

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Konstrukční návrh kompozitového hydraulického jeřábu s integrovaným  
řešením spojů

Autor: Bc. Stanislav Vrba  
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Raab, Ph.D.  
Konzultant: Ing. Ondřej Uher, Ph.D.

Akademický rok 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Stanislav VRBA**  
Osobní číslo: **S17N0055P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**  
Název tématu: **Konstrukční návrh kompozitového hydraulického jeřábu  
s integrovaným řešením spojů**  
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

#### Základní požadavky:

Proveďte konstrukční návrh kompozitového hydraulického nakládacího jeřábu s využitím integrovaného řešení spojů. Proveďte potřebné pevnostní výpočty. Zaměřte se na technologičnost konstrukce vzhledem k dostupným technologiím a strojům.

#### Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

#### Osnova diplomové práce:

1. Rešerše současného stavu techniky
2. Konstrukční návrh
3. Kontrola klíčových vlastností konstrukčního návrhu
4. Technologičnost výroby
5. Zhodnocení práce, závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**EHRENSTEIN, GOTTFRIED W.** *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Scientia, 2009

**LAŠ, VLADISLAV** *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004

**REMTA, FRANTIŠEK ET AL.** *Jeřáby: I. díl*. Praha: SNTL, 1974

**REMTA, FRANTIŠEK ET AL.** *Jeřáby: II. díl*. Praha: SNTL, 1974

*Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

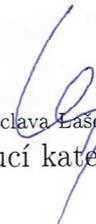
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Raab, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Ondřej Uher**  
CompoTech PLUS, spol. s r.o.

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2018

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Vrba	Jméno Stanislav		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301T001 „Dopravní a manipulační technika“			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Raab, PhD.		Jméno Zdeněk	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>		Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Konstrukční návrh kompozitového hydraulického jeřábu s integrovaným řešením spojů			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	162	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	113	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	49
---------------	-----	---------------------	-----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce se zabývá konstrukční studií nakládacího jeřábu, pro který byl jako materiál zadavatelem práce zvolen uhlíkový kompozit. Práce obsahuje koncepční návrh rozpracovaný do výrobní dokumentace. Konstrukční práce byly podloženy analytickými výpočty ale i výpočty MKP.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p style="text-align: center;">jeřáb, kompozitní materiály, hydraulika, MKP</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Vrba	Name Stanislav	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301T001“Transport and handling machinery“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Raab, PhD.	Name Zdeněk	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The design of composite hydraulic crane with integrated joint solution		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	162	<b>TEXT PART</b>	113	<b>GRAPHICAL PART</b>	49
----------------	-----	------------------	-----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis is focused on design study of loader crane, for which carbon composite was selected as material by the thesis assigner. The thesis contains conceptual design developed into production documentation. The design work was supported by analytical calculations as well as FEA calculations.
<b>KEY WORDS</b>	crane, composite materials, hydraulice, FEA

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

## Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat kolegům z firmy CompoTech Plus, zejména Ing. Vítku Šprdlíkovi, Ing. Ondřeji Uhrovi, Ph.D., Petru Jíchovi a Vlastimilu Krpálkovi, za cenné odborné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Raabovi, Ph.D. za vedení.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mi umožnila studovat na vysoké škole a byla mi po celou dobu studia oporou.

# Obsah

<b>Seznam použitých veličin</b>	<b>8</b>
<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>1 Jeřáby</b>	<b>10</b>
1.1 Nakládací jeřáb . . . . .	11
<b>2 Použitý materiál [5] a [6]</b>	<b>13</b>
2.1 Výztuž . . . . .	14
2.2 Matrice . . . . .	16
2.3 Možnosti zpracování . . . . .	17
<b>3 Specifikace požadavků</b>	<b>19</b>
3.1 Nosnost . . . . .	19
3.1.1 Zatížení a síly . . . . .	19
3.2 Zástavba do nosného vozidla . . . . .	20
3.3 Hmotnost . . . . .	21
3.4 Odolnost vůči povětrnostním vlivům . . . . .	21
<b>4 Stávající řešení [7]</b>	<b>22</b>
<b>5 Konstrukční řešení</b>	<b>24</b>
5.1 Varianty řešení . . . . .	24
5.1.1 Varianta A . . . . .	24
5.1.2 Varianta B . . . . .	24
5.1.3 Varianta C . . . . .	25
5.2 Vyhodnocení variantního řešení . . . . .	26
5.3 Statické vyhodnocení . . . . .	26
5.4 Návrh průřezových charakteristik . . . . .	33
5.4.1 Průběh ohybového momentu . . . . .	33
5.4.2 Teleskopický výložník . . . . .	35
5.4.3 Návrh průřezu a skladba návinu . . . . .	36
5.4.4 Návrh sloupu . . . . .	37
5.4.5 Návrh výložníku . . . . .	37
5.5 Návrh integrálních spojů . . . . .	38
5.5.1 Bod A . . . . .	38
5.5.2 Bod B . . . . .	39
5.5.3 Bod C . . . . .	43
5.5.4 Bod D . . . . .	44
5.6 Kontrolní výpočty čepů . . . . .	44
5.6.1 Kontrola čepů na otláčení . . . . .	44
5.6.2 Kontrola čepů na smyk . . . . .	45
5.7 Kontrolní výpočet přípojovacích šroubů . . . . .	48
5.8 Hydraulická soustava . . . . .	51
5.8.1 Návrh lineárního hydromotoru . . . . .	53

<b>6</b>	<b>Konečnoprvková analýza</b>	<b>54</b>
6.0.1	Materiál . . . . .	56
6.1	Statická napěťová analýza sloupu . . . . .	57
6.1.1	Výpočtový model sloupu . . . . .	57
6.1.2	Konečnoprvková síť sloupu . . . . .	58
6.1.3	Simulace sloupu . . . . .	64
6.1.4	Vyhodnocení výsledků . . . . .	66
6.2	Statická napěťová analýza hlavního dílu výložníku . . . . .	78
6.2.1	Výpočtový model hlavního dílu výložníku . . . . .	78
6.2.2	Konečnoprvková síť hlavního dílu výložníku. . . . .	78
6.2.3	Simulace hlavního dílu výložníku . . . . .	82
6.2.4	Vyhodnocení hlavního dílu výložníku . . . . .	85
6.3	Nelineární statická analýza výložníku . . . . .	89
6.3.1	Výpočtový model teleskopického výložníku . . . . .	90
6.3.2	Konečnoprvková síť teleskopického výložníku . . . . .	91
6.3.3	Simulace teleskopického výložníku . . . . .	92
6.3.4	Vyhodnocení teleskopického výložníku . . . . .	94
6.4	Statická napěťová analýza koncovky výložníku . . . . .	95
6.4.1	Výpočtový model koncovky . . . . .	95
6.4.2	Konečnoprvková síť koncovky . . . . .	96
6.4.3	Simulace koncovky . . . . .	96
6.4.4	Vyhodnocení koncovky . . . . .	96
<b>7</b>	<b>Technologičnost výroby</b>	<b>97</b>
7.1	Výrobní přípravy pro sloup . . . . .	98
7.1.1	Navíjecí trn - sloup . . . . .	99
7.1.2	Jehličky - sloup . . . . .	99
7.1.3	Příruba . . . . .	102
7.2	Výrobní přípravy pro výložník . . . . .	102
7.2.1	Navíjecí trn - výložník . . . . .	102
7.2.2	Jehličky - výložník . . . . .	103
<b>8</b>	<b>Výrobní dokumentace</b>	<b>104</b>
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>106</b>
9.1	Technické specifikace studie . . . . .	108
	<b>Literatura</b>	<b>109</b>
	<b>Příloha A Podklady k použitému kluznému materiálu</b>	<b>114</b>

## Seznam použitých veličin

Veličina	Jednotka	Název
$F$	[N]	Síla
$m$	[kg]	Hmotnost
$a$	[m · s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení
$g$	[m · s <sup>-2</sup> ]	Gravitační zrychlení (9,81 m · s <sup>-2</sup> )
$M$	[N · m]	Točivý moment
1, 2, 3	-	Souřadnicové osy (též x,y,z nebo L,T,T')
$E$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
$E_1$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu ve směru 1
$E_2$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu ve směru 2
$E_3$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu ve směru 3
$G$	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
$G_{12}$	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku v rovině 12
$G_{13}$	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku v rovině 13
$G_{23}$	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku v rovině 23
$\nu$	[-]	Poissonova konstanta
$\nu_{12}$	[-]	Poissonova konstanta v rovině 12
$\nu_{13}$	[-]	Poissonova konstanta v rovině 13
$\nu_{23}$	[-]	Poissonova konstanta v rovině 23
$R_m$	[MPa]	Napětí na mezi pevnosti v tahu
$R_{P0,2}$	[MPa]	Smluvní napětí na mezi kluzu
$s$	[-]	Bezpečnost
$\rho$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Hustota
$T$	[°C]	Maximální teplota
$T_{MAX}$	[°C]	Teplota
$v_f$	[%]	Objemový podíl vláken
$v_m$	[%]	Objemový podíl matrice
$X^T$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu v podélném směru
$Y^T$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu v příčném směru
$Z^T$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu ve směru kolmo na vrstvu
$X^C$	[MPa]	Mez pevnosti v tlaku v podélném směru
$Y^C$	[MPa]	Mez pevnosti v tlaku v příčném směru
$Z^C$	[MPa]	Mez pevnosti v tlaku ve směru kolmo na vrstvu
$S^{LT}$	[MPa]	Podélná mez pevnosti ve smyku
$\sigma_1$	[MPa]	Normálové napětí ve směru 1
$\sigma_2$	[MPa]	Normálové napětí ve směru 2
$\sigma_{12}$	[MPa]	Smykové napětí ve směru 12

## Úvod

Přemísťování materiálu je klíčové pro širokou škálu oborů lidského konání. Manipulaci s materiálem lze provádět meziobjektově či vnitroobjektově. Lze k ní využívat technické prostředky různé technické vyspělosti od mechanizovaných až po počítačem řízené manipulační systémy.

Cílem předkládané diplomové práce je provést konstrukční studii nakládacího jeřábu s hydraulickým pohonem, pro jehož konstrukci bude namísto klasické konstrukční oceli využito kompozitních materiálů. Motivací pro použití kompozitu v konstrukci jeřábu je zejména nižší hmotnost. V některých případech jsou výhodné výše položené hodnoty vlastních frekvencí nebo například pro vojenské aplikace radarová neviditelnost.



Obrázek 1: Nakládací jeřáb PALFINGER [8]

Na obr. 1 je nakládací jeřáb rakouské firmy PALFINGER, která patří mezi významné producenty nakládacích jeřábů.

# 1 Jeřáby

**Jeřáb** je stroj pro opakované zdvihání nebo pro opakované zdvihání a přemístování břemen zavěšených na háku nebo na jiném příslušenství pro manipulaci s břemeny, vyráběný kusově, sériově nebo sestavovaný z komponent. [3]

**Nakládací jeřáb** Jeřáby s vozem na pneumatikách slouží jako překládací jeřáby na skládkách sypkých hmot i kusového zboží, jako jeřáby montážní, stavební a jako zvláštní pomocné jeřáby při nehodách v silničním provozu, v protipožární ochraně apod.

Mívají výložník krátký pouhých několik metrů, také k až 20 i 35 m dlouhý, nosnost od 2 do 20 t, výjimečně až 40 t.

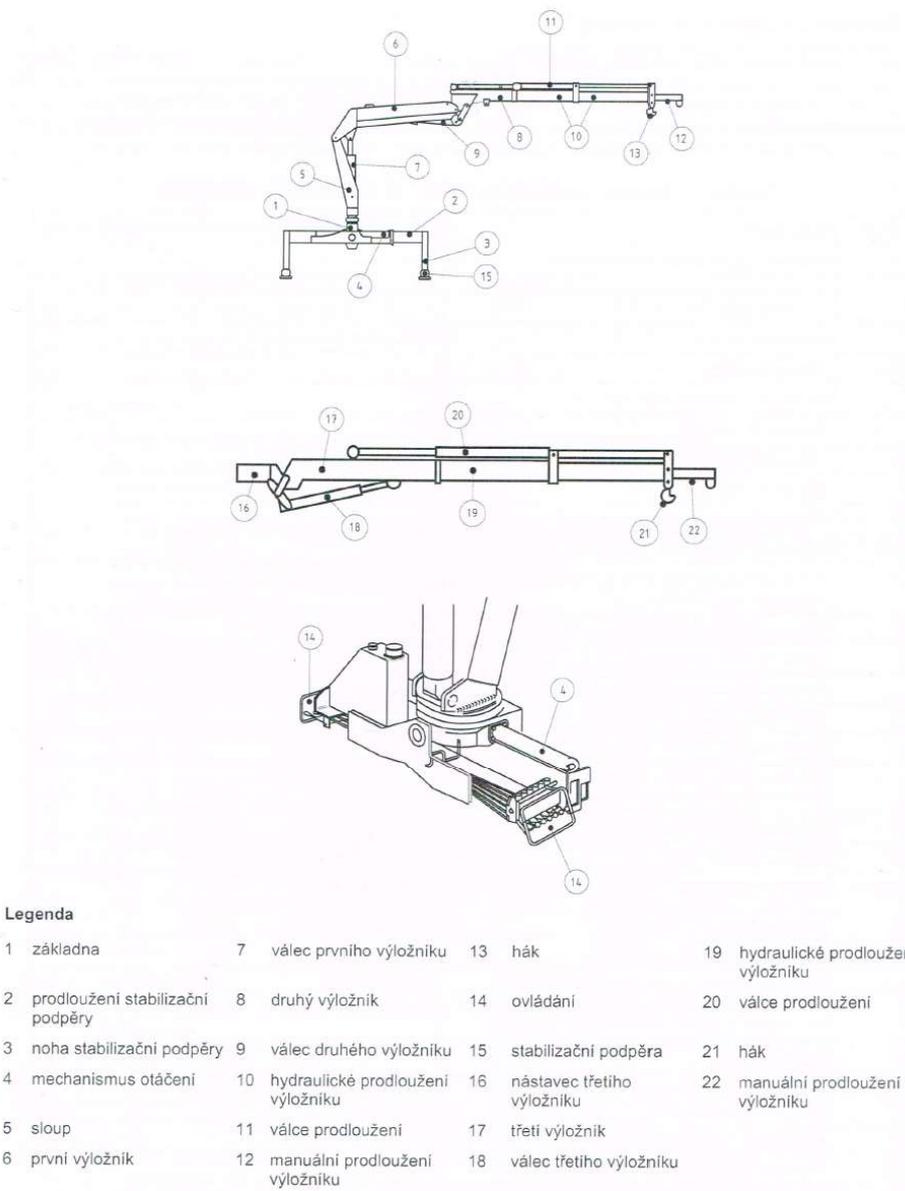
Výložník bývá stavitelný. Jeřáb je nejčastěji točnicový, někdy tvoří s vozem zcela osobitý konstrukční celek.

Podle účelu jsou jeřáby opatřeny hákem nebo drapákem nebo speciálním ústrojím k uchopení břemena.

Výložník se upevňuje v kyvně, nejčastěji na otočném svršku, tj. na vlastním jeřábu.[9]

## 1.1 Nakládací jeřáb

Nakládací jeřáb se skládá z hlavních konstrukčních celků popsanych na obr.2.



Obrázek 2: Hlavní části nakládacího jeřábu dle ČSN EN 12999+A1 [4]

ČSN 12999+A1 dále dělí nakládací jeřáby podle systému výložníku:

- nakládací jeřáb s přímým systémem výložníku
  - teleskopický systém výložníku
  - pevný přímý systém výložníku
- nakládací jeřáb s kloubovým systémem výložníku
  - kloubový systém výložníku, sklápěný příčně k vozidlu

- kloubový systém výložníku s prodloužením výložníku, sklápěný podélně k vozidlu

dle montáže:

- Montáž za kabinou
- Střední montáž
- Zadní montáž

Dále je možné provést montáž na traktor, na stabilní základ nebo na pick-up.

## 2 Použitý materiál [5] a [6]

Materiálem zvoleným pro konstrukci jeřábu je polymer vyztužený vlákny, tzv. kompozitní materiál. Struktura kompozitních materiálů je inspirována přírodními materiály a využívá spojení vlastností matrice a výtzuže.

ČSN 13000+A1 dovoluje použití neocelových konstrukcí, nepředepisuje pro ně však postup výpočtu, ale vyžaduje, aby výrobce jeřábu potažmo dodavatel prokázal dostatečné znalosti konstrukcí z těchto materiálů.

Konkrétně norma uvádí: *Neocelová konstrukce musí být navrhována pro předpokládanou životnost se stejným rozsahem bezpečnosti jako ocelová konstrukce. Musí být uváženy charakteristiky (např. tahové tečení, relaxace, anizotropie, chování za teplot). Tato norma nepojednává o technických požadavcích na tyto materiály. Výrobce jeřábu nebo dodavatel musí prokázat dostatečné znalosti a zkušenosti s těmito konstrukcemi.* [2]

Pod pojmem kompozitní materiál se v technické praxi rozumí materiál kombinující v makroskopickém měřítku alespoň dvě složky za účelem dosažení specifické vlastnosti. Pro kompozitní materiály je typická vlastnost zvaná anizotropie. Anizotropní materiál vykazuje rozdílné vlastnosti v závislosti na tom v jakém směru jsou měřeny. Hovoříme-li o obecně anizotropním materiálu potřebujeme pro popis jeho elastického chování znát 21 konstant. Jeho matice tuhosti má následující tvar:

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix}$$

Prakticky používané materiály však mají alespoň jednu rovinu symetrie.

Důvody pro použití vláken jako konstrukčního prvku vycházejí ze čtyř *paradoxů materiálu*. [5]

- **Paradox pevného materiálu**

*Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky (F. Zwicky).*

- **Paradox vláknité struktury**

*Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší (A. A. Griffith).*

- **Paradox délky zatížení**

*Čím kratší je zatěžovaná část jednotlivého vlákna, tím vyšší je jeho naměřená pevnost.*

- **Paradox kompozitního materiálu**

*Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku*

*porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl jeho teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně (G. Slayter).*

## 2.1 Výztuž

Výztuž kompozitního materiálu může být tvořena:

- vlákny
- částicemi

Vláknité kompozity dále dělíme dle délky na:

- dlouhovláknové
- krátkovláknové

Částice i vlákna mohou být ve výsledné struktuře orientované i neorientované.

Z pohledu mechaniky je vlákno tzv. příčně (transverzálně) izotropní materiál. Po příčně izotropní materiál platí:

Jedná se o materiál, jehož jedna rovina symetrie elastických vlastností je rovinou izotropie, tzn. elastické vlastnosti v této rovině jsou ve všech směrech stejné. [1]

Pro popis chování příčně izotropního materiálu je třeba znát 5 nezávislých prvků matice tuhosti, která získá následující tvar:

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}$$

Mezi běžně používané materiály výztuže patří např. různé druhy skla, aramid, uhlík. Různé materiály vlákna se hodí pro různé aplikace.

Skleněná vlákna z tzv. E - skla jsou používána např. v aplikacích vyžadujících vysokou odolnost proti průrazu elektrickým výbojem. Jiný druh skla, tzv. D - sklo je díky velmi nízké dielektrické konstantě vhodný pro výrobu krytů radarů.

Vlákna z Aramidu jsou světově známa v různých modifikacích pod různými obchodními názvy. Mezi nejrozšířenější patří Kevlar nebo Twaron.

Nejvhodnějším materiálem výztuže pro aplikace vyžadující vysoké hodnoty mechanických konstant jsou vlákna uhlíková.

Tabulka 1 shrnuje základní mechanické konstanty běžně užívaných výztuží:

<b>Materiál vlákna</b>	<b>E - sklo</b>	<b>Aramid</b>	<b>HST uhlík</b>	<b>HM uhlík</b>
$E_1$ [MPa]	73 000	130 000	240 000	500 000
$X^T$ [MPa]	2 400	3 000	5 000	1 750
$\rho$ [kg · m <sup>-3</sup> ]	2 600	1 450	1 750	1 960

Tabulka 1: Vlastnosti vláken používaných jako výztuha - viz [5]

Uhlíková vlákna jsou vyráběna řízenou pyrolýzou. Její podstatou je ohřev výchozích organických surovin na danou teplotu v kontrolované atmosféře. Obecně platí, že čím vyšší teploty bylo dosaženo, tím vyšších hodnot mechanických vlastností bude dosaženo.

Látky používané jako suroviny pro výrobu uhlíkových vláken jsou zejména:

- **celulóza** - využívána jako tepelně izolační materiál.
- **PAN (Polyakrylonitril)** - vlákna z PAN jsou považována za standardní
- **smola** - velmi vysoká hodnota modulu E

Výrobní metoda sloužící k výrobě uhlíkového vlákna, jak bylo zmíněno výše, spočívá v ohřevu vstupních surovin v kontrolované atmosféře. Tento proces je opakován při různých podmínkách v několika krocích za účelem dosažení stanoveného stupně grafitizace. Pro výrobu vláken označovaných jako standardní má výrobní proces následující podobu:

- **Dloužení** - PAN je tvarován do podoby vláken.
- **1. stupeň - Oxidace** - Ohřev na teplotu 200 - 300 °C za přítomnosti vzduchu za účelem dehydratace PAN a přeměny jeho struktury na žebříčkový polymer.
- **2. stupeň - Karbonizace** - Ohřev na teplotu okolo 1 300 °C za přítomnosti dusíku s cílem přeměnit žebříčkovou strukturu karbonizací na grafitickou. Vlákna po průchodu touto fází získají pevnost více než 5 000 MPa.
- **(3. stupeň - Grafitizace)** - Ohřevem na 2 500 °C v atmosféře argonu lze získat tzv. vysokomodulová vlákna. Fází grafitizace procházejí jen vlákna, u kterých je žádoucí dosáhnout vysokého modulu E, a není prováděna se všemi vlákny, neboť ohřev na zmíněnou teplotu je energeticky náročný a vlákna na úkor vysokého modulu ztratí na pevnosti v tahu.
- **Povrchová úprava** - Vlákna jsou ošetřena apretací směsí na bázi epoxidové pryskyřice, která slouží jako ochrana při zpracování.
- **Cívka** - Závěrečným bodem výroby je navinutí vláken na cívku.

## 2.2 Matrice

Jako matrice je označována spojitá fáze kompozitu, jejímiž úkoly jsou:

1. přenos namáhání na vlákna
2. převedení namáhání z vlákna na vlákno
3. zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku
4. ochrana vlákna před vlivy okolí

Důležitým hlediskem pro hodnocení vhodnosti matrice je kvalita spojení na rozhraní výztuže a matrice, která je do značné míry závislá na smáčivosti. Neméně důležitým parametrem je viskozita.

Základní dělení matric kompozitů užívaných v technické praxi je dle chemického složení na:

**reaktoplasty (termosety)** Významnou výhodou reaktoplastických matric lze spatřit zejména ve zpracovatelnosti, jelikož je lze zpracovávat za pokojové teploty. Jejich vytvrzení spočívá v přidání katalyzátoru, urychlovače, či jiné energie.

**termoplasty** Užitečnou vlastností termoplastických matric je fakt, že při ohřevu v nich nenastávají chemické změny, ale pouze natavení. Uvedené chování je nevýhodné ve smyslu energetické náročnosti zpracovatelského procesu, neboť je třeba udržovat matici nad teplotou likvidu. Nejsou tedy v technické praxi příliš rozšířené.

Mezi nejrozšířenější typy **reaktoplastických** pryskyřic patří:

- nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP-R)
- vinylesterové (VE-R) a fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice
- epoxidové pryskyřice (EP-R)
- fenolické pryskyřice
- metakrylátové pryskyřice (MA-R)
- izokyanátové pryskyřice

Nevýhodou epoxidových pryskyřic je vyšší cena a nutnost míchat je s tvrdidlem v přesně určeném tzv. stechiometrickém poměru. Naproti tomu disponují vyššími hodnotami požadovaných mechanických vlastností.

## 2.3 Možnosti zpracování

Kompozity lze zpracovávat řadou více či méně automatizovaných výrobních postupů. Samostatnou kapitolu tvoří zpracování tzv. prepregových tkanin. Jde o tkaniny které jsou na rozdíl od klasických tkanin předsycené matricí. Nicméně, prepregová tkanina však není vhodná pro výrobu navrhovaného dílu proto nebude zpracování této tkaniny dále rozváděno.

O výběru výrobní technologie rozhoduje zejména tvar zpracovávané výztuže a dále tvar navrhovaného dílce. Metoda bez jakékoliv mechanizace je nazývána **ruční kladení**, též zvané laminace. Při použití této metody jsou tkaniny ukládány ručně do formy, která má finální tvar výrobku. Nevýhodou ručního kladení je dosažení nejhorší kvality výrobku, což znamená zejména nerovnoměrný objemový podíl, který má zásadní vliv na vlastnosti výsledného laminátu. Jednoznačnou výhodou je nízká cena technických prostředků potřebných pro nasazení této metody.

Částečnou automatizaci lze do ručního kladení vnést užitím jednoduchých zařízení. Příkladem takové mechanizace může být například užití tlakových vaků, které slouží ke zhutnění a zalisování výrobku.

Technologie vhodné pro **výrobu nosíkových součástí** jsou zejména:

- odstředivé lití
- oplétání
- navíjení

Právě poslední zmíněné, **navíjení**, bylo zvoleno jako výrobní technologie nosníků jeřábu. Pro navíjení je charakteristický rotační pohyb budoucího výrobku, který je tvořen kladením jednotlivých pramenců vláken v přesně určeném pořadí a v přesně určené poloze. Obecně lze říci, že výrobní zařízení, navíjecí stroj, má podobné kinematické charakteristiky jako například soustruh. Navíjecí stroj se skládá z lože, po kterém se pohybuje suport, a pohonné části. Na rozdíl od soustruhu není na suportu umístěna nožová hlava, ale tryska, ze které vystupuje vlákno. Základ budoucího výrobku, tzv. navíjecí trn, je upnut ve speciálně uzpůsobeném sklíčidle tak, aby byla zajištěna jeho jednoznačná poloha.

Vlákno, které je navíjeno na trn, prochází z cívkovnice do prosycovací vany, kde je nasyceno přesným objemovým podílem matrice, a následně je po průchodu tryskou kladeno na trn.

Dalším vývojovým stupněm výroby kompozitu jsou technologie označované jako AFL (automated fiber laying) nebo AFP (automated fiber placement). Obě tyto technologie mají původ v leteckém průmyslu a lze s jejich pomocí dosáhnout lepší konsolidace výztuže v kompozitu. Implementace do praxe je nejčastěji prováděna pomocí šestiosé robotické paže, která pokládá vlákna či tkaniny s vysokou přesností a opakovatelností. Nespornou výhodou zpracovávání jednotlivých pramenců vláken je znalost přesného složení návinu (laminátu).

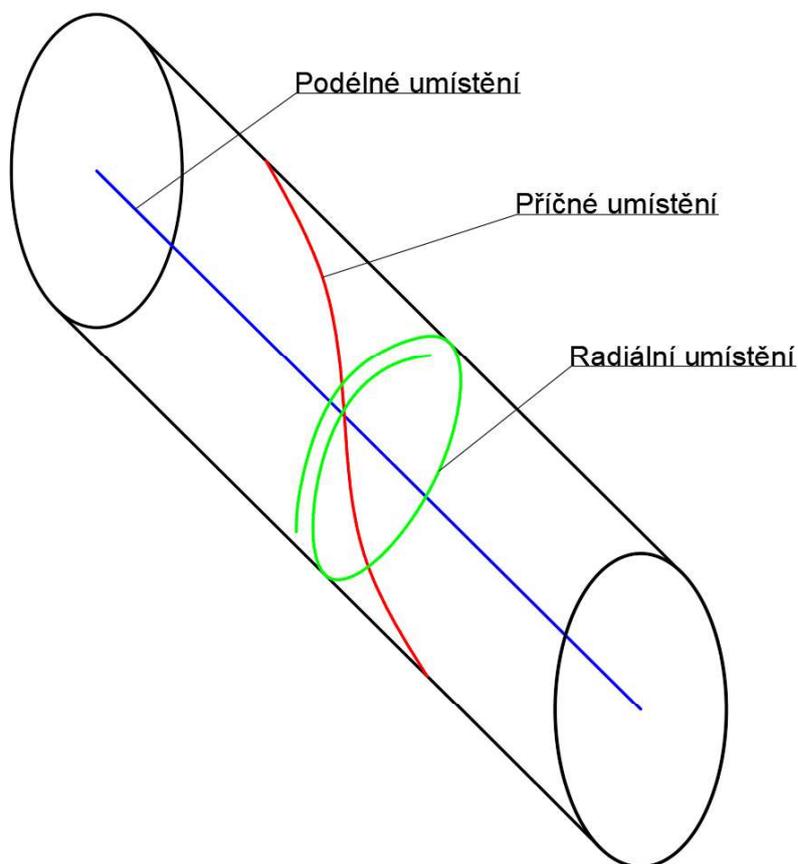
Jak bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, pro výsledné vlastnosti kompozitu je zcela zásadní orientace výztuže. Obecně lze vycházet z předpokladu, že vláknitá výztuž nejlépe přenáší napětí v rovině kolmé na osu vlákna. Z tohoto pohledu je účelné orientovat vlákna v návinu tak, aby do nich bylo napětí vnášeno právě tímto směrem.

Každá vrstva návinu má v kompozitu svou specifickou úlohu, kterou nemusí být nutně přenos zatížení. U navíjených kompozitů hovoříme vzhledem k poloze vůči ose trnu o následujících vrstvách:

**Podélná vlákna** - Leží rovnoběžně s osou trnu. Mají nejvýraznější podíl na ohybové tuhosti výsledného profilu. Pro jejich navíjení je třeba užít speciální jednoúčelové přípravky.

**Vlákna umístěná napříč** - Jsou na trn navíjena pod určitým úhlem, díky čemuž vzniká typický vzor. Tyto vrstvy jsou používány jako propojovací mezi jednotlivými vrstvami podélných vláken, na povrchu návinu z estetických důvodů, jako vrstva, do které lze obrábět bez výraznější ztráty mechanických vlastností a v neposlední, řadě má kladný vliv na stabilitu stěny.

**Radiální vlákna** - Úhel stoupání šroubovice, ve které jsou navíjena, je tak malý, že vlákna přenášejí zejména vnitřní přetlak. Z toho důvodu jsou používána právě pro součásti namáhané vnitřním přetlakem, například tlakové nádoby.



Obrázek 3: Orientace vláken navíjeného výrobku

## 3 Specifikace požadavků

Nakládací jeřáb patří mezi strojní zařízení souhrně označovaná jako zdvihací zařízení. Vyhláška č. 19/1979 Sb. stanovuje tzv. vyhrazená zdvihací zařízení a z toho vyplývající podmínky pro zajištění jejich provozu a bezpečnosti. Dle výše uvedené vyhlášky se o vyhrazeném zařízení hovoří, pokud jde o zdvihadla s nosností nad 5 000 kg.

Navzdory faktu, že se nejedná o vyhrazené zařízení, je jeho konstrukce, výroba, provoz a následná údržba svázána řadou předpisů uvedených v ČSN EN 12 999+A1 a ČSN EN 13 000+A1.

### 3.1 Nosnost

Elementárním parametrem každého zdvihacího zařízení je nosnost.

Dle ČSN 13 000+A1 musí být ve výpočtu nosnosti uváženy tyto parametry: [3]

- pracovní tlak válců
- plocha válců přenášejících zatížení od břemena
- geometrie
- zatížení od vlastní hmotnosti
- kombinace zatížení

#### 3.1.1 Zatížení a síly

Norma uvažuje následující zatížení a síly:

- pravidelná zatížení
  - zatížení od vlastní hmotnosti
  - celkové břemeno
  - dynamické
  - odstředivé síly
- občasná zatížení
  - vítr za provozu
  - jiná klimatická zatížení a vlivy prostředí, jako je teplota, sníh a led
  - zatížení schodišť, plošin a zábradlí
- výjimečná zatížení
  - zatížení při zkouškách
  - zatížení způsobená náhlým zastavením pohybu účinkem mechanické části, například při nouzovém zastavení nebo při uzavření ventilu v případě prasknutí hydraulického potrubí

- náhlé uvolnění zatížení od břemena, například selhání lana a vazáku
- síly způsobené dynamickým rázem při současném zdvihání nebo spouštění břemena a při maximální výsledné svislé rychlosti všech pohonů kloubových částí výložníku

Dynamické účinky od kmitání zavěšeného břemene a vlastní tíhy dílů jeřábu se do výpočtu zanášejí pomocí dynamických součinitelů  $\phi_1$  a  $\phi_2$ .

Určení těchto součinitelů dle ČSN 12 999+A1:

$$\phi_1 = \min(1, 1; \phi_2) \quad (1)$$

kde:

- $\phi_1$  - součinitel zohledňující dynamické účinky tíhy jeřábu
- $\phi_2$  - součinitel zohledňující dynamické účinky tíhy břemene

$$\phi_2 = \phi_{2,\min} + \beta_2 \cdot v_h \quad (2)$$

kde:

- $\beta_2$  - součinitel dle příslušné zdvihové třídy
- $v_h$  - rovnoměrná rychlost zvedání

Vyčíslení hodnot koeficientů proběhlo dle tabulek v uvedené ČSN:

Jeřáb spadá do zdvihové třídy HC1, jelikož je montovaný na vozidle. Z určení zdvihové třídy plynou koeficienty  $\beta_2 = 0,17$  a  $\phi_{2,\min} = 1,05$ .

Pohon zdvihu může pracovat pouze pevnou rychlostí, spadá tedy do skupiny HD1, z čehož plyne hodnota  $v_h = v_{h,\max}$ . Běžná nejvyšší rychlost zdvihu u podobných jeřábů je 10 [m/min].

Po vyčíslení dostaneme následující vztah:

$$\phi_2 = \phi_{2,\min} + \beta_2 \cdot v_h \quad (3)$$

$$\phi_2 = 1,05 + 0,17 \cdot 10 = 2,75 \quad (4)$$

Výslednou hodnotou  $\phi_1$  tedy je:

$$\phi_1 = \min(1, 1; 2,75) = 1,1 \quad (5)$$

### 3.2 Zástavba do nosného vozidla

Dle ČSN 13 000+A1 musí být nakládací jeřáb na podvozku umístěn tak, aby se zaručilo, že kompletní montáž vyhovuje požadavkům stability. Stabilita nakládacího jeřábu namontovaného na vozidle musí být taková, aby se tato pracovní jednotka nepřeklopila za předpokládaných provozních podmínek.[3] Dále norma uvádí postup pro ověření

stability.

Nakládací jeřáb se k rámu nosného vozidla umísťuje pomocí mechanismu otáčení, který musí být schopen odolávat maximálními silami od otáčení tak, aby se otáčení zastavilo a uneslo břemeno za nejnepříunivějších podmínek.

### 3.3 Hmotnost

Hmotnost jeřábu je stejně jako u většiny strojních zařízení sledovaný parametr. Pro nakládací jeřáb je žádoucí snaha dosáhnout nejnižší možné hmotnosti z důvodů úspory pohonných hmot nosného vozidla a neopodstatněného snižování využitelné hmotnosti nosného vozidla.

Snaha dosáhnout co nejnižší hmotnosti je dále motivována užitím co nejmenších pohonů.

### 3.4 Odolnost vůči povětrnostním vlivům

Nevýhodou užití oceli je náchylnost ke vzniku koroze. Lze ji snížit užitím nátěru či jinou povrchovou úpravou, například pozinkováním. Tyto ochranné vrstvy však v pracovním prostředí jeřábu, kde snadno dojde k oděrkám, po poškození ztrácí účinnost.

Uhlíkový kompozit s reaktoplastickou maticí nepodléhá korozi, avšak epoxidová matrice podléhá poškození vlivem vystavení ultrafialovému záření, které se projevuje ztrátou lesku, žloutnutím a zhoršením mechanických vlastností. UV degradaci lze výrazně omezit užitím UV stabilizátorů a ochranného laku.

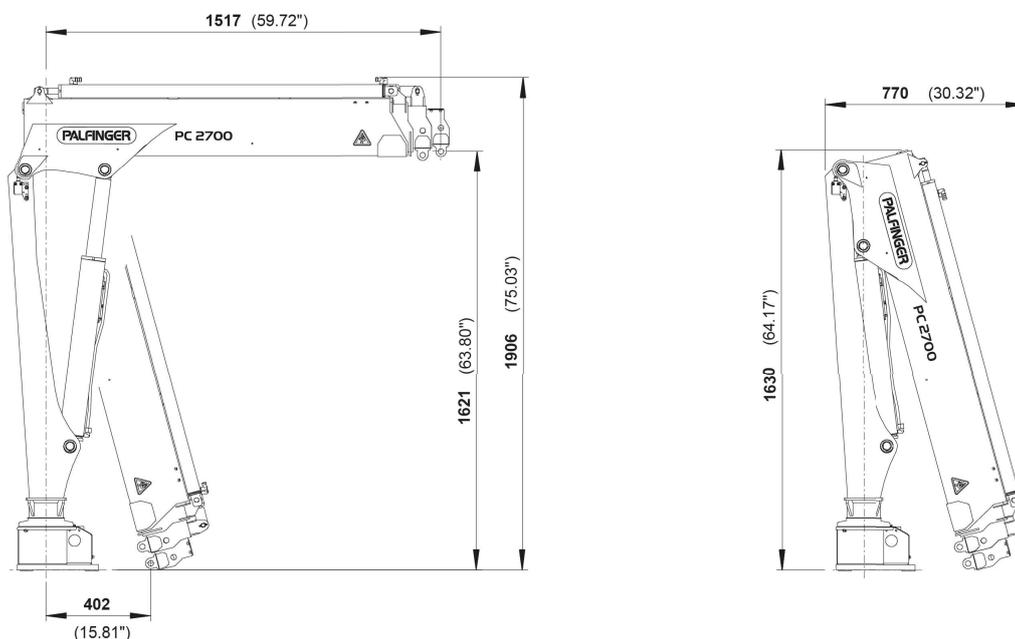
## 4 Stávající řešení [7]

Vzhledem k požadavkům na nosnost a vyložení byl rešerši podroben nakládací jeřáb typu PC2700 rakouského výrobce PALFINGER.



Obrázek 4: Nakládací jeřáb PALFINGER PC2700 [7]

Z konstrukčního hlediska jsou sloup i výložníky provedeny jako svařence z konstrukční oceli. Na typovém výkresu (obr.5) můžeme vidět precizní provedení spojů z hlediska únavového namáhání a optimalizace využití materiálu.



Obrázek 5: Nakládací jeřáb PALFINGER PC2700 - typový výkres, nárys

Spoje jsou řešeny přidáním vhodně tvarovaných plechových příložek k základnímu profilu.

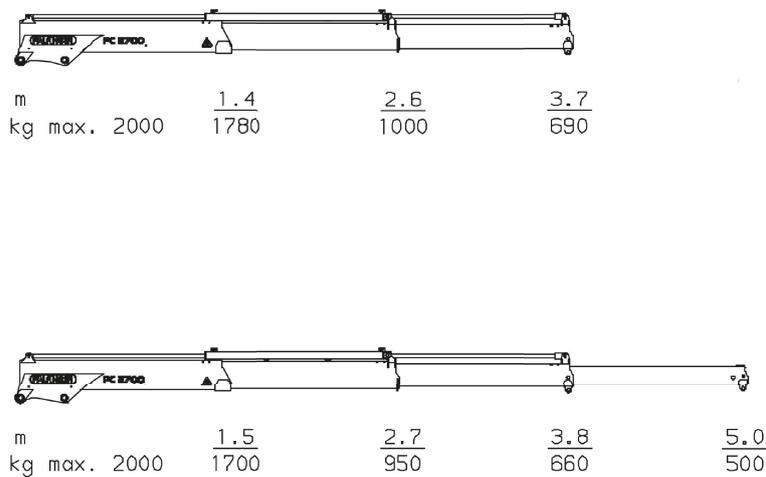
Parametr	Jednotka	Hodnota
Maximální zdvihový moment	[kNm]	25.8
Maximální nosnost	[kN]	2000
Maximální dosah	[m]	3.7
Úhel otočení	[°]	325
Moment otočení	[kNm]	3.0
Zástavbový prostor	[m]	0.4
Složená šířka	[m]	0.77
Mrtvá váha	[kg]	207

Tabulka 2: Vybrané charakteristiky PALFINGER PC2700

Z použitého materiálu - konstrukční oceli vyplývají přednosti i nevýhody oceli. V porovnání s kompozitními materiály je ocel náchylná ke vzniku oxidické vrstvy na povrchu. Dále mají několikrát vyšší hustotu.

Jejich výraznou výhodou je naopak řádově nižší cena, rozšířená zpracovatelnost a výrazně jednodušší vytváření spojů.

Každý nakládací jeřáb je opatřen závazným diagramem, který zachycuje maximální nosnost v závislosti na vyložení výložníku. Obzvláště důležitý je pak pro jeřáby s teleskopickým výložníkem. V případě uvedeného PC2700 má diagram následující podobu viz obr.6.



Obrázek 6: Diagram vyložení PC2700

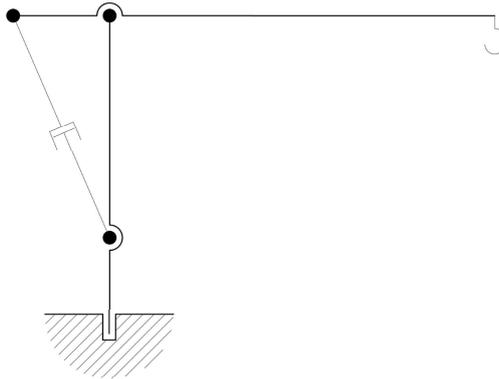
Z diagramu lze vyčíst, že se jeřáb jednoho modelu nabízí s variátním řešením výložníku a zákazník si zvolí, zda upřednostní nižší hmotnost nebo vyšší maximální vyložení. Rovněž lze volit mezi hydraulicky a ručně ovládaným teleskopickým výložníkem.

## 5 Konstrukční řešení

Na základě specifikace požadavků byly vytvořeny tři varianty možného řešení. Jednotlivé varianty se navzájem liší kinematikou, počtem členů a z toho vyplývající rozdílnou hmotností a tuhostí.

### 5.1 Varianty řešení

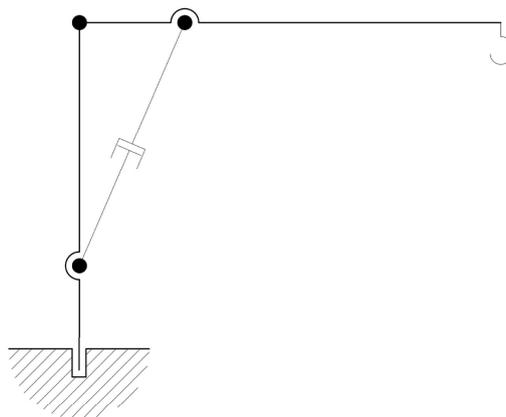
#### 5.1.1 Varianta A



Obrázek 7: Kinematické schéma varianty A

Jak je patrné ze schématu na obr.7, varianta A se skládá ze sloupu, výložníku a hydraulického válce. Výložník přesahuje přes sloup oboustranně. Výhodou tohoto řešení je příznivější umístění těžiště. Mezi nevýhody patří nepříznivé skladovací rozměry ve složené stavu.

#### 5.1.2 Varianta B

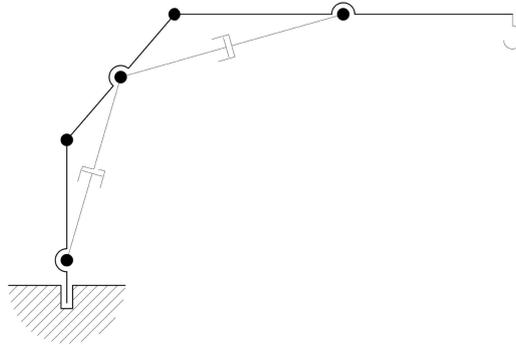


Obrázek 8: Kinematické schéma varianty B

Druhá varianta se opět skládá ze sloupu, výložníku a hydraulického válce viz obr.8. Na rozdíl od varianty A výložník nepřesahuje přes sloup a spolu s hydraulickým válcem

se nachází po jedné straně sloupu. Nevýhodou tohoto řešení je tedy nepříznivější poloha těžiště. Výhodou jsou menší skladovací rozměry ve složeném stavu a zejména příznivější statické řešení. V této variantě je převážná část sloupu namáhána zejména tahem, což je vzhledem k použití kompozitního materiálu příznivější.

### 5.1.3 Varianta C

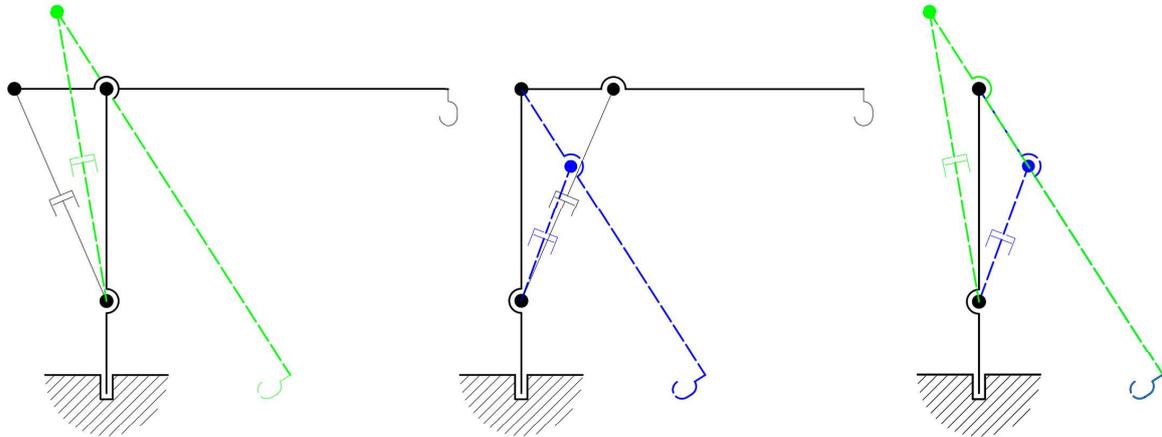


Obrázek 9: Kinematické schéma varianty C

Třetí uvažovaná varianta viz obr.9 se skládá ze sloupu, dvou výložníků a dvojice hydraulických válců. Výhodou tohoto řešení je vynikající skladnost ve složeném stavu. Významnou nevýhodou je zvýšený počet dílců výložníku i spojů, a tím zvýšená hmotnost řešení i konstrukční složitost.

## 5.2 Vyhodnocení variantního řešení

Po zvážení všech kladů a záporů byl pro další konstrukční činnost zvolena varianta B. Mezi její hlavní přednosti patří menší počet konstrukčních celků oproti variantě C a příznivější namáhání sloupu oproti variantě A.



Obrázek 10: Porovnání skladovacích rozměrů variant A a B

Přímé srovnání rozměrů variant A a B ve složeném stavu zachycuje obrázek 10. Schematický obrázek vychází z předpokladu shodné délky výložníku. Varianta A ve složeném stavu (zelenou barvou) přesahuje nad variantu B (modrou barvou).

## 5.3 Statické vyhodnocení

Prvním krokem konstrukčního řešení bylo hrubé (návrhové) statické řešení. Jelikož zatížení, reakce i geometrie leží v jedné rovině, jedná se z hlediska statiky o rovinnou soustavu skládající se ze čtyř členů včetně rámu. Má tedy 3 rotační a jednu obecnou (vetknutí) vazbu.

Počet stupňů volnosti byl určen užitím vazbové rovnice.

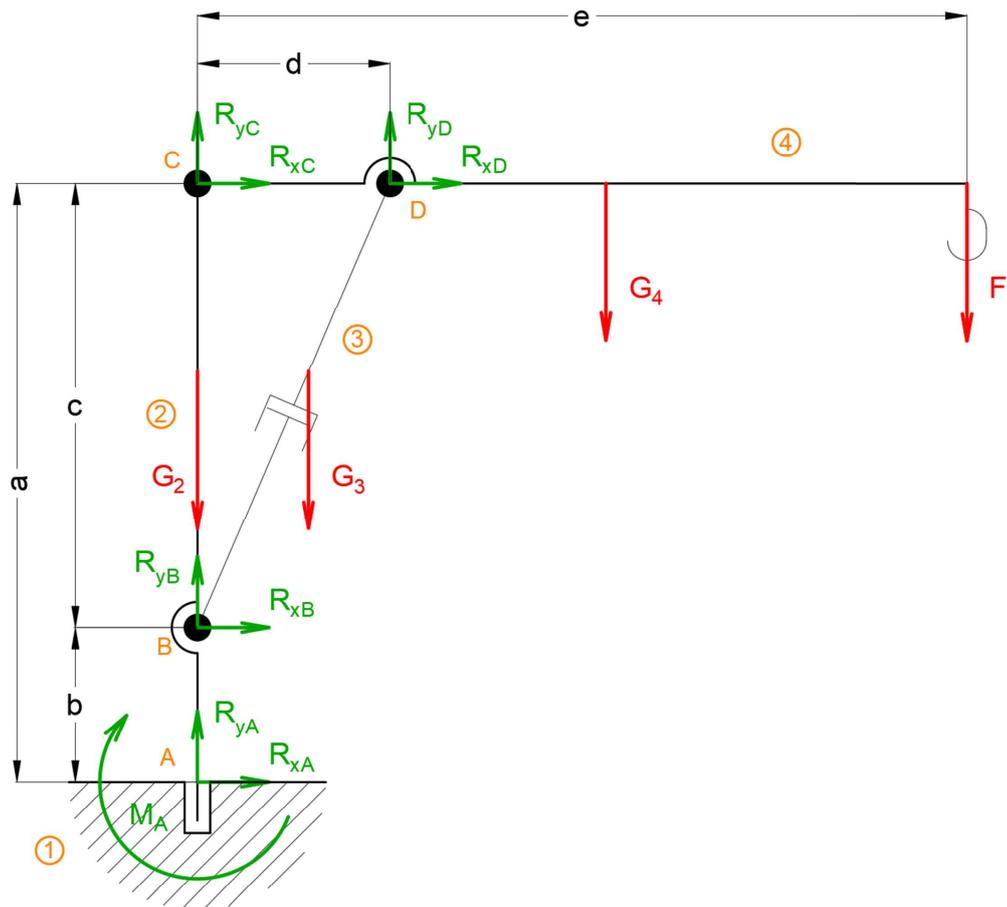
$$i = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot (r + p + v) - o \quad (6)$$

$$i = 3 \cdot (4 - 1) - 2 \cdot (3 + 0 + 0) - 1 = 0 \quad (7)$$

Počet stupňů volnosti určený vazbovou rovnicí je 0. Z toho lze vyvodit, že se jedná o staticky určitou nepohyblivou soustavu, u níž vyšetřujeme reakce. V obr.11 jsou zakresleny akční a reakční silové účinky, které v soustavě působí.

Pro vyšetření velikostí a směrů pro jednotlivé členy byla využita metoda uvolňování. Zjednodušeně řečeno, použitá metoda je založena na myšleném uvolnění všech členů soustavy, přičemž jsou okolní členy zaneseny prostřednictvím reakčních silových účinků. Pro každý člen byla poté sestavena trojice rovnic, dvě silové podmínky ve směrech souřadného systému a jedna momentová podmínka.

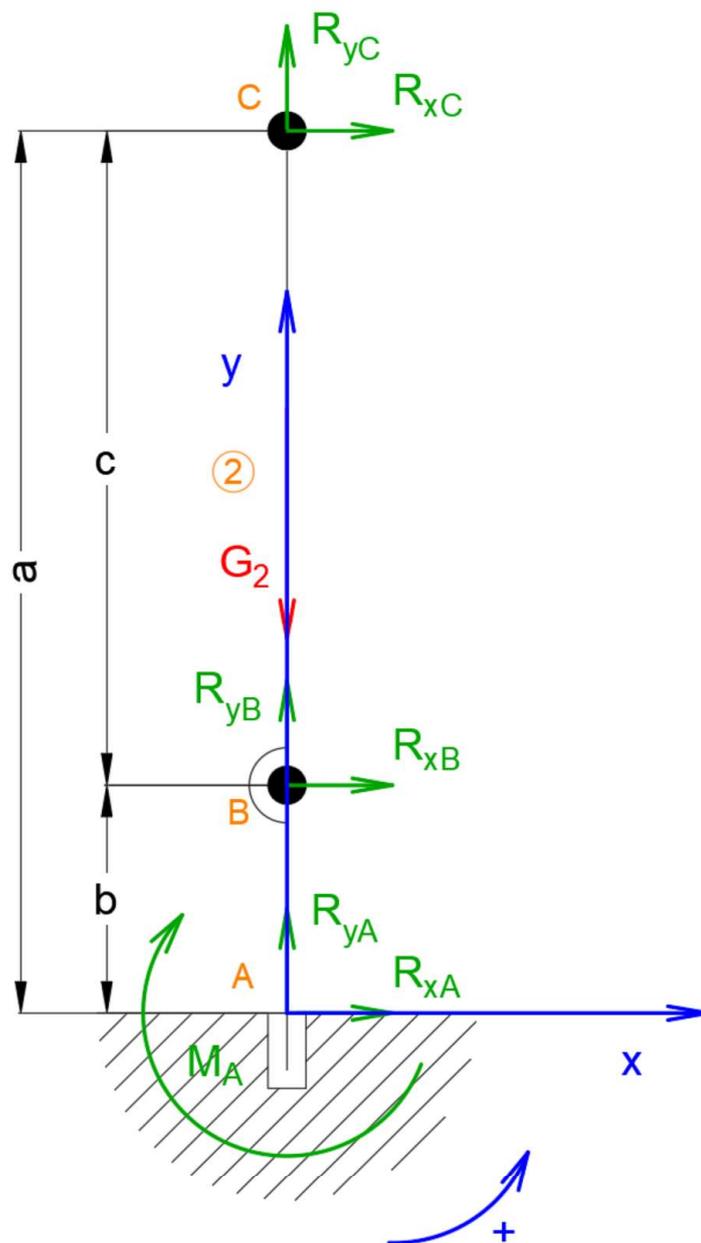
Pro tři členy tedy vzniklo devět rovnic, což koresponduje s devíti složkami reakcí, a řešením této soustavy rovnic lze získat všech devět složek reakcí.



Obrázek 11: Působící akční síly a reakce

Statické řešení bylo provedeno ve vodorovné poloze výložníku, neboť v této poloze vyzvojuje zavěšené břemeno největší moment.

Pro člen 2 platí:



Obrázek 12: Člen 2

Ve směru souřadné osy  $x$ :

$$R_{Ax} + R_{Bx} + R_{Cx} = 0 \quad (8)$$

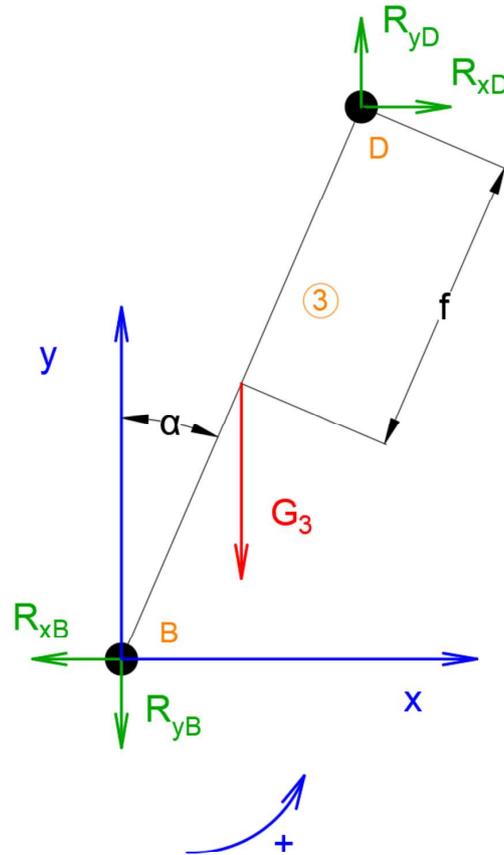
Ve směru souřadné osy  $y$ :

$$R_{Ay} + R_{By} + R_{Cy} - G_2 = 0 \quad (9)$$

K bodu A:

$$-M_A - R_{Bx} \cdot b - R_{Cx} \cdot a = 0 \quad (10)$$

Pro člen 3 platí:



Obrázek 13: Člen 3

Ve směru souřadné osy x:

$$-R_{Bx} + R_{Dx} = 0 \quad (11)$$

Ve směru souřadné osy y:

$$-R_{By} + R_{Dy} - G_3 = 0 \quad (12)$$

K bodu B:

$$\begin{aligned} -G_3 \cdot \left( \sqrt{d^2 + (a-b)^2} - f \right) \cdot \sin \alpha + R_{Dy} \cdot \sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \sin \alpha - \\ -R_{Dx} \cdot \sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \cos \alpha = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

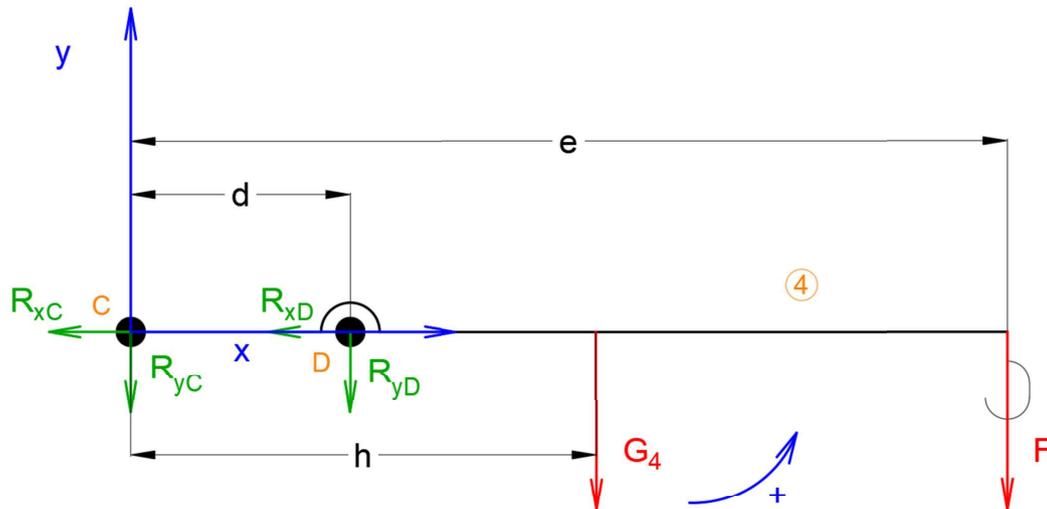
Přičemž platí:

$$\tan \alpha = \frac{d}{a-b} \quad (14)$$

$$\sin \alpha = \frac{d}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2}} \quad (15)$$

$$\cos \alpha = \frac{a-b}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2}} \quad (16)$$

Pro **člen 4** platí:  
Ve směru souřadné osy x:



Obrázek 14: Člen 4

$$-R_{Cx} - R_{Dx} = 0 \quad (17)$$

Ve směru souřadné osy y:

$$-R_{Cy} - R_{Dy} - G_4 - F = 0 \quad (18)$$

K bodu C:

$$-R_{Dy} \cdot d - G_4 \cdot h - F \cdot e = 0 \quad (19)$$

Děvět rovnic a 9 neznámých ( $R_{Ax}, R_{Ay}, M_A, R_{Cx}, R_{Cy}, R_{Bx}, R_{By}, R_{Dx}, R_{Dy}$ )

### Řešení soustavy

Pro účely číselného řešení soustavy byla zanedbána vlastní tíha členů mechanismu, která se v symbolickém řešení objevuje.

Symbolické řešení:

Z (19):

$$R_{Dy} = \frac{1}{d} \cdot (-G_4 \cdot h - F \cdot e) \quad (20)$$

(20) do (18):

$$R_{Cy} = -R_{Dy} - G_4 - F + \frac{1}{d} \cdot (G_4 \cdot h + F \cdot e) - G_4 - F = G_4 \cdot \left(\frac{h}{d} - 1\right) + F \cdot \left(\frac{e}{d} - 1\right) \quad (21)$$

(20) do (12):

$$R_{By} = R_{Dy} - G_3 = \frac{1}{d} \cdot (-G_4 \cdot h - F \cdot e) - G_3 \quad (22)$$

(20) do (13):

$$R_{Dx} = \frac{-G_3 \cdot \left( \sqrt{d^2 + (a-b)^2} - f \right) \cdot \sin \alpha}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \cos \alpha} + \frac{\frac{1}{d} \cdot (-G_4 \cdot h - F \cdot e) \cdot \sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \sin \alpha}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \cos \alpha} \quad (23)$$

(23) do (11):

$$R_{Bx} = R_{Dx} = \frac{-G_3 \cdot \left( \sqrt{d^2 + (a-b)^2} - f \right) \cdot \sin \alpha}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \cos \alpha} + \frac{\frac{1}{d} \cdot (-G_4 \cdot h - F \cdot e) \cdot \sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \sin \alpha}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \cos \alpha} \quad (24)$$

(23) do (17):

$$R_{Cx} = R_{Dx} = -\frac{-G_3 \cdot \left( \sqrt{d^2 + (a-b)^2} - f \right) \cdot \sin \alpha}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \cos \alpha} + \frac{\frac{1}{d} \cdot (-G_4 \cdot h - F \cdot e) \cdot \sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \sin \alpha}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \cos \alpha} \quad (25)$$

(24),(25) do (10):

$$M_A = -R_{Bx} \cdot b - R_{Cx} \cdot a = -R_{Dx} \cdot b + R_{Dx} \cdot a = R_{Dx} \cdot (a - b) = \frac{-G_3 \cdot \left( \sqrt{d^2 + (a-b)^2} - f \right) \cdot \sin \alpha + \frac{1}{d} \cdot (-G_4 \cdot h - F \cdot e) \cdot \sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \sin \alpha}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \cos \alpha} \cdot (a - b) \quad (26)$$

(24),(25) do (8):

$$R_{Ax} = -R_{Bx} - R_{Cx} = -R_{Dx} + R_{Dx} = 0 \quad (27)$$

(12),(11) do (2):

$$R_{Ay} = G_2 - R_{By} - R_{Cy} = G_2 - \frac{1}{d} \cdot (-G_4 \cdot h - F \cdot e) + G_3 - G_4 \cdot \left( \frac{h}{d} - 1 \right) - F \cdot \left( \frac{e}{d} - 1 \right) = G_2 + G_3 + G_4 + F \quad (28)$$

### Číselné řešení:

Vliv vlastní hmotnosti členů byl v číselném řešení zanedbán, jelikož je velmi malý v porovnání s účinky zatížení vyvozenými břemenem. Jediný významnější příspěvek vlastní tíhy se projevuje na členu 4, ten byl zohledněn jako navýšení hmotnosti břemene o 100 kg. Uvedené zjednodušení bylo možné závest zejména proto, že statické zhodnocení bylo použito pro hrubý návrhový výpočet.

Hmotnost břemene byla dále navýšena výše zmíněným koeficientem  $\phi_1$ .

$$m_b = 2100 \cdot \phi_1 = 2100 \cdot 1,1 = 2310 \text{ kg} \quad (29)$$

Břemeno o této hmotnosti vyvozuje následující tíhovou sílu:

$$F = 2310 \cdot g = 2310 \cdot 9,81 = 22661 \text{ N} \quad (30)$$

Geometrické parametry konstrukce:

$$a = 1,4 \text{ m}; b = 0,3 \text{ m}; c = 0,7 \text{ m}; d = 0,3 \text{ m}; e = 1,5 \text{ m}$$

Vyčíslení rovnic (20) až (28):

$$R_{Dy} = \frac{1}{0,3} \cdot (-22661 \cdot 1,5) = -113305 \text{ N} \quad (31)$$

$$R_{Cy} = 22661 \cdot \left( \frac{1,5}{0,3} - 1 \right) = 90644N \quad (32)$$

$$R_{By} = \frac{1}{0,3} \cdot (-22661 \cdot 1,5) = -113305N \quad (33)$$

$$\begin{aligned} R_{Dx} &= \frac{\frac{1}{d} \cdot (-F \cdot e) \cdot \sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \sin \alpha}{\sqrt{d^2 + (a-b)^2} \cdot \cos \alpha} = \frac{-\frac{F \cdot e}{d} \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha} = \\ &= -\frac{F \cdot e}{d} \cdot \tan \alpha = -\frac{22661 \cdot 1,5}{0,3} \cdot \tan 15,25^\circ = -30890N \end{aligned} \quad (34)$$

Z (14) platí:

$$\tan \alpha = \frac{d}{a-b} \Rightarrow \alpha = \arctan \left( \frac{d}{a-b} \right) = \arctan \left( \frac{0,3}{1,4-0,3} \right) = 15,25^\circ \quad (35)$$

$$R_{Bx} = R_{Dx} = -30890N \quad (36)$$

$$R_{Cx} = -R_{Dx} = 30890N \quad (37)$$

$$M_A = R_{Dx} \cdot (a-b) = -30890 \cdot (1,4-0,3) = -33979N \quad (38)$$

$$R_{Ax} = 0 \quad (39)$$

$$R_{Ay} = F = 22661N \quad (40)$$

Ze složek reakcí byla určena absolutní velikost reakcí:

$$R_A = \sqrt{R_{Ax}^2 + R_{Ay}^2} = \sqrt{0 + 22661^2} = 22661N \quad (41)$$

$$R_B = \sqrt{R_{Bx}^2 + R_{By}^2} = \sqrt{-30890^2 + (-113305)^2} = 117440N \quad (42)$$

$$R_C = \sqrt{R_{Cx}^2 + R_{Cy}^2} = \sqrt{30890^2 + 90644^2} = 95763N \quad (43)$$

$$R_D = \sqrt{R_{Dx}^2 + R_{Dy}^2} = \sqrt{-30890^2 + (-113305)^2} = 117440N \quad (44)$$

Reakce	Jednotka	Hodnota
$R_A$	[N]	22661
$R_B$	[N]	117440
$R_C$	[N]	95763
$R_D$	[N]	117440
$M_A$	[Nm]	-33979

Tabulka 3: Shrnutí reakčních silových účinků

Vyšetření reakčních silových účinků posloužilo k návrhu průřezových charakteristik jednotlivých nosníků, dimenzi spojů i hydraulických prvků.

## 5.4 Návrh průřezových charakteristik

Návrh průřezových charakteristik vychází z průběhu ohybového momentu podél sloupu a výložníku.

### 5.4.1 Průběh ohybového momentu

Ohybový moment na **členu 2** byl vyšetřován ve směru souřadnice  $y$  (označené v obr. 13).

$$y \in (0; a = 1,4m)$$

#### V intervalu I

$$y \in (0; c = 1,1m):$$

$$M_{2I}(0) = 0$$

$$M_{2I}(1,1) = R_{Cx} \cdot c = 30890 \cdot 1,1 = 33979Nm$$

#### V intervalu II

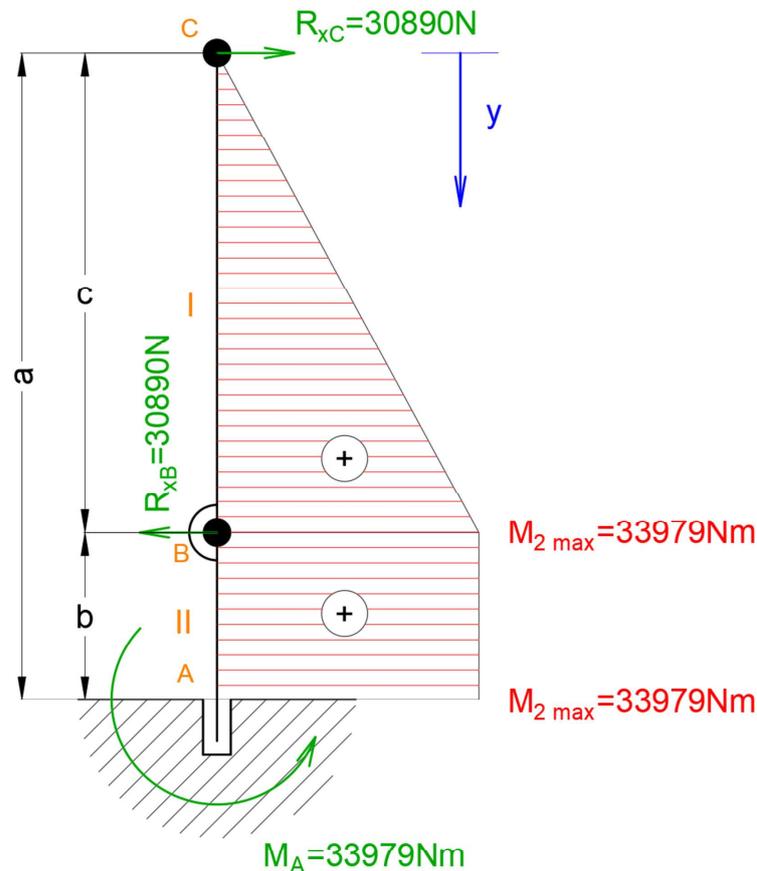
$$y \in (c = 1,1m; a = 1,4m):$$

$$M_{2II}(1,1) = R_{Cx} \cdot c = 30890 \cdot 1,1 = 33979Nm$$

$$M_{2II}(1,4) = R_{Cx} \cdot (c + b) - R_{Bx} \cdot b = 30890 \cdot (1,1 + 0,3) - 30890 \cdot 0,3 = 33979Nm$$

$$M_{2\max} = 33979Nm$$

Průběh je graficky reprezentován velikostí tzv. momentových ploch na obr.15.



Obrázek 15: Průběh ohybového momentu - sloup / člen 2

Z obrázku průběhu ohybového momentu č.13 plyne, dle očekávání, že maximální hodnoty nabývá v bodě vetknutí (v bodě A) a má hodnotu 33 979 Nm.

Ohybový moment na **členu 4** byl vyšetřován ve směru souřadnice x (označené v obr. 14).

$$x \in (0; e = 1,5m)$$

#### V intervalu I

$$x \in (0; d = 0,3m):$$

$$M_{4I}(0) = 0$$

$$M_{4I}(0,3) = R_{Cy} \cdot d = 90644 \cdot 0,3 = 27193,2Nm$$

#### V intervalu II

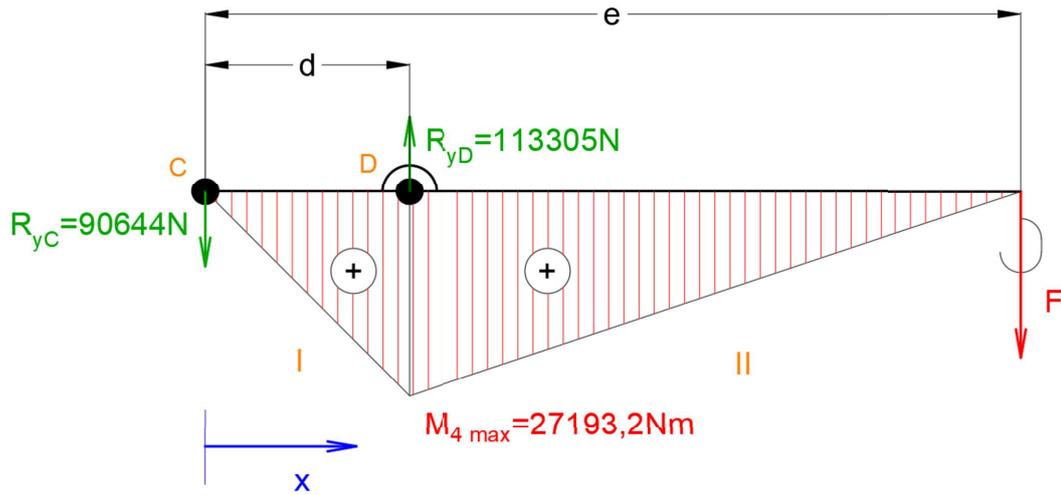
$$x \in (d = 0,3m; e = 1,5m):$$

$$M_{4II}(0,3) = R_{Cy} \cdot d = 90644 \cdot 0,3 = 27193,2Nm$$

$$M_{4II}(1,5) = R_{Cy} \cdot e - R_{Bx} \cdot (e - d) = 90644 \cdot 1,5 - 113305 \cdot (1,5 - 0,3) = 0Nm$$

$$M_{4max} = 27193,2Nm$$

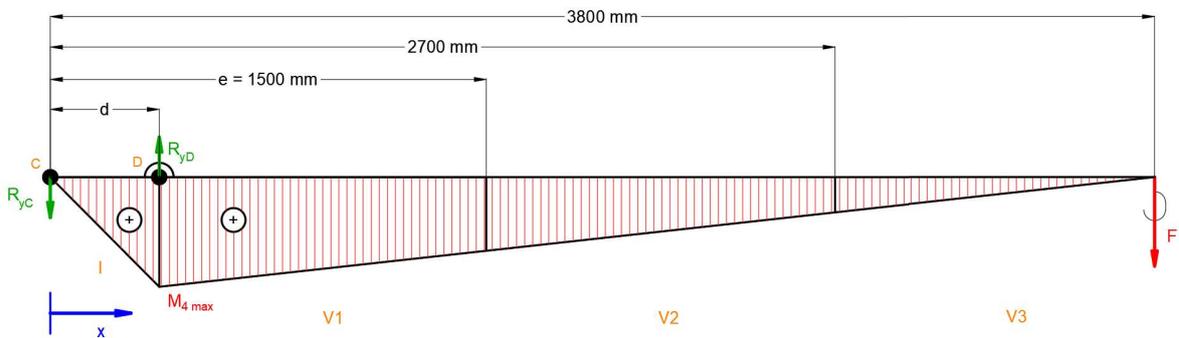
Jak je patrné z obrázku č.14, který zachycuje průběh ohybového momentu podél výložníku, je maximální ohybový moment v bodě D. Nabývá hodnoty 27 193,2 Nm.



Obrázek 16: Průběh ohybového momentu - výložník / člen 4

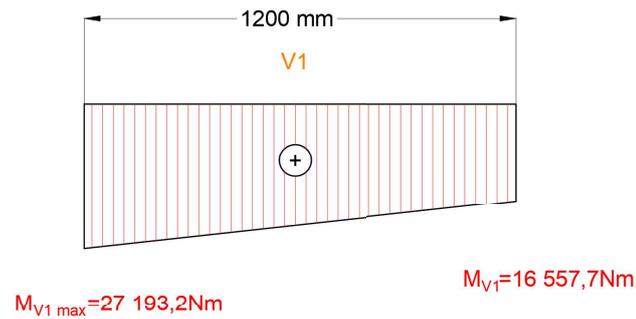
#### 5.4.2 Teleskopický výložník

Průběh ohybového momentu podél teleskopického nosníku výložníku má takový průběh, aby se při vysunutí nezměnily vyvozované reakční účinky. Konstantních reakčních účinků se dosahuje poklesem maximální hmotnosti zdvihaného břemene se zvětšujícím se vyložněním.

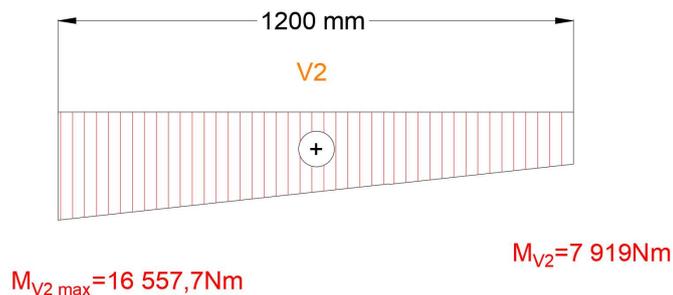


Obrázek 17: Průběh ohybového momentu - teleskopický výložník

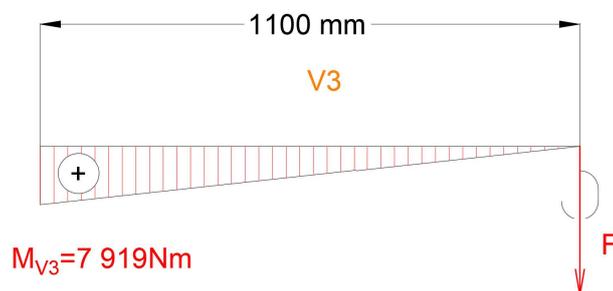
Jenotlivé části teleskopického výložníku jsou namáhy momentem následujícího průběhu:



Obrázek 18: Průběh ohybového momentu - část teleskopického výložníku V3



Obrázek 19: Průběh ohybového momentu - část teleskopického výložníku V2



Obrázek 20: Průběh ohybového momentu - část teleskopického výložníku V1

### 5.4.3 Návrh průřezu a skladba návinu

Z technologického hlediska je výhodné zvolit průřez konstantní podél sloupu i výložníku. Pro výložník je konstantní průřez důležitý i proto, že bude obsahovat prvky teleskopického (výsuvného) mechanismu.

Z geometrického hlediska je rozumné vycházet z rozměrů výložníku a sloupu jeřábu PC2700 diskutovaného v rešeršní části.

Pro určení složení laminátu (v případě navíjených výrobků nazývaného návin) byl použit interní software zadavatele práce, firmy CompoTech, využívající klasickou lamináčnickou teorii. Postup práce ve zmíněném softwaru ani jeho podobu nelze zveřejnit. Jedná se jedná o analytické hrubé návrhové řešení, které nezahrnuje přítomnost spojovacích bodů. Získané řešení bylo třeba dále ověřit a upřesnit pomocí konečnoprvkové analýzy.

Software slouží primárně k návrhu kruhových trubek, je však velmi dobře použitelný i ke stanovení skladby nosníků různého průřezu. Podle praktických zkušeností zadavatele se osvědčilo, že při dodržení stejného obvodu lze aproximovat různě členitý tvar na kružnici.

Skladba kompozitního nosníku je vždy kompromisem mezi požadavky konstruktéra, technologa výroby kompozitních materiálů a programátora navíjecího stroje.

#### 5.4.4 Návrh sloupu

Dle návrhových výpočtů viz kapitola 5.4.1 a vzhledem k rozměrům připojovací příruby byl jako výchozí rozměr pro sloup zvolen čtvercový profil o hraně 125 mm.

Skladba navržená pro sloup je uvedena v následující tabulce 4. Při vláknovém navíjení jsou vrstvy číslovány od vnitřní stěny k vnější, což plyne z pořadí kladení vláken na navíjecí trn.

ID vrstvy	Materiál	Tloušťka [mm]	Úhel [°]	Vlákno
1	HS Uhlík	0.53	42	Tenax STS40F13 24K
2	HS Uhlík	0.25	90	Tenax STS40F13 24K
3	HS Uhlík	1.61	0	Tenax STS40F13 24K
4	HS Uhlík	0.6	42	Tenax STS40F13 24K
5	HS Uhlík	1.57	0	Tenax STS40F13 24K
6	HS Uhlík	0.6	43	Tenax STS40F13 24K
7	HS Uhlík	1.98	0	Tenax STS40F13 24K
8	HS Uhlík	0.59	44	Tenax STS40F13 24K

Tabulka 4: Skladba vrstev sloupu navržená analyticky

Jak bylo uvedeno v kapitole Použitý materiál, vlákna rozdílné orientace mají rozdílné úlohy ve skladbě a teprve společně tvoří výsledný kompozit. Dále je třeba respektovat určitá empiricky zjištěná pravidla o skladbě, například je rozumné aby vrstva podélných vláken (orientace 0° nepřesahovala 2 mm.

#### 5.4.5 Návrh výložníku

Obdobně jako sloup byl i výložník navržen nejprve analyticky pomocí interního softwaru zadavatele práce. Výložník je řešen jako teleskopický systém osmiúhelníkových nosníků zasunutých do sebe. Kluzná dvojice mezi částmi výložníku byla po zkušenostech z předchozích podobných produktů navržena jako plechový a polymerní pás, které po sobě vzájemně kloužou. Použitý kluzný polymer nese obchodní označení ZX-100K. Kluzné dvojice byly vytvořeny v horních, spodních a rohových plochách dotyku osmiúhelníků. Polymerní pásy i plechové protikusy byly navrženy s nominální tloušťkou 2 mm. Plechové pásy je možné využít i k případné úpravě provozní vůle, neboť je možné upravit jejich tloušťku broušením. Zároveň při snížení plechových pásů nedojde ke změně vlastností kluzné dvojice, neboť je plech lepen k výrazně tužšímu (kompozitnímu) podkladu.

Návrh lepeného spoje počítá s užitím dvojsložkového lepidla Spabond 345. Pevnost

lepeného spoje byla ověřena pomocí konečnoprvkové simulace - viz dále.

Z technologických a výrobních důvodů je rozumné uvažovat ideálně totožnou skladbu pro co možná největší množství profilů. Avšak navzdory těmto požadavkům je nutné aby profily plnily nároky na pevnost a tuhost. Často tedy dochází ke kompromisním řešením, kdy se opakuje určitá sekvence z návinu. Touto cestou lze zkrátit čas přípravy programů pro navíjecí stroje a zároveň upravit počet vrstev dle požadavků. V tomto analytickém kroku byla tedy stanovena skladba totožná se skladbou sloupu - viz tabulka 5.

ID vrstvy	Materiál	Tloušťka [mm]	Úhel [°]	Vlákno
1	HS Uhlík	0.53	42	Tenax STS40F13 24K
2	HS Uhlík	0.25	90	Tenax STS40F13 24K
3	HS Uhlík	1.61	0	Tenax STS40F13 24K
4	HS Uhlík	0.6	42	Tenax STS40F13 24K
5	HS Uhlík	1.57	0	Tenax STS40F13 24K
6	HS Uhlík	0.6	43	Tenax STS40F13 24K
7	HS Uhlík	1.98	0	Tenax STS40F13 24K
8	HS Uhlík	0.59	44	Tenax STS40F13 24K

Tabulka 5: Skladba vrstev výložníku navržená analyticky

Řez základním profilem výložníku je znázorněn na obr. 21, kde:

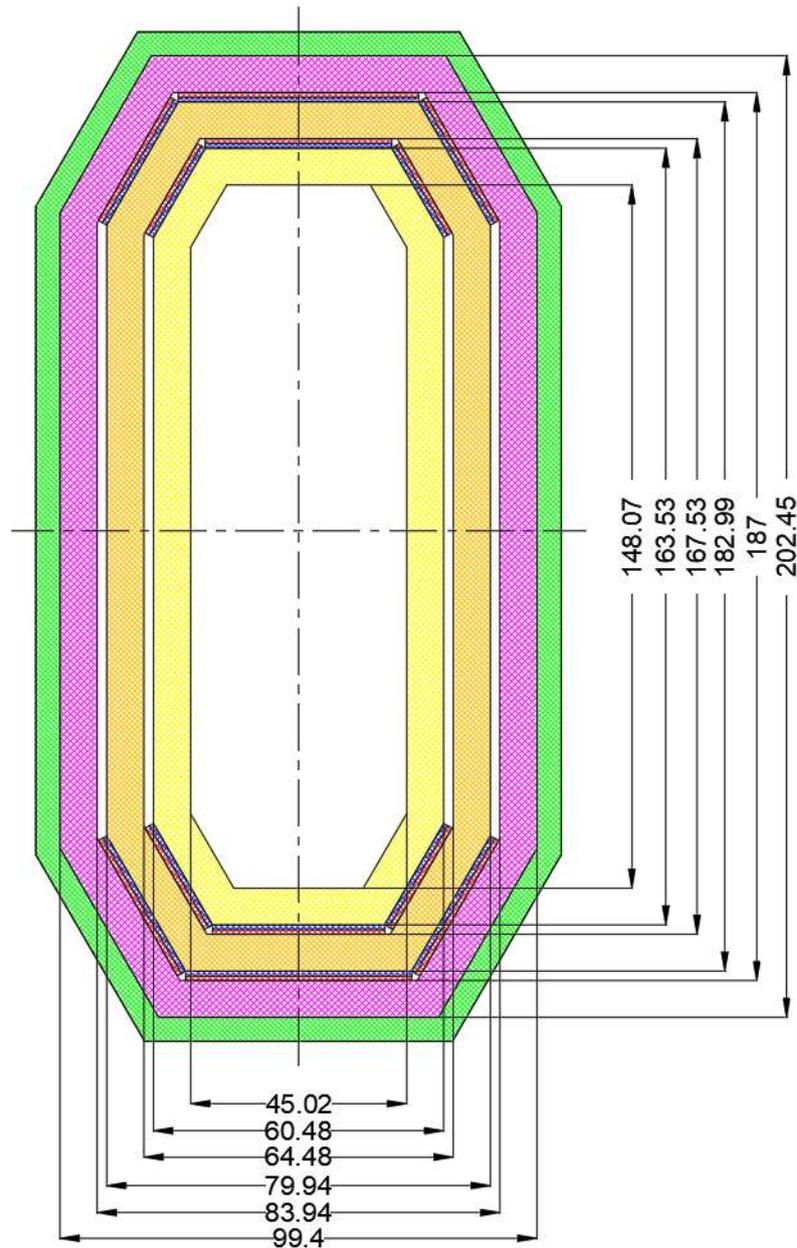
- zeleně - výztuha výložníku
- fialově - základní díl výložníku (1. sekce)
- oranžově - 2. sekce výložníku
- žlutě - 3. sekce výložníku
- modře - kluzná dvojice - plech
- červeně - kluzná dvojice - plast

## 5.5 Návrh integrálních spojů

Obecně je dimenzování integrálních spojů, tedy navíjených ok, problematické. Pro hrubý návrh navíjených ok bylo nutné analyticky vyřešit velikost přenášené síly. Následně byla pevnost ok ověřena pomocí MKP.

### 5.5.1 Bod A

Jak bylo uvedeno výše, připojení v místě A bylo navrženo s užitím prvku podobného přírubě - ocelové trubky přivínuté vrstvou vláken s orientací 90° vůči ose profilu. Dimenzování takového spoje analyticky není proveditelné tak, aby se při zavedení rozumných zjednodušení dosáhlo relevantních výsledků. Z tohoto důvodu byl uhlíkový ovin navržen na základě zkušeností v tloušťce 3 mm s tím, že napětí bude pouze zkontrolováno



Obrázek 21: Schematický řez výložníkem

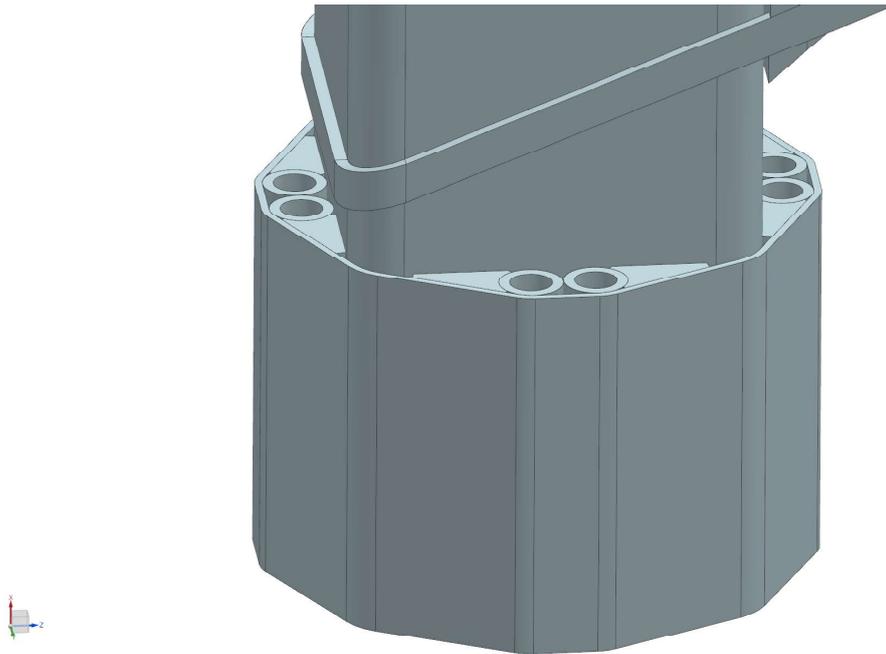
pomocí napěťové analýzy MKP.

V bodě A je nutné zachytit reakční moment o velikosti 33 979 Nm a tlakovou reakční sílu o velikosti 22 661 Nm.

Připojovací šrouby byly zkontrolovány analyticky - viz kapitola Kontrolní výpočet připojovacích šroubů.

### 5.5.2 Bod B

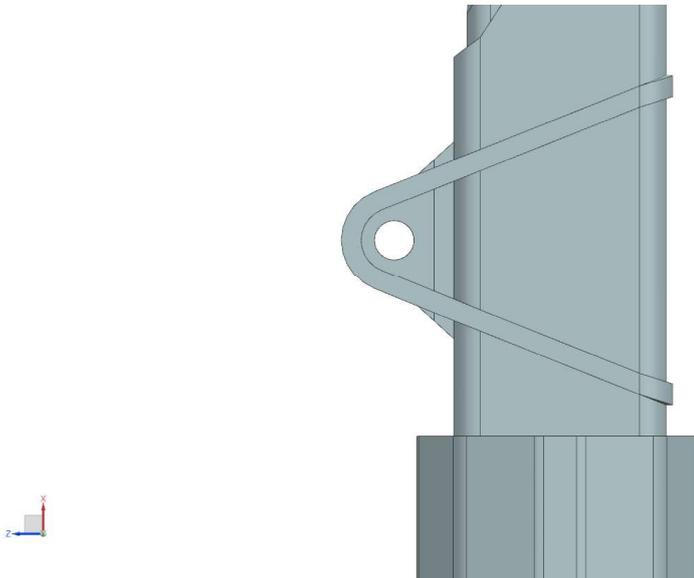
V bodě B bylo třeba vytvořit připojovací bod pro připojení jedné strany lineárního hydromotoru sloužícího ke zdvihání výložníku. Z velikosti reakční síly v lineárním hydromotoru plyne dimenze připojovacího čepu.



Obrázek 22: Přivinutá příruba

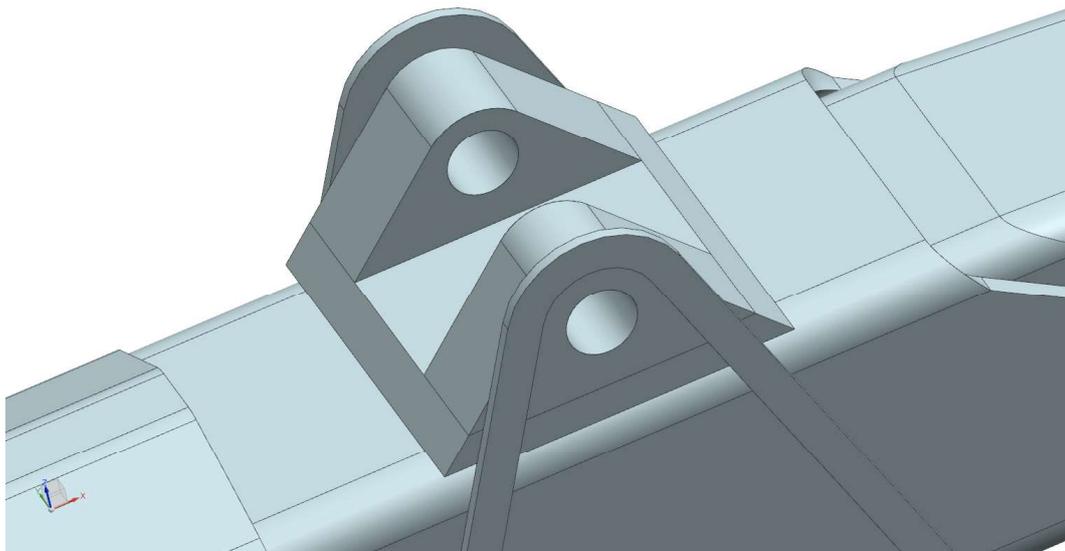
Při návrhu tohoto oka bylo nutné vzít v potaz fakt, že kompozitní materiály obecně nejsou vhodné třecí materiály a nehodí se tedy ke konstrukci ložisek. Dále není možné nanášet na jejich povrch mazivo bez dlouhodobé degradace matrice. Z tohoto důvodu byla navržena ocelová vložka.

Kloub v bodě B přenáší reakční sílu o velikosti 117 440 N.



Obrázek 23: Zavinuté oko v bodě B

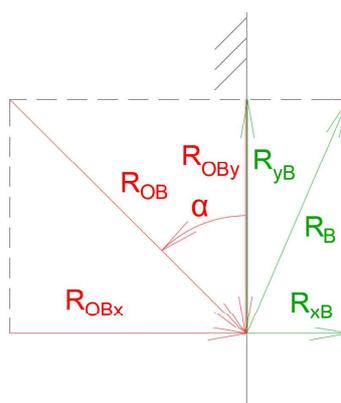
Návrh oka byl proveden podle jednoduchého principu, kdy je přenášená akční síla rozložena do směru vláken navíjeného oka a ze známé meze pevnosti vláken v tahu lze



Obrázek 24: Zavinuté oko v bodě B

určit potřebný průřez.

Schematicky jsou působící síly znázorněny na následujícím obr.25.



Obrázek 25: Síly působící v bodě B

Platí tedy silová rovnováha:

$$\sum_{i=1}^n F_x = 0 \Rightarrow R_{OBx} - R_{Bx} = 0 \quad (45)$$

$$\sum_{i=1}^n F_y = 0 \Rightarrow R_{OBy} - R_{By} = 0 \quad (46)$$

Z toho plyne:

$$R_{OBx} + R_{Bx} = 0 \Rightarrow R_{OBx} = -R_{Bx} = 30890 [N] \quad (47)$$

$$-R_{OBy} + R_{By} = 0 \Rightarrow R_{OBy} = R_{By} = -113305 [N] \quad (48)$$

Ze složky lze pomocí změřeného úhlu dopočítat absolutní velikost síly:

$$\cos \alpha = \frac{R_{OBy}}{R_{OB}} \Rightarrow R_{OB} = \frac{R_{OBy}}{\cos \alpha} = \frac{113305}{\cos 45^\circ} = 160237 [N] \quad (49)$$

Z měření zadavatele práce plyne, že meze napětí pro ovin zhotovený z HS uhlíkových vláken dosahují hodnot 1200 MPa v tahu a 300 MPa v tlaku. Přičemž hodnota meze pevnosti v tlaku je dána ztrátou stability spíše než porušením v tlaku.

Dimenzování je tedy založeno na určení minimálního průřezu, který přenese výše určenou sílu. Pro dimenzování bylo použito dovolené napětí, které je oproti mezi pevnosti poníženo o hodnotu bezpečnosti na  $\sigma_D = 960 MPa$ .

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{R_{OB}}{S} \leq \sigma_D \Rightarrow S \geq \frac{F}{\sigma_D} = \frac{160237}{960} = 166,9 [mm^2] \quad (50)$$

### 5.5.3 Bod C

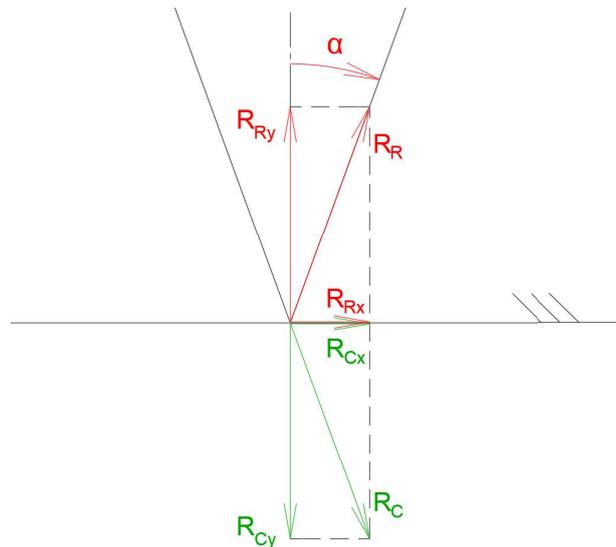
Pro spojení sloupu a výložníku byla navržena dvojice ok, které do sebe vzájemně zapadají a tvoří kloubové spojení. Kloubové spojení tedy tvoří:

**Oko ve sloupu** Oko ve sloupu přenáší reakci  $R_C = 95763N$ . Po zavedení zjednodušení předpokládajícího že sílu přenáší pouze jedna strana oka platí:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{R_C}{S} \leq \sigma_D \Rightarrow S \geq \frac{F}{\sigma_D} = \frac{95763}{960} = 99,75 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (51)$$

**Oko ve výložníku** Bylo vytvořeno jako vidlice, do které zapadá oko na sloupu. Z konstrukčního hlediska byla ocelová výztuha oka v bodech C a D propojena. Propojení těchto dvou ok bylo nutné z hlediska dodržení rovnoběžnosti os jejich čepů. Toto propojení samozřejmě přináší zvýšení hmotnosti o materiál spojení, nicméně je nezbytné.

Z hlediska návrhu šlo o oko obdobné jako v bodě B. Působící síly zobrazuje následující obr.26.



Obrázek 26: Síly působící v bodě C

Platí tedy silová rovnováha:

$$\sum_{i=1}^n F_x = 0 \Rightarrow R_{Cx} + R_{Rx} = 0 \quad (52)$$

$$\sum_{i=1}^n F_y = 0 \Rightarrow R_{Ry} - R_{Cy} = 0 \quad (53)$$

Z toho plyne:

$$R_{Cx} + R_{Rx} = 0 \Rightarrow R_{Cx} = -R_{Rx} = 30890 \text{ [N]} \quad (54)$$

$$R_{Ry} - R_{Cy} = 0 \Rightarrow R_{Ry} = R_{Cy} = 90644 [N] \quad (55)$$

Ze složky lze pomocí změřeného úhlu dopočítat absolutní velikost síly:

$$\cos \alpha = \frac{R_{Ry}}{R_R} \Rightarrow R_R = \frac{R_{Ry}}{\cos \alpha} = \frac{90644}{\cos 20^\circ} = 96461 [N] \quad (56)$$

A ze známé síly potřebný minimální průřez:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{R_R}{S} \leq \sigma_D \Rightarrow S \geq \frac{F}{\sigma_D} = \frac{96461}{960} = 100 [mm^2] \quad (57)$$

#### 5.5.4 Bod D

Spoj v bodě D nepřenáší za provozního stavu tahové síly, ale pouze síly tlakové, z oka na nosník. Návin oka tedy nepřenáší žádné provozní zatížení a jeho úlohou je zejména zajišťovat polohu ocelové výztuhy.

Oko bylo propojeno s okem v bodě C z důvodů popsaných výše.

### 5.6 Kontrolní výpočty čepů

Sloup jeřábu a hlavní díl výložníku byly vzájemně provázány lineárním hydromotorem, jehož úlohou je zdvih výložníku do požadované pozice. Hydromotor byl ke kompozitní konstrukci připojen pomocí ocelového mezičlánu, neboť kompozitní materiál obecně špatně odolává namáhání kontaktním tlakem. Kromě komplexní napěťové analýzy provedené metodou konečných prvků, která bude popsána ve vyhrazené kapitole, byla provedena kontrola čepů analytickým přístupem. Vzhledem k velmi nízkým, téměř nulovým úhlovým rychlostem otáčení v čepích lze jejich provoz popsat jako kvazistatický a není třeba provádět kontrolu na oteplení.

Kontrola byla provedena v čepích patřících bodům B, C a D.

Čepy byly vytvořeny formou jednoduchých valivých ložisek, jejichž čepy jsou namáhány kontaktním tlakem (otlačením) a na smyk.

#### 5.6.1 Kontrola čepů na otláčení

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{d_{cepu} \cdot l_{cepu}} \leq p_D \quad (58)$$

kde:

- S - průmět stykové plochy do roviny kolmé ke směru působení zatěžující síly
- F - zatěžující síla
- $p_{dov}$  - dovolený tlak ve stykových plochách - 90 MPa

Čep B:

$$p_B = \frac{F}{S_B} = \frac{R_B}{d_B \cdot l_{cepu}} = \frac{22661}{30 \cdot 50} = 15,1 [MPa] \quad (59)$$

$$p_B \leq p_{dov} \quad (60)$$

$$15,1 \leq 90 \Rightarrow VYHOVUJE \quad (61)$$

Čep C:

$$p_C = \frac{F}{S_C} = \frac{R_C}{d_C \cdot l_{cepu}} = \frac{95763}{30 \cdot 50} = 63,8 [MPa] \quad (62)$$

$$p_C \leq p_{dov} \quad (63)$$

$$63,8 \leq 90 \Rightarrow VYHOVUJE \quad (64)$$

Čep D:

$$p_D = \frac{F}{S_D} = \frac{R_D}{d_D \cdot l_{cepu}} = \frac{117440}{30 \cdot 50} = 78,3 [MPa] \quad (65)$$

$$p_D \leq p_{dov} \quad (66)$$

$$78,3 \leq 90 \Rightarrow VYHOVUJE \quad (67)$$

### 5.6.2 Kontrola čepů na smyk

$$\tau_s = \frac{F}{S} \leq \tau_{Ds} \quad (68)$$

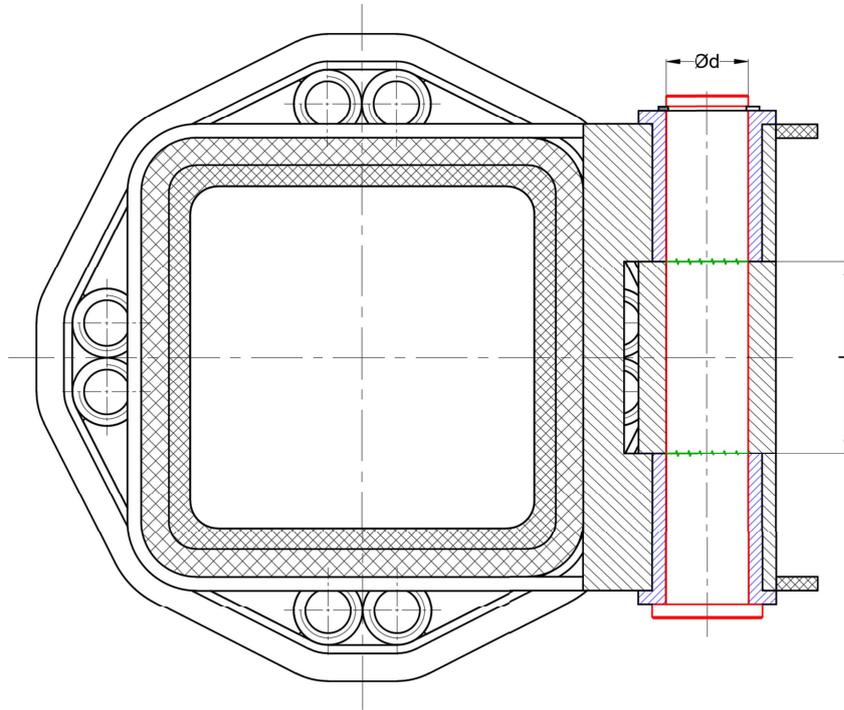
kde:

- S - průřez namáhaný smykem
- F - zatěžující síla
- $\tau_{Ds}$  - dovolený napětí ve smyku

Pro čepy byl zvolen materiál s označením 11 700, pro který platí:  $\tau_{Ds} = 125 [MPa]$ . Uvedené dovolené napětí ve smyku platí pro případ míjivého zatížení, které odpovídá zatěžování čepů.

**Čep B:**

Rozměry čepu jsou označeny na následujícím obr. 27. Samotný čep je označen červeně, plochy namáhané na smyk jsou označeny zeleně.



Obrázek 27: Dispozice čepu v bodě B

$$\tau_{sB} = \frac{R_B}{S_B} = \frac{R_B}{\frac{\pi \cdot d_B^2}{4}} = \frac{117440}{\frac{\pi \cdot 30^2}{4}} = 83,1 \text{ [MPa]} \quad (69)$$

$$\tau_{sB} \leq \tau_{Ds} \quad (70)$$

$$83,1 \leq 125 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (71)$$

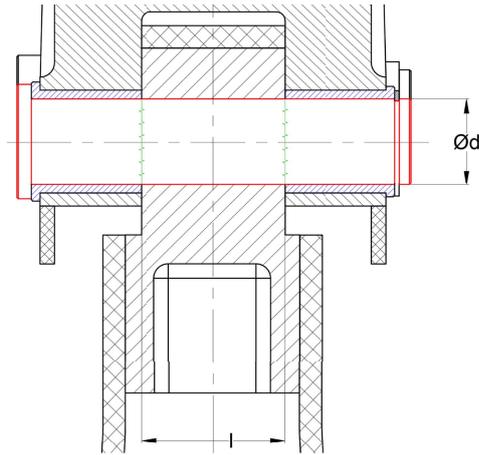
**Čep C:**

Rozměry čepu jsou označeny na následujícím obr. 28. Samotný čep je označen červeně, plochy namáhané na smyk jsou označeny zeleně.

$$\tau_{sC} = \frac{R_C}{S_C} = \frac{R_C}{\frac{\pi \cdot d_C^2}{4}} = \frac{22661}{\frac{\pi \cdot 30^2}{4}} = 16 \text{ [MPa]} \quad (72)$$

$$\tau_{sC} \leq \tau_{Ds} \quad (73)$$

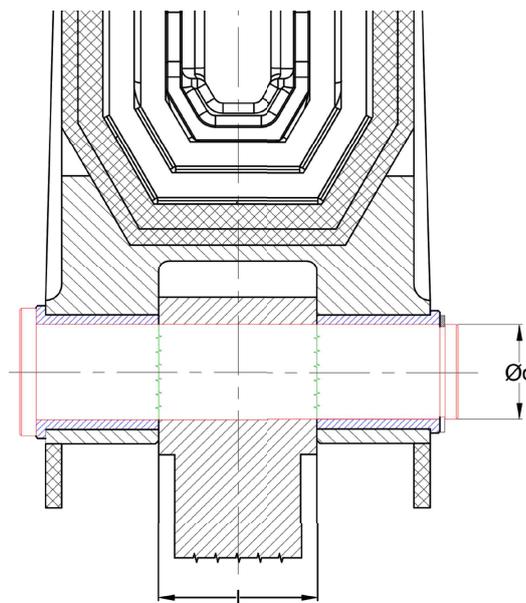
$$16 \leq 125 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (74)$$



Obrázek 28: Dispozice čepu v bodě C

**Čep D:**

Rozměry čepu jsou označeny na následujícím obr. 29. Samotný čep je označen červeně, plochy namáhané na smyk jsou označeny zeleně.



Obrázek 29: Dispozice čepu v bodě D

$$\tau_{sD} = \frac{R_D}{S_D} = \frac{R_D}{\frac{\pi \cdot d_D^2}{4}} = \frac{117440}{\frac{\pi \cdot 30^2}{4}} = 83,1 [MPa] \quad (75)$$

$$\tau_{sD} \leq \tau_{Ds} \quad (76)$$

$$83,1 \leq 125 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (77)$$

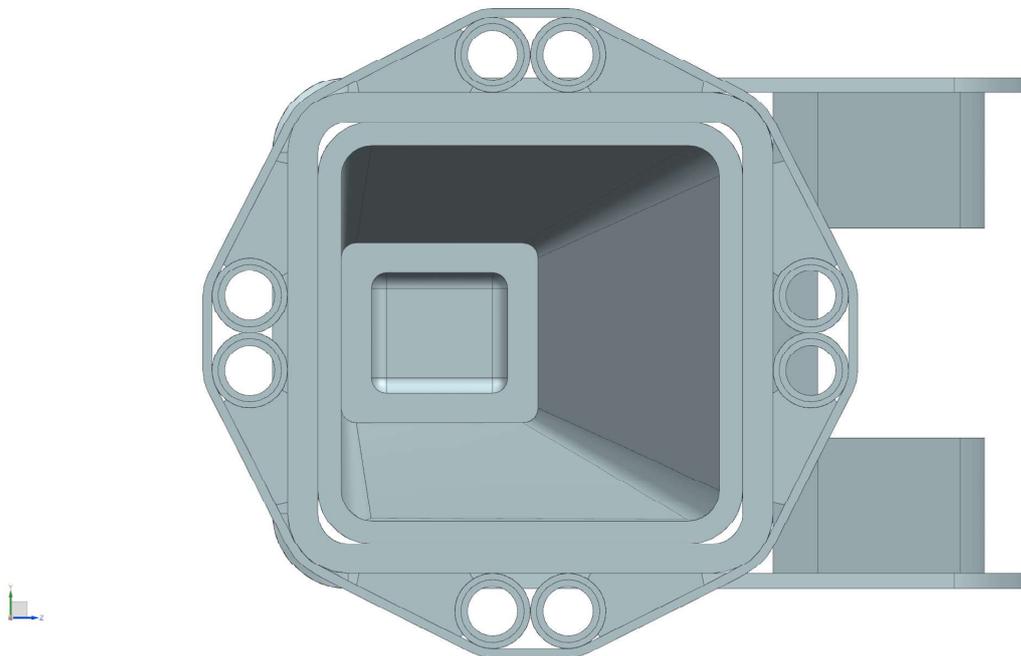
Všechny čepy jsou dle analytického výpočtu vyhovující.

## 5.7 Kontrolní výpočet přípojovacích šroubů

Připojení sloupu jeřábu k nosnému vozidlu bylo navrženo pomocí otočné základny. Základna slouží zároveň jako rotační hydraulický motor a řídí otočný pohyb sloupu, potažmo celého jeřábu.

Návrh jejího konkrétního technického řešení je nad rámec této diplomové práce, nicméně bylo třeba vyřešit připojení k základně.

Připojení bylo provedeno pomocí řešení ověřeného a používaného zadavatelem práce. Základním principem je přivnutí sady ocelových trubek k povrchu základního kompozitového nosníku. V této konkrétní aplikaci byla použita sada osmi šroubů rozměru M20 s normálním stoupáním 2,5 mm. Délka přípojovacích šroubů je závislá na konstrukci konkrétní otočné základny.



Obrázek 30: Přívinitá příruba

Příruba přenáší do otočné základny zejména ohybový moment  $M_A$  o velikosti 33979  $[N \cdot m]$ . Pro dimenzování šroubů bylo uchycení příruby zjednodušeno na dvojici šroubů namáhanou tahovou silou vyvozovanou ohybovým momentem  $M_A$ . Vznik tahové síly je zobrazen na obr.31.

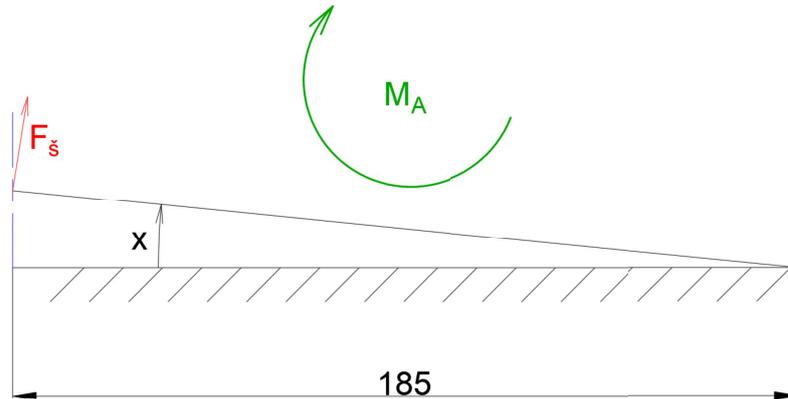
Červeně - osová síla ve šroubu, zeleně - ohybový moment, modře - osy přípojovacích šroubů

$$M = F \cdot R \Rightarrow F = \frac{M}{R} = \frac{33979}{0,185} = 183620 [N] \quad (78)$$

Kontrola šroubu na tah:

$$\sigma = \frac{F_s}{S} = \frac{F_s}{\frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \cdot i} = \frac{183620}{\frac{\pi \cdot 16,933^2}{4} \cdot 2} = 408 [MPa] \quad (79)$$

kde:



Obrázek 31: Schéma zatížení přípojovací příruby.

- S - průřez namáhaný tahem
- $F_s$  - zatěžující síla - osová síla ve šroubu
- $\tau_{Ds}$  - dovolené napětí ve smyku

Jako materiál šroubu byl zvolen materiál s označením 12.9., kterému odpovídá smluvní mez kluzu  $R_{p0,2} = 1080 \text{ MPa}$ .

$$\sigma \leq R_{p0,2} \quad (80)$$

$$408 \leq 1080 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (81)$$

Tlak ve stykových plochách - otláčení:

$$p = \frac{F_s}{S} = \frac{F_s}{\frac{\pi \cdot (d^2 - d_1^2)}{4} \cdot i \cdot i_z} = \frac{F_s}{\frac{\pi \cdot (20^2 - 17,294^2)}{4} \cdot 2 \cdot 20} = 57,9 \text{ [MPa]} \quad (82)$$

$$i_z = \frac{L}{P} = \frac{50}{2,5} = 20 \quad (83)$$

$$p \leq p_{dov} \quad (84)$$

$$57,9 \leq 90 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (85)$$

kde:

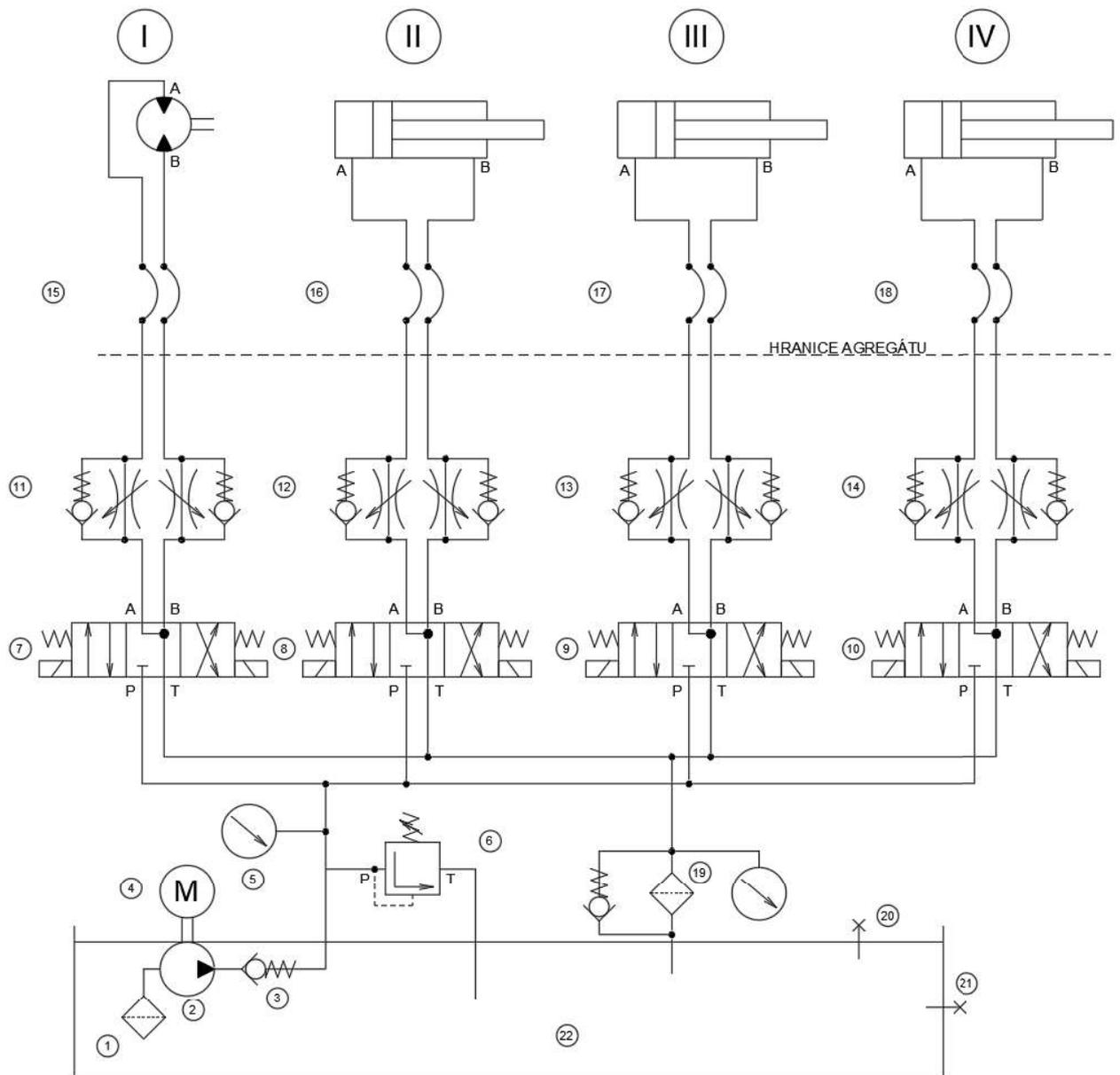
- S - průmět stykové plochy do roviny kolmé ke směru působení zatěžující síly
- $F_s$  - zatěžující síla - osová síla ve šroubu
- $p_{dov}$  - dovolený tlak ve stykových plochách - 90 MPa
- i - počet namáhaných průřezů
- $i_z$  - počet činných závitů

- L - délka závitu
- P - stoupání závitu

## 5.8 Hydraulická soustava

Pro pohon jeřábu je uvažována hydraulická soustava. Konstrukční návrh hydraulických válců není předmětem této diplomové práce, proto zde nebude detailně řešen. Nicméně podoba soustavy je důležitým východiskem pro konstrukci přípojovacích rozměrů hydraulických prvků (zejména hydromotorů).

V rámci diplomové práce tedy byla navržena její hrubá podoba, které zachycuje následující schéma - viz obr.32:



Obrázek 32: Hydraulická soustava

Navržená hydraulická soustava se skládá z následujících prvků:

- 1 - **Plnopřůtočný filtr** Filtruje hydraulický olej nasávaný do systému.
- 2 - **Neregulační jednosměrný generátor** Dodává tlakový olej do systému.
- 3 - **Jednosměrný ventil** Zabraňuje zpětnému toku oleje do generátoru.
- 4 - **Elektromotor** Mění elektrickou energii na tlakovou pohonem generátoru.
- 5 - **Manometr** Slouží k měření tlaku v soustavě.
- 6 - **Pojistný ventil** Zabraňuje překročení nastaveného tlaku v hydraulické soustavě.
- 7 - **4/2 Rozváděč ovládaný elektromagnetem a pružinou** Rozvádí tlakový olej k rotačnímu hydromotoru I.
- 8 - **4/2 Rozváděč ovládaný elektromagnetem a pružinou** Rozvádí tlakový olej k přímočarému hydromotoru II.
- 9 - **4/2 Rozváděč ovládaný elektromagnetem a pružinou** Rozvádí tlakový olej k přímočarému hydromotoru III.
- 10 - **4/2 Rozváděč ovládaný elektromagnetem a pružinou** Rozvádí tlakový olej k přímočarému hydromotoru IV.
- 11 - **Škrtící ventil se zpětným ventilem** Řídí rychlost proudění tlakového oleje k hydromotoru I.
- 12 - **Škrtící ventil se zpětným ventilem** Řídí rychlost proudění tlakového oleje k hydromotoru II.
- 13 - **Škrtící ventil se zpětným ventilem** Řídí rychlost proudění tlakového oleje k hydromotoru III.
- 14 - **Škrtící ventil se zpětným ventilem** Řídí rychlost proudění tlakového oleje k hydromotoru IV.
- 15 - 19 - **Hadice** Přivádí tlakový olej k hydromotorům.
- 19 - **Plnopřůtočný filtr** Filtruje hydraulický olej odváděný ze systému.
- 20 - **Připojovací šroubení** Slouží k plnění zásobníku hydraulickým olejem.
- 21 - **Připojovací šroubení** Slouží k vypuštění zásobníku hydraulického oleje.
- 22 - **Nádrž** Slouží ke skladování a chlazení hydraulického oleje.
- I - **Rotační hydromotor** Obousměrný rotační hydromotor, slouží k otáčení točny jeřábu.
- II - **Přímočarý hydromotor** Dvojčinný přímočarý hydromotor s jednostrannou pístnicí, sloužící ke zdvihu výložníku.

**III - Přímočarý hydromotor** Dvojitý přímočarý hydromotor s jednostrannou pístnicí, sloužící k vysouvání výložníku.

**IV - Přímočarý hydromotor** Dvojitý přímočarý hydromotor s jednostrannou pístnicí, sloužící k vysouvání výložníku.

### 5.8.1 Návrh lineárního hydromotoru

Ačkoli není návrh hydromotorů předmětem diplomové práce, bylo třeba získat představu o rozměrech hydromotoru, který zdvihá výložník (spojuje tedy body B-D).

Pro vyvinutí potřebné síly stanoveným tlakem je třeba pístnice následujícího průměru:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{R_B}{S} \Rightarrow S = \frac{R_B}{p} = \frac{117440}{20} = 5870 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (86)$$

- S - plocha pístnice
- p - pracovní tlak - u podobných zařízení 200 bar
- F - zatěžující síla
- D - průměr pístnice

Z plochy plyne potřebný průměr pístnice:

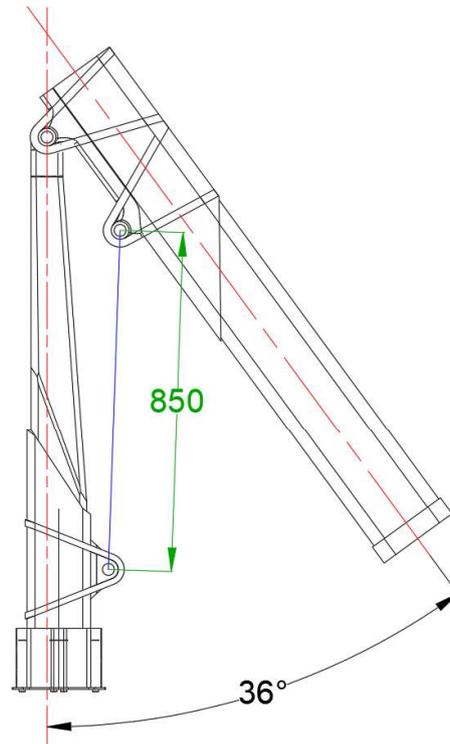
$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5870}{\pi}} = 86,5 \text{ [mm]} \quad (87)$$

Pro určení potřebného zdvihu hydraulického válce posloužila geometrie nosníků.

Geometrickým omezením ve složené poloze je určitý minimální úhel sevřený výložníkem a sloupem.

Následně bylo třeba dořešit konstrukční detaily hydraulické soustavy. Zejména bylo třeba uložit válce ke kompozitním dílcům výložníku a přivést k nim hadice dopravující tlakový olej. Celková situace je zachycena na následujícím obrázku.

Bylo třeba k jednotlivým členům upnout lineární hydromotory. Pro každý z nich byla vytvořen připojovací bob z oceli. V rámci uvažované kusové výroby, byly připojovací body navrženy jako obrobky, což by bylo pro sériovější výrobu neekonomické. Konstrukce připojovacích bodů byla optimalizována s ohledem na minimální hmotnost. Hadice byly uloženy do tzv. energořetězu od firmy IGUS. Řetěz zajišťuje řízený pohyb hadic, díky kterému dochází k menšímu opotřebení hadic. Zároveň jsou částečně chráněny proti mechanickému poškození a usnadňuje jejich případnou výměnu.



Obrázek 33: Jeřáb ve složené poloze

## 6 Konečnoprvková analýza

Obecně metody konečných prvků slouží k řešení řady inženýrských problémů. Zjednodušeně lze metodu konečných prvků - MKP - popsat tak, že se geometrie zkoumané součásti diskretizuje na konečný počet elementárních prvků. po tomto procesu tvorby sítě následuje hledání přibližných hodnot funkce řešení, typicky posuvů u napěťové analýzy.

MKP doznala značného rozšíření spolu s rozvojem výpočetní techniky, neboť právě výpočetní výkon stroje na kterém je analýza prováděna, je jediným omezením tohoto přístupu.

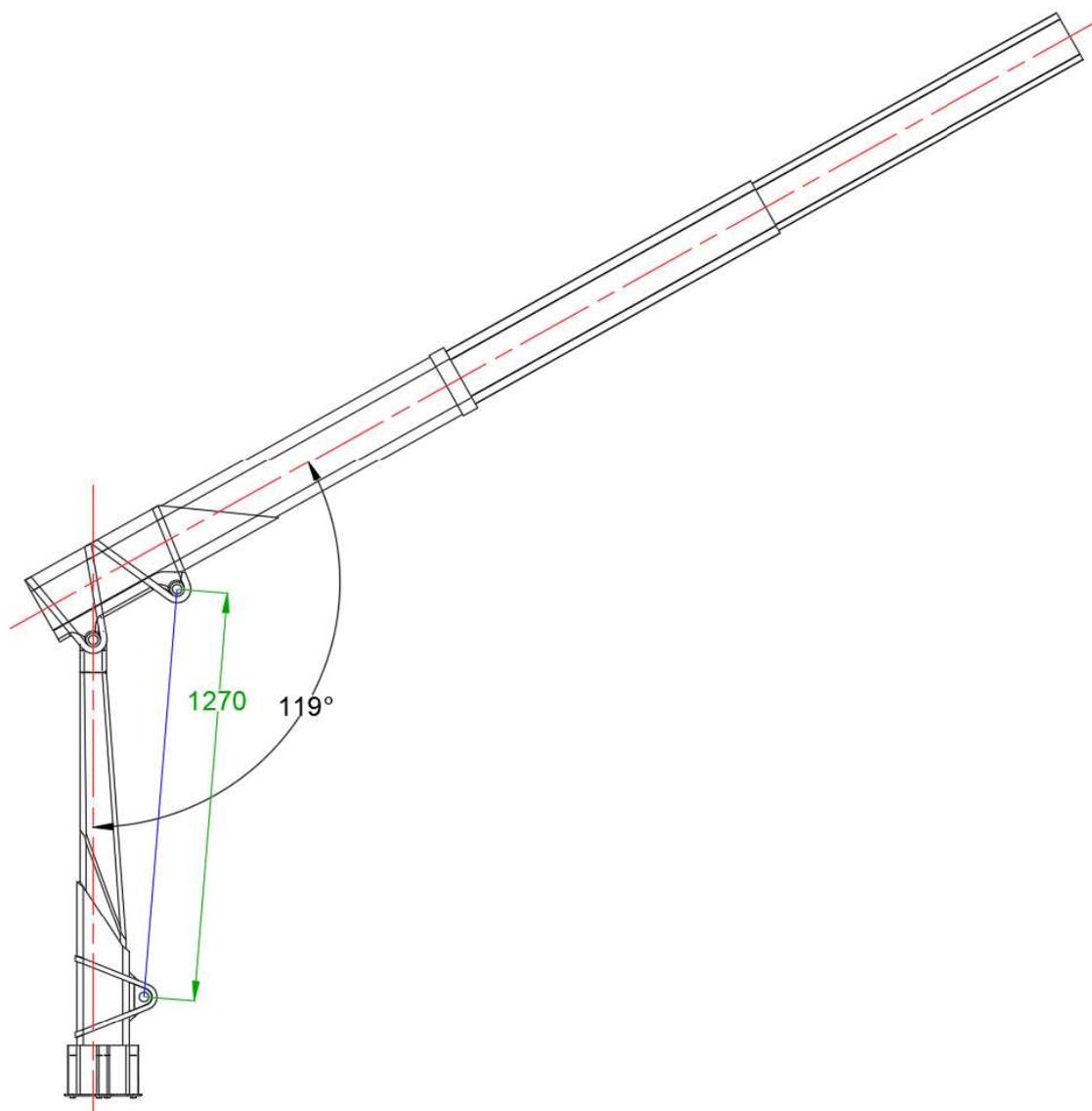
Pro výpočtovou analýzu byl užit řešič NASTRAN, který je součástí softwarového balíku Siemens NX ve verzi 12.

Řešič NASTRAN byl vybrán zejména pro své pohodlné a přehledné uživatelské prostředí, které je plně integrováno do CAD systému NX. Zároveň však jde o renomovaný software, jehož základy vznikly v NASA. Odtud název **NASA STR**ucture **AN**alysis. Díky progresivní obchodní politice založené na nákupu specializovaných firem a následné integraci jejich řešení do NASTRANu obsahuje v dnešní době řadu specializovaných a velmi zdařilých pre-processorů a post-processorů.

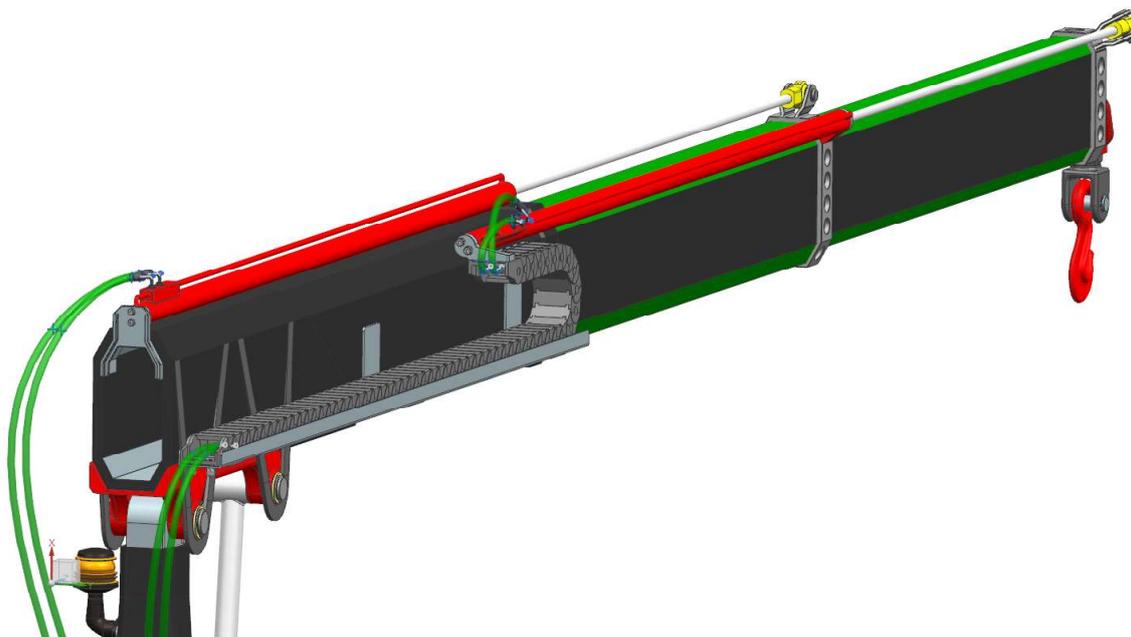
Vzhledem k tvarově složitým prvkům, které nelze zanedbat v zájmu zachování podobnosti výpočtového a reálného modelu, nebyl prováděn výpočet v rámci jedné simulace, ale byl účelně rozdělen.

Odděleně byly provedeny tyto výpočty:

- statická napěťová analýza sloupu



Obrázek 34: Jeřáb v poloze maximálního zdvihu



Obrázek 35: Uchycení hydraulických prvků

- statická napěťová analýza hlavního dílu výložníku
- nelineární statická analýza výložníku

Obecně se MKP výpočet skládá z několika základních kroků:

**Výpočtový model** Při tvorbě výpočtového modelu je hlavním cílem definovat geometrii tak, aby přesně vystihovala řešený problém a umožnila rychlý a bezproblémový průběh výpočtu.

**Konečnoprvková síť** Po přípravě výpočtového modelu následuje diskretizace geometrie modelu. Jde o proces, kdy je geometrie popsána pomocí konečného počtu prvků o stanovené velikosti. Prvkům je následně přiřazena odpovídající fyzikální vlastnost.

**Simulace** Diskretizovaný model je upnut v prostoru a obtížen.

**Vyhodnocení výsledků** Posledním krokem je vyhodnocení výsledků výpočtu.

### 6.0.1 Materiál

Mechanické konstanty byly získány z údajů výrobce vláken a z vnitřních zdrojů firmy CompoTech.

Hodnoty uvedené v následujících tabulkách 6,7 a 8 byly použity pro definici materiálů ve výpočtech, které jsou popsány v následujících kapitolách.

Použité objemové podíly:

- objemový podíl vláken  $v_f = 55$  [%]
- objemový podíl matrice  $v_m = 45$  [%]

Konstanta	Jednotka	Hodnota
Modul pružnosti v tahu ve směru 1 - $\mathbf{E}_1$	[MPa]	230 000
Modul pružnosti v tahu ve směru 2 - $\mathbf{E}_2$	[MPa]	15 000
Modul pružnosti v tahu ve směru 3 - $\mathbf{E}_3$	[MPa]	15 000
Modul pružnosti ve smyku v rovině 12 - $\mathbf{G}_{12}$	[MPa]	17 000
Modul pružnosti ve smyku v rovině 13 - $\mathbf{G}_{13}$	[MPa]	17 000
Modul pružnosti ve smyku v rovině 23 - $\mathbf{G}_{23}$	[MPa]	5 800
Poissonova konstanta v rovině 12 - $\nu_{12}$	[-]	0.33
Poissonova konstanta v rovině 13 - $\nu_{13}$	[-]	0.33
Poissonova konstanta v rovině 23 - $\nu_{23}$	[-]	0.33
Hustota - $\rho$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	1 600

Tabulka 6: Materiálové konstanty použitých vláken Tenax STS40F13 24K

Konstanta	Jednotka	Hodnota
Modul pružnosti v tahu ve směru 1 - $\mathbf{E}_1$	[MPa]	779 000
Modul pružnosti v tahu ve směru 2 - $\mathbf{E}_2$	[MPa]	5 000
Modul pružnosti v tahu ve směru 3 - $\mathbf{E}_3$	[MPa]	5 000
Modul pružnosti ve smyku v rovině 12 - $\mathbf{G}_{12}$	[MPa]	20 000
Modul pružnosti ve smyku v rovině 13 - $\mathbf{G}_{13}$	[MPa]	20 000
Modul pružnosti ve smyku v rovině 23 - $\mathbf{G}_{23}$	[MPa]	15 000
Poissonova konstanta v rovině 12 - $\nu_{12}$	[-]	0.088
Poissonova konstanta v rovině 13 - $\nu_{13}$	[-]	0.3
Poissonova konstanta v rovině 23 - $\nu_{23}$	[-]	0.3
Hustota - $\rho$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	2 170

Tabulka 7: Materiálové konstanty použitých vláken Granoc XN-80-A2S

Materiál	$\mathbf{E}$ [MPa]	$\mathbf{G}$ [MPa]	$\nu$ [-]	$\rho$ [kg · m <sup>-3</sup> ]
Ocel	206 940	80 209	0,29	7 829
Spabond 345	3 000	1 111	0,35	1 180
Pryskyřice LG3000/HG1008	4 500	1 600	0,4	1 200

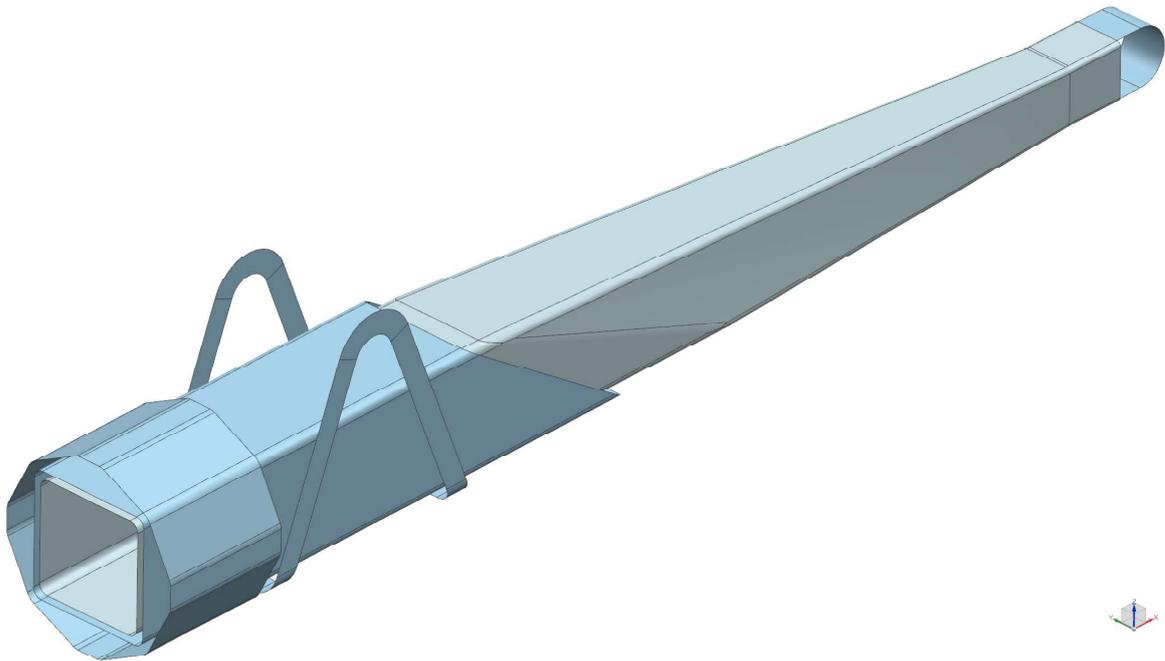
Tabulka 8: Materiálové konstanty použitých izotropních materiálů

## 6.1 Statická napěťová analýza sloupu

### 6.1.1 Výpočtový model sloupu

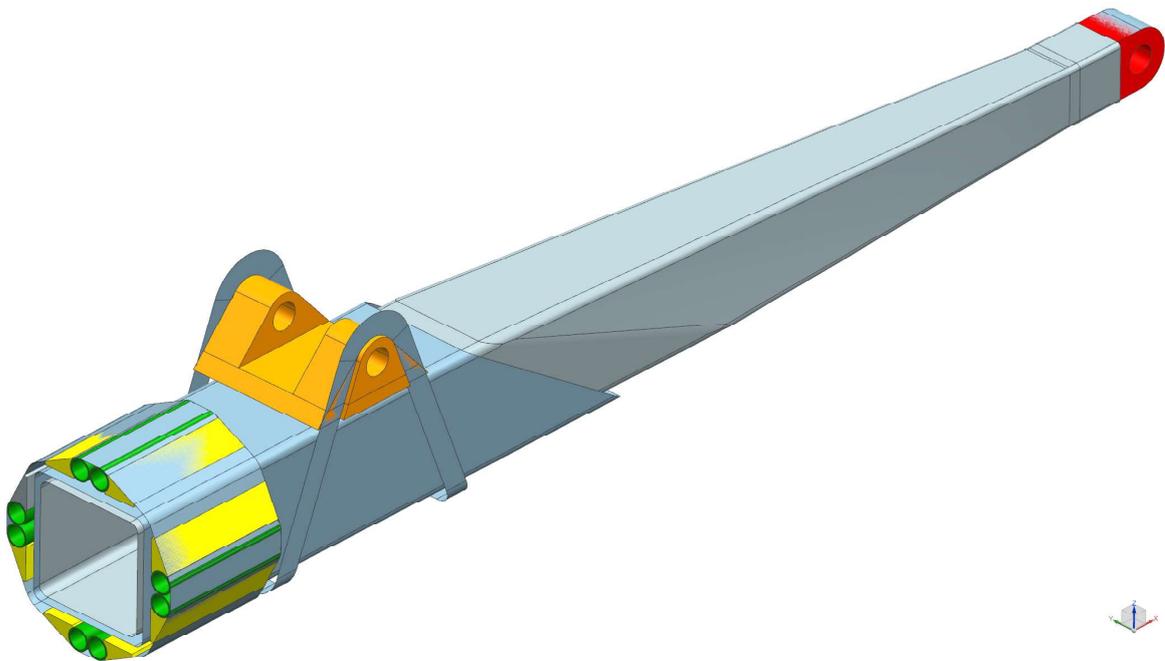
Jak bylo řečeno výše, prvním krokem MKP výpočtu je příprava výpočtového (zjednodušeného) modelu. Pro přípravu sítě kompozitu bylo třeba vytvořit plošný model. Model je zobrazen na následujícím ob. 36. Na obrázku je zachycen samotný sloup opatřený okem na užším konci a ve spodní části výztuhou, která byla dodána z důvodu rozložení kontaktních tlaků. Dále je vidět plošné tělo reprezentující ovin oka v bodě B. Zde bylo zavedeno zjednodušení ve formě nepřesné geometrie. Vlákná ve skutečnosti zaujmou přirozený tvar. Nepřirozený průřez v modelu má za cíl umístit odpovídající

průřez vláken do správné polohy.



Obrázek 36: Plošný model sloupu

Plošný model byl doplněn o objemové prvky reprezentující vložky a přípojovací prvky. Na následujícím obr. 37 jsou zeleně zachyceny modely přípojovacích trubek, žlutě pěnové výztuhy příruby, oranžově ocelová vložka oka B a červeně ocelová vložka oka C.



Obrázek 37: Model sloupu s objemovými prvky

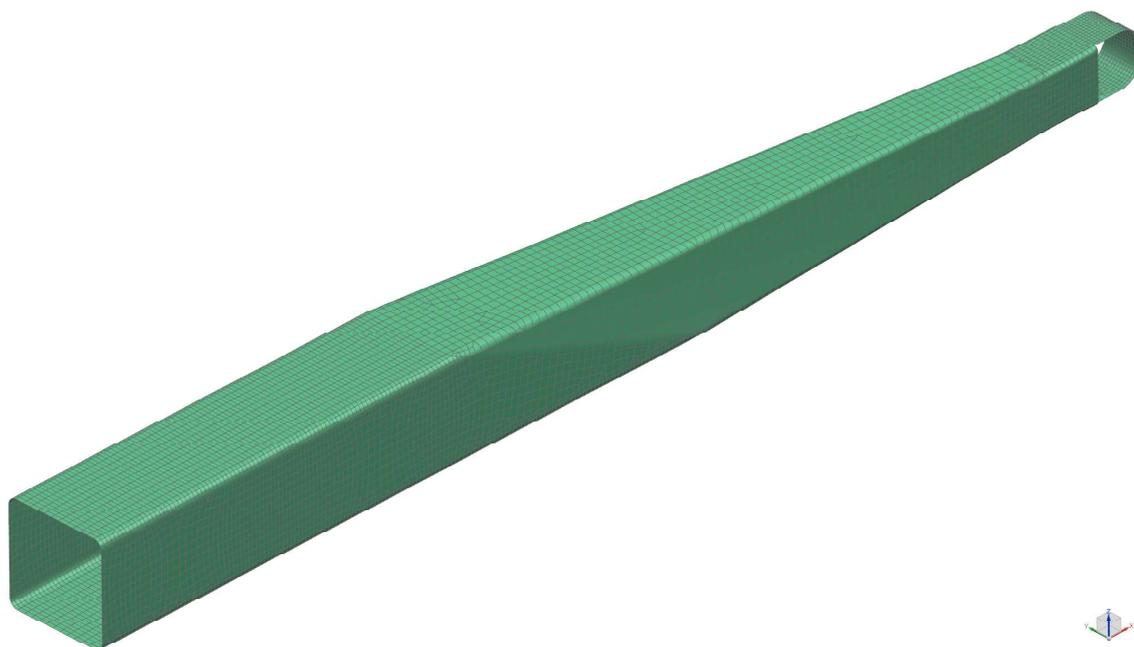
### 6.1.2 Konečnoprvková síť sloupu

Obecně lze říci, že příprava sítě pro výpočty kompozitních materiálů je náročná jak časově, tak na množství materiálových konstant, které uvádí jedna z předcházejících kapitol.

V rámci zachování maximální možné věrohodnosti výpočtu a možnosti vyhodnocení napětí v jednotlivých vrstvách byl zvolen přístup, při kterém je plocha vysítována 2D sítí, která se následně vysune do podoby 3D objemové reprezentace s tím, že z každého 2D elementu vznikne právě tolik 3D elementů, kolik má kompozit vrstev. Vysunutí a následný vznik 3D elementů se řídí fyzikální vlastností 2D sítě. Fyzikální vlastností speciálně určené sítě s názvem "Laminates" je kompletní předpis kompozitního materiálu včetně orientací, tloušťek vrstev atd.

Materiálové vlastnosti jednotlivých vrstev byly určeny ze známých vlastností materiálu vláken a matrice. Preprocesor je kombinuje dle známého objemového podílu a určuje z nich efektivní hodnoty kompozitu.

Pro vysítování plošného modelu sloupu byla použita 2D síť s prvky názvu CQUAD(8). Jde o čtyřhranné prvky s meziuzly. Díky meziuzlům lépe aproximují tvarové prvky sítě. 2D síť aplikovaná na sloup je zobrazena na následujícím obr. 38.



Obrázek 38: 2D síť sloupu

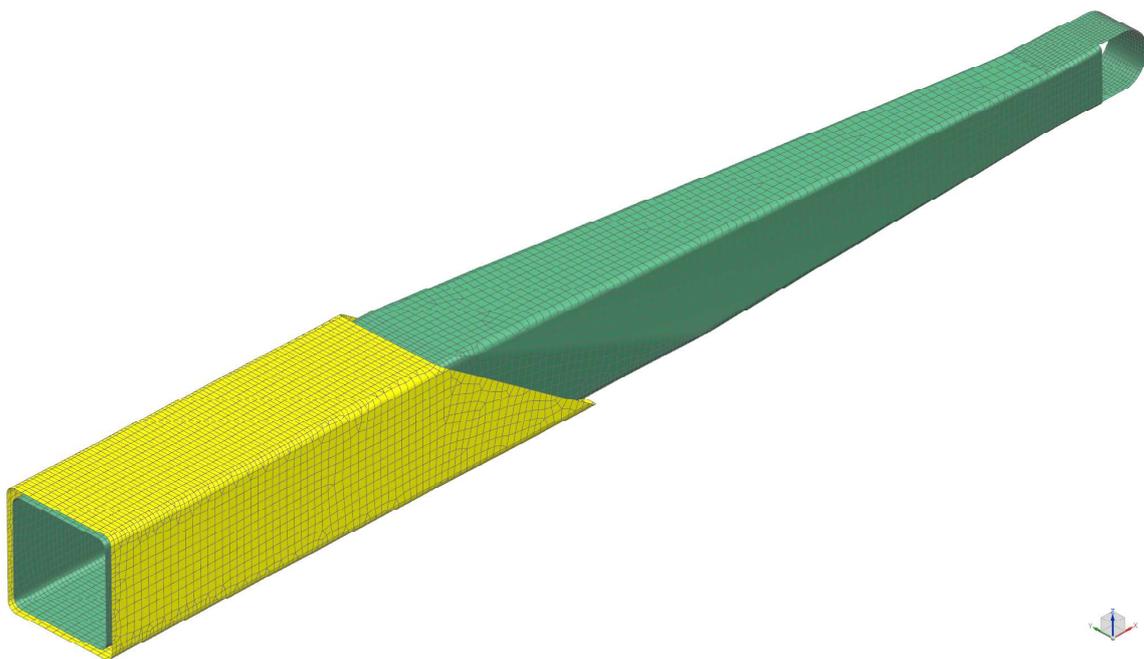
Zmiňovaná fyzikální vlastnost v případě kompozitního materiálu je skladba vrstev. Po prvních výpočtech bylo rozhodnuto, že za účelem zvýšení ohybové tuhosti byla zaměněna vlákna HS uhlíku za UHM uhlíková vlákna. Konkrétně vlákna Tenax STS40F13 24K byla nahrazena vlákny Granoc XN-80-A2S. Výsledná skladba základního dílu sloupu tedy získala následující podobu - viz tabulka 9.

Obdobně byla vysítována výztuha, jejíž síť je zobrazena žlutě na následujícím obr. 39.

Skladba výztuhy byla z technologických důvodů zvolena následujícím způsobem -

ID vrstvy	Materiál	Tloušťka [mm]	Úhel [°]	Vlákno
1	HS Uhlík	0.53	42	Tenax STS40F13 24K
2	HS Uhlík	0.25	90	Tenax STS40F13 24K
3	UHM Uhlík	1.61	0	Granoc XN-80-A2S
4	HS Uhlík	0.6	42	Tenax STS40F13 24K
5	UHM Uhlík	1.57	0	Granoc XN-80-A2S
6	HS Uhlík	0.6	43	Tenax STS40F13 24K
7	UHM Uhlík	1.98	0	Granoc XN-80-A2S
8	HS Uhlík	0.59	44	Tenax STS40F13 24K

Tabulka 9: Skladba vrstev sloupu upravená pomocí MKP



Obrázek 39: 2D síť výztuhy

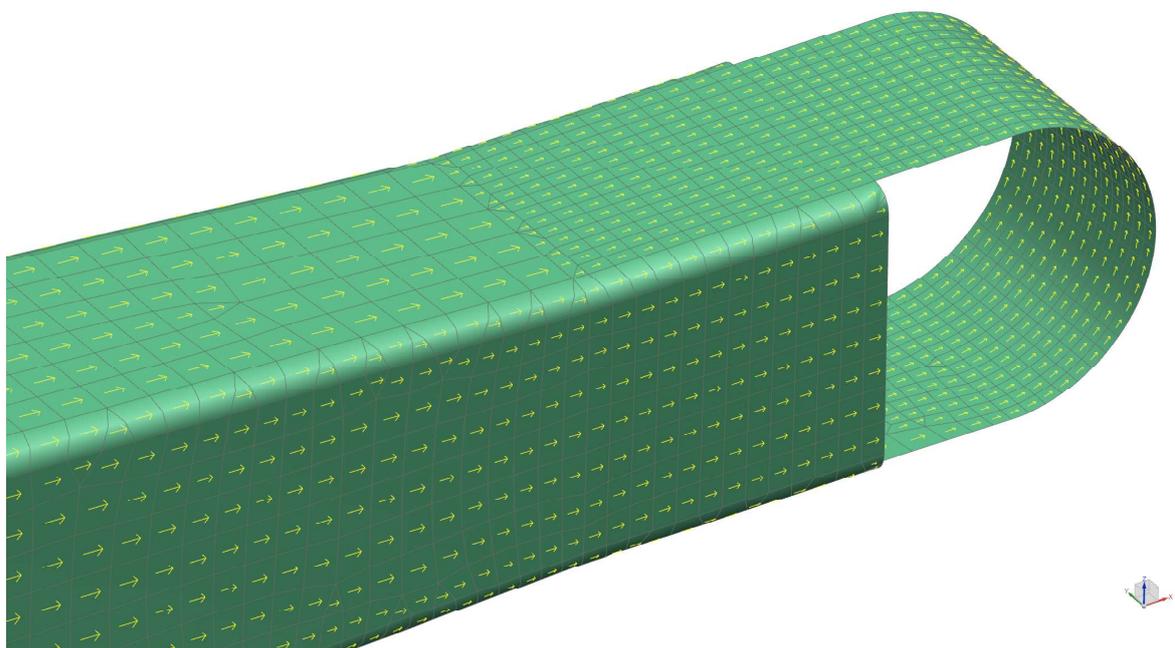
viz tabulka 10.

ID vrstvy	Materiál	Tloušťka [mm]	Úhel [°]	Vlákno
1	HS Uhlík	2	45	Tenax STS40F13 24K
2	HS Uhlík	2	90	Tenax STS40F13 24K
3	HS Uhlík	2	45	Tenax STS40F13 24K
4	HS Uhlík	2	90	Tenax STS40F13 24K
5	HS Uhlík	2	45	Tenax STS40F13 24K

Tabulka 10: Skladba vrstev výztuhy sloupu

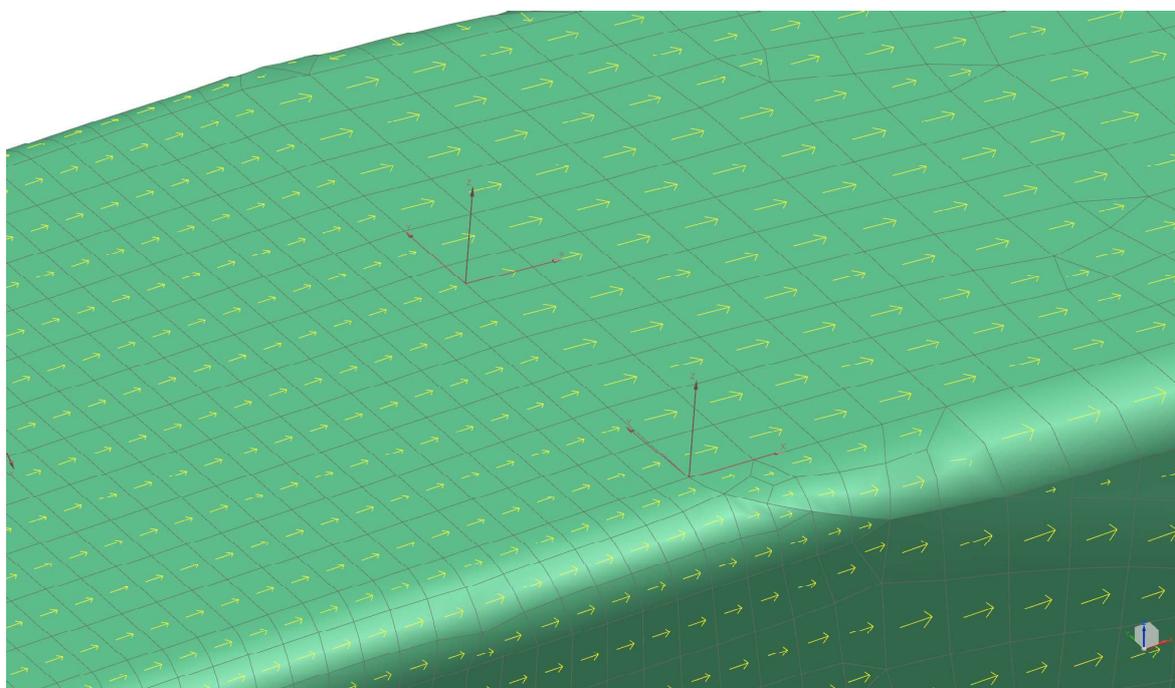
Pro mechanické vlastnosti kompozitního materiálu je rozhodující orientace výztuhy (vláken). Pro výpočet je tedy důležité věrně reprezentovat tento fakt. Orientace 3D elementů vzniklých vysunutím se dědí z 2D elementů. Bylo tedy třeba každou část 2D

sítě orientovat podle směru vláken. Orientace plyne z následujícího obrázku, kde žluté šipky reprezentují směr vlákna, tedy směr 11 - viz obr. 40.



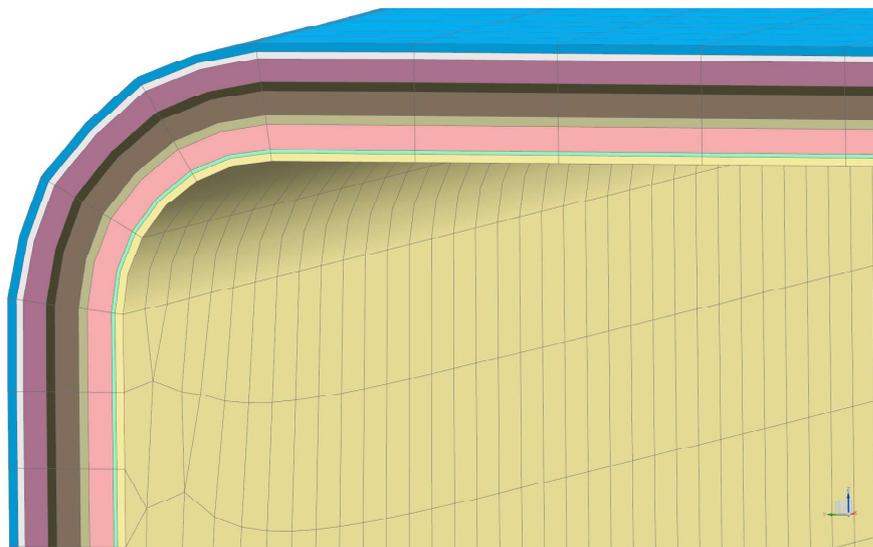
Obrázek 40: Orientace elementů 2D sítě

Zorientování elementů je proveditelné řadou způsobů, ale pro tvarově rozumně složitý model bylo výhodné použít pracovní souřadné systémy. Příklad jejich použití je zobrazen na obr. 41.



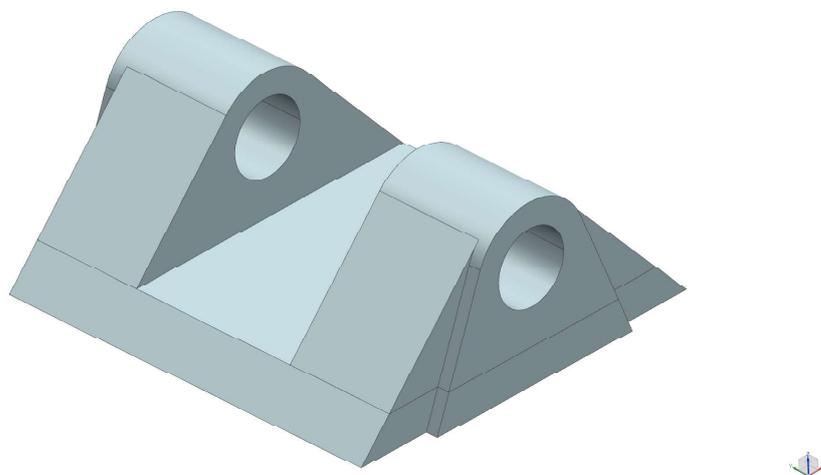
Obrázek 41: Pracovní souřadné systémy pro orientaci elementů

Finálním krokem tvorby sítě kompozitních prvků bylo jejich vysunutí. Sít sloupu je vidět na obr. 42. Jednotlivé elementy reprezentující vrstvy jsou barevně rozlišeny.



Obrázek 42: Objemové 3D elementy

Ocelové výztuhy byly z pohledu přípravy sítě oproti kompozitových dílu výrazně jednodušší a byly vysítovány pomocí 3D elementů.

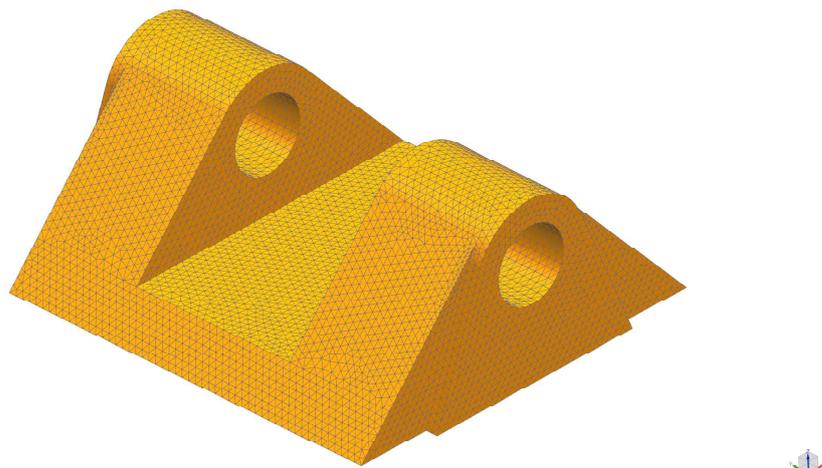


Obrázek 43: Výpočtový model výztuhy v bodě B

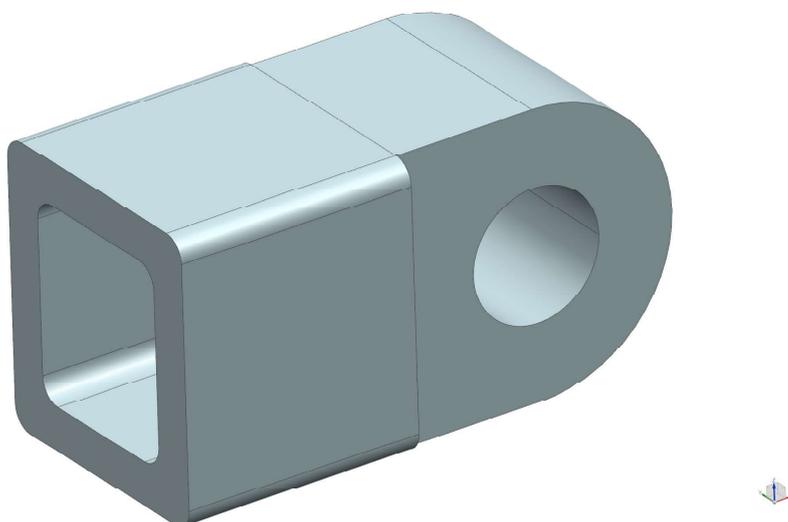
Pro vysítování ocelové výztuhy byl využit prvek s názvem CTETRA(10), opět tedy jde o prvek s meziuzly, který díky jehlanovitému tvaru výborně popisuje tvarově složitě objemové díly. Sít zobrazují obr. 43,44.

Obdobně byl vysítován model ocelové výztuhy v bodě C, který je znázorněn na obr. 44.

Na rozdíl od výztuhy bodu B byla pro tento bod s výhodou využita kombinace prvků CTETRA(10) a CHEXA(20). Prvky CHEXA(20) opět využívají meziuzly, ale



Obrázek 44: 3D síť výztuhy v bodě B



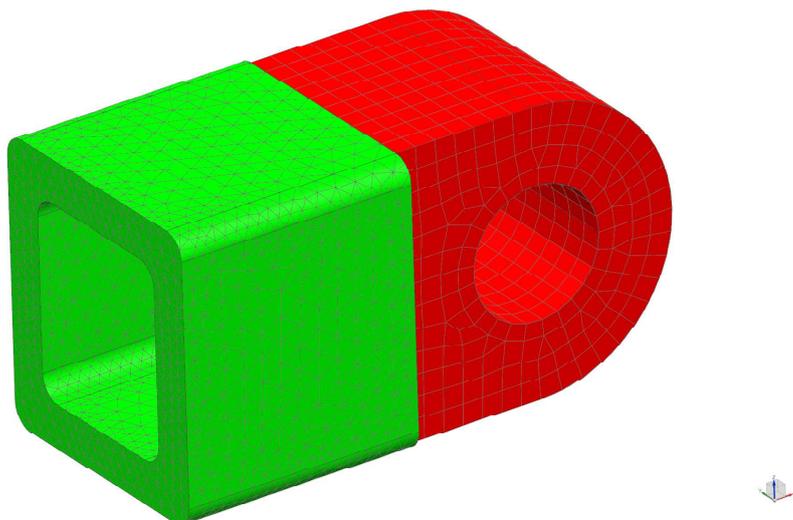
Obrázek 45: Výpočtový model výztuhy v bodě C

díky tvaru kvádru mají dvakrát více uzlů než CTETRA(10). Nicméně hůře popisují tvarově složité díly. Na obr. 46 je vidět kombinace CTETRA prvků - zeleně a CHEXA prvků - červeně.

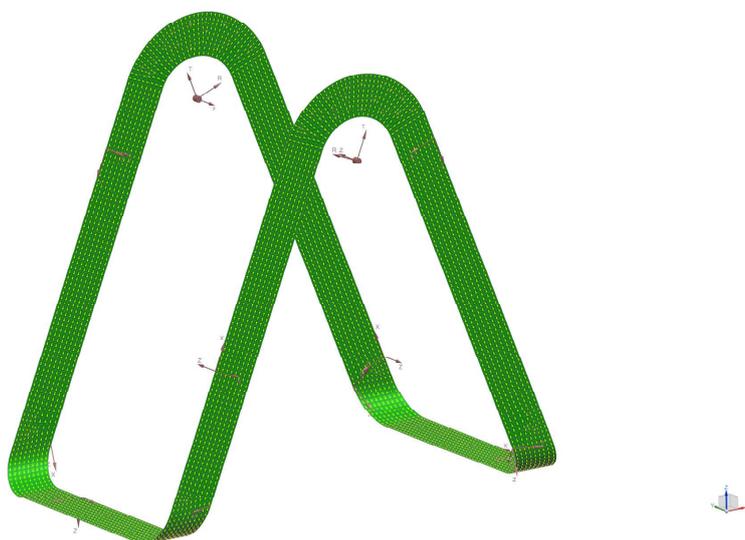
Spojení těchto dvou typů sítí bylo realizováno pomocí funkce "Mesh Maiting Conditions", která při použití své varianty "Glue - conicident" vytvoří síť se společnými uzly. Díky tomu nevznikají uměle vytvořené napěťové extrémny.

Následujícím krokem bylo vysítování vláken tvořících oko. Postup byl totožný jako u předešlých kompozitních dílů.

Opět tedy bylo třeba vytvořit 2D síť pomocí prvků CQUAD(8) a pomocí pracovních souřadných systémů zorientovat její elementy. Zajímavostí je, že elementy ovinu v obloukové části mají radiálně vedený směr 11 tak, jak zachycuje obr. 48 a laminát byl v těch oblastech orientován s pootočením 90 °. Pro zorientování elementů byl použit



Obrázek 46: 3D síť výztuhy v bodě C



Obrázek 47: 2D síť navíjeného oka

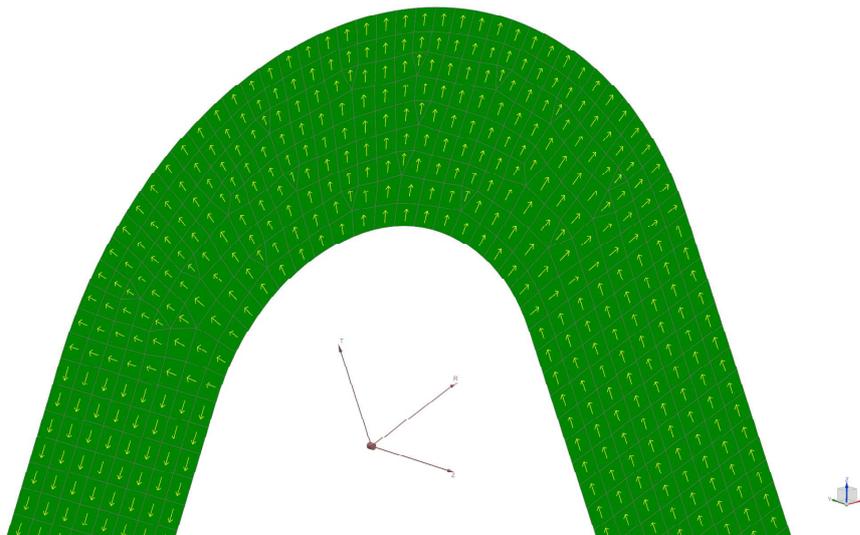
cylindrický souřadný systém.

Následně byl kompozit taktéž vysunut a vznikla prostorová síť, která je na obr. 49.

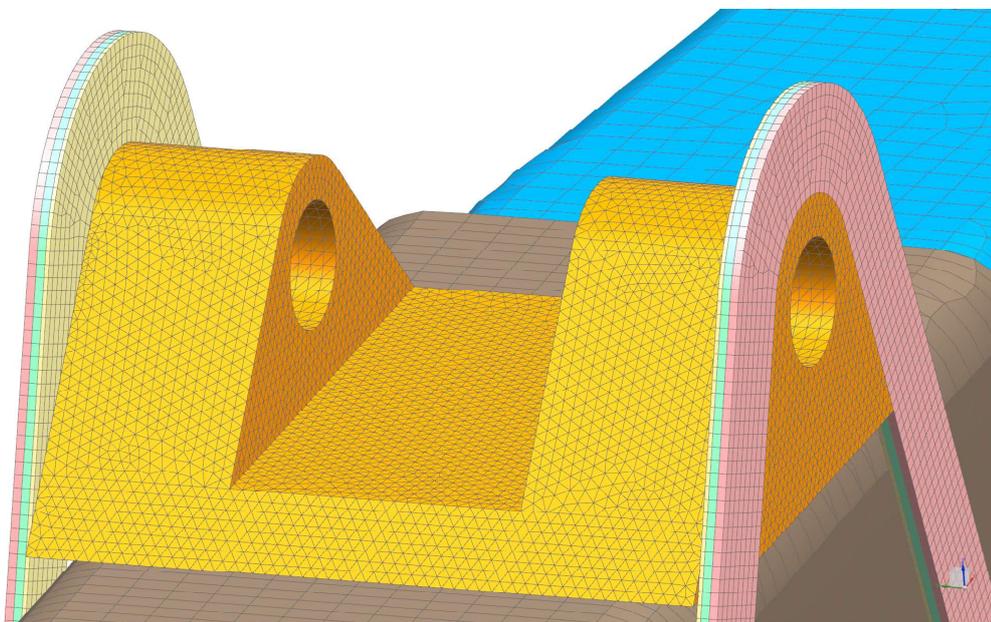
Poslední nevysítovanou částí je příruba, která se skládá z ocelových trubek, pěnových výplní a uhlíkového ovinu. Pro vysítování ocelových trubek byly využity prvky CTETRA(10) - na obr. 50 modře a pro pěnové výplně prvky CHEXA(20) - na obrázku žlutě.

Trubky a výztuhy kryje ovin reprezentovaný 2D sítí se svou orientací, která byla následně také vysunuta. Tímto postupem byl vytvořen věrný výpočtový model sloupu. Skladba ovinu je tvořena jednoduchým jednosměrným laminátem o tloušťce 6 mm vláknem Tenax STS40F13 24K - viz obr. 51.

Následující obr. 52 zachycuje kompletní výpočtový model připravený k propojení sítí, uložení v prostoru a obtížení zatížením.



Obrázek 48: 2D síť navíjeného oka - oblouk



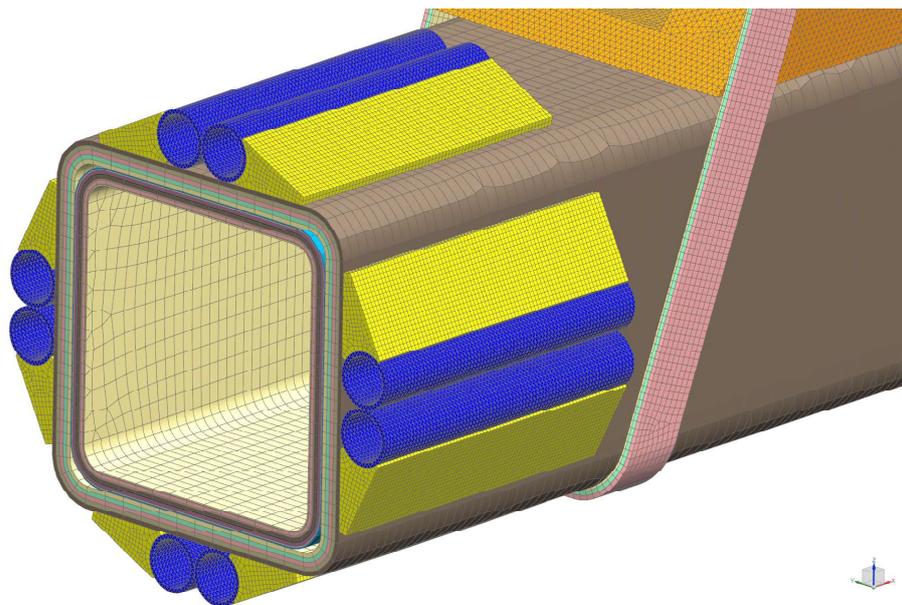
Obrázek 49: 3D síť navíjeného oka

### 6.1.3 Simulace sloupu

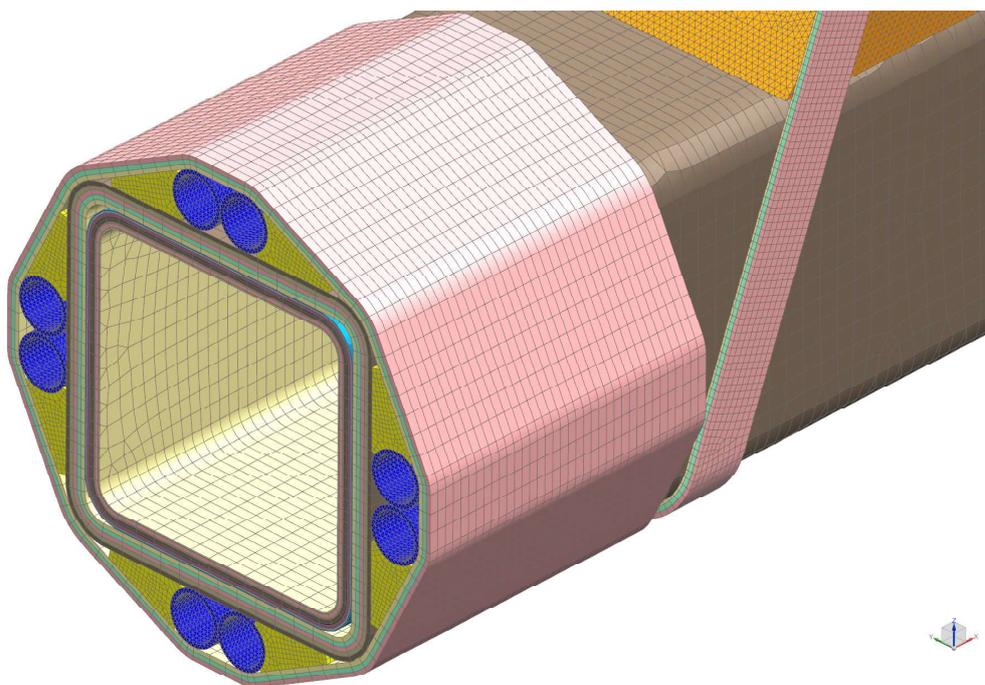
Před upnutím tělesa a jeho obtížením bylo třeba spojit sítě tak, aby spojení věrně reprezentovala spojení fyzických součástí. V preprocesoru NX existuje několik možností, jak takové spojení provést, pro úlohu lineární statiky a spoje, kde se nepředpokládá odlehnutí, je vhodné využití funkce Gluing, která zaručí totožné posunutí uzlů sítě. Postupně tedy byla aplikována na všechna spojení.

První spojení bylo aplikováno mezi ocelovou vložkou a kompozitem v místě bodu C. Spojení představují zlaté šipky na obr. 53.

Obdobně byla spojena základní část sloupu a výztuha. Spojení reprezentují žluté šipky na obr. 54.



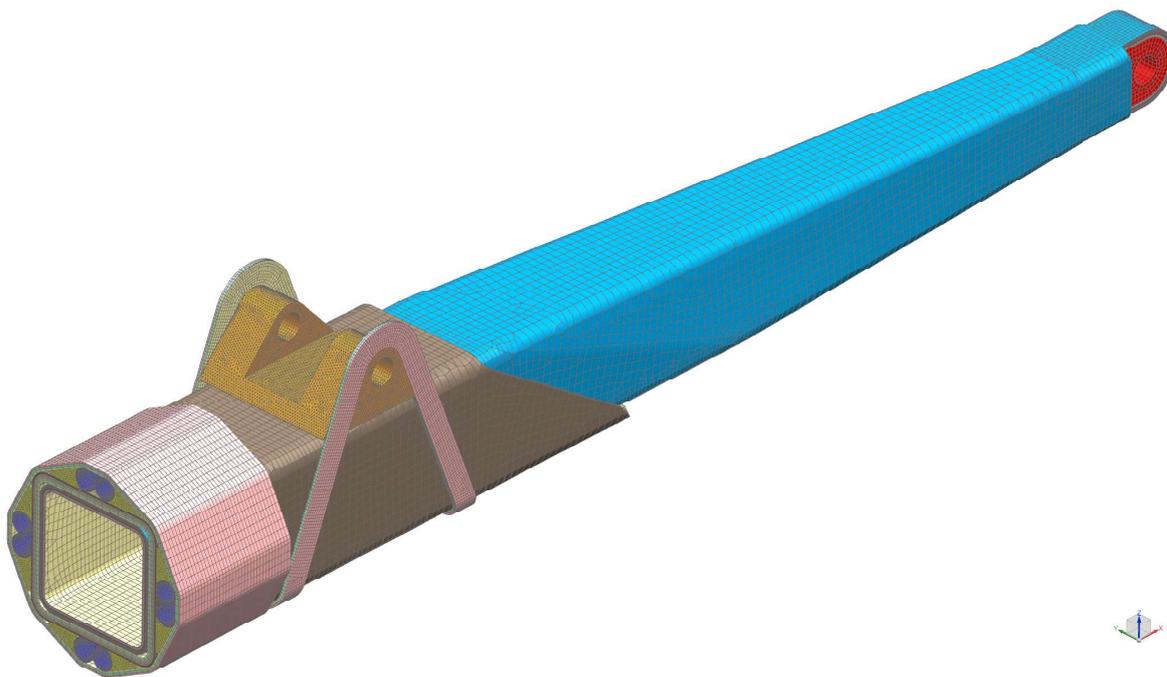
Obrázek 50: 3D síť součástí příruby



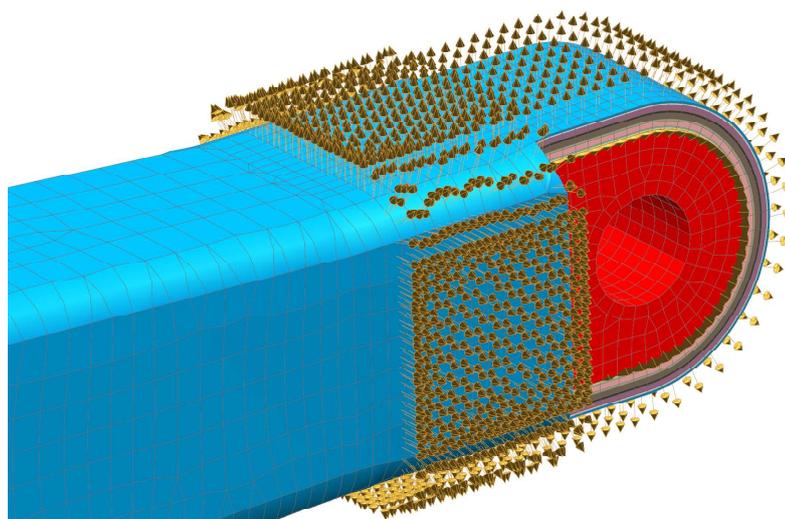
Obrázek 51: Výpočtový model příruby

Síť reprezentující oko byla pomocí Gluingu propojena se sítí výztuhy a ocelové výztuhy. Modré šipky reprezentují spojení ocelové příruby a výztuhy, zelené šipky představují spojení ovinu a výztuhy a fialové šipky spojení ovinu a ocelové výztuhy. - viz obr. 55.

Na spojení sítí byla nejnáročnější příruba. Obr. 56 zachycuje spojení jejich sítí. Modré šipky zobrazují spojení pěnové výztuhy a výztuhy, fialové pěnové výztuhy a vnějšího ovinu, zelené vzájemný dotyk trubek a zlaté spojení trubek a vnějšího ovinu.



Obrázek 52: Výpočtový model sloupu

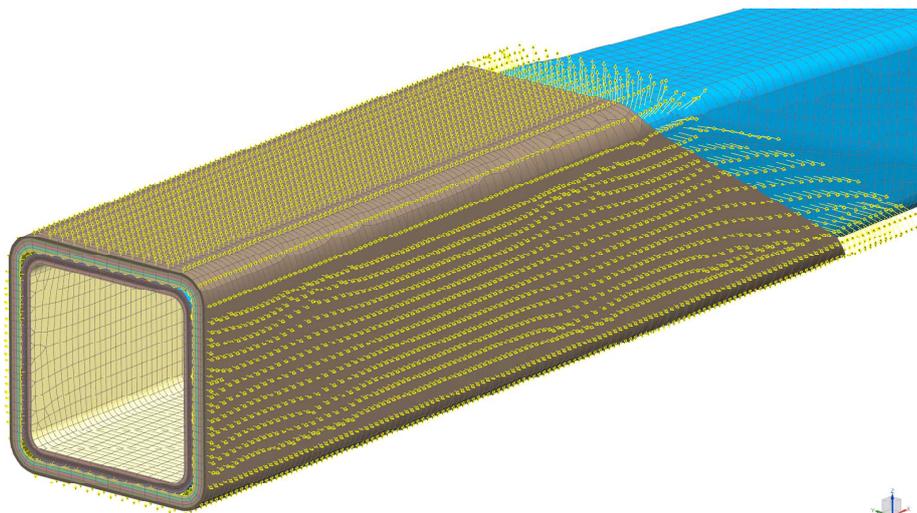


Obrázek 53: Gluing - oko C

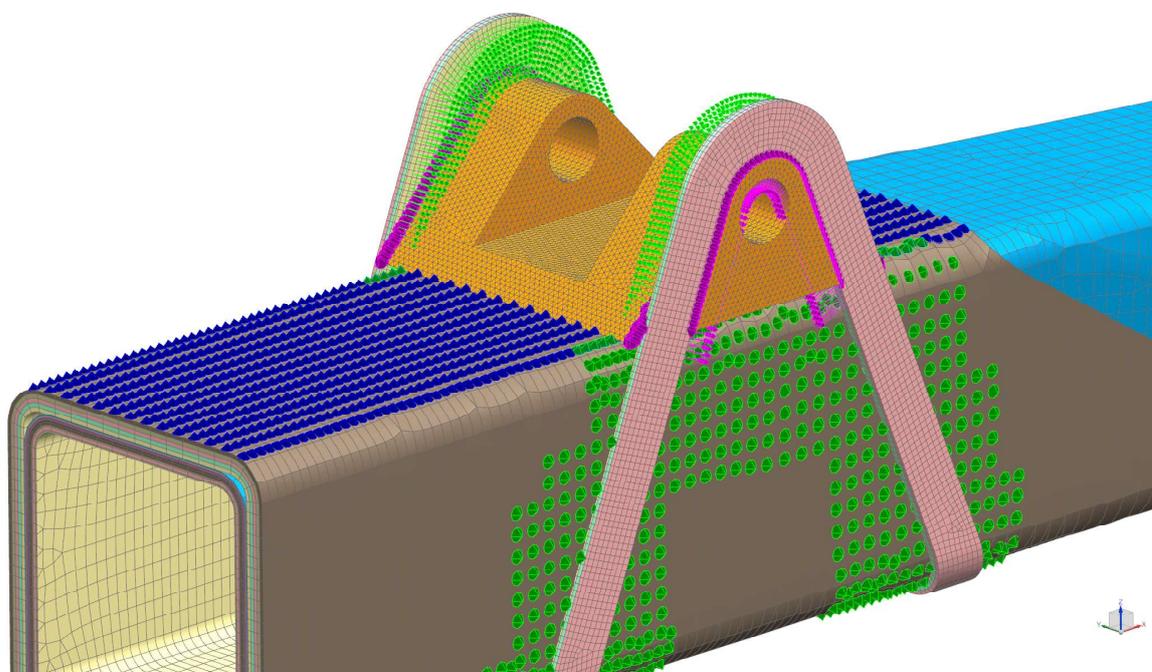
Trubky nejsou záměrně propojeny s pěnovou výztuhou neboť toto spojení má zanedbatelný vliv na tuhost příruby.

Následně byl model upnut v prostoru pomocí tzv. "rigidních růžic". Jde o konstrukci vytvořenou spojením vybrané plochy a bodu v prostoru pomocí teoreticky tuhých 1D prvků s názvem RBE2. Podoba růžice je patrná z obr. 56. Bod, ve kterém se růžice potkává byl upnut v prostoru odebráním všech stupňů volnosti. Odebrání stupňů volnosti symbolizuje červená značka.

Posledním krokem bylo zatížení modelu. Síly byly aplikovány na válcové plochy ocelových vložek pomocí složek sil do jednotlivých souřadných směrů. Síla  $R_B$  je re-



Obrázek 54: Gluing - výztuha



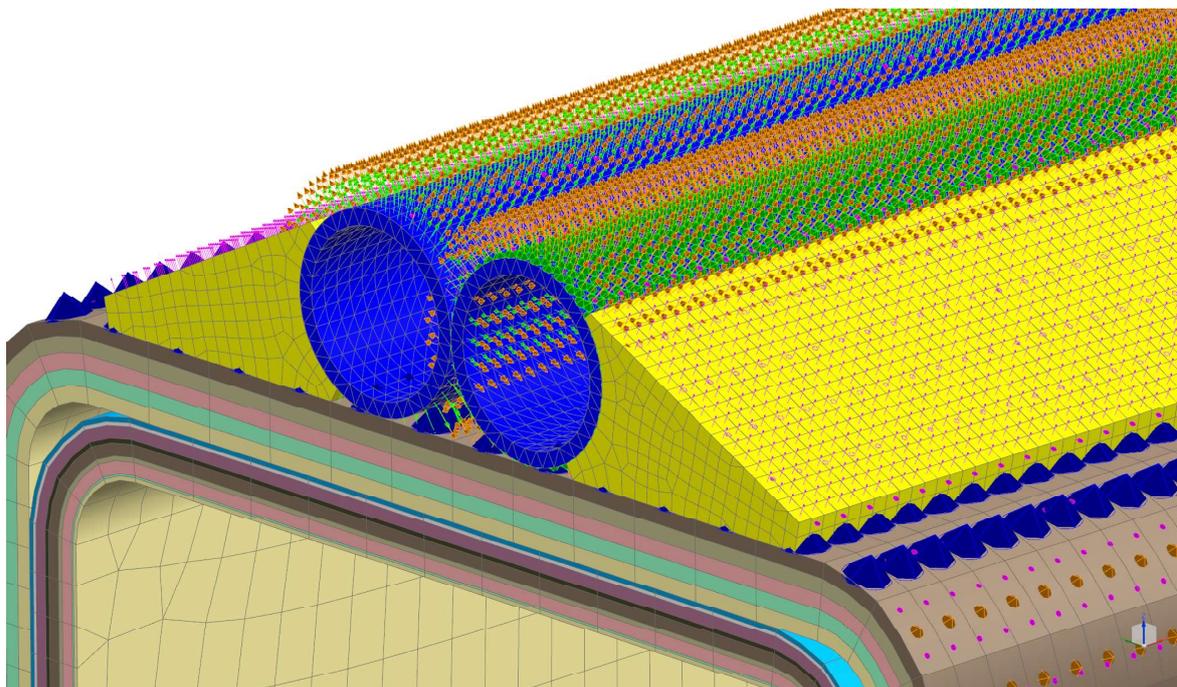
Obrázek 55: Gluing - oko B

prezentována červenou šipkou, síla  $R_C$  zelenou.

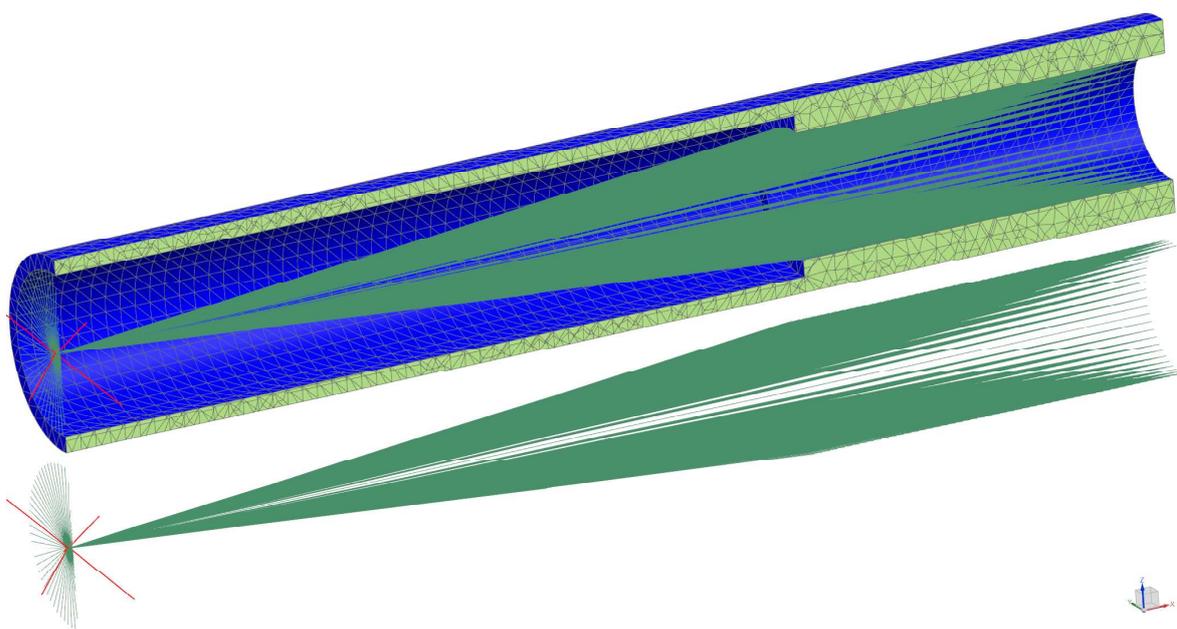
#### 6.1.4 Vyhodnocení výsledků

Závěrečným krokem MKP výpočtů je vyhodnocení výsledků.

Na vyhodnocení napětí v kompozitu je nutné nahlížet dvěma způsoby. Hodnotí se interlaminární a intralaminární porušení. **Interlaminární** porušení se projevuje delaminací, což je děj, při kterém se oddělí jednotlivé vrstvy laminátu od sebe. **Intra-**



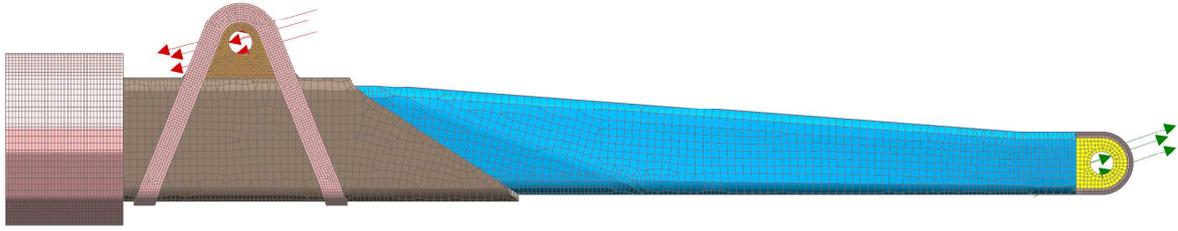
Obrázek 56: Gluing - oko B



Obrázek 57: Rigidní růžice

**laminární** porušení vzniká v jednotlivých vrstvách a lze jej predikovat pomocí tzv. kritérií pevnosti.

Kritéria pevnosti se rozdělují na neinteraktivní a interaktivní. **Neinteraktivní** kritéria neuvažují vazbu mezi normálovými složkami napětí ani mezi složkami normálových a smykových napětí. Patří mezi ně kritérium maximálního napětí a maximální defor-



Obrázek 58: Síly aplikované na sloup

-	směr	Tenax STS40F13 24K	Granoc XN-80-A2S
$X^T$ [MPa]	11	2 572	1 979
$X^C$ [MPa]	11	900	800
$Y^C$ [MPa]	22	230	139
$Y^T$ [MPa]	22	50	26
$S^{LT}$ [MPa]	12	97	90

Tabulka 11: Hodnoty mezí pevností pro vyhodnocení intralaminární pevnosti

mace. **Interaktivní** kritéria jsou založena na energetických přístupech a odstraňují nedostatek neinteraktivních kritérií. Patří mezi ně například Tsai-Wu, Puckovo nebo LaRC04.

Vzhledem k tomu, že jeřáb je úlohou tuhosti nikoli pevnosti, bylo pro svou jednoduchost a přímočarost použito kritérium maximálního napětí.

Dle tohoto kritéria nedojde k porušení materiálu, pokud platí rovnice (88).

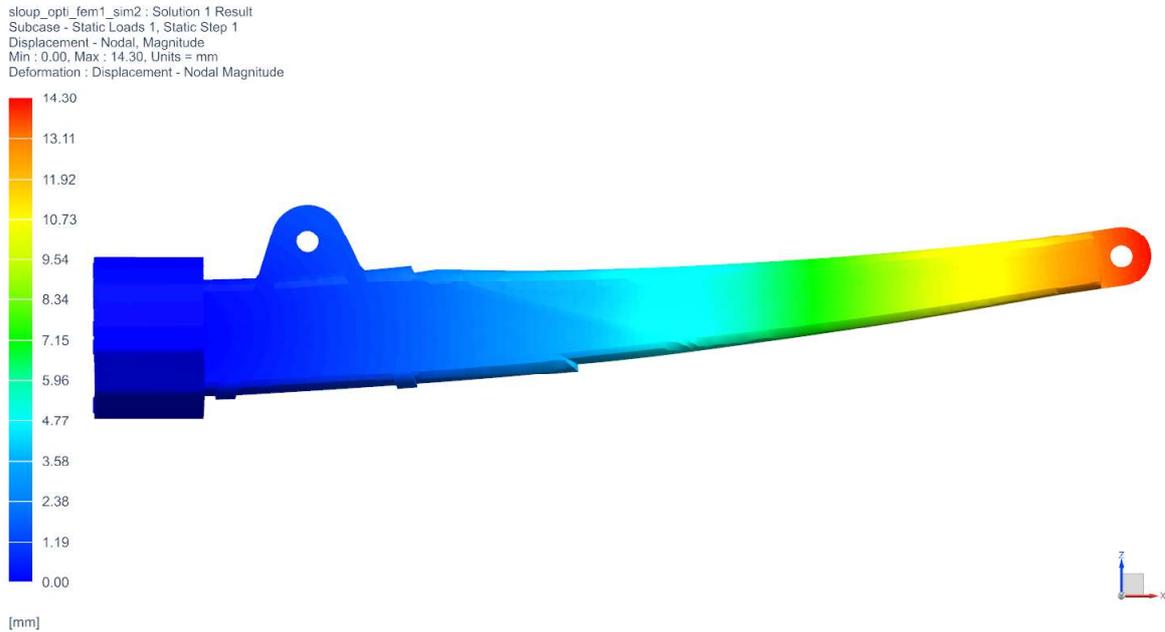
$$\frac{\sigma_1}{-X^C} = 1; \frac{\sigma_1}{X^T} = 1; \frac{\sigma_2}{-Y^C} = 1; \frac{\sigma_2}{Y^T} = 1; \frac{\sigma_{12}}{S^{LT}} = 1 \quad (88)$$

Pro vyčíslení pevností bylo třeba znát hodnoty mezí pevností pro jednotlivé vrstvy. Preprocesor umožňuje opět dopočítat tyto hodnoty ze známých hodnot jednotlivých složek. Fyzikálně to však pro vláknový kompozit nemá význam, neboť nelze změřit například meze pevnosti v tlaku. Z tohoto důvodu byly k vyhodnocení využity hodnoty získané od zadavatele práce. Jejich výčet představuje následující tabulka 11.

Při použití indexování souřadných os podle NX mají napětové meze indexy 11, 22, 33, 12, 23 a 31.

Prvním krokem vyhodnocení byla kontrola posunutí. Deformovaný tvar je dle před-

pokladu jednostranně ohnutý nosník. Maximální dosažená hodnota je 14,3 mm, což je s přihlédnutím k celkové délce nosníku přijatelná hodnota.



Obrázek 59: Posunutí sloupu

Vyhodnocení napětového stavu v kompozitu spočívá nejen v odečtení maximální hodnoty, ale také v rozboru jeho rozložení.

Postupně byly tedy jednotlivé vrstvy analyzovány. Následující obr. 60-64 popisují analýzu jedné z náhodně vybraných vrstev. Konkrétně jde o vrstvu podélných vláken z UHM uhlíku.

Následující obrázky zachycují rozložení napětí ve všech směrech příslušné vrstvy. Dle očekávání se objevuje tlakové napětí na vnitřní straně a tahové napětí na vnější straně ohýbaného nosníku, což je nejnáze pozorovatelné ve vrstvách podélných vláken.

Při vyčíslení podmínky maximálního napětí dostaneme následující rovnice:

$$\frac{-368,86}{-800} = 0,46; \frac{390,38}{1979} = 0,20; \frac{-11,65}{-139} = 0,08 \quad (89)$$

$$\frac{9,88}{26} = 0,38; \frac{13,15}{90} = 0,15 \quad (90)$$

Poměr napětí a pevnosti v daném směru udává tzv. index porušení. Index porušení je číslo od 0 od 1. Pokud dosáhne hodnoty 1 dojde k porušení materiálu dle uvažované podmínky.

V tomto konkrétním případě jsou tedy napětí vyhovující ve všech směrech.

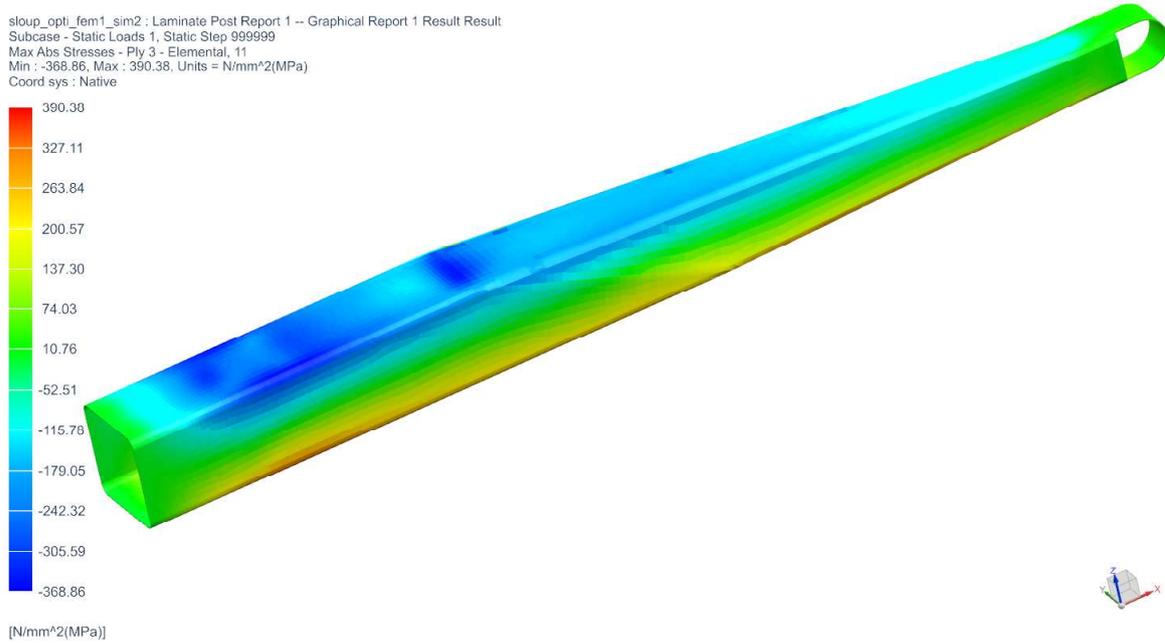
Obdobným způsobem proběhla kontrola všech vrstev skladby s výsledným vyhovujícím hodnocením.

<b>ID vrstvy</b>	<b>11 tah</b>	<b>11 tlak</b>	<b>22 tah</b>	<b>22 tlak</b>	<b>33 tah</b>	<b>33 tlak</b>
1	239,42	-199,34	28,66	-22,5	15,82	-16,27
2	242,91	-272,08	11,03	-12,10	14,53	-13,57
3	390,38	-368,86	9,88	-11,65	12,22	-12,82
4	158,87	-169,95	23,06	-20,43	9,53	-9,47
5	413,24	-416,21	11,25	-14,05	6,94	-7,39
6	140,37	-163,47	24,58	-22,26	6,25	-9,35
7	480,27	-517,05	12,36	-15,40	6,10	-11,05
8	566,64	-600,09	13,02	-15,72	5,67	-12,43
9	135,04	-144,89	26,00	-24,11	6,42	-13,64

Tabulka 12: Přehled maximálních napětí ve směrech 11, 22 a 33 ve sloupu v MPa

<b>ID vrstvy</b>	<b>12 tah</b>	<b>12 tlak</b>	<b>23 tah</b>	<b>23 tlak</b>	<b>31 tah</b>	<b>31 tlak</b>
1	10,61	-9,58	20,22	-11,97	7,97	-13,35
2	16,77	-15,15	19,82	-10,63	11,49	-11,85
3	13,15	14,86	12,72	-10,18	9,32	-14,37
4	5,65	-7,67	9,58	-6,54	10,48	-10,76
5	11,33	-15,06	13,34	-10,95	12,02	-9,39
6	6,00	-8,84	11,12	-7,85	9,97	-12,39
7	11,24	-15,31	13,70	-11,74	13,94	-12,12
8	11,20	-15,25	12,72	-11,13	19,56	-17,77
9	7,34	-9,20	16,95	-15,63	14,46	-14,74

Tabulka 13: Přehled maximálních napětí ve směrech 12, 23 a 31 ve sloupu v MPa



Obrázek 60: Napětí ve směru 11 ve 3. vrstvě v MPa

ID vrstvy	11 tah	11 tlak	22 tah	22 tlak	33 tah	33 tlak
1	81,86	-87,96	15,08	-19,72	12,43	-24,14
2	65,37	-65,75	21,88	-23,55	15,29	-24,67
3	108,48	-105,66	29,97	-27,39	19,32	-30,28
4	118,16	-120,48	46,97	-42,51	26,43	-36,87
5	280,38	-267,07	47,13	-68,78	35,33	-46,7

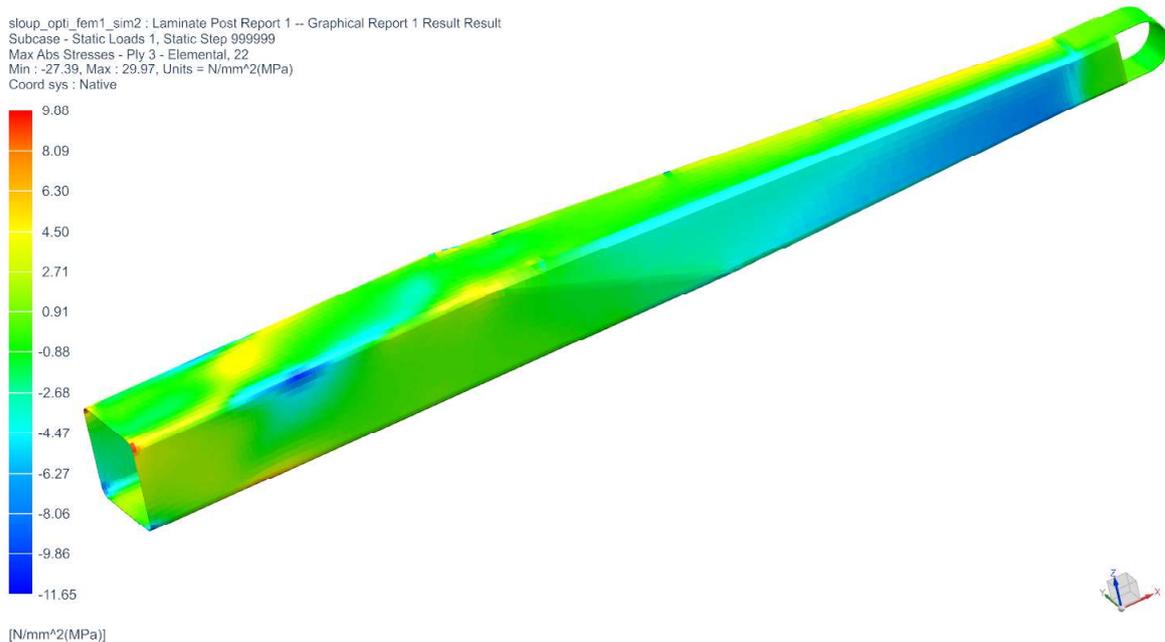
Tabulka 14: Přehled maximálních napětí ve směrech 11, 22 a 33 ve výztuže v [MPa]

### Vyhodnocení výztuhy

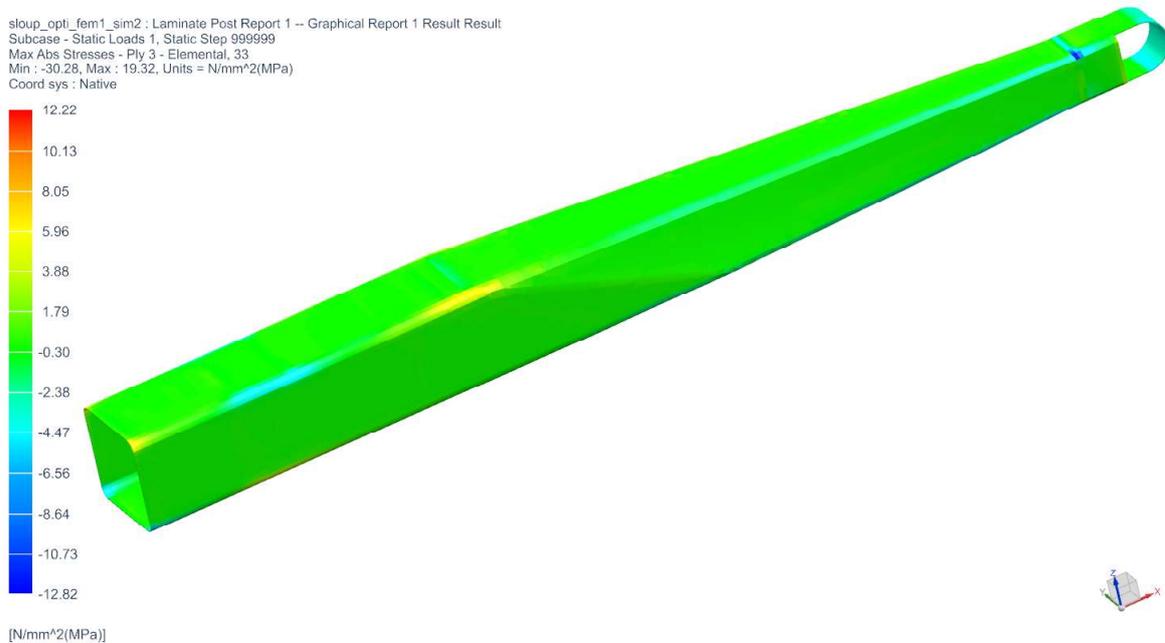
Obdobným postupem byla vyhodnocena výztuha sloupu, také s pozitivním výsledkem. Zajímavostí pozorovatelnou na obr. 65 je, že rozložení napětí věrně kopíruje tvar výztuhy a navíjeného oka.

Opět byla pomocí kritéria maximálního napětí zkontrolována napětí v jednotlivých souřadných směrech. Maximální hodnoty napětí jsou zaneseny v následujících tabulkách.

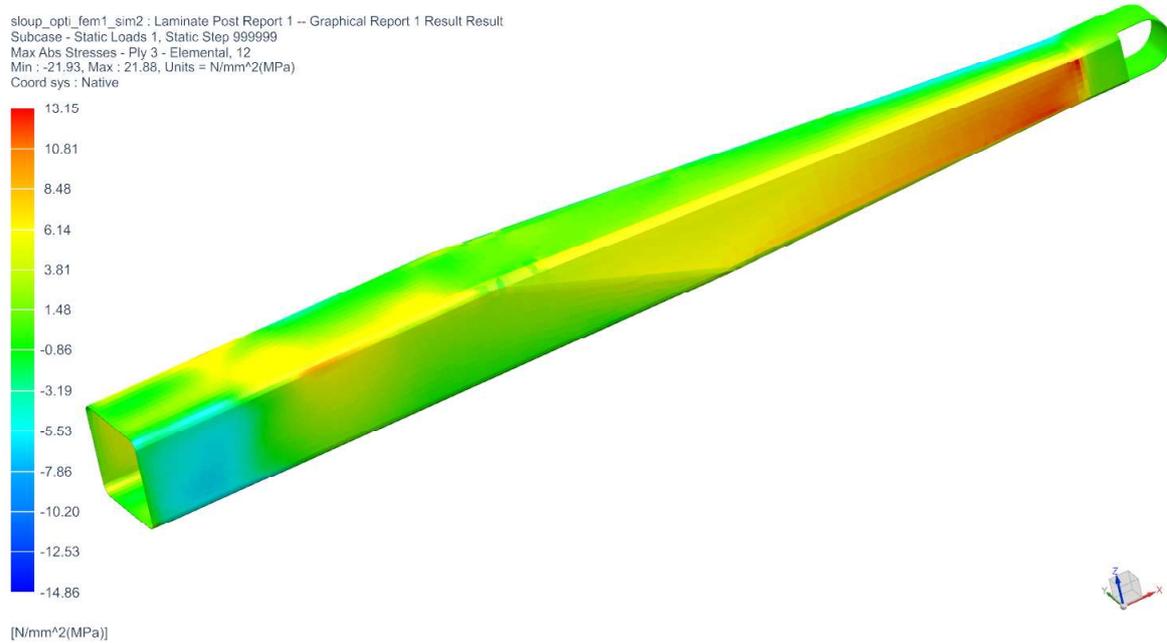
Opět byla napětí ve všech směrech shledána jako bezpečná.



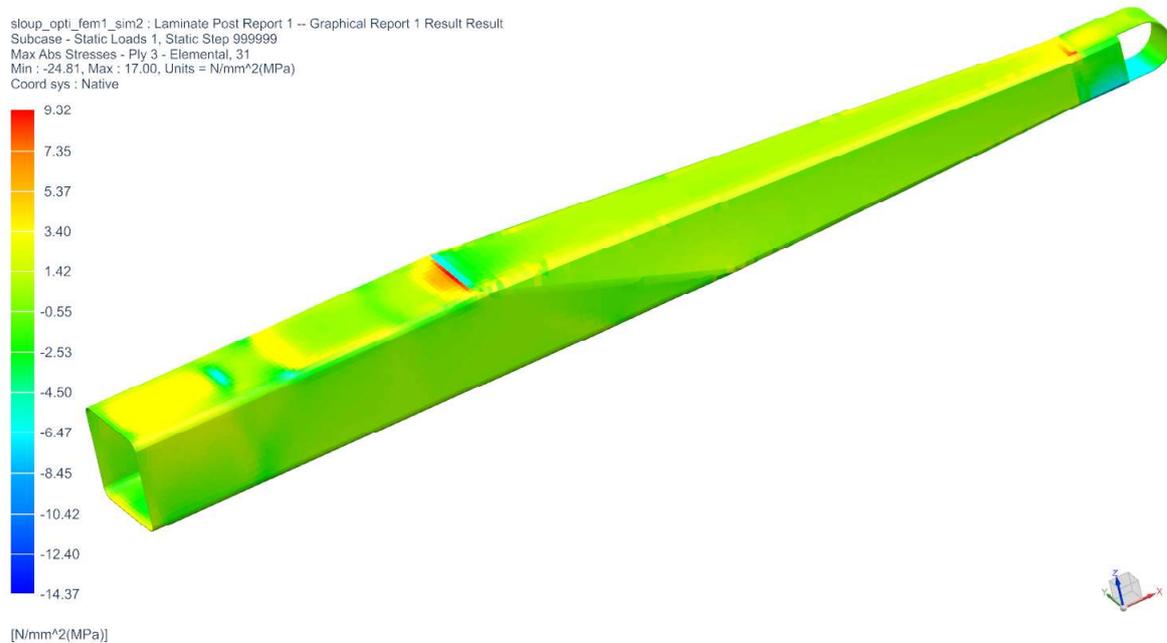
Obrázek 61: Napětí ve směru 22 ve 3. vrstvě v MPa



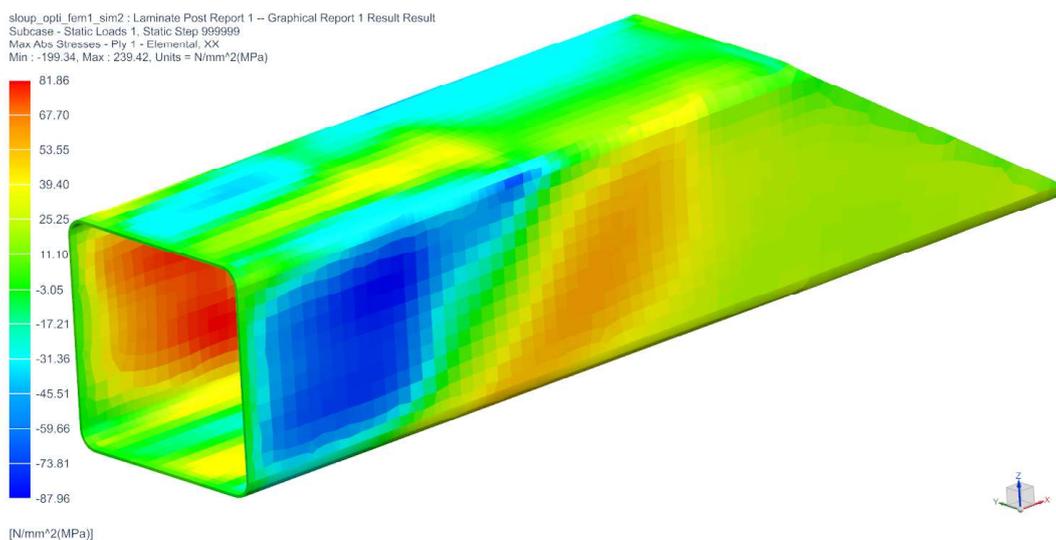
Obrázek 62: Napětí ve směru 33 ve 3. vrstvě v MPa



Obrázek 63: Napětí ve směru 12 ve 3. vrstvě v MPa



Obrázek 64: Napětí ve směru 13 ve 3. vrstvě v MPa



Obrázek 65: Napětí ve směru 11 ve vrstvě výztuhy v [MPa]

ID vrstvy	12 tah	12 tlak	23 tah	23 tlak	31 tah	31 tlak
1	9,31	-7,71	15,07	-16,23	14,96	-18,51
2	8,98	-8,79	21,13	-22,72	22,48	-20,76
3	13,14	-13,80	19,31	-20,16	17,00	-24,81
4	17,20	-17,08	29,73	-31,03	21,14	-22,74
5	36,28	-4,00	45,64	-42,61	39,71	-39,43

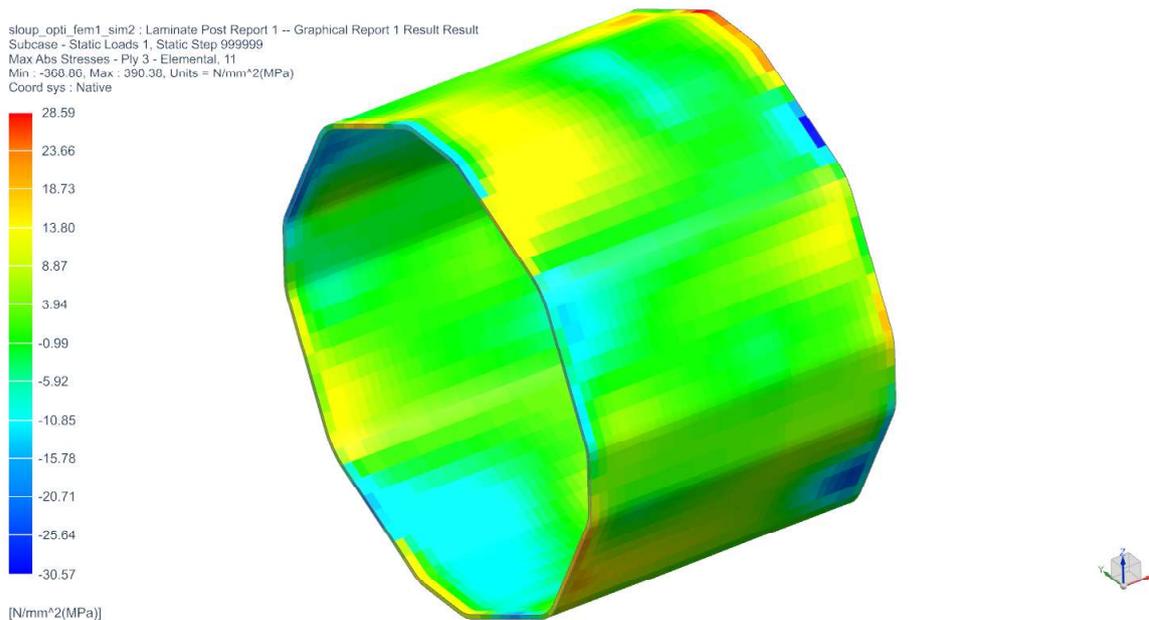
Tabulka 15: Přehled maximálních napětí ve směrech 12, 23 a 31 ve výztuže v [MPa]

Následujícím krokem bylo **vyhodnocení napětí v ovinu příruby**. Rozložení napětí je patrné z obr. 66. Dosahuje maximální hodnoty 28,59 MPa v tahu a -30,57 MPa v tlaku, což jsou hodnoty vzdálené od meze pevnosti. Obdobně je tomu i v ostatních souřadných směrech. Napětí jsou uvedena v souhrnné tabulkách 16 a 17 spolu s napětími oka.

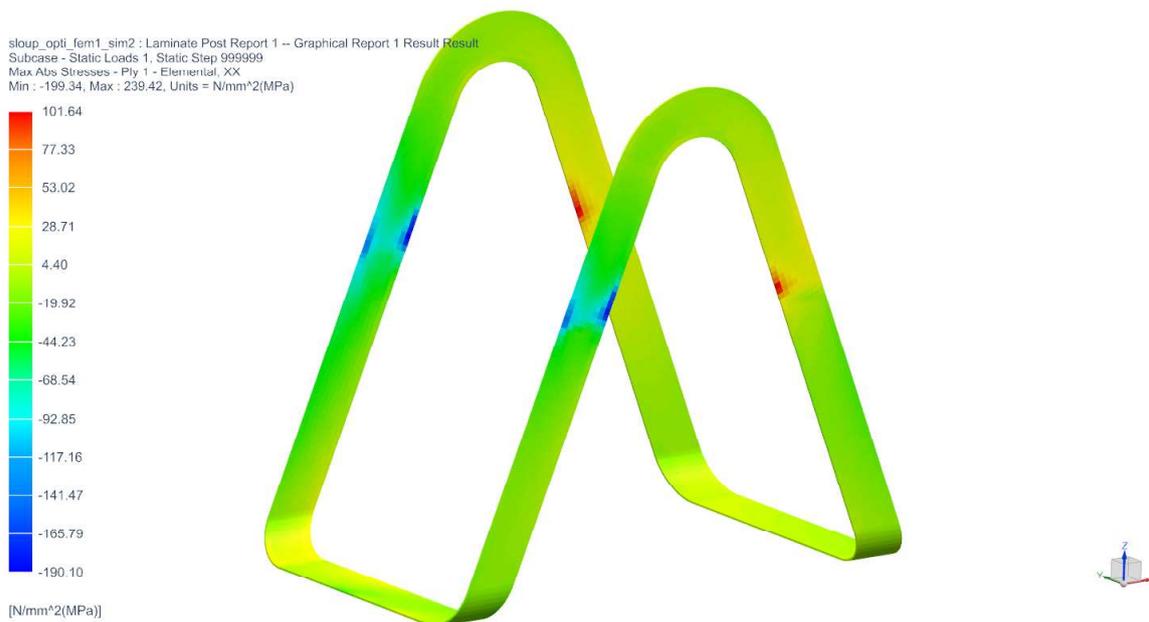
Poslední vyhodnocovanou kompozitní částí byl ovin navíjeného oka. Rozložení napětí v ovinu oka je zobrazeno na obr. 67. Dle logického předpokladu je jedna strana namáhána výrazně tahovým napětím, přičemž druhá tlakovým.

Ve směru 11, jehož napětí jsou zobrazena na obrázku mají maximální hodnotu 101,64 MPa v tahu a -190,10 MPa v tlaku. Což jsou hodnoty velmi bezpečné. Rozdíl mezi napětími z MKP a analytického výpočtu lze vysvětlit idealizací v případě analytického výpočtu. Ten totiž na rozdíl od MKP výpočtu nezohledňuje, že spodní plocha ocelové výztuhy oka je schopna přenášet smykové napětí, jelikož ji lze považovat za lepený spoj.

Vyhodnocení izotropních komponent bylo závěrečným krokem této napěťové analýzy. Následující obr. 68,69 zobrazují jejich napěťové stavy. Výztuhy byly navrženy z oceli s označením 15 230.7, která má dle [10]  $R_e=835$  MPa. Jedná se o velice nákladný materiál, který však byl užit v minimálním množství a jeho vysoká pevnost je přínosem



Obrázek 66: Napětí ve směru 11 v ovinu příruby v MPa



Obrázek 67: Napětí ve směru 11 v ovinu oka v MPa

pro konstrukci.

Pokud neuvažujeme napěťové špičky vzniklé sítí, dosahuje redukované napětí ve výztuze v bodě C 400 MPa, podobně ve výztuze bodu B.

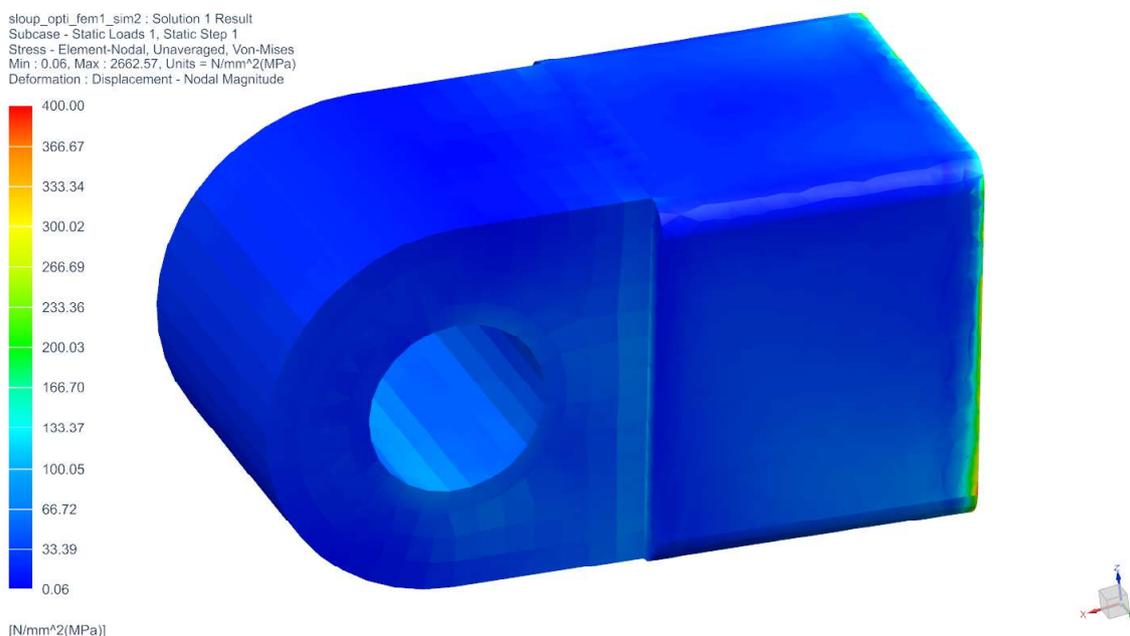
Redukované napětí v trubkách příruby dosahuje po zanedbání špiček v dotyku trubek a otočné základny hodnoty kolem 500 MPa.

vrstva	11 tah	11 tlak	22 tah	22 tlak	33 tah	33 tlak
příruba	28,59	-30,57	3,17	-3,25	0,86	-0,96
oko	101,64	-190,1	21,38	-20,1	8,74	-5,14

Tabulka 16: Přehled maximálních napětí ve směrech 11, 22 a 33 v přírubě a ovinu oka v MPa

vrstva	12 tah	12 tlak	23 tah	23 tlak	31 tah	31 tlak
příruba	10,56	-10,71	0,72	-0,68	2,53	-2,87
oko	20,31	-21,18	7,64	-12,77	17,66	-18,06

Tabulka 17: Přehled maximálních napětí ve směrech 12, 23 a 31 v přírubě a ovinu oka v MPa



Obrázek 68: Redukované napětí ve výztuze bodu C v MPa

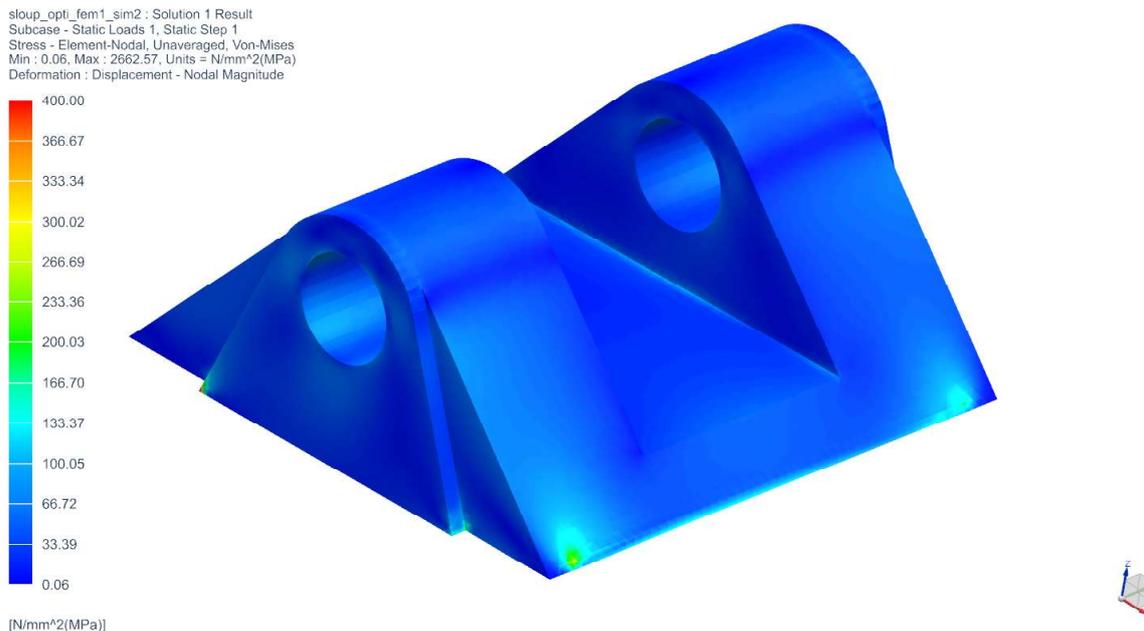
## 6.2 Statická napěťová analýza hlavního dílu výložníku

Podobně jako u sloupu byla i pro hlavní díl výložníku provedena statická napěťová analýza za účelem analýzy napětí v jednotlivých vrstvách.

### 6.2.1 Výpočtový model hlavního dílu výložníku

Obdobně jako v případě sloupu bylo třeba připravit výpočtový model - viz obr. 70.

K modelování nosníku výložníku byl zvolen zčásti odlišný přístup než u sloupu. Odlišnosti jsou pozorovatelné už na výpočtovém modelu. Plochy modelu byly rozděleny podle počtu vrstev, který bude na jednotlivé plochy aplikován. Následně byl model doplněn o objemové prvky - viz obr.71 .



Obrázek 69: Redukované napětí ve výztuze bodu B v MPa

### 6.2.2 Konečnoprvková síť hlavního dílu výložníku.

Stejně jako u sloupu byl i plošný model výložníku vysítován pomocí 2D prvků CQUAD(8). Po vysítování byly elementy zorientovány. Směr 11 zobrazují žluté šipky na obr. 72.

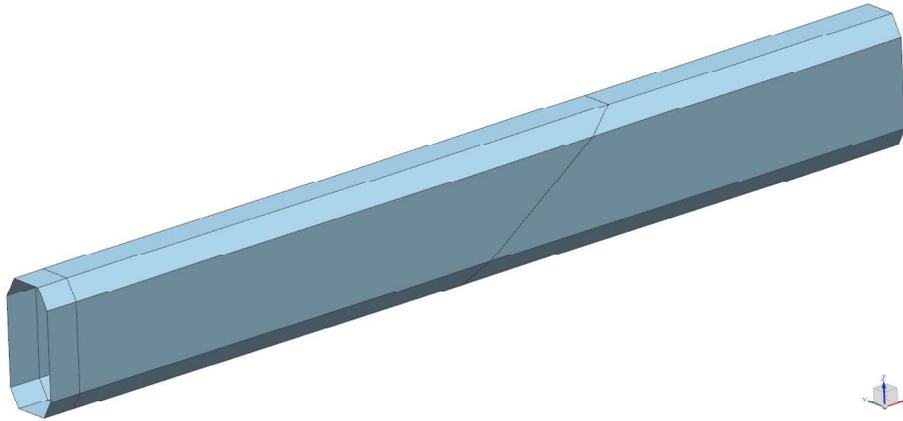
Na rozdíl od sloupu nebyla 2D síti přiřazena fyzikální vlastnost v podobě složení laminátu, ale byla užita funkce Global Layup. Myšlenkou tohoto postupu je přiřazení složení kompozitu jednotlivým nastřihamým plochám. Výhodou tohoto postupu je lepší zpracování přechodů mezi plochami s rozdílným počtem vrstev. V těchto přechodných partiích vytvoří preprocesor speciální elementy tvořené materiálem matrice. Zamezí tím vzniku výrazných napěťových špiček.

ID vrstvy	Materiál	Tloušťka [mm]	Úhel [°]	Vlákno
1	HS Uhlík	0.53	42	Tenax STS40F13 24K
2	HS Uhlík	0.25	90	Tenax STS40F13 24K
3	UHM Uhlík	1.61	0	Granoc XN-80-A2S
4	HS Uhlík	0.6	42	Tenax STS40F13 24K
5	UHM Uhlík	1.57	0	Granoc XN-80-A2S
6	HS Uhlík	0.6	43	Tenax STS40F13 24K
7	UHM Uhlík	1.98	0	Granoc XN-80-A2S
8	HS Uhlík	0.59	44	Tenax STS40F13 24K

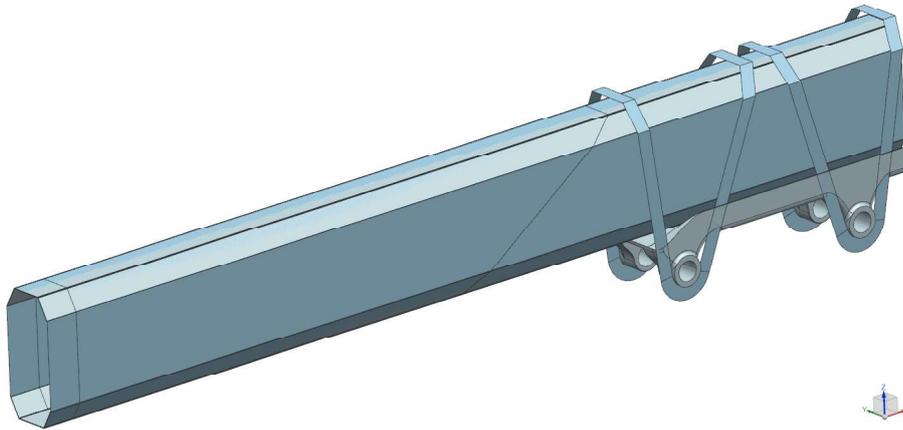
Tabulka 18: Základní skladba vrstev hlavního dílu výložníku

Podobně jako sloup byl i hlavní díl výložníku vyztužen výztuhou roznášející napětí. Ta byla navržena v následující skladbě - viz tabulka 19.

Po přiřazení skladeb byl laminát vysunut stejně jako u předchozích součástí. Na obr. 73 je vidět část se základní skladbou (modře) vyztužená výztuhou (červeně) a



Obrázek 70: Plošný model výložníku



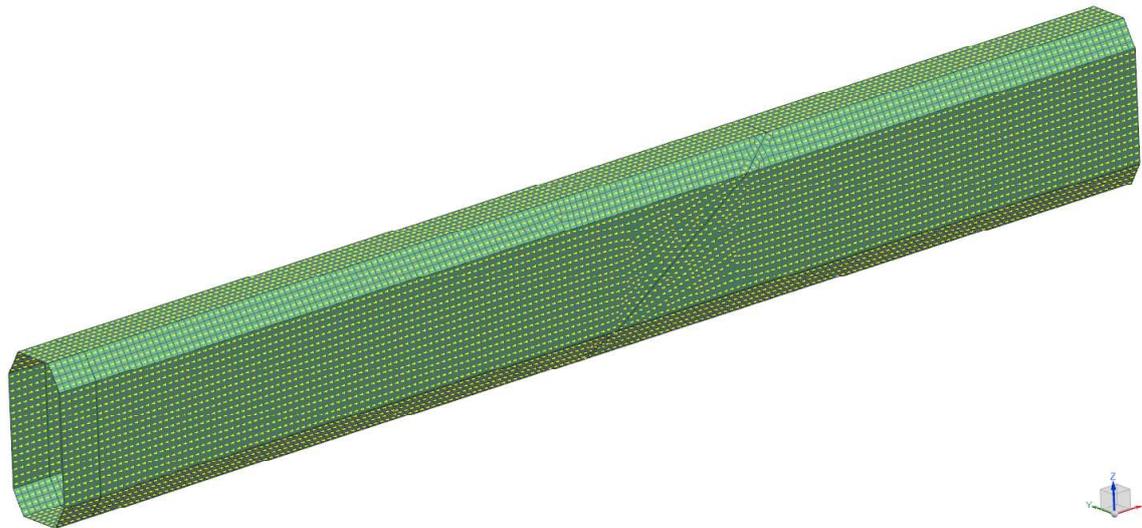
Obrázek 71: Model výložníku s objemovými prvky

ID vrstvy	Materiál	Tloušťka [mm]	Úhel [°]	Vlákn
1	HS Uhlík	1	45	Tenax STS40F13 24K
2	HS Uhlík	1	90	Tenax STS40F13 24K
3	HS Uhlík	1	45	Tenax STS40F13 24K
4	HS Uhlík	1	90	Tenax STS40F13 24K
5	HS Uhlík	1	45	Tenax STS40F13 24K

Tabulka 19: Skladba výztuhy výložníku

krátká výztuha pro vyztužení konce výložníku, tvořená 5 mm vrstvou vláken Tenax STS40F13 24K s orientací 90 °.

Stejně jako u sloupu byla navíjená oka vysítována pomocí 2D prvků CQUAD(8), zorientována a následně vysunuta. Postup zde nebude detailně popisován, neboť je identický.

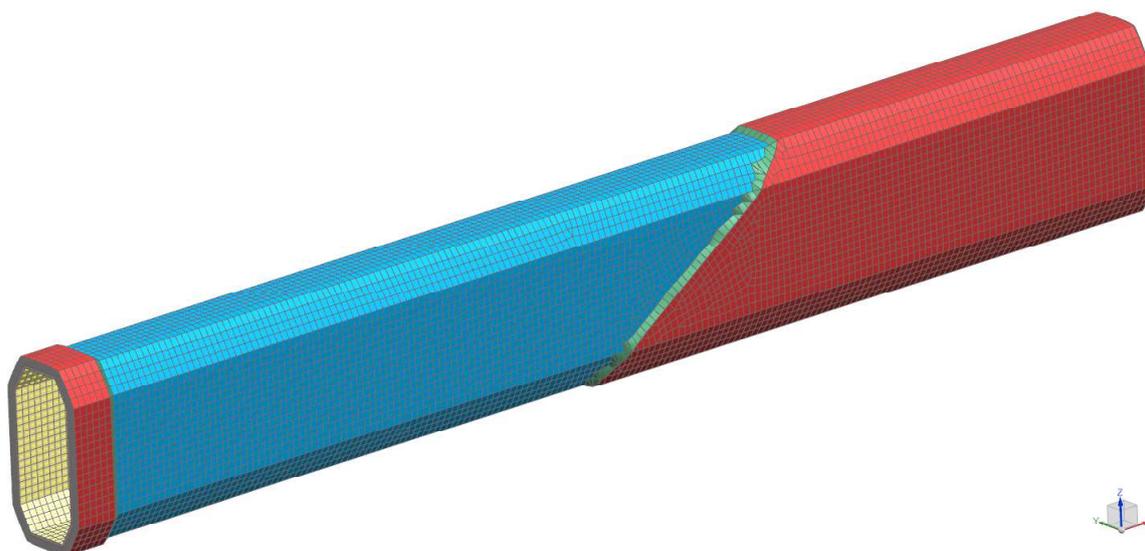


Obrázek 72: 2D síť výložníku

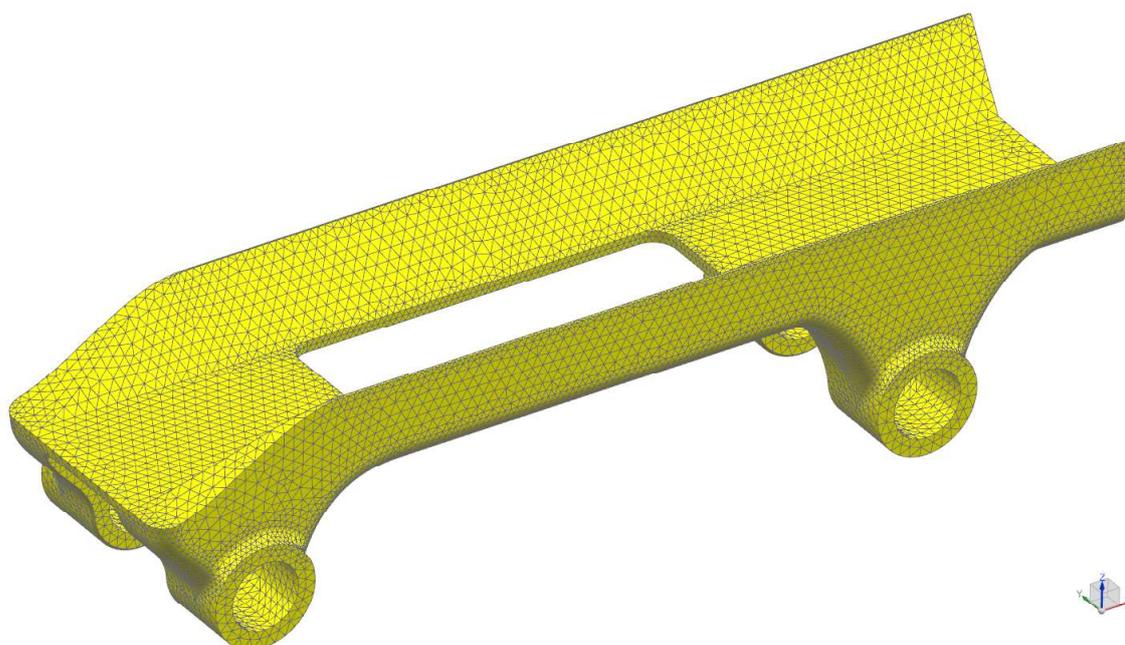
Dále byl vysítován objemový model ocelové výztuhy. Vzhledem ke složité geometrii dílu byla užita síť 3D prvků CTETRA(10) - viz obr. 74.

Poslední připravovanou sítí byla 3D síť kluzných plastových pásů. Jde o klasickou taženou síť tělesa jednoduchého tvaru, proto bylo užito prvků CHEXA(20) (na obr. 75 oranžově).

Takto vysítovaný model výložníku byl připraven pro vstup do simulace.



Obrázek 73: 3D síť výložníku

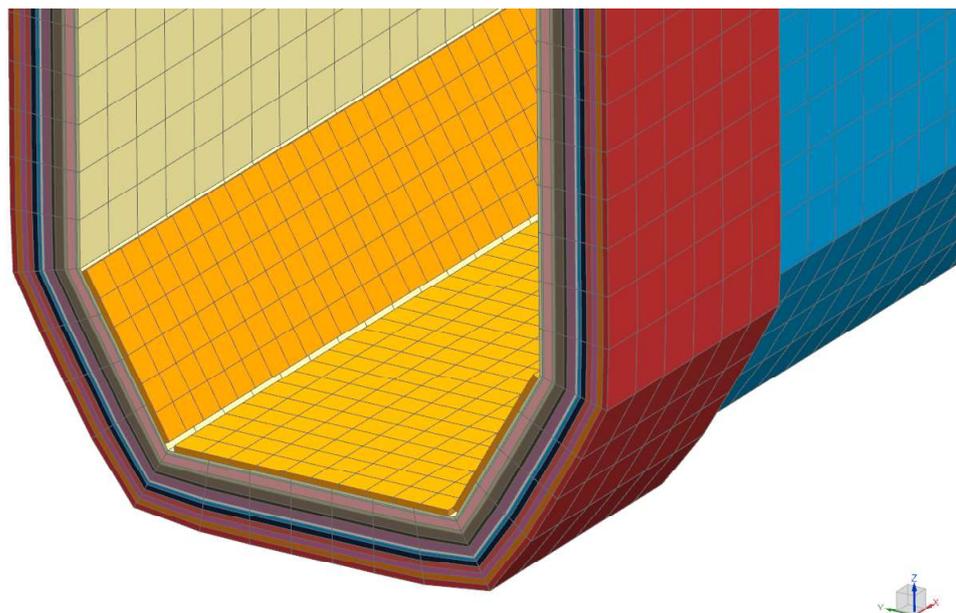


Obrázek 74: 3D síť ocelové výztuhy v bodě C a D

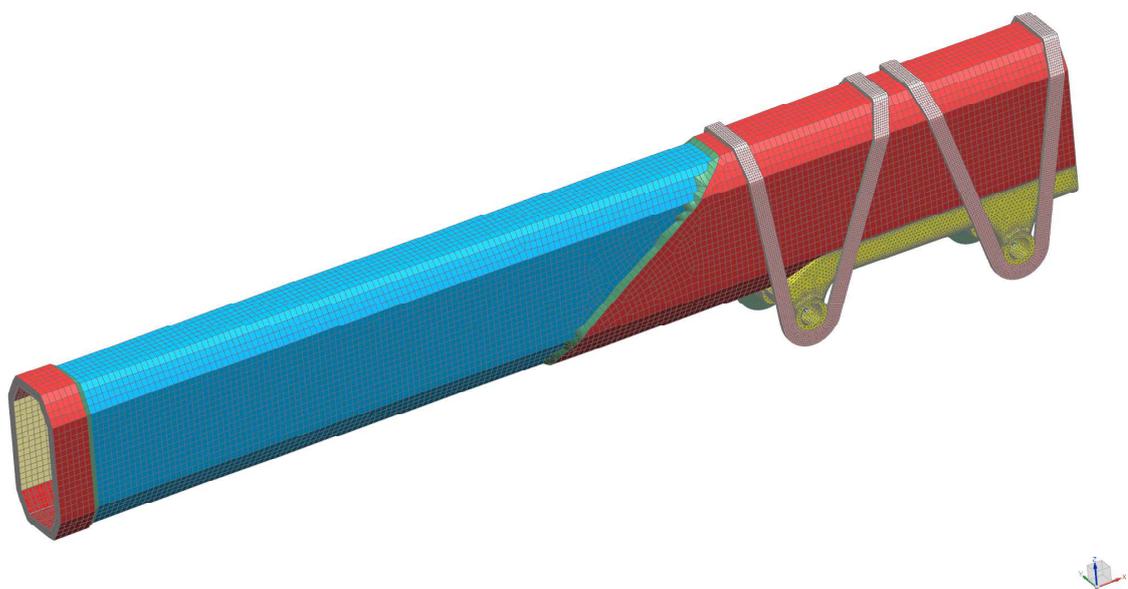
### 6.2.3 Simulace hlavního dílu výložníku

Následně bylo opět třeba v simulaci spojit síť tak, jako budou ve skutečnosti spojena tělesa. Díky využití Global Layup nebylo třeba spojovat síť jednotlivých kompozitních vrstev.

Nicméně bylo nutné spojit výztuhu a oko se základním dílem. Spojení bylo prove-



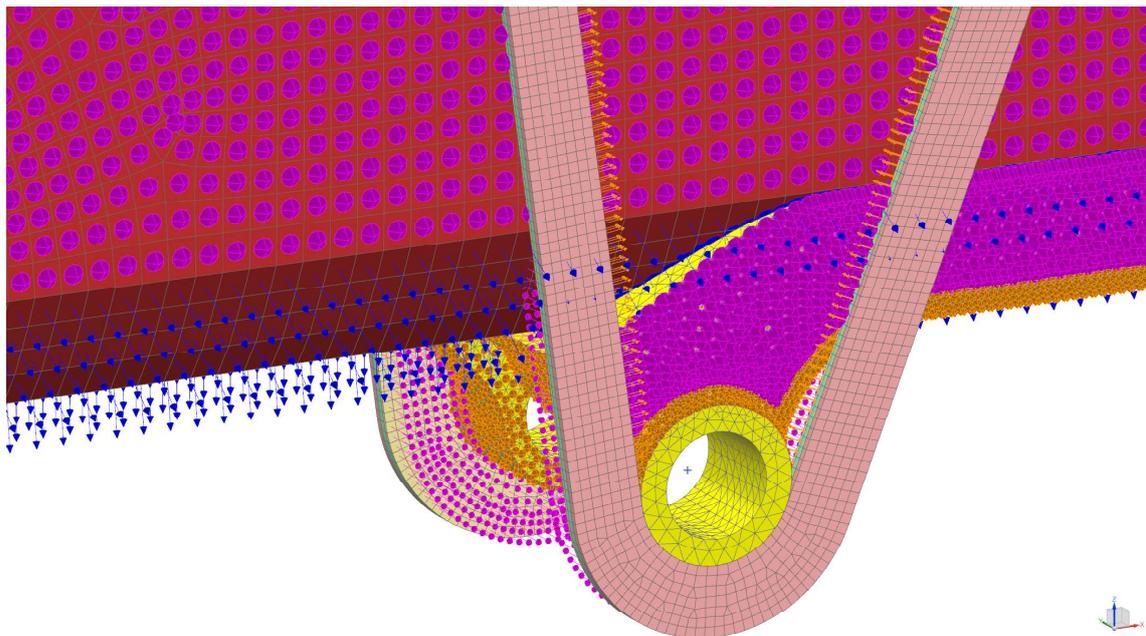
Obrázek 75: 3D síť plastových pásů



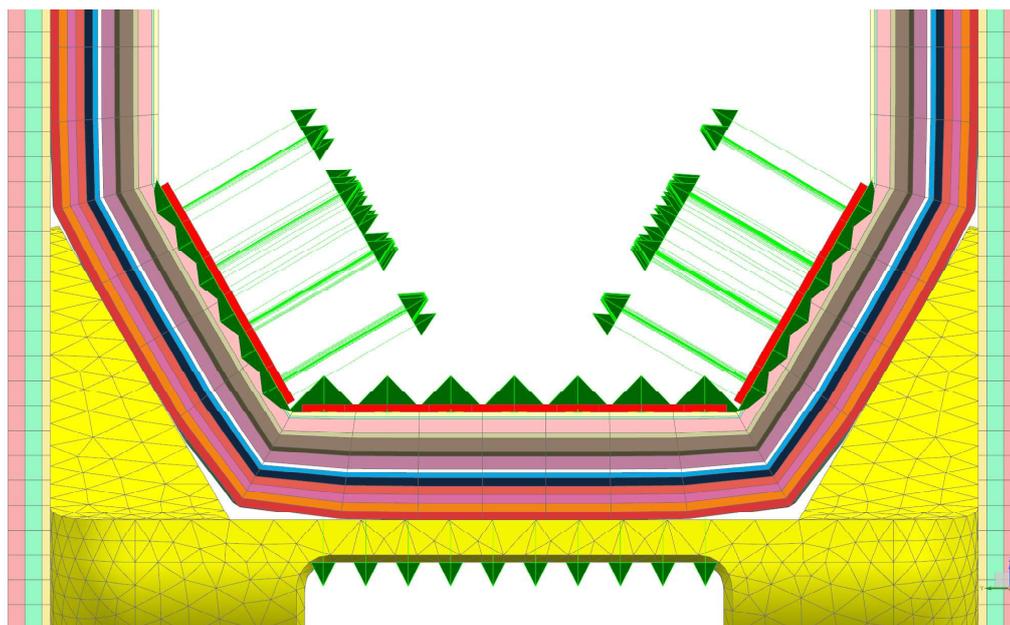
Obrázek 76: Vysítovaný model výložníku

deno pomocí funkce Surface-to-Surface Gluing. Fialové šipky na obr. 77 reprezentují spojení základního dílu výložníku či povrchu ocelové výztuhy a návinnu oka, modré šipky ukazují spojení ocelové výztuhy a základního dílu výložníku, oranžové pak spojují povrch výztuhy a ovinu oka.

Stejně byly spojeny síť plastových pásů a vnitřního povrchu základního dílu výložníku. Spojení je reprezentováno zelenou šipkou - viz obr. 78.



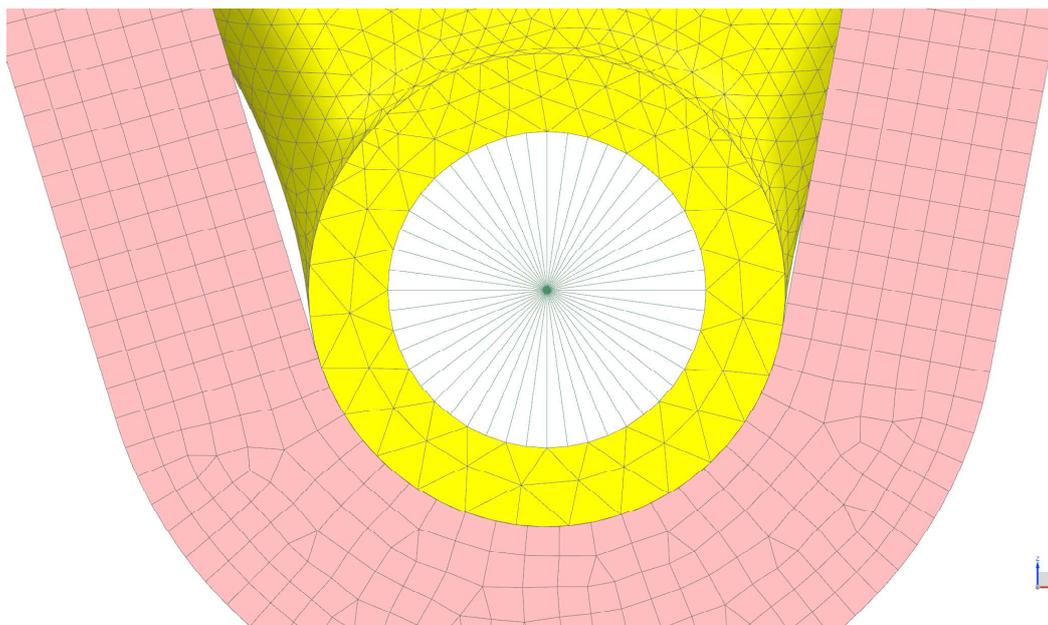
Obrázek 77: Gluing - oko C a D



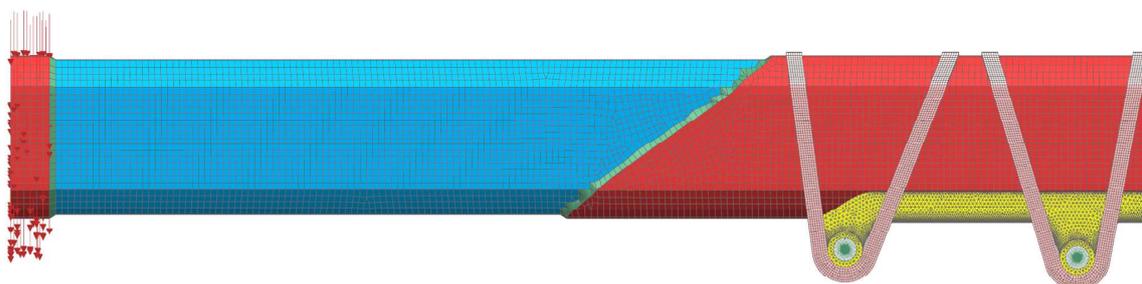
Obrázek 78: Gluing - kluzný plastový pás

Posledním krokem přípravy výpočtu bylo uchycení v prostoru a obtížení. Výložník byl uchycen v osách, kterými procházejí spojovací čepy. Opět byly využity rigidní růžice s tím, že okrajové podmínky byly aplikovány na jejich středy - viz obr. 79.

Zatížení bylo aplikováno pouze na koncovou část, aplikace zatížení pouze na tento úsek nosníku je z výpočtového hlediska konzervativní. Velikost aplikovaného zatížení je 25 000 N - viz obr. 79.



Obrázek 79: Rigidní růžice uložení výložníku

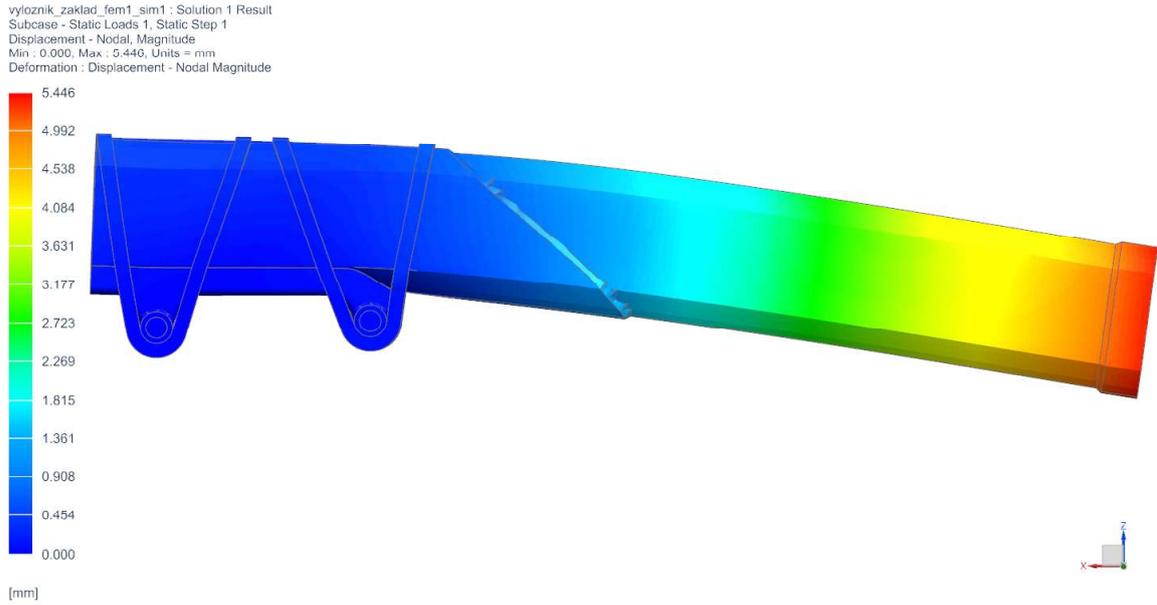


Obrázek 80: Síla aplikovaná na hlavní díl výložníku

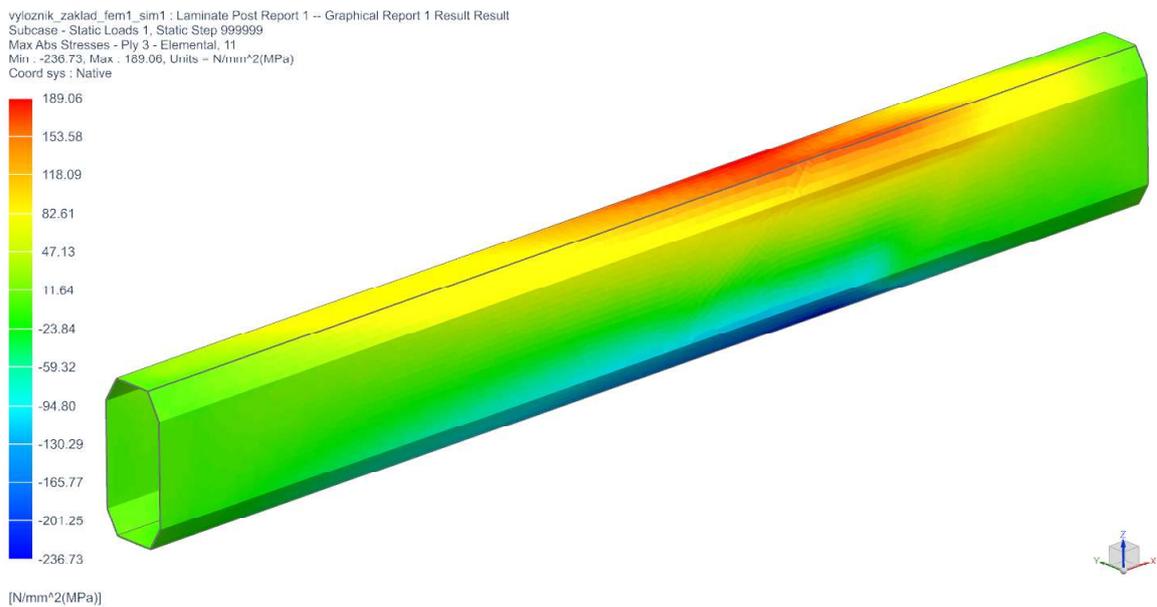
#### 6.2.4 Vyhodnocení hlavního dílu výložníku

Prvním krokem vyhodnocení výpočtu byla opět kontrola posunutí, dosažená maximální hodnota 5,45 mm vyhovuje lineárnímu chování výpočtu.

Následně byla také provedena kontrola napětí v kompozitu pomocí aplikace podmínky maximálních napětí. Následující obr. 82 - 86 ukazují rozložení napětí v jednotlivých směrech v náhodně vybrané 3. vrstvě (podélná vlákna).



Obrázek 81: Posunutí výložníku



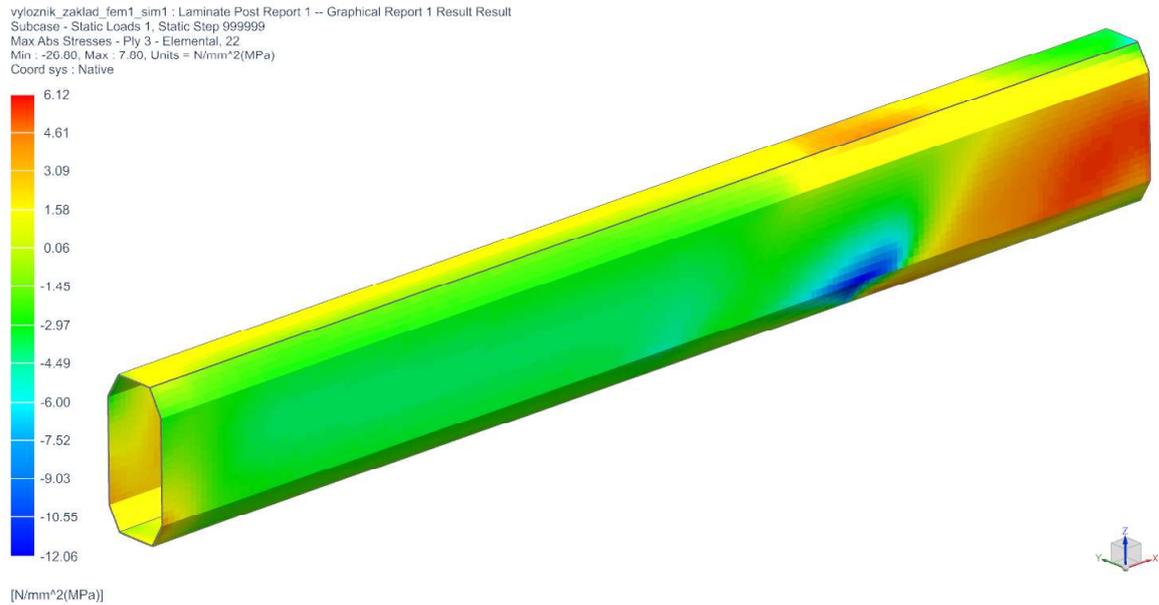
Obrázek 82: Napětí ve směru 11 ve 3. vrstvě v MPa

Dle očekávání se na horní straně nosníku vyskytuje spíše tahové napětí a na spodní straně spíše tlakové napětí, což je patrné zejména ve směru 11 - viz tabulky 20 - 21.

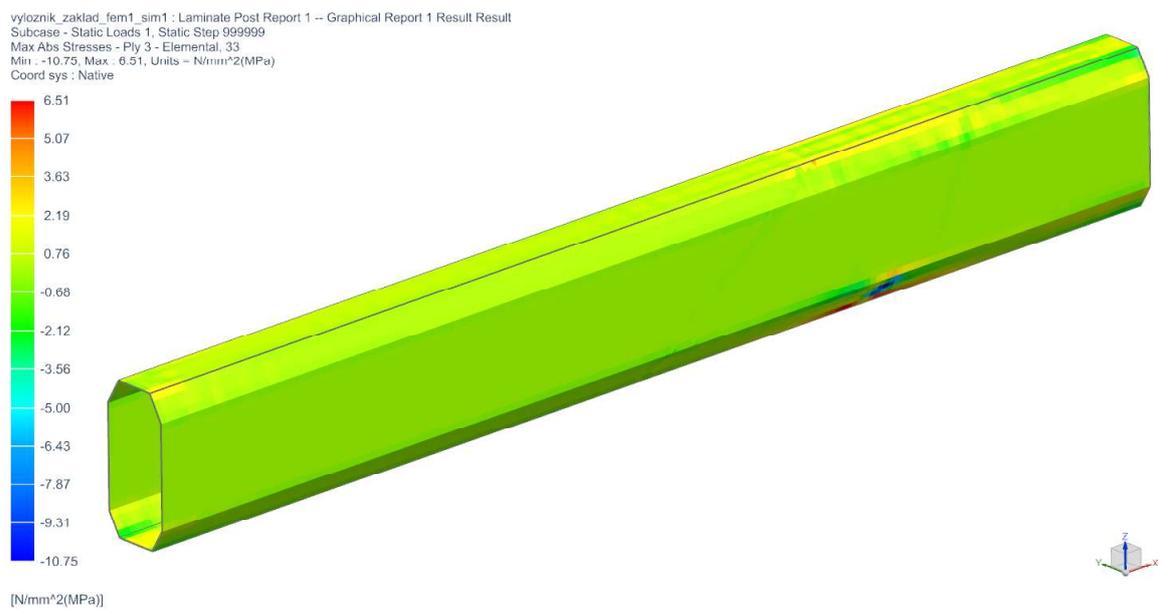
Kromě vyhodnocení základní části výložníku bylo vyhodnoceno i napětí ve výztuze. Napětí ve výztuze opět reaguje na polohu výztuhy a ovinu oka - viz obr. 86.

Následně bylo také vyhodnoceno napětí ovinu navíjených ok - viz obr. 87

Vyhodnocení napětí v ocelové výztuze bylo posledním krokem vyhodnocení napě-



Obrázek 83: Napětí ve směru 22 ve 3. vrstvě v MPa



Obrázek 84: Napětí ve směru 33 ve 3. vrstvě v MPa

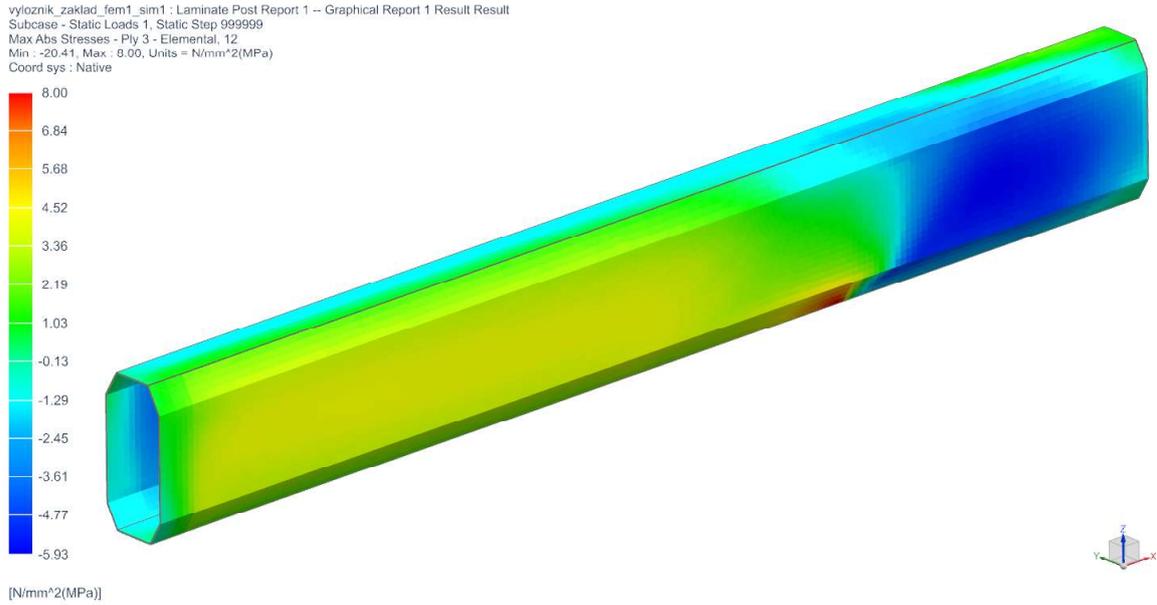
ťové analýzy. Vzhledem k  $R_e=835$  MPa, kterou disponuje použitá ocel s označením 15 230.7, je maximální dosažené redukované napětí 485 MPa vyhovující.

<b>ID vrstvy</b>	<b>11 tah</b>	<b>11 tlak</b>	<b>22 tah</b>	<b>22 tlak</b>	<b>33 tah</b>	<b>33 tlak</b>
1	91,07	-119,05	7,57	-14,50	5,32	-9,48
2	105,95	-211,37	4,78	-6,79	6,30	-10,05
3	189,06	-236,73	6,12	-12,06	6,51	-10,75
4	80,73	-96,60	7,05	-11,37	6,52	-11,46
5	198,13	-266,02	5,67	-9,07	6,01	-12,21
6	79,79	-89,83	6,95	-12,06	5,61	-13,03
7	211,29	-345,22	5,38	-9,53	5,1	-13,91
8	66,62	-135,49	4,76	-9,17	4,64	-14,79
9	78,5	-84,63	6,86	-14,22	4,55	-15,27
10	76,86	-89,06	6,76	-15,86	4,26	-16,03
11	81,20	-150,94	4,06	-18,97	4,43	-17,16
12	77,86	-139,79	7,52	-24,32	5,22	-21,18
13	69,44	-253,09	4,86	-31,77	6,06	-26,2
14	102,79	-234,25	9,92	-39,20	7,49	-35,96

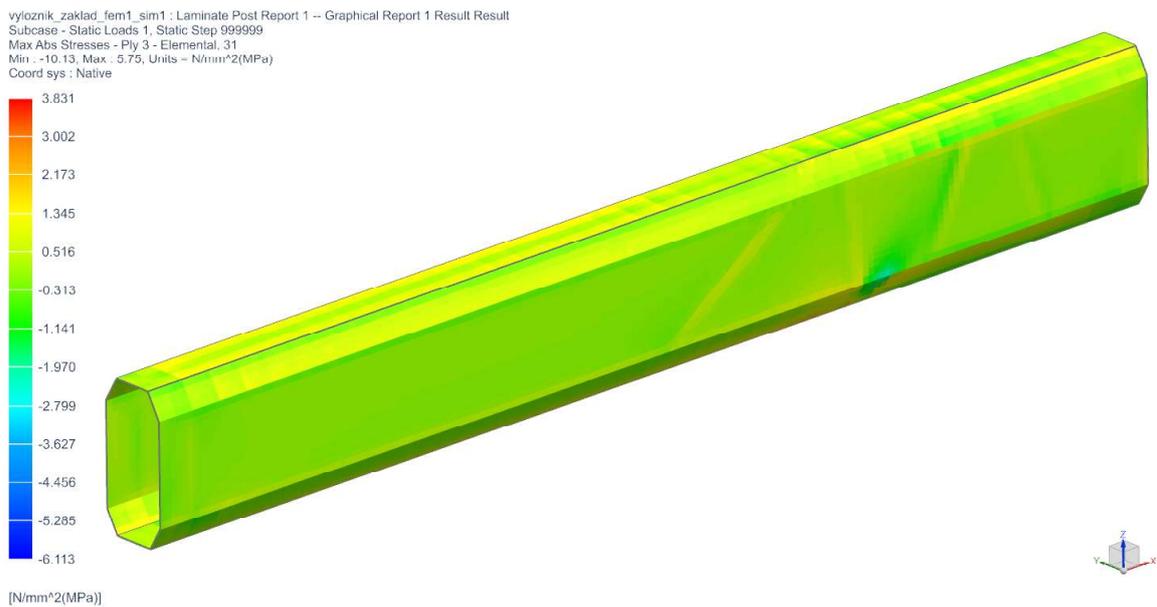
Tabulka 20: Přehled maximálních napětí ve směrech 11, 22 a 33 ve výložníku v MPa

<b>ID vrstvy</b>	<b>12 tah</b>	<b>12 tlak</b>	<b>23 tah</b>	<b>23 tlak</b>	<b>31 tah</b>	<b>31 tlak</b>
1	4,47	-5,13	3,73	-3,61	4,63	-5,63
2	5,57	-7,76	3,81	-3,39	4,60	-4,47
3	8,00	-5,93	5,88	-5,01	3,83	-6,11
4	3,71	-3,29	6,71	-2,84	4,60	-6,72
5	7,61	-5,85	7,17	-6,34	2,27	-8,13
6	3,43	-2,96	7,91	-3,60	4,49	-8,24
7	8,24	-5,78	8,46	-7,43	2,45	-10,34
8	8,04	-5,36	8,72	-7,44	3,19	-11,58
9	4,44	-2,94	9,03	-4,56	5,75	-10,20
10	4,96	-2,53	9,21	-4,5	7,27	-12,12
11	5,32	-9,63	11,78	-4,02	13,32	-11,5
12	8,10	-2,51	12,83	-7,50	11,39	-13,62
13	5,58	-12,03	14,24	-5,89	15,96	-13,72
14	15,18	-6,4	24,72	-12,67	18,15	-19,54

Tabulka 21: Přehled maximálních napětí ve směrech 12, 23 a 31 ve výložníku v MPa



Obrázek 85: Napětí ve směru 12 ve 3. vrstvě v MPa

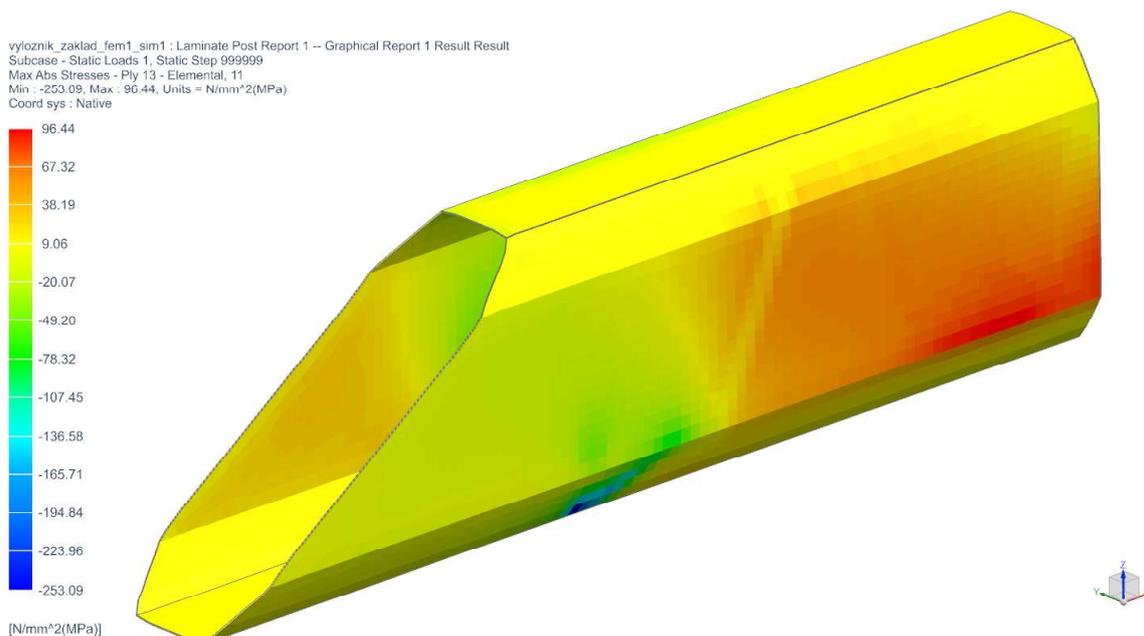


Obrázek 86: Napětí ve směru 13 ve 3. vrstvě v MPa

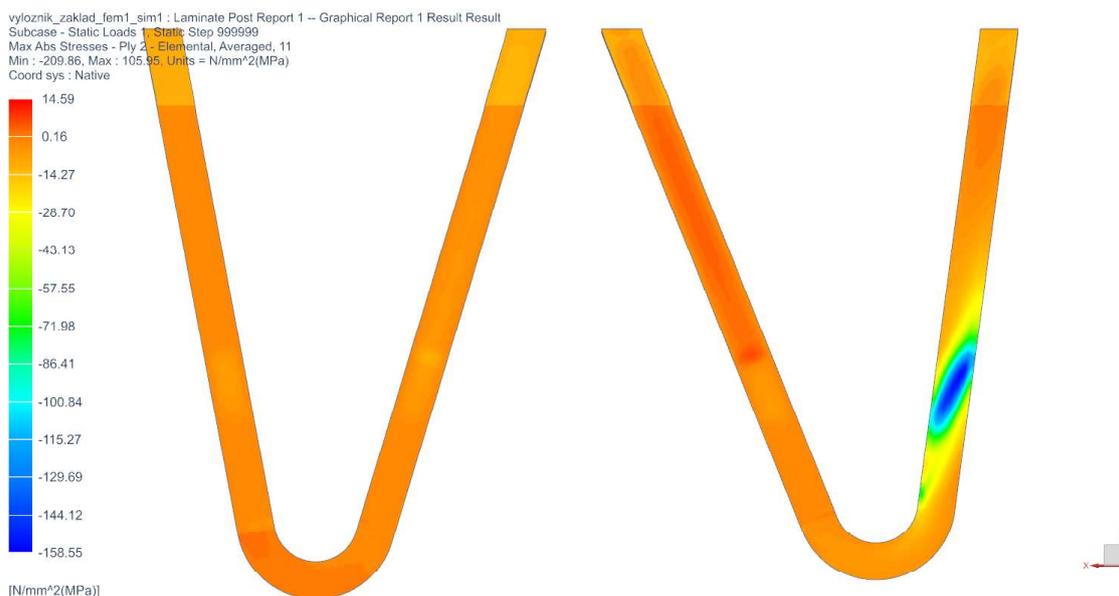
### 6.3 Nelineární statická analýza výložníku

Cílem této části MKP výpočtu nebylo zjištění napěťových stavů v kompozitním materiálu, ale určení velikosti kontaktních tlaků vznikajících ve styku plastových a plechových pásů.

Nelinearita výpočtu plyne z kontaktu, který je řešen iteračně.



Obrázek 87: Napětí ve směru 11 ve 13. vrstvě v [MPa]

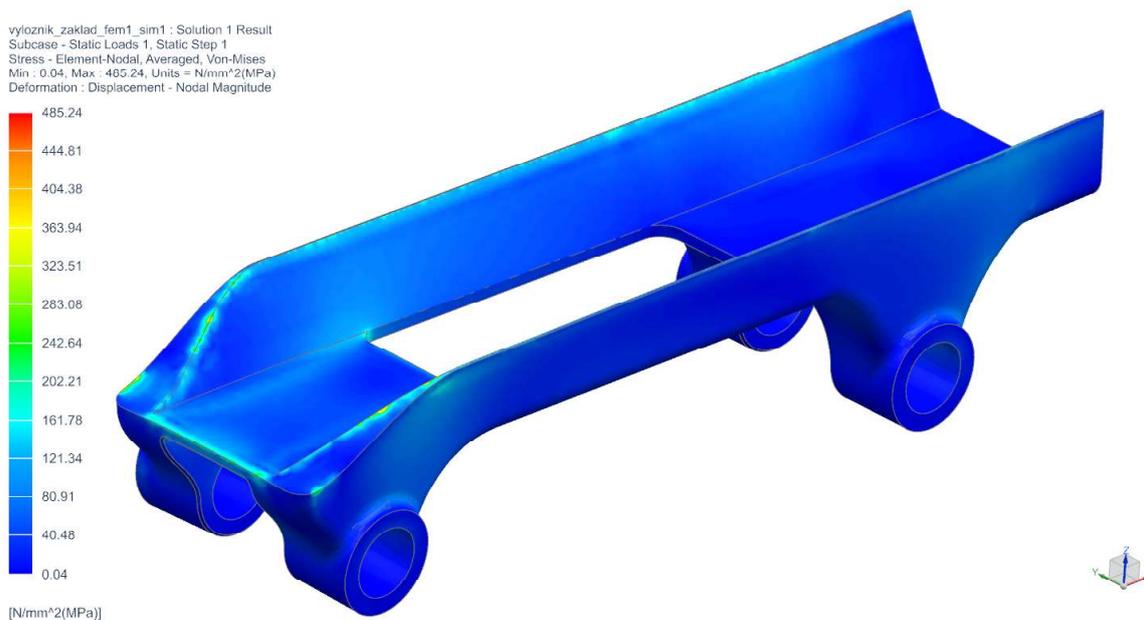


Obrázek 88: Napětí ve směru 11 ovinu oka v MPa

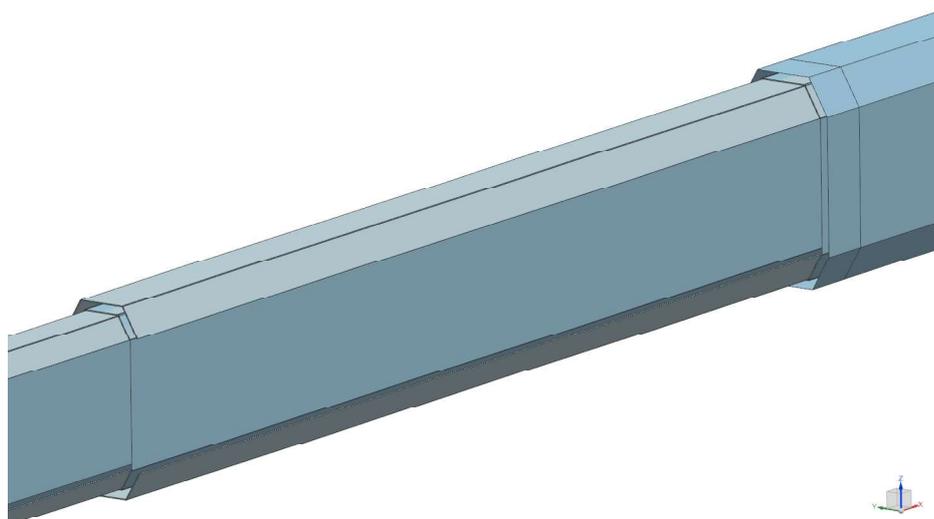
### 6.3.1 Výpočtový model teleskopického výložníku

Účelu výpočtu odpovídá i výpočtový model. Byly z něj vypuštěny součásti, které nemají výrazný podíl na tuhosti celého nosníku. Nebyly tedy uvažovány síť ovinu ok a ocelové výztuhy. Tím se významně zmenšila síť popisující hlavní díl výložníku.

Nicméně model je jinak velmi podobný předchozím výpočtovým modelům. Opět se skládá z plošných a objemových modelů - viz obr. 89.



Obrázek 89: Redukované napětí ve výztuze bodu C a D v MPa

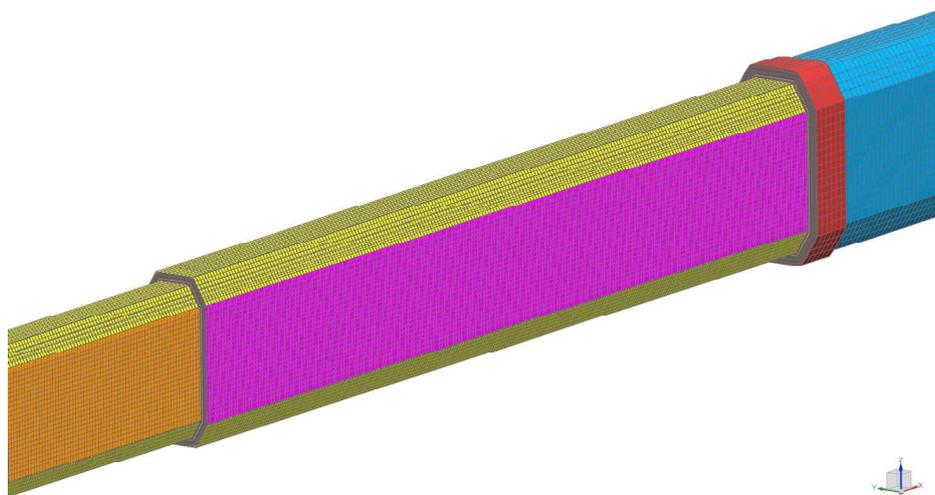


Obrázek 90: Výpočtový model teleskopického výložníku

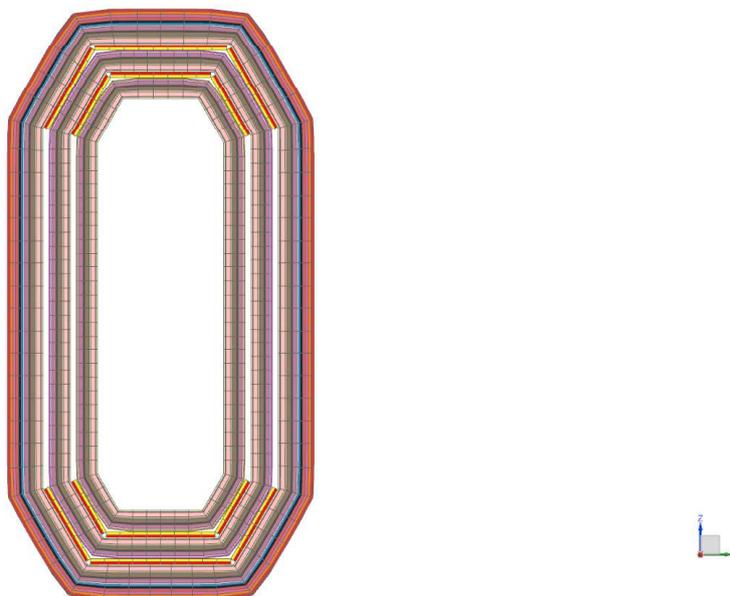
### 6.3.2 Konečnoprvková síť teleskopického výložníku

Taktéž identicky byla zpracována síť reprezentující kompozitní materiál. Po vysítování ploch 2D sítí a jejich zorientování byl kompozit podle příslušné skladby vysunut do podoby 3D elementů - viz obr. 90.

Jak je patrné z obrázků byly, vysítovány všechny 3 segmenty teleskopického výložníku. Všechny byly opatřeny prvky kluzné dvojice. Výsledkem byla skladba dle následujícího obr. 92.



Obrázek 91: 3D síť výložníku

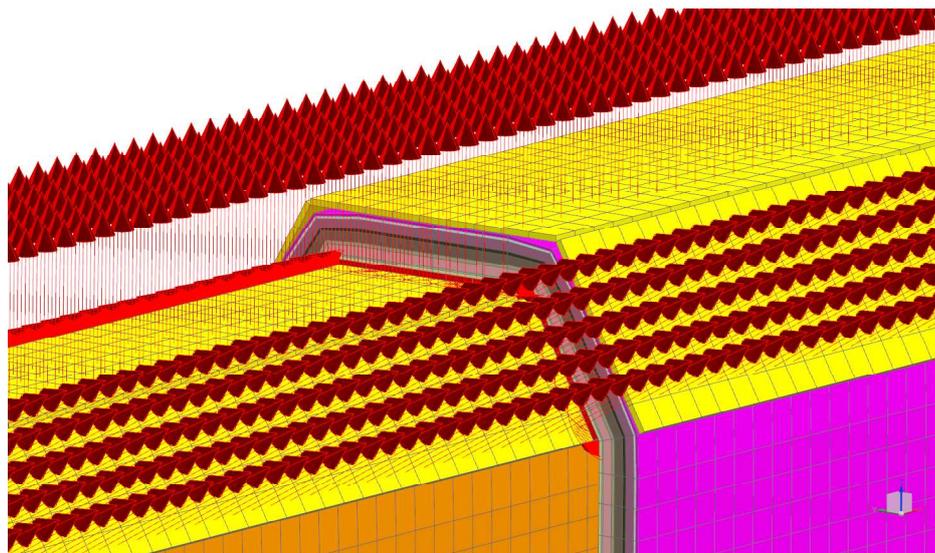


Obrázek 92: 3D síť výložníku - kluzné dvojice

### 6.3.3 Simulace teleskopického výložníku

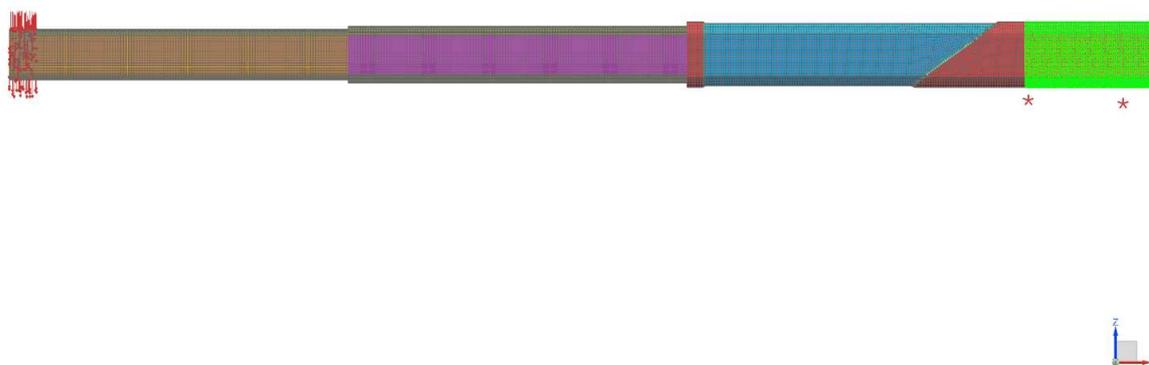
Identicky jako v případě základního dílu výložníku byly plastové a plechové pásy spojeny se sítí kompozitu. Na dotykové plochy kluzných elementů byla aplikována funkce Surface-to-Surface Contact. Jde o obdobu funkce Surface-to-Surface Gluing, ale na rozdíl od ní připouští vzájemné odlehnutí stykových ploch. Průběh výpočtu je řízen na základě snahy o vyrovnaní reakčních sil. Výpočet tedy probíhá v krocích (iteracích), tudíž je výrazně náročnější na výpočetní výkon, neboť po sestavení matice tuhosti probíhá výpočet několikrát. Zejména z tohoto důvodu byl model oproštěn od sítí navíjených ok a ocelové výztuhy. Kontakt reprezentují červené šipky na obr. 93.

Pro vyhodnocení kontaktních tlaků také nebylo třeba komplikovat výpočet přesným



Obrázek 93: 3D síť výložníku - kontakt

upínáním výložníku v prostoru. Jak popisuje obr. 94, byl upnut za plochu rozměrově odpovídající ocelové výztuže. Upnutí odebírající všechny stupně volnosti je znázorněno zeleně. Zatěžující síla je znázorněna pomocí červených šipek.

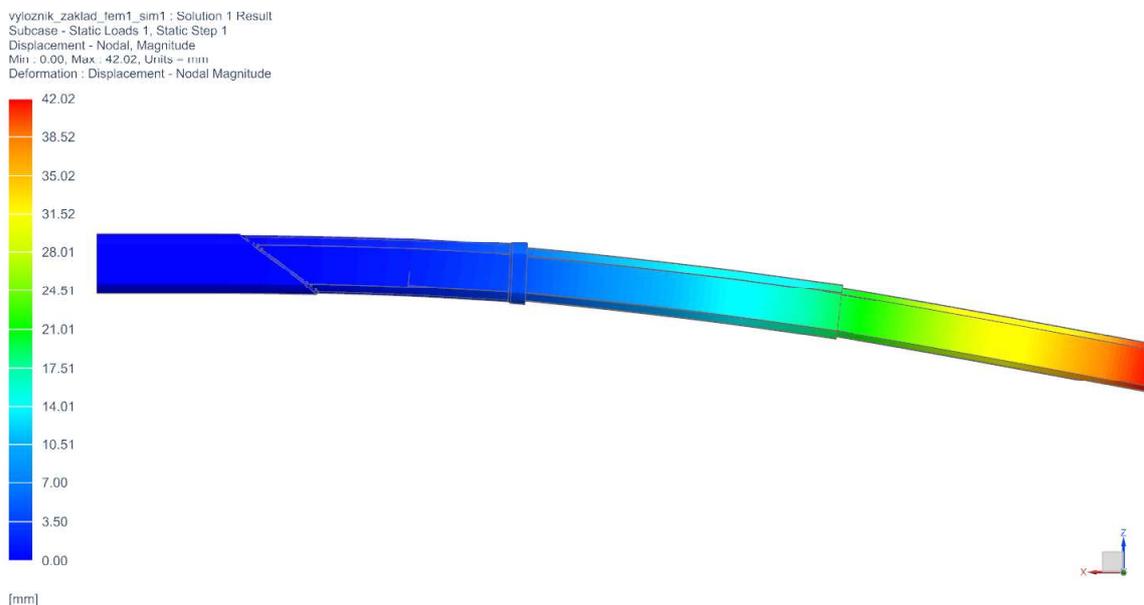


Obrázek 94: 3D síť výložníku - zatížení

Stejně jako ve všech předchozích výpočtech nebyl uvažován vliv gravitace, neboť je vzhledem k vlastním hmotnostem částí jeřábu zanedbatelná oproti zatížení od břemene.

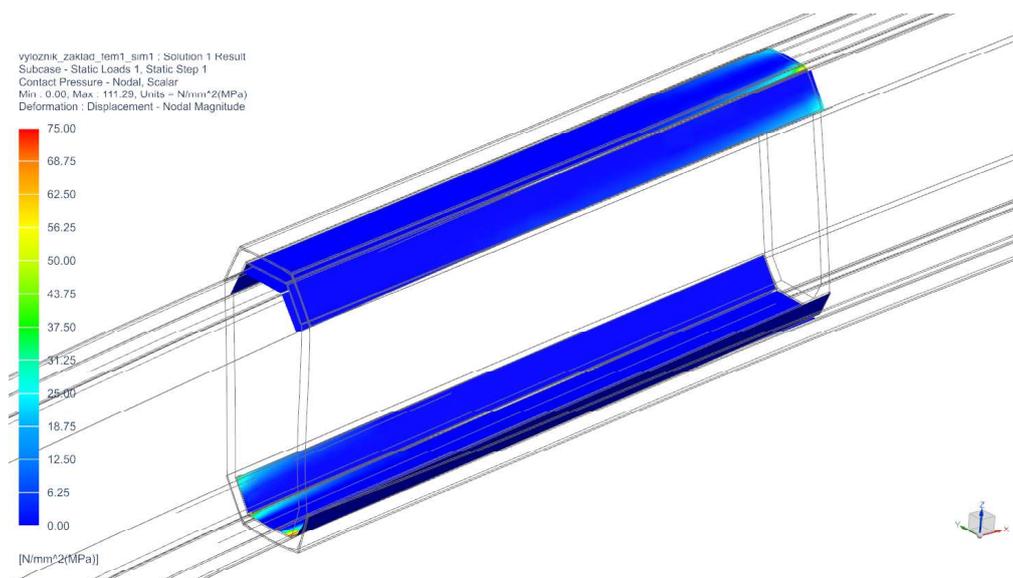
### 6.3.4 Vyhodnocení teleskopického výložníku

Stejně jako u předcházejících součástí byla prvním krokem vyhodnocení kontrola posunutí. Ta ovšem v tomto kroku nemá přílišný význam vzhledem k ne zcela přesně provedenému upnutí v prostoru, které posunutí ovlivní zásadním způsobem - viz obr. 95.



Obrázek 95: Teleskopický výložník - posunutí

Maximální hodnota posunutí takto postaveného výpočtu dosahuje 42,02 mm. Dále byl vyhodnocen kontaktní tlak. Použitý kluzný plast nese označení ZX-100K, je vyráběn a dodáván českou firmou Wolko-plast v různých tloušťkách. Pro aplikaci takto tenkých desek (nominální tloušťka desky je 2 mm) není dle informací výrobce třeba dodržovat striktně hodnoty dovoleného zatížení v tlaku. Deska je natolik tenká, že neumožní vznik jiné než jednoosé tlakové napjatosti. Jak lze pozorovat na následujícím obr. 96, kontaktní tlak dosahuje 75 MPa, což je nevyhovující dle materiálového listu, který je připojen jako PŘÍLOHA A. Nicméně po konzultaci se zástupcem dodavatele bylo zatížení uznáno jako přípustné.

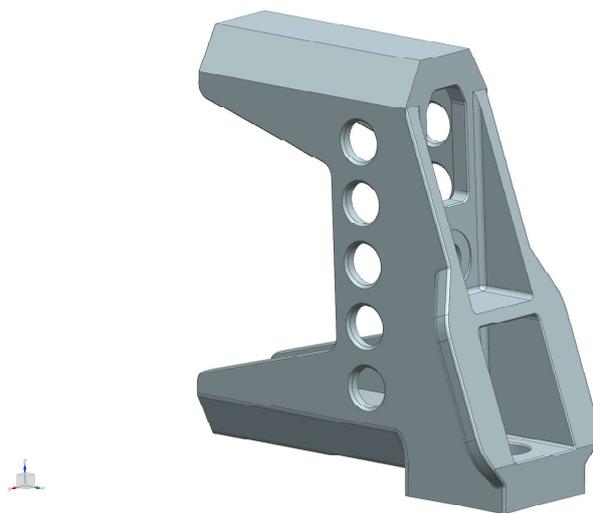


Obrázek 96: Teleskopický výložník - kontaktní tlak

## 6.4 Statická napěťová analýza koncovky výložníku

Dále byl proveden MKP výpočet ocelové koncovky, která má za úkol roznášet napětí z kotevního bodu jeřábového háku do kompozitního výložníku. Zároveň bylo žádoucí minimalizovat hmotnost koncovky. Z toho důvodu byla na základě výsledků prvotních MKP výpočtů vylehčena. Nabízelo se využití topologické optimalizace. Tato technologie však nebyla užita kvůli nevhodnosti z pohledu příliš vysokého počtu omezení a požadavku využít k výrobě konvenční třískové obrábění.

### 6.4.1 Výpočtový model koncovky



Obrázek 97: Výpočtový model koncovky výložníku

Vylehčení bylo tedy provedeno účelným užitím zkosení hran a děr, jak zobrazuje výpočtový model který v případě koncovky má tvar jediného objemového těla - viz

obr. 97.

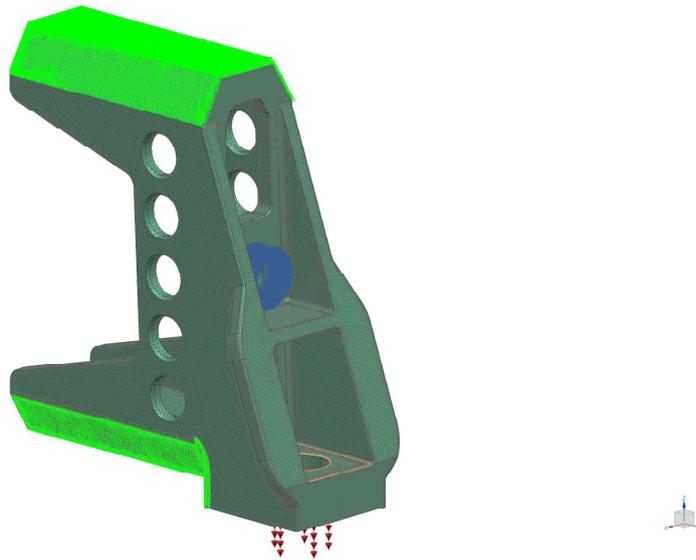
#### 6.4.2 Konečnoprvková síť koncovky

Kvůli tvarové složitosti byl výpočtový model koncovky vysítován pomocí prvků CTETRA(10). Vzhledem k požadavku na rozbor napětí v okolí kritických tvarově komplikovaných míst byla užita dostatečně jemná síť.

#### 6.4.3 Simulace koncovky

Koncovka byla v prostoru upnuta tak, aby okrajové podmínky reprezentovaly uložení ocelové koncovky v kompozitovém nosníku. Nosník obepínající koncovku lze považovat za výrazně tužší v porovnání s koncovkou.

Okrajová podmínka odebírající první a třetí stupeň volnosti (DOF1 a DOF3) je reprezentována zelenou šipkou na obr. 98.

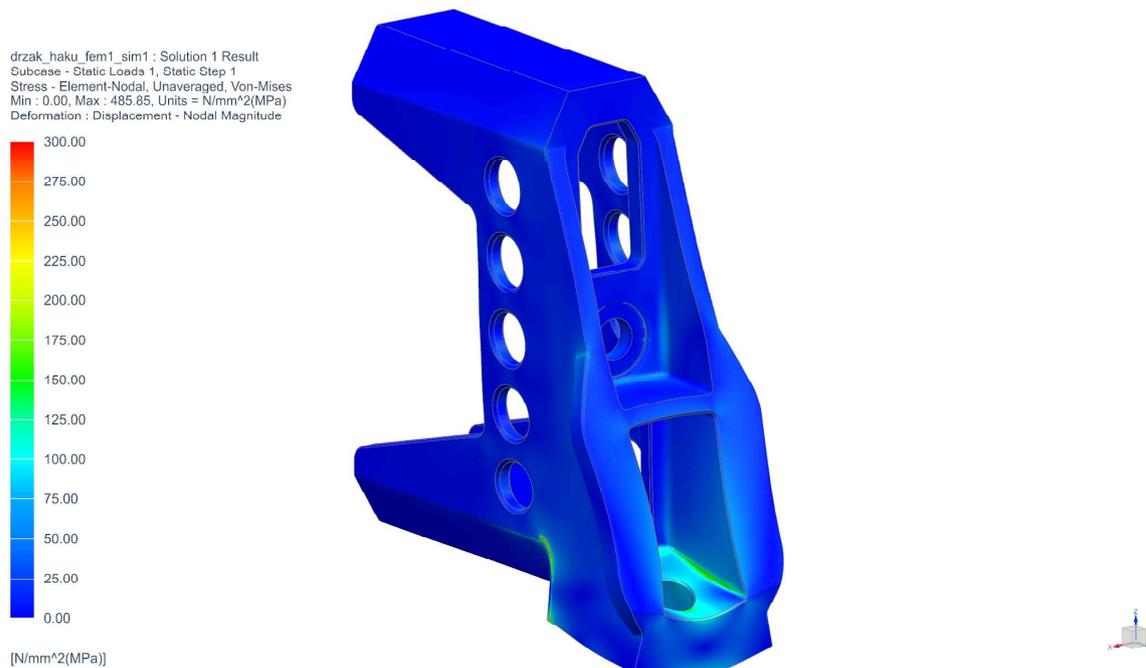


Obrázek 98: Simulace koncovky výložníku

Dále byla aplikována zatěžující síla o velikosti 25 000 N. Jako působiště síly byla vybrána vnitřní válcová plocha. Vliv gravitace byl opět zanedbán vzhledem k téměř nulovému dopadu na výsledky.

#### 6.4.4 Vyhodnocení koncovky

Redukované napětí Mises dosahuje velikosti 486,85 MPa. Je třeba zvážit fakt, že takto vysoká napětí vznikají ve špičkách a vrubech sítě. Napětí, která lze považovat za reálná, nepřesahují 175 MPa. Mají tedy proti  $R_e=835$  MPa materiálu 15 230.7 značnou bezpečnost - viz obr. 98.



Obrázek 99: Redukované v ocelové koncovce výložníku v MPa

## 7 Technologičnost výroby

Pro výrobu navíjených kompozitních dílců, která se provádí v jednoúčelovém stroji, je třeba sestava výrobních přípravků, které umožňují navinutí kompozitního dílu a jeho následnou konsolidaci za účelem dosažení požadovaného objemového podílu.

Obecně se tato sestava skládá z následujících hlavních součástí:

**Navíjecí trn** Je hlavní částí této sestavy přípravků, svým obtiskem tvoří vnitřní povrch kompozitního profilu. Dle požadavků na přesnost, kvalitu povrchu, sériovost výroby a samozřejmě s ohledem na cenu lze pro výrobu trnu použít různé materiály.

Pro sériově vyráběné výrobky se nejvhodněji jeví užití obráběných profilů z hliníkové slitiny, či ocelových svařenců. Pro výrobky s nižší sériovostí výroby lze pro výrobu trnu využít tzv. umělé dřevo nebo například vysokoteplotní pěny. Nekovové trny je třeba opatřit kovovým jádrem, které umožňuje upínání trnu do sklíčidla navíjecího stroje. Výhodou použití nekovového trnu je hlavně cena. Vysoká cena obráběných kovových trnů plyne z vyšší ceny materiálu, ale zejména z vysoké ceny obrábění. Tvarově a vývojově komplikované profily se nejprve navíjejí na relativně levné trny, sloužící k minimalizaci potencionálních problémů, a až následně jsou pro ně vyrobeny kovové trny s požadovanou přesností povrchu. Důležitým aspektem, který je třeba brát v potaz při konstrukci trnu, je zajištění jeho odstranění z výrobku po vytvrzení matrice. U kovových trnů je třeba vytvořit dostatečně dimenzované připojovací body ke kterým je možné uchytit hydraulické válce, a ve speciálním přípravku vytáhnout trn z výrobku. Při použití nekovových trnů je možné trn buď záměrně zničit při vytahování nebo využít tzn. ztracený trn, kdy se pěnové jádro ponechá ve výrobku.

**Jehličky** Výraz jehličky označuje výrobní přípravek, okolo kterého navíjecí stroj omotává vlákna a slouží k umístění zejména podélných vláken na přesnou předem určenou pozici. Opět lze s ohledem na výše uvedená kritéria použít různé široké spektrum materiálů.

Pro výrobky vyráběné v objemnější sérii je rentabilní výroba ocelových jehliček. Pro méně sériovou výrobu se ve výrobním procesu zadavatele v poslední době s úspěchem aplikuje kombinace kovové, co možná nejuniverzálnější hlavní části, osazené tvarově komplikovanou funkční částí zhotovenou pomocí 3D tisku polymerních materiálů. Pro kusovou či prototypovou výrobu lze použít jehličky zhotovené pouze 3D tiskem. Výhoda užití 3D tisku je zjevná, úspora času a prostředků vynaložených na obrábění tvarově velmi složitých funkčních ploch, které by vyžadovalo užití víceosých obráběcích strojů či by konvenčními prostředky nebylo proveditelné vůbec.

**Lisovací přípravek** Po navinutí výrobku na navíjecí trn pomocí jehliček je nutné kompozit konsolidovat na výsledný požadovaný objemový podíl. I pro lisování lze použít několik různých variant přípravků.

Pro sériově vyráběné výrobky s požadavkem na vysokou kvalitu povrchu lze užít jednoúčelově zkonstruovaných pneumatických lisů s možností výhřevu pro rychlejší vytvrzování pryskyřice. Jejich výroba je však extrémně nákladná jak z hlediska konstrukční náročnosti, tak výrobních nákladů.

Pro méně sériové výrobky lze použít jakousi zjednodušenou formu lisu tvořenou sadou samostatných dřevěných desek, které se mechanicky přitlačují na povrch výrobku a dávají mu tak definovaný tvar.

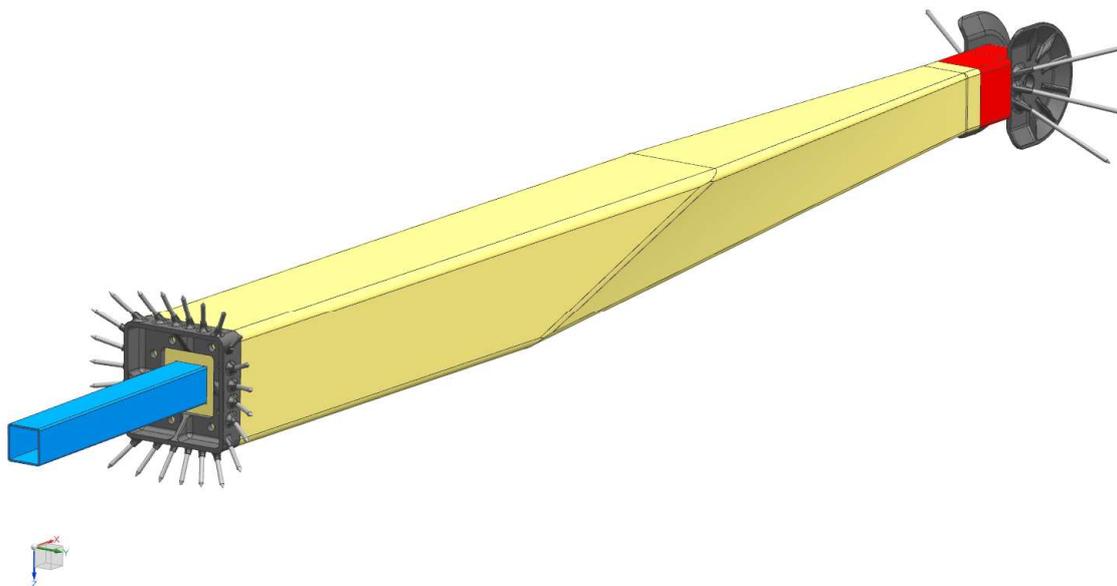
Pro prototypové výrobky je nejvhodnější použít vakuování. Při vakuování je výrobek po navinutí zakryt tkaninou s obchodním názvem Ulmanis, která slouží ke stržení ostatních vrstev použitých při vakuování. Následně je výrobek obalen do fleecové tkaniny, která slouží k odvodu přebytečné matrice (pryskyřice) vytékající z kompozitu. Poslední vrstvou je vakuovací fólie. Tato folie tvoří vzduchotěsný vak, ze kterého je pomocí vývěvy vysán vzduch a na výrobek tak působí přetlak o velikosti atmosférického tlaku.

Nevýhodou užití vakuování je omezení maximální velikosti lisovacího tlaku na cca 1013 hPa a nemožnost dosažení kvalitního povrchu. Naproti tomu není třeba vyrábět tvarově jednoúčelový lisovací přípravek pro každý výrobek a vakuování je tedy s výhodou užíváno ve vývojových fázích složitějších profilů.

Už při samotné konstrukci kompozitních profilů je třeba dodržovat určité zásady s ohledem na technologická omezení výroby vláknovým navíjením a naopak využívat výhod, které tato metoda nabízí. Při konstrukci této sady přípravků je potřeba úzká spolupráce konstruktéra s technologem a výpočtářem.

## 7.1 Výrobní přípravky pro sloup

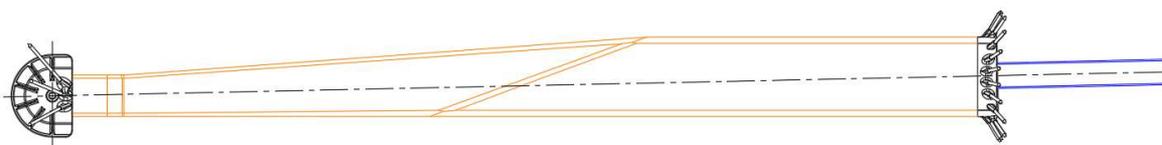
Jak bylo uvedeno výše, pro navíjení kompozitního profilu je potřeba sestava unikátních přípravků - viz obr. 100.



Obrázek 100: Navíjecí trn sloupu - sestava

### 7.1.1 Navíjecí trn - sloup

Vzhledem k předpokládané malé sériovosti byl trn navržen jako sestava z pěny ROHA-CEL a ocelového čtvercového profilu. Tvarová část trnu byla vytvořena z pěny a do ní byl vložen ocelový profil k upínání do čtyřčelistového sklíčidla navíjecího stroje. Ocelový profil je v pěnové tvarové části uložen záměrně pod určitým úhlem tak, že spojuje střed čtvercového průřezu na jedné straně a osu oka na opačném konci sloupu. Díky tomuto opatření je možné provést navíjení na dvojosém navíjecím stroji - viz obr. 101 - 102.

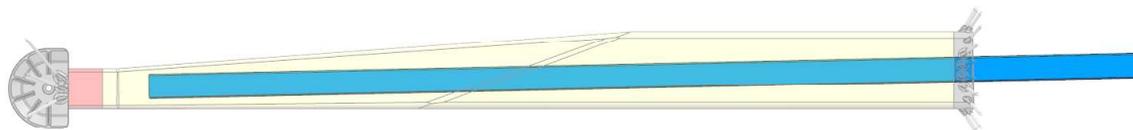


Obrázek 101: Navíjecí trn - zvýrazněná osa rotace trnu

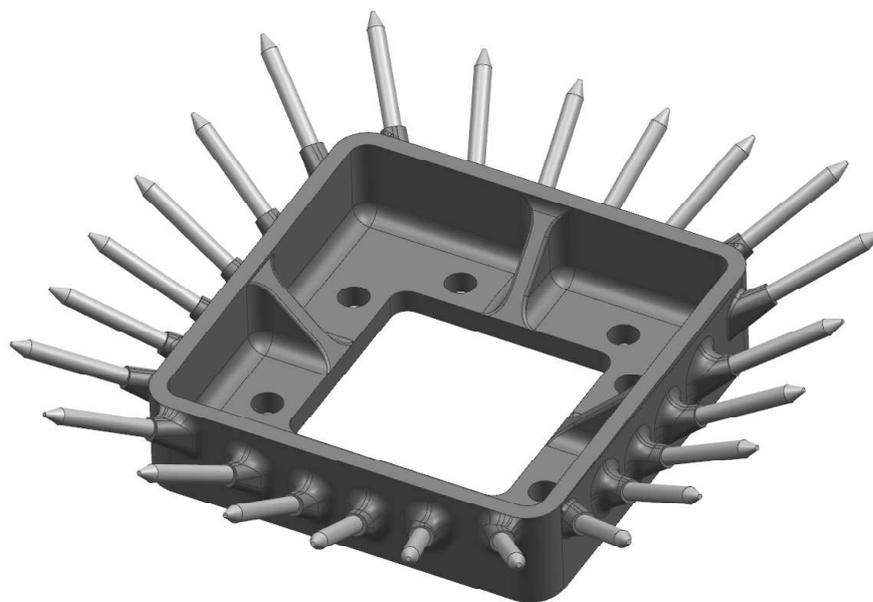
### 7.1.2 Jehličky - sloup

**Jehličky čtyřhranného konce nosníku** Jehličky na straně nosníku ukončené čtyřhrannem (čtvercem) jsou z pohledu zadavatele práce standardní. Jak je vidět na obrázku, počet jehličkových drátů je 24. Jejich počet vychází ze zkušeností technologa a možností navíjecího stroje. Z počtu 24 na obvod nosníku tedy vychází 6 jehliček na každou stranu - viz obr. 103.

Bylo třeba vyklonit osu rotace pomyslného kužele, ve kterém leží jehličky, o úhel odpovídající vyklonění osy trnu, neboť pohyby navíjecího stroje počítají s přesnou polohou jehličkových drátů. Vyklonění je patrné z obr. 104.



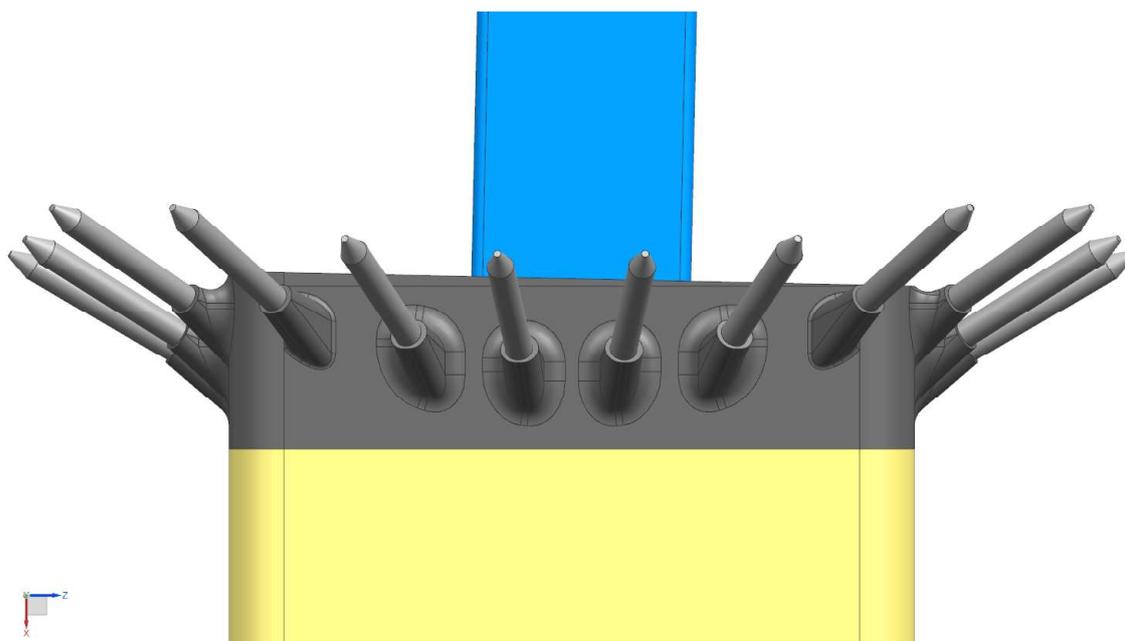
Obrázek 102: Navíjecí trn - sestava - zvýrazněné uložení ocelového profilu



Obrázek 103: Jehličky - strana čtyřhranu

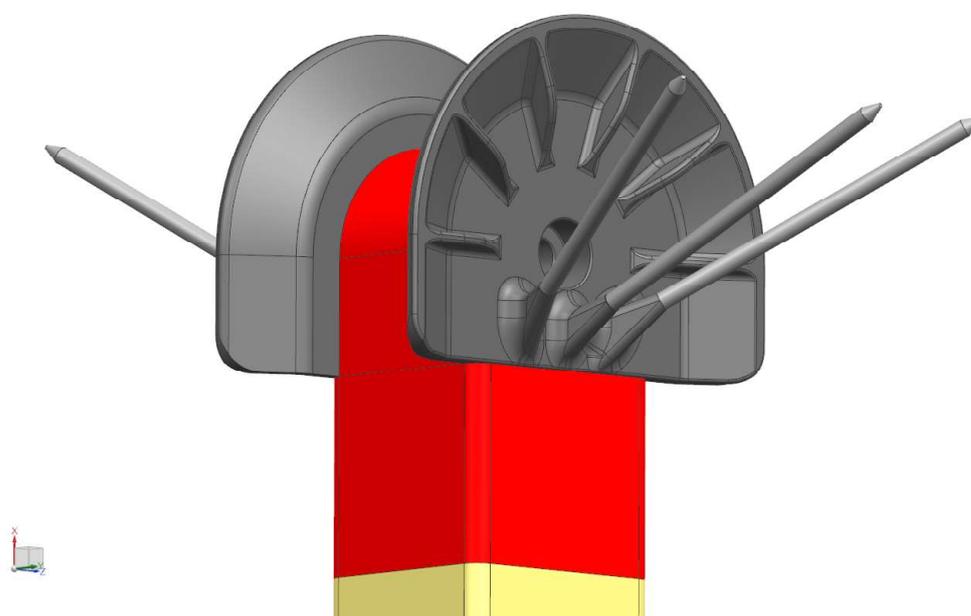
Z konstrukčního hlediska byly jehličky navrženy jako výtisk z 3D tiskárny. Díky tomu bylo možné použít tvarově velmi složité připojení jehličkových drátů. Každá strana byla vyztužena žebrem, které výrazně zvyšuje tuhost jejich konstrukce.

**Jehličky navíjeného oka** Jehličky na straně navíjeného oka jsou specifické z několika důvodů. Na jedno straně vůbec nemají dráty, což znamená, že navíjecí stroj vlákna nezahakuje okolo drátů, ale procházejí drážkou tvořenou příložkami a ocelovou vložkou tvořící samotné oko. Jak bylo uvedeno výše, má každá strana nos-



Obrázek 104: Jehličky - strana čtyřhranu - bokorys

níku na čtyřhranném konci 6 jehličkových drátů, kterým odpovídají 3 na opačném konci. To znamená, že se předpokládá zahakování dvojnásobného počtu vláken o jehličky na straně oka. Zahakování podélných vláken na stranách, které nemají jehličkové dráty, bylo vyřešeno průchodem vláken mezi příložkami - viz obr. 104.



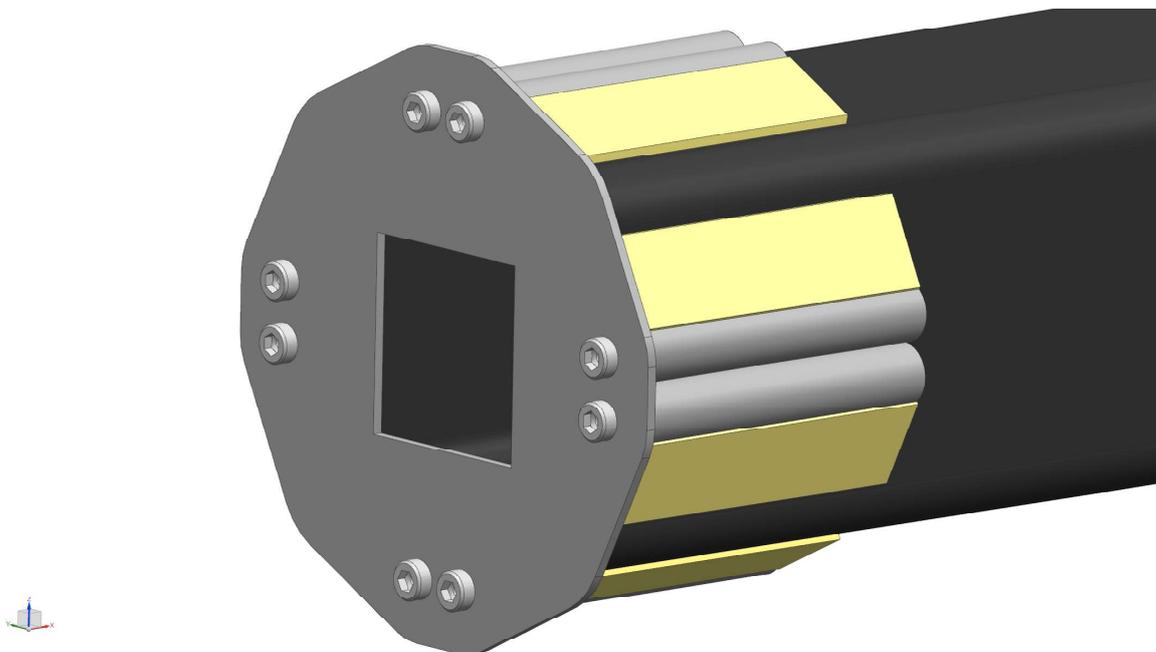
Obrázek 105: Jehličky - strana oka

Příložky byly opatřeny výrazným tvarovým zkosením, které navádí vlákna do správné pozice pro vytvoření oka. V zájmu zvýšení tuhosti a pevnosti příložky

bylo zkosení opatřeno řadou radiálních žeber, která při účelném rozmístění k tuhosti výrazně přispívají.

### 7.1.3 Příruba

Pro výrobu příruby na nosníku bylo třeba vytvořit přípravek, kterým lze během navíjení přidržovat ocelové závitové vložky. Hlavní funkcí přípravku je tedy zajištění přesné polohy trubek během navíjení.



Obrázek 106: Navíjecí přípravek - příruba

Přípravek zároveň pomáhá v zajištění přesné polohy pěnových výplní zobrazených na obr. 106 - 107.

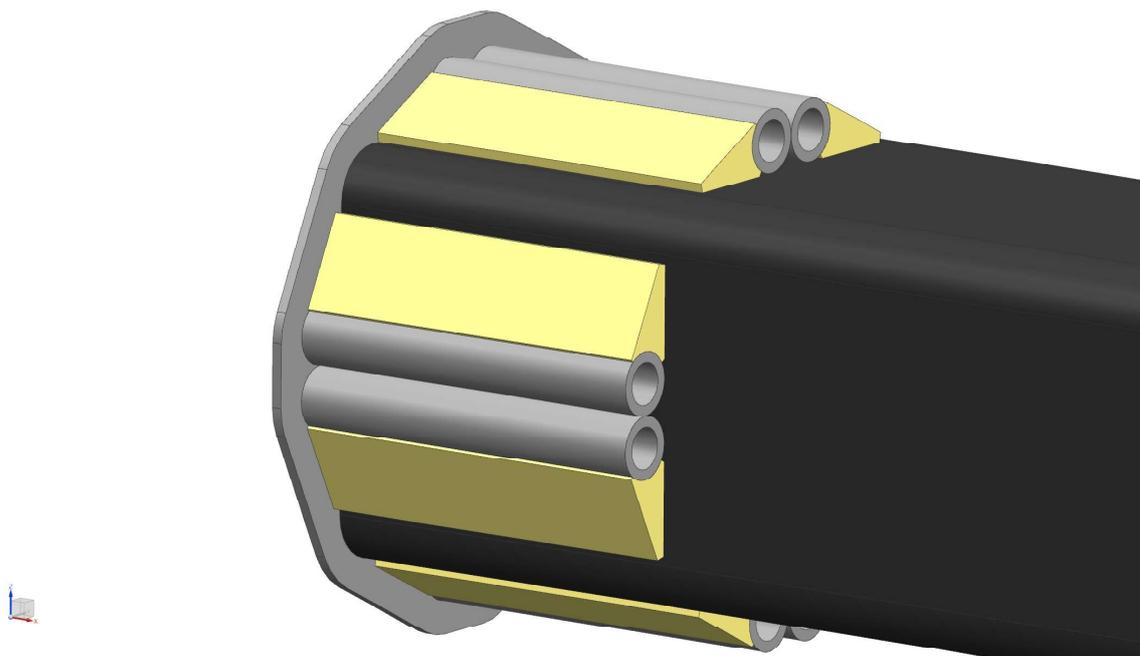
## 7.2 Výrobní přípravky pro výložník

Výložník je z pohledu technologičnosti konstrukce součást výrazně jednodušší součást než sloup. Nicméně i pro sloup bylo třeba navrhnout soustavu navíjecího trnu a jehliček. Jak bylo uvedeno výše, výložník se skládá ze soustavy vzájemně posuvných tvarově podobných nosníků. Sestava výrobních přípravků je tedy podobná s tím, že se zmenšují rozměry nosníku a tomu úměrně i trnů a jehliček.

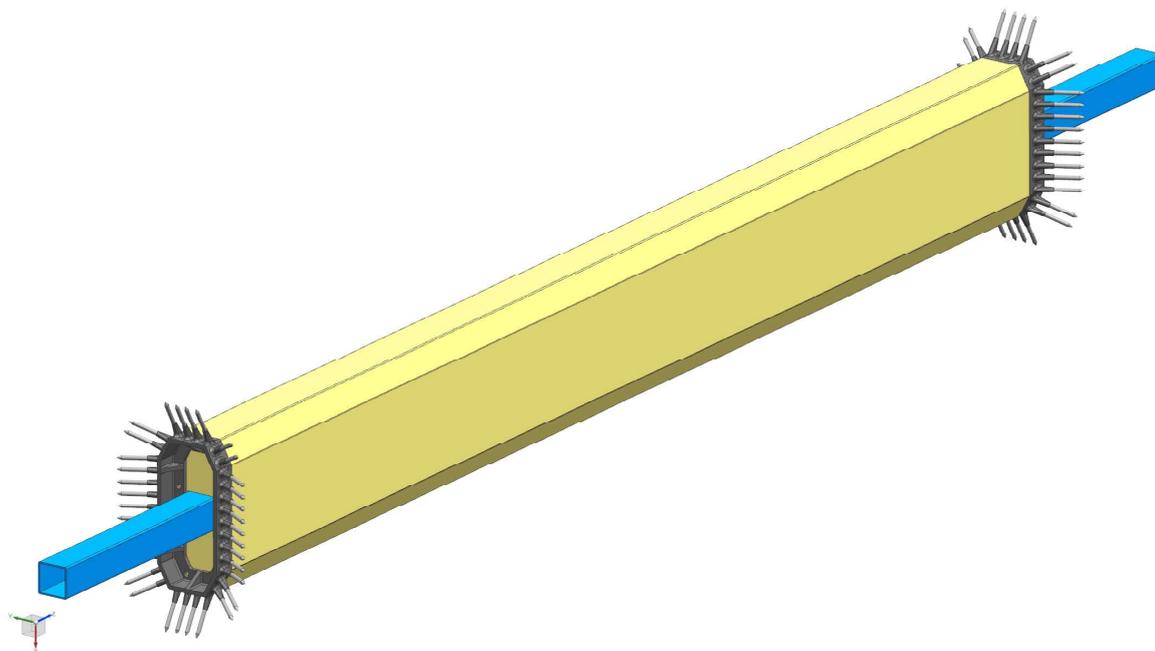
Následující kapitola tedy popisuje přípravky pro první (největší) sekci výložníku, pro další sekce vypadají přípravky analogicky.

### 7.2.1 Navíjecí trn - výložník

Obdobně jako v případě sloupu byl i navíjecí trn pro výložník navržen jako obrobek z pěnového materiálu s ocelovým profilem ve středu pro upínání do navíjecího stroje - viz obr. 108.



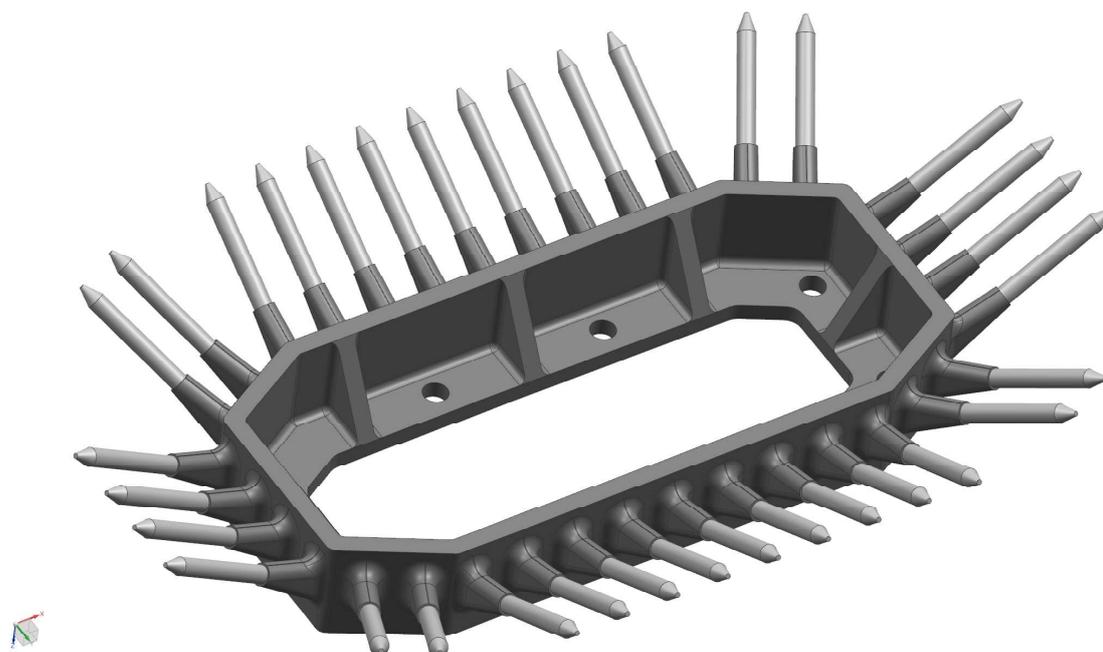
Obrázek 107: Navíjecí přípravek - příruba - pěnové výztuhy



Obrázek 108: Navíjecí trn výložníku - sestava

### 7.2.2 Jehličky - výložník

Vzhledem k nízké sériovosti výroby byly jehličky navrženy jako 3D výtisk obdobné konstrukce jako pro čtyřhranný konec sloupu. Opět byla tedy použita žebra zvyšující tuhost. Na rozdíl od sloupu byly jehličky pro výložník opatřeny 36 jehličkovými dráty.



Obrázek 109: Jehličky - výložník

## 8 Výrobní dokumentace

Součástí diplomové práce bylo i vypracování výrobní dokumentace. Kromě vyráběných dílů bylo použito i množství nakupovaných a normalizovaných dílů - viz kusovník výkresu sestavy.

Název	Číslo	Druh	Ks.
<b>SESTAVA - JEŘÁB</b>	DP - 2019 - 01 - 00	sestava	1
<b>MONTÁŽNÍ SESTAVA - VÝLOŽNÍK</b>	DP - 2019 - 02 - 00	sestava	1
SLOUP	DP - 2019 - 01 - 01	součást	1
VÝLOŽNÍK - 1	DP - 2019 - 01 - 02	součást	1
VÝLOŽNÍK - 2	DP - 2019 - 01 - 03	součást	1
VÝLOŽNÍK - 3	DP - 2019 - 01 - 04	součást	1
KONCOVKA - 2	DP - 2019 - 01 - 05	součást	1
KONCOVKA - 3	DP - 2019 - 01 - 06	součást	1
DRŽÁK HÁKU	DP - 2019 - 01 - 07	součást	1
ČEP - VÝLOŽNÍK	DP - 2019 - 01 - 08	součást	2
ČEP - SLOUP	DP - 2019 - 01 - 09	součást	1
KLUZNÝ PÁS - 2 PLAST - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 10	součást	4
KLUZNÝ PÁS - 2 PLECH - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 11	součást	4
KLUZNÝ PÁS - 2 PLAST	DP - 2019 - 01 - 12	součást	2
KLUZNÝ PÁS - 2 PLECH	DP - 2019 - 01 - 13	součást	2
KLUZNÝ PÁS - 3 PLAST - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 14	součást	4
KLUZNÝ PÁS - 3 PLECH - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 15	součást	4
KLUZNÝ PÁS - 3 PLAST	DP - 2019 - 01 - 16	součást	2
KLUZNÝ PÁS - 3 PLECH	DP - 2019 - 01 - 17	součást	2
KOTEVNÍ ŠROUB	DP - 2019 - 01 - 18	součást	1
KOTEVNÍ TRUBKA	DP - 2019 - 01 - 19	součást	1
DRŽÁK HADICE - VÝLOŽNÍK	DP - 2019 - 01 - 20	součást	1
DRŽÁK HADICE - SLOUP	DP - 2019 - 01 - 21	součást	1
DRŽÁK ENERGOŘETĚZU	DP - 2019 - 01 - 22	součást	1
KONCOVKA VÝLOŽNÍK	DP - 2019 - 01 - 23	součást	1

Tabulka 22: Soupiska dílů použitých k výrobě

## 9 Závěr

Cílem diplomové práce bylo provedení konstrukční studie kompozitního jeřábu s užitím integrovaných spojů. Integrovaným spojem je rozuměno užití ocelové vložky již během výrobního procesu kompozitních nosníků. Díky včasné implementaci spojovacích členů byl vytvořen výrobek nevyžadující dodatečné obrábění funkčních ploch. Obrábění kompozitních materiálů je obecně problematickou disciplínou třískového obrábění. Výstupem předkládané diplomové práce je CAD model konstrukce založený na hrubých návrhových výpočtech následně ověřených pomocí pokročilých konečnoprvkových výpočtů.

Díky použití kompozitních materiálů na klíčové konstrukční prvky bylo dosaženo výrazné hmotnostní úspory.



Obrázek 110: Konstrukční studie nakládacího jeřábu

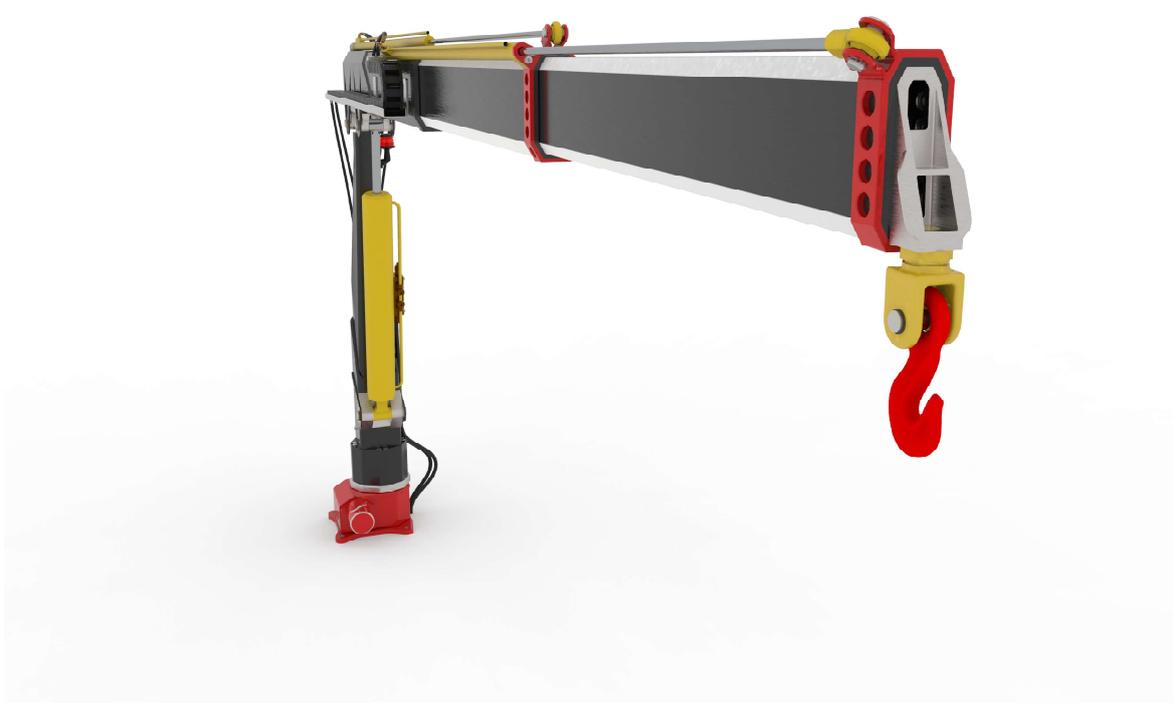
Součástí řešení je kromě návrhu nosné konstrukce i příprava implementace hydraulické soustavy včetně řešení pohybujících se hadic v okolí teleskopického výložníku.

Kromě užití nosných konstrukčních celků z kompozitních materiálů byla ve studii užitá i řada dílů z konvenčních materiálů, zejména v partiích kde kompozitní prvky navazují na standardizované díly jako například jeřábový hák. Obdobné díly jsou z výhodou využity normalizované jednak s ohledem na cenu, ale také legislativní požadavky.

Cílem konstrukční studie nebylo vypracování kompletní výrobní dokumentace pro konkrétní rozměrovou variantu jeřábu, ale ověření možností užití kompozitních materiálů jako tzv. high end aplikace kompozitních materiálů, které maximálně využívají jejich specifických mechanických vlastností.

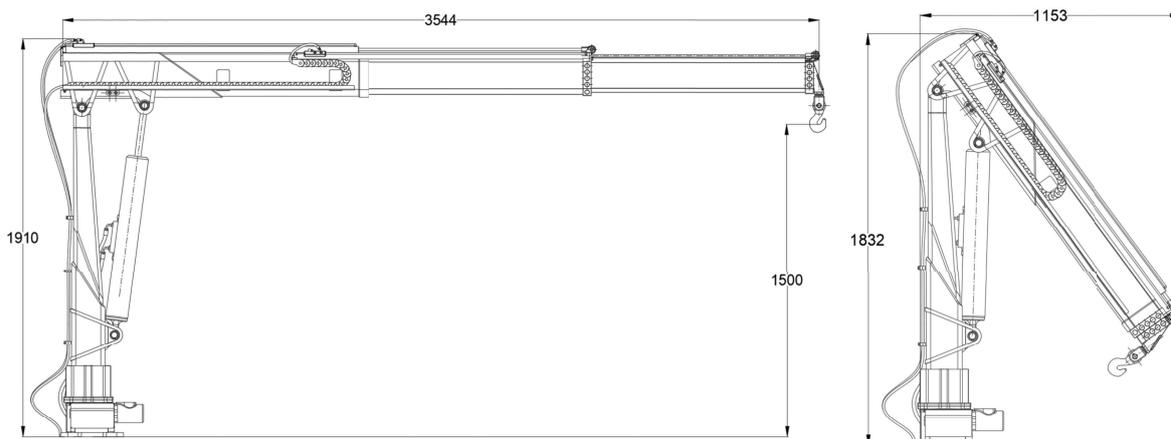


Obrázek 111: Uložení hadic - studie



Obrázek 112: Ukotvení háku - studie

## 9.1 Technické specifikace studie



Obrázek 113: Základní rozměry navrženého jeřábu

Parametr	Jednotka	Hodnota
Maximální zdvihový moment	[kNm]	27.2
Maximální nosnost	[kN]	2000
Maximální dosah	[m]	3.54
Úhel otočení	[°]	325
Moment otočení	[kNm]	3.0
Zástavbový prostor	[m]	0.3
Složená šířka	[m]	1.15
Mrtvá váha	[kg]	97.5

Tabulka 23: Vybrané charakteristiky návrhové studie

Celková hmotnost jeřábu **97.5 kg** uvedená v tabulce 21, ukazuje **snížení hmotnosti o 131,5 kg** oproti 229 kg původního ocelového řešení - viz tabulka 2. Jde tedy o úsporu 57 % původní hmotnosti.

Je nutné dodat, že téměř 50 kg z celkové hmotnosti je tvořeno prvky hydrauliky. Z této hmotnosti by bylo možné šetřit například použitím kompozitních hydromotorů. Například při použití hydromotorů z řady Parker Lighdraulics<sup>®</sup>, které zachovávají ocelovou pístitnici a i přes to dosahují hmotnostní úspory 60 %. Užití hydromotorů z této řady by umožnilo úsporu dalších téměř 30 kg.

Dále jsou v hmotnosti zahrnuty komponenty, které nelze vylehčovat, jako například jeřábový hák.

Takto výrazné snížení hmotnosti má význam zejména u menších užitkových automobilů s užitnou hmotností do 3500 kg, pro které jde o významnou úsporu.

V případě montáže na loď je výhodou korozivzdornost kompozitních profilů. Obzvláště pro vojenské námořní aplikace je velmi užitečná i snížená radarová odrazivost. Dosažení nižší radarové odrazivosti jeřábu jako celku je možné podpořit užitím kompozitních hydraulických prvků, které jsou cenově náročnější, ale právě ve vojenské aplikaci ospravedlnitelné.

## Literatura

- [1] REMTA, František et al. Jeřáby: *I. díl*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1974. 645 s.
- [2] REMTA, František et al. Jeřáby: *II. díl*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1975. 562 s.
- [3] ČSN EN 13000+A1. Jeřáby - Mobilní jeřáby. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 110 s.
- [4] ČSN EN 12999+A1. Jeřáby - Nakládací jeřáby. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. 76 s.
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů. 2. přeprac. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. 200s.* ISBN 978-80-7043-689-9.
- [7] Palfinger. *PC 2700 Compact* [online]. 2018 [cit. 2018-09-11]. Dostupné z: [https://www.palfinger.com/en-us/products/knuckle-boom-cranes/models/pc-2700-compact\\_p\\_633](https://www.palfinger.com/en-us/products/knuckle-boom-cranes/models/pc-2700-compact_p_633)
- [8] Palfinger. *Loader cranes* [online]. 2018 [cit. 2018-09-11]. Dostupné z: [https://www.palfinger.com/importdata/emea/products/loader-cranes/gallery/image-thumb\\_7209\\_lightbox/transport-logistics-heavy-load-transport.jpeg](https://www.palfinger.com/importdata/emea/products/loader-cranes/gallery/image-thumb_7209_lightbox/transport-logistics-heavy-load-transport.jpeg)
- [9] REMTA, František et al. Jeřáby: *III. díl*. Praha: SNTL, 1961. 412 s.
- [10] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. Strojnické tabulky. Úvaly: ALBRA, 2008. 914s.

## Seznam obrázků

1	Nakládací jeřáb PALFINGER [8] . . . . .	9
2	Hlavní části nakládacího jeřábu dle ČSN EN 12999+A1 [4] . . . . .	11
3	Orientace vláken navíjeného výrobku . . . . .	18
4	Nakládací jeřáb PALFINGER PC2700 [7] . . . . .	22
5	Nakládací jeřáb PALFINGER PC2700 - typový výkres, nárys . . . . .	22
6	Diagram vyložení PC2700 . . . . .	23
7	Kinematické schéma varianty A . . . . .	24
8	Kinematické schéma varianty B . . . . .	24
9	Kinematické schéma varianty C . . . . .	25
10	Porovnání skladovacích rozměrů variant A a B . . . . .	26
11	Působící akční síly a reakce . . . . .	27
12	Člen 2 . . . . .	28
13	Člen 3 . . . . .	29
14	Člen 4 . . . . .	30
15	Průběh ohybového momentu - sloup / člen 2 . . . . .	34
16	Průběh ohybového momentu - výložník / člen 4 . . . . .	35
17	Průběh ohybového momentu - teleskopický výložník . . . . .	35
18	Průběh ohybového momentu - část teleskopického výložníku V3 . . . . .	36
19	Průběh ohybového momentu - část teleskopického výložníku V2 . . . . .	36
20	Průběh ohybového momentu - část teleskopického výložníku V1 . . . . .	36
21	Schematický řez výložníkem . . . . .	39
22	Přivinutá příruba . . . . .	40
23	Zavinuté oko v bodě B . . . . .	40
24	Zavinuté oko v bodě B . . . . .	41
25	Síly působící v bodě B . . . . .	41
26	Síly působící v bodě C . . . . .	43
27	Dispozice čepu v bodě B . . . . .	46
28	Dispozice čepu v bodě C . . . . .	47
29	Dispozice čepu v bodě D . . . . .	47
30	Přivinutá příruba . . . . .	48
31	Schéma zatížení připojovací příruby. . . . .	49
32	Hydraulická soustava . . . . .	51
33	Jeřáb ve složené poloze . . . . .	54
34	Jeřáb v poloze maximálního zdvihu . . . . .	55
35	Uchycení hydraulických prvků . . . . .	56
36	Plošný model sloupu . . . . .	58
37	Model sloupu s objemovými prvky . . . . .	59
38	2D síť sloupu . . . . .	59
39	2D síť výztuhy . . . . .	60
40	Orientace elementů 2D sítě . . . . .	61
41	Pracovní souřadné systémy pro orientaci elementů . . . . .	62
42	Objemové 3D elementy . . . . .	62
43	Výpočtový model výztuhy v bodě B . . . . .	63
44	3D síť výztuhy v bodě B . . . . .	63
45	Výpočtový model výztuhy v bodě C . . . . .	64

46	3D síť výztuhy v bodě C . . . . .	64
47	2D síť navíjeného oka . . . . .	65
48	2D síť navíjeného oka - oblouk . . . . .	65
49	3D síť navíjeného oka . . . . .	66
50	3D síť součástí příruby . . . . .	66
51	Výpočtový model příruby . . . . .	67
52	Výpočtový model sloupu . . . . .	67
53	Gluing - oko C . . . . .	68
54	Gluing - výztuha . . . . .	68
55	Gluing - oko B . . . . .	69
56	Gluing - oko B . . . . .	69
57	Rigidní růžice . . . . .	70
58	Síly aplikované na sloup . . . . .	70
59	Posunutí sloupu . . . . .	71
60	Napětí ve směru 11 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	72
61	Napětí ve směru 22 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	73
62	Napětí ve směru 33 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	73
63	Napětí ve směru 12 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	74
64	Napětí ve směru 13 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	74
65	Napětí ve směru 11 ve vrstvě výztuhy v [MPa] . . . . .	75
66	Napětí ve směru 11 v ovinu příruby v MPa . . . . .	76
67	Napětí ve směru 11 v ovinu oka v MPa . . . . .	77
68	Redukované napětí ve výztuze bodu C v MPa . . . . .	78
69	Redukované napětí ve výztuze bodu B v MPa . . . . .	79
70	Plošný model výložníku . . . . .	80
71	Model výložníku s objemovými prvky . . . . .	80
72	2D síť výložníku . . . . .	81
73	3D síť výložníku . . . . .	82
74	3D síť ocelové výztuhy v bodě C a D . . . . .	82
75	3D síť plastových pásů . . . . .	83
76	Vysítovaný model výložníku . . . . .	83
77	Gluing - oko C a D . . . . .	84
78	Gluing - kluzný plastový pás . . . . .	84
79	Rigidní růžice uložení výložníku . . . . .	85
80	Síla aplikovaná na hlavní díl výložníku . . . . .	85
81	Posunutí výložníku . . . . .	86
82	Napětí ve směru 11 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	86
83	Napětí ve směru 22 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	87
84	Napětí ve směru 33 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	87
85	Napětí ve směru 12 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	89
86	Napětí ve směru 13 ve 3. vrstvě v MPa . . . . .	89
87	Napětí ve směru 11 ve 13. vrstvě v [MPa] . . . . .	90
88	Napětí ve směru 11 ovinu oka v MPa . . . . .	90
89	Redukované napětí ve výztuze bodu C a D v MPa . . . . .	91
90	Výpočtový model teleskopického výložníku . . . . .	91
91	3D síť výložníku . . . . .	92
92	3D síť výložníku - kluzné dvojice . . . . .	92

93	3D síť výložníku - kontakt . . . . .	93
94	3D síť výložníku - zatížení . . . . .	93
95	Teleskopický výložník - posunutí . . . . .	94
96	Teleskopický výložník - kontaktní tlak . . . . .	95
97	Výpočtový model koncovky výložníku . . . . .	95
98	Simulace koncovky výložníku . . . . .	96
99	Redukované v ocelové koncovce výložníku v MPa . . . . .	97
100	Navíjecí trn sloupu - sestava . . . . .	99
101	Navíjecí trn - zvýrazněná osa rotace trnu . . . . .	99
102	Navíjecí trn - sestava - zvýrazněné uložení ocelového profilu . . . . .	100
103	Jehličky - strana čtyřhranu . . . . .	100
104	Jehličky - strana čtyřhranu - bokorys . . . . .	101
105	Jehličky - strana oka . . . . .	101
106	Navíjecí přípravek - příruba . . . . .	102
107	Navíjecí přípravek - příruba - pěnové výztuhy . . . . .	103
108	Navíjecí trn výložníku - sestava . . . . .	103
109	Jehličky - výložník . . . . .	104
110	Konstrukční studie nakládacího jeřábu . . . . .	106
111	Uložení hadic - studie . . . . .	107
112	Ukotvení háku - studie . . . . .	107
113	Základní rozměry navrženého jeřábu . . . . .	108

## Seznam tabulek

1	Vlastnosti vláken používaných jako výztuha - viz [5] . . . . .	15
2	Vybrané charakteristiky PALFINGER PC2700 . . . . .	23
3	Shrnutí reakčních silových účinků . . . . .	33
4	Skladba vrstev sloupu navržená analyticky . . . . .	37
5	Skladba vrstev výložníku navržená analyticky . . . . .	38
6	Materiálové konstanty použitých vláken Tenax STS40F13 24K . . . . .	57
7	Materiálové konstanty použitých vláken Granoc XN-80-A2S . . . . .	57
8	Materiálové konstanty použitých izotropních materiálů . . . . .	57
9	Skladba vrstev sloupu upravená pomocí MKP . . . . .	60
10	Skladba vrstev výztuhy sloupu . . . . .	61
11	Hodnoty mezí pevnosti pro vyhodnocení intralaminární pevnosti . . . . .	71
12	Přehled maximálních napětí ve směrech 11, 22 a 33 ve sloupu v MPa . . . . .	72
13	Přehled maximálních napětí ve směrech 12, 23 a 31 ve sloupu v MPa . . . . .	75
14	Přehled maximálních napětí ve směrech 11, 22 a 33 ve výztuze v [MPa] . . . . .	76
15	Přehled maximálních napětí ve směrech 12, 23 a 31 ve výztuze v [MPa] . . . . .	76
16	Přehled maximálních napětí ve směrech 11, 22 a 33 v přírubě a ovinu oka v MPa . . . . .	77
17	Přehled maximálních napětí ve směrech 12, 23 a 31 v přírubě a ovinu oka v MPa . . . . .	77
18	Základní skladba vrstev hlavního dílu výložníku . . . . .	79
19	Skladba výztuhy výložníku . . . . .	80
20	Přehled maximálních napětí ve směrech 11, 22 a 33 ve výložníku v MPa . . . . .	88
21	Přehled maximálních napětí ve směrech 12, 23 a 31 ve výložníku v MPa . . . . .	88
22	Soupiska dílů použitých k výrobě . . . . .	105
23	Vybrané charakteristiky návrhové studie . . . . .	108

## **Příloha A**

### **Podklady k použitému kluznému materiálu**

## Materiál: ZX-100K

## CZ 1.0

Vlastnost	Symbol	Jednotka	Norma	Hodn.
<b>Informace</b>				
Kód materiálu	-	-	materiálová norma	A1K
Barva	-	-	-	bílá
Měrná hmotnost	$\rho$	kg/dm <sup>3</sup>	ISO 1183	1,35
<b>Mechanické</b>				
Modul pružnosti v tlaku	$E_c$	M Pa	DIN EN ISO 604	3150
Napětí na mezi pružnosti	$\sigma_{0,1}$	M Pa	materiálová norma	75
Hranice tečení v tlaku	$\sigma_y$	M Pa	DIN EN ISO 604	nex
Mez kluzu v tlaku	$\sigma_M$	M Pa	DIN EN ISO 604	nex
Napětí v tlaku při rel. zkrácení 3,5 %	$\sigma_{3,5\%}$	M Pa	DIN EN ISO 604	30
Přípustné plošné zatížení (0,01 h)	$\sigma_M$	M Pa	materiálová norma	75
Přípustné plošné zatížení (100 h)	$\sigma_M$	M Pa	materiálová norma	60
Přípustné plošné zatížení (10 000 h)	$\sigma_M$	M Pa	materiálová norma	30
Napětí v tlaku při zlomení	$\sigma_B$	M Pa	DIN EN ISO 604	bz
Elastická mez tečení	$\epsilon_{0,1}$	%	materiálová norma	6
Nominální mez tečení	$\epsilon_{0,2}$	%	DIN EN ISO 604	n
Nominální mez kluzu v tlaku	$\epsilon_{0,2}$	%	DIN EN ISO 604	n
Nominální mez deformace při zlomu	$\epsilon_{BR}$	%	DIN EN ISO 604	bz
Modul pružnosti v tahu	$E_t$	MPa	DIN EN ISO 527	2900
Napětí na mezi pružnosti	$\sigma_{0,1}$	MPa	materiálová norma	65
Hranice tečení v tahu	$\sigma_y$	MPa	DIN EN ISO 527	78
Mez kluzu v tahu	$\sigma_M$	MPa	DIN EN ISO 527	78
Napětí v tahu při přetržení	$\sigma_B$	MPa	DIN EN ISO 527	70
Elastická mez tečení	$\epsilon_{0,1}$	%	materiálová norma	1,6
Protažení na mezi tečení	$\epsilon_y$	%	DIN EN ISO 527	6
Protažení na mezi kluzu	$\epsilon_M$	%	DIN EN ISO 527	6
Protažení při přetržení	$\epsilon_R$	%	DIN EN ISO 527	9,5
Modul pružnosti v ohybu	$E_f$	MPa	DIN EN ISO 178	3300
Napětí při průhybu 3,5 %	$\sigma_{f3,5}$	MPa	DIN EN ISO 178	96
Mez kluzu v ohybu	$\sigma_{fM}$	MPa	DIN EN ISO 178	117
Napětí v ohybu při zlomení	$\sigma_{fB}$	MPa	DIN EN ISO 178	bz
Průhyb na mezi kluzu	$\epsilon_{fM}$	%	DIN EN ISO 178	6,1
Průhyb při zlomení	$\epsilon_{fR}$	%	DIN EN ISO 178	bz
Modul tečení v tlaku pro deformaci 1% (1.000 h)	$E$	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53444	2000
Tlakové napětí pro deformaci 1% (1.000 h)	$\sigma_{1\%}$	N/mm <sup>2</sup>	DIN 53444	22
Odolnost proti tečení	-	-	relativní hodnota	③
Tvrdość Brinell H358/30 (H132/30) [H49/30]	HB	N/mm <sup>2</sup>	DIN 2039	136
Tvrdość Shore A	-	Shore	DIN 53505	>100
Tvrdość Shore D	-	Shore	DIN 53505	84
Charpyho rázová zkouška tělísko bez vrubu	-	kJ/m <sup>2</sup>	EN ISO 179/1eU	54
Charpyho rázová zkouška tělísko s vrubem	-	kJ/m <sup>2</sup>	EN ISO 179/1eA	6,0
Ztrátový číselník (1 Hz)	tan $\delta$	1	materiálová norma	0,077
Odol. proti cykl. namáání, 20°C, 10 <sup>6</sup> stříd. zatíží., 1 Hz	-	MPa	materiálová norma	52
<b>Tepeľné</b>				
Maximální stálá povolená teplota	RTi	°C	UL 746B	110
Maximální krátkodobá povolená teplota (3h)	-	°C	materiálová norma	140
Max. stálá povolená teplota zalisovaného pouzdra	-	°C	materiálová norma	65
Teplota tání	$T_m$	°C	DSC	250
Teplota přechodu do skelné fáze	$T_g$	°C	DSC	78
Koeficient tepelné roztažnosti do 100°C	$\alpha$	10 <sup>-5</sup> /K	ISO E 830	8
Koeficient tepelné roztažnosti do 150°C	$\alpha$	10 <sup>-5</sup> /K	ISO E 831	12
Tvarová stálost HDT/A 1,8 Mpa	HDT(A)	°C	DIN EN ISO 75	75
Koeficient tepelné vodivosti	$\lambda$	W/(m*K)	DIN 52612	0,24
Specifické skupenské teplo	$c_p$	kJ/(kg*K)	DSC	1,06
Odolnost proti prohoření (3,2 mm) UL 94	-	-	UL 94 HB	94HB
Odolnost proti prohoření (3,2 mm) UL 94	%	LOI	DIN EN ISO 4589	24

Vlastnost	Symbol	Jednotka	Norma	Hodn.
<b>Elektrické</b>				
Specifický odpor	$R_D$	$\Omega \cdot \text{cm}$	IEC 60093	2E14
Povrchový odpor	$R_{\square}$	$\Omega$	IEC 60093	6E10
Elektrická pevnost	E	kV/mm	IEC 243	21,5
Odolnost proti plazivým proudům	-	V	IEC 112	305
Dielektrický ztrátový číselník (110 Hz)	-	1	IEC 250	3,4
Ztrátový faktor (ztrátový tangens) (110 Hz)	tan $\delta$	1	IEC 112	0,015
<b>pv hodnoty</b>				
Dovolené plošné zatížení při rychlosti v=1 m/min	$P_{zul}$	N/mm <sup>2</sup>	materiálová norma	35
Dovolené plošné zatížení při rychlosti v=10 m/min	$P_{zul}$	N/mm <sup>2</sup>		2,59
Dovolené plošné zatížení při rychlosti v=100 m/min	$P_{zul}$	N/mm <sup>2</sup>		0,08
Dovolené plošné zatížení při rychlosti v=200 m/min	$P_{zul}$	N/mm <sup>2</sup>		0,04
Vyvinutá - ustálená teplota při rychlosti v=1 m/min	-	°C		42
Vyvinutá - ustálená teplota při rychlosti v=10 m/min	-	°C		60
Vyvinutá - ustálená teplota při rychlosti v=100 m/min	-	°C	35	
Vyvinutá - ustálená teplota při rychlosti v=200 m/min	-	°C	64	
<b>Tření</b>				
Statický koeficient tření při 20°C za sucha	$\mu_{stat}$	1	materiálová norma	0,11
Dynamický koeficient tření při 20°C za sucha	$\mu_{dyn}$	1		0,08
Dynamický koeficient tření při 100°C za sucha	$\mu_{dyn}$	1		0,15
<b>Opotřebení</b>				
Opotřebení při 20 °C za sucha	-	mm/100km	materiálová norma	0,07
Opotřebení při 100 °C za sucha	-	mm/100km		0,21
Opotřebení při 200 °C za sucha	-	mm/100km		n
Opotřebení při 240 °C za sucha	-	mm/100km		n
<b>Polotovary</b>				
Trubky do $\phi$	-	-	-	✓
Desky do tloušťky	-	-	-	✓
Týče do $\phi$	-	-	-	✓
Granulat	-	-	-	(✓)
Lisované díly	-	-	-	(✓)
Obráběné díly	-	-	-	✓
<b>Stálost</b>				
Stálost rozměrů ve vodním prostředí	-	-	relativní hodnota	⑦
Nasákovost ve vodě 23 °C	-	%	DIN EN ISO 62	0,3
Nasákovost ve vodě do nasycení	-	%	DIN EN ISO 62	0,5
Stálost rozměrů v souvislosti s teplotou	-	-	relativní hodnota	③
Vhodné pro vysokou přesnost (negativní vůle)	-	-	-	✓
Kompensace geometrických nepřesností	-	-	relativní hodnota	⑤
<b>Vliv okolí</b>				
Nasazení ve vodě	-	-	-	✓
Odolnost proti horké vodě	-	°C	-	80
Citlivost vůči znečištění, prachu, abrazivním částicím	-	-	relativní hodnota	⑥
Odolnost vůči UV záření	-	-	relativní hodnota	⑨
Nasazení ve venkovních podmínkách	-	-	relativní hodnota	⑧
Odolnost vůči chemikáliím	-	-	relativní hodnota	⑦
FDA kompatibilní	-	-	-	✓
Vhodný pro vakuum	-	-	-	✓
Desorpce	$a_{1h}$	mbar*1/(s/cm <sup>2</sup> )	-	1,83 E-6 $\alpha=0,44$
ROHS/WEE	-	-	-	✓
Bez silikonu	-	-	-	✓
Bez PTFE	-	-	-	✓
<b>Sterilizace</b>				
Odolnost vůči dezinfekčním prostředkům	-	-	-	✓
Sterilizace parou	-	-	relativní hodnota	⑥
Sterilizace gama zářením	-	-	relativní hodnota	③
Chemická sterilizace	-	-	relativní hodnota	⑦
UV sterilizace	-	-	relativní hodnota	⑦

### Prohlášení

Všechny zkoušky byly provedeny za normální teploty (23°C), není-li uvedeno jinak. Uvedené hodnoty byly získány jako průměr vícenásobného měření a odrážejí stav momentálních znalostí. Slouží jako informační vodítko ke vhodné volbě konstrukčních materiálů. Nezakládá právní odpovědnost výrobce pro vlastní nasazení. Zkušební tělíska jsou zhotovena z extrudovaných polotovarů.

### Legenda

- ① nízká
- ② vysoká
- ✓ použitelná
- x nepoužitelná
- (✓) omezená
- bz bez zlomu
- n neproveditelná
- neurčená
- nex neexistující



↓

## KUSOVNÍK

POZ.	NÁZEV	VÝKRES/NORMA	KS	HMOT.
1	SLOUP	DP - 2019 - 01 - 01	1	14,5
2	VÝLOŽNÍK - 1	DP - 2019 - 01 - 02	1	8
3	VÝLOŽNÍK - 2	DP - 2019 - 01 - 03	1	6
4	VÝLOŽNÍK - 3	DP - 2019 - 01 - 04	1	5
5	KONCOVKA - 2	DP - 2019 - 01 - 05	1	0,6
6	KONCOVKA - 3	DP - 2019 - 01 - 06	1	0,5
7	DRŽÁK HÁKU	DP - 2019 - 01 - 07	1	1,2
8	ČEP - VÝLOŽNÍK	DP - 2019 - 01 - 08	2	0,8
9	ČEP - SLOUP	DP - 2019 - 01 - 09	1	0,9
10	KLUZNÝ PÁS - 2 PLAST - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 10	4	0,05
11	KLUZNÝ PÁS - 2 PLECH - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 11	4	0,12
12	KLUZNÝ PÁS - 2 PLAST	DP - 2019 - 01 - 12	2	0,05
13	KLUZNÝ PÁS - 2 PLECH	DP - 2019 - 01 - 13	2	0,12
14	KLUZNÝ PÁS - 3 PLAST - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 14	4	0,03
15	KLUZNÝ PÁS - 3 PLECH - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 15	4	0,1
16	KLUZNÝ PÁS - 3 PLAST	DP - 2019 - 01 - 16	2	0,03
17	KLUZNÝ PÁS - 3 PLECH	DP - 2019 - 01 - 17	2	0,1
18	KOTEVNÍ ŠROUB	DP - 2019 - 01 - 18	8	0,22
19	KOTEVNÍ TRUBKA	DP - 2019 - 01 - 19	8	0,1
20	DRŽÁK HADICE - VÝLOŽNÍK	DP - 2019 - 01 - 20	6	0,05
21	DRŽÁK HADICE - SLOUP	DP - 2019 - 01 - 21	2	0,02
22	DRŽÁK ENERGOŘETĚZU	DP - 2019 - 01 - 22	1	0,3
23	KONCOVKA - VÝLOŽNÍK	DP - 2019 - 01 - 23	1	0,2
24				
25				
30	HYDROMOTOR - VÝLOŽNÍK - 1	30/1420	1	5,5
31	HYDROMOTOR - VÝLOŽNÍK - 2	30/1420	1	5,5
32	HYDROMOTOR - SLOUP	106/800	1	20
33	SVĚTELNÝ MAJÁK	NAKUPOVANÝ	1	0,09
34	TOČNA	NAKUPOVANÝ	1	

Měřítko	Hmotnost (kg)	Promítání 	Formát A3
 <p>FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p>	Kreslil Stanislav Vrba	Název <b>KUSOVNÍK</b>	
	Datum 4.3.2019		
	Schválil	Číslo dokumentu DP - 2019 - 01 - K	
<b>KKS</b> KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Datum	List 1 Listů 2	
	Druh dokumentu KUSOVNÍK		



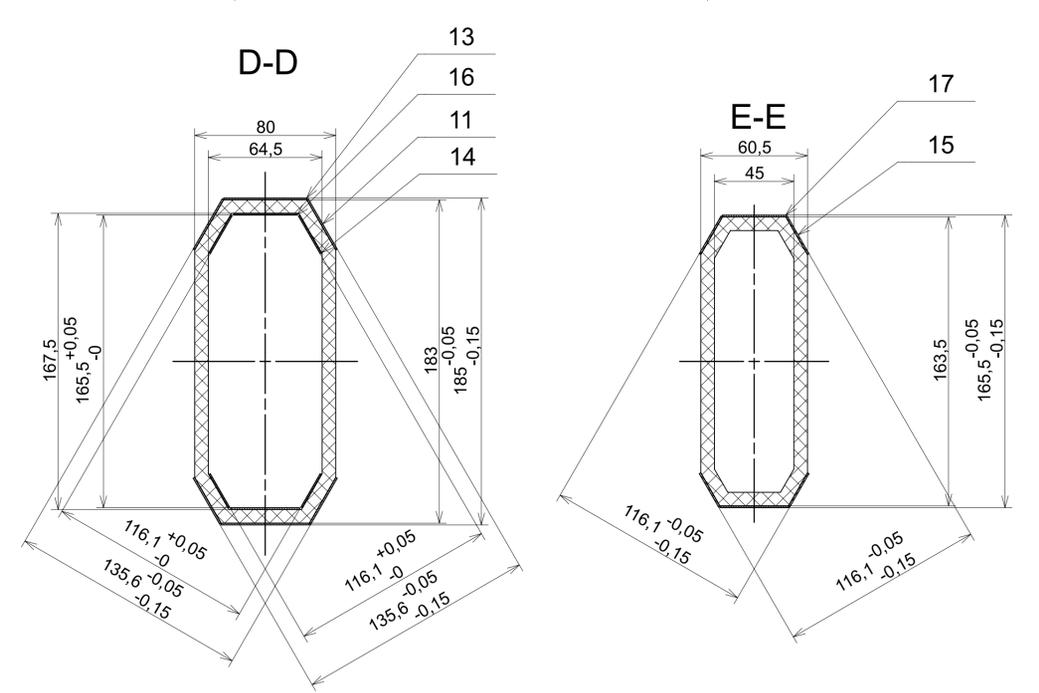
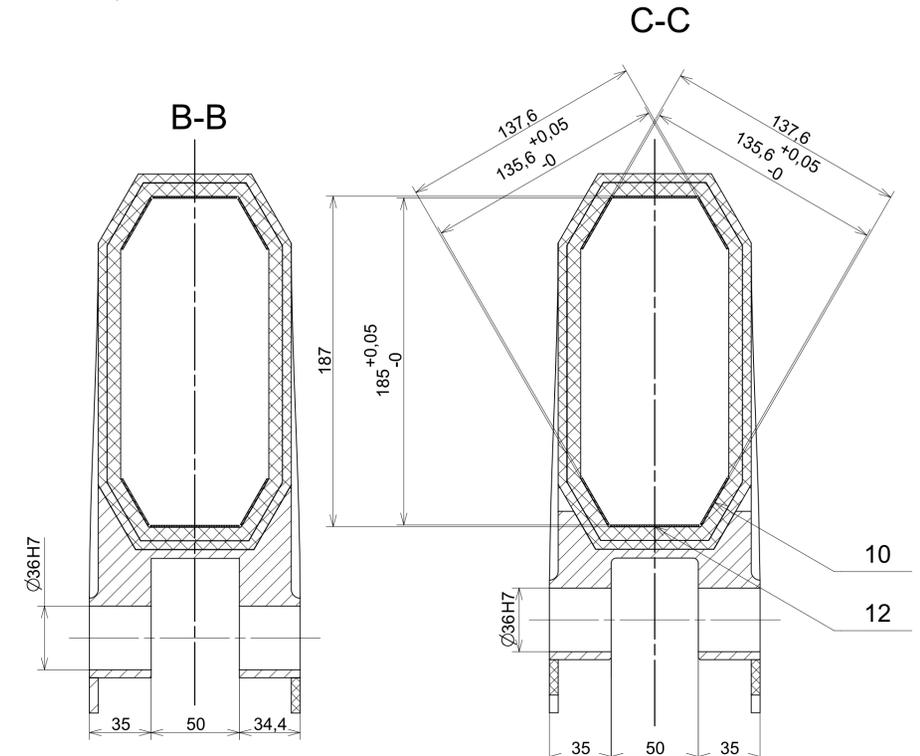
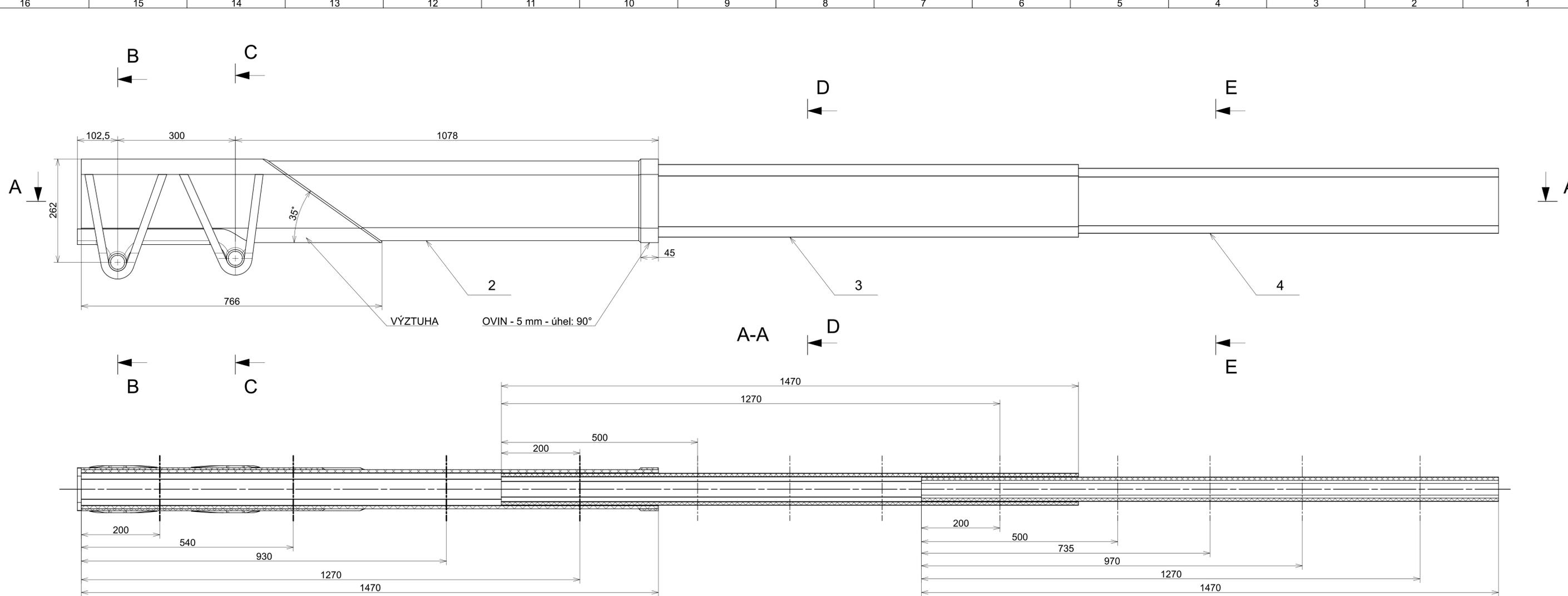
↓

## KUSOVNIK

POZ.	NAZEV	VYKRES/NORMA	KS	HMOT.
35	OKO HYDROMOTORU	M12/15	2	0,25
36	ENERGOŘETĚZ	igus E2/255	1	0,4
37	JEŘÁBOVÝ HÁK	VCÖH.8	1	0,88
38	KALENÉ POUZDRO 30X35	NAKUPOVANÝ	4	0,1
39	KALENÉ POUZDRO 30X50	NAKUPOVANÝ	2	0,08
40	ŠROUB M5X20	DIN 7984	2	0,02
41	PODLOŽKA 5	DIN 988	2	0,005
42	ŠROUB M6X20	DIN 7984	2	0,01
43	PODLOŽKA 6	DIN 988	4	0,005
44	ŠROUB M8X20	DIN 7984	2	0,015
45	PODLOŽKA 8	DIN 988	4	0,007
46	ŠROUB M8X25	DIN 7984	8	0,02
47	POJISTNÝ KROUŽEK 15X1	DIN 471	2	0,005
48	POJISTNÝ KROUŽEK 20X1,2	DIN 471	1	0,006
49	POJISTNÝ KROUŽEK 30X1,5	DIN 471	3	0,007
50	MATICE UZAVŘENÁ M6	DIN 1587	2	0,05
51	ŠROUB M6X16	DIN 7991	4	0,01

Měřítko	Hmotnost (kg)	Promítání 	Formát A4
 <p>FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p>	Kreslil Stanislav Vrba	<p>Název</p> <h1 style="text-align: center;">KUSOVNÍK</h1>	
	Datum 4.3.2019		
<p><b>KKS</b> KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ</p>	Schválil	<p>Číslo dokumentu</p> <h2 style="text-align: center;">DP - 2019 - 01 - K</h2>	
	Datum		
	Druh dokumentu KUSOVNÍK	List 1 Listů 2	

↑



**SKLADBA DÍLŮ VÝLOŽNÍKU**

ID	Tloušťka	Úhel	Vlákn
1	0.35	42	Tenax STS40F13 24K
2	0.25	90	Tenax STS40F13 24K
3	1.61	-	Granoc XN-80-A2S
4	0.6	42	Tenax STS40F13 24K
5	1.57	-	Granoc XN-80-A2S
6	0.6	43	Tenax STS40F13 24K
7	1.98	-	Granoc XN-80-A2S
8	0.59	44	Tenax STS40F13 24K

KUSOVNÍK			
POZ.	NÁZEV	VÝKRES / ROZMĚR	KS
2	1. SEKCE VÝLOŽNÍKU	DP - 2019 - 01 - 02	1
3	2. SEKCE VÝLOŽNÍKU	DP - 2019 - 01 - 03	1
4	3. SEKCE VÝLOŽNÍKU	DP - 2019 - 01 - 04	1
10	KLUZNÝ PÁS - PLAST - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 10 / 29 x 1470 x 2	4
11	KLUZNÝ PÁS - 2 PLECH - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 11 / 29 x 1470 x 2	4
12	KLUZNÝ PÁS - 2 PLAST	DP - 2019 - 01 - 12 / 50 x 1470 x 2	2
13	KLUZNÝ PÁS - 2 PLECH	DP - 2019 - 01 - 13 / 50 x 1470 x 2	2
14	KLUZNÝ PÁS - 3 PLAST - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 14 / 21 x 1470 x 2	4
15	KLUZNÝ PÁS - 3 PLECH - BOČNÍ	DP - 2019 - 01 - 15 / 21 x 1470 x 2	4
16	KLUZNÝ PÁS - 3 PLAST	DP - 2019 - 01 - 16 / 38 x 1470 x 2	2
17	KLUZNÝ PÁS - 3 PLECH	DP - 2019 - 01 - 17 / 38 x 1470 x 2	2

Datum / Date: 25.3.2019 Kreslí / Drawn by: S. Vtba Projedeno / Checked by: --- Schvál / Approved by: --- Index změny: ---		Jméno / Name: S. Vtba Schvál. / APP: --- Datum / Date: --- Podpis / Signature: ---		Projekt / Project: DP C. sestavy / Assembly No.: DP - 2019 - 01 - 00 C. hmot. sestavy: 0,00		Fakulta Strojní Západočeské Univerzity v Plzni	
Tolerance / Tolerování: Soubor-motod / ASME-B ISO 8015 ISO 2768mK		Soubor-vykres / DWG-název: vykres_vyloznic Soubor-vykres / DWG-název: vykres_vyloznic		Projekt / Project: DP C. sestavy / Assembly No.: DP - 2019 - 01 - 00 C. hmot. sestavy: 0,00		Měřítko / Scale: 1:5	
Nazev / Title: MONTÁŽNÍ SESTAVA - VÝLOŽNÍK				Rev. 0 Cílo vykresu / Drawing No.: DP - 2019 - 02 - 00		List / sheet no.: 1 Pocat listu / sheets: 1	

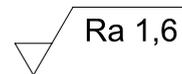
- VÝLOŽNÍK ZOBRAZEN V POLOZE MAXIMÁLNÍHO VYSUNUTÍ  
 POKYNY PRO LEPENÍ KLUZNÝCH PÁSŮ:  
 - VE VZDÁLENOSTECH OZNAČENÝCH ----- VRTAT OTVORY Ø 0.5mm PRO INJEKTÁŽ LEPIDLA  
 - LEPIT POMOCÍ Spabond 345  
 - LEPIT V POLOZE MAXIMÁLNÍHO ZASUNUTÍ  
 - NEVYSOUVAT DO VYTVRZENÍ LEPIDLA

4

3

2

1


 Ra 1,6

D

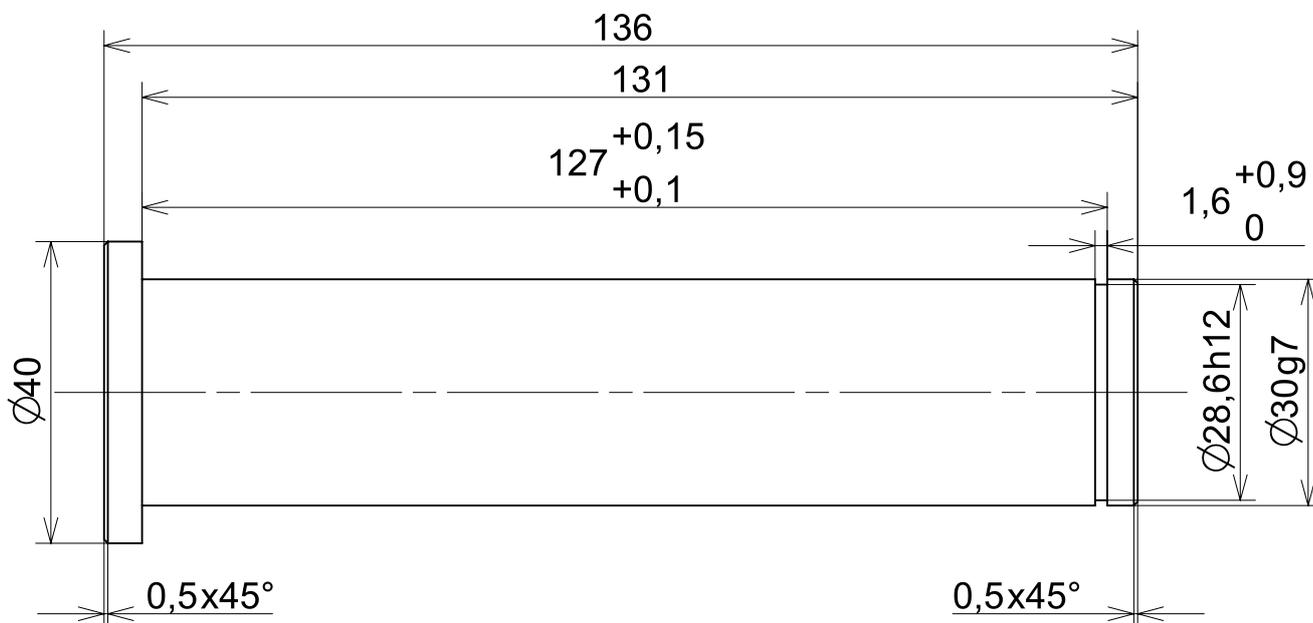
D

C

C

B

B



8

---

KR40-140

12 020

--- 0,800

---

---

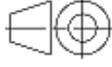
2

Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychodi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			 FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI <small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small>
Kreslil / Drawn by	21.3.2019	S. Vrba			
Prezkousel / Checked by	---	---			
Schvalil / Approved by	---	---			
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---

A

A

 Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file	Projekt / Project:	Meritko / Scale	
	vykres_cep	DP		1:1
	Soubor-vykres / DRW-file	C.sestavy / Assembly No.	DP - 2019 - 01 - 00	
	vykres_cep	DP - 2019 - 01 - 00		
Nazev / Title		Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.	Format
<b>ČEP - VÝLOŽNÍK</b>		0	DP - 2019 - 01 - 08	A4
---		List / sheet no.	Pocet listu / sheets	
		1	1	

4

3

2

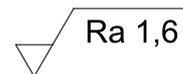
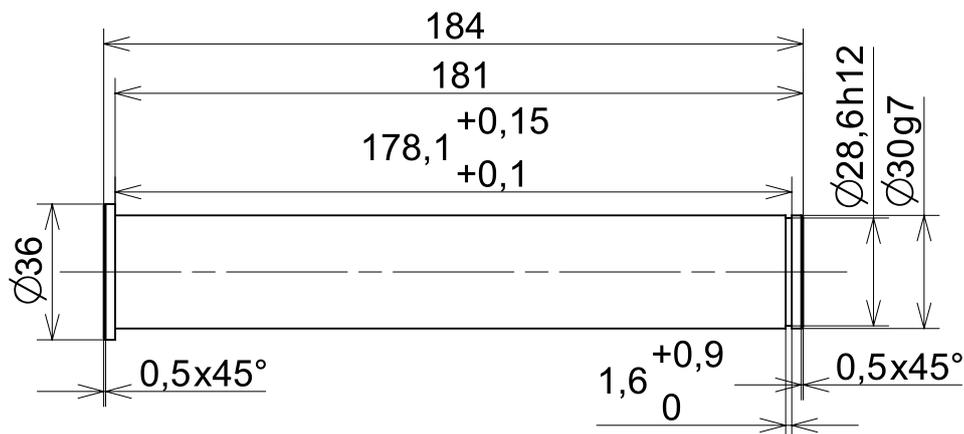
1

4

3

2

1


 Ra 1,6


9

---

KR36-190

11 700

--- 0,900

---

---

1

Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychazi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name		
Kreslil / Drawn by	21.3.2019	S. Vrba		
Prezkousel / Checked by	---	---		
Schvalil / Approved by	---	---		
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---


 FAKULTA STROJNI  
 ZAPADOCESKE  
 UNIVERZITY  
 V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:

---

A



ISO 128

Tolerance /  
TolerovaniISO 8015  
ISO 2768mK

Soubor-model / ASM-file

vykres\_cep\_sloup

Soubor-vykres / DRW-file

vykres\_cep\_sloup

Projekt /  
Project:

DP

C.sestavy /  
Assembly No.

DP - 2019 - 01 - 00

Meritko / Scale

1:2

Nazev / Title

ČEP - SLOUP

Rev.

Cislo vykresu / Drawing No.

0

DP - 2019 - 01 - 09

Format

A4

List / sheet no.

1

Pocet listu / sheets

1

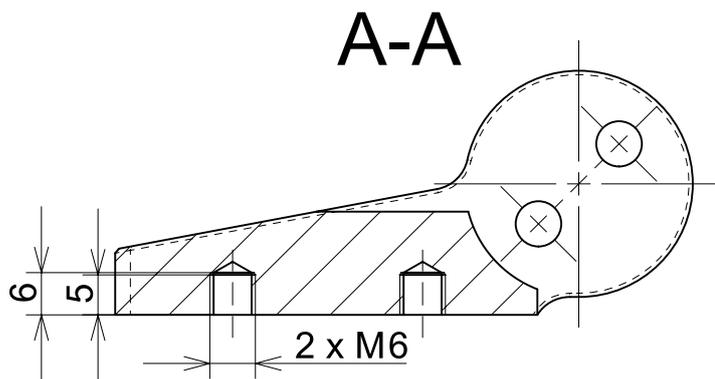
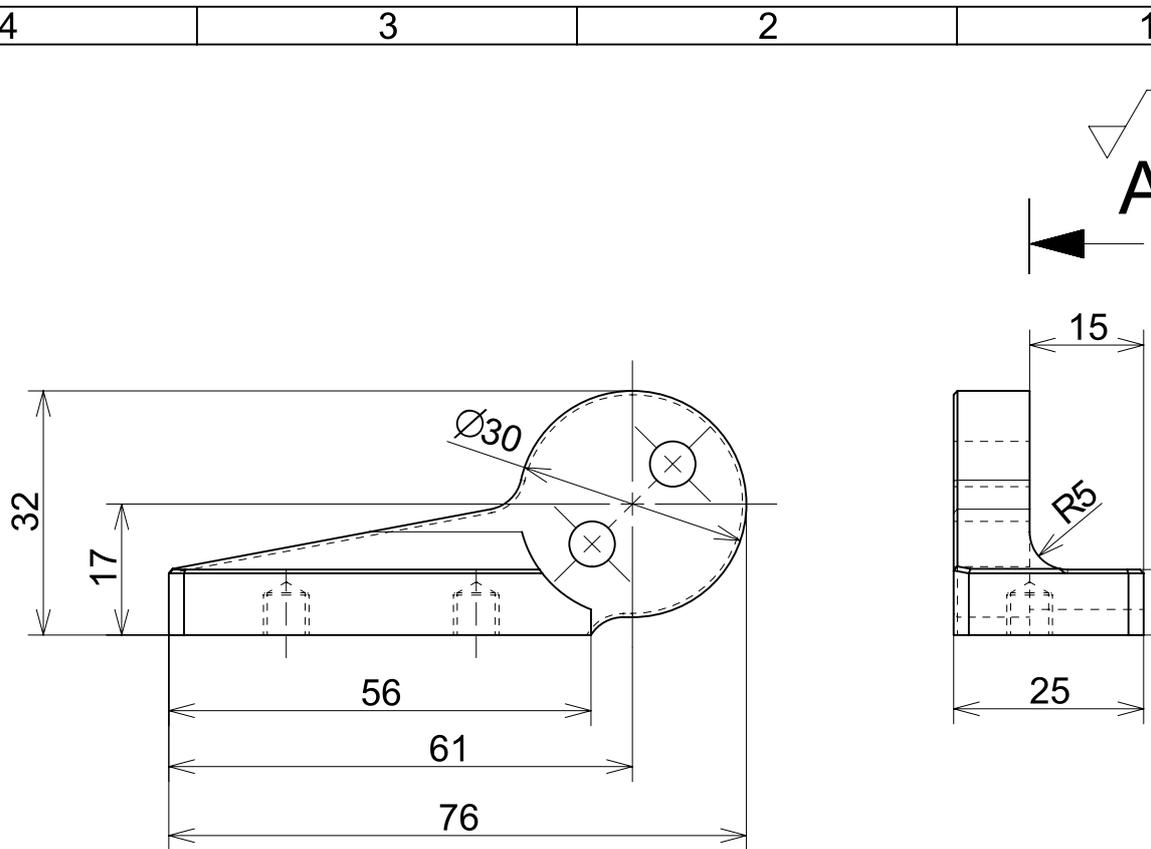
4

3

2

1

A



**B NEKOTOVANÉ ROZMĚRY OBRÁBĚT DLE 3D DAT  
NEKOTOVANÉ SRAŽENÍ HRAN 0.5x45°**

22	---	PL025x35 - 80	11 500	---	0,300	---	---	1
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychodi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name		
Kreslil / Drawn by	22.3.2019	S.Vrba		
Prezkousel / Checked by	---	---		
Schvalil / Approved by	---	---		
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---



FAKULTA STROJNI  
ZAPADOČESKE  
UNIVERZITY  
V PLZNI

Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved

Poznamka / Note:	
---	

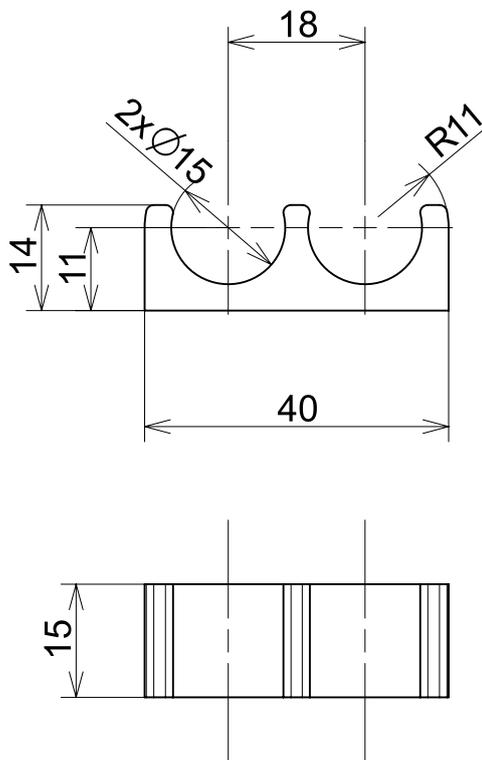
 ISO 128 Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file vykres_drzak_energoretazu	Projekt / Project: DP	Meritko / Scale 1:1
	Soubor-vykres / DRW-file vykres_drzak_energoretazu	C.sestavy / Assembly No. DP - 2019 - 01 - 00	
Nazev / Title <b>DRŽÁK ENERGOŘETĚZU</b>		Rev. 0	Cislo vykresu / Drawing No. <b>DP - 2019 - 01 - 22</b>
---		List / sheet no. 1	Pocet listu / sheets 1
---		Format A4	

4

3

2

1



## NEKOTOVANÉ RADIUSY R1

21	---	---	ABS	---	0,020	---	---	2
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovary	Material konecny/vychodi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			 <p>FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI</p> <p><small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small></p>
Kreslil / Drawn by	24.3.2019	S. Vrba			
Prezkoušel / Checked by	---	---			
Schválil / Approved by	---	---			
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---

 <p>ISO 128</p>	<p>Tolerance / Tolerovani</p> <p>ISO 8015 ISO 2768mK</p>	Soubor-model / ASM-file	Projekt / Project:	DP	Meritko / Scale
		vykres_drzak_hadice_sloup		C.sestavy / Assembly No.	
Nazev / Title		Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.	Format	
DRŽÁK HADICE - SLOUP		0	DP - 2019 - 01 - 21	A4	
---		List / sheet no.	1	Pocet listu / sheets	1

4

3

2

1

4

3

2

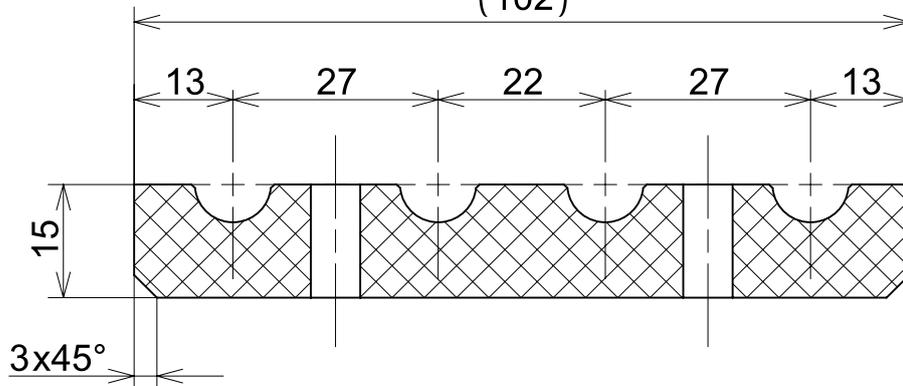
1

D

D

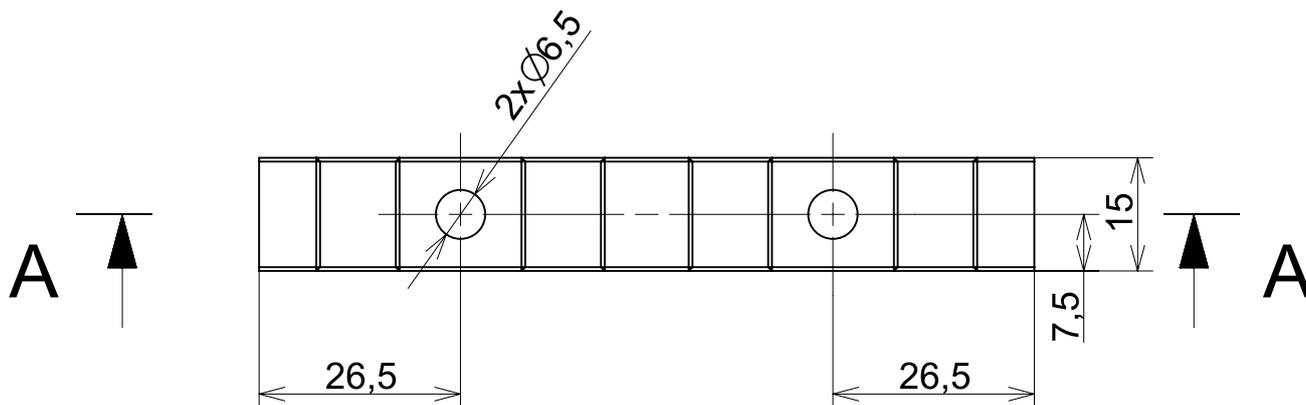
A-A

(102)



C

C



B

B

VŠECHNY HRANY SRAZIT NA 0,5x45°

20	---	---	ABS	---	0,050	---	---	6
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychazi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.

CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name			 FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI <small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small>
Kreslil / Drawn by	21.3.2019	S. Vrba			
Prezkousel / Checked by	---	---			
Schvalil / Approved by	---	---			
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---

A

A

 Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file	Projekt / Project:	DP	Meritko / Scale	
	vykres_drzak_hadice_vyloznik	C.sestavy / Assembly No.	DP - 2019 - 01 - 00		1:1
	Soubor-vykres / DRW-file	Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.	Format	
	vykres_drzak_hadice_vyloznik	0	DP - 2019 - 01 - 20	A4	
Nazev / Title <b>DRŽÁK HADICE - VÝLOŽNÍK</b>		List / sheet no.	1	Pocet listu / sheets	1

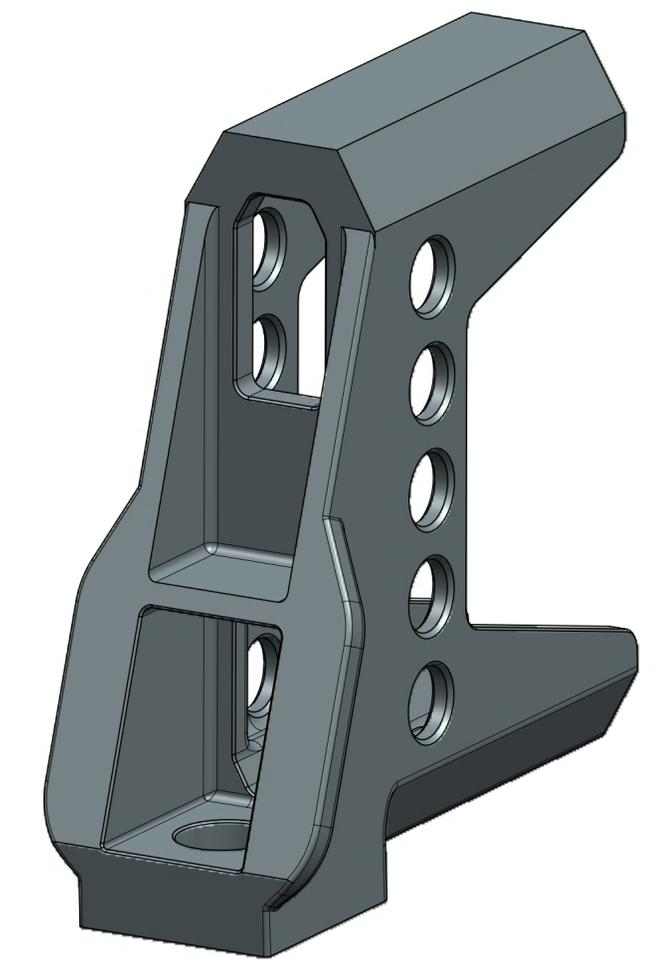
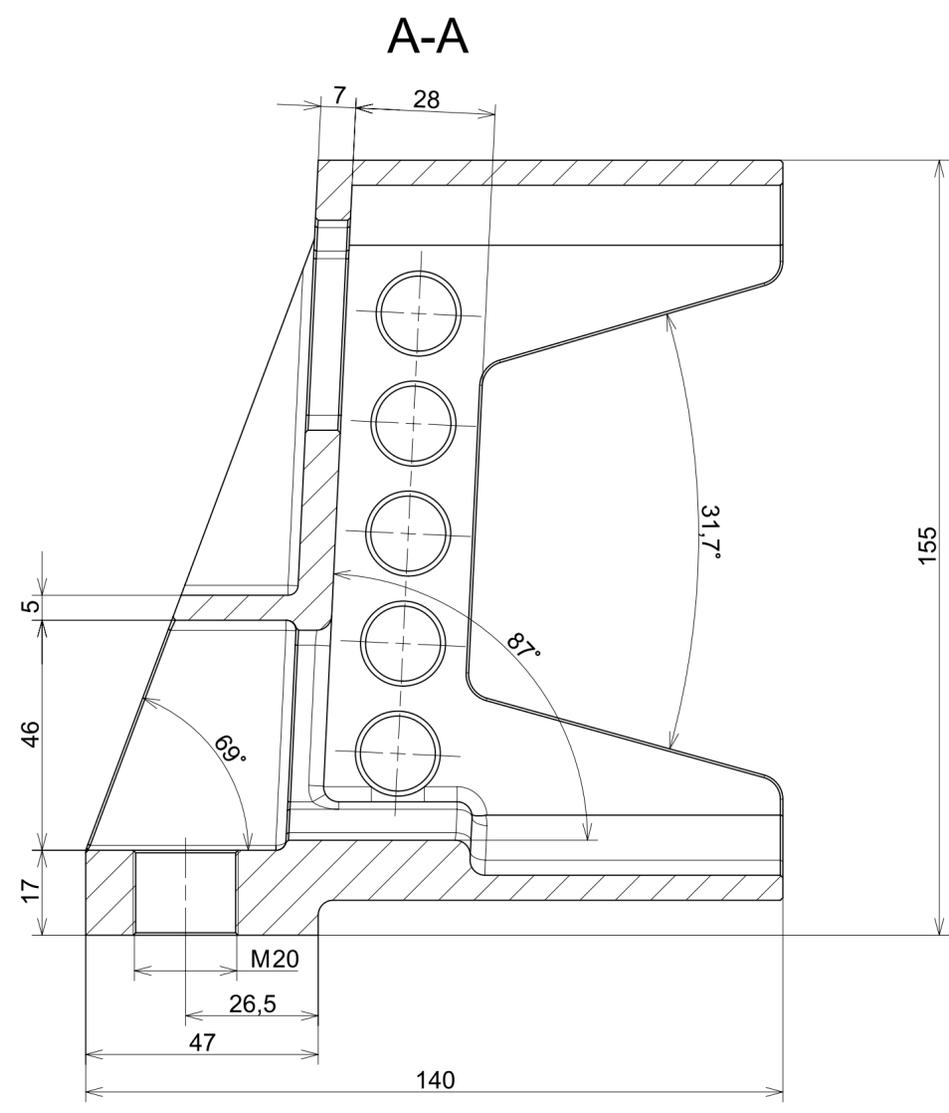
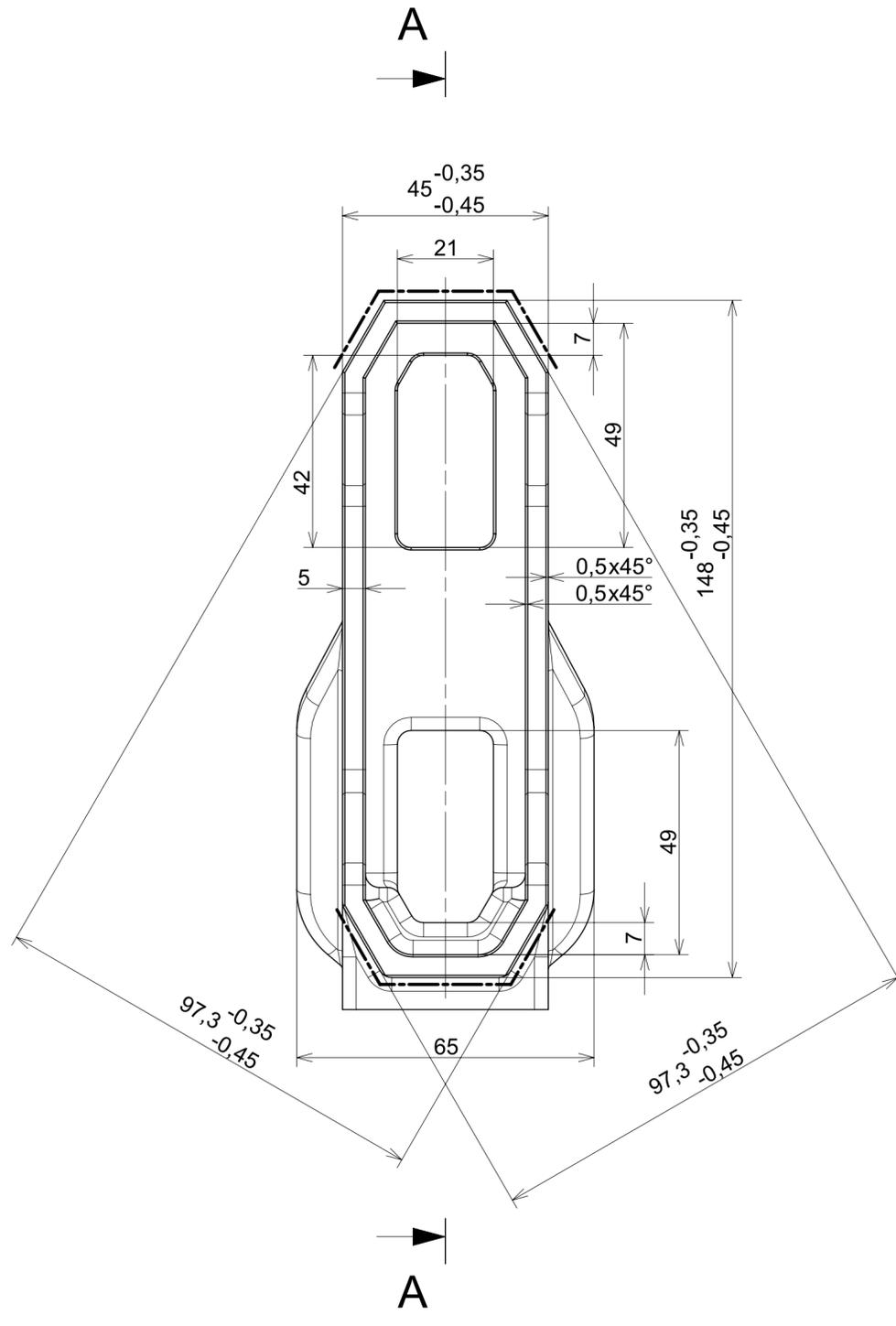
4

3

2

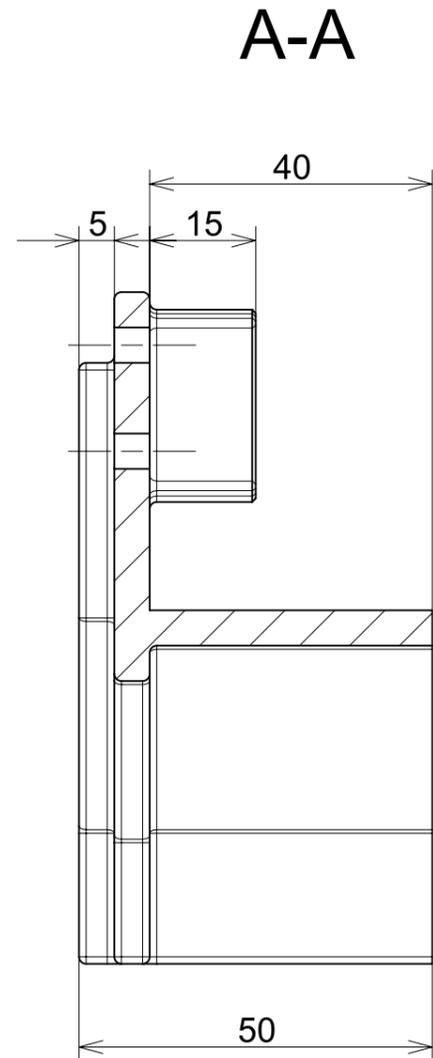
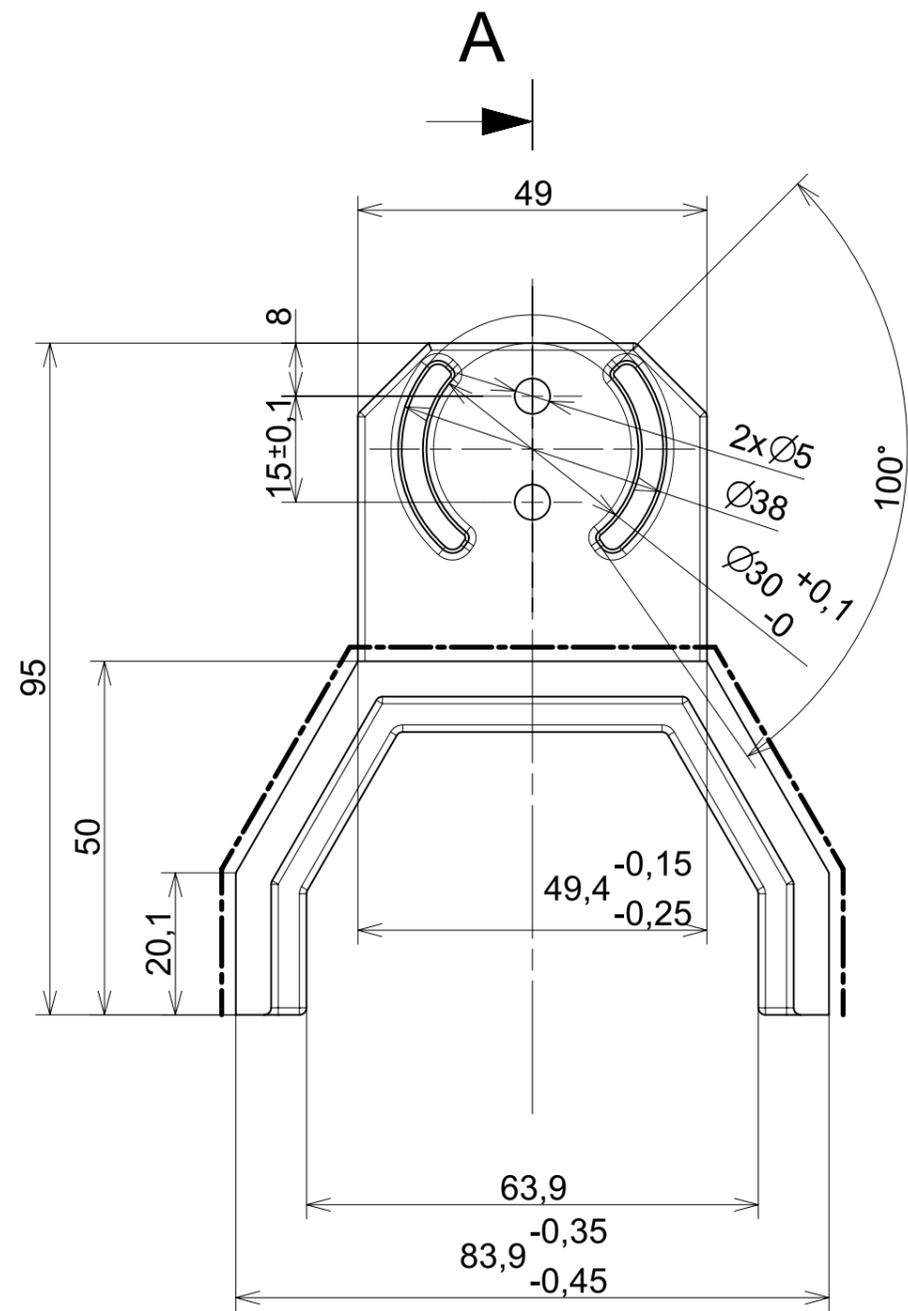
1

Ra 3,2



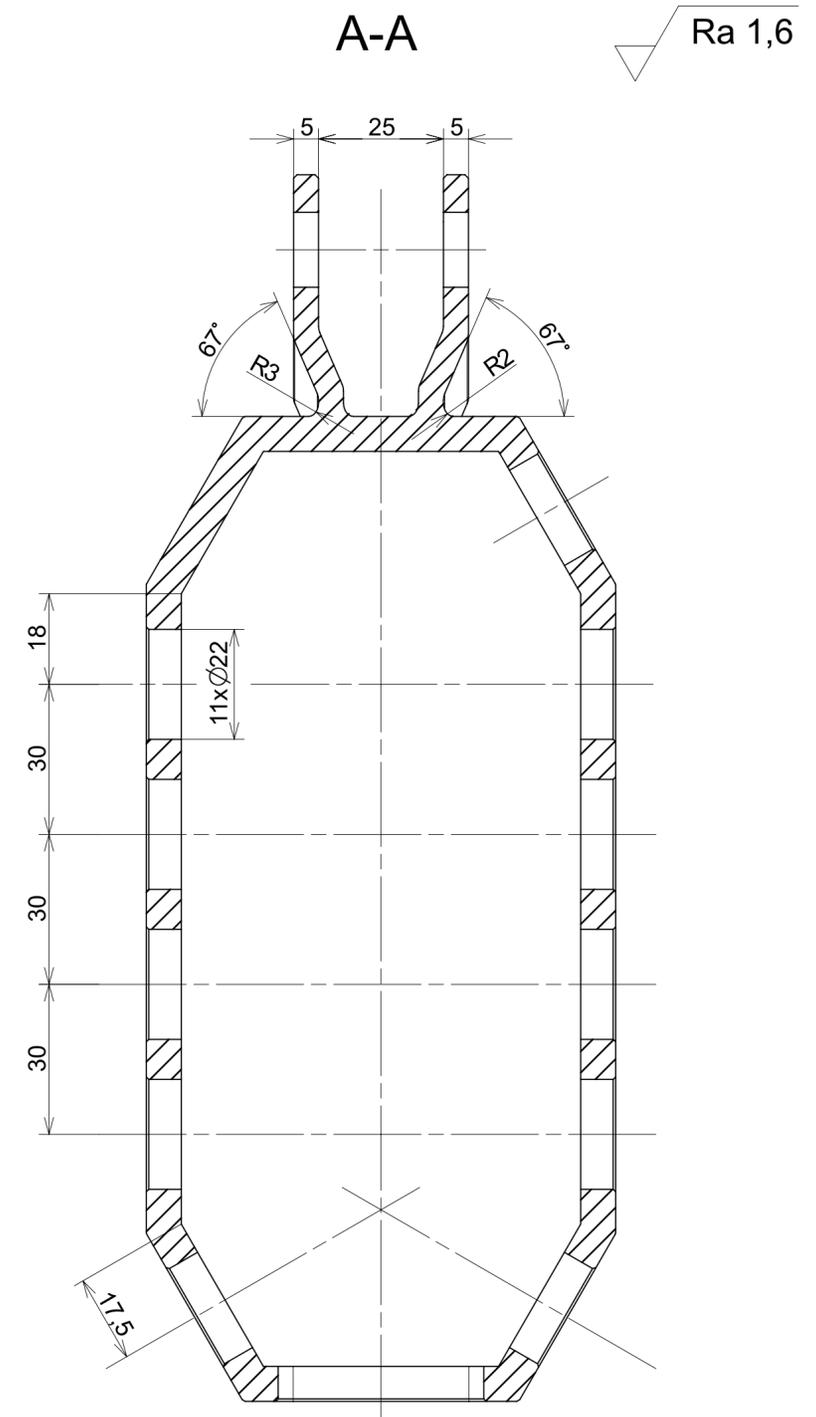
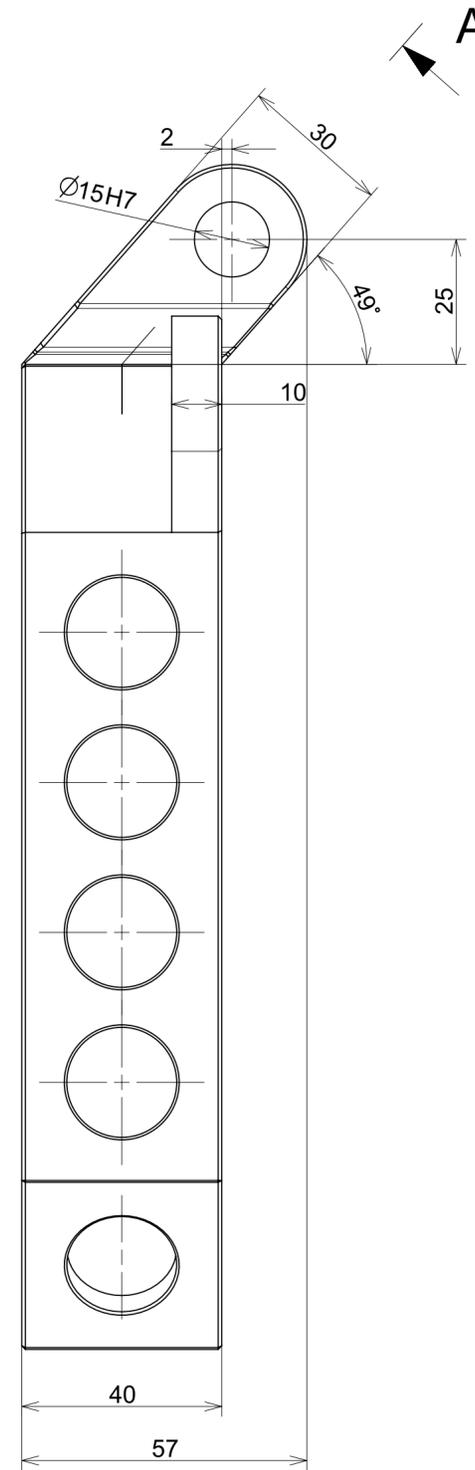
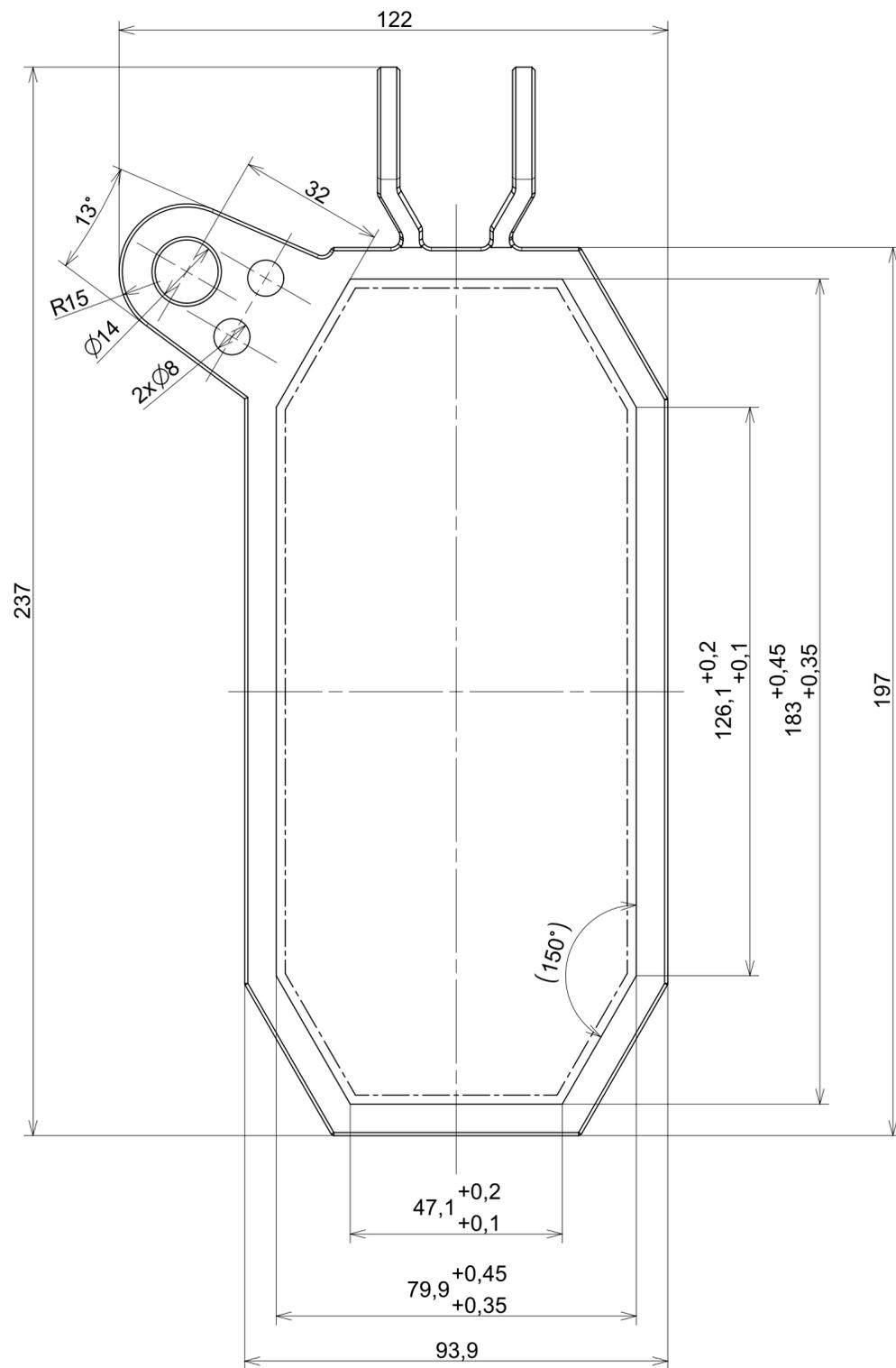
- NEKOTOVANÉ ROZMĚRY OBRÁBĚT DLE 3D DAT
- NEKOTOVANÉ SRAŽENÍ HRAN 0.5x45°
- PLOCHY ZNAČENÉ ----- ZDRSNIT PŘED LEPENÍM
- VYLEHČOVACÍ OTVORY ZAČISTI PO ZALEPENÍ

7	---	PLO65x140 - 160	14 260	---	1,200	---	---	1
Poz.	Název - rozměr	Položovar	Material konečný/vychází	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Číslo výkresu sestavy	Počet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.
cad 1	Datum / Date	Jmeno / Name						
Kreslil / Drawn by	24.3.2019	S. Vrba						
Prezkoušel / Checked by	---	---						
Schválil / Approved by	---	---						
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:			
---	---	---	---	---	---			
---	---	---	---	---	---			
ISO 128	Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file vykres_drzak_haku		Projekt / Project:	DP	Meritko / Scale	1:1	
ISO 128	ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-vykres / DRW-file vykres_drzak_haku		C.sestavy / Assembly No.	DP - 2019 - 01 - 00	Format	A2	
Název / Title				Rev.	Číslo výkresu / Drawing No.	0 DP - 2019 - 01 - 07		
				DRŽÁK HÁKU	0	DP - 2019 - 01 - 07	A2	
				---	List / sheet no.	1	Počet listů / sheets	1



NEKOTOVANÉ ROZMĚRY OBRÁBĚT DLE 3D DAT  
 NEKOTOVANÉ SRAŽENÍ HRAN 0.5x45°  
 PLOCHY ZNAČENÉ ----- ZDRSNIT PŘED LEPENÍM

23	---	PLO85x50 - 100	14 260	---	0,200	---	---	1
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.
CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name		 FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI <small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small>				
Kreslil / Drawn by	28.3.2019	S. Vrba						
Prezkoušel / Checked by	---	---						
Schválil / Approved by	---	---						
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:			
---	---	---	---	---	---			
---	---	---	---	---	---			
 Tolerance / Tolerovani ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file		Projekt / Project:		Meritko / Scale			
	vykres_drzak_vyloznic_3		DP		1:1			
Soubor-vykres / DRW-file		C.sestavy / Assembly No.		Format				
vykres_drzak_vyloznic_3		DP - 2019 - 01 - 00		A3				
Nazev / Title			Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.			Format	
KONCOVKA - VÝLOŽNÍK			0	DP - 2019 - 01 - 23			A3	
---			List / sheet no.	Pocet listu / sheets				
			1	1				

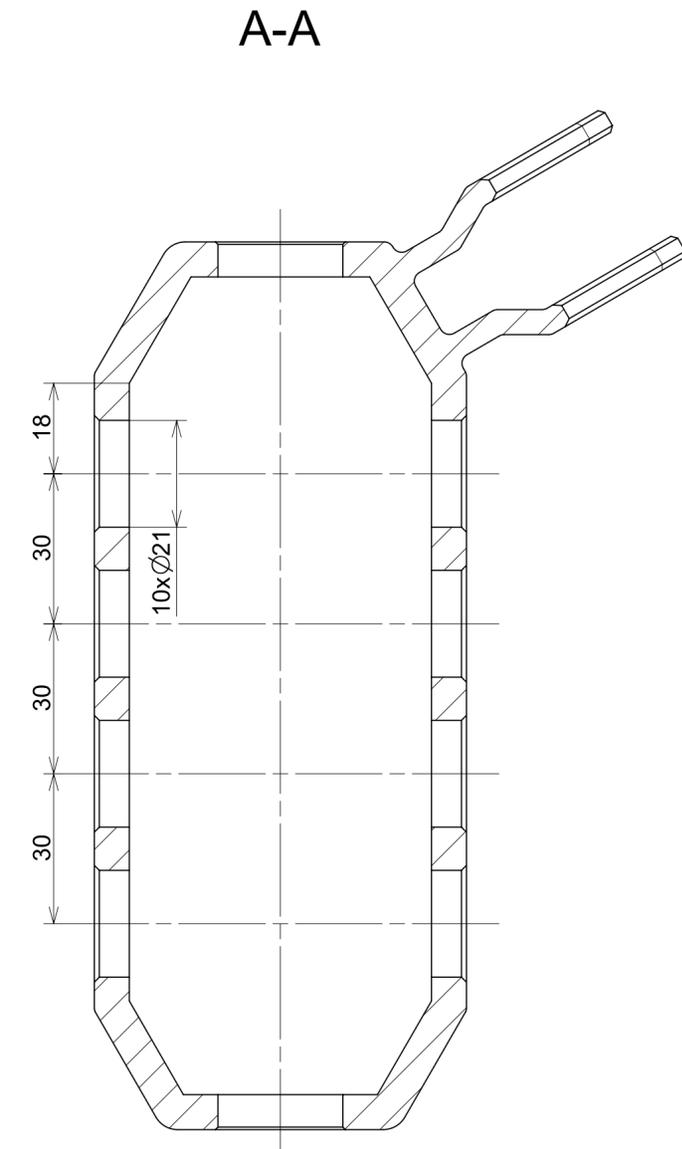
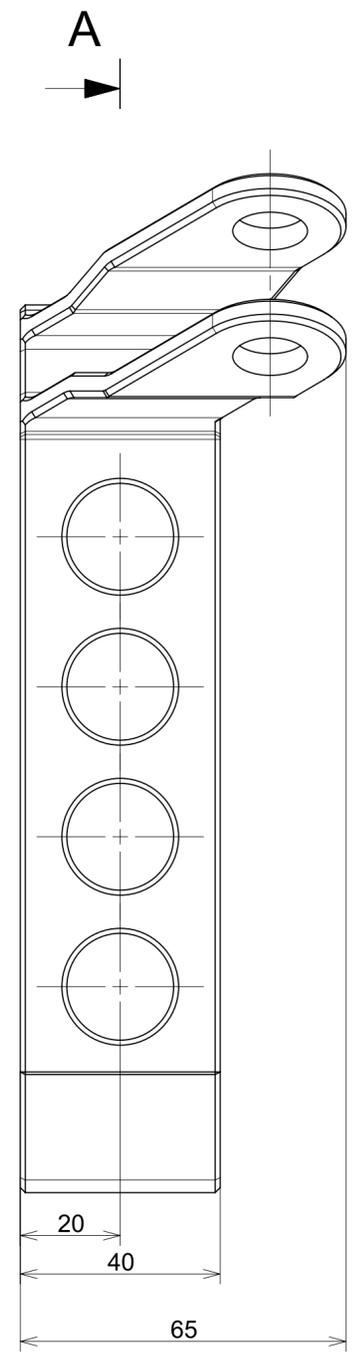
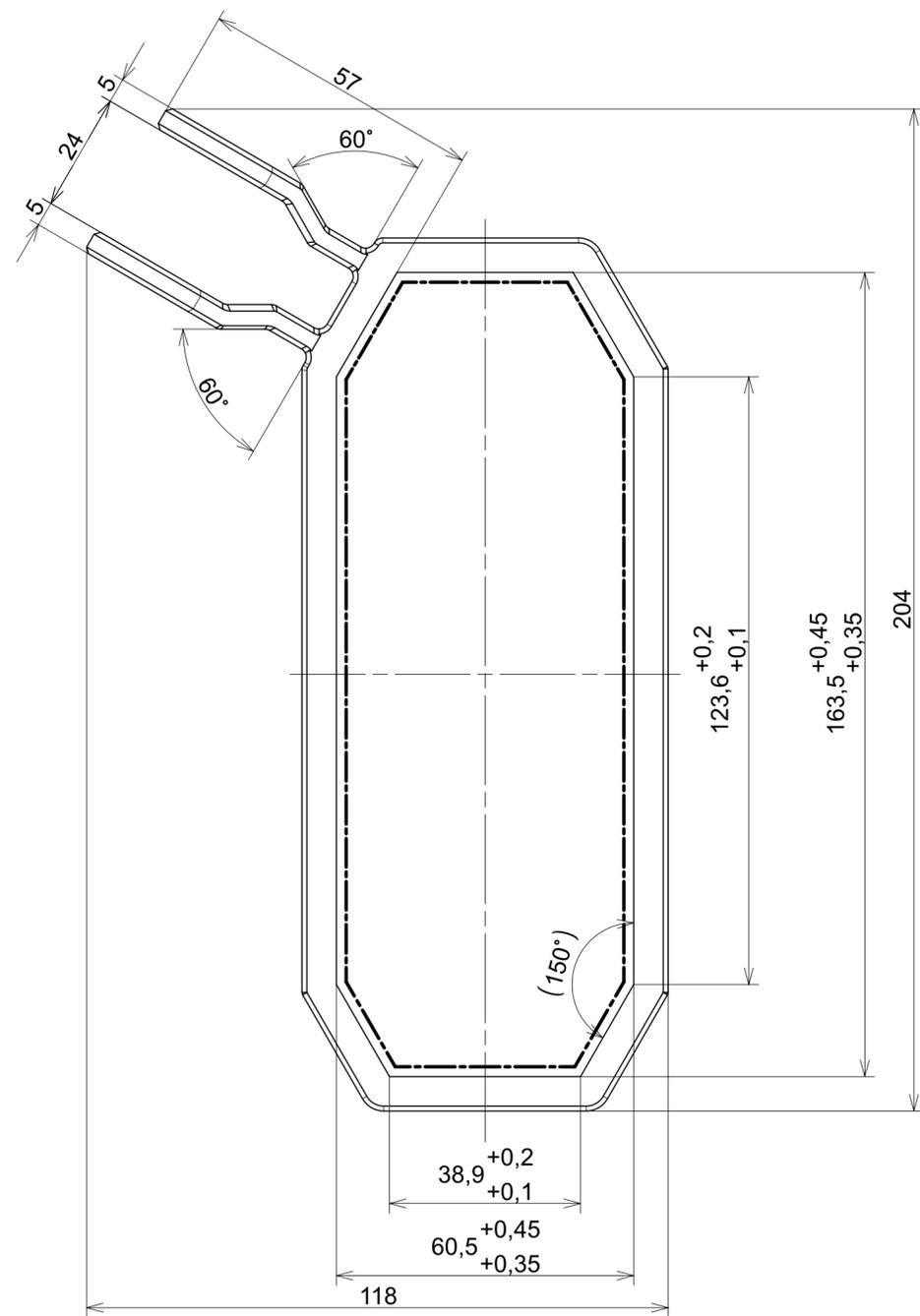


NEKOTOVANÉ ROZMĚRY OBRÁBĚT DLE 3D DAT  
 NEKOTOVANÉ SRAŽENÍ HRAN 0.5x45°  
 PLOCHY ZNAČENÉ ----- ZDRSNIT PŘED LEPENÍM

23	---	PLO60x130 - 240	14 260	---	0,600	---	---	1
Poz.	Nazev - rozmer	Poloovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.
cad 1	Datum / Date	Jmeno / Name						
Kreslil / Drawn by	22.3.2019	S. Vrba						
Prezkoušel / Checked by	---	---						
Schválil / Approved by	---	---						
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:			
---	---	---	---	---	---			
---	---	---	---	---	---			
Tolerance / Tolerovani		Soubor-model / ASM-file		Projekt / Project:		Meritko / Scale		
ISO 8015 ISO 2768mK		vykres_koncovka_vyloznik		DP		1:1		
Soubor-yrkes / DRW-file		vykres_koncovka_vyloznik		C.sestavy / Assembly No.		DP - 20219 - 01 - 00		
Nazev / Title				Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.		Format	
KONCOVKA - VÝLOŽNÍK				0	DP - 2019 - 01 - 05		A2	
				List / sheet no.	1		Pocet listu / sheets 1	



Ra 1,6

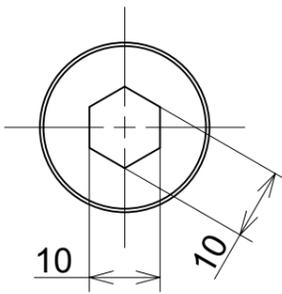
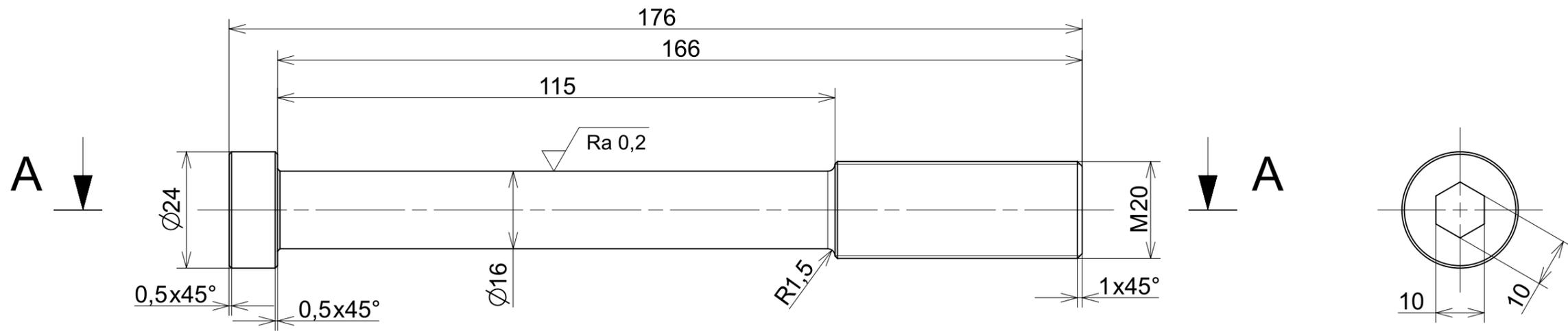


NEKOTOVANÉ ROZMĚRY OBRÁBĚT DLE 3D DAT  
 NEKOTOVANÉ SRAŽENÍ HRAN 0.5x45°  
 PLOCHY ZNAČENÉ ----- ZDRSNIT PŘED LEPENÍM

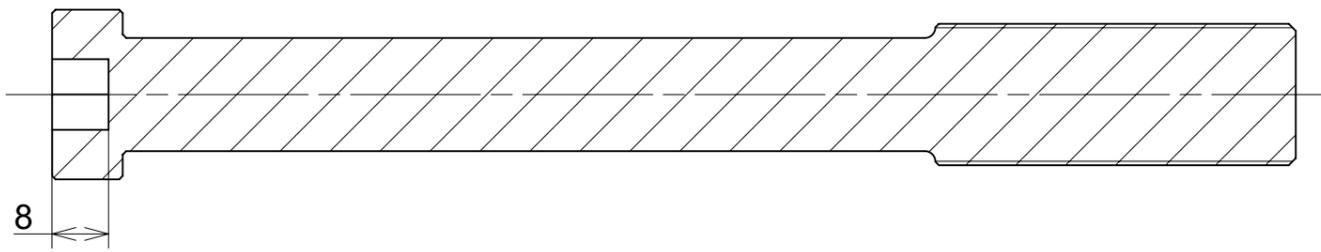
24	---	PLO70x120-210	14 260	---	0,500	---	---	1
Poz.	Nazev - rozmer	Pořadov.	Material konecny/vychodi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.
cad 1	Datum / Date	Jmeno / Name						
Kreslil / Drawn by	22.3.2019	S.Vrba						
Prezkoušel / Checked by	---	---						
Schválil / Approved by	---	---						
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznamka / Note:			
---	---	---	---	---	---			
---	---	---	---	---	---			
Tolerance / Tolerovani		Soubor-model / ASM-file		Projekt / Project:		Meritko / Scale		
ISO 8015 ISO 2768mK		vykres_koncovka_vyloznik_2		DP		1:1		
Soubor-vykres / DRW-file		vykres_koncovka_vyloznik_2		C.sestavy / Assembly No.		DP - 2019 - 01 - 00		
Nazev / Title			Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.			Format	
KONCOVKA - VÝLOŽNÍK - 2			0	DP - 2019 - 01 - 06			A2	
List / sheet no.		1		Pocet listu / sheets		1		

8 7 6 5 4 3 2 1

Ra 0,8



A-A



C

B

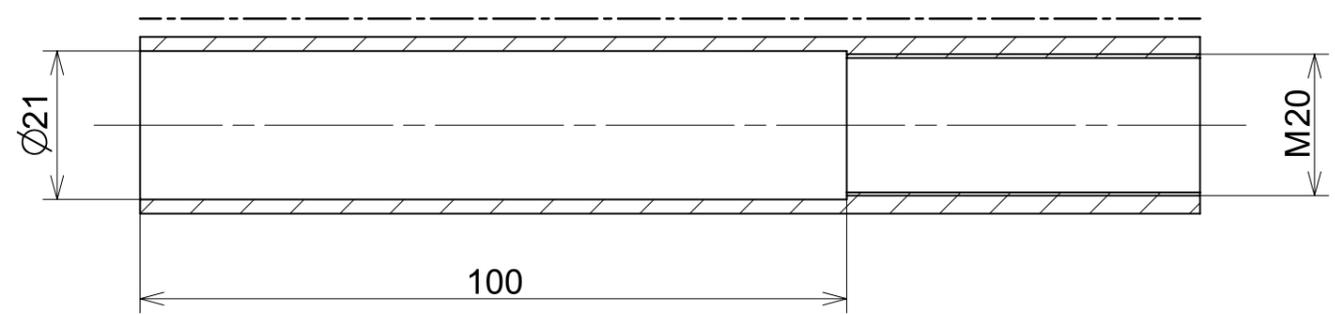
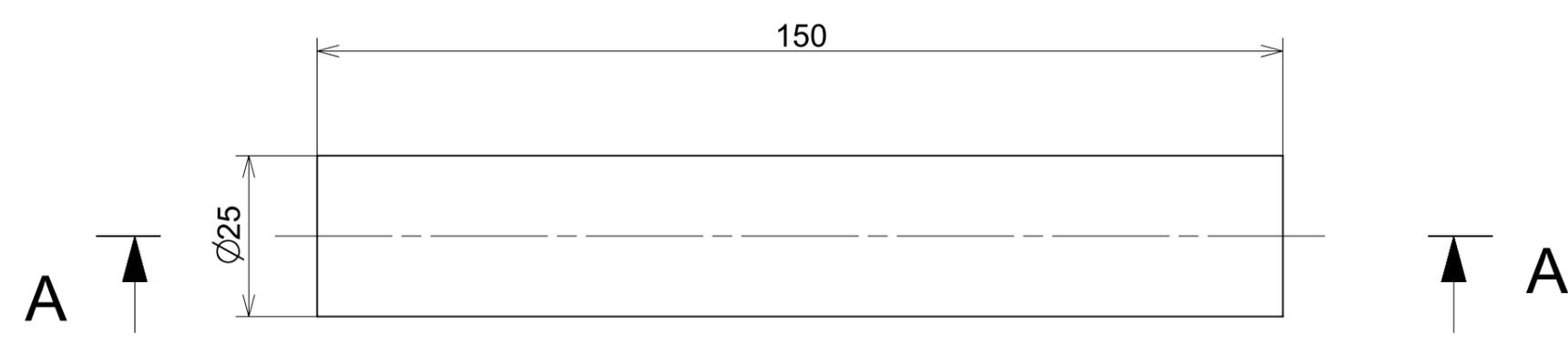
A

18	---	KR25-180	14 260	---	0,220	---	---	8
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.
CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name		 FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI <small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small>				
Kreslil / Drawn by	21.3.2019	S. Vrba						
Prezkoušel / Checked by	---	---						
Schválil / Approved by	---	---						
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznámka / Note:			
---	---	---	---	---	---			
---	---	---	---	---	---			
 Tolerance / Tolerovani ISO 128 ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file		vykres_kotevni_sroub		Projekt / Project:		DP	Meritko / Scale
	Soubor-vykres / DRW-file		vykres_kotevni_sroub		C.sestavy / Assembly No.		DP - 2019 - 01 - 00	
Nazev / Title				Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.			Format
KOTEVNÍ ŠROUB				0	DP - 2019 - 01 - 18			A3
---				List / sheet no.	1	Pocet listu / sheets		1

8 7 6 5 4 3 2 1

8 7 6 5 4 3 2 1

Ra 0,8



A-A

D  
C  
B  
A

D  
C  
B  
A

PLOCHY ZNAČENÉ ----- ZDRSNIT PŘED LEPENÍM

19	---	KR30 - 155	14 260	---	0,100	---	---	8
Poz.	Nazev - rozmer	Polotovar	Material konecny/vychozi	T.O.	C.hmot.	H.hmot	Cislo vykresu sestavy	Pocet ks.
Pos.	Title - size	Blank	End material/Start material	C.W.	Weight	R.weig.	Assembly drawing no.	Quant.
CAD 1	Datum / Date	Jmeno / Name		 FAKULTA STROJNI ZAPADOCESKE UNIVERZITY V PLZNI <small>Vsechna prava vyhrazena / All rights reserved</small>				
Kresil / Drawn by	21.3.2019	S. Vrba						
Prezkoušel / Checked by	---	---						
Schválil / Approved by	---	---						
Index zmeny	Popis zmeny / change description	Schval. / APP	Datum / Date	Podpis / Signature	Poznámka / Note:			
---	---	---	---	---	---			
---	---	---	---	---	---			
 Tolerance / Tolerovani ISO 128 ISO 8015 ISO 2768mK	Soubor-model / ASM-file		Projekt / Project:		Meritko / Scale			
	vykres_kotevni_trubka		DP		1:1			
Soubor-vykres / DRW-file		C.sestavy / Assembly No.		Format				
vykres_kotevni_trubka		DP - 2019 - 01 - 00		A3				
Nazev / Title			Rev.	Cislo vykresu / Drawing No.			Format	
KOTEVNÍ TRUBKA			0	DP - 2019 - 01 - 19			A3	
			List / sheet no.	Pocet listu / sheets				
			1	1				

8 7 6 5 4 3 2 1