

Marcel Pavič

**PEVNOSTNÍ ANALÝZA KONSTRUKCE  
KOLOTOČE**

**STRENGTH ANALYSIS OF AMUSEMENT  
ATTRACTION**

Bakalářská práce

Vedoucí práce:  
doc. Ing. Poruba Zdeněk, Ph.D.

Ostrava 2022



**Bibliografický záznam**

Autor: Marcel Pavič, PAV0442

Název práce: Pevnostní analýza konstrukce kolotoče

Studijní program: B0715A270011 – Strojírenství

Vedoucí práce: doc. Ing. Poruba Zdeněk, Ph.D.

Akademický rok: 2021/2022

Počet stran: 77

Klíčová slova: ocelová konstrukce, kolotoč, zábavní atrakce, skládání, pevnostní analýza.

## Zadání bakalářské práce

Student: **Marcel Pavič**  
Studijní program: B0715A270011 Strojírenství  
Specializace: S01 Aplikovaná mechanika  
Téma: **Pevnostní analýza konstrukce kolotoče**  
**Strength Analysis of Amusement Attraction**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

- 1) Seznámení s normou pro výpočet ocelových konstrukcí
- 2) Úprava geometrického modelu do podoby vhodné pro výpočet
- 3) Tvorba modelu pro výpočet metodou konečných prvků
- 4) Diskuse okrajových podmínek
- 5) Napěťově deformační analýza konstrukce ve vybraných polohách při stavění/skládání kolotoče
- 6) Případná optimalizace - v závislosti na výsledcích simulací

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] COOK, Robert D. Finite element modeling for stress analysis. Vyd. 1. Hong Kong: John Wiley, 1995, 320 s. ISBN 04-711-0774-3.
- [2] ANSYS® Academic Teaching Advanced, Release R19.2, help system, ANSYS, Inc.
- [3] ČSN EN 1991-1-4. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2007.
- [4] ČSN EN 13814. Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky - Bezpečnost. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2005.
- [5] ČSN EN 1991-1-4. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2007.

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

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2021

Datum odevzdání: 16.05.2022

---

doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.  
vedoucí katedry

---

prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.  
děkan fakulty

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PAVIČ, Marcel. *Pevnostní analýza konstrukce kolotoče*. Ostrava, 2022. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2022, 77 s. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

Tato bakalářská práce se zabývá pevnostní analýzou konstrukce kolotoče. V úvodu je popsána atrakce a cíl této práce. Následně jsou uvedeny 2 normy, které je případně nutno uvažovat při výpočtu. Jedná se o normy ČSN EN 13814 a ČSN EN 1991-1-4. Praktická část práce pojednává o geometrii věže, jejím modelu pro výpočet metodou konečných prvků a aplikaci okrajových podmínek, vlastním výpočtem a jeho vyhodnocením. Výpočty v softwaru je zjištěno napětí a celkové posunutí věže. Jsou vybrány pevnostně nejméně příznivé polohy a je provedeno jejich hodnocení. Je provedeno jejich posouzení, zdali se konstrukce jeví jako vhodná pro postavení. Celý tento proces, vedoucí k finálním výsledkům, je vykonán prostřednictvím programu *ANSYS Workbench 2020 R2*.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PAVIČ, Marcel. *Strength analysis of amusement attraction*. Ostrava, 2022. Bachelor's thesis. VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2022, 77 p. Thesis supervisor doc. Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.

This bachelor thesis deals with strength analysis of amusement attraction. The introduction describes the attraction and its objective. Further there are 2 standards that may need to be contained in the calculation. These standards are called ČSN EN 13814 and ČSN EN 1991-1-4. The practical part of the work deals with the geometry of the tower, its model for finite element calculation and application of boundary conditions, its own calculation and its evaluation. The stress and the total displacement of the tower are determined by software calculations. The least favorable positions in terms of strength are selected and their evaluation is performed. Their assessment is made whether the structure appears to be suitable for the positioning. The whole process leading to the final results is performed using *the ANSYS Workbench 2020 R2 software*.

# OBSAH

1 ÚVOD.....	10
2 NORMY PRO NÁVRH OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ A ZÁBAVNÍCH ATRAKCÍ.....	13
2.1 NORMA ČSN EN 13814 – PROSTŘEDKY LIDOVÉ ZÁBAVY PRO SLAVNOSTI A LUNAPARKY..	13
2.1.1 VŠEOBECNÉ POŽADAVKY NA ROZBOR A PROHLÍDKU KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU .....	13
2.1.2 VÝBĚR MATERIÁLŮ .....	14
2.1.3 KONSTRUKČNÍ ZATÍŽENÍ.....	14
2.2 NORMA ČSN EN 1991-1-4 – EUROKÓD I – ZATÍŽENÍ VĚTREM .....	14
2.2.1 RYCHLOST VĚTRU A MAXIMÁLNÍ DYNAMICKÝ TLAK.....	15
2.2.2 TLAK VĚTRU NAPŘ. NA OPLÁŠTĚNÍ, UPEVNŮVACÍ PRVKY A ČÁSTI KONSTRUKCE .....	17
2.2.3 SÍLY OD VĚTRU NA KONSTRUKCE, TJ. CELKOVÉ ÚČINKY VĚTRU .....	17
2.2.4 TLAK VĚTRU NA POVRCHY.....	17
2.2.5 SÍLY OD VĚTRU.....	18
4 TVORBA GEOMETRICKÉHO MODELU .....	19
5 TVORBA MODELU PRO VÝPOČET METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ .....	23
5.1 TLOUŠŤKA.....	23
5.2. MATERIÁL .....	25
5.3 SÍŤ .....	25
5.4 KONTAKTY A VAZBY.....	27
5.4.1 KONTAKTY – DOLNÍ VĚŽ .....	27
5.4.2 KONTAKTY – TROJÚHELNÍK .....	28
5.4.3 KONTAKTY – HORNÍ VĚŽ.....	28
5.4.4 VAZBY – KLOUBOVÉ .....	29
5.4.5 VAZBY – POSUVNÉ.....	33
6 OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	35
6.1 GRAVITAČNÍ ZRYCHLENÍ.....	37
6.2 POSUVY PÍSTNIC S PÍSTY V HYDRAULICKÝCH VÁLCÍCH .....	38
6.3 SÍLY .....	41
7 NAPĚŤOVĚ-DEFORMAČNÍ ANALÝZA KONSTRUKCE.....	57
8 OPTIMALIZACE .....	69
9 ZÁVĚR .....	74
10 PODĚKOVÁNÍ.....	76

11 CITACE .....	77
12 SEZNAM PŘÍLOH.....	77

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK

### Velká písmena latinské abecedy

Veličina	Značka	Základní jednotka
Plocha vnějšího povrchu rovnoběžná s větrem	$A_{fr}$	$m^2$
Referenční plocha konstrukce nebo nosného prvku	$A_{ref}$	$m^2$
Youngův modul pružnosti	$E$	Pa
Síla v jednom laně	$F_1$	N
Síla v jednom laně ve směru x u dolní věže	$F_{1dx}$	N
Síla v jednom laně ve směru y u dolní věže	$F_{1dy}$	N
Síla v jednom laně ve směru x u horní věže	$F_{1hx}$	N
Síla v jednom laně ve směru y u horní věže	$F_{1hy}$	N
Síla do válečků	$F_2$	N
Síla do válečků ve směru osy x	$F_{2x}$	N
Síla do válečků ve směru osy y	$F_{2y}$	N
Třecí síla	$F_{fr}$	N
Síla od větru	$F_w$	N
Síla z vnějšího tlaku	$F_{w,e}$	N
Síla z vnitřního tlaku	$F_{w,i}$	N
Tíhová síla	$G$	N
Posunutí 1. páru hydraulických válců	$P_1$	m
Posunutí 2. páru hydraulických válců	$P_2$	m
Posunutí 3. páru hydraulických válců	$P_3$	m

### Malá písmena latinské abecedy

Veličina	Značka	Základní jednotka
Vzdálenost ok 2. páru hydraulických válců	(d)	m
Vzdálenost ok 1. páru hydraulických válců	(e)	m
Vzdálenost ok 3. páru hydraulických válců	(h)	m
Nejmenší vzdálenost spodního oka hydraulického válce uvnitř konstrukce a spodních ok 2. páru hydraulických válců	a	m
Nejmenší vzdálenost spodních ok 2. páru hydraulických válců a bodu, jež je spojnicí horní a dolní věže při skládání	c	m
Součinitel směru větru	$C_{dir}$	-
Součinitel expozice	$C_e$	-
Součinitel síly pro konstrukce nebo nosné prvky	$C_f$	-
Součinitel tření	$C_{fr}$	-
Součinitel orografie	$C_o$	-
Součinitel výsledného tlaku	$C_{p,net}$	-
Vnější součinitel tlaku	$C_{pe}$	-
Vnitřní součinitel tlaku	$C_{pi}$	-



Součinitel drsnosti terénu	$C_r$	-
Součinitel konstrukce	$C_s C_d$	-
Součinitel ročního období	$C_{season}$	-
Vzdálenost ramena rovnoramenného trojúhelníku na rozmezí dolní a horní věže	$f$	m
Vzdálenost základny rovnoramenného trojúhelníku na rozmezí dolní a horní věže	$g$	m
Tíhové zrychlení	$g_z$	$m/s^2$
Horizontální vzdálenost mezi spodními oky 1. páru hydraulických válců a válcem uvnitř konstrukce	$k$	m
Součinitel turbulence	$k_l$	-
Součinitel terénu	$k_r$	-
Vertikální vzdálenost mezi spodními oky 1. páru hydraulických válců a válcem uvnitř konstrukce	$l$	m
Turbulence větru	$l_v$	Pa
Přepona trojúhelníku u odvěsen $k$ a $l$	$m$	m
Hmotnost karuselu	$m_k$	kg
Základní dynamický tlak	$q_b$	Pa
Maximální dynamický tlak	$q_p$	Pa
Základní rychlost větru	$v_b$	m/s
Výchozí základní rychlost větru	$v_{b,0}$	m/s
Střední rychlost větru	$v_m$	m/s
Vnější tlak větru	$w_e$	Pa
Vnitřní tlak větru	$w_i$	Pa
Výška atrakce	$z$	m
Parametr drsnosti terénu	$z_0$	m
Referenční výška pro vnější tlak	$z_e$	m
Referenční výška pro vnitřní tlak	$z_i$	m

### Malá písmena řecké abecedy

Veličina	Značka	Základní jednotka
Úhel mezi dolní věží a horizontální polohou	$\alpha$	°
Úhel mezi horní věží a horizontální polohou	$\beta$	°
Úhel svírající naklonění dolní věže s horizontální polohou	$\eta$	°
Poissonova konstanta	$\mu$	-
Úhel rovnoramenného trojúhelníku, který je na rozmezí horní a dolní věže, svírající jedno rameno a kolmici na základnu procházející jeho vrcholem	$\xi$	°
Měrná hmotnost	$\rho$	$kg/m^3$
Směrodatná odchylka turbulence	$\sigma_v$	Pa

## 1 ÚVOD

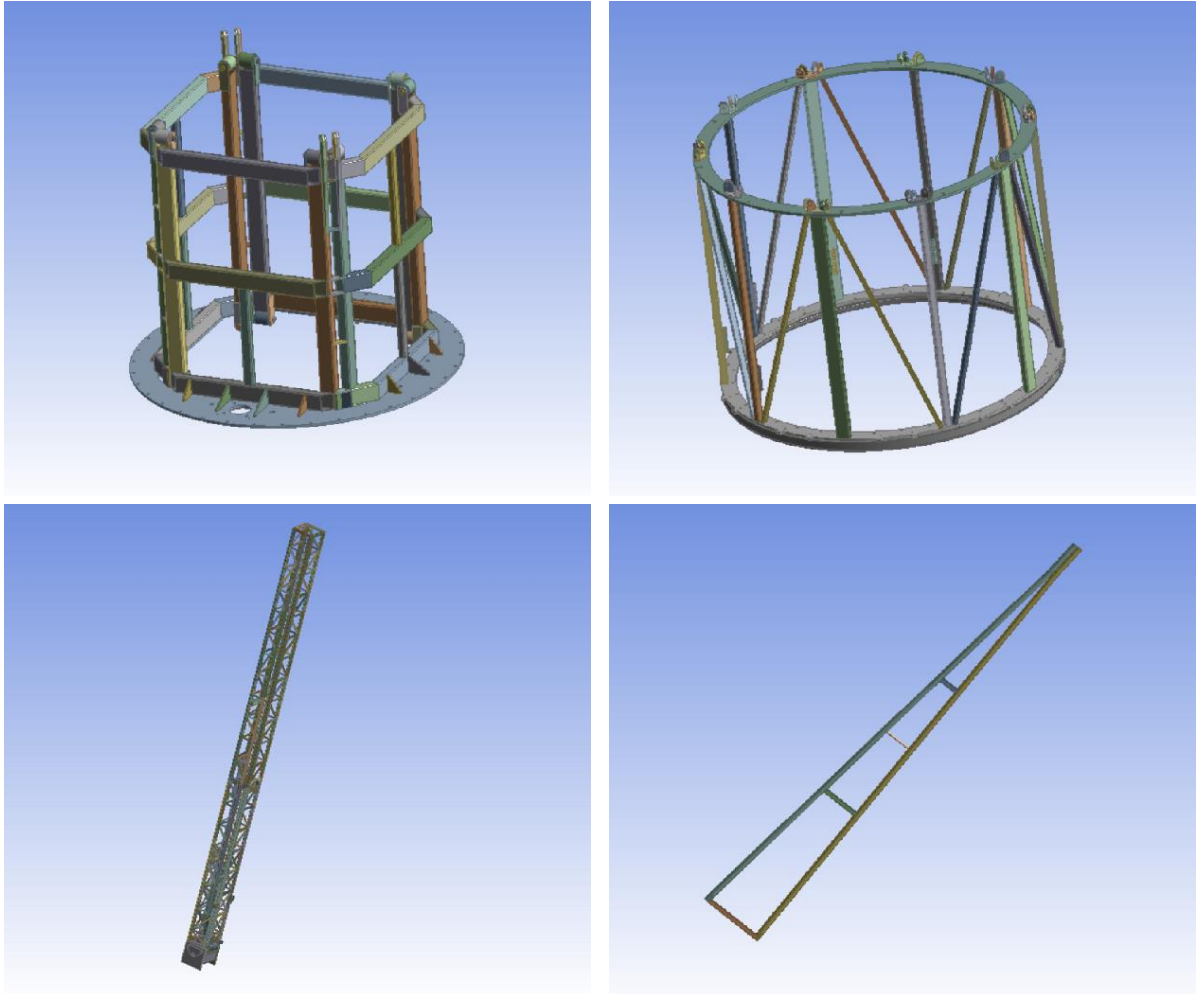
Tato práce pojednává o zábavní atrakci zvané „Swing tower“. Jedná se o zařízení tvořené příhradovou věží ukotvenou na podvozku nákladního automobilu, po níž se ve svislém směru pohybuje výtah, kolem něhož rotuje karusel. S rotujícím karuselem jsou spojena ramena nesoucí sedačky se sedícími osobami. Ilustrace této atrakce v provozním stavu je vyobrazena na Obr. 1. Modely jednotlivých jmenovaných dílů konstrukce (věž, výtah, karusel s rameny) jsou vyobrazeny na Obr. 2.



Obr. 1 – Swing tower – vlevo v provozním stavu, vpravo ve stavu připraveném pro provoz

Příhradová věž je vysoká 20 m a je tvořena, z důvodu snadnějšího transportu, 2 částmi – dolní věží a horní věží. Pohyb výtahu s karuselem, rameny, sedačkami a sedícími osobami směrem nahoru a dolů je realizován pohybem hydraulického válce umístěného uvnitř věže a lanovými převody.

Transport zábavní atrakce probíhá v jejím složeném stavu tak, že horní i dolní věž jsou sklopeny do vodorovného směru a vzájemně na sobě leží. Výtah, karusel i ramena přitom spočívají na horní věži. Atrakce ve složeném – transportním stavu je vyobrazena na Obr. 3.

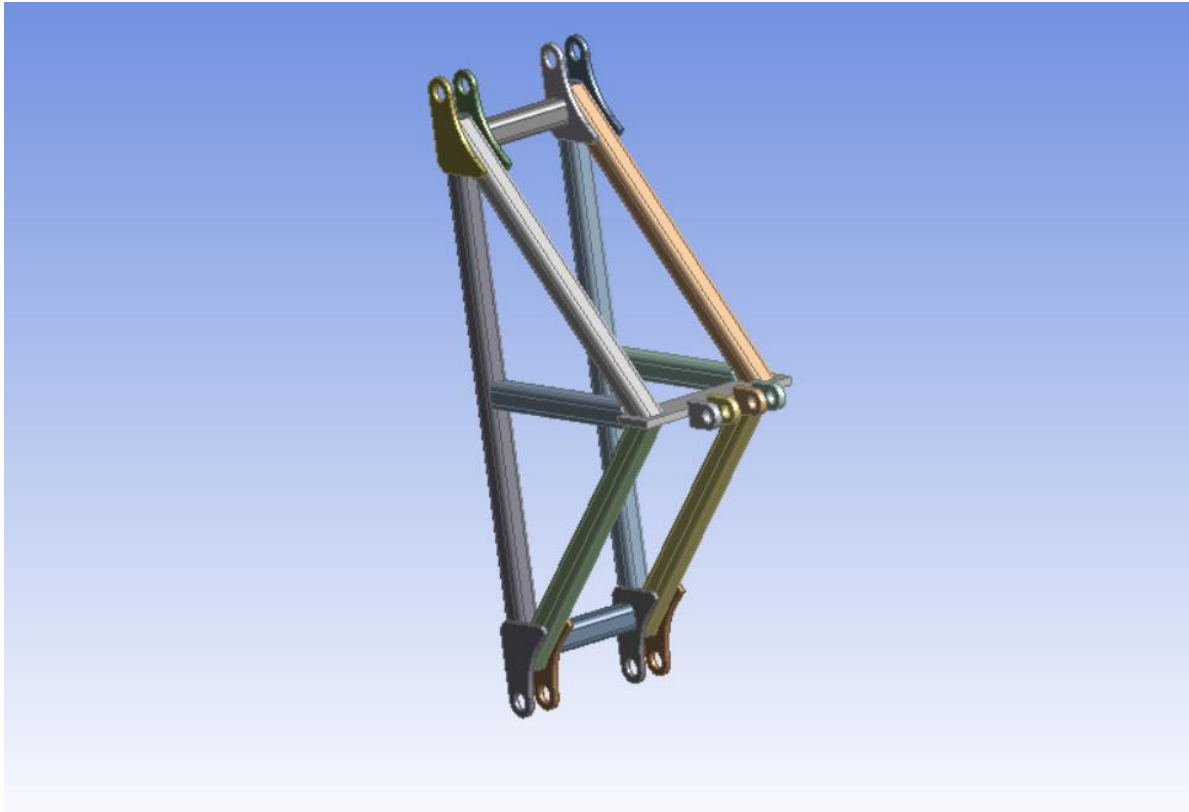


Obr. 2 – Díly konstrukce – výtah (vlevo nahoře), karusel (vpravo nahoře), věž (vlevo dole), rameno karuselu (vpravo dole)



Obr. 3 – Atrakce v transportním stavu [3]

Předmětem práce je napětově-deformační analýza konstrukce zábavní atrakce při jejím stavění/sklápění. Toto probíhá postupným vysouváním/zasouváním tří dvojic hydraulických válců spojujících podvozek, dolní věž, trojúhelník a horní věž. Trojúhelník, vyobrazený na Obr. 4, slouží k realizaci rozevírání horní věže.



Obr. 4 – Trojúhelník

Dále budou popsány jednotlivé kroky vedoucí k realizaci pevnostní analýzy spočívající v rozboru norem souvisejících s ocelovými konstrukcemi a zábavními atrakcemi, popisu tvorby geometrického modelu a modelu pro výpočet metodou konečných prvků, diskusi okrajových podmínek, provedení a vyhodnocení napětově-deformační analýzy a diskusi možností optimalizace konstrukce zábavní atrakce. Napětově-deformační analýza bude provedena s využitím počítačového modelování metodou konečných prvků. Zajímavostí je výpočet všech poloh skládání/rozkládání věže v rámci jedné analýzy.

## 2 NORMY PRO NÁVRH OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ A ZÁBAVNÍCH ATRAKCÍ

Zásadními normami pro návrh ocelových konstrukcí a zábavních atrakcí jsou ČSN EN 13814 a ČSN EN 1991. Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky [1] a norma Eurokód I, zejména její část ČSN EN 1991-1-4 – Eurokód I: Zatížení větrem [2], na kterou norma ČSN EN 13814 odkazuje. V následujících podkapitolách (2.1 a 2.2) budou uvedeny základní poznatky uvedené v těchto normách a využitelné při návrhu a pevnostní kontrole konstrukcí zábavních atrakcí.

### 2.1 NORMA ČSN EN 13814 – PROSTŘEDKY LIDOVÉ ZÁBAVY PRO SLAVNOSTI A LUNAPARKY

Tato norma se zabývá bezpečnostními pravidly pro stavby a strojní zařízení, která jsou buď součástí prostředku lidové zábavy, nebo tvoří samotný prostředek lidové zábavy. Bezpečnostními pravidly se rozumí ochrana před ublížením na zdraví, ke kterému může dojít, proto je třeba na tohle dbát při navrhování, konstrukci a provozu těchto staveb či strojních zařízení.

Jedná se o minimální požadavky, které je potřeba splnit pro zajištění bezpečného návrhu, výpočtu, výroby, instalace, údržby, provozu, prohlídek a zkoušek mobilních, přechodně nebo trvale instalovaných prostředků lidové zábavy a staveb, např. kolotočů, houpaček, gondol, ruských kol, horských drah, skluzavek, tribun, membránových nebo textilních konstrukcí, stánků, pódíí, staveb pro předvádění produkcí a artistických vystoupení (=prostředky lidové zábavy).

#### 2.1.1 VŠEOBECNÉ POŽADAVKY NA ROZBOR A PROHLÍDKU KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU

Mezi všeobecné požadavky na rozbor a prohlídku konstrukčního návrhu patří konstrukční podklady. Jsou to všechny dokumenty potřebné pro posouzení stability a provozní bezpečnosti prostředku lidové zábavy. Tyto dokumenty musí zahrnovat všechny konstrukční podmínky týkající se provozu zábavní atrakce. K tomu ještě popis konstrukce, provozu a provozní bezpečnosti, konstrukční výkresy a komplexní analýzu namáhání, únavu materiálu a stabilitu.

Je třeba zmínit:

- popisem konstrukce se rozumí vysvětlení prostředku lidové zábavy, zejména jeho konstrukce (podrobnosti ohledně všech ovládacích prvcích), dále sem patří např. údaje o volném prostoru pro pohyb, o omezeních, o rychlostech, o zrychleních
- konstrukčními výkresy se rozumí konstrukční sestavy, podsestavy a jednotlivé konstrukční součásti, jejichž výpadek nebo prasknutí by mohly ohrozit stabilitu nebo provozní bezpečnost zařízení
- komplexní analýzou se rozumí zahrnutí ověřování, které se skládá z analýzy mezních stavů únosnosti, analýzy mezních stavů únavy, analýzy mezních stavů stability, tj. ohnutí tyčí, vyboulení desek a pláště, ověření mezních stavů deformace, ověření bezpečnosti proti převrácení, sklouznutí a zdvihnutí z podkladu a dynamické analýzy
- kromě toho musí být sepsáno – hlavní rozměry a průřezy všech nosných konstrukčních součástí, podrobné údaje pro posouzení únavové pevnosti, údaje o materiálech a konstrukčních součástech, stanovení nejméně výhodných namáhání

(maximální/minimální namáhání a rozsah namáhání), údaje o pevnosti nosných konstrukčních součástí a spojovacích prvků, údaje o pružných deformacích (prohýbání, zkroucení), údaje o konstrukčních součástech

Zásady analýzy:

- analýza mezních stavů únosnosti
- analýza mezních stavů únavy
- analýza mezních stavů stability, tj. ohnutí tyčí, vyboulení desek a pláště
- ověřování mezních stavů deformace
- ověřování bezpečnosti proti převrácení, sklouznutí a zdvihnutí z podkladu
- dynamická analýza

## 2.1.2 VÝBĚR MATERIÁLŮ

Konstrukční součásti mohou být vyrobeny pouze z materiálů, jejichž konstrukční údaje jsou obsaženy v evropských normách pro stavby (jiné materiály mohou být použity, pokud se prokážou).

Spojovací prvky – šrouby a čepy musí odpovídat pevnostním třídám 4.6, 5.6, 6.8, 8.8 a 10.9.

## 2.1.3 KONSTRUKČNÍ ZATÍŽENÍ

Konstrukční zatížení je rozděleno na trvalé a proměnlivé.

U trvalého zatížení se předpokládá skutečné zatížení vlastní hmotností nosné konstrukce, příslušenství a technická zařízení nutná pro provoz.

Proměnlivé zatížení zahrnuje provozní zatížení, pohonné síly a brzdící síly a zatížení větrem. Provozní zatížení se skládá z vnějších zatížení a vynucených deformací působících na konstrukční součást, které mohou při provozu kolísat. Brzdícími silami se rozumí zohlednění vlivu rozjíždění a brzdění u hydraulických válců při výpočtu. Povětrnostní podmínky – zatížení větrem závisí na umístění atrakce, trvání a roční době instalace, použití pod dozorem obsluhy a možnostem ochrany a zesílení. Jízdní zařízení nebo stavby musí být chráněny nebo zesíleny, pokud dosáhne rychlost větru  $v_{skut} \geq 25$  m/s ve výšce 10 m.

## 2.2 NORMA ČSN EN 1991-1-4 – EUROKÓD I – ZATÍŽENÍ VĚTREM

(Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem)

Tato norma poskytuje pokyny pro stanovení zatížení větrem pro navrhování pozemních a inženýrských staveb pro každou ze zatížených ploch. Patří zde celé konstrukce, části konstrukcí nebo i prvky na nich připevněné. Tato norma se vztahuje na pozemní a inženýrské stavby s výškou do 200 m.

Zatížení větrem se mění v čase a působí jako tlaky na vnější povrchy uzavřených konstrukcí. Vzhledem k prodyšnosti vnějšího povrchu působí také na vnitřní povrchy. Kolmé síly působí tlakem na povrch konstrukce. Jestliže jsou konstrukce obtékány větrem, mohou se objevit třecí síly působící tečně k povrchu.

Účinek větru na konstrukci závisí na tvaru, velikosti a dynamických vlastnostech konstrukce. Tento účinek neboli odezva konstrukce se vypočítá z maximálního dynamického tlaku  $q_p$  v referenční výšce, ze součinitelů sil, tlaků a ze součinitele konstrukce  $c_{scd}$ .

## 2.2.1 RYCHLOST VĚTRU A MAXIMÁLNÍ DYNAMICKÝ TLAK

Obě dvě veličiny se skládají ze střední a flukтуаční složky. Střední rychlost větru  $v_m$  se stanoví ze základní rychlosti větru  $v_b$ . Flukтуаční složka větru je popsána intenzitou turbulence. Maximální dynamický tlak zahrnuje střední a krátkodobé fluktuace rychlosti větru.

Základní rychlost větru  $v_b$  se vypočte z výrazu:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (2.2.1.1)$$

- $v_b$  je základní rychlost větru ve výšce 10 m nad zemí v terénu kategorie II, definovaná jako funkce směru větru a ročního období
- $v_{b,0}$  je výchozí základní rychlost větru
- $c_{dir}$  je součinitel směru větru (doporučená hodnota je 1)
- $c_{season}$  je součinitel ročního období (doporučená hodnota je 1)

Střední rychlost větru  $v_m(z)$  ve výšce  $z$  se vypočte z výrazu:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (2.2.1.2)$$

- $c_r(z)$  je součinitel drsnosti terénu
- $c_o(z)$  je součinitel orografie
- $v_b$  je základní rychlost větru

Intenzita turbulence  $l_v(z)$  ve výšce  $z$  se vypočte z výrazu:

$$l_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_l}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad (2.2.1.3)$$

- $\sigma_v$  je směrodatná odchylka turbulence
- $v_m(z)$  je střední rychlost větru ve výšce  $z$
- $k_l$  je součinitel turbulence
- $c_o$  je součinitel orografie
- $z_0$  je parametr drsnosti terénu

Směrodatná odchylka turbulence  $\sigma_v$  se vypočte z výrazu:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_l \quad (2.2.1.4)$$

- $k_r$  je součinitel terénu
- $v_b$  je základní rychlost větru
- $k_l$  je součinitel turbulence

Základní dynamický tlak větru ve výšce  $z$  se vypočte z výrazu:

$$q_b(z) = [1 + 7 \cdot l_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

(2.2.1.5)

- $l_v(z)$  je intenzita turbulence
- $\rho$  je měrná hmotnost vzduchu (závisí na nadmořské výšce, teplotě a barometrickém tlaku)
- $c_e(z)$  je součinitel expozice

Je nutné vzít v úvahu drsnost terénu. Součinitel drsnosti  $c_r(z)$  vyjadřuje změnu střední rychlosti větru v místě konstrukce způsobenou výškou nad úrovní terénu a drsností povrchu terénu na návětrné straně konstrukce pro uvažovaný směr větru.

Součinitel drsnosti  $c_r(z)$  se vypočte z výrazu:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \dots \text{pro } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

(2.2.1.6)

- $k_r$  je součinitel terénu, který závisí na parametru drsnosti terénu  $z_0$
- $z_0$  je parametr drsnosti terénu
- $z_{\min}$  je minimální výška definovaná v Tab. 1
- $z_{\max}$  se uvažuje 200 m

Tab. 1 – Kategorie terénu

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

Včetně drsnosti terénu je důležitá orografie. Orografie zahrnuje kopce, útesy apod., tímto je zvýšená rychlost větru o více než 5 %. S těmito účinky se počítá použitím součinitele orografie  $c_o$ .

Pokud je konstrukce umístěna v blízkosti jiné konstrukce, která je vyšší dvakrát a více než průměrná výška okolních konstrukcí, potom by mohla být vystavená vyšším rychlostem větru (závisí to na vlastnostech konstrukce). Je třeba to vzít v úvahu.

Pokud se konstrukce nachází v oblasti hustě umístěných pozemních staveb, tak se vítr chová tak, jako by úroveň země byla posunuta do výšky  $h_{\text{dis}}$ . Je třeba to vzít v úvahu.



## 2.2.2 TLAK VĚTRU NAPŘ. NA OPLÁŠTĚNÍ, UPEVNŮVACÍ PRVKY A ČÁSTI KONSTRUKCE

K jeho určení je potřeba znát:

- vnější součinitel tlaku  $c_{pe}$
- vnitřní součinitel tlaku  $c_{pi}$
- součinitel výsledného tlaku  $c_{p, net}$
- vnější tlak větru  $w_e$
- vnitřní tlak větru  $w_i$

## 2.2.3 SÍLY OD VĚTRU NA KONSTRUKCE, TJ. CELKOVÉ ÚČINKY VĚTRU

K jejich určení je potřeba znát:

- součinitel konstrukce  $c_s c_d$
- sílu od větru  $F_w$  vypočtená ze součinitelů sil
- sílu od větru  $F_w$  vypočtená ze součinitelů tlaku

## 2.2.4 TLAK VĚTRU NA POVRCHY

Tlak větru  $w_e$  působící na vnější povrchy konstrukce se vypočte z výrazu:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (2.2.4.1)$$

- $q_p(z_e)$  je maximální dynamický tlak ( $z_e$  je referenční výška pro vnější tlak)
- $c_{pe}$  je součinitel vnějšího tlaku

Tlak větru  $w_i$  působící na vnitřní povrchy konstrukce se vypočte z výrazu:

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (2.2.4.2)$$

- $q_p(z_i)$  je maximální dynamický tlak ( $z_i$  je referenční výška pro vnitřní tlak)
- $c_{pi}$  je součinitel vnitřního tlaku
- výsledný tlak větru na stěnu, střechu nebo těleso je rozdíl mezi tlaky na opačných površích, uvažovaný s ohledem na jejich znaménka

## 2.2.5 SÍLY OD VĚTRU

K výpočtu sil od větru jsou 2 možné přístupy. Prvním přístupem je použití součinitelů sil a druhým je výpočet z povrchových tlaků.

Pro první přístup slouží výraz:

$$F_w = c_s c_d \cdot \sum_{\text{prvky}} c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (2.2.5.1)$$

- $c_s c_d$  je součinitel konstrukce
- $c_f$  je součinitel síly pro konstrukce nebo nosné prvky
- $q_p(z_e)$  je maximální dynamický tlak v referenční výšce  $z_e$
- $A_{ref}$  je referenční plocha konstrukce nebo nosného prvku

Pro druhý přístup je nutno stanovit vektorový součet sil  $F_{w,e}$ ,  $F_{w,i}$  a  $F_{fr}$ .

$F_{w,e}$  je síla vypočtená z vnějšího tlaku,  $F_{w,i}$  je síla vypočtená z vnitřního tlaku a  $F_{fr}$  je třecí síla, která je výsledkem tření větru rovnoběžného s vnějším povrchem.

Vnější síla  $F_{w,e}$  se vypočte z výrazu:

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot \sum_{\text{povrchy}} w_e \cdot A_{ref} \quad (2.2.5.2)$$

Vnější síla  $F_{w,i}$  se vypočte z výrazu:

$$F_{w,i} = \sum_{\text{povrchy}} w_i \cdot A_{ref} \quad (2.2.5.3)$$

Třecí síla  $F_{fr}$  se vypočte z výrazu:

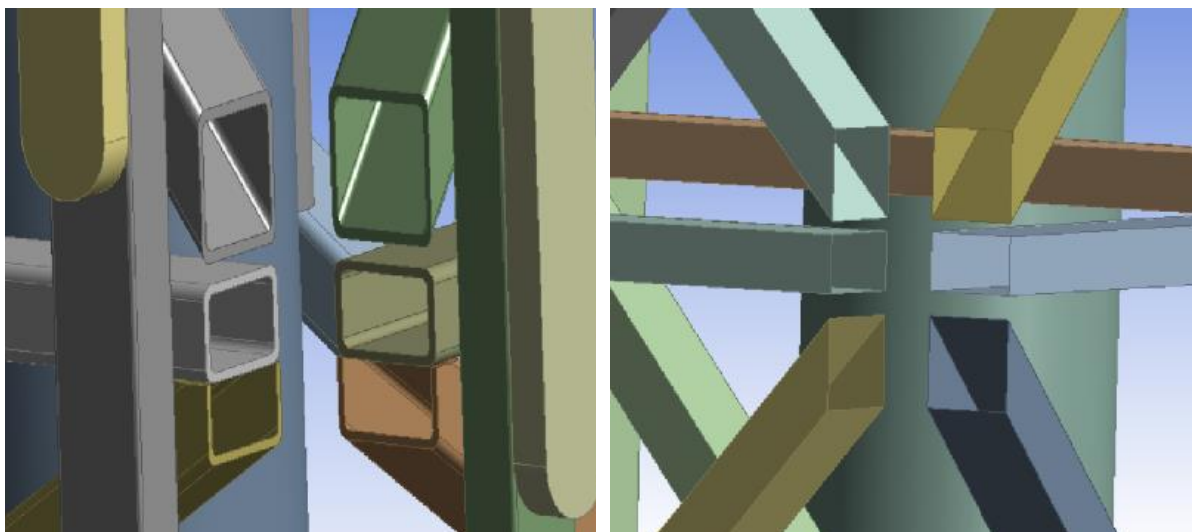
$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_f \quad (2.2.5.4)$$

- $c_s c_d$  je součinitel konstrukce
- $w_e$  je vnější tlak na dílčí povrch ve výšce  $z_e$
- $w_i$  je vnitřní tlak na dílčí povrch ve výšce  $z_i$
- $A_{ref}$  je referenční plocha dílčího povrchu
- $c_{fr}$  je součinitel tření
- $A_f$  je plocha vnějšího povrchu rovnoběžná s větrem

## 4 TVORBA GEOMETRICKÉHO MODELU

Vhodný geometrický model tvoří jeden ze stěžejních vstupů pro tvorbu numerického modelu. Z důvodu snížení časové a hardwarové náročnosti výpočtu při současném zachování (či nevelkém snížení) přesnosti získaných výsledků bylo přistoupeno k tvorbě skořepinového modelu. Jako zdroj informací o podobě a rozměrech kontrolovaného zařízení slouží poskytnutý objemový model věže ve vztyčené poloze, včetně výtahu, karuselu a ramen. Tento model byl poskytnut ve formátu *Step*. Následně byl otevřen v programu *ANSYS Workbench 2020 R2*. V prostředí *DesignModeler* je možno odečítat rozměry jednotlivých těles věže pro vytvoření skořepinové geometrie. Jedná se o 2D plochy, u kterých je později přiřazena příslušná tloušťka tenkostěnného profilu. Součástí této konstrukce je zanedbání sražení/zaoblení hran těles, tělesa kladkostroje, čepů, šroubů apod., zjednodušení, či nahrazení vhodnou okrajovou podmínkou.

Příklad porovnání původní a skořepinové geometrie je zobrazen na Obr. 5. Další 2 příklady jsou na Obr. 10 a Obr. 11.



Obr. 5 – Porovnání vybraných těles 3D geometrie a skořepinové geometrie

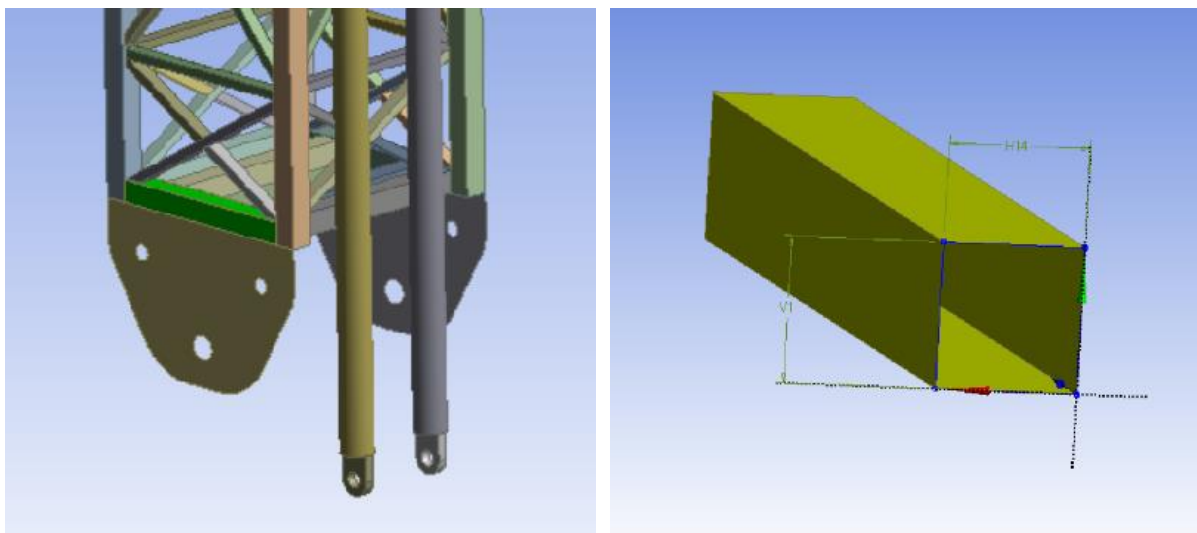
Při samotné tvorbě geometrického modelu byla postupně tvořena jeho jednotlivá tělesa převážně technikou vytažení průřezového profilu do prostoru viz Obr. 7. Způsob nastavení funkce vytažení (*Extrude*) je vyobrazen na Obr. 6.

Důležitými položkami nastavení jsou zejména:

- Operation: *Add Frozen* – zabrání vzájemnému sečení vkládaných těles při jejich vzájemném kontaktu
- Extent Type: *Fixed* – rozměr vysunutí je pevně daný
- FD1, Depth (<0): *900 mm* – vysune těleso průřezového profilu o zadaný rozměr
- As Thin/Surface?: *Yes* – nastaví těleso jako tenkostěnný
- FD2, Inward Thickness (>=0): *0 mm* – těleso nebude obsahovat vnitřní tloušťku
- FD3, Outward Thickness (>=0): *0 mm* – těleso nebude obsahovat vnější tloušťku

Details View	
[-] Details of Extrude7	
Extrude	Extrude7
Geometry	Sketch7
Operation	Add Frozen
Direction Vector	None (Normal)
Direction	Normal
Extent Type	Fixed
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	900 mm
As Thin/Surface?	Yes
<input type="checkbox"/> FD2, Inward Thickness (>=0)	0 mm
<input type="checkbox"/> FD3, Outward Thickness (>=0)	0 mm
Merge Topology?	Yes
[-] Geometry Selection: 1	
Sketch	Sketch7

Obr. 6 – Tabulka detailů vysunutí tělesa geometrie

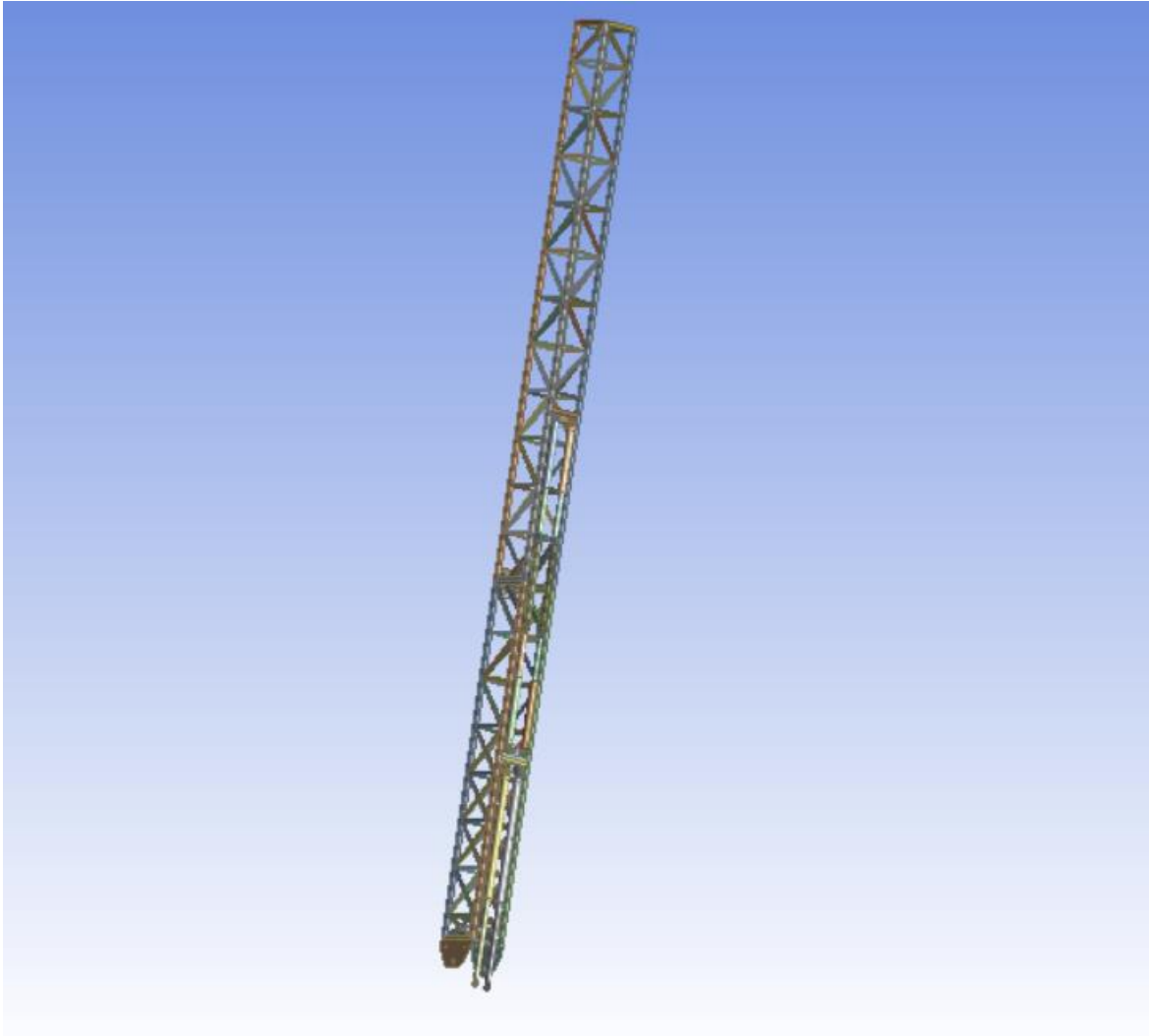


Obr. 7 – Zvolené nosíkové těleso

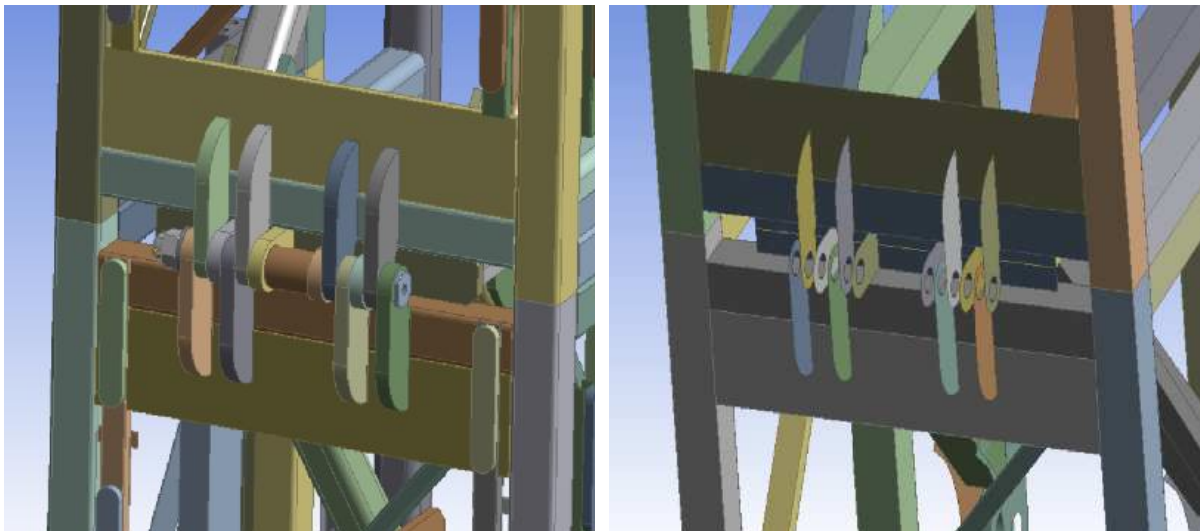
Konstrukce, kterou se zabývá primárně tato práce, je věž. Její podoba je vyobrazena na Obr. 9. Skládá se z 325 těles, 1213 ploch, 3715 hran a 2530 vrcholů viz Obr. 8.

Details	
Bodies	325
Volume	...
Surface Area	...
Faces	1213
Edges	3715
Vertices	2530

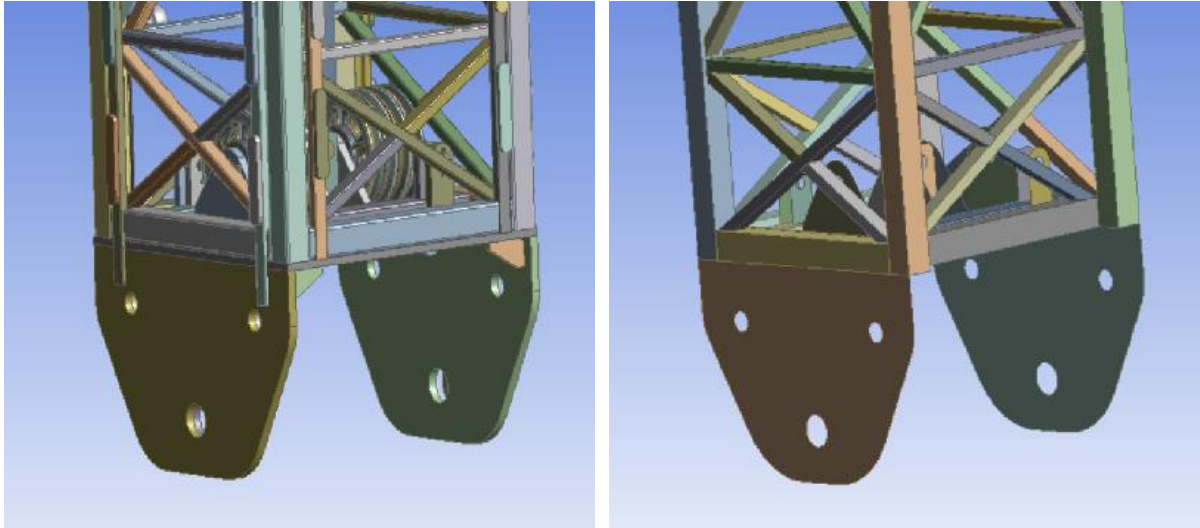
Obr. 8 – Tabulka detailů věže



Obr. 9 – Zjednodušená geometrie věže



Obr. 10 – Porovnání vybraných těles 3D geometrie a skořepinové geometrie



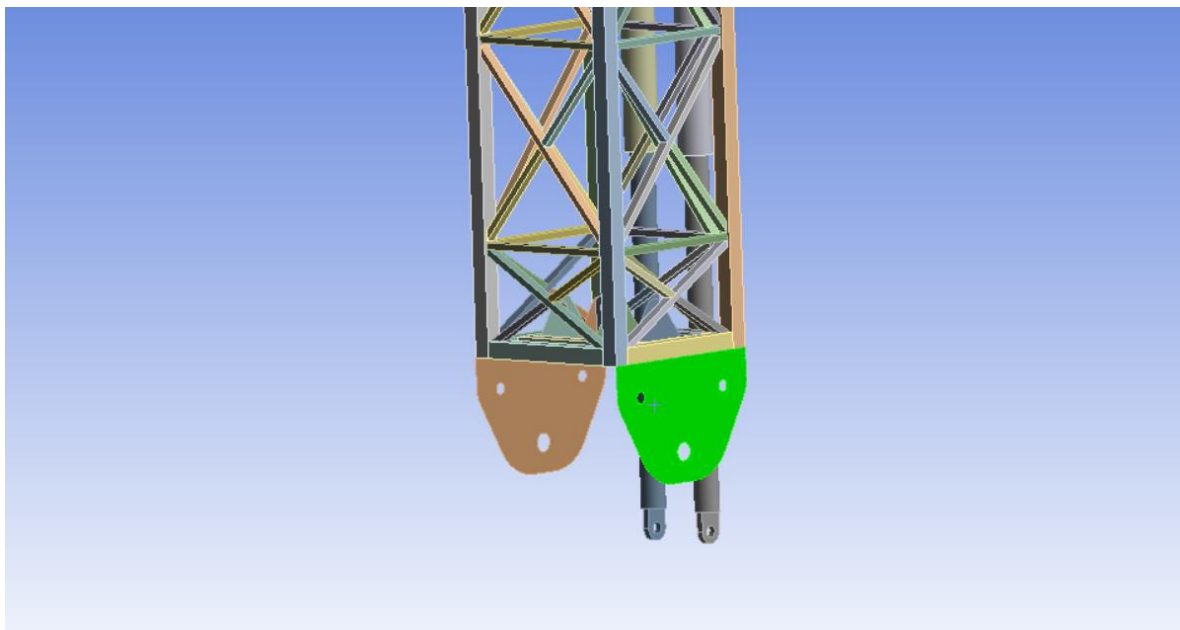
Obr. 11 – Porovnání vybraných těles 3D geometrie a skořepinové geometrie

## 5 TVORBA MODELU PRO VÝPOČET METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

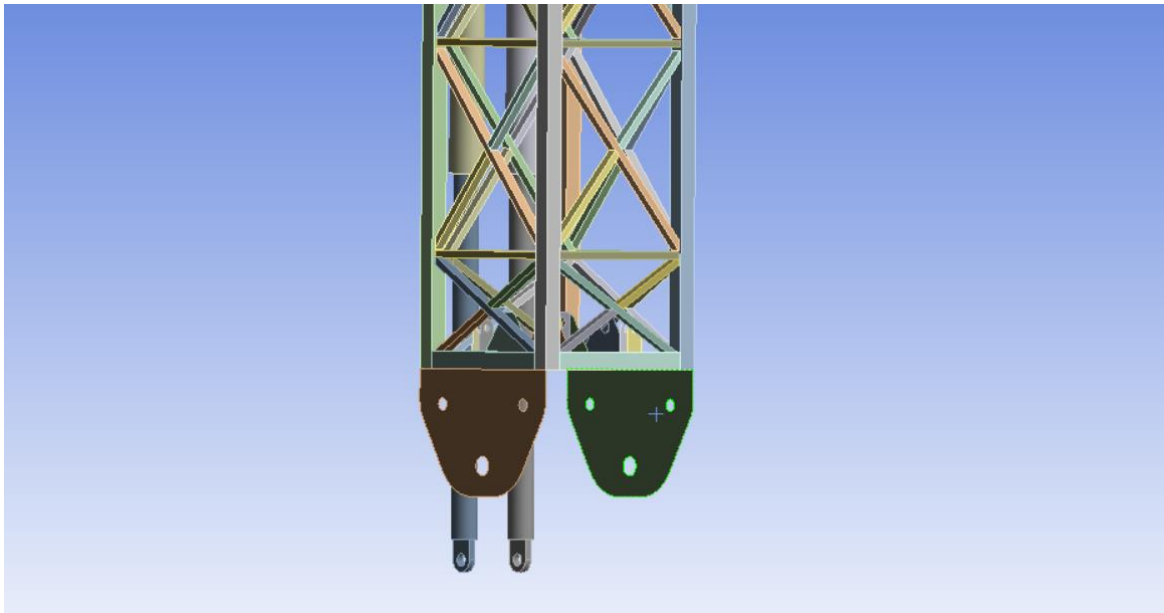
Model pro výpočet metodou konečných prvků vychází z vytvořeného geometrického modelu. V modelu je nastavena tloušťka jednotlivých těles podle 3D geometrie. Následně je zvolen materiál, a to konstrukční ocel S235 (viz [podkapitola 5.2](#)), který je jednotný pro celou věž. Dané konstrukci je zde přiřazena odpovídající síť. Pevně (pomocí svarů) spojené části jsou v modelu spojeny pomocí tzv. *bonded* kontaktů, aby celá konstrukce věže byla jednotná. Pohyblivě (vazbami) spojeným tělesům jsou přiřazeny příslušné vazby, které umožní/zamezí pohybu těchto těles. Jakmile je vytvořena síť, kontakty a vazby, tak jsou zavedeny okrajové podmínky na příslušná místa.

### 5.1 TLOUŠŤKA

Jak už bylo zmíněno (viz [kapitola 4](#)), tak model věže je tvořen plochami s nulovou tloušťkou. Pro dotvoření vlastností trojrozměrného tělesa je nutné nastavit tloušťku jednotlivým tělesům této konstrukce. V modelu se to provede takovým způsobem, že se označí plocha tělesa a této je následně přiřazena tloušťka ve formě konstanty. Příklad na Obr. 12.



Obr. 12 – Označená plocha vybraného tělesa pro přiřazení tloušťky – *Bottom*



Obr. 13 – Označená plocha vybraného tělesa pro přiřazení tloušťky – *Top*

Označená plocha se „rozsvítí“ zeleně z jedné strany – *Bottom*, a z té druhé lze vidět zelený obrys tělesa – *Top*. Tloušťka je přidána kolmo na označenou plochu. *Bottom* znamená „dovnitř“. *Top* znamená „ven“.

Tabulka takového přiřazení v prostředí *ANSYS Mechanical* je na Obr. 14. Tloušťka je uvedena pod pojmem *Thickness* a plocha k přiřazení vhodného směru tloušťky pod pojmem *Offset Type*. U prvku z Obr. 12 se vybrala plocha *Top* (Obr. 13) a tloušťka se nastavila na 6 mm.

Definition	
<input type="checkbox"/> Suppressed	No
Dimension	3D
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
<input type="checkbox"/> Thickness	6, mm
Thickness Mode	Manual
Offset Type	Top
Treatment	None
Model Type	Shell
Material	
<input type="checkbox"/> Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Properties	

Obr. 14 – Tabulka označené plochy vybraného tělesa (desky)



## 5.2. MATERIÁL

Kromě přiřazené tloušťky je nutné přiřadit profilům i odpovídající materiál. Celá věž je tvořena ocelí S235. Prvotně navržený materiál, který je možné změnit na základě výsledků pevnostní analýzy konstrukce. Jedná se o nízkolegovanou ocel pro stavbu ocelových konstrukcí.

Model je uvažován jako lineární, je tedy uvažována lineární závislost mezi napětím a poměrnou deformací materiálu, která je definována Hookeovým zákonem.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.2.1)$$

- E je modul pružnosti v tahu
- $\varepsilon$  je poměrné délkové prodloužení

Musí být splněna podmínka, že redukované napětí materiálu je menší než mez kluzu. Pokud není splněna, tak dojde k výskytu plastických deformací a Hookův zákon nebude platit.

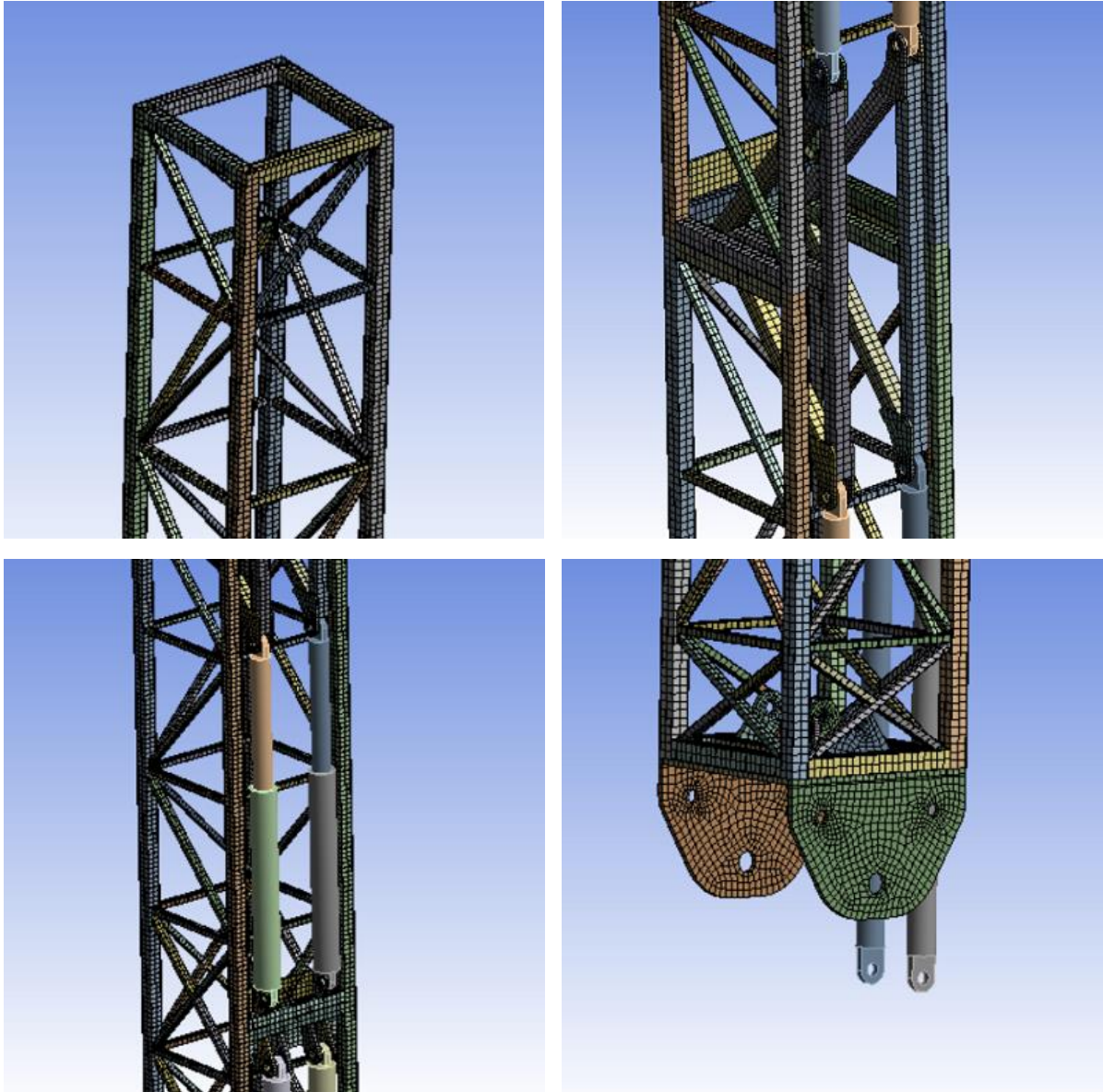
Tab. 2 – Vlastnosti materiálu S235

Veličina	Označení	Hodnota	Základní jednotka
Youngův modul pružnosti	E	$210 \cdot 10^9$	Pa
Poissonovo číslo	$\mu$	0,3	-
Hustota	$\rho$	9553	$\text{kg/m}^3$
Mez kluzu	Re	$235 \cdot 10^6$	Pa
Mez pevnosti v tahu	Rm	$350 \cdot 10^6$	Pa

Jako materiál je zvolena konstrukční ocel o hustotě  $9553 \text{ kg/m}^3$ . Hustota byla (z běžné hodnoty  $7850 \text{ kg/m}^3$ ) navýšena z důvodu nezahrnutí některých těles, reálně přítomných v konstrukci, do geometrického, popř. numerického modelu. Hmotnostní vliv nezahrnutých částí je takto, alespoň zjednodušeně, zahrnut do výpočtu. Na Obr. 14 je materiál přiřazen v poli *Assignment*. Zvolena je *Structural Steel* neboli konstrukční ocel. Je to materiál s vlastnostmi přiřazenými dle Tab. 2.

## 5.3 SÍŤ

K získání co nejpřesnějších výsledků je potřeba nastavit vhodnou síť. Jelikož se tato práce zabývá zjednodušenou geometrií, tak je tato činnost poměrně dost zjednodušena. U skořepinových konstrukcí je poměrně nenáročné vytvořit síť dostatečně kvalitně zachycující hodnocenou geometrii při zachování relativně nízkého počtu konečnoprvkových elementů. Síť se skládá z 18595 uzlů a 16539 elementů o velikosti 100 mm viz Obr. 16. Je vytvořena automaticky pomocí *SW Mechanical*. U válců není vygenerovaná žádná síť, jelikož byly uvažovány jako absolutně tuhá tělesa.



Obr. 15 – Detail sítě na vhodně zvolená místa

<b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	100, mm
<b>Sizing</b>	
<b>Quality</b>	
<b>Inflation</b>	
<b>Batch Connections</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	18595
<input type="checkbox"/> Elements	16539

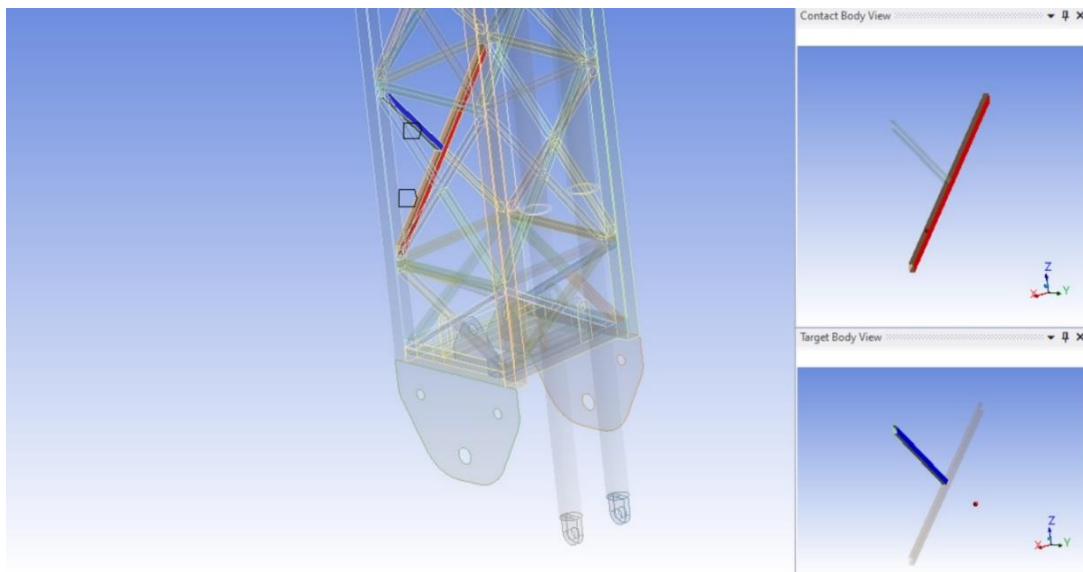
Obr. 16 – Vlastnosti sítě

## 5.4 KONTAKTY A VAZBY

Geometrie konstrukce se skládá z 325 těles. Pro napěťově deformační analýzu je potřeba tato tělesa vhodně spojit za účelem celistvosti a umožnění příp. zamezení vzájemných pohybů (posuvů či rotací). K tomu se využije kontaktů a vazeb.

### 5.4.1 KONTAKTY – DOLNÍ VĚŽ

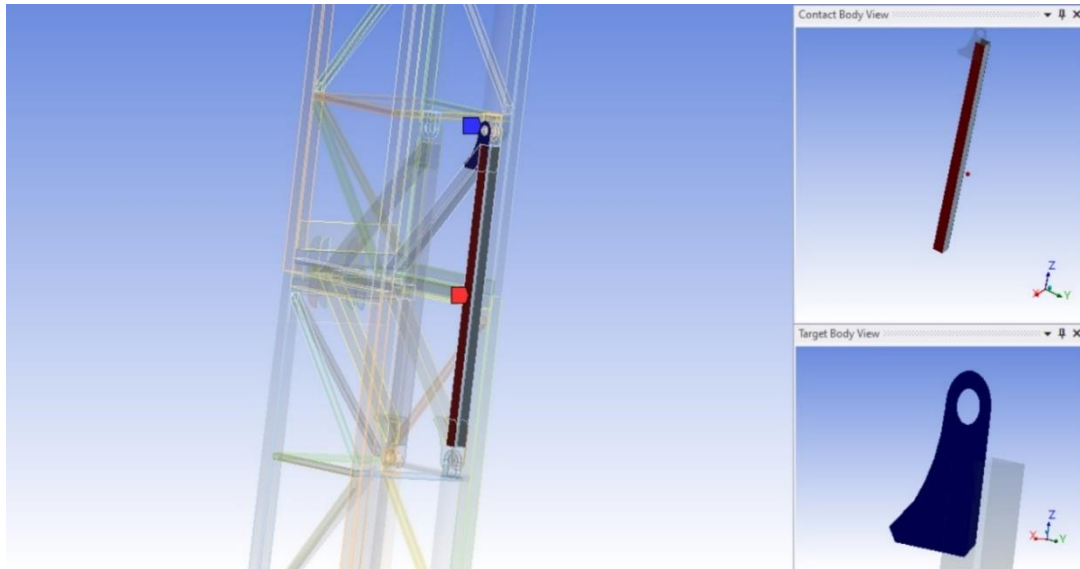
U dolní věže byl použit kontakt typu *Bonded* a tolerance je nastavena na 1 mm. Tedy všechny povrchy a čáry s plochami, nacházející se v tomto okolí a vzdálenosti menší než 1 mm, budou tvořit jedno těleso. Celkový počet kontaktů u tohoto tělesa je 868. Na Obr. 17 je vyobrazeno kontaktní spojení výztuží dolní věže.



Obr. 17 – Vybraný kontakt u dolní věže – plocha 1 prutu příhradové konstrukce a plocha 2. prutu nacházející se ve zmíněné toleranci

## 5.4.2 KONTAKTY – TROJÚHELNÍK

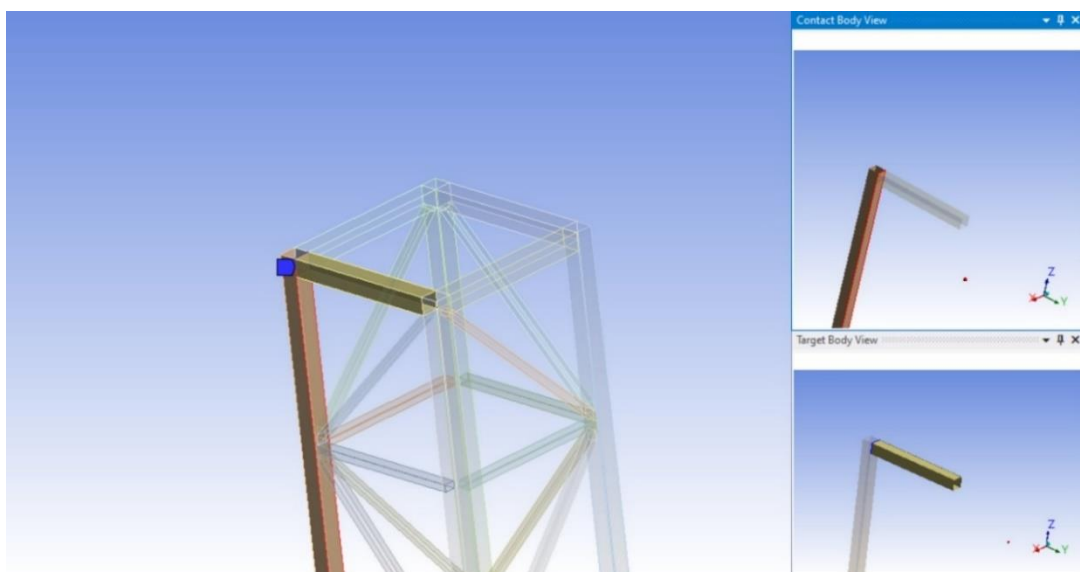
U trojúhelníku byl použit kontakt typu *Bonded* a tolerance je nastavena na 1 mm. Tedy všechny povrchy a čáry s plochami, nacházející se v tomto okolí a vzdálenosti menší než 1 mm, budou tvořit jedno těleso. Celkový počet kontaktů u tohoto tělesa je 113. Na Obr. 18 je vyobrazeno kontaktní spojení výztuží trojúhelníku.



Obr. 18 – Vybraný kontakt u trojúhelníku – plocha tělesa obsahující oko pro čep a 1 plocha trojúhelníku nacházející se ve zmíněné toleranci tohoto tělesa

## 5.4.3 KONTAKTY – HORNÍ VĚŽ

U horní věže byl použit kontakt typu *Bonded* a tolerance je nastavena na 1 mm Tedy všechny povrchy a čáry s plochami, nacházející se v tomto okolí a vzdálenosti menší než 1 mm, budou tvořit jedno těleso. Celkový počet kontaktů u tohoto tělesa je 313. Na Obr. 19 je vyobrazeno kontaktní spojení výztuží horní věže.



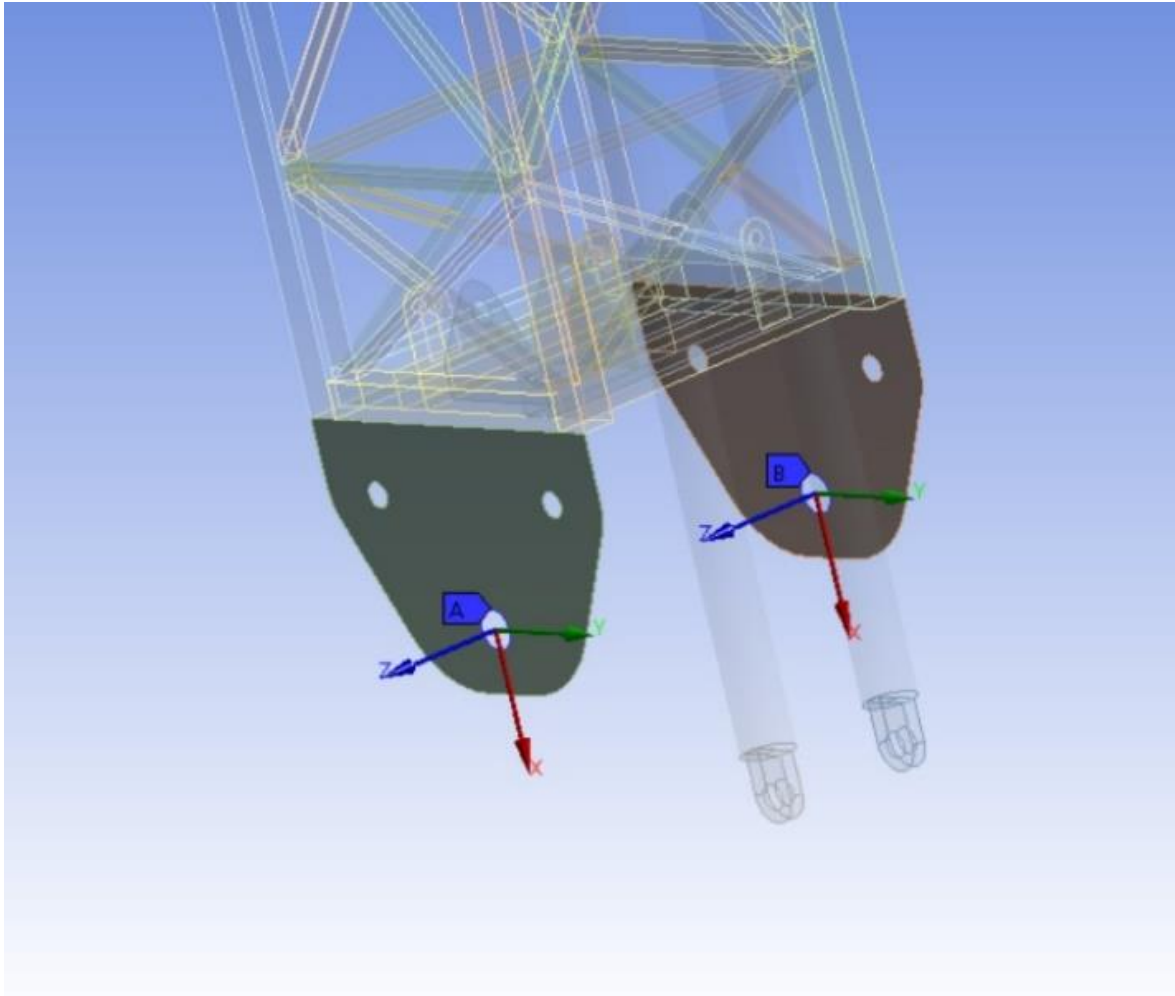
Obr. 19 – Vybraný kontakt u horní věže – 2 nosíková tělesa na horní části věže

#### 5.4.4 VAZBY – KLOUBOVÉ

Použil se typ vazby *Revolute*. Jedná se o vazbu, která zamezí posuvům ve všech osách a umožní pouze rotaci kolem osy z.

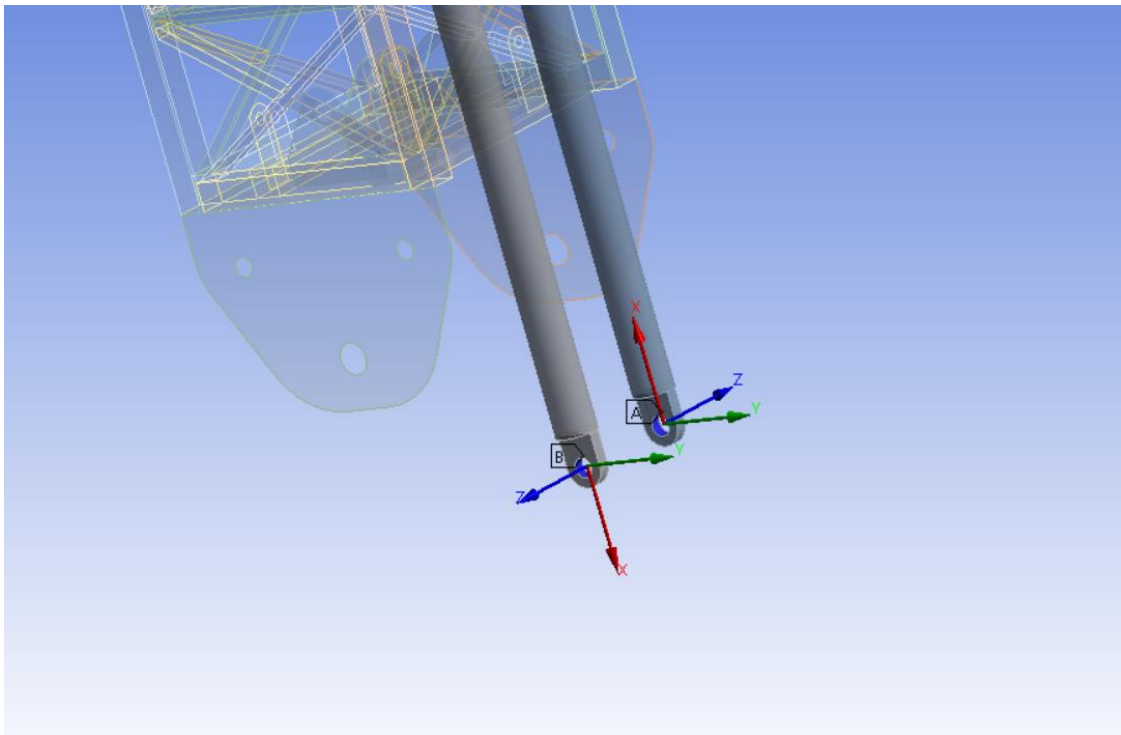
Zde jsou uvedena místa použití těchto vazeb:

1. a 2. KLOUBOVÁ VAZBA:



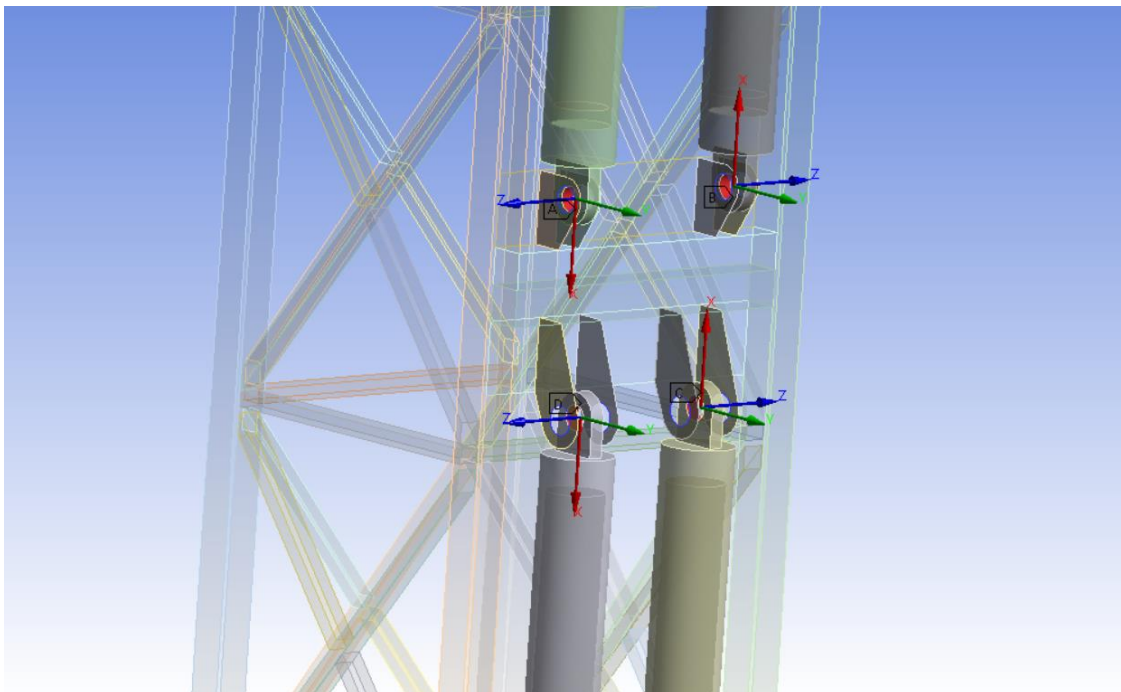
Obr. 20 – Vazby u 2 desek na dolní věži

### 3. A 4. KLOUBOVÁ VAZBA:



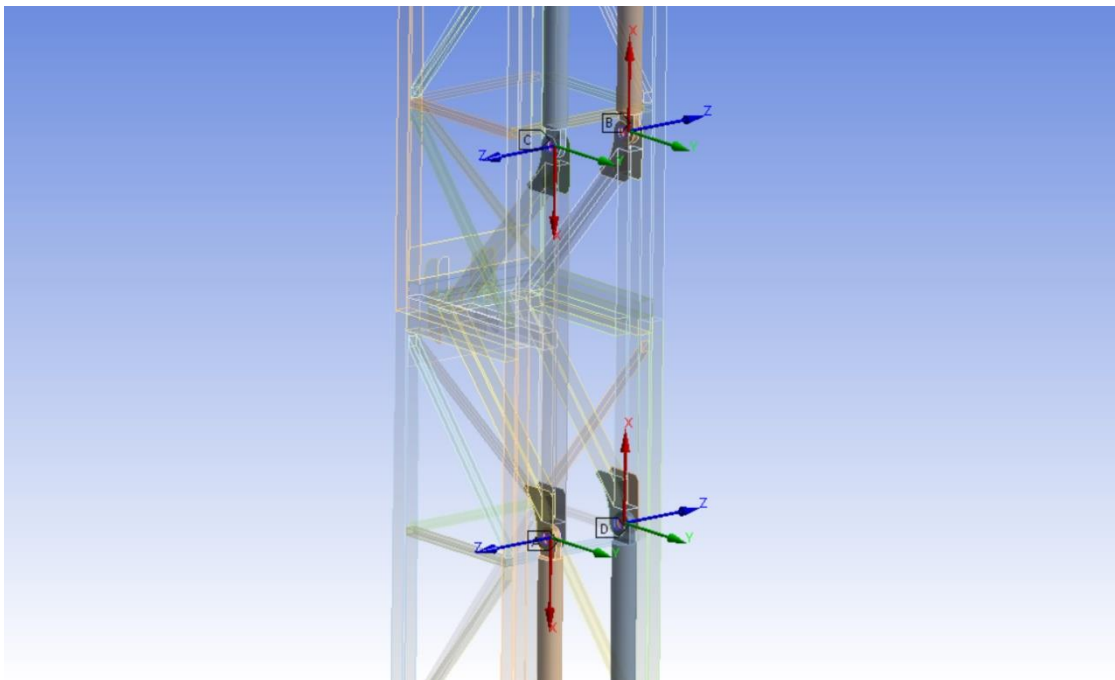
Obr. 21 – Vazby u 1. páry hydraulických válců, která jsou připevněná k nákladnímu podvozku

### 5. – 8. KLOUBOVÁ VAZBA:



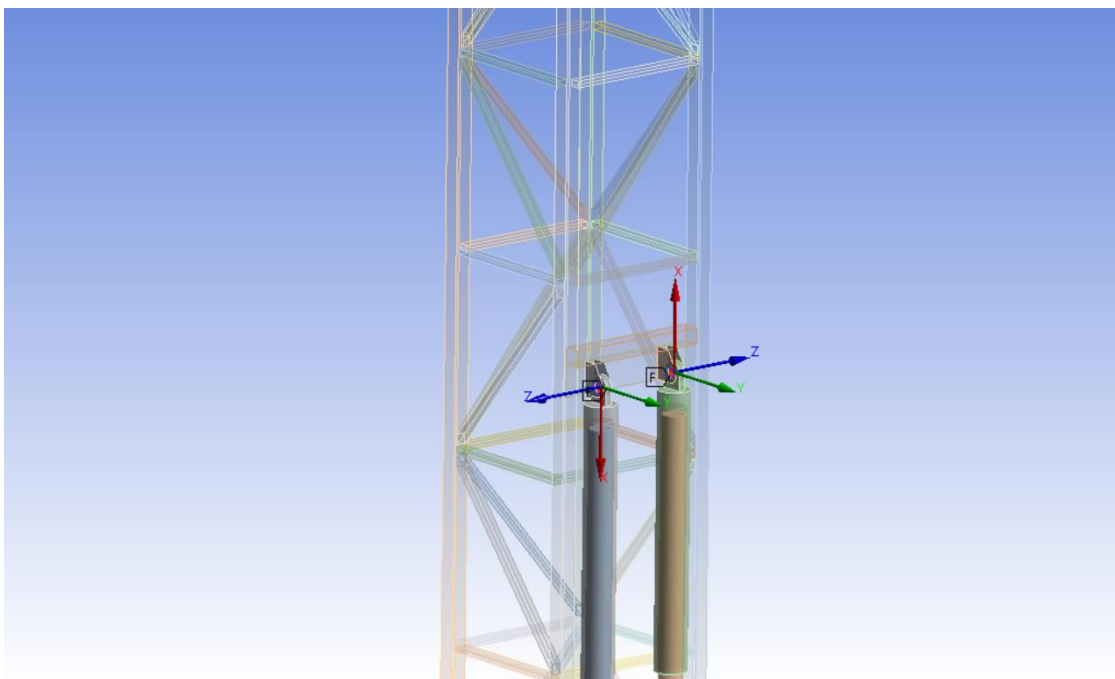
Obr. 22 – Vazby 1. páry hydraulických válců, která jsou připevněná k nákladnímu podvozku z druhého konce a oka 2. páry hydraulických válců nacházející se v těsné blízkosti nad nimi

9. – 12. KLOUBOVÁ VAZBA:



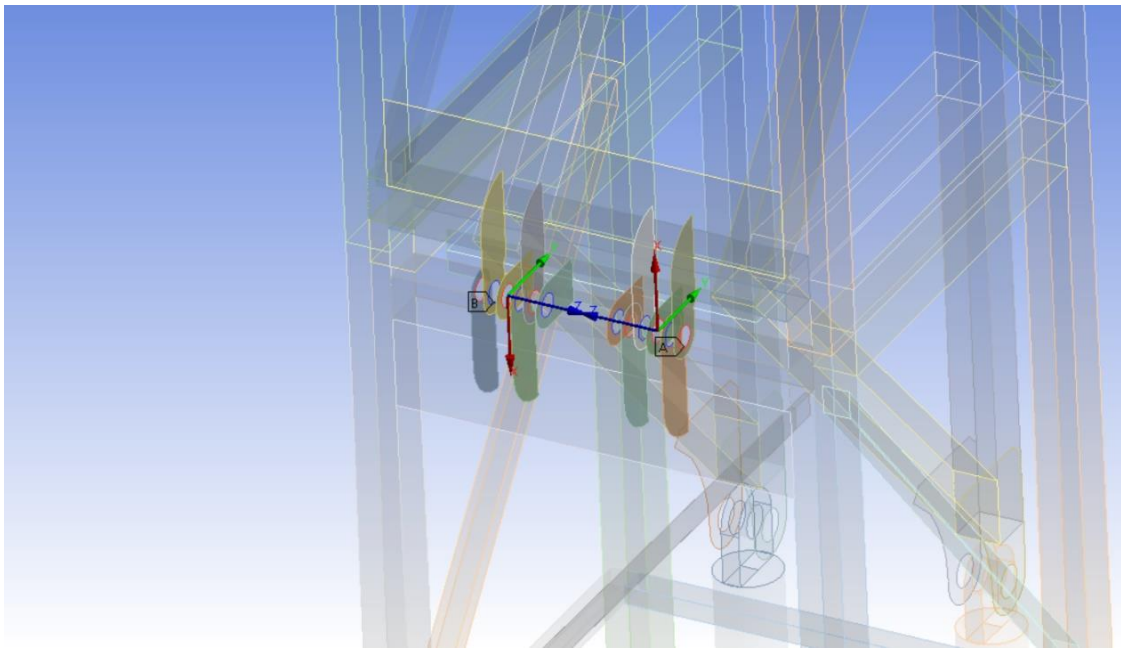
Obr. 23 – Vazby 2. páru hydraulických válců z druhého konce a oka 3. páru hydraulických válců (oba dva páry válců jsou spojené s trojúhelníkem pomocí čepu)

13. A 14. KLOUBOVÁ VAZBA:



Obr. 24 – Vazby 3. páru hydraulických válců z druhého konce

15. A 16. KLOUBOVÁ VAZBA:



Obr. 25 – Vazby těles spojených čepem z druhé strany věže v okolí 3. vrcholů (3. vrcholem je průsečík ramen) obou trojúhelníků (druhé dva vrcholy jsou u válců)

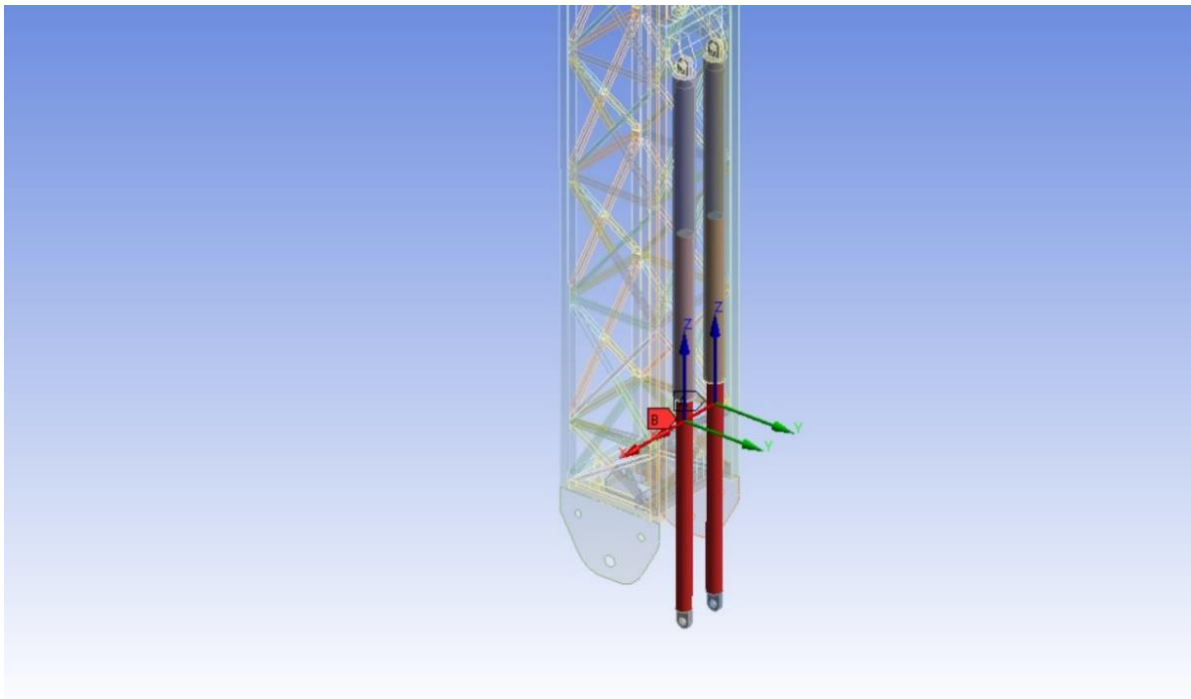


## 5.4.5 VAZBY – POSUVNÉ

Posuvný pohyb vykonávají píсты uvnitř válců (zasouvání/vysouvání). Použil se typ vazby *General*. Jedná se o obecnou vazbu, která byla nadefinována. Ve všech třech případech (3 páry válců) se bude jednat o tu stejnou. Zamezí se rotacím kolem všech os a posuvům v ose x a y. Povolen bude pouze posuvný pohyb v ose z.

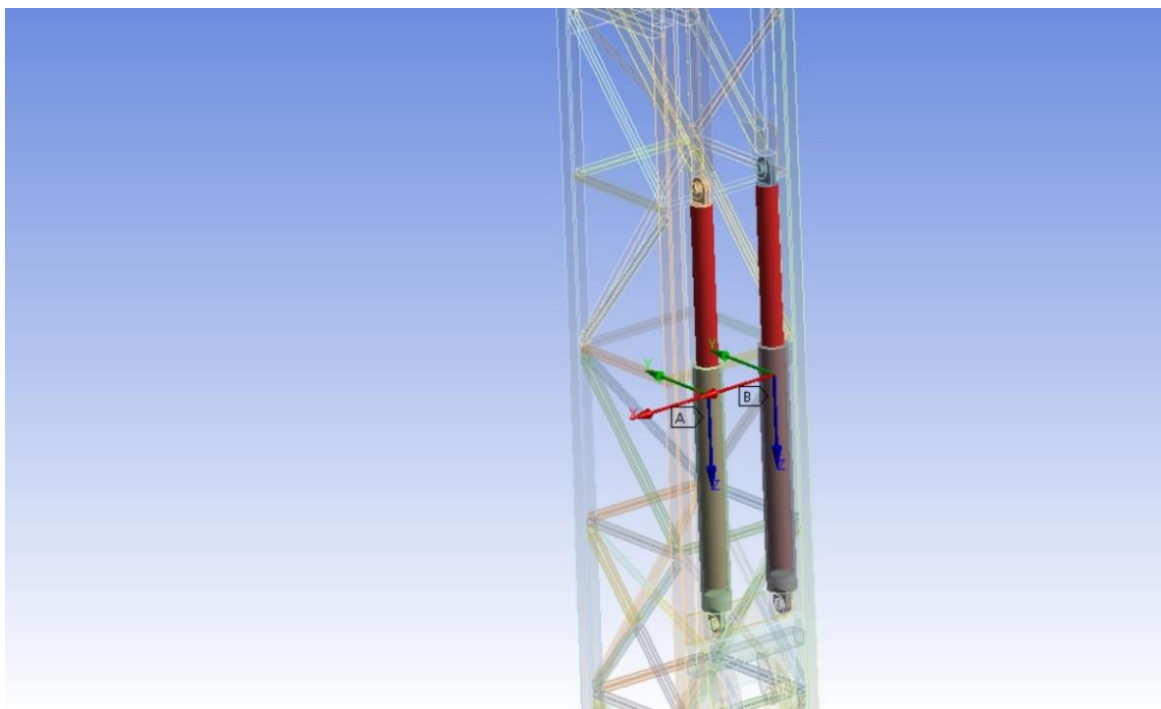
Zde jsou uvedena místa použití této vazby:

1. A 2. POSUVNÁ VAZBA (PRO KAŽDÝ HYDRAULICKÝ VÁLEC ZVLÁŠŤ):



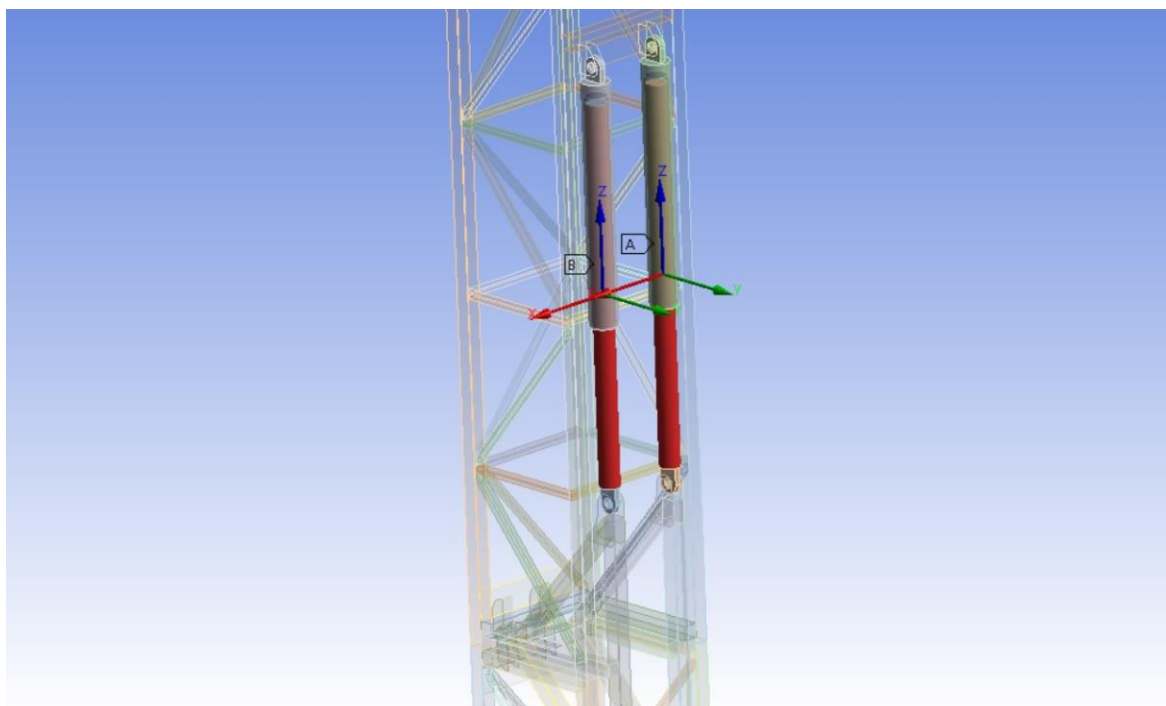
Obr. 26 – Vazby 1. páru hydraulických válců

3. A 4. POSUVNÁ VAZBA (PRO KAŽDÝ HYDRAULICKÝ VÁLEC ZVLÁŠŤ):



Obr. 27 – Vazby 2. páru hydraulických válců

5. A 6. POSUVNÁ VAZBA (PRO KAŽDÝ HYDRAULICKÝ VÁLEC ZVLÁŠŤ):



Obr. 28 – Vazby 3. páru hydraulických válců

## 6 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

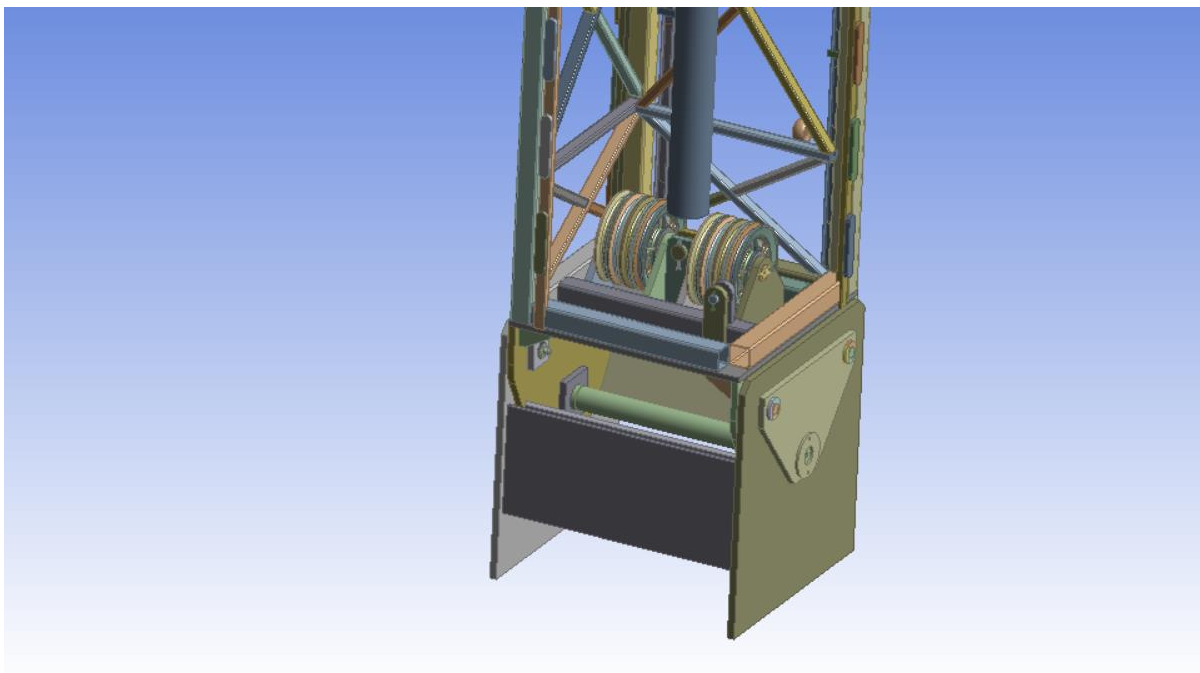
K provedení jakéhokoliv typu výpočtu je potřeba nastavit okrajové podmínky. V našem případě se bude jednat o gravitační zrychlení, posuvy pístů v jednotlivých krocích a síly, jež budou nahrazovat účinky lan v lanových převodech.

Jak už bylo zmíněno dříve, tak na věži se nachází výtah s karuselem a rameny. V této práci je uvažován jako hmotný bod, tedy ponechá se jeho hmotnost. Tato hmotnost je zahrnuta do síly, která vlivem gravitačního pole působí na věž. Jedná se o sílu, jež je násobkem hmotnosti a gravitačního zrychlení.

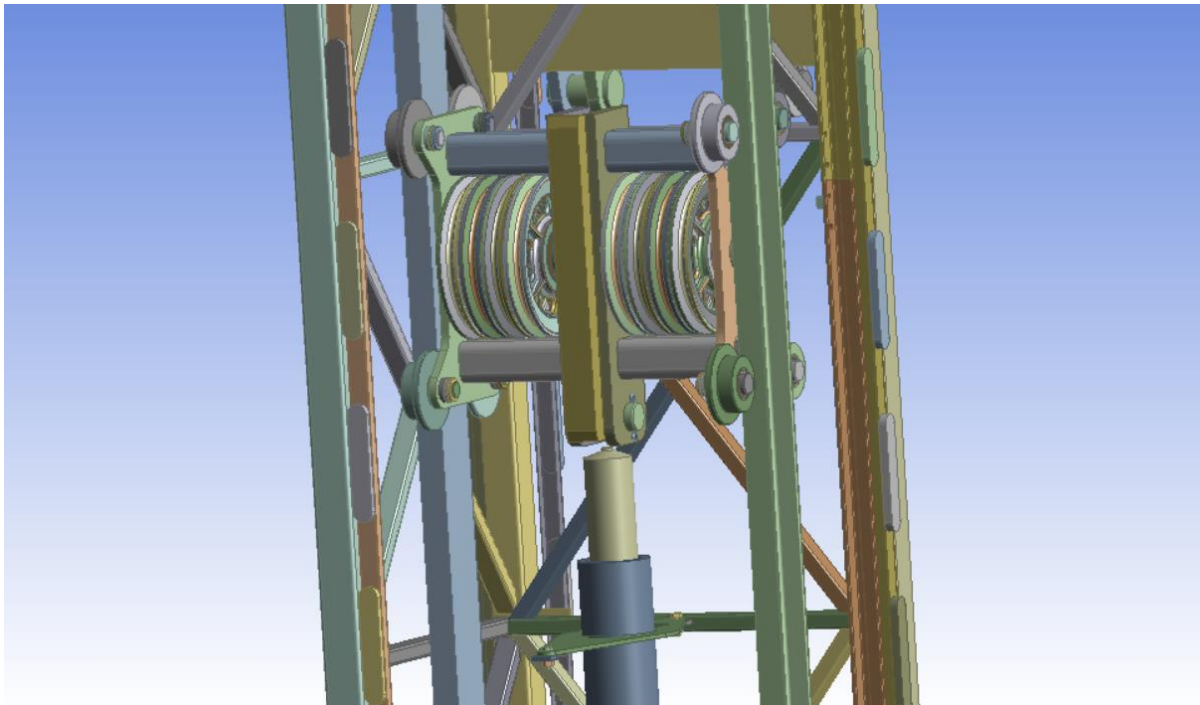
Tato atrakce obsahuje celkem 7 hydraulických válců, z nichž 6 je vnějších a 1 je vnitřní. Zatímco u všech vnějších válců jsou aplikovány okrajové podmínky (vysunutí/zasunutí) v numerickém modelu, u vnitřního válce je použita okrajová podmínka síly (složek x a y).

Dále je zde soustava kladek, na nichž jsou lana a celý princip je založen na statické rovnováze sil. V nejspodnější části věže je umístěno celkem 8 kladek viz Obr. 29, které jsou nepohyblivé a slouží pouze pro přenos sil. Nad nimi je umístěno dalších 8 kladek viz Obr. 30, které se už pohybují nahoru a dolů prostřednictvím vnitřního hydraulického válce. Na nejsvrchnější části horní části věže se nachází 2 kladky viz Obr. 31, které jsou nepohyblivé. Kladky a ani vnitřní válec nejsou sestrojeny v geometrii, protože to není nezbytné ke splnění cíle této práce. Uvažují se síly v lanech na kladkách.

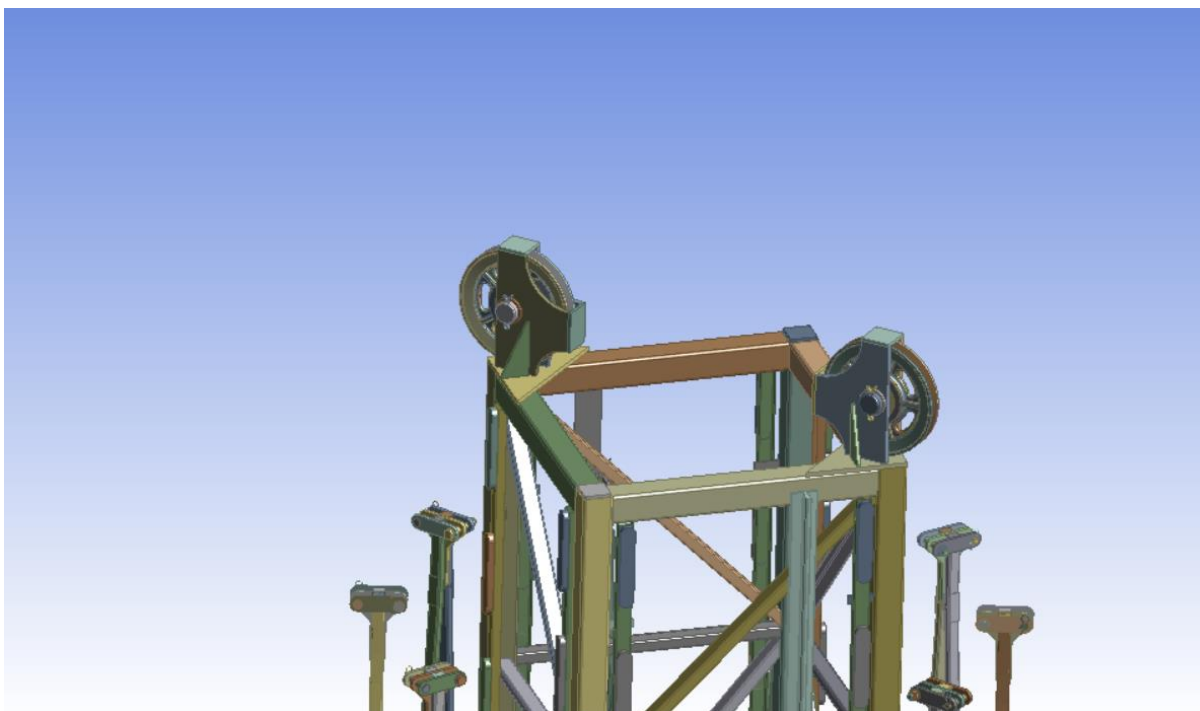
Zatížení větrem je zanedbáno s předpokladem stavění a skládání pouze za příznivých povětrnostních podmínek.



Obr. 29 – Zobrazení 8 nepohyblivých kladek v nejspodnější části věže



Obr. 30 - Zobrazení 8 pohyblivých kladek u 2. konce vnitřního hydraulického válce



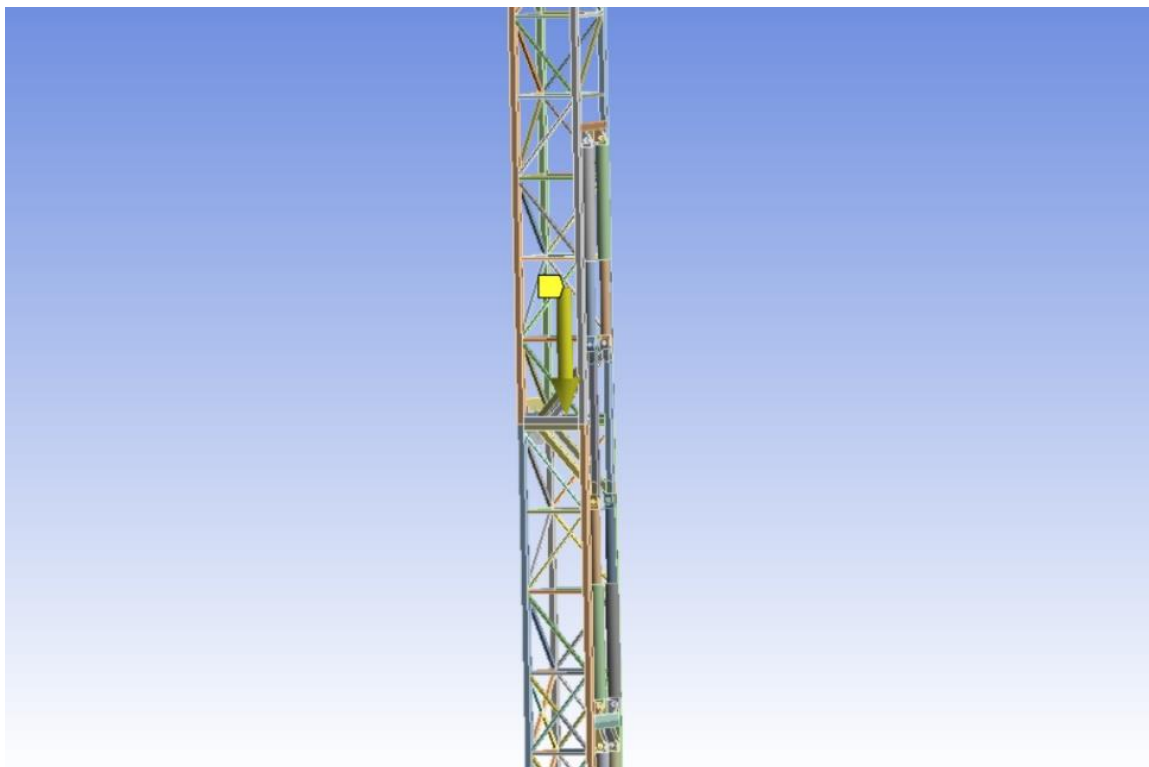
Obr. 31 – Zobrazení 2 nepohyblivých kladek na nejsvrchnější částí věže

## 6.1 GRAVITAČNÍ ZRYCHLENÍ

Jedná se o zrychlení, které tělesu uděluje gravitační síla. V modelu je pojmenovaná jako „*Standard Earth Gravity*“ neboli standartní gravitační zrychlení. Její hodnota je rovna  $9,8066 \text{ m/s}^2$ .

Zde je uvedeno místo aplikace takové okrajové podmínky:

1. OKRAJOVÁ PODMÍNKA:



Obr. 32 – Okrajová podmínka – Gravitační zrychlení

## 6.2 POSUVY PÍSTNIC S PÍSTY V HYDRAULICKÝCH VÁLCÍCH

Jsou umožněné pohyby pístů v hydraulických válcích. Definuje se to zde pro uskutečnění napětově deformační analýzy konstrukce ve vybraných polohách při stavění/skládání kolotoče. Postupným nastavováním hodnot vysunutí/zasunutí pístů se bude realizovat skládání/rozkládání věže. Konstrukce věže nebude modelována ve vybraných polohách pokaždé znovu, ale výpočet proběhne automaticky ve všech polohách.

Na základě testování pohybu obou částí věže se zvolily hodnoty posunutí jednotlivých párů hydraulických válců. Rovněž i počet kroků (časů). Nakonec se dospělo k výsledným jednotlivým posunům v Tab. 3.

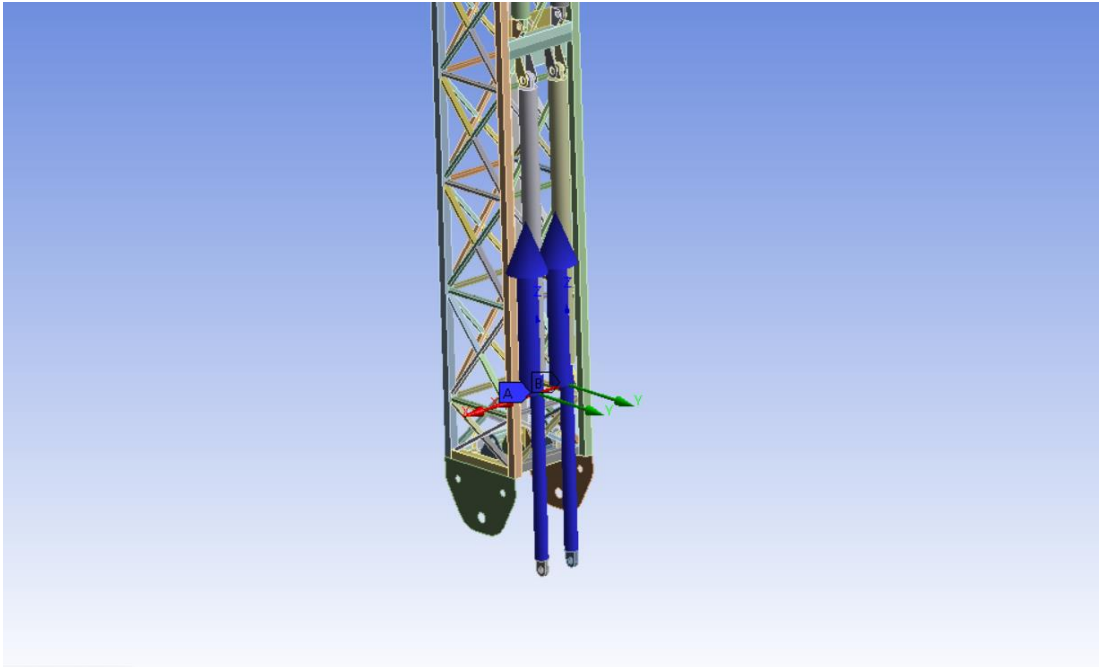
Tab. 3 – Posuvy hydraulických válců

Čas (s)	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)
1	0	0	0
2	180	0	0
3	180	395	0
4	180	395	395
5	363	395	395
6	363	785	395
7	363	785	785
8	546	785	785
9	546	1175	785
10	546	1175	1175
11	729	1175	1175
12	729	1565	1175
13	729	1565	1565
14	912	1565	1565
15	912	1955	1565
16	912	1955	1955
17	1095	1955	1955
18	1095	2345	1955
19	1095	2345	2345

Písty se pohybují pouze jedním směrem, a to uvnitř válce. Tento vzájemný pohyb je umožněn.

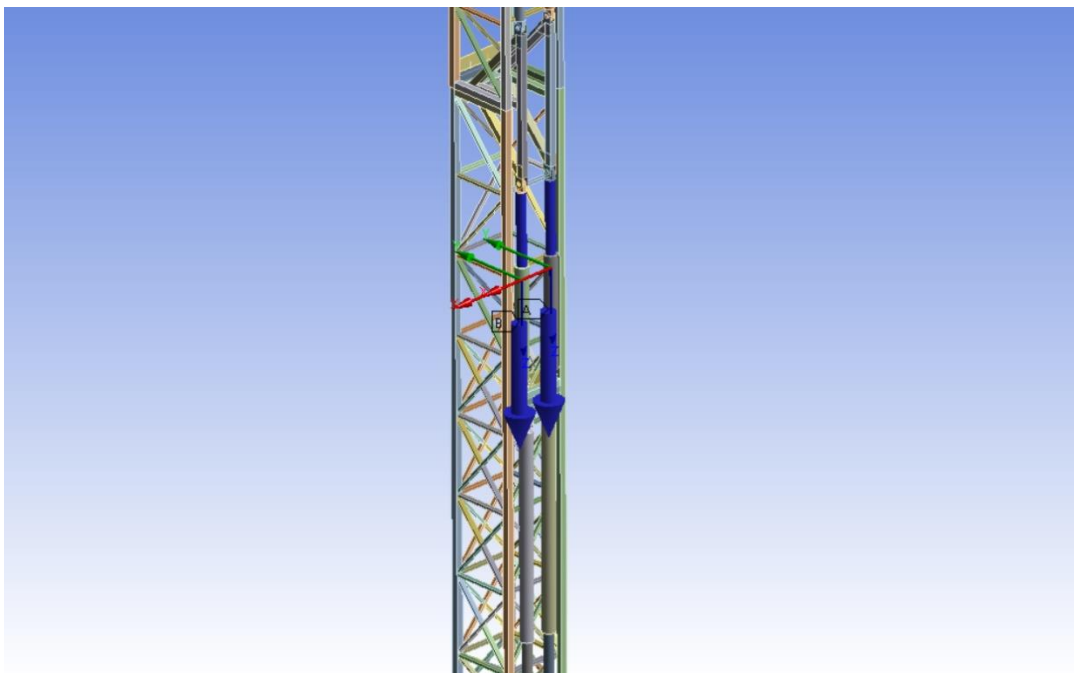
Zde jsou uvedena místa aplikace takové okrajové podmínky:

2. a 3. OKRAJOVÁ PODMÍNKA (PRO KAŽDÝ HYDRAULICKÝ VÁLEC ZVLÁŠŤ):



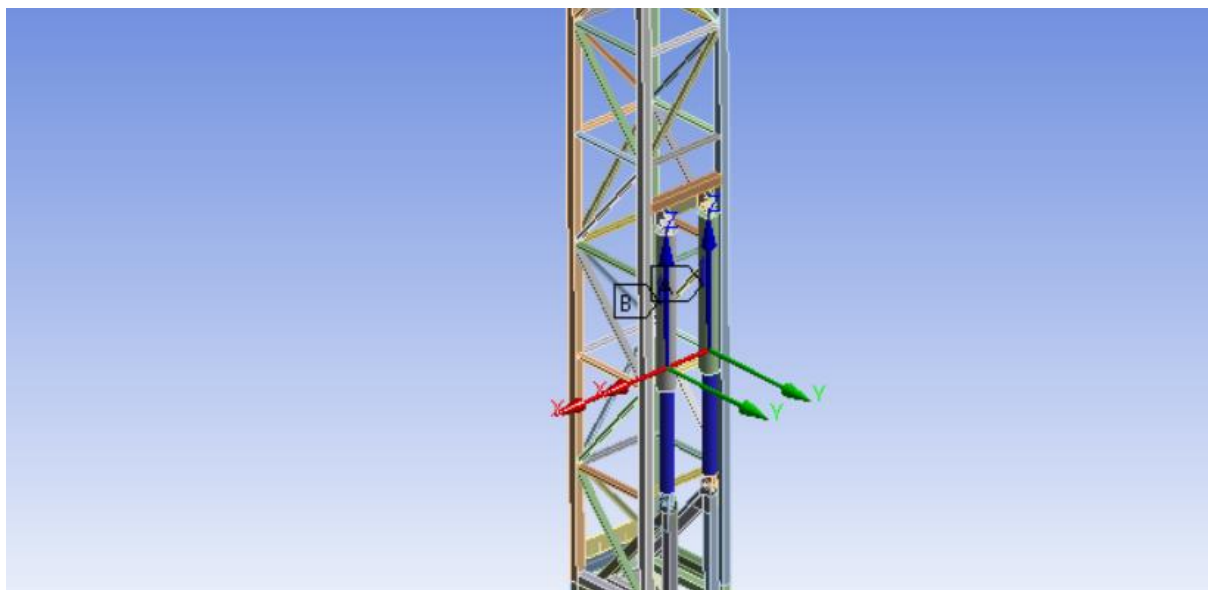
Obr. 33 – Okrajová podmínka u 1. páru hydraulických válců – *Displacement* v ose z u 1. páru válců

4. A 5. OKRAJOVÁ PODMÍNKA (PRO KAŽDÝ HYDRAULICKÝ VÁLEC ZVLÁŠŤ):



Obr. 34 – Okrajová podmínka u 2. páru hydraulických válců – *Displacement* v ose z u 2. páru válců

6. A 7. OKRAJOVÁ PODMÍNKA (PRO KAŽDÝ HYDRAULICKÝ VÁLEC ZVLÁŠŤ):

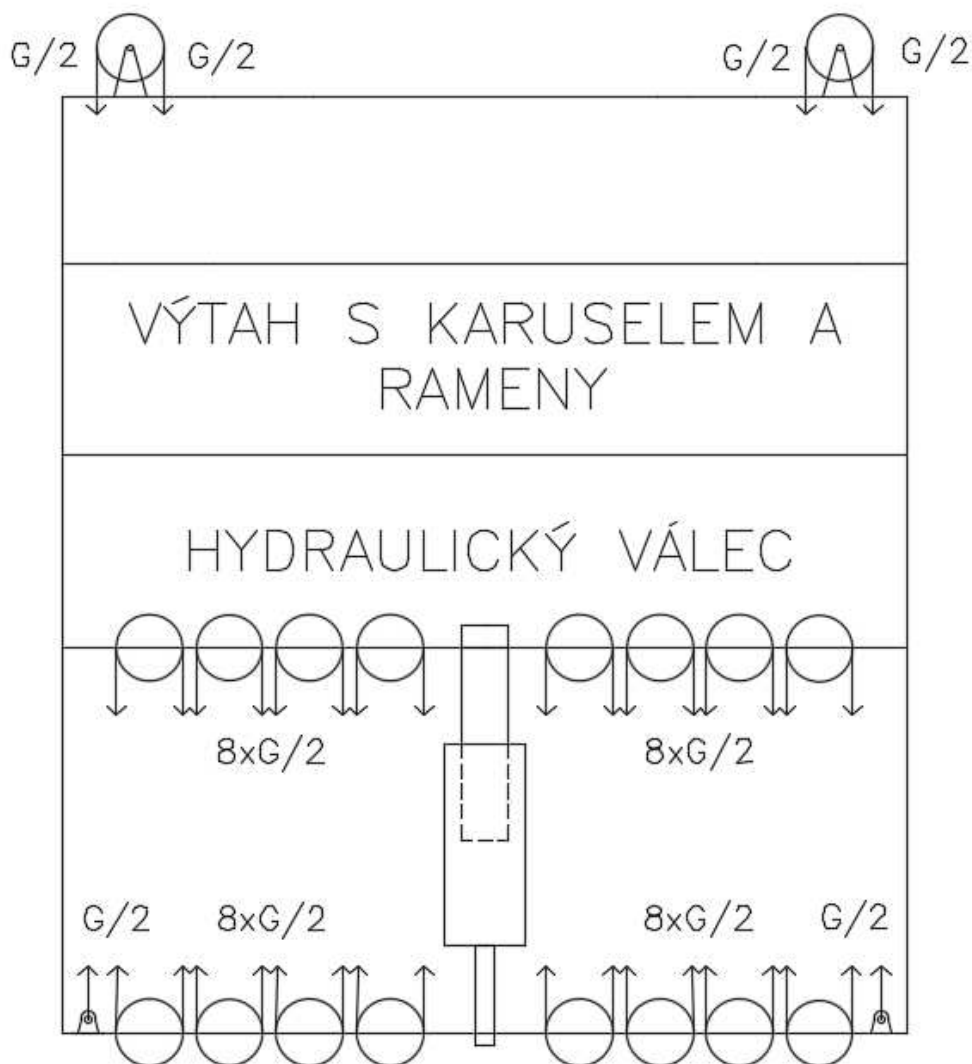


Obr. 35 – Okrajová podmínka u 3. páru hydraulických válců – *Displacement* v ose z u 3. páru válců



## 6.3 SÍLY

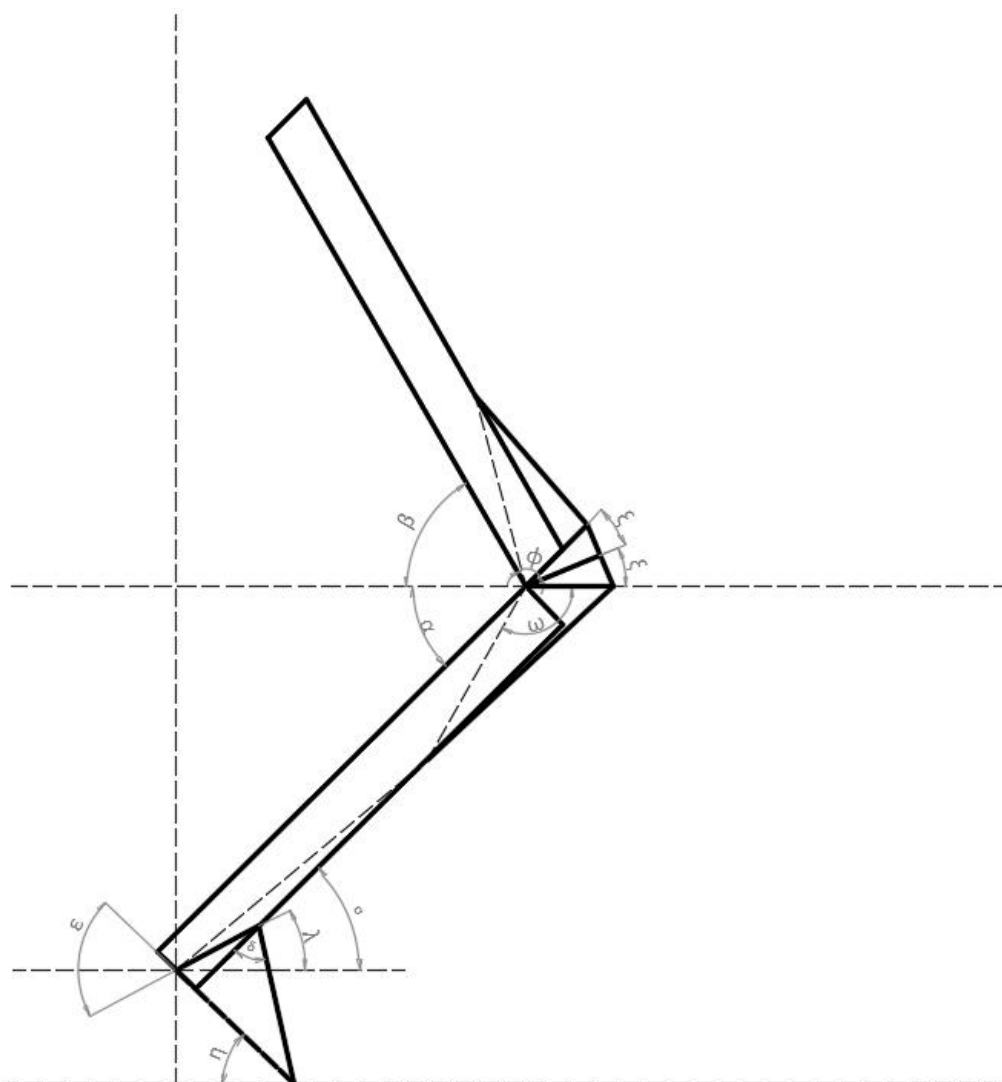
Účinky lan v lanových převodech jsou nahrazeny silami. Na Obr. 36 jsou vykresleny akční síly těchto lan. Avšak do okrajových podmínek jsou zadány síly reakční. Tyto síly mají opačný směr a po součtu musí vyjít výsledná reakce rovna tíze výtahu s karuselem a rameny, tedy  $G$ . Tato síla má směr svislý vzhůru.



Obr. 36 – Ilustrace akčních sil atrakce ve vertikální poloze

Avšak hodnoty jednotlivých sil (násobků  $G/2$ ) nejsou konstantní při vysouvání/zasouvání pístů uvnitř hydraulických válců, tj. při změně polohy horní a dolní věže. Pro výpočet těchto neznámých je nutné si vypsát rozměry jednotlivých částí věže, popř. spočítat zbývající dle Obr. 37 a následně pomocí jiných úhlů na Obr. 38 dopočítat úhly alfa a beta. Úhel alfa je ostrý úhel mezi dolní věží a horizontální polohou. Úhel beta je ostrý úhel mezi horní věží a horizontální polohou.





Obr. 38 – Ilustrace potřebných úhlů v náhodně sklopené poloze věže

K určení úhlů alfa a beta při stavění/sklápění věže je zapotřebí určit jednotlivé rozměry z Obr. 37. Některé z nich je nutné vypočítat viz níže. Z Obr. 38 se spočítají 2 úhly (eta, ksi) viz níže.

Změřené hodnoty:

Tab. 4 – Tabulka změřených hodnot k určení úhlů alfa a beta při stavění/skládání věže

k [mm]	l [mm]	e0 [mm]	d0 [mm]	h0 [mm]	a [mm]	g [mm]	f [mm]	c [mm]
552	536,17	5434,8	3035	3035	4930,5	2340	1645,5	4363,9

Vypočtené hodnoty:

Rozměr m se vypočte z výrazu:

$$m = \sqrt{k^2 + l^2} \quad (6.3.1.1)$$

$$m = \sqrt{552^2 + 536,17^2}$$

$$m = 769,53 \text{ mm}$$

Úhel  $\eta$  se vypočte z výrazu:

$$\eta = \arctan\left(\frac{l}{k}\right) \quad (6.3.1.2)$$

$$\eta = \arctan\left(\frac{536,17}{552}\right)$$

$$\eta = 44,17^\circ$$

Úhel  $\xi$  se vypočte z výrazu:

$$\xi = \arcsin\left(\frac{g}{f}\right) \quad (6.3.1.3)$$

$$\xi = \arcsin\left(\frac{2340}{1645,5}\right)$$

$$\xi = 45,32^\circ$$

Úhel  $\alpha$  se vypočte z výrazu:

$$\alpha = \arccos\left(a^2 + m^2 - \frac{(e0 - P1)^2}{(2 \cdot a \cdot m)}\right) - \eta + 6,44 \quad (6.3.1.4)$$

- mění se pouze hodnota P1 (posuv 1. páru hydraulických válců), ostatní hodnoty jsou konstantní

Úhel  $\beta$  se vypočte z výrazu:

$$\beta = 360^\circ - \arccos\left(\left(c^2 + f^2 - \frac{(d0^2 + P2)^2}{2 \cdot c \cdot f}\right)\right) - \arccos\left(c^2 + f^2 - \frac{(h0 + P3)^2}{2 \cdot c \cdot f}\right) - 2 \cdot \xi - 2 \cdot 15,322 - \alpha$$

(6.3.1.5)

- mění se hodnoty P2 (posuv 2. páru hydraulických válců), P3 (posuv 3. páru hydraulických válců) a  $\alpha$ , ostatní hodnoty jsou konstantní

Tab. 5 – Tabulka 19 kroků pohybu hydraulických válců a úhlů alfa a beta při těchto posuvech

Čas (s)	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)
1	0	0	0	89,9	90,5
2	180	0	0	73,2	107,2
3	180	395	0	73,2	90,4
4	180	395	395	73,2	73,6
5	363	395	395	58,5	88,3
6	363	785	395	58,5	74,2
7	363	785	785	58,5	60,0
8	546	785	785	44,7	73,8
9	546	1175	785	44,7	60,2
10	546	1175	1175	44,7	46,6
11	729	1175	1175	31,0	60,3
12	729	1565	1175	31,0	46,4
13	729	1565	1565	31,0	32,5
14	912	1565	1565	16,4	47,0
15	912	1955	1565	16,4	32,0
16	912	1955	1955	16,4	17,0
17	1095	1955	1955	-0,8	34,2
18	1095	2345	1955	-0,8	16,8
19	1095	2345	2345	-0,8	-0,6

K výpočtu sil jsou stanovené potřebné úhly – alfa a beta, a proto je snadné spočítat síly působící na daných místech viz Obr. 31. Celková hmotnost karuselu je 1800 kg.

Tíhová síla G se vypočte z výrazu:

$$G = m_k \cdot g_z$$

(6.3.1.6)

$$G = 1800 \cdot 9,81$$

$$G = 17658 \text{ N}$$

Síla v jednom laně se uvažuje jako  $G/2$ , tedy 8829 N. O poloviční tíhovou sílu se jedná z toho důvodu, že zvedané části jsou nesený dvěma závěsy.

Během stavění/sklápění vlivem posunutí hydraulických válců dochází k rozložení sil do dvou směrů – do osy x a y. Ve směru osy y působí daná část sil v lanech. Ve směru osy x působí daná část sil ve válečcích.

Síla v jednom laně se vypočte z výrazu:

$$F_1 = \frac{G}{2} \cdot \sin \alpha \quad (6.3.1.7)$$

Síla ve válečcích se vypočte z výrazu:

$$F_2 = \frac{G}{2} \cdot \cos \alpha \quad (6.3.1.8)$$

Síla v jednom laně ve směru x u dolní věže se vypočte z výrazu:

$$F_{1dx} = F_1 \cdot \cos \alpha \quad (6.3.1.9)$$

Síla v jednom laně ve směru y u dolní věže se vypočte z výrazu:

$$F_{1dy} = F_1 \cdot \sin \alpha \quad (6.3.1.10)$$

Síla v jednom laně ve směru x u horní věže se vypočte z výrazu:

$$F_{1hx} = F_1 \cdot \cos \beta \quad (6.3.1.11)$$

Síla v jednom laně ve směru y u horní věže se vypočte z výrazu:

$$F_{1hy} = F_1 \cdot \sin \beta \quad (6.3.1.12)$$

Síla ve válečcích ve směru osy x se vypočte z výrazu:

$$F_{2x} = F_2 \cdot \sin \beta \quad (6.3.1.13)$$

Síla ve válečcích ve směru osy y se vypočte z výrazu:

$$F_{2y} = F_2 \cdot \cos \beta \quad (6.3.1.14)$$

Tab. 6 – Hodnoty sil v jednom laně a hodnoty sil do válečků u daných poloh sklápění horní a dolní věže (zaokrouhloeno na 1 desetinné místo)

Čas (s)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	Síla v jednom laně (N)	Síla do válečků (N)
1	89,9	90,5	<b>8828,7</b>	<b>-70,0</b>
2	73,2	107,2	<b>8435,5</b>	<b>-2606,6</b>
3	73,2	90,4	<b>8828,8</b>	<b>-61,3</b>
4	73,2	73,6	<b>8470,9</b>	<b>2489,1</b>
5	58,5	88,3	<b>8825,3</b>	<b>255,2</b>
6	58,5	74,2	<b>8494,9</b>	<b>2405,8</b>
7	58,5	60,0	<b>7648,5</b>	<b>4410,3</b>
8	44,7	73,8	<b>8479,6</b>	<b>2459,0</b>
9	44,7	60,2	<b>7662,6</b>	<b>4385,9</b>
10	44,7	46,6	<b>6414,9</b>	<b>6066,3</b>
11	31,0	60,3	<b>7670,9</b>	<b>4371,4</b>
12	31,0	46,4	<b>6393,4</b>	<b>6088,9</b>
13	31,0	32,5	<b>4740,2</b>	<b>7448,6</b>
14	16,4	47,0	<b>6460,6</b>	<b>6017,6</b>
15	16,4	32,0	<b>4679,8</b>	<b>7486,7</b>
16	16,4	17,0	<b>2579,0</b>	<b>8443,9</b>
17	-0,8	34,2	<b>4964,3</b>	<b>7301,2</b>
18	-0,8	16,8	<b>2555,0</b>	<b>8451,2</b>
19	-0,8	-0,6	<b>-87,9</b>	<b>8828,6</b>

Byly vypočítány hodnoty sil pro všech 19 úhlů alfa a beta viz Tab. 6. Následně se tyto hodnoty a jejich násobky dle Obr. 36 aplikovaly do okrajových podmínek sil. Z důvodu putování těžiště výtahu, s karuselem a rameny, se výsledné hodnoty sil rozloží do os x a y. Jedna složka této síly působí v laně a druhá do válečků. Celková hodnota síly v každé poloze musí být rovna odmocnině součtu druhých mocnin složek sil x a y. V tabulkách viz níže jsou síly označeny tučným černým písmem. Okrajové podmínky zahrnují i jejich násobky a jsou označeny tučným modrým písmem. Záporné násobky hodnot sil v tabulkách níže jsou z důvodu způsobu nastavení relativního pohybu dvojice píst/pístnice v definici posuvné vazby.

Tab. 7 – Hodnoty sil v jednom laně a hodnoty sil do válečků ve směru os x a y u daných poloh sklápění horní a dolní věže (zaokrouhлено na 1 desetinné místo)

Čas (s)	Síla v jednom laně ve směru osy x dolní věže (N)	Síla v jednom laně ve směru osy y dolní věže (N)	Síla v jednom laně ve směru osy x u horní věže (N)	Síla v jednom laně ve směru osy y u horní věže (N)
1	12,1	8828,7	-70,0	8828,4
2	2437,5	8075,6	-2490,4	8059,5
3	2551,1	8452,2	-61,3	8828,6
4	2447,7	8109,5	2388,2	8127,2
5	4613,1	7523,7	255,1	8821,6
6	4440,4	7242,0	2314,8	8173,4
7	3998,0	6520,4	3820,7	6625,9
8	6028,5	5963,3	2361,7	8144,1
9	5447,6	5388,7	3806,5	6650,3
10	4560,6	4511,3	4407,6	4660,9
11	6577,6	3946,8	3798,0	6664,7
12	5482,2	3289,6	4409,2	4629,8
13	4064,6	2438,9	3999,1	2545,0
14	6197,6	1824,6	4403,4	4727,6
15	4489,3	1321,6	3968,3	2480,5
16	2474,0	728,3	2466,5	753,3
17	4963,8	-71,4	4105,2	2791,3
18	2554,7	-36,8	2445,7	739,4
19	-87,9	1,3	-87,9	0,9



Tab. 8 – Okrajové podmínky jednonásobku hodnot sil v jednom laně a do válečků ve směru os x a y u daných poloh sklápění horní a dolní věže (zaokrouhлено na 1 desetinné místo)

Čas (s)	Síla v jednom laně ve směru osy x u dolní věže (N)	Síla v jednom laně ve směru osy y u dolní věže (N)	Síla v jednom laně ve směru osy x u dolní věže (N)	Síla v jednom laně ve směru osy y u dolní věže (N)
1	12,1	8828,7	12,1	8828,7
2	2437,5	8075,6	2437,5	8075,6
3	2551,1	8452,2	2551,1	8452,2
4	2447,7	8109,5	2447,7	8109,5
5	4613,1	7523,7	4613,1	7523,7
6	4440,4	7242,0	4440,4	7242,0
7	3998,0	6520,4	3998,0	6520,4
8	6028,5	5963,3	6028,5	5963,3
9	5447,6	5388,7	5447,6	5388,7
10	4560,6	4511,3	4560,6	4511,3
11	6577,6	3946,8	6577,6	3946,8
12	5482,2	3289,6	5482,2	3289,6
13	4064,6	2438,9	4064,6	2438,9
14	6197,6	1824,6	6197,6	1824,6
15	4489,3	1321,6	4489,3	1321,6
16	2474,0	728,3	2474,0	728,3
17	4963,8	-71,4	4963,8	-71,4
18	2554,7	-36,8	2554,7	-36,8
19	-87,9	1,3	-87,9	1,3

Tab. 9 – Okrajové podmínky osminásobku a šestnáctinásobku (záporného) hodnot sil v jednom laně a do válečků ve směru os x a y u daných poloh sklápění horní a dolní věže (zaokrouhleno na 1 desetinné místo)

Čas (s)	Osminásobek síly v jednom laně ve směru osy x u dolní věže (N)	Osminásobek síly v jednom laně ve směru osy y u dolní věže (N)	Šestnáctinásobek (záporný) síly v jednom laně ve směru osy x u dolní věže (N)	Šestnáctinásobek (záporný) síly v jednom laně ve směru osy y u dolní věže (N)
1	96,9	70629,7	-193,8	-141259,4
2	19499,8	64605,0	-38999,6	-129209,9
3	20409,0	67617,4	-40818,0	-135234,8
4	19581,6	64876,1	-39163,2	-129752,2
5	36904,8	60189,3	-73809,6	-120378,5
6	35523,1	57935,8	-71046,2	-115871,6
7	31983,9	52163,5	-63967,7	-104327,1
8	48228,3	47706,6	-96456,6	-95413,1
9	43581,2	43109,7	-87162,4	-86219,4
10	36485,0	36090,3	-72970,1	-72180,7
11	52620,8	31574,7	-105241,6	-63149,5
12	43857,8	26316,6	-87715,6	-52633,1
13	32516,9	19511,5	-65033,8	-39023,0
14	49581,0	14596,6	-99162,0	-29193,2
15	35914,2	10573,1	-71828,4	-21146,2
16	19791,9	5826,7	-39583,8	-11653,4
17	39710,0	-571,5	-79420,1	1143,1
18	20437,8	-294,2	-40875,6	588,3
19	-703,1	10,1	1406,2	-20,2

Tab. 10 – Hodnoty sil v jednom laně ve směru os x a y a okrajové podmínky dvojnásobku těchto sil u daných poloh sklápění horní a dolní věže (zaokrouhлено na 1 desetinné místo)

Čas (s)	Síla v jednom laně ve směru osy x u horní věže (N)	Síla v jednom laně ve směru osy y u horní věže (N)	Dvojnásobek (záporný) síly v jednom laně ve směru osy x u horní věže (N)	Dvojnásobek (záporný) síly v jednom laně ve směru osy y u horní věže (N)
1	-70,0	8828,4	140,1	-17656,9
2	-2490,4	8059,5	4980,8	-16118,9
3	-61,3	8828,6	122,7	-17657,1
4	2388,2	8127,2	-4776,3	-16254,5
5	255,1	8821,6	-510,2	-17643,2
6	2314,8	8173,4	-4629,6	-16346,9
7	3820,7	6625,9	-7641,3	-13251,8
8	2361,7	8144,1	-4723,4	-16288,2
9	3806,5	6650,3	-7612,9	-13300,5
10	4407,6	4660,9	-8815,2	-9321,8
11	3798,0	6664,7	-7595,9	-13329,3
12	4409,2	4629,8	-8818,5	-9259,5
13	3999,1	2545,0	-7998,2	-5089,9
14	4403,4	4727,6	-8806,8	-9455,1
15	3968,3	2480,5	-7936,6	-4961,0
16	2466,5	753,3	-4933,0	-1506,6
17	4105,2	2791,3	-8210,5	-5582,5
18	2445,7	739,4	-4891,3	-1478,8
19	-87,9	0,9	175,8	-1,8

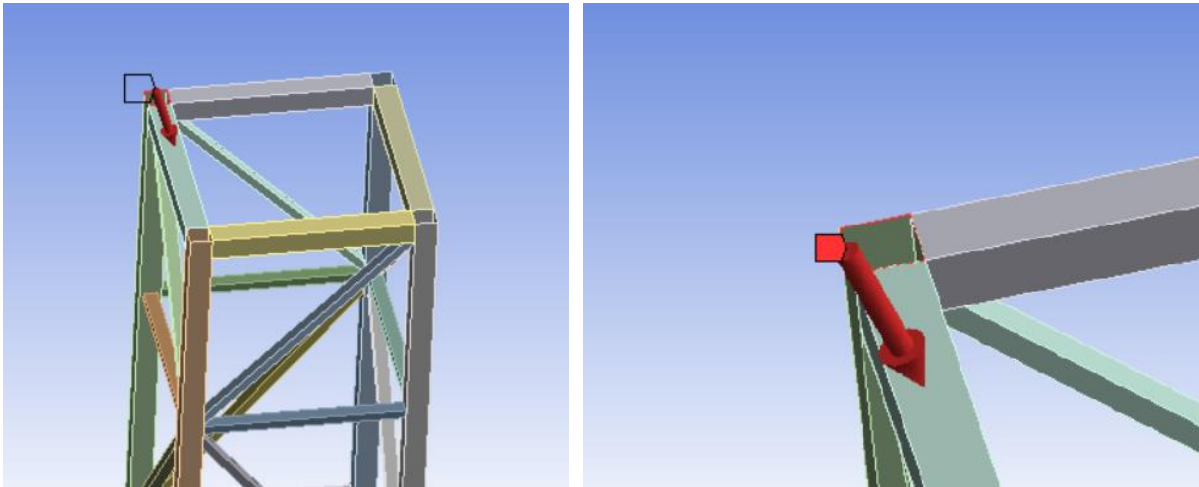
Tab. 11 – Hodnoty sil působící na válečky ve směru os x a y a okrajové podmínky jednonásobku (záporného) těchto sil u daných poloh sklápění horní a dolní věže (zaokrouhлено na 1 desetinné místo)

Čas (s)	Síla na válečky ve směru osy x (N)	Síla na válečky ve směru osy y (N)	Jednonásobek (záporný) síly na válečky ve směru osy x (N)	Jednonásobek (záporný) síly na válečky ve směru osy y (N)
1	-70,0	0,6	70,0	-0,6
2	-2490,4	769,5	2490,4	-769,6
3	-61,3	0,4	61,3	-0,4
4	2388,2	701,8	-2388,2	-701,8
5	255,1	7,4	-255,1	-7,4
6	2314,8	655,6	-2314,8	-655,6
7	3820,7	2203,1	-3820,7	-2203,1
8	2361,7	684,9	-2361,7	-684,9
9	3806,5	2178,7	-3806,5	-2178,7
10	4407,6	4168,1	-4407,6	-4168,1
11	3798,0	2164,3	-3798,	-2164,3
12	4409,2	4199,2	-4409,2	-4199,2
13	3999,1	6284,0	-3999,1	-6284,0
14	4403,4	4101,4	-4403,4	-4101,4
15	3968,3	6348,5	-3968,3	-6348,5
16	2466,5	8075,7	-2466,5	-8075,7
17	4105,2	6037,7	-4105,2	-6037,7
18	2445,7	8089,6	-2445,7	-8089,6
19	-87,9	8828,1	87,9	-8828,1

Tab. 6 - Tab. 11 platí pro síly aplikované do okrajových podmínek při pohybu věže z polohy vertikální do horizontální. Pro opačný proces (stavění věže) se tyto síly přepočítaly. Pouze se prohodily úhly alfa a beta u vztahů (6.3.1.7) - (6.3.1.14) viz [podkapitola 6.3.1](#). Tabulky těchto sil jsou uvedeny v příloze A.

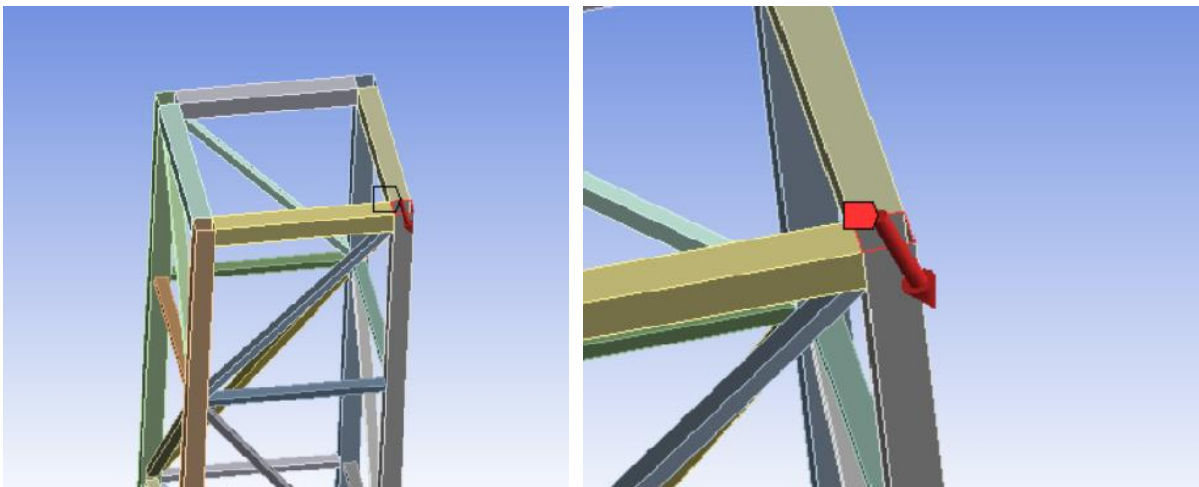
Zde jsou uvedena místa aplikace takových okrajových podmínek:

#### 8. OKRAJOVÁ PODMÍNKA:



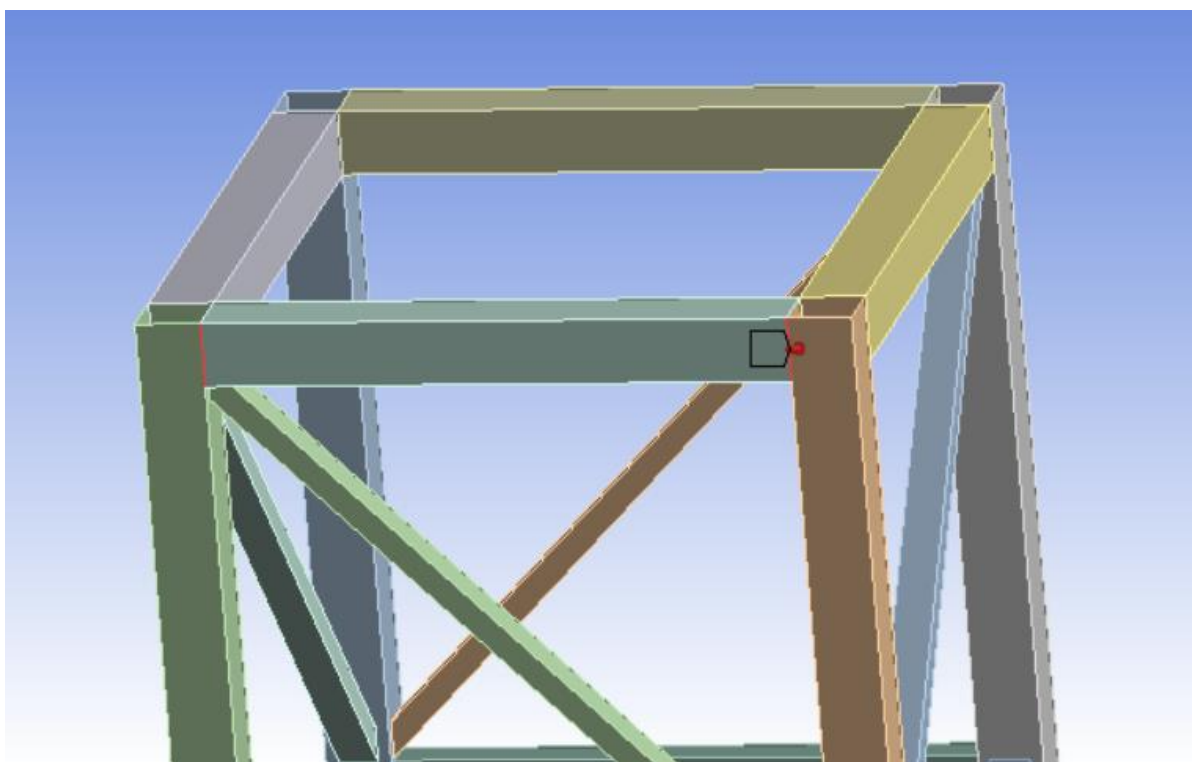
Obr. 39 – Okrajová podmínka síly u horní věže – síla od kladky (vpravo detailní pohled na sílu)

#### 9. OKRAJOVÁ PODMÍNKA:



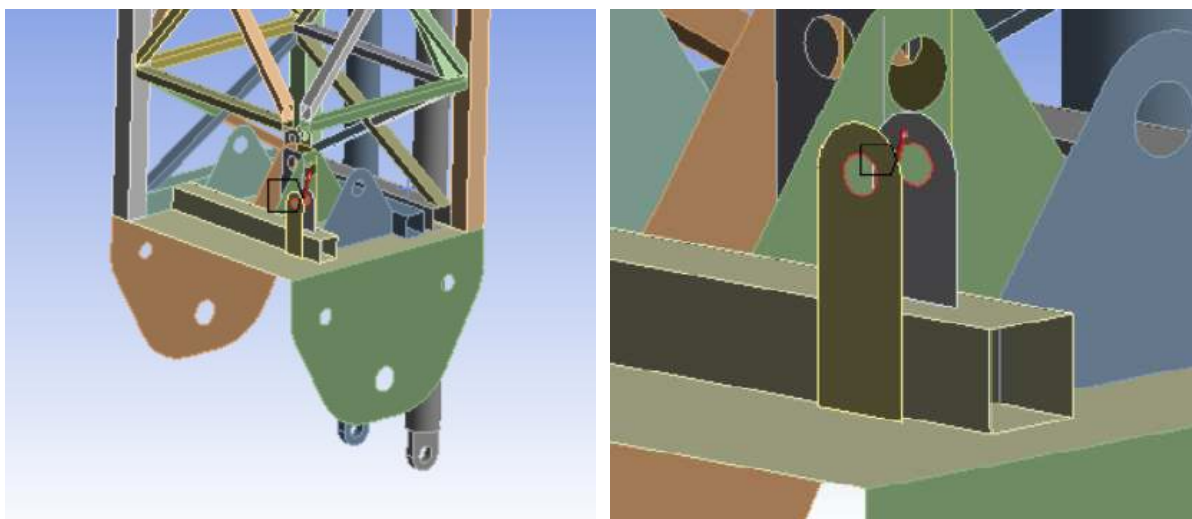
Obr. 40 – Okrajová podmínka síly u horní věže – síla od kladky (vpravo detailní pohled na sílu)

10. OKRAJOVÁ PODMÍNKA:



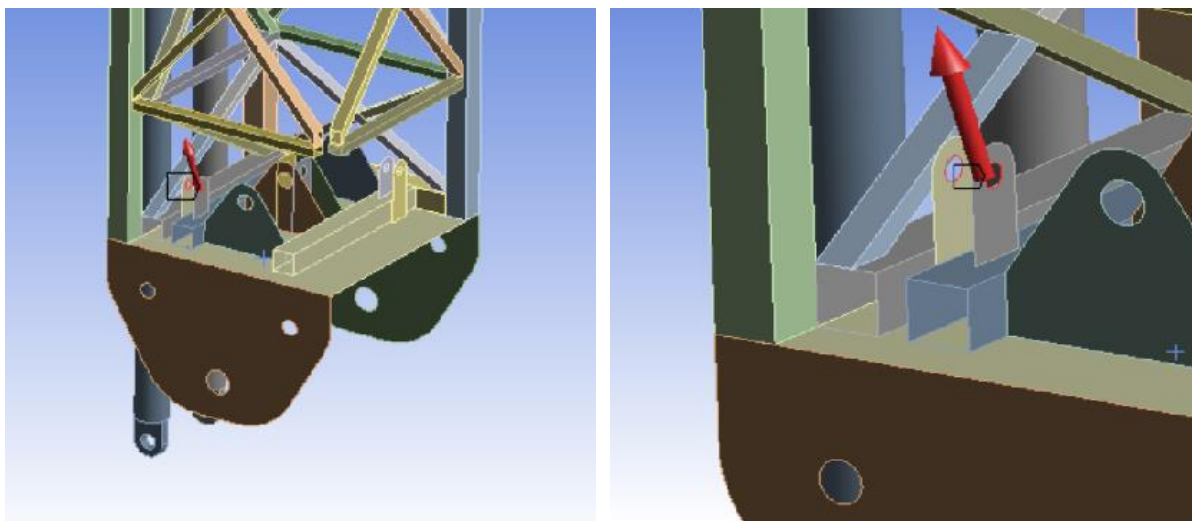
Obr. 41 – Okrajová podmínka síly u horní věže – síla od válečků

11. OKRAJOVÁ PODMÍNKA:



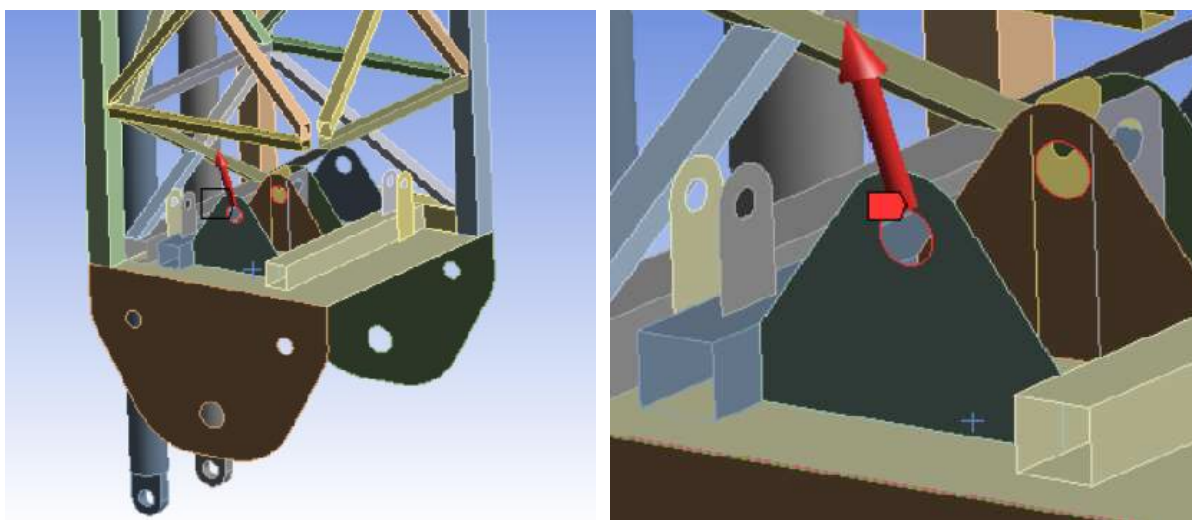
Obr. 42 – Okrajové podmínky síly u dolní věže – síla od těles zachycujících lano (vpravo detailní pohled na sílu)

## 12. OKRAJOVÁ PODMÍNKA:



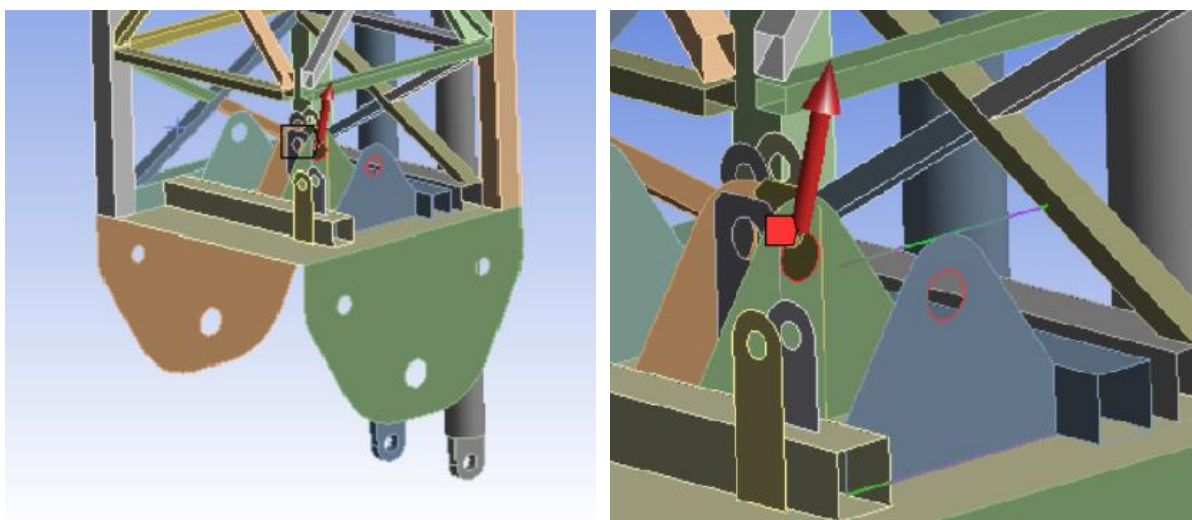
Obr. 43 – Okrajová podmínka síly u dolní věže – síla od těles zachycujících lano (vpravo detailní pohled na sílu)

## 13. OKRAJOVÁ PODMÍNKA:



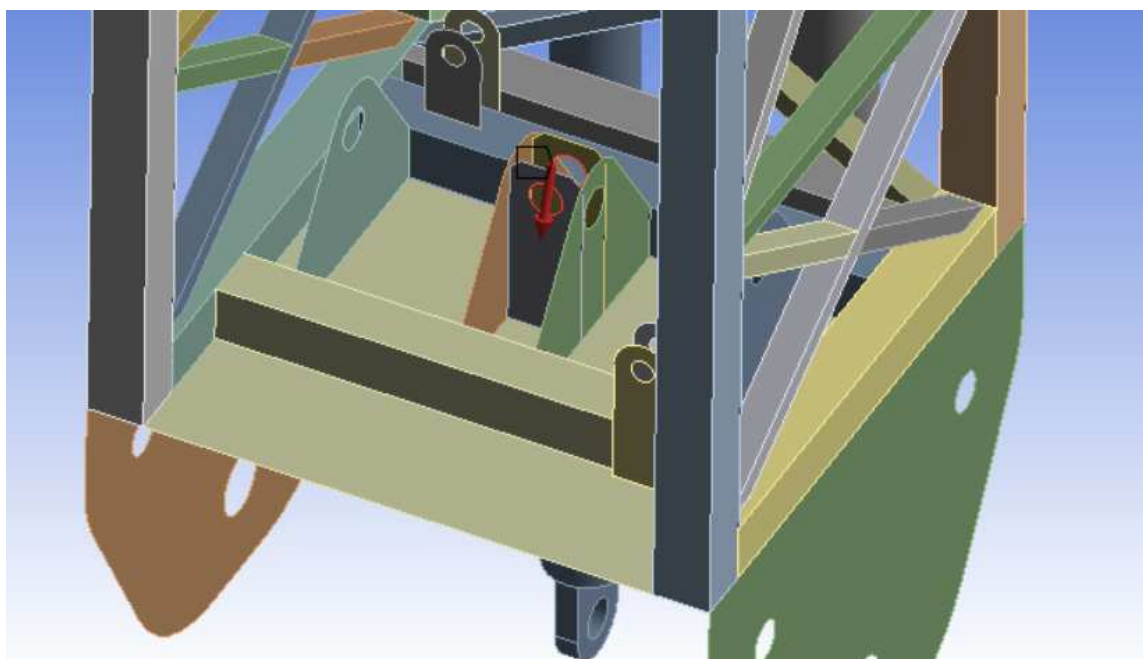
Obr. 44 – Okrajová podmínka síly u dolní věže – síla od kladek (vpravo detailní pohled na sílu)

#### 14. OKRAJOVÁ PODMÍNKA:



Obr. 45 – Okrajová podmínka síly u dolní věže – síla od kladek (vpravo detailní pohled na sílu)

#### 15. OKRAJOVÁ PODMÍNKA:



Obr. 46 – Okrajová podmínka síly u dolní věže – síla od hydraulického válce

Informace o nastavení časových kroků (1-19) – krok 1: zatížení vlastní tíhou, další kroky: postupné vysouvání/zasouvání jednotlivých pístů tak, aby docházelo k definovanému skládání konstrukce kolotoče. Hodnoty aplikovaných sil v jednotlivých polohách vycházejí z Tab. 5 viz výše (zadaní do *Workbenche*) pro jednotlivé kombinace zasunutí/vysunutí pístů, tj. pro vypočtené hodnoty úhlů alfa a beta.



## 7 NAPĚŤOVĚ-DEFORMAČNÍ ANALÝZA KONSTRUKCE

Byla provedena napětově-deformační analýza, avšak výpočet po cca 2/3 celkového počtu kroků (19) havaroval. Proto bylo navrženo a také uskutečněno takové řešení, že neuskutečněná polovina výpočtů bude získána při stavění věže z polohy horizontální do polohy blízké vertikální.

Původní soubor byl duplikován. Změnila se geometrie, a to takovým způsobem, že nová geometrie odpovídala složenému (transportnímu) stavu. Celá věž se potočila o 90° ve směru hodinových ručiček. Horní věž se poté potočila o 180° proti směru hodinových ručiček. Materiál, síť, kontakty, okrajové podmínky a další nastavení zůstalo totožné. Pouze se změnila znaménka u vysouvání/zasouvání pístů a síly. Síly se kompletně přepočítaly znovu. Jedinou změnou u výpočtů byla záměna úhlů sevření obou částí věže s horizontální polohou, tedy úhlů alfa a beta. Tato záměna byla provedena u všech vzorců výpočtu sil (viz [podkapitola 6.3.1](#)).

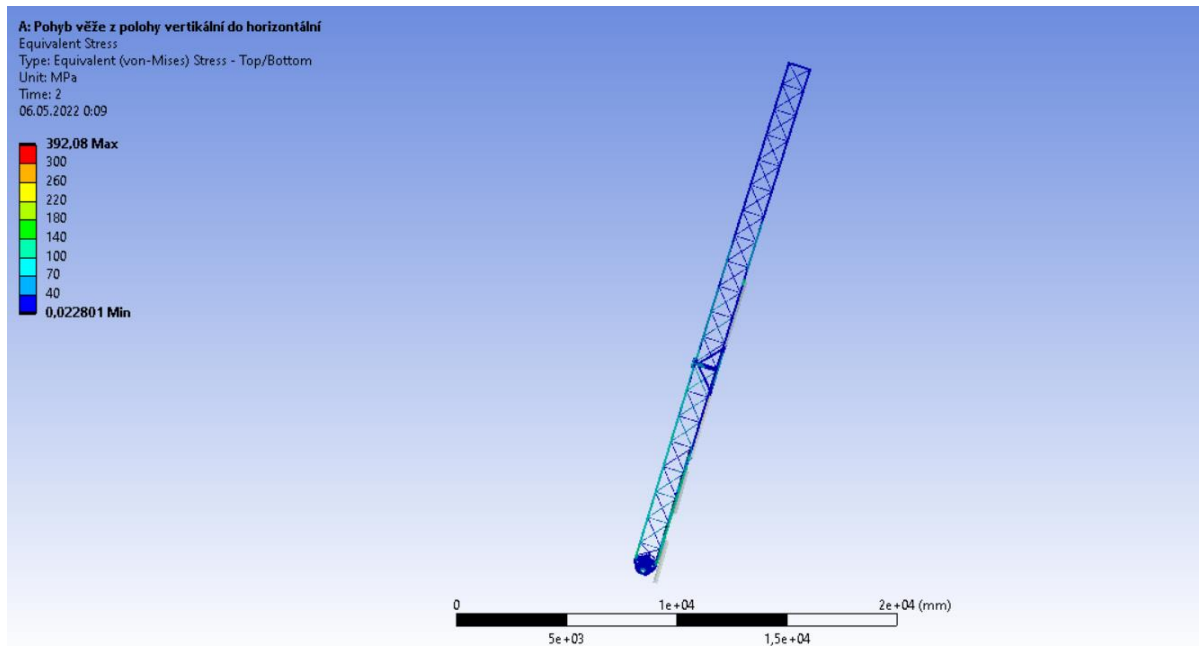
Tab. 12 – Hodnoty maximálního napětí v jednotlivých krocích vysunutí/zasunutí hydraulických válců

Čas (s)	Maximální napětí (MPa)
1 (od tohoto kroku z polohy vertikální)	31,11
<b>2</b>	<b>392,08</b>
3	156,71
4	264,63
5	218,34
6	245,93
<b>7</b>	<b>345,35</b>
8	233,43
9	309,62
10 (do tohoto kroku z polohy vertikální)	327,72
11 (do tohoto kroku z polohy horizontální)	304,53
12	241,74
13	241,29
14	219,03
15	209,42
16	263,38
<b>17</b>	<b>345,04</b>
18	321,60
<b>19 (od tohoto kroku z polohy horizontální)</b>	<b>360,47</b>

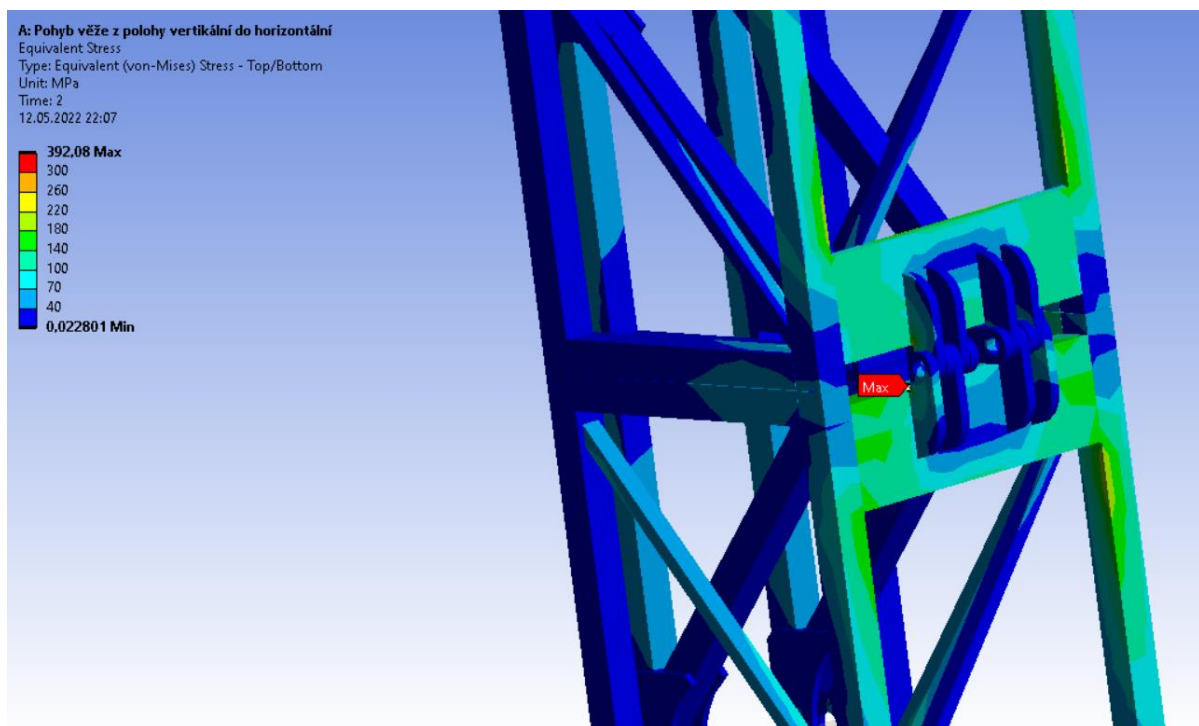
Nejvyšší napětí vyšly pro časy 2 s, 7 s, 17 s a 19 s. Vybraná poloha číslo 1 odpovídá času 2 s, vybraná poloha číslo 2 odpovídá času 7 s. Vybraná poloha číslo 3 odpovídá času 19 s. Vybraná poloha číslo 4 odpovídá času 17 s.

Zde jsou uvedeny vybrané polohy a místa zvýšeného napětí:

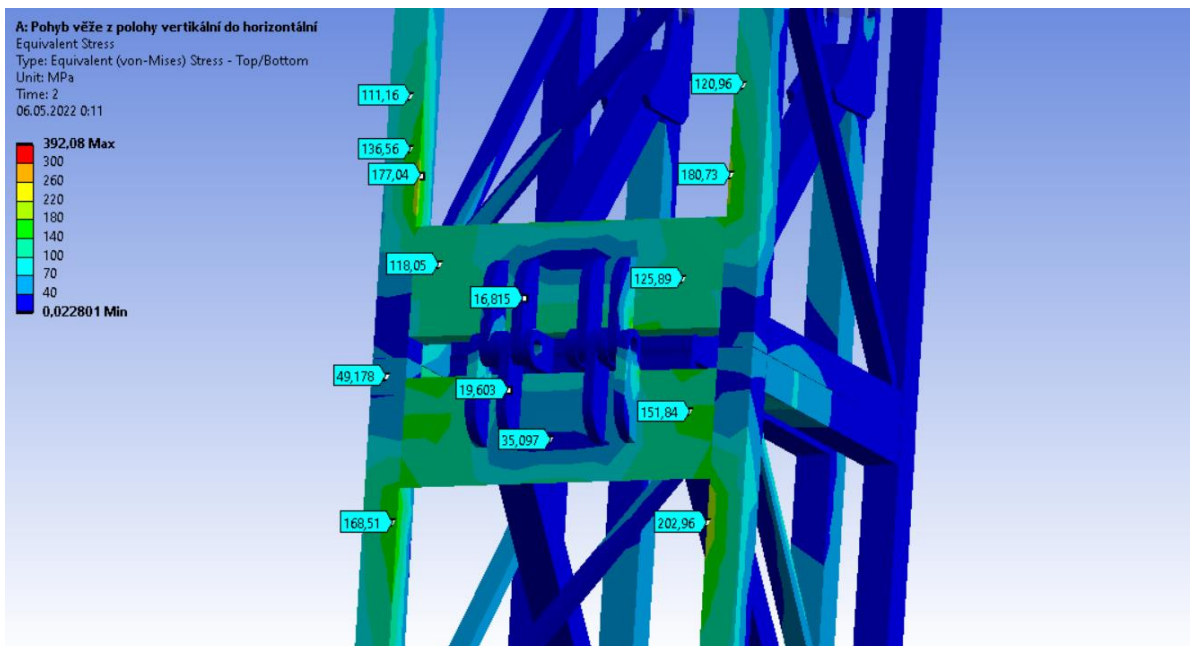
VYBRANÁ POLOHA ČÍSLO 1:



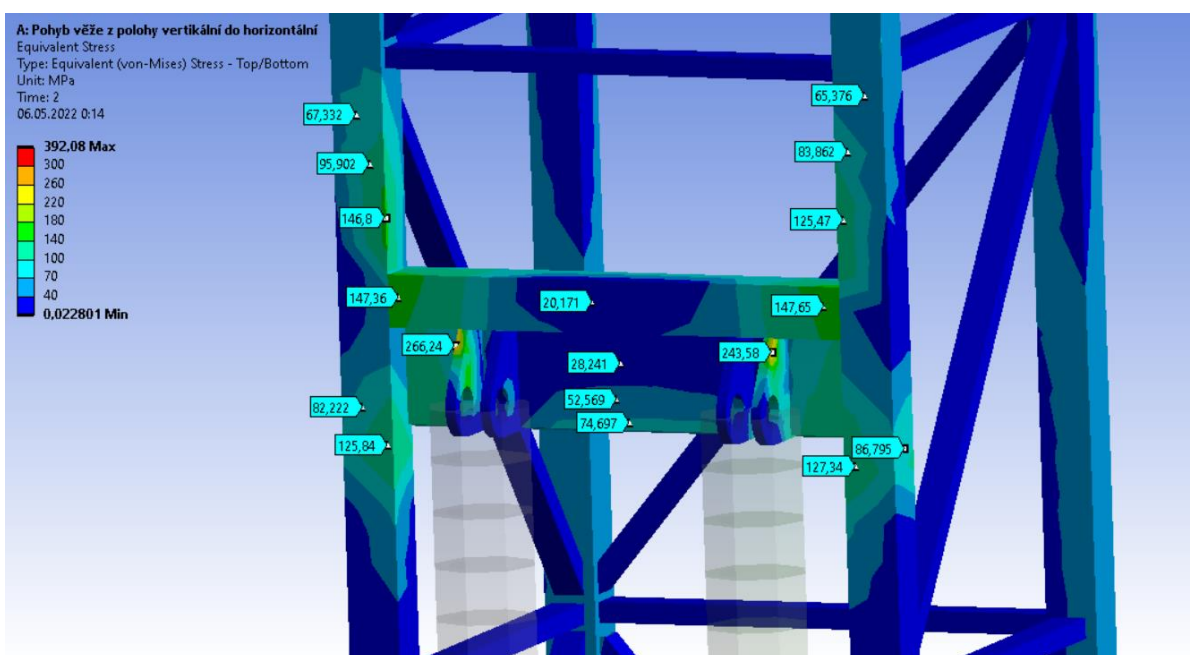
Obr. 47 – Vybraná poloha číslo 1



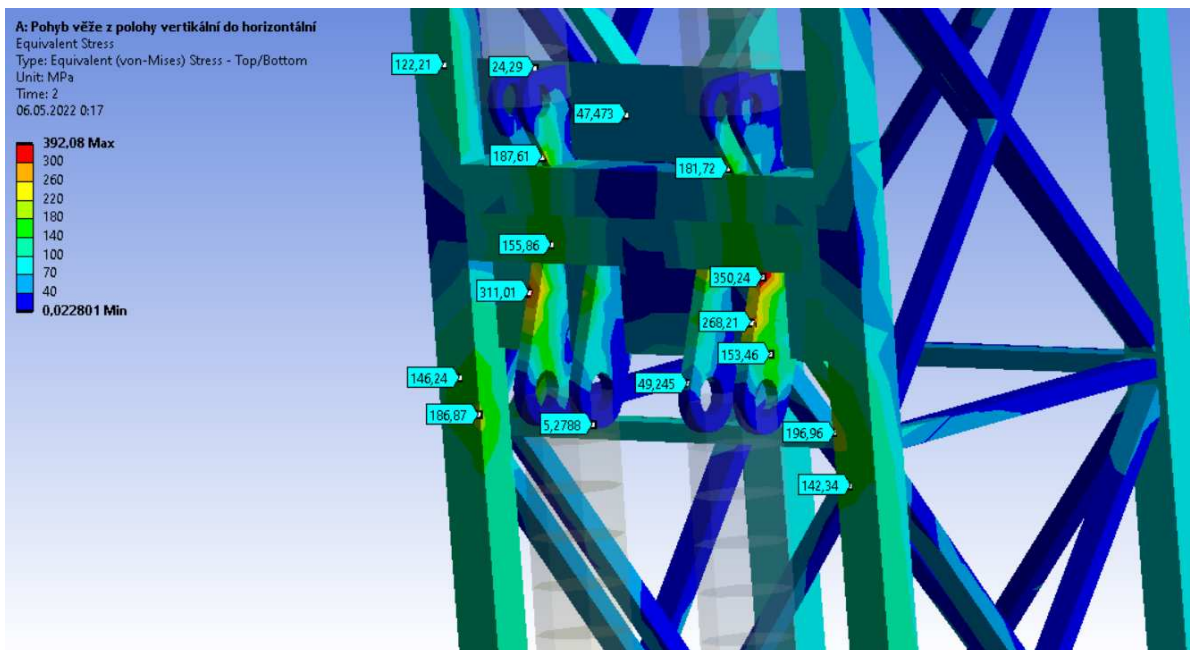
Obr. 48 – Hodnota nejvyššího napětí ve vybrané poloze číslo 1



Obr. 49 – Hodnoty napětí těles u trojúhelníkového kloubu ve vybrané poloze číslo 1

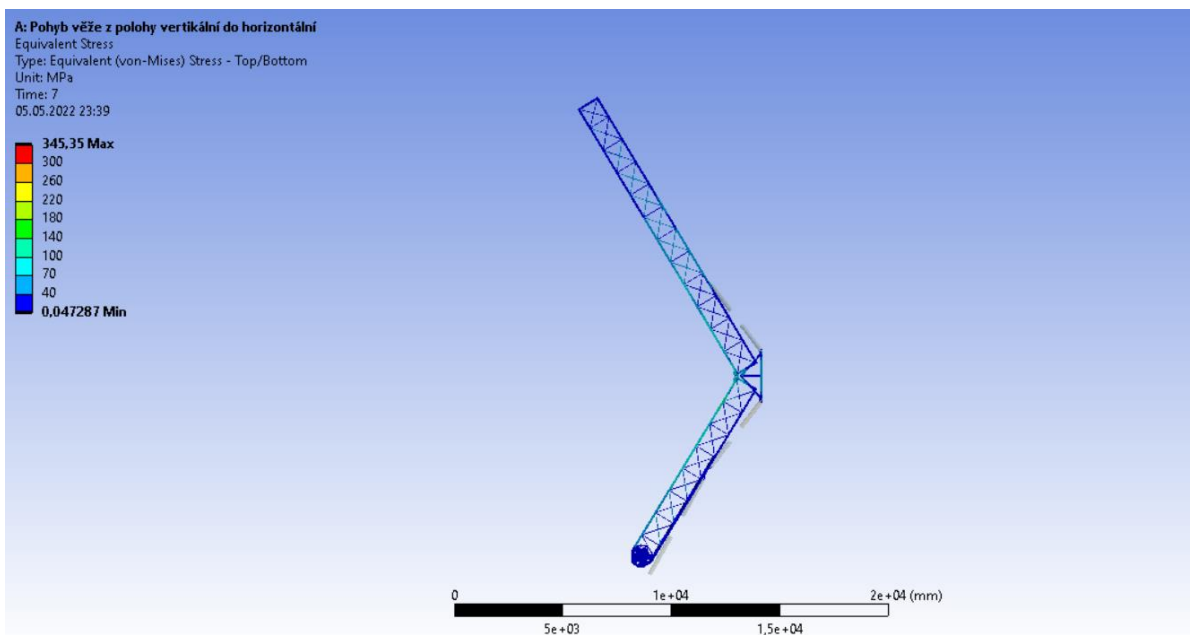


Obr. 50 – Hodnoty napětí těles v místě spojení (čepem) ok 3. páru hydraulického válce ve vybrané poloze číslo 1

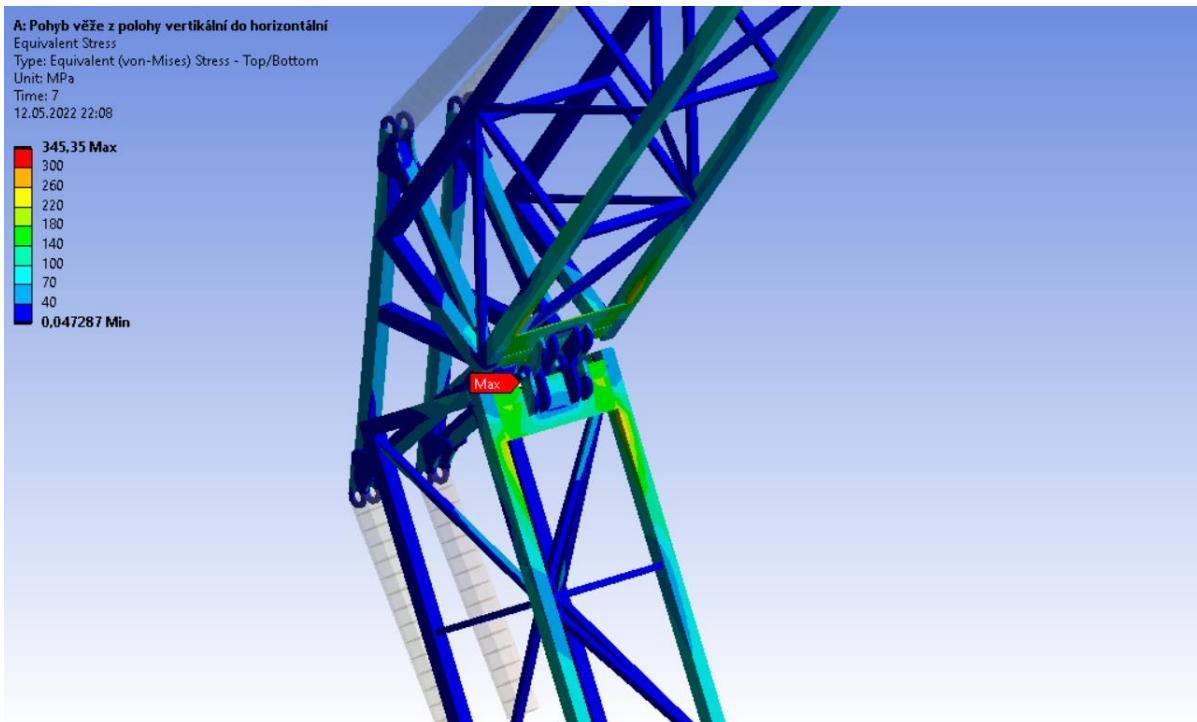


Obr. 51 – Hodnoty napětí těles v okolí těles s oky pro 1. a 2. pár hydraulických válců nacházejících se na dolní věži ve vybrané poloze číslo 1

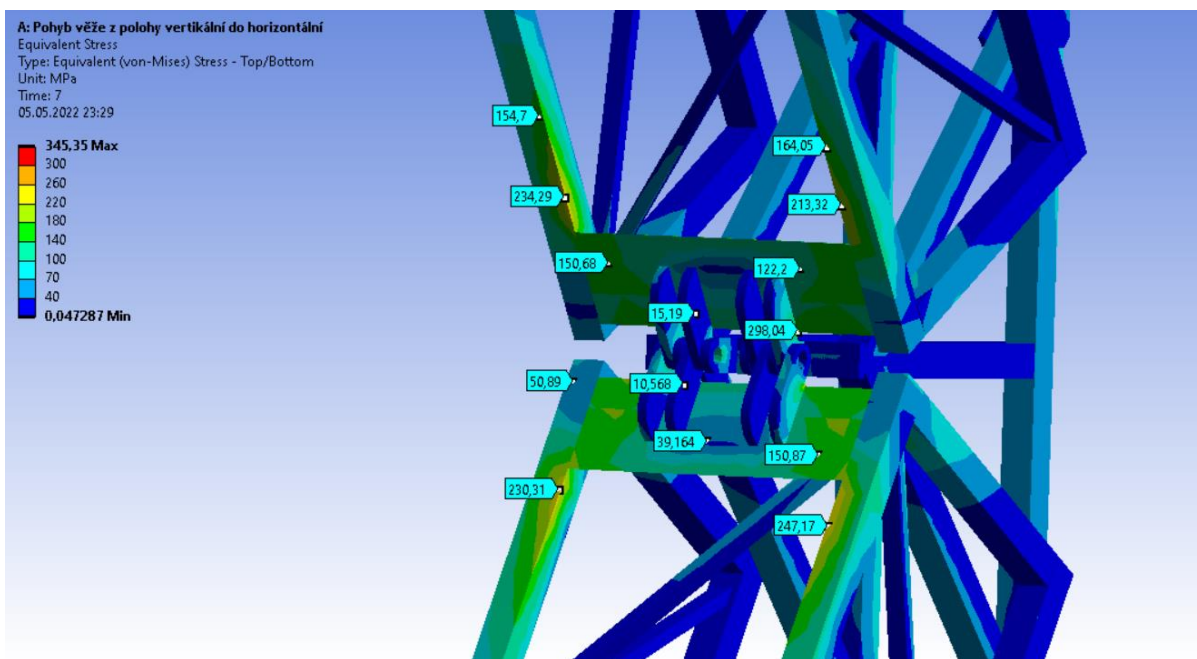
VYBRANÁ POLOHA ČÍSLO 2:



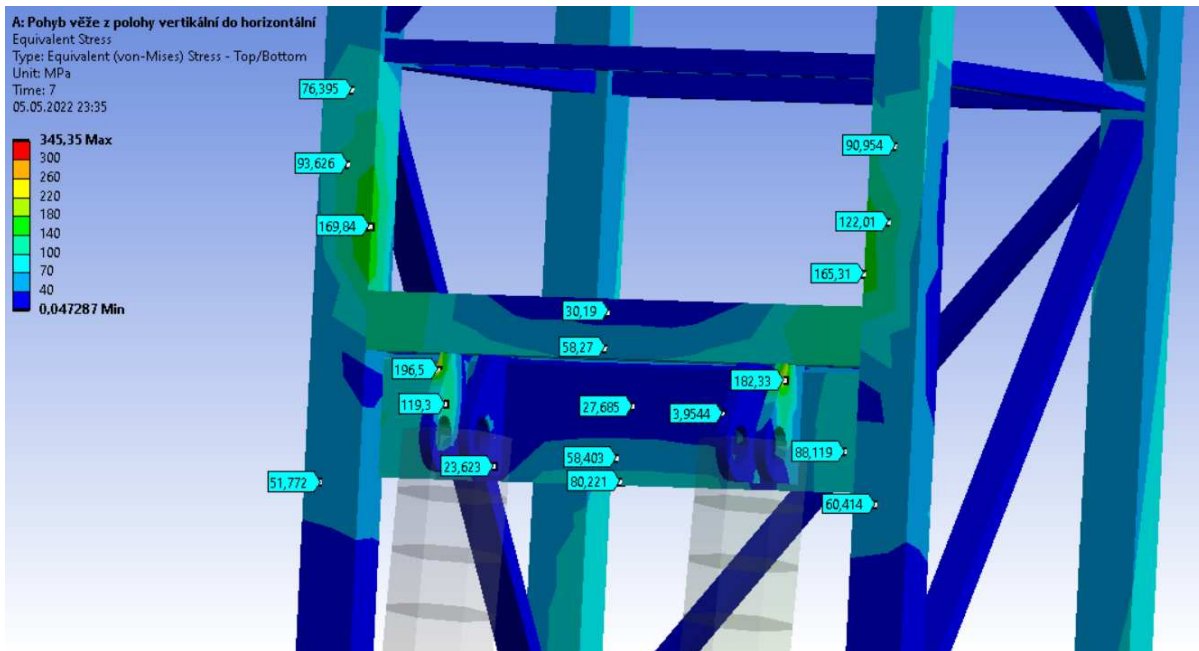
Obr. 52 – Vybraná poloha číslo 2



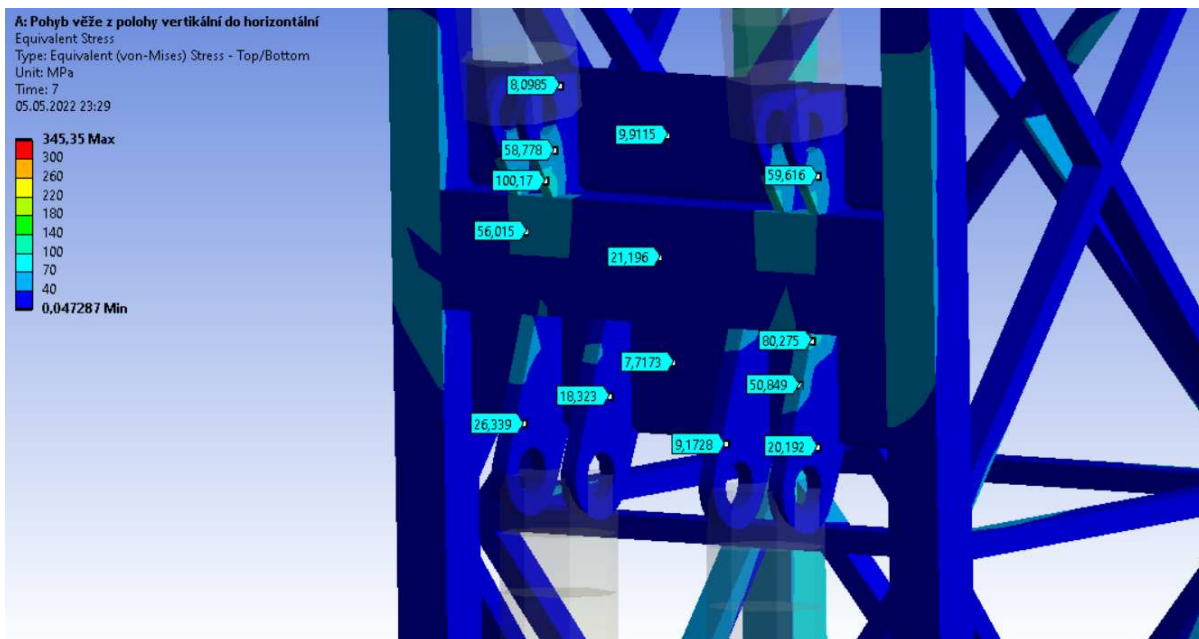
Obr. 53 – Hodnota nejvyššího napětí ve vybrané poloze číslo 2



Obr. 54 – Hodnoty napětí těles u trojúhelníkového kloubu ve vybrané poloze číslo 2

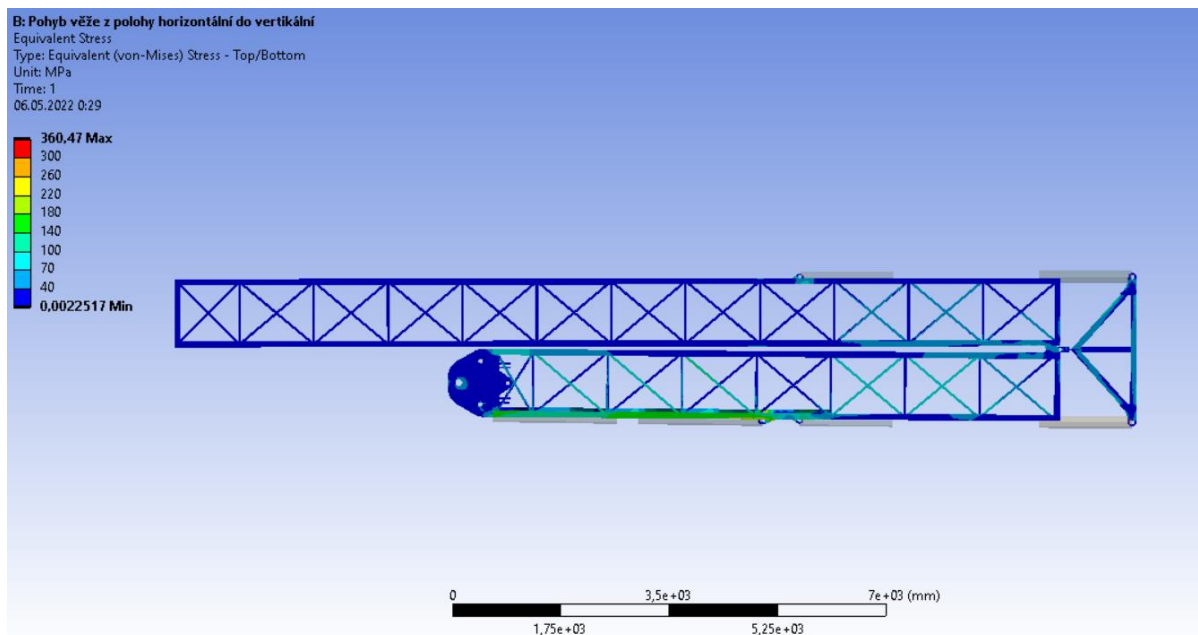


Obr. 55 – Hodnoty napětí těles v místě spojení (čepem) ok 3. páru hydraulického válce nacházejících se na horní věži ve vybrané poloze číslo 2

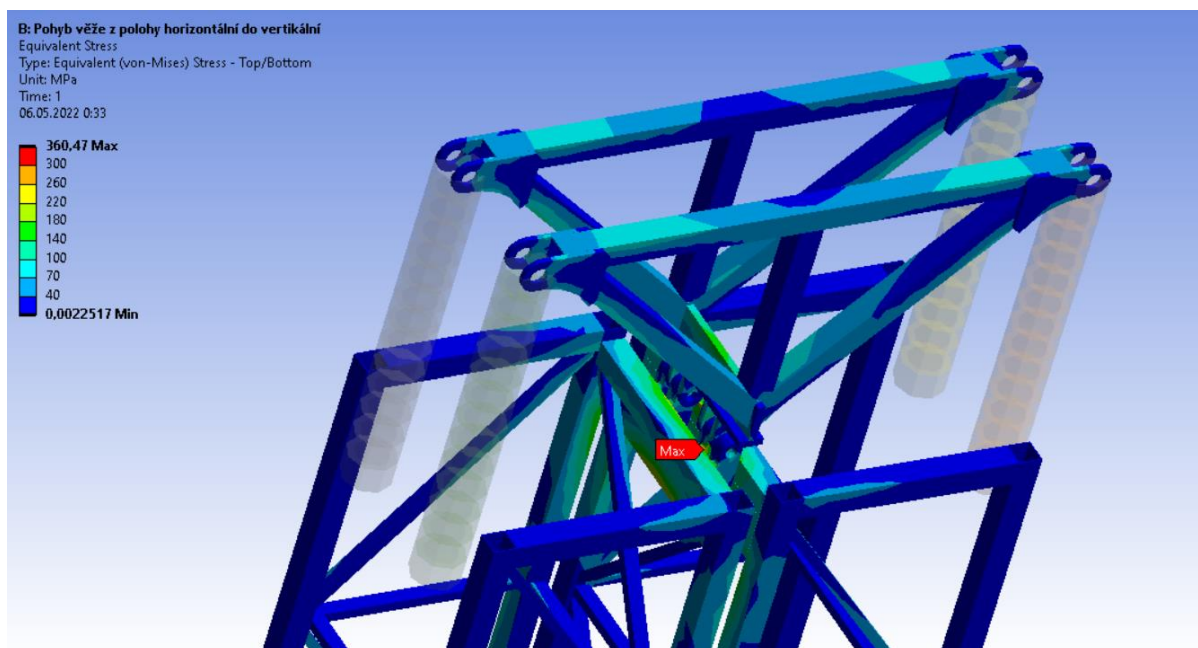


Obr. 56 – Hodnoty napětí těles v okolí těles s oky pro 1. a 2. pár hydraulických válců nacházejících se na dolní věži ve vybrané poloze číslo 2

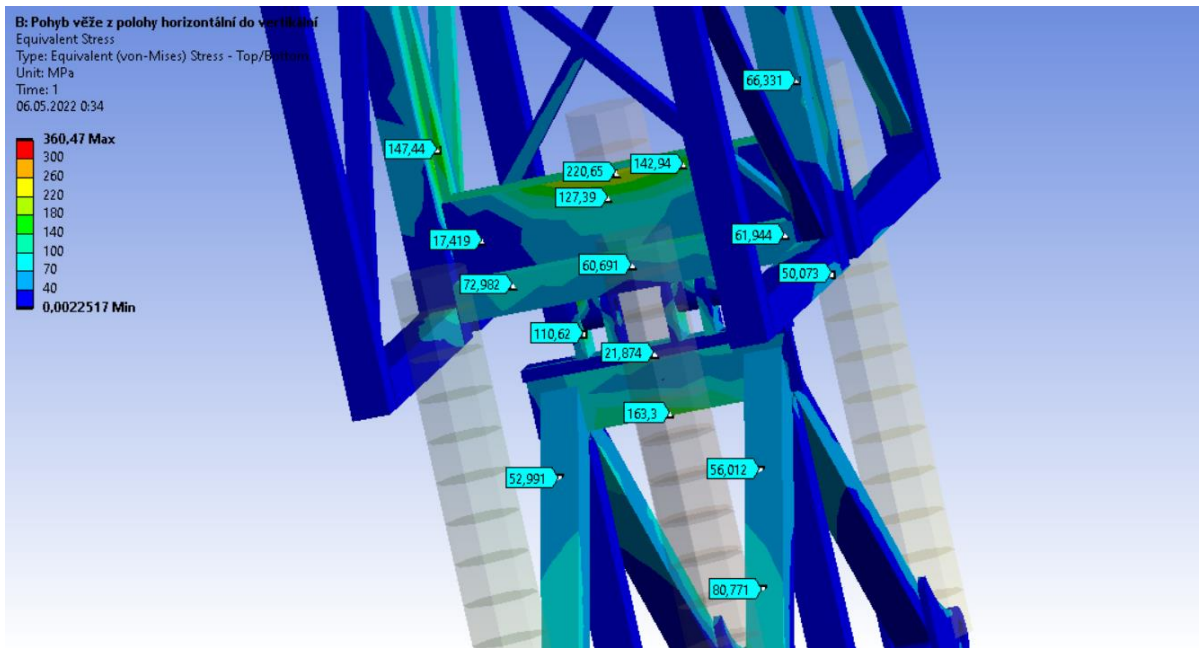
### VYBRANÁ POLOHA ČÍSLO 3:



Obr. 57 – Vybraná poloha číslo 3 (vlevo nahoře je čas 1 s z důvodu získaných hodnot z polohy obrácené)

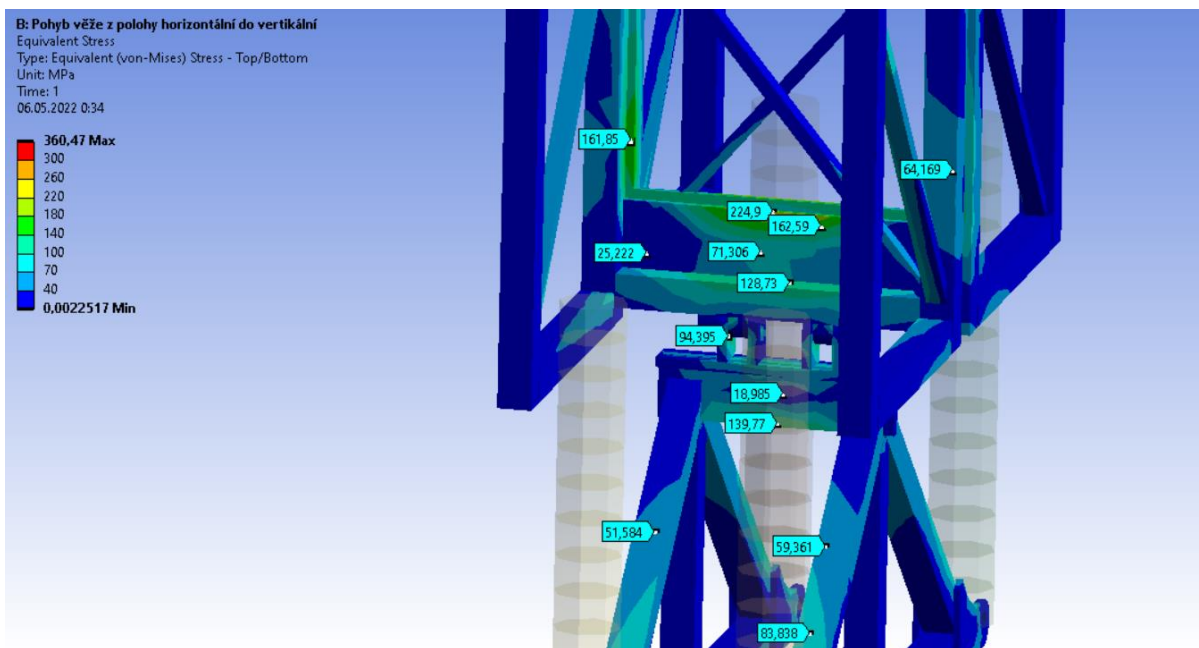


Obr. 58 – Hodnota nejvyššího napětí ve vybrané poloze číslo 3



Obr. 59 – Hodnoty napětí těles u trojúhelníkového kloubu z jedné strany ve vybrané poloze číslo

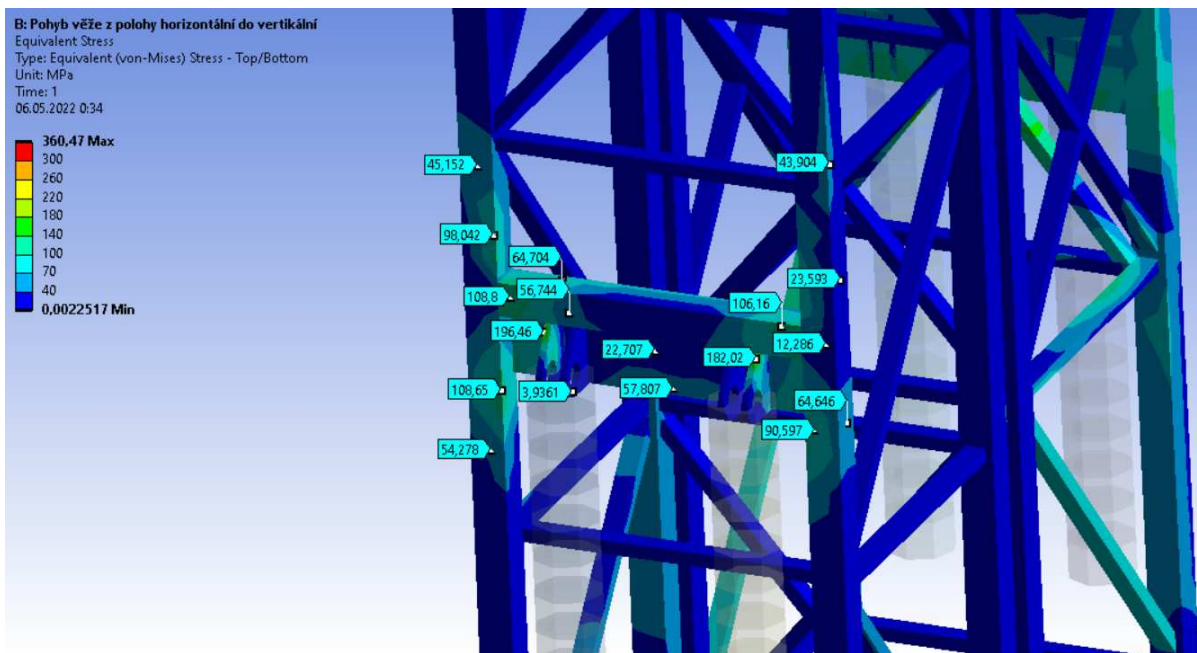
3



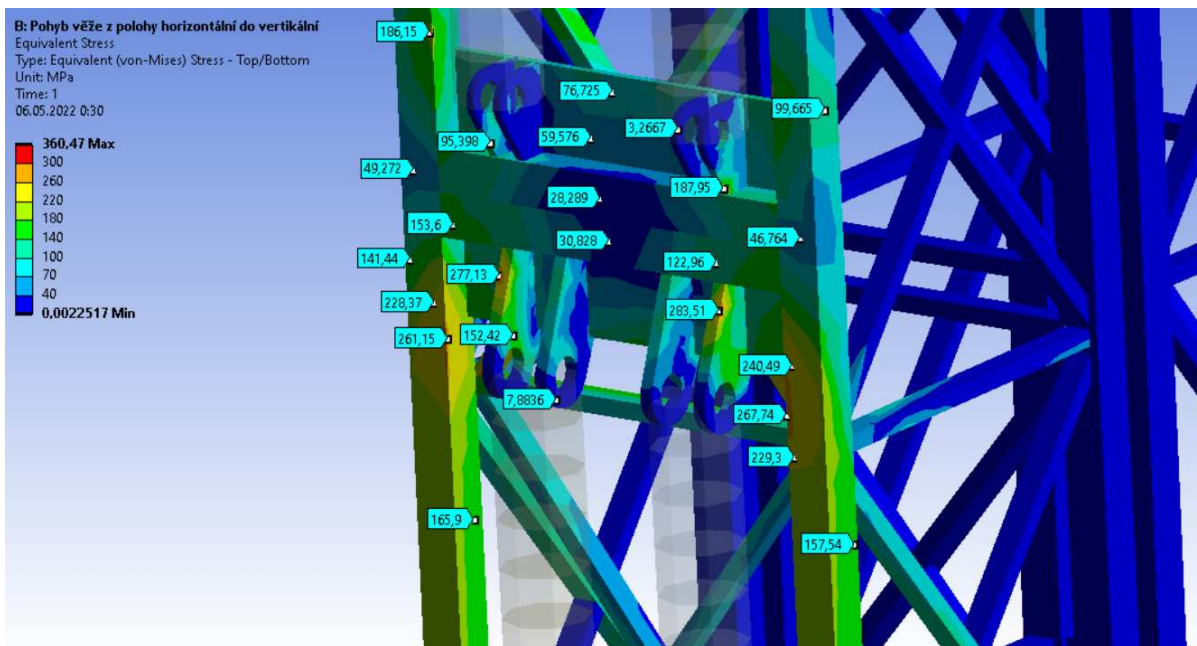
Obr. 60 – Hodnoty napětí těles u trojúhelníkového kloubu z druhé strany ve vybrané poloze číslo

3



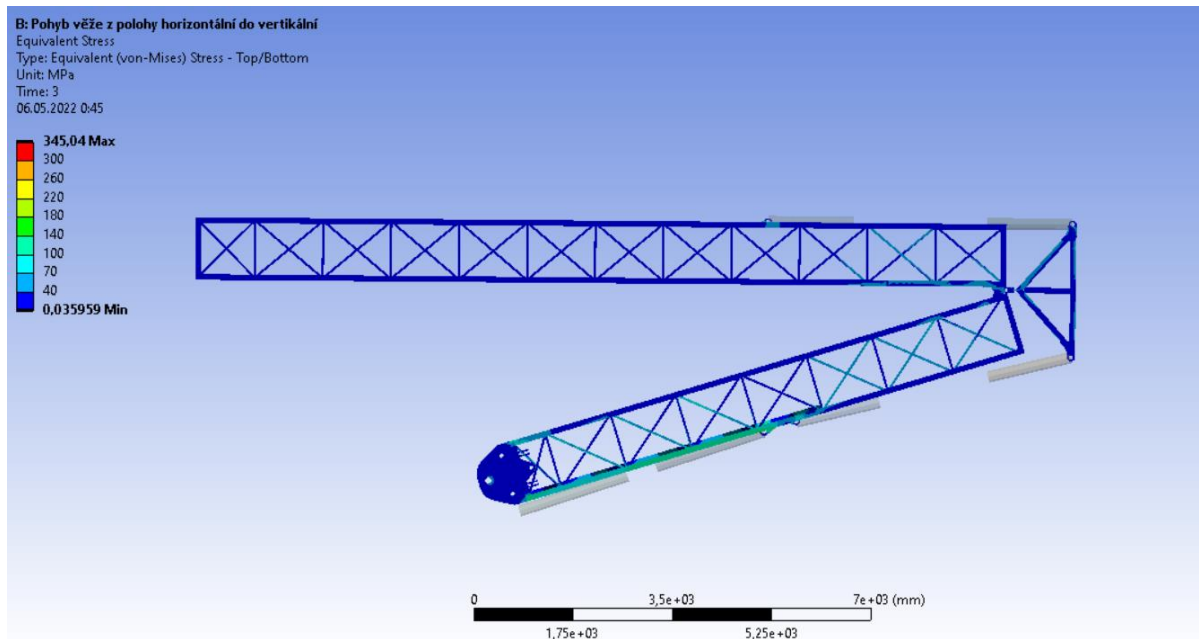


Obr. 61 – Hodnoty napětí těles v místě spojení (čepem) ok 3. páru hydraulického válce nacházejících se na horní věži ve vybrané poloze číslo 3

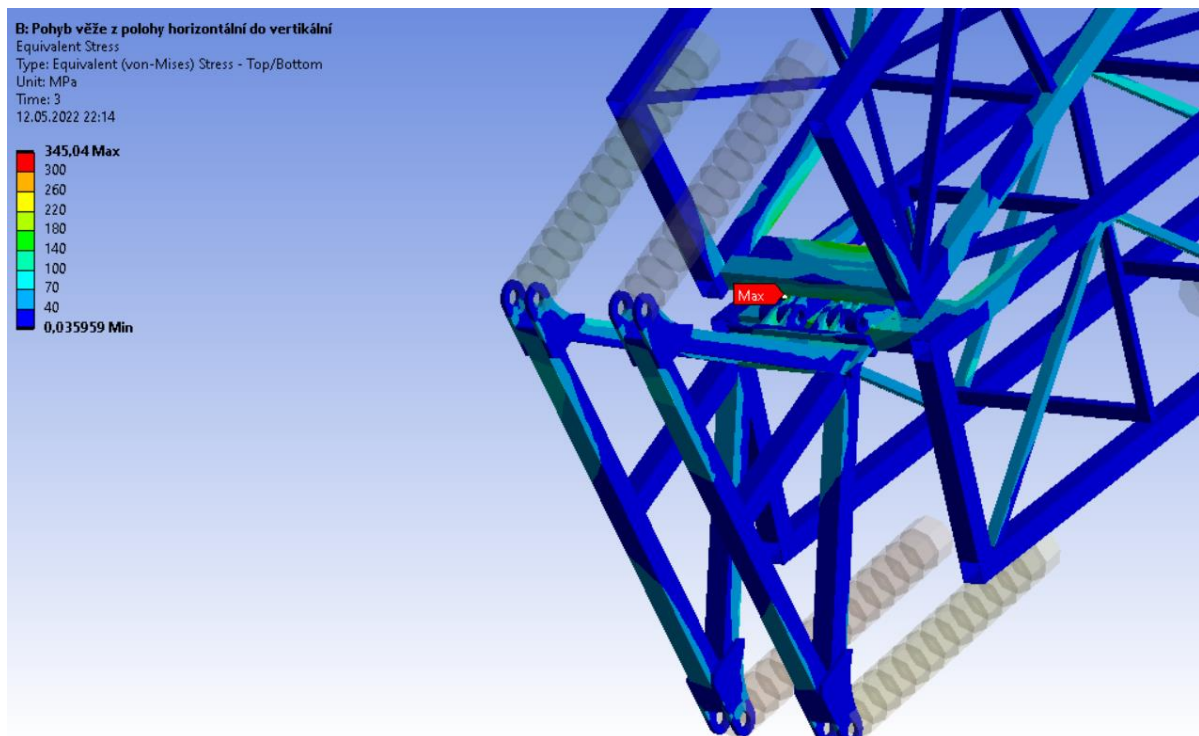


Obr. 62 – Hodnoty napětí těles v okolí těles s oky pro 1. a 2. pár hydraulických válců nacházejících se na dolní věži ve vybrané poloze číslo 3

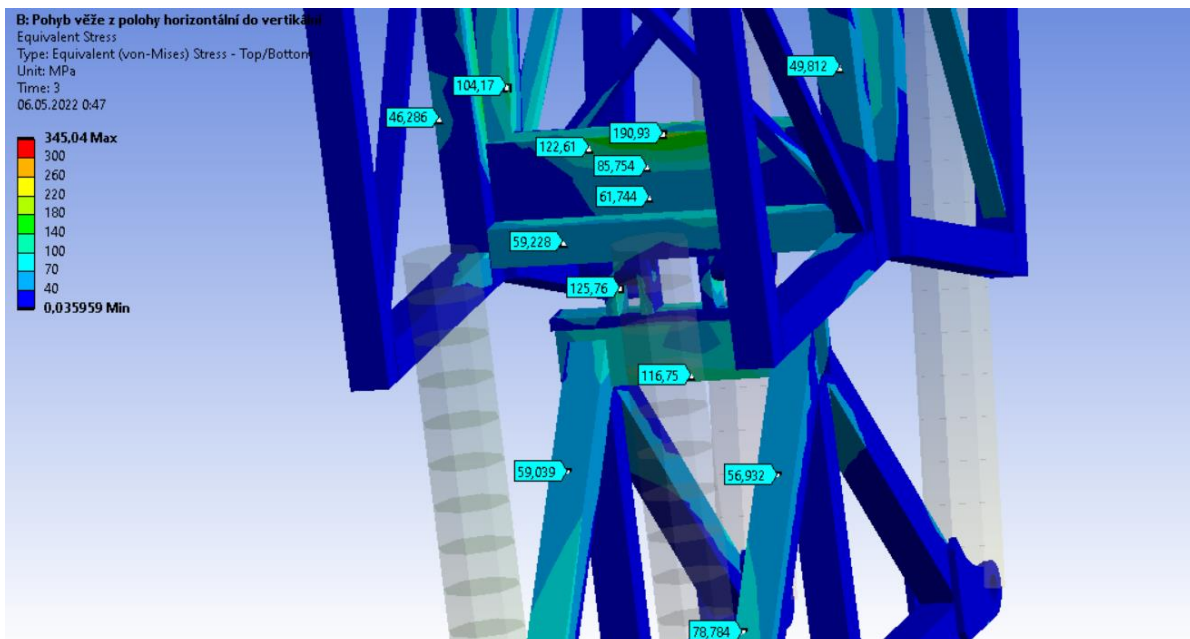
## VYBRANÁ POLOHA ČÍSLO 4:



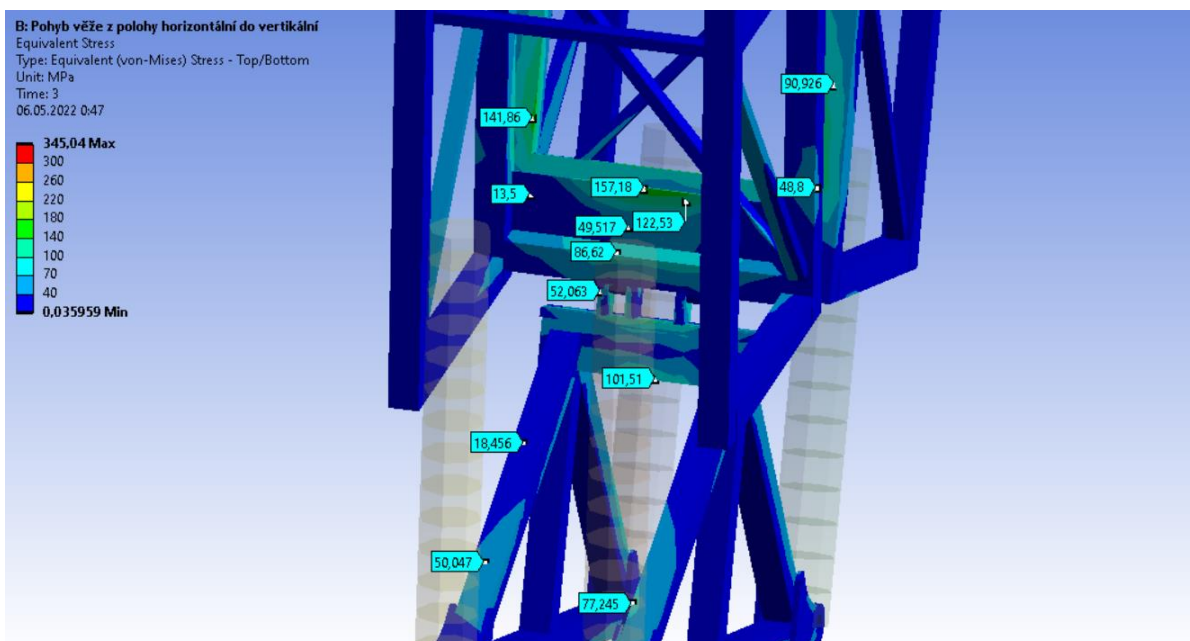
Obr. 63 – Vybraná poloha číslo 4 (vlevo nahoře je čas 3 s z důvodu získaných hodnot z polohy obrácené)



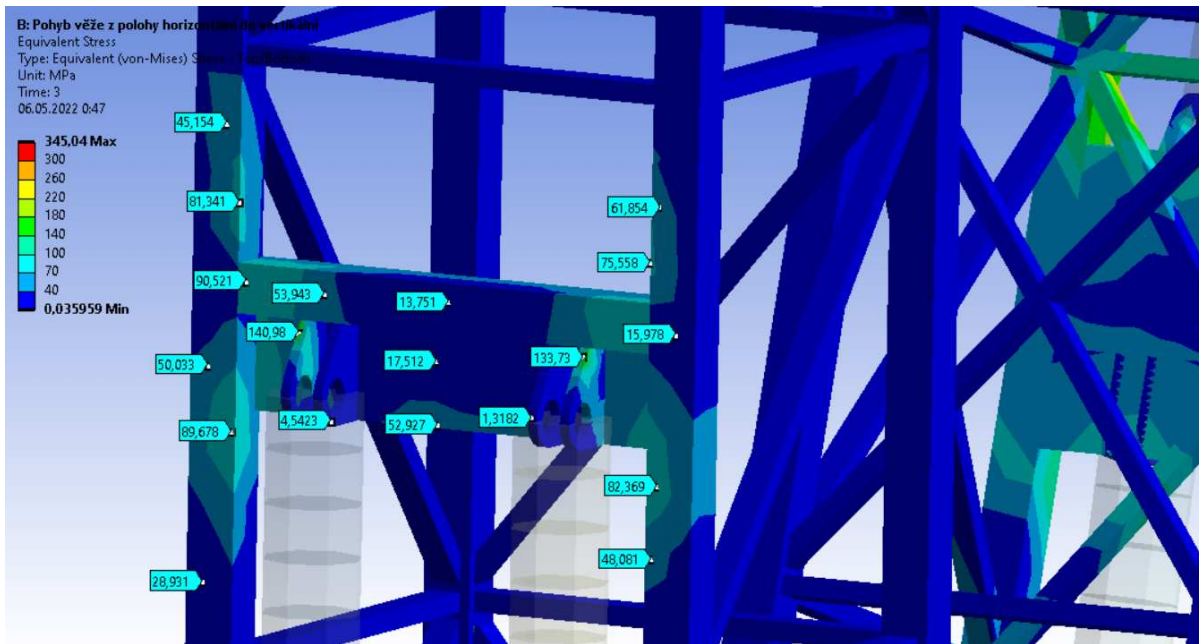
Obr. 64 – Hodnota nejvyššího napětí ve vybrané poloze číslo 4



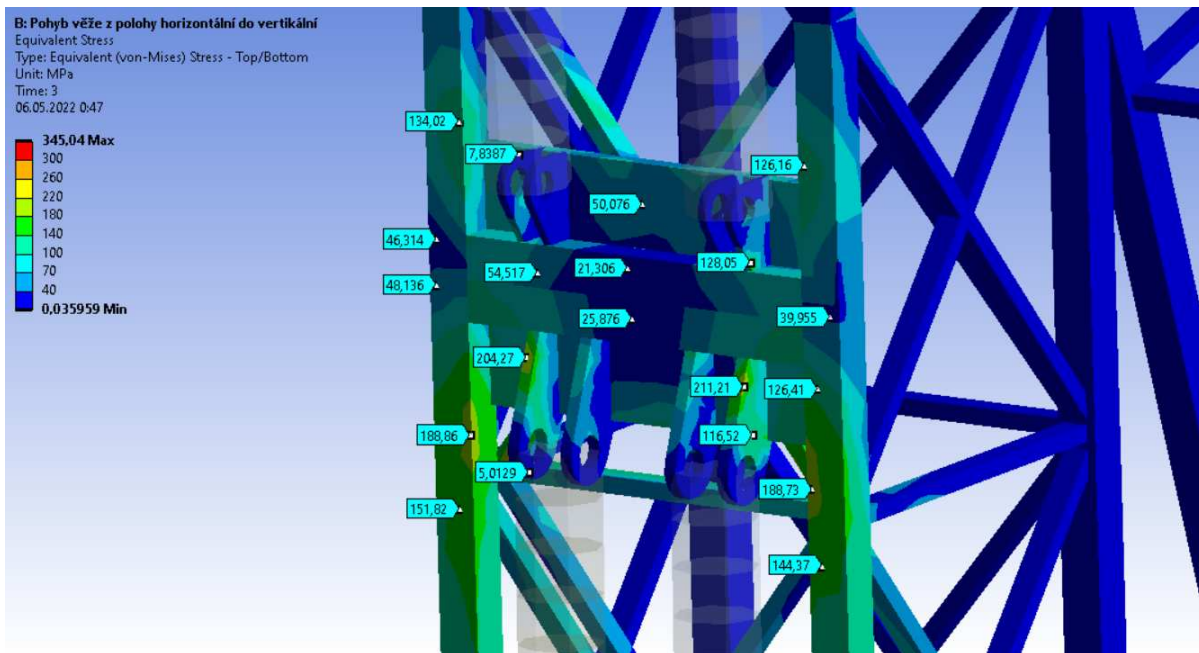
Obr. 65 – Hodnoty napětí těles u trojúhelníkového kloubu ve vybrané poloze číslo 4 z jedné strany



Obr. 66 – Hodnoty napětí těles u trojúhelníkového kloubu ve vybrané poloze číslo 4 z druhé strany



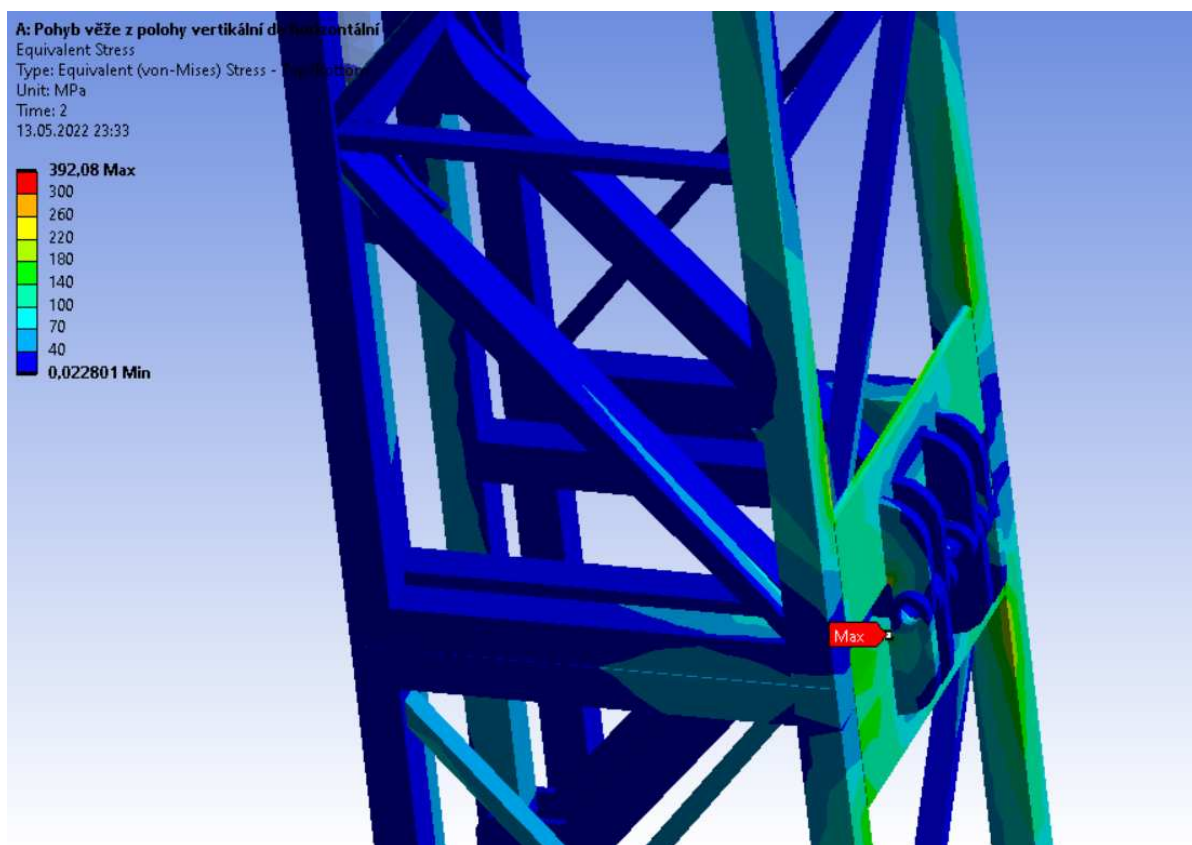
Obr. 67 – Hodnoty napětí těles v místě spojení (čepem) ok 3. páru hydraulického válce nacházejících se na horní věži ve vybrané poloze číslo 4



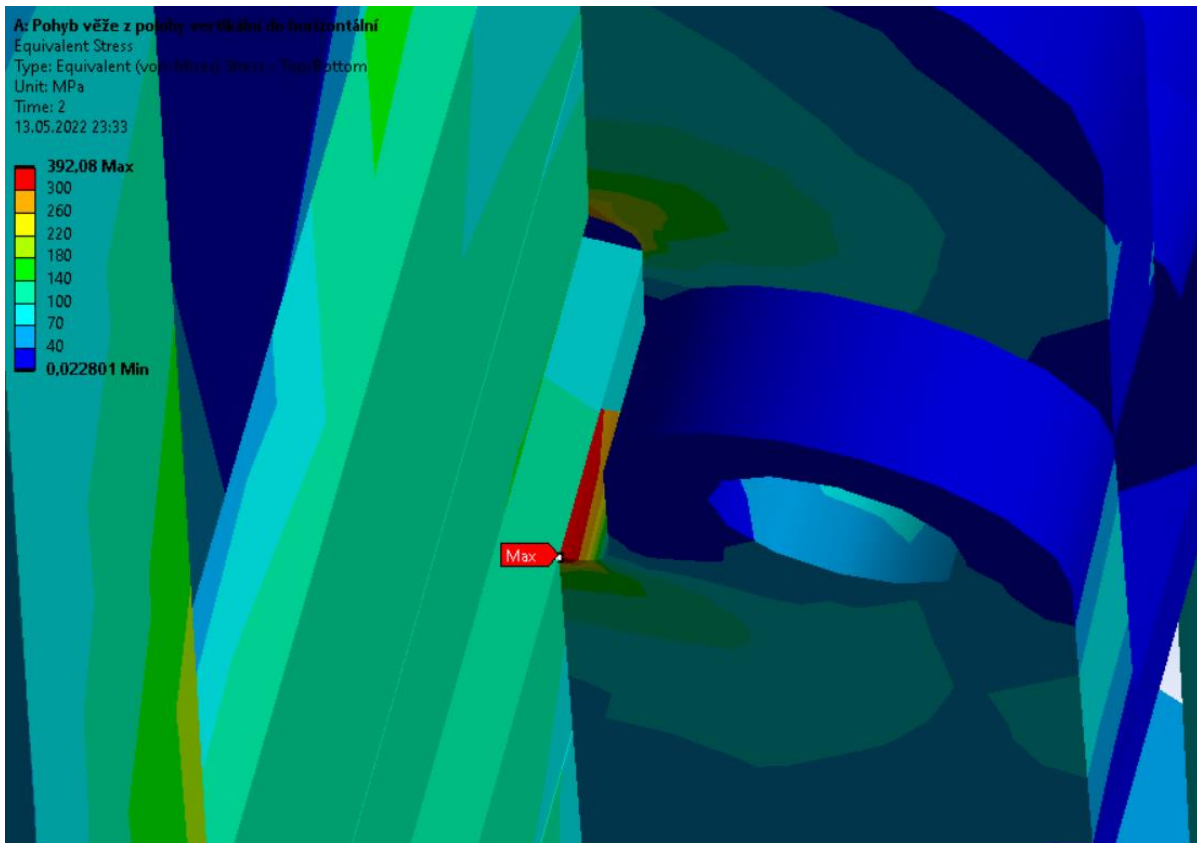
Obr. 68 – Hodnoty napětí těles v okolí těles s oky pro 1. a 2. pár hydraulických válců nacházejících se na dolní věži ve vybrané poloze číslo 4

## 8 OPTIMALIZACE

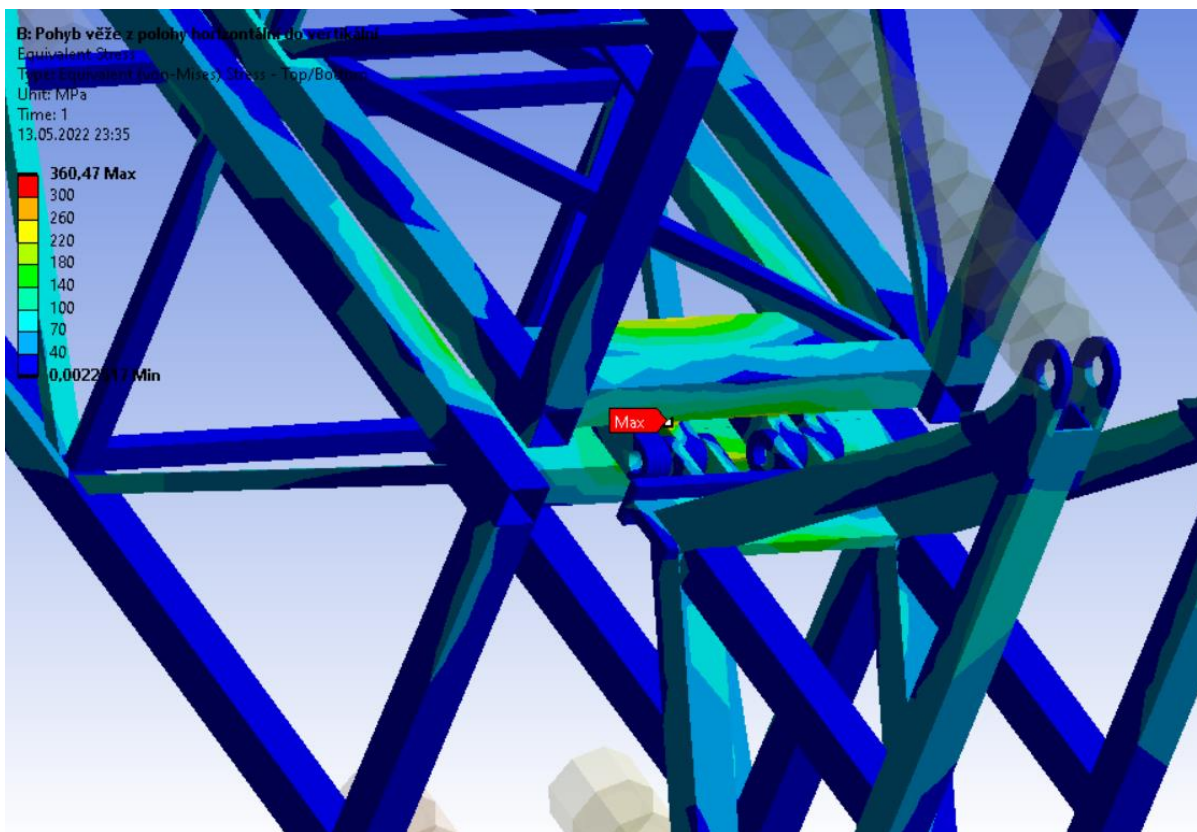
Optimalizace je buď úprava nevyhovující konstrukce do vyhovujícího stavu, nebo úprava vyhovující konstrukce, např. za účelem úspory materiálu. Na základě provedené pevnostní analýzy se zjistilo, že věž není pevnostně vyhovující. U 13 poloh z celkového počtu (19) přesahuje maximální napětí mez kluzu materiálu ( $R_e = 235 \text{ MPa}$ ). Jako nejsnazší možnost se nabízí změna materiálu na konstrukční ocel S355 ( $R_e = 355 \text{ MPa}$ ). Ten je charakteristický Youngovým modulem pružnosti  $E = 210 \text{ GPa}$ , Poissonovou konstantou  $\mu = 0,3$ , mezí kluzu  $R_e = 355 \text{ MPa}$  a mezí pevnosti  $R_m = 550 \text{ MPa}$ . Touto změnou se výrazně sníží počet nevyhovujících poloh, a to z 13 na 2. Tyto 2 nevhodné pozice naklopení věže patří mezi vybrané pro analýzu napětí na rizikových místech (viz [kapitola 7](#)). Konkrétně se jedná o 1. a 3. vybranou polohu. U obou poloh se nachází místo maximálního napětí na tělesu s okem pro čep lokalizované u spojení trojúhelníku s věží (1. poloha viz Obr. 69 a Obr. 70, 3. poloha viz Obr. 71 a Obr. 72). Obě 2 hodnoty přesahují mez kluzu nově zvoleného materiálu. Konstrukce je stále nevyhovující. Musí dojít k redesignu konstrukce. Ten spočívá např. v navýšení tloušťky zmíněných kritických míst nebo v úpravě mechanismu.



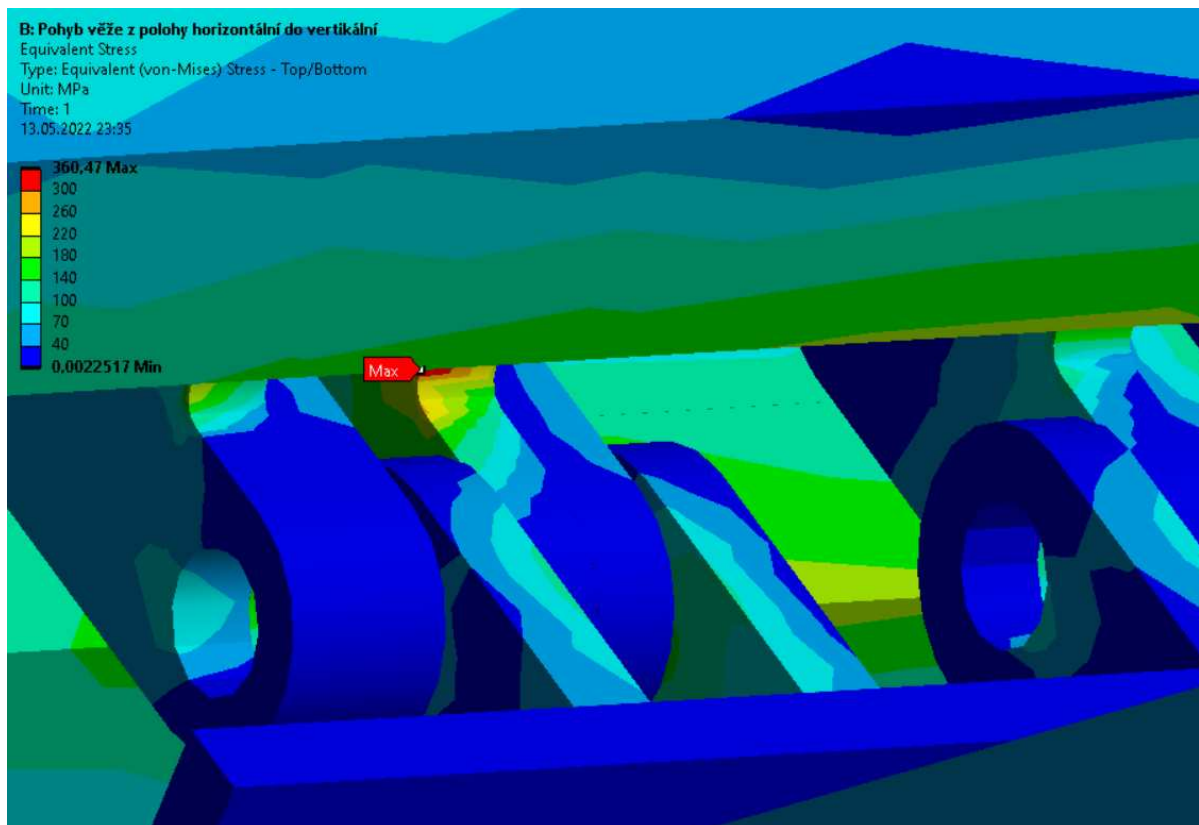
Obr. 69 – Místo maximálního napětí ve vybrané poloze číslo 1



Obr. 70 – Detail na místo maximálního napětí ve vybrané poloze číslo 1



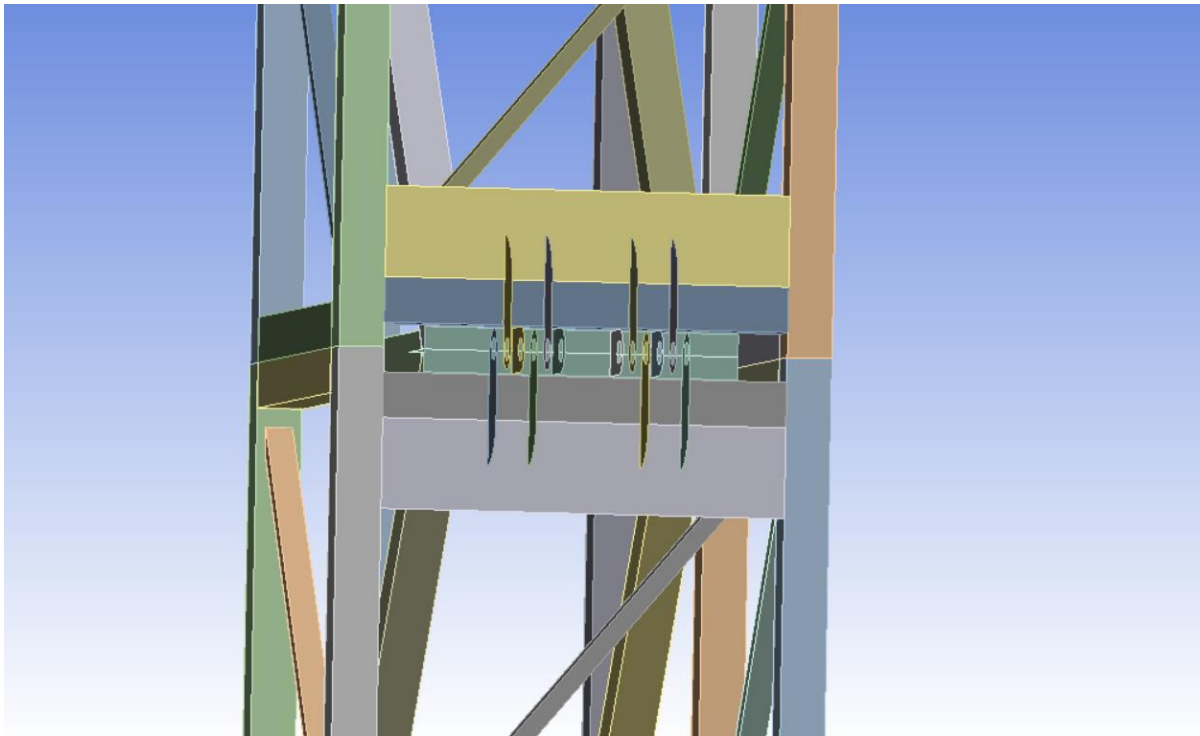
Obr. 71 - Místo maximálního napětí ve vybrané poloze číslo 3



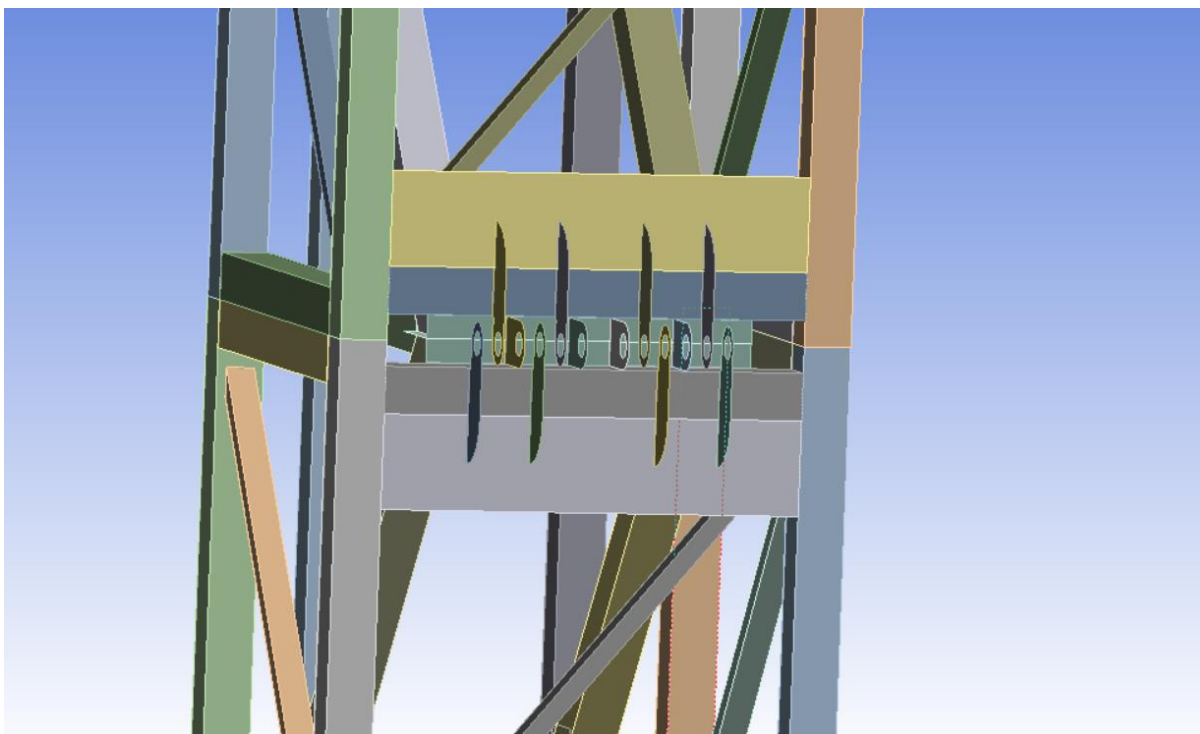
Obr. 72 - Detail na místo maximálního napětí ve vybrané poloze číslo 3

Názornou ukázkou využití optimalizace v tomto případě je vyztužení komponentu za účelem redukce napětí. Místo, ve kterém se vyskytlo maximální napětí u 2 nevyhovujících poloh, se nachází na rozmezí horní a dolní věže viz Obr. 73. Konkrétně vždy ve vrubu u jednoho z dvanácti zde nacházejících se těles s oky. Všechna tato tělesa měla původní tloušťku 30 mm, která se navýšila na 45 mm. Geometrie byla mírně upravena, protože tělesa se vzájemně dotýkala a takhle nebylo reálné navýšit třetí rozměr viz Obr. 74.

Výpočty byly opětovně provedeny a napětí se skutečně snížilo. Příkladem je vybraná poloha č. 3 viz Obr. 75. Maximální napětí se snížilo na 350,86 MPa. Tato poloha se následně projevila jako vyhovující. Mez kluzu nově zvoleného materiálu je vyšší než maximální napětí v této poloze. Poloha nového maximálního napětí se rovněž změnila viz Obr. 76.

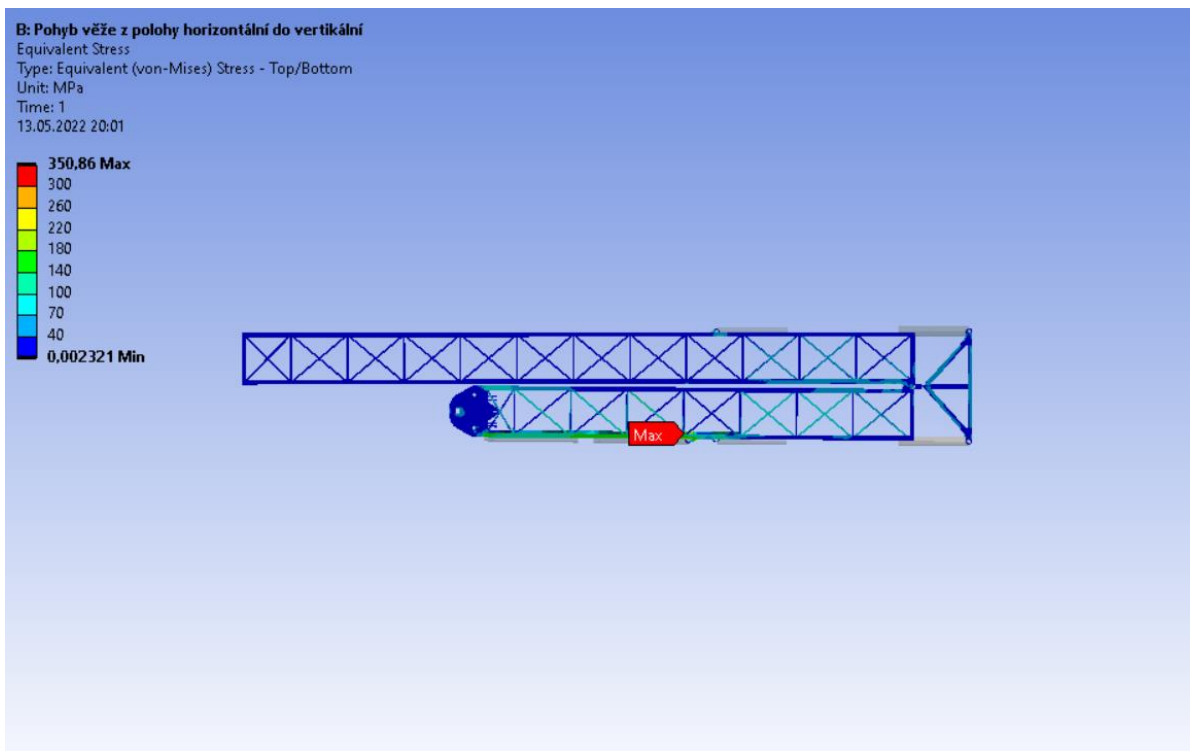


Obr. 73 – Původní geometrie v kritickém místě

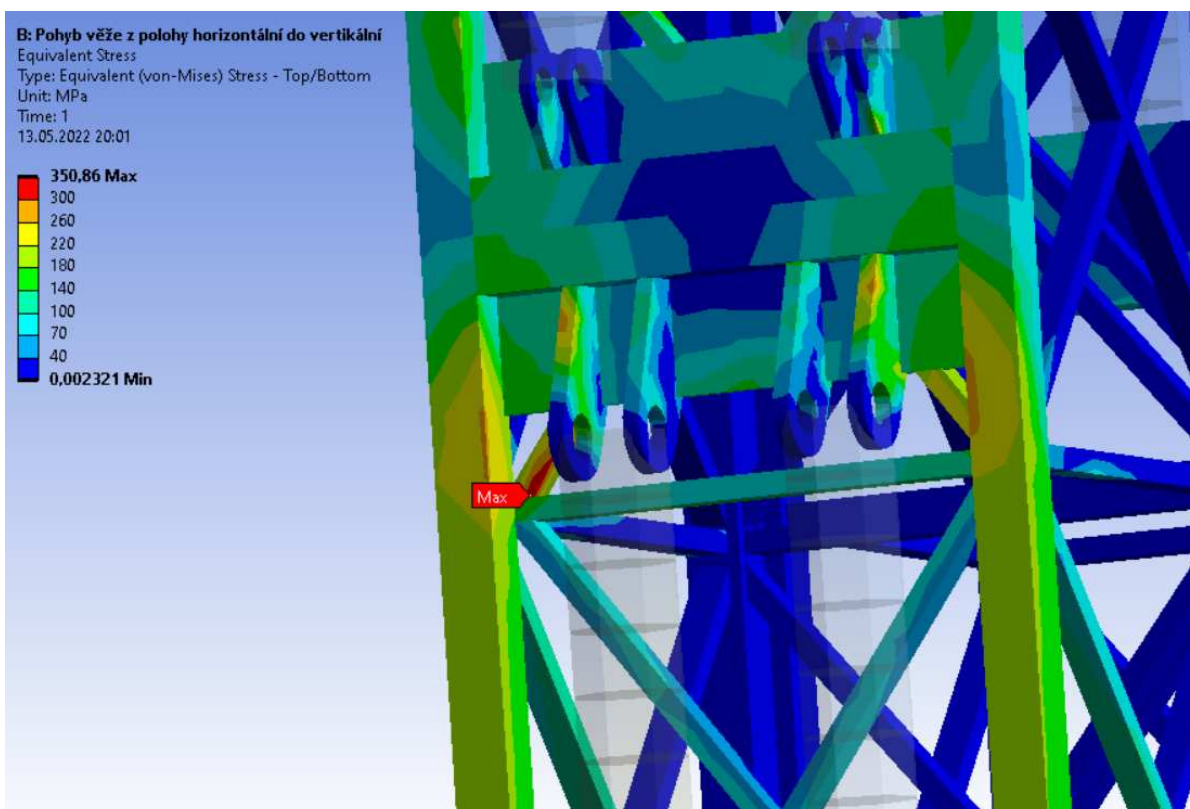


Obr. 74 – Upravená geometrie v kritickém místě





Obr. 75 – Hodnoty napětí ve vybrané poloze č. 3 po optimalizaci



Obr. 76 - Hodnota nejvyššího napětí ve vybrané poloze číslo 3 po optimalizaci

## 9 ZÁVĚR

Cílem práce byla napětově-deformační analýza konstrukce.

Proběhlo seznámení s dvěma normami. Obě dvě je nutné vzít v úvahu při návrhu ocelových konstrukcí a zábavních atrakcí. Prvně zmíněnou normou byla ČSN EN 13814. Tato norma pojednává o bezpečnostních pravidlech, které by měly předejít ublížení na zdraví. Jsou zde uvedeny všeobecné požadavky na rozbor a prohlídku konstrukčního návrhu, kde patří např. údaje o volném prostoru pro pohyb nebo konstrukční výkresy součástí, jejichž výpadek nebo prasknutí by mohl ohrozit stabilitu nebo provozní bezpečnost. Dále jsou uvedeny informace o výběru materiálů a konstrukčním zatížení. Druhou zmíněnou normou byla ČSN EN 1991-1-4. Tato norma se zabývá pokyny pro stanovení zatížení větrem pro navrhování pozemních a inženýrských staveb. Její platnost se vztahuje na pozemní a inženýrské stavby s výškou do 200 m. Účinek větru závisí na konstrukci, na tvaru, velikosti a dynamických vlastnostech konstrukce. Tento účinek neboli odezva konstrukce se vypočítá z maximálního dynamického tlaku v referenční výšce, ze součinitelů sil, tlaků a ze součinitele konstrukce. Jsou zde uvedeny vzorce pro výpočet rychlosti větru, maximálního dynamického tlaku, tlaku větru na povrchy (vnější a vnitřní) a sil od větru (dva možné způsoby).

Na základě dodaného souboru, který obsahoval objemová tělesa, byla vytvořena nová geometrie s tělesy skořepinovými. Výhodou tohoto postupu je nepřevzetí chyb z původního modelu např. nedotažené hrany, průnik těles. Důvodem tohoto zjednodušení byl pokles časové a hardwarové náročnosti výpočtu.

Z hotového geometrického modelu se postoupilo na tvorbu modelu numerického. Ten zahrnuje nastavení tloušťky jednotlivých těles, volbu materiálu, přiřazení vhodné sítě, kontakty a vazby. Hodnota tloušťky materiálu byla určena podle objemových těles v dodaném souboru. Pouze se zvolil směr přidání takového rozměru (*Bottom/Top*). Celá věž je z jednotného materiálu, a to z oceli S235, který je charakteristický pro stavbu ocelových konstrukcí. Avšak hustota tohoto materiálu byla navýšena o cca 1700 kg/m<sup>3</sup> z důvodu nezahrnutí všech těles do geometrického modelu. Mezi napětím a poměrnou deformací materiálu platí lineární závislost. Důležitou veličinou nutnou k uvážení je mez kluzu. Jestliže je redukováno napětí vyšší než mez kluzu, tak přestává platit zmíněná lineární závislost (Hookeův zákon) a dochází ke vzniku plastických deformací. Síť konstrukce byla vygenerována automaticky pouze se změnou výchozí velikosti elementu, a to na 100 mm. Skořepinová geometrie umožňuje vytvořit kvalitní síť z důvodu zjednodušení. Kontakty slouží k ucelení jednotlivých těles. U všech 325 těles byl použit kontakt typu *Bonded* za účelem spojení těles v jeden celek. Vazby slouží k umožnění, resp. zamezení vzájemných pohybů. Zde jsou rozděleny na kloubové a posuvné. Byly použity typy *Revolute* a *General*. *Revolute* zamezí posuvům ve všech osách a umožní pouze rotaci kolem osy z. Celkový počet takových vazeb je 16. *General* je obecná vazba, která musí být nadefinována. Zde zamezí rotacím kolem všech os a posuvům v ose x a y, povolen bude pouze posuvný pohyb v ose z. Celkový počet takových vazeb je 6.

Po přípravě numerického modelu se nastavily okrajové podmínky. Mezi tyto okrajové podmínky patří gravitační zrychlení, posuvy pístů uvnitř hydraulických válců v jednotlivých krocích a síly, jež budou nahrazovat účinky lan v lanových převodech. Gravitační zrychlení je zde z důvodu působení gravitačního pole na konstrukci. Hodnoty posuvů pístů u jednotlivých párů hydraulických válců se určily experimentálně na základě relativního skládání věže. Síly aplikované do okrajových podmínek jsou důsledkem existence výtahu s karuselem a rameny, který je zachycen prostřednictvím lan v lanových

převodech. Tento výtah včetně karuselu a ramen je uvažován jako hmotný bod. Součinem hmotnosti tohoto hmotného bodu a gravitačního zrychlení je síla působící do lan v lanových převodech ve vertikální poloze věže. Protože jsou zvedané části neseny dvěma závěsy, bude tato síla poloviční. V každé poloze stavění/rozkládání věže dojde k rozkladu této síly na složky x a y. Vektorový součet této síly má vždy stejnou hodnotu v každé poloze. Ve směru osy x působí daná část síly do válečků a ve směru osy y působí daná část síly do lan. Zatížení větrem je zanedbáno, stavění věže bude probíhat za příznivého počasí (bezvětrí).

Po nastavení okrajových podmínek byla provedena napětově-deformační analýza. Výpočet byl rozdělen do 19 kroků na základě určených hodnot vysunutí/zasunutí válců. Avšak v softwaru se vyskytla porucha po zhruba 2/3 výpočtů z celkového počtu kroků. Zjištění zbývajících hodnot se zrealizovalo stavěním věže z polohy vodorovné. Jakmile byly vypočítány hodnoty napětí a posunutí pro všechny polohy věže, tak se vybraly 4 polohy s nejvyššími napětími. Jedná se o kroky 2 s, 7 s, 17 s a 19 s.

Z 4 vybraných poloh není ani 1 z nich pevnostně vyhovující. Určilo se to z podmínky, která neplatí pro tyto 4 polohy, nižší hodnoty redukovaného napětí v porovnání s hodnotou meze kluzu materiálu. Při zhlédnutí maximálních napětí u všech 19 poloh se dospělo k tomu, že 13 z nich je nevyhovujících. Musí být provedena optimalizace. V tomto případě se jedná o úpravu nevyhovující konstrukce do vyhovujícího stavu. Nejjednodušší variantou byla změna materiálu z konstrukční oceli S235 na S355. Takhle se zvýšila mez kluzu z  $Re = 235 \text{ MPa}$  na  $Re = 355 \text{ MPa}$  a zároveň snížil počet nevyhovujících poloh z 13 na 2. Názorná ukázka využití optimalizace ve smyslu navýšení tloušťky kritických míst byla uskutečněna u vybrané polohy č. 3. Jedná se o čas 19 s neboli polohu složené věže. Maximální napětí u této polohy před optimalizací přesahovalo mez kluzu. Po změně geometrie a následném navýšení tloušťky těles kritických míst se změnila hodnota maximálního napětí na 350,86 MPa. Po optimalizaci je tato nová hodnota maximálního napětí nižší o 4,14 MPa než mez kluzu. Tato poloha je nyní vyhovující.

Stavění věže probíhá ručně. Neexistuje obecně postup, který by to popisoval. Pro navržený způsob dochází k uspořádání takových napětí, pro jiný způsob by to mohlo být jinak. Při zasouvání/vysouvání válců dochází k putování těžiště kolem osy atrakce. To má vliv na rozložení napětí. Těžiště se více či méně odchyluje od osy věže. Kdyby těžiště více kopírovalo osu kolotoče, tak by docházelo k lepším výsledkům. Na základě tohoto zjištění by bylo vhodné navrhnout jiné hodnoty vysouvání.

## 10 PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Zdeňku Porubovi, Ph.D., za jeho ochotný přístup, cenné rady, připomínky a čas věnovaný na konzultacích při zpracování mé práce. Dále bych chtěl vyjádřit velké díky mé rodině a přátelům, kteří mi byli podporou po celou dobu mého studia.

## 11 CITACE

[1] ČSN EN 13814. *Prostředky lidové zábavy pro slavnosti a lunaparky – Bezpečnost*. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2005 [cit. 2022-05-05].

[2] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Aktuální vydání. Český normalizační institut, 2007 [cit. 2022-05-05].

[3] PIŇOS, Michal. *Napětově – deformační analýza zábavní atrakce* [online]. Ostrava, 2020 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/141208>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: A\_hodnoty\_sil\_v\_lanech\_a\_ve\_valeccich\_u\_pohybu\_veze\_z\_polohy\_horizontalni