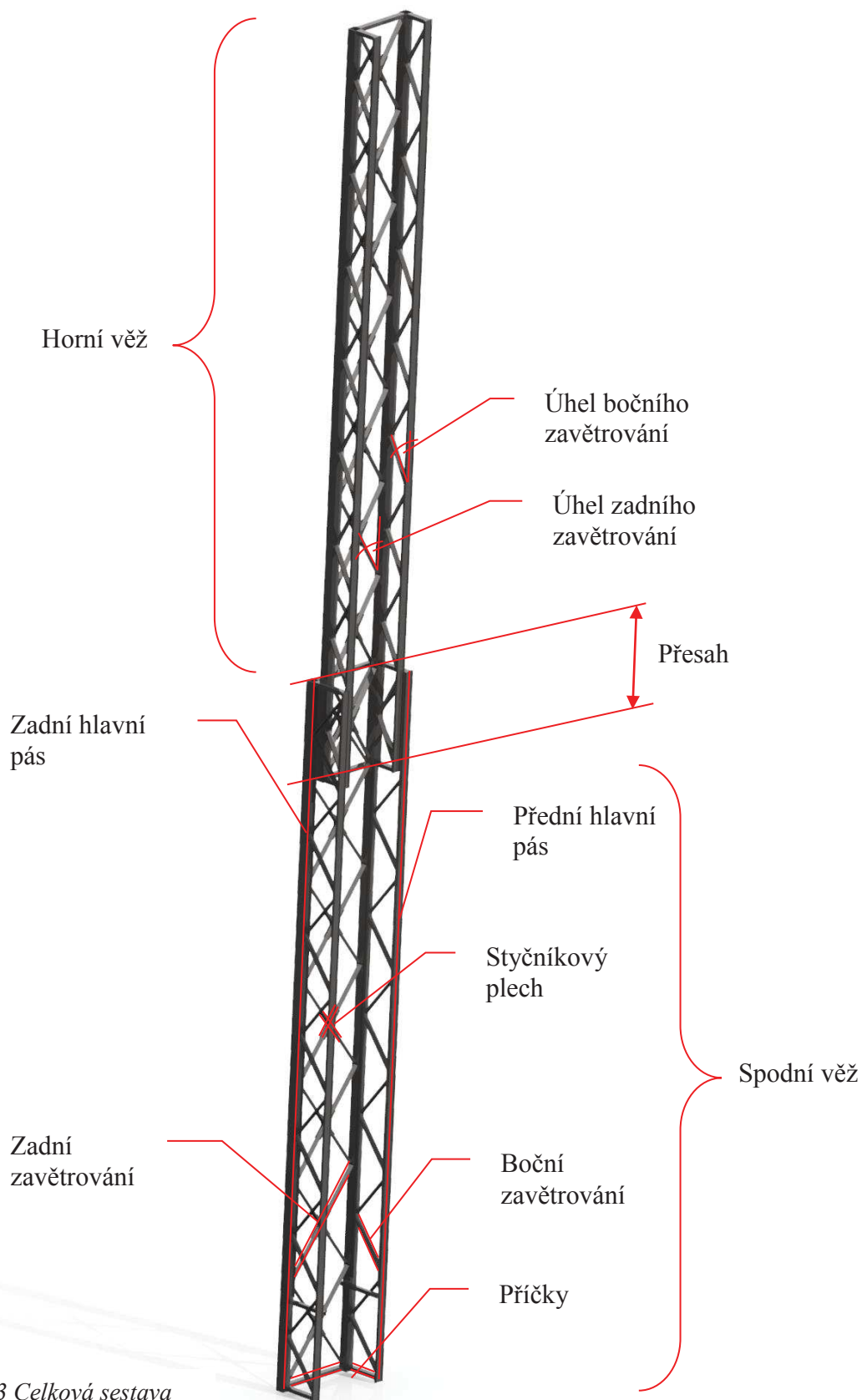
Tab. 178 Výsledky - U profil

| i                 | $\lambda_1$      | $\bar{\lambda}$  | $\phi$           | $\chi$           | $N_{b,Rd}$       | POSUDEK   |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 6,9232875<br>[mm] | 67,115157<br>[-] | 2,1349057<br>[-] | 5,9139262<br>[-] | 0,0874963<br>[-] | 60291,922<br>[N] | 0,9655071 |

Prut dle normy [8] vyhovuje.

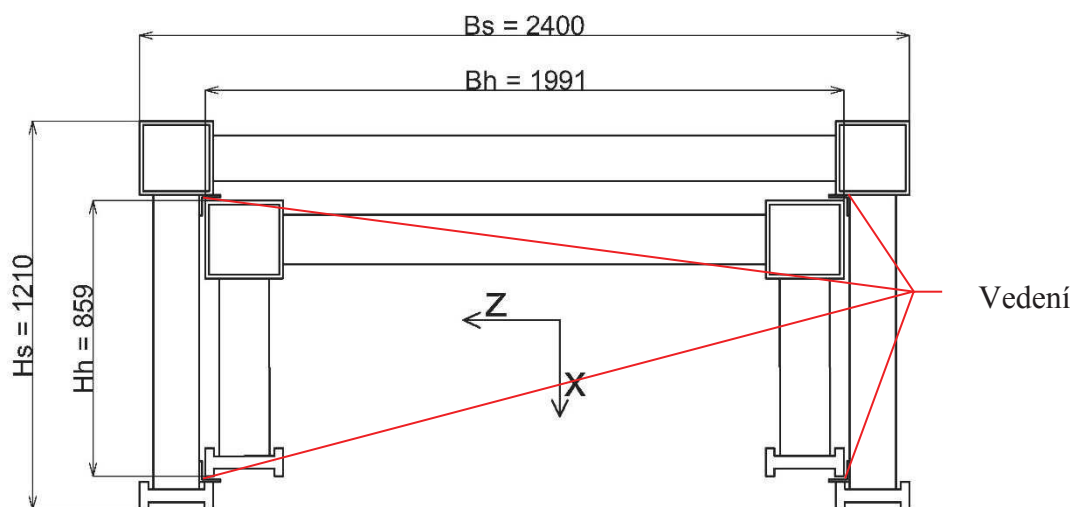
## 7 KONEČNÝ NÁVRH VĚŽE

Celá konstrukce je navržena pro ocel S460 NL EN 10025-3



Obr. 23 Celková sestava

## 7.1 PARAMETRY SPODNÍ A HORNÍ VĚŽE



Obr. 24 Vnější rozměry spodního a horního dílu [mm]

|         |                               |                        |
|---------|-------------------------------|------------------------|
| Rozměry | původní věže: $Hs' = 1100$ mm | návrhu: $Hs = 1210$ mm |
|         | $Bs' = 2400$ mm               | $Bs = 2400$ mm         |
|         | $Hh' = 990$ mm                | $Hh = 859$ mm          |
|         | $Bh' = 2000$ mm               | $Bh = 1991$ mm         |

Vnější rozměr HS musí být navýšen o 110 mm kvůli použití rozměrnějšího zadního pásu (B) oproti původní věži. Složená věž je uložena na podvozku na zadní stěně, proto navýšení nebude činit žádné problémy při uložení věže při převozu.

Rozměry horní věže musely být upraveny tak, aby bylo umožněno zasunutí dílů do sebe.

### Sodní věž

Výška: 17876 mm  
Hmotnost: 7280 kg

### Horní věž

Výška: 18920 mm  
Hmotnost: 7378 kg

Přesah obou věží je 3800 mm a celková hmotnost sestavy činí 14658 kg.

## 7.2 VEDENÍ

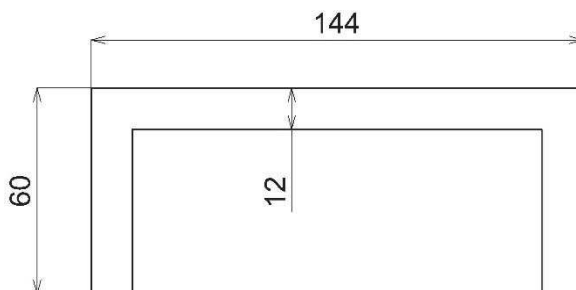
Pro vedení je použit rovnoramenný L profil ČSN 425541, L 65x65x8. Vedení je přivařeno v každém rohu spodní věže. Vůle mezi vedením a horní věží je 10 mm. [11]

## 7.3 PŘÍČKY

Na obou koncích věže, a to jak na spodním tak i na dolním dílu, je použit stejný profil – dutý svařovaný černý se čtvercovým průřezem dle EN 10219, rozměr 100x5. [11]

## 7.4 BOČNÍ ZAVĚTROVÁNÍ SPODNÍ VĚŽE

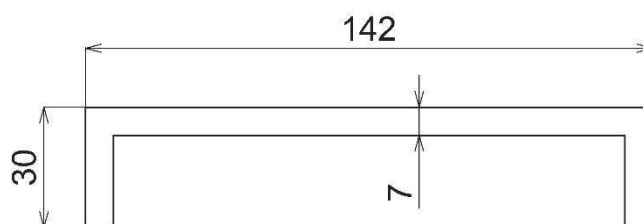
U bočního zavětrování spodní věže se nejedná o normalizovaný profil, proto je nutné jej vyhotovit, nejvhodněji jako ohýbaný.



Obr. 25 boční zavětrování spodní věže [mm]

## 7.5 ZADNÍ ZAVĚTROVÁNÍ SPODNÍ VĚŽE

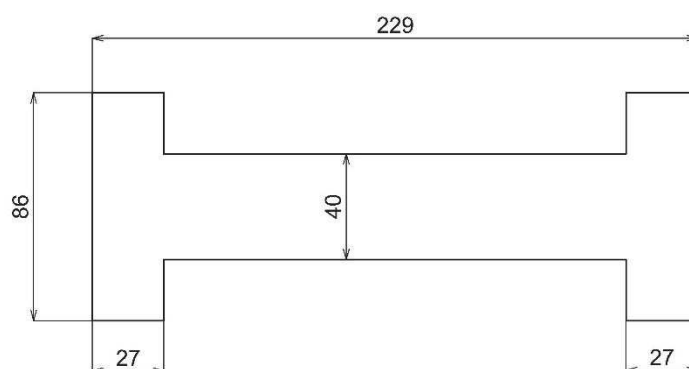
Obdobně je nutné vyrobit i zadní zavětrování.



Obr. 26 Zadní zavětrování spodní věže [mm]

## 7.6 PŘEDNÍ HLAVNÍ PÁS SPODNÍ VĚŽE

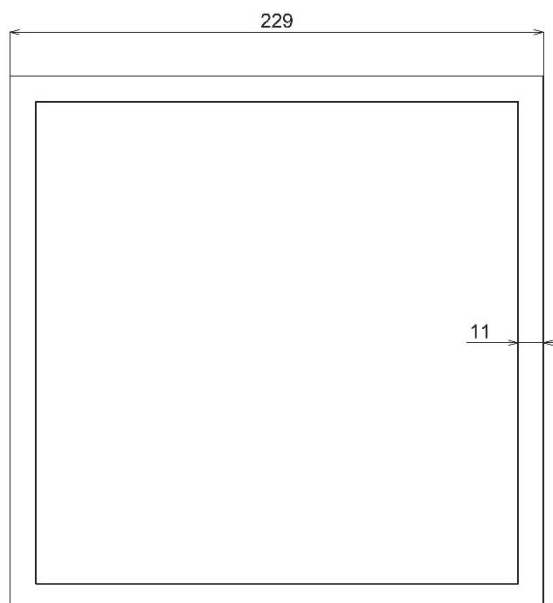
Přední hlavní pás opět není normalizovaný profil, tudíž je nutné jej vyhotovit, a to nejvhodněji jako válcovaný.



Obr. 27 Přední hlavní pás spodní věže [mm]

## 7.7 ZADNÍ HLAVNÍ PÁS SPODNÍ VĚŽE

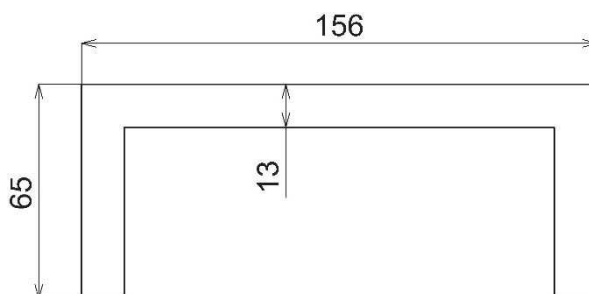
U zadního hlavního pásu se opět nejedná o normalizovaný profil, tedy je nutné jej vyhotovit, nejlépe jako svařovaný



Obr. 28 Zadní hlavní pás spodní věže [mm]

## 7.8 BOČNÍ ZAVĚTROVÁNÍ HORNÍ VĚŽE

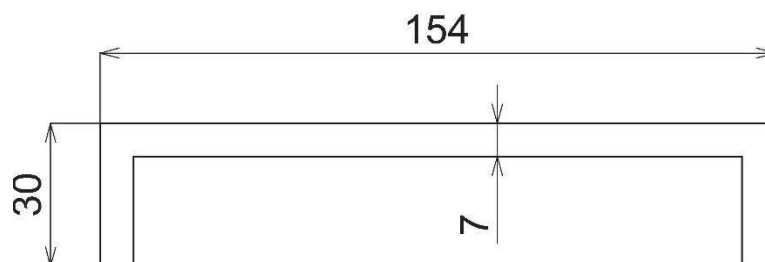
Nejedná se o normalizovaný profil, proto je nutné jej vyhotovit, nejlépe jako ohýbaný.



Obr. 29 Boční zavětrování horní věže [mm]

## 7.9 ZADNÍ ZAVĚTROVÁNÍ HORNÍ VĚŽE

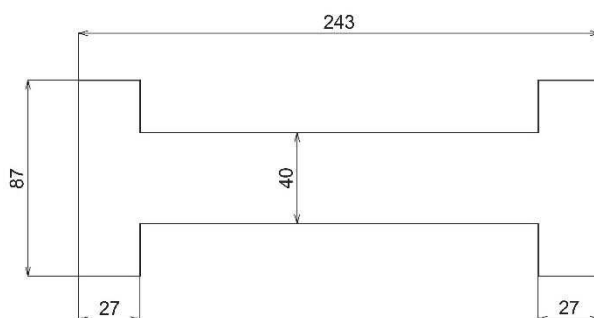
Tento díl opět není normalizovaný, tudíž je nejlepší varianta jej vyrobit, nejlépe jako ohýbaný.



Obr. 30 Zadní zavětrování horní věže [mm]

### 7.10 PŘEDNÍ HLAVNÍ PÁS HORNÍ VĚŽE

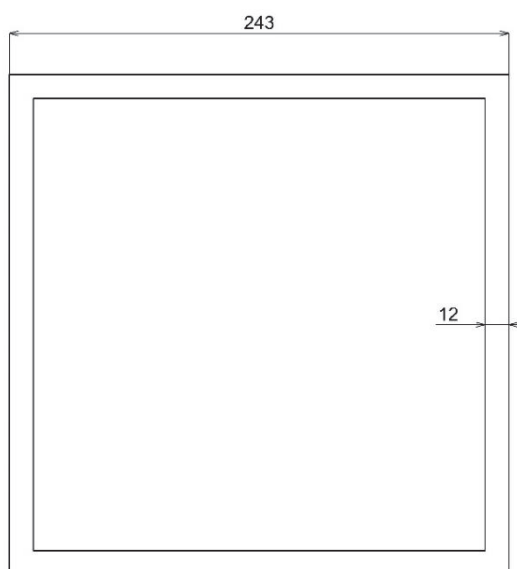
Tento díl je nejlépe vyhotovit jako válcovaný, protože se nejedná o normalizovaný profil.



Obr. 31 Přední hlavní pás horní věže [mm]

### 7.11 ZADNÍ HLAVNÍ PÁS HORNÍ VĚŽE

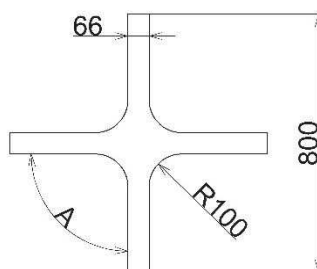
Nejedná se o normalizovaný profil, tudíž je nutné jej vyhotovit, nejvhodněji jako svařovaný.



Obr. 32 Zadní hlavní pás horní věže [mm]

### 7.12 STYČNÍKOVÝ PLECH PRO SPODNÍ I HORNÍ VĚŽ

Styčnickový plech má tloušťku 7 mm a je nutné dodržet jen tloušťku plechu. Ostatní rozměry jsou pouze orientační a je možno nahradit za čtvercový nebo obdélníkový tvar. Úhel A je závislý na úhlu zavětrování.



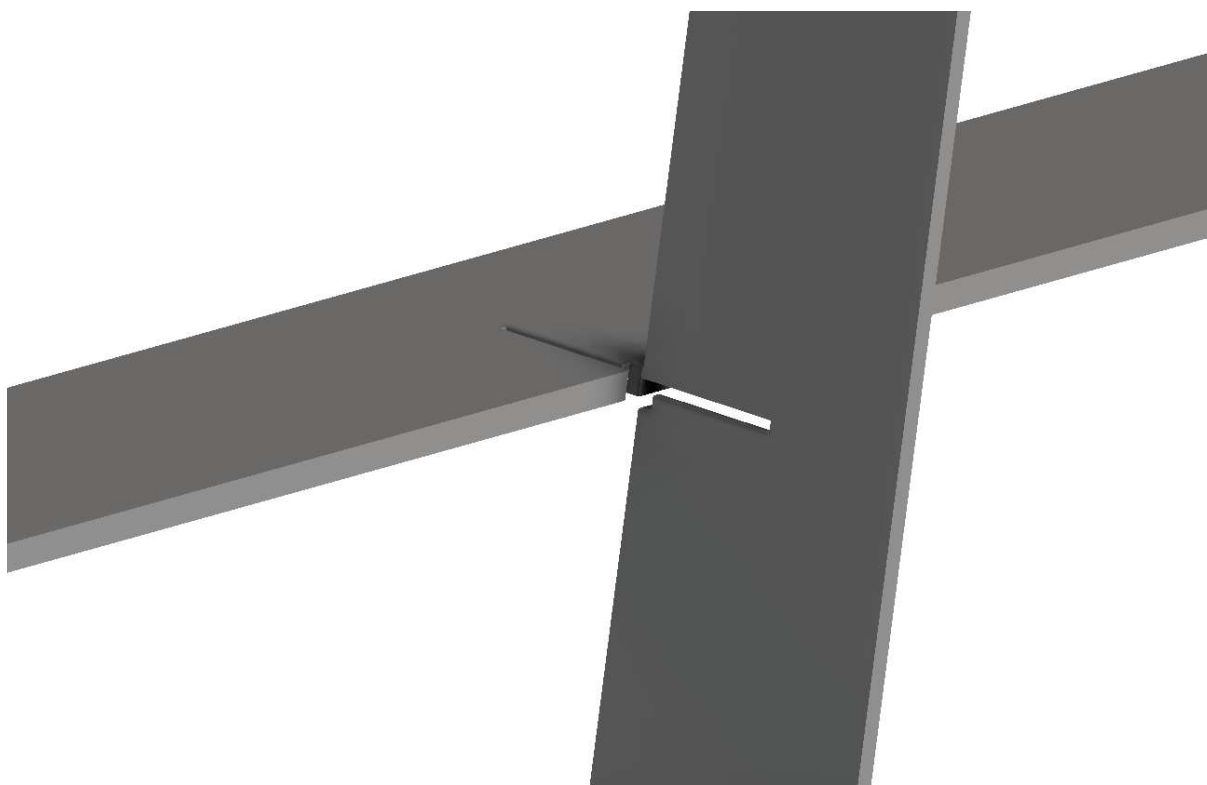
Obr. 33 Styčnickový plech

### 7.13 ÚHLY ZAVĚTROVÁNÍ

- Úhel bočního zavětrování spodní věže:  $38^\circ$
- Úhel zadního zavětrování spodní věže:  $38^\circ$
- Úhel bočního zavětrování horní věže:  $28^\circ$
- Úhel zadního zavětrování horní věže:  $33^\circ$

### 7.14 KŘÍŽENÍ ZADNÍHO ZAVĚTROVÁNÍ

Zavětrování do sebe budou vsunuta, jak reprezentuje obrázek, a poté mezi sebou svařena. Následně spoji bude dodána tuhost přivařením dvou styčnickových plechů z každé strany.



*Obr. 34 Křížení zadního zavětrování*

## ZÁVĚR

Navržená věž splňuje požadavek na hmotnost, tj. hmotnost musí být nižší než 15000 kg. Tento návrh má hmotnost 14658 kg. Posudky zadního zavětrování a předních pásů jsou na hranici vyhovění, avšak konstrukce byla posuzována při extrémním stavu, tzn. 50 mm silnou ledovku po obvodu všech prutů a pásu na konstrukci. Boční vítr o rychlosti 23 m/s, jehož účinek na konstrukci je znásobený zvětšenou plochou díky ledovce. Tenhle extrémní stav je méně pravděpodobný a dá se předpokládat, že při tvorbě takhle velké námrazy nebude souprava v provozu.

Vzhledem k tomu, že důležité rozměry a hmotnost věže zůstaly stejné jako u věže původní, je možné užít stejné konstrukční řešení uchycení k podvozku a využít stejné konstrukce zámků při vysunutí věže.

Jedná se o první návrh konstrukce, tudíž ne o finální a použitelný. Na konstrukci není přesně navrženo uchycení k podvozku, zakomponování zámku vysunutých věží, uložení kladkostroje a umístění vedení pro top drive. Veškeré tyto konstrukční úkony by vedly k zasažení do konstrukce a k její změně, což by znamenalo nový přepočet a novou optimalizaci. Návrh této věže slouží jako ukazatel směru, kterým se design konstrukce má ubírat.

Vzhledem k časově náročné optimalizaci konstrukce by řešení konstrukčních úkonů, zmíněných v odstavci výše, přesahovalo časové možnosti diplomové práce.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Technika a technologie hlubinného vrtání. Geologie.vsb.cz [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2006 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/TECHHLD0B/hlubinneVrtani/vrtani/technikaPraci.html#h3>
- [2] Trailer mounted, fast moving, automatic, hydraulic rotary drilling rig. Iceland drilling [online]. Iceland: ICELAND DRILLING, 2006 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.jardboranir.is/equipment/jotunn/>
- [3] Horní pohon Canrig [online]. Russia, Tumeň: OILLINK, 2015 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://onerig.com/index.php?id=11>
- [4] IDECO. BIR - 7585: Výkresová dokumentace. USA.
- [5] ČSN EN ISO 13535. Naftový a plynárenský průmysl: Vrtné a těžební zařízení - Zdvihací zařízení. 1. Česká republika: Český normalizační institut, 2001.
- [6] ČSN EN 1991-1-4. Zatížení konstrukcí: Obecná zatížení - Zatížení větrem. Ed. 2. Česká republika: Český normalizační institut, 2013.
- [7] ČSN ISO 12494. Zatížení konstrukcí námrazou. Česká republika: Český normalizační institut, 2011.
- [8] ČSN EN 1993-1-1. Navrhování ocelových konstrukcí: Obecná pravidla pro pozemní stavby. Ed. 2. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, 2011.
- [9] Mechanika těles: pružnost a pevnost I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2592-x.
- [10] KVADRATICKÝ MOMENT A MODUL PRŮŘEZU V OHYBU. E-konstrukter [online]. 2013 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/technicke-vypocty/14-kvadraticky-moment-a-modul-prurezu-v-ohybu>
- [11] Feron: Sortiment [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/index.php>
- [12] Těžba ropy a zemního plynu v České republice: historie a současnost. OENERGETICE.CZ [online]. Česká republika, 2016 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/ropa/tezba-ropy-a-zemniho-plynu-v-ceske-republice-historie-a-soucasnost/>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

|                |                    |   |
|----------------|--------------------|---|
| A              | [-]                | Přední hlavní pás                                 |
| B              | [-]                | Zadní hlavní pás                                  |
| C              | [-]                | Zadní zavětrování                                 |
| D              | [-]                | Boční zavětrování                                 |
| m_vysl         | [kg]               | Hmotnost věže                                     |
| Alf1           | [°]                | Úhel bočního zavětrování                          |
| Alf2           | [°]                | Úhel zadního zavětrování                          |
| A_A            | [mm <sup>2</sup> ] | Plocha průřezu A                                  |
| A_B            | [mm <sup>2</sup> ] | Plocha průřezu B                                  |
| A_C            | [mm <sup>2</sup> ] | Plocha průřezu C                                  |
| A_D            | [mm <sup>2</sup> ] | Plocha průřezu D                                  |
| Juu_A          | [mm <sup>4</sup> ] | Kvadratický moment průřezu A v ohybu (tužší směr) |
| Jvv_A          | [mm <sup>4</sup> ] | Kvadratický moment průřezu A v ohybu (měkčí směr) |
| h_A            | [mm]               | Výška pásnice průřezu A                           |
| b_A            | [mm]               | Výška stojiny průřezu B                           |
| Jk_B           | [mm <sup>4</sup> ] | Kvadratický moment průřezu B v krutu              |
| a_B            | [mm]               | Výška hrany průřezu B                             |
| Juu_C          | [mm <sup>4</sup> ] | Kvadratický moment průřezu C v ohybu (tužší směr) |
| Jvv_C          | [mm <sup>4</sup> ] | Kvadratický moment průřezu C v ohybu (měkčí směr) |
| h_C            | [mm]               | Výška pásnice průřezu C                           |
| b_C            | [mm]               | Výška stojiny průřezu B                           |
| Juu_D          | [mm <sup>4</sup> ] | Kvadratický moment průřezu D v ohybu (tužší směr) |
| Jvv_D          | [mm <sup>4</sup> ] | Kvadratický moment průřezu D v ohybu (měkčí směr) |
| h_D            | [mm]               | Výška pásnice průřezu D                           |
| b_D            | [mm]               | Výška stojiny průřezu D                           |
| dh_A           | [mm]               | Tloušťka pásnice profilu A                        |
| db_A           | [mm]               | Tloušťka stojiny profilu B                        |
| d_B            | [mm]               | Tloušťka profilu B                                |
| d_C            | [mm]               | Tloušťka profilu C                                |
| d_D            | [mm]               | Tloušťka profilu D                                |
| Q              | [kN]               | Síla od zatížení                                  |
| F <sub>m</sub> | [kN]               | Síla v mrtvém konci lana                          |

|           |                       |  |
|-----------|-----------------------|--|
| $F_t$     | [kN]                  | Síla v tažném konci lana                   |
| $k$       | [-]                   | Počet kladek ve spodním bloku kladkostroje |
| $R$       | [kN]                  | Skutečné zatížení v koruně věže            |
| $SF_D$    | [-]                   | Bezpečnostní faktor                        |
| $R_N$     | [kN]                  | Zatížení v koruně věže upravené dle normy  |
| $P$       | [Pa]                  | Tlak od větru při provozu                  |
| $P_{max}$ | [Pa]                  | Tlak od větru při mimo provozu             |
| $\rho_v$  | [kg.m <sup>-3</sup> ] | Měrná hmotnost vzduchu                     |
| $m_l$     | [kg]                  | Hmotnost ledu na konstrukci                |
| $s$       | [m <sup>2</sup> ]     | Celková obnažená plocha konstrukce         |
| $t$       | [mm]                  | Tloušťka námrazy                           |
| $\rho_l$  | [kg.m <sup>-3</sup> ] | Hustota ledu                               |
| $l_1$     | [m]                   | Délka lana 1                               |
| $l_2$     | [m]                   | Délka lana 2                               |
| $l_3$     | [m]                   | Délka lana 3                               |
| $F_1$     | [kN]                  | Předpětí lana 1                            |
| $F_2$     | [kN]                  | Předpětí lana 2                            |
| $F_3$     | [kN]                  | Předpětí lana 3                            |
| $S_1$     | [mm <sup>2</sup> ]    | Plocha lana 1                              |
| $S_2$     | [mm <sup>2</sup> ]    | Plocha lana 2                              |
| $S_3$     | [mm <sup>2</sup> ]    | Plocha lana 3                              |
| $E_L$     | [MPa]                 | Modul pružnosti lana                       |
| $k_1$     | [N.m <sup>-1</sup> ]  | Tuhost lana 1                              |
| $K_2$     | [N.m <sup>-1</sup> ]  | Tuhost lana 2                              |
| $K_3$     | [N.m <sup>-1</sup> ]  | Tuhost lana 3                              |
| $F_{1x}$  | [kN]                  | Složka síly od lana 1 ve směru osy x       |
| $F_{2x}$  | [kN]                  | Složka síly od lana 2 ve směru osy x       |
| $F_{3x}$  | [kN]                  | Složka síly od lana 2 ve směru osy x       |
| $F_{1y}$  | [kN]                  | Složka síly od lana 1 ve směru osy y       |
| $F_{2y}$  | [kN]                  | Složka síly od lana 2 ve směru osy y       |
| $F_{3y}$  | [kN]                  | Složka síly od lana 3 ve směru osy y       |
| $F_{1z}$  | [kN]                  | Složka síly od lana 1 ve směru osy z       |
| $F_{3z}$  | [kN]                  | Složka síly od lana 3 ve směru osy z       |

|                 |                      |   |
|-----------------|----------------------|---|
| $N_{Ed}$        | [N]                  | Hodnota tlakové síly  |
| $N_{b,Rd}$      | [N]                  | Návrhová vzpěrná únosnost tlačného prutu                          |
| $\chi$          | [-]                  | Součinitel vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení               |
| $S_A$           | [mm <sup>2</sup> ]   | Plocha průřezu  |
| $f_y$           | [MPa]                | Mez kluzu   |
| $\gamma_{M1}$   | [-]                  | Dílčí součinitel únosnosti průřezu při posuzování stability prutů |
| $\bar{\lambda}$ | [-]                  | Poměrná štíhlost  |
| $\alpha$        | [-]                  | Součinitel imperfekce   |
| $L_{cr}$        | [mm]                 | Vzpěrná délka   |
| $i$             | [mm]                 | poloměr setrvačnosti plného průřezu k příslušné ose               |
| $E$             | [N.mm <sup>2</sup> ] | modul pružnosti v tahu a tlaku pro ocel                           |
| $J_{min}$       | [mm <sup>4</sup> ]   | minimální kvadratický moment                                      |
| $H_{s'}$        | [mm]                 | Hloubka spodního dílu původní věže                                |
| $B_{s'}$        | [mm]                 | Šířka spodního dílu původní věže                                  |
| $H_{h'}$        | [mm]                 | Hloubka horního dílu původní věže                                 |
| $B_{h'}$        | [mm]                 | Šířka horního dílu původní věže                                   |
| $H_s$           | [mm]                 | Hloubka spodního dílu věže  |
| $B_s$           | [mm]                 | Šířka spodního dílu věže  |
| $H_h$           | [mm]                 | Hloubka horního dílu věže   |
| $B_h$           | [mm]                 | Šířka horního dílu věže   |

## SEZNAM PŘÍLOH

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Teleskopická věž_MND            | A2-1   |
| Teleskopická věž_MND (kusovník) | A2-1-k |