

ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

FAKULTA  
STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE

2019

ROBERT  
THEINER

ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

FAKULTA  
STROJNÍ

ÚSTAV  
LETADLOVÉ TECHNIKY

REKONSTRUKCE  
RUČNÍ PUMPY  
NOUZOVÉHO VYSOUVÁNÍ  
PODVOZKU

2019

ROBERT  
THEINER

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Theiner** Jméno: **Robert** Osobní číslo: **425288**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Rekonstrukce nouzového vysouvání podvozku UL letounu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Reconstruction of the emergency extension of UL aircraft landing gear**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Rešerši používaných nouzových systémů hydraulického vysouvání podvozků
- 2) Hydraulické schéma systému s ruční pumpou.
- 3) Zmapování současného řešení
- 4) Rekonstrukci pumpy pro aditivní technologii výroby
- 5) Zatížení a pevnostní kontrolu pumpy
- 6) Hmotový rozbor

Seznam doporučené literatury:

Dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

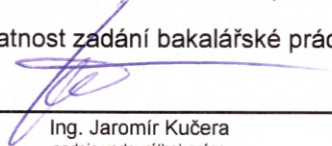
**Ing. Jaromír Kučera, ústav letadlové techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

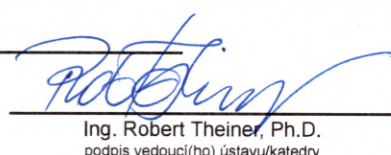
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.08.2019**

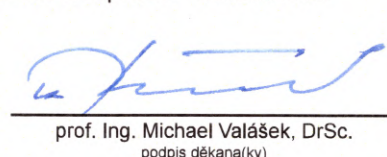
Platnost zadání bakalářské práce:



Ing. Jaromír Kučera  
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Robert Theiner, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



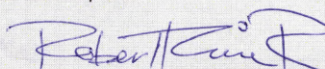
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně.

  
.....  
Podpis studenta

Praha 2019

Děkuji svým rodičům za to, že pro mou sestru a mě vytvořili realitu, ve které jsme oba dostali možnost vystudovat vysokou školu.

Děkuji Ing. Jaromíru Kučerovi za trpělivé vedení mé práce, Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. a Ing. Janu Šimotovi za velmi užitečné konzultace týkající se 3D tisku kovu.

Děkuji také kolegovi Stanislavu Archmanovi za ochotu předávat mi své dlouholeté zkušenosti s prací v CAD/CAM softwaru Siemens NX.

# Anotace

## Abstrakt

Rekonstrukce ruční pumpy nouzového vysouvání podvozku

Cílem této práce je vytvořit návrh rekonstrukce ruční pumpy nouzového vysouvání podvozku pro letoun UL-39 Albi vyvíjený na Ústavu letadlové techniky ČVUT v Praze. Důvodem rekonstrukce je záměr využít při výrobě hydraulických komponentů použitých v letadle moderní aditivní technologie a snížit tím hmotnost letounu v rámci omezeného množství použitých dílů vyrobených z kovu.

## Klíčová hesla

3D tisk kovu, aditivní technologie, hydraulika, kategorie UL, letadlo, nouzový systém, pumpa, zatahovací podvozek

## Abstract

Reconstruction of the manual emergency undercarriage retraction pump

Objective of this work is to redesign existing manual emergency undercarriage retraction pump for UL-39 Albi, microlight category airplane that is being developed by Department of Aerospace of the CTU in Prague. Reason for this is a vision of utilization of modern additive technology in order to save weight on a limited amount of metal parts used on the airplane.

## Keywords

Additive technology, airplane, emergency system, hydraulics, metal 3D printing, microlight category, pump, retractable undercarriage

# Obsah

<b>1</b>	<b>Rešerše používaných nouzových systémů hydraulického vysouvání podvozku</b>	<b>10</b>
1.1	UL-39 Albi	11
1.2	JMB Aircraft VL-3 Evolution	12
1.3	Aerospool WT-9 Dynamic Speed	13
1.4	TL-ULTRALIGHT Stream	14
<b>2</b>	<b>Hydraulické schéma systému s ruční pumpou</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>Zmapování současného řešení</b>	<b>16</b>
3.1	Princip fungování ruční pumpy	16
3.2	Konstrukce pumpy	17
3.2.1	Mechanismus páky	18
3.2.2	Tělo pumpy	19
3.2.3	Sestava pístu	21
3.2.4	Hydraulické komponenty	22
3.2.4.1	Řízený zpětný ventil	22
3.2.4.2	Zpětné ventily	22
3.2.4.3	Natloukací zátky	23
3.2.4.4	Spojovací armatury	24
3.2.4.5	Hadicová vsuvka	24
<b>4</b>	<b>Rekonstrukce pumpy pro aditivní technologii</b>	<b>25</b>
4.1	Cíle rekonstrukce	25
4.2	Základní kritéria konstrukce pro výrobu aditivními technologiemi	26
4.3	Geneze návrhu rekonstrukce	30
4.3.1	Verze 1	30
4.3.2	Verze 2	31
4.3.3	Verze 3	32
4.3.4	Verze 4	33
4.3.5	Verze 5 a Verze 6	34
4.3.6	Verze 7 - pracovní verze pro UL-39 Albi	38
4.3.7	Verze 8 - finální verze pro UL-39 Albi II	41
4.4	Obrobení výtisku těla pumpy	51
4.4.1	Koncepční návrh vrtacího přípravku	51
4.4.2	Postup obrábění	52
4.5	Úprava interiéru pro montáž	54
4.6	Návrh mechanismu	59
4.6.1	Konstrukce páky	60
4.6.2	Konstrukce binárního členu	61
4.6.3	Konstrukce pístu	61
4.6.4	Konstrukce táhla	62
4.7	Celková sestava pumpy	66

<b>5</b>	<b>Zatížení a pevnostní kontrola pumpy</b>	<b>70</b>
5.1	Statická analýza sestavy pumpy . . . . .	71
5.1.1	Uvolnění kloubového ložiska . . . . .	72
5.1.2	Uvolnění táhla . . . . .	72
5.1.3	Uvolnění pístu . . . . .	73
5.1.4	Uvolnění binárního členu . . . . .	73
5.1.5	Uvolnění páky . . . . .	74
5.1.6	Výsledky statické analýzy . . . . .	75
5.2	Pevnostní kontrola členů mechanismu . . . . .	76
5.2.1	Kontrola pevnosti táhla . . . . .	76
5.2.2	Kontrola pevnosti pístní tyče . . . . .	82
5.2.3	Dimenzování čepů . . . . .	87
5.2.4	Dimenzování šroubů . . . . .	88
5.2.5	Kontrola pevnosti páky . . . . .	89
5.2.6	Kontrola pevnosti binárního členu . . . . .	91
5.3	FEM analýza tištěného těla pumpy . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Hmotový rozbor</b>	<b>97</b>



# Úvod

Zatahovací podvozek není v kategorii ultralehkých letadel běžně používaný systém. Letadla této kategorie jsou určena především k rekreačnímu létání a nejsou primárně navrhována k podávání vysokých výkonů. Benefit snížení odporu vzduchu při letu se zataženým podvozkem tedy nemá takovou váhu jako v jiných kategoriích. Návrh zatahovacího podvozku nemá při konstrukci prioritu a spíše se zohledňují jiná kritéria, pro tuto kategorii typická, za účelem maximálního zjednodušení, a tedy zlevnění konstrukce, výroby a provozu.

Pokud se výrobce rozhodne vyrábět ultralehké letadlo se zatahovacím podvozkem, jde jistým způsobem proti této filosofii, protože právě konstrukce a instalace takového systému jsou věci, kterým musí být dáována priorita a musí se s nimi počítat od začátku vývoje takového letadla.

I tak existují ultralehká letadla, která systémem zatahovacího podvozku disponují. Jsou to letadla většinou luxusního charakteru pro zákazníky s nároky na výkon. Tito zákazníci mají dostatečné finanční prostředky, ale nechtějí hospodařit s letadly pokročilejších kategorií, jakou je například General Aviation, tedy kategorie letadel o hmotnosti vyšší než 750 kg. Finanční, časové, ale i organizační nároky na provoz a údržbu jsou v těchto hmotnostních třídách řádově vyšší.

Ultralehké letadlo se zatahovacím podvozkem, s jiným než ručně ovládaným mechanismem vysouvání, musí být dle certifikační specifikace CS-VLA [1, CS-VLA 729 (c)] vybaveno systémem nouzového vysouvání pro případ závady pohonu mechanismu. Způsob nouzového vysouvání podvozku většinou vychází z charakteru samotné podvozkové soustavy.

# 1 Rešerše používaných nouzových systémů hydraulického vysouvání podvozku

Zamykání podvozkových noh letadla vybaveného hydraulickým systémem může být provedeno více způsoby, typicky mechanickými zámky nebo hydraulickými zámky, realizovanými pomocí systému zpětných ventilů a šoupátek, které umožňují kapalině proudit vždy pouze jedním směrem podle toho, odkud kam je kapalina přečerpávána, respektive jestli je podvozek vysouván nebo zasouván.

V případě využití hydraulických zámků zůstává kapalina v době, kdy čerpadlo nepracuje, uzamčena v prostoru mezi šoupátkem a zpětným ventilem bez ohledu na provozuschopnost čerpadla. Podvozkové nohy se tedy nemohou vlastní vahou za letu vysunout nebo zasunout vlivem hmotnosti letadla v době, kdy se pohybuje nebo stojí na zemi. Pro odemknutí takových zámků v situaci, kdy čerpadlo nefunguje, je potřeba dodat tlak záložním systémem, u ultralehkých letadel nejčastěji ruční pumpou umístěnou v dosahu pilota. V případě vícemístného letadla musí být pumpa umístěna tak, aby na ni primárně dosáhl pilot. Není dáno, že by na pumpu museli dosáhnout i jiní členové posádky, protože dvojí a vícené zálohování částí hydraulického systému je konstrukčně velice složité a přináší nárůst hmotnosti. Po odemknutí zámků se následně podvozek vlastní vahou vysune. Vysouvání může být urychleno pumpováním, nicméně v průběhu vysouvání pilot nekoná prakticky žádnou práci, pouze přesouvá objem kapaliny systémem. Když je podvozek vysunut je třeba opět pumpovat, aby byla šoupátka zámků přesunuta do uzavřené polohy a kapalina mezi nimi zůstala uzamčena. Při změně polohy šoupátek pilot opět koná práci, protože překonává odpor pružin šoupátek.

Při použití mechanických zámků je třeba u malých letadel pro nouzové vysunutí podvozku zámky uvolnit a následně za letu vypustit hydraulickou kapalinu ze systému. Podvozek samotný totiž nemá dostatečnou hmotnost, aby bylo možné zanedbat viskozitu hydraulické kapaliny, za jejíž přítomnosti by se podvozek vysouval zdlouhavě. Zamknutí podvozku ve vysunuté poloze probíhá opět mechanicky za pomoci kinematiky mechanismu zámků. Zamknutí mechanických zámků může být podpořeno plynovými vzpěrami nebo může pilot využít gravitačních a setrvačných účinků odemknutých podvozkových noh. Například při uspořádání podvozku tak, že je vysouván a zasouván v normálové rovině k ose letu, může zkušený pilot naklánět letadlo pro zvýšení účinku gravitace na jednotlivé podvozkové nohy.

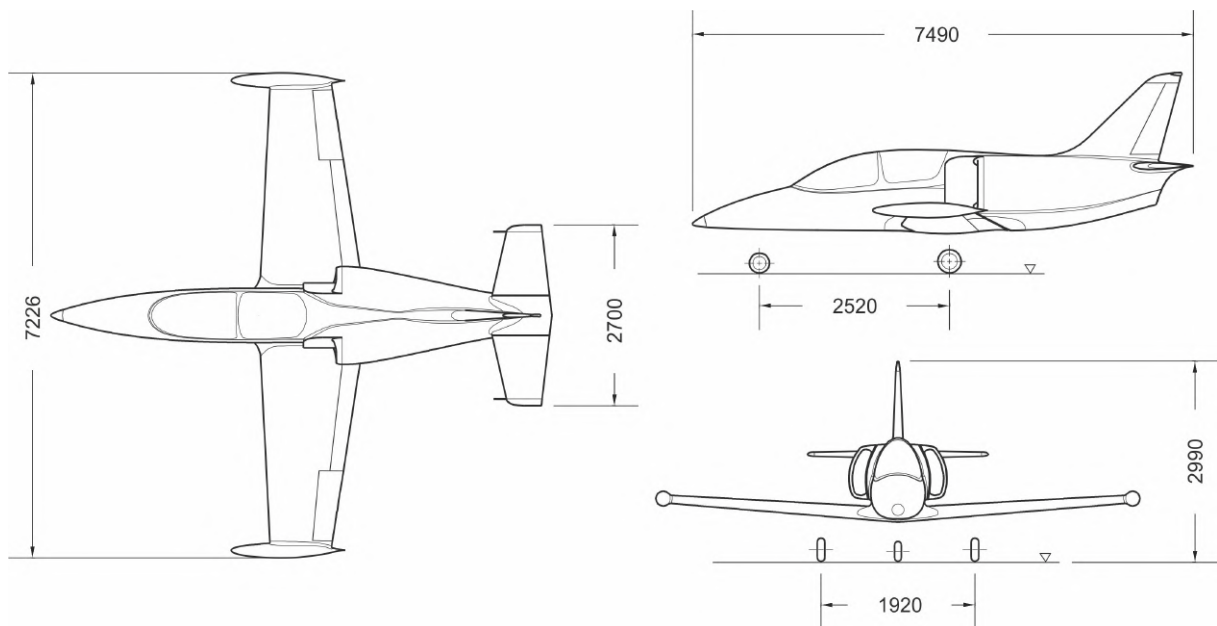
Sportovní letadla mohou být také vybavena zásobníkem se stlačeným plynem. Ten může být po vypuštění hydraulické kapaliny jednorázově použit pro násilné vysunutí podvozkových noh, při kterém dojde i k jejich zajištění mechanickými zámky.

Pro libovolné konstrukční řešení nouzového vysouvání podvozku může k úspěšnému vysunutí přispět vhodně zvolená kinematika mechanismu podvozkových noh, jako je vysouvání podvozku proti směru letu, kdy odporová síla proudu vzduchu tlačí do podvozkových noh a pomáhá tím gravitační síle s vysouváním.

V rámci výroby jakéhokoliv komponentu užívaného ve strojírenství je základním předpokladem k úspěšné konstrukci informace o již existujících řešeních a jejich konkrétních aplikacích. V případě systému nouzového vysouvání podvozku je třeba udělat rešerši mezi výrobci ultralehkých letadel. Předmětem rešerše této práce je několik typů ultralehkých letadel vyráběných v České republice, průřezově postihujících několik konstrukčních řešení používaných v dnešní době.

## 1.1 UL-39 Albi

UL-39 Albi je celokompozitový samonosný dvoumístný dolnoplošník se sedadly uspořádanými za sebou, s příďovým zasouvacím podvozkiem, poháněný nekonvenčním ventilátorovým pohonem.

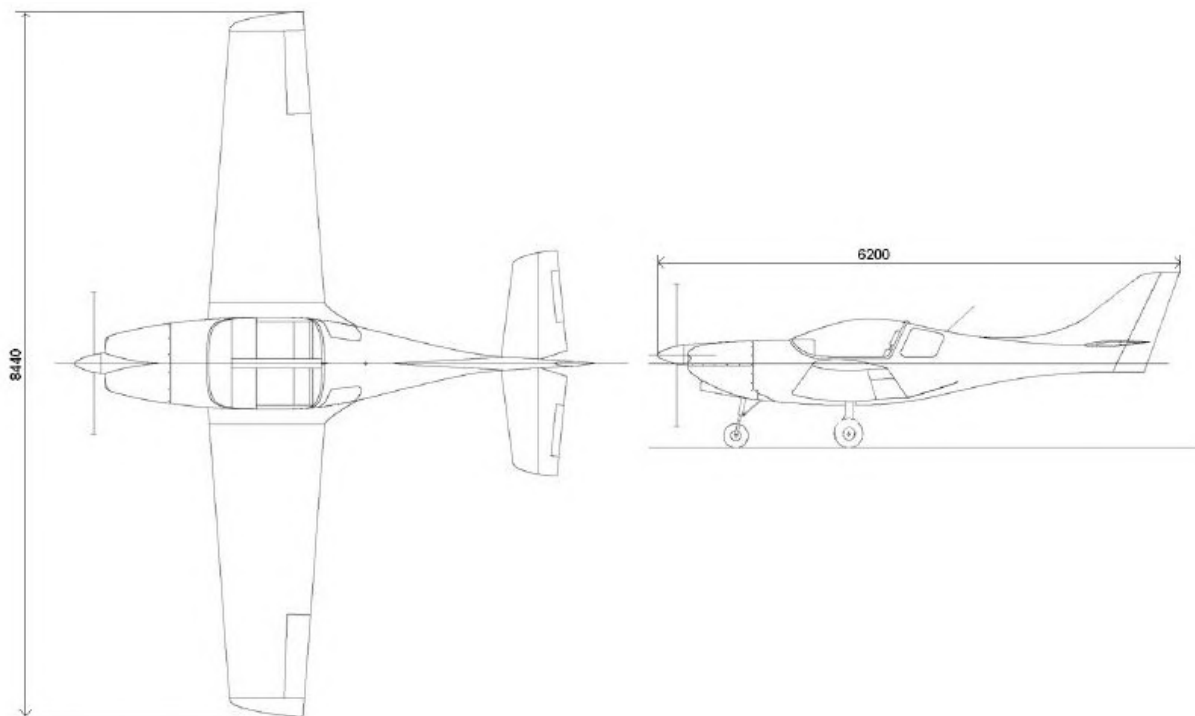


Obr. 1.1: Třípohledový výkres letadla UL-39 Albi [22]

Provozní tlak hydraulického systému letadla Albi je 12 MPa. Pohon čerpadla je zajištěn elektromotorem. Nouzový systém vysouvání podvozku je realizován pomocí pákové ruční pumpy, umístěné na podlaze mezi nohama předního pilota. Zamykání podvozkových noh je vyřešeno hydraulickými zámky.

## 1.2 JMB Aircraft VL-3 Evolution

VL-3 Evolution je jednomotorový, samonosný dvoumístný dolnoplošník se sedadly uspořádanými vedle sebe, s předovým zasouvacím podvozkem. Drak letadla je vyráběn z kompozitních materiálů.

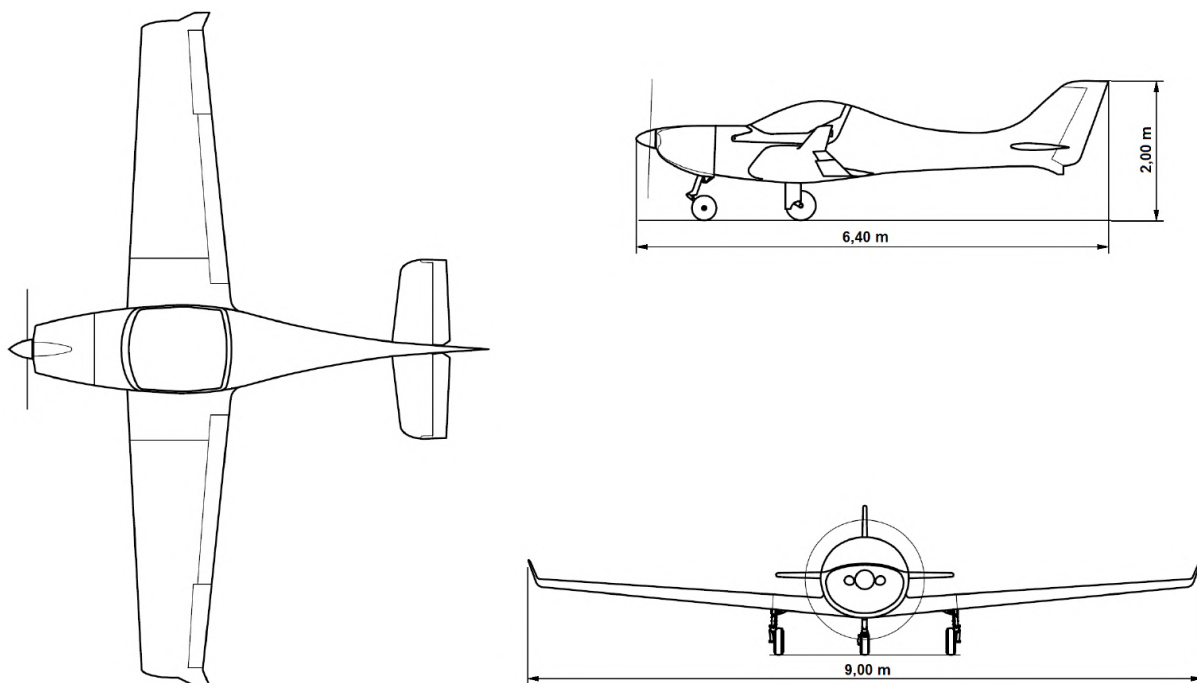


Obr. 1.2: Dvoupohledový výkres letadla VL-3 Evolution [22]

Dle operačního manuálu [22] je nouzové vysouvání podvozku prováděno ruční pumpou. Pro vysunutí a zamknutí podvozku je třeba minimálně 50 cyklů stlačení.

### 1.3 Aerospool WT-9 Dynamic Speed

WT-9 Dynamic Speed je jednomotorový, samonosný dvoumístný dolnoplošník se sedadly uspořádanými vedle sebe, s příďovým zasouvacím podvozkem. Drak letadla je vyráběn z kompozitních materiálů. Informace a dokumentaci poskytl poskytl firma Aerospool.

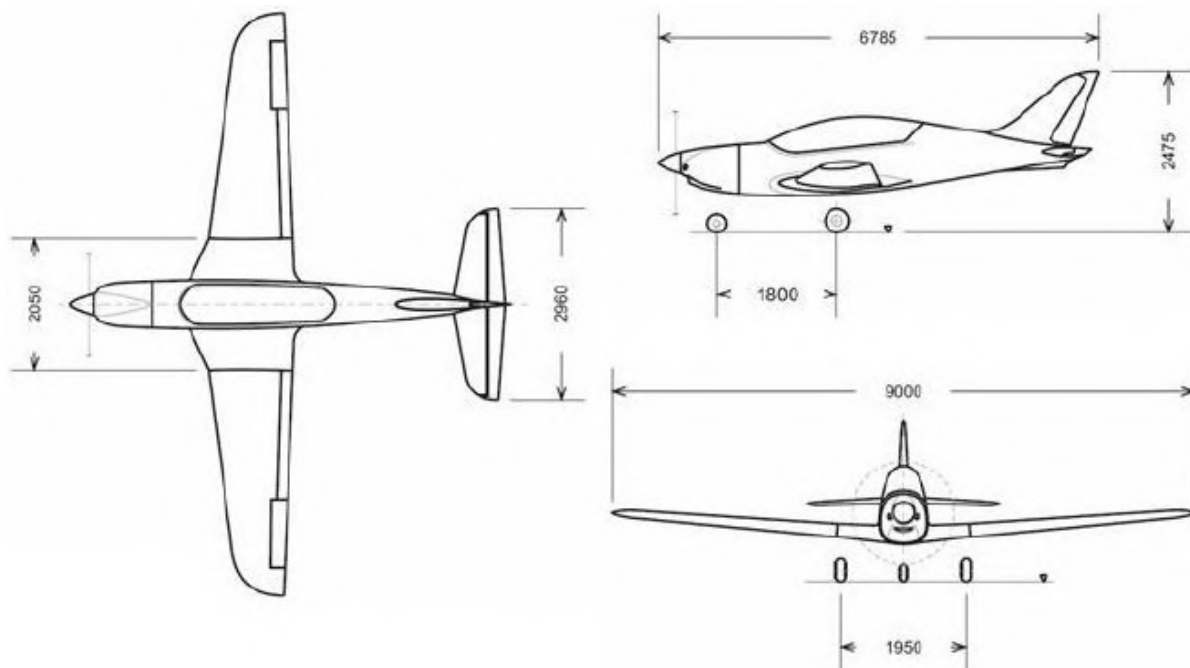


Obr. 1.3: Třípohledový výkres letadla WT-9 Dynamic Speed

Dle operačního manuálu je hydraulická kapalina do systému letadla Dynamic hnána čerpadlem poháněným elektromotorem. Součástí systému je hydraulický akumulátor. Nouzový systém vysouvání podvozku spočívá v uvolnění mechanických zámků podvozkových noh a jejich samovolném vysunutí vlastní vahou. Zamknutí mechanických zámků vysunutých podvozkových noh je podpořeno pneumatickými vzpěrami.

## 1.4 TL-ULTRALIGHT Stream

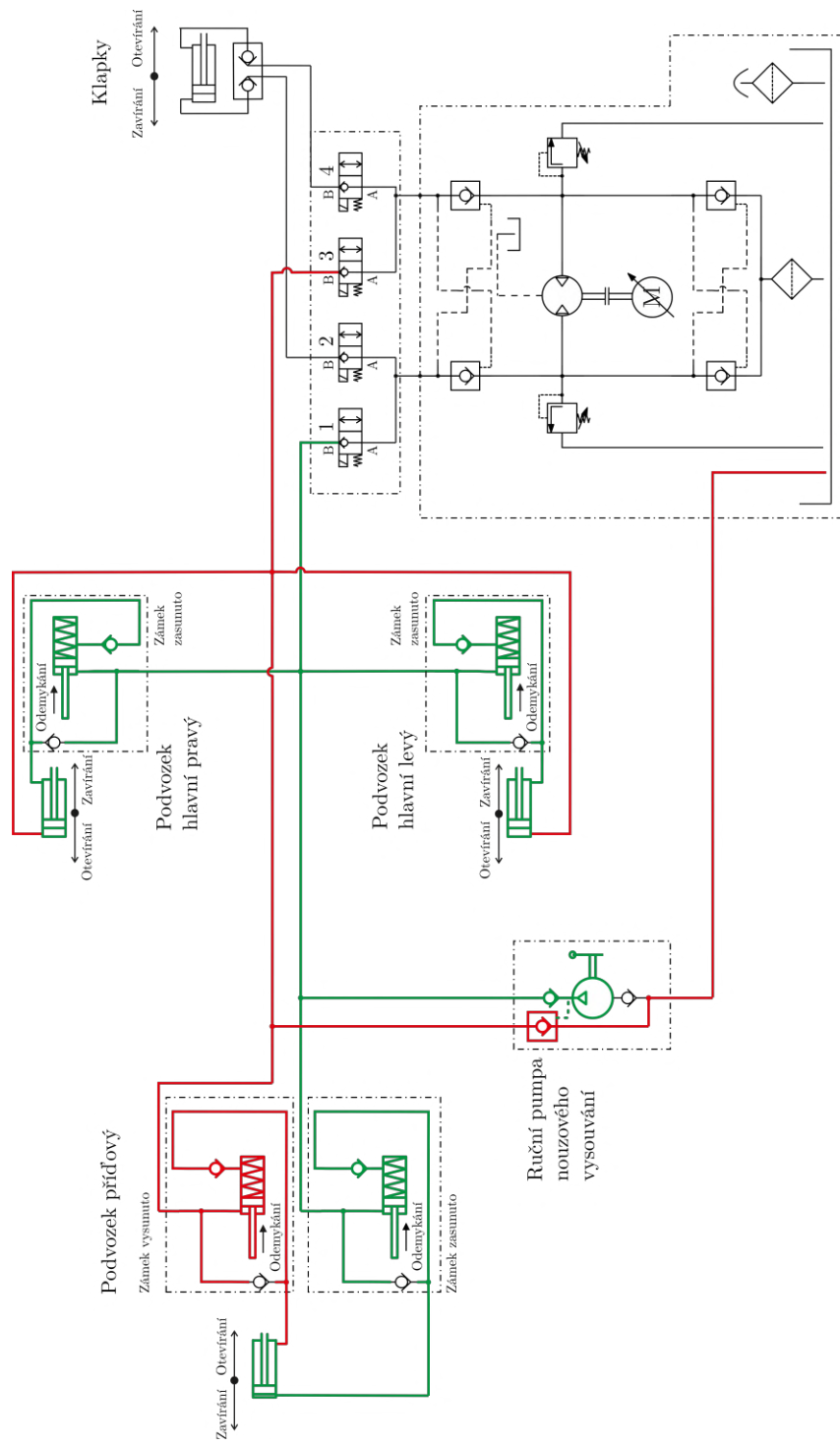
TL-ULTRALIGHT Stream je jednomotorový, samonosný dvoumístný dolnoplošník se sedadly uspořádanými za sebou, s příďovým zasouvacím podvozkem. Drak letadla je vyráběn z kompozitních materiálů.



Obr. 1.4: Třípohledový výkres Stream [9]

Dle operačního manuálu [9] je tlakování hydraulického systému u letadla Stream zajištěno čerpadlem poháněným elektromotorem. Nouzový systém vysouvání podvozku je realizován ruční pumpou, umístěnou v levé části palubní desky. Osa táhla pumpy směřuje kolmo k rovině palubní desky. Pilot pumpuje opakovaným vytahováním a zatlačováním madla pístní tyče. Pro vysunutí a zajištění podvozku je potřeba 70-75 zdvihů pístu.

## 2 Hydraulické schéma systému s ruční pumpou



Obr. 2.1: Schéma hydraulického systému letadla UL-39 Albi při tahu za páku pumpy

### 3 Zmapování současného řešení

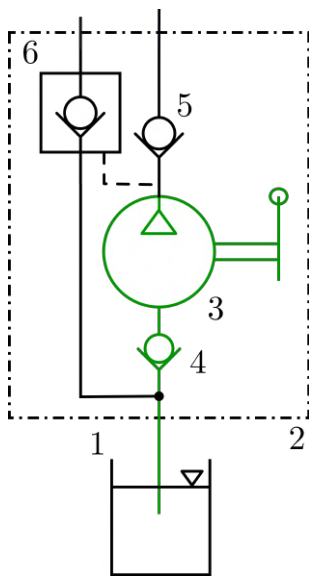
Tíhová síla vyvozená vlastní hmotností sestavy podvozku ulehčuje práci pohonu hydraulického systému při vysouvání, naopak při zasouvání musí pohon tuto sílu překonávat. Zároveň musí být brán v úvahu početní násobek zatížení 1,5. Z těchto důvodů je hodnota pracovního tlaku hydraulické kapaliny 12 MPa.

#### 3.1 Princip fungování ruční pumpy

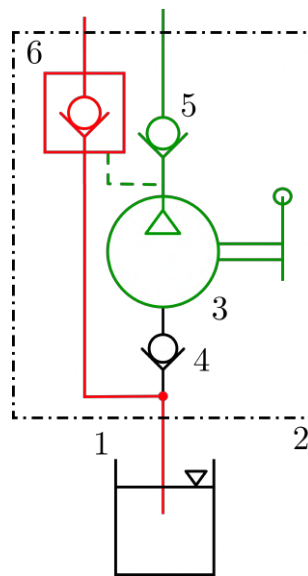
Číslem 2 je na obrázcích 3.1 a 3.2 označena celková sestava ruční pumpy.

Z obrázku 3.1 je patrné, že tlakem na páku pumpy je do válce 3 nasávána hydraulická kapalina z nádrže 1.

Na obrázku 3.2 je vidět, že tahem za páku je kapalina přesouvána z válce 3 pumpy přes zpětný ventil 5 do tlakové větve hydraulického okruhu. Při přesouvání hydraulické kapaliny pístem do tlakové větve hydraulického okruhu, tedy větve mezi ruční pumpou a šoupátky hydraulických zámek podvozkových noh, dochází současně i k otevírání tlakem řízeného zpětného ventilu 6, který umožňuje návrat přesunutého objemu hydraulické kapaliny v uzavřeném okruhu z odpadní větve, tedy větve mezi šoupátky hydraulických zámek podvozkových noh a ruční pumpou do nádrže 1.



Obr. 3.1: Tlak na páku pumpy



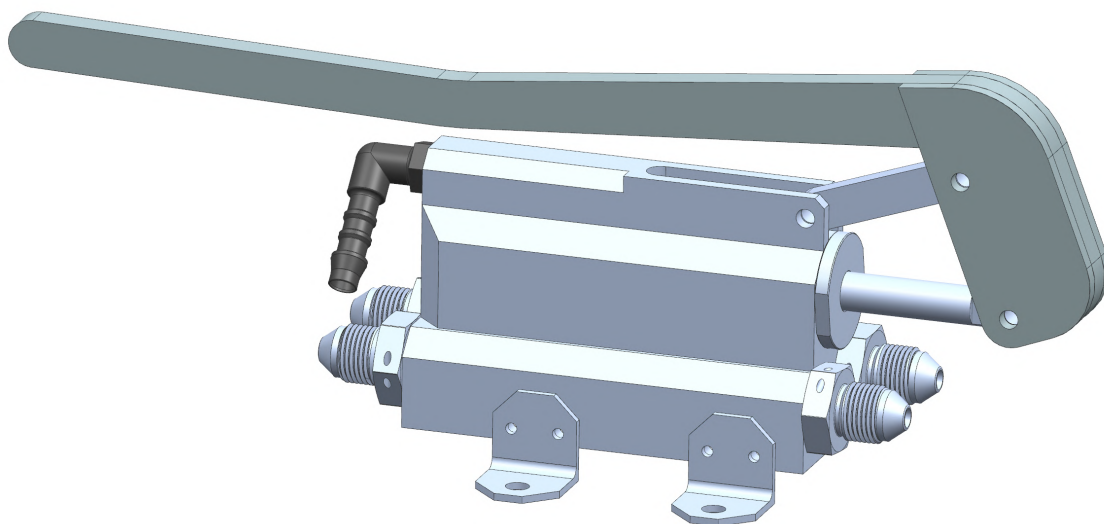
Obr. 3.2: Tah za páku pumpy

Na počátku a na konci pumpování koná pilot reálnou práci, jelikož vyvíjí sílu potřebnou k odemknutí a zamknutí hydraulických zámek, respektive překonání síly pružin šoupátek zámek. Během vysouvání podvozkových noh pilot pumpováním pouze urychluje proces vysouvání, svou silou překonává pouze pasivní odpory jednotlivých spojovacích částí komponentů mezi pilotem a podvozkovými nohami jako jsou čepy a ložiska nebo viskozita hydraulické kapaliny.

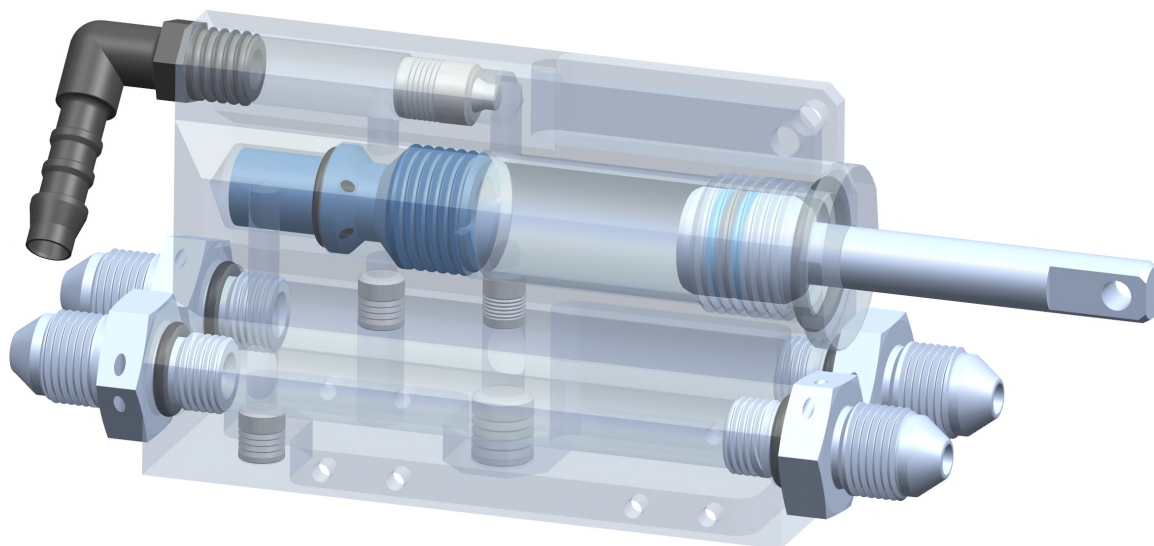


## 3.2 Konstrukce pumpy

Sestava pumpy je umístěna v prostoru předního kokpitu mezi nohama pilota. V případě nouzového vysouvání podvozku pumpuje pilot levou rukou tak, že tah probíhá zprava doleva. Pumpa je uchycena k podlaze kabiny letadla přes čtyři úhelníky, snýtované s tělem pumpy každý dvěma ocelovými nýty, lícovanými šrouby M5 dle ČSN 02 1111 [5, str. 409].



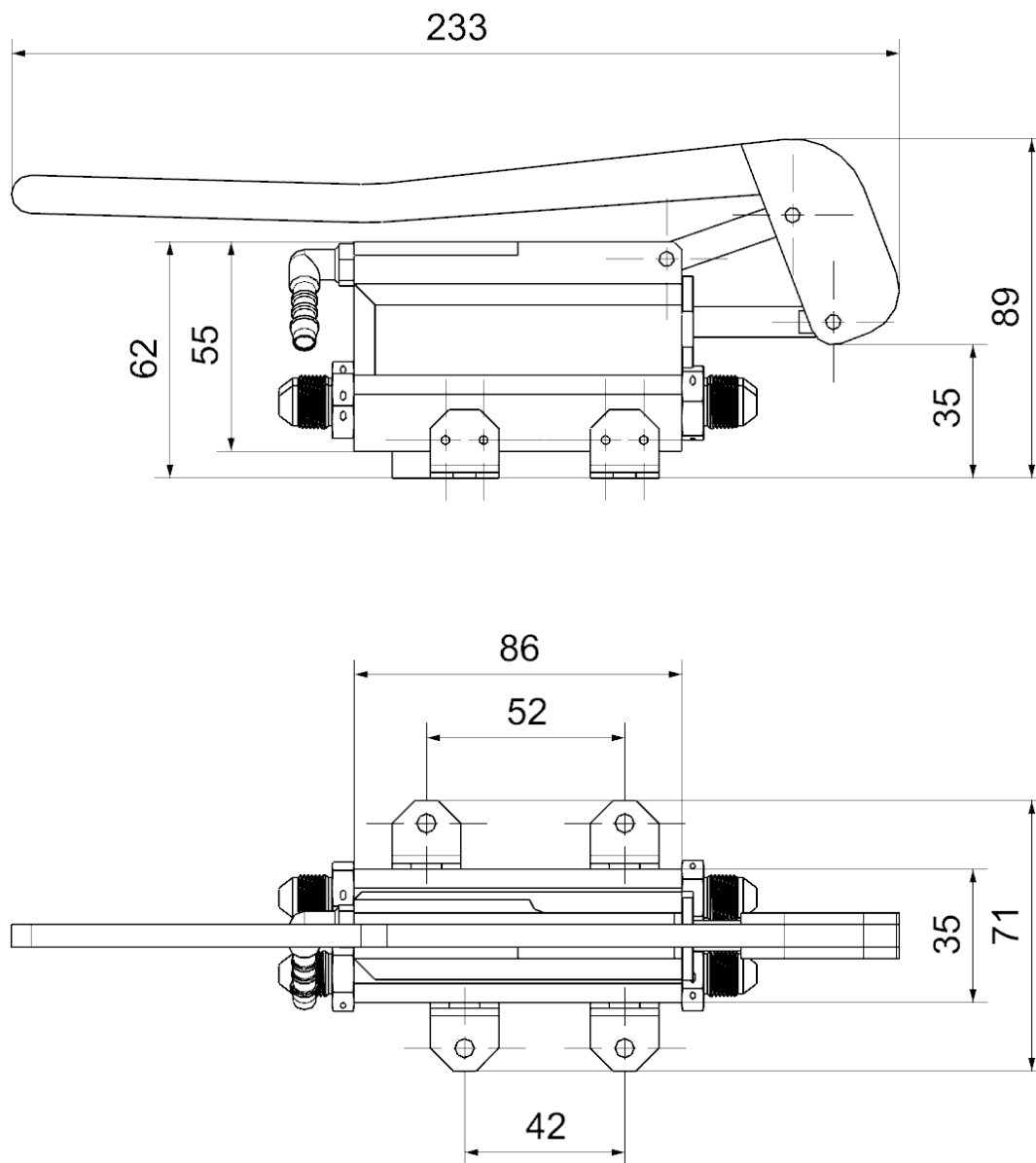
Obr. 3.3: Sestava původní pumpy



Obr. 3.4: Uspořádání vnitřních hydraulických komponentů

### 3.2.1 Mechanismus páky

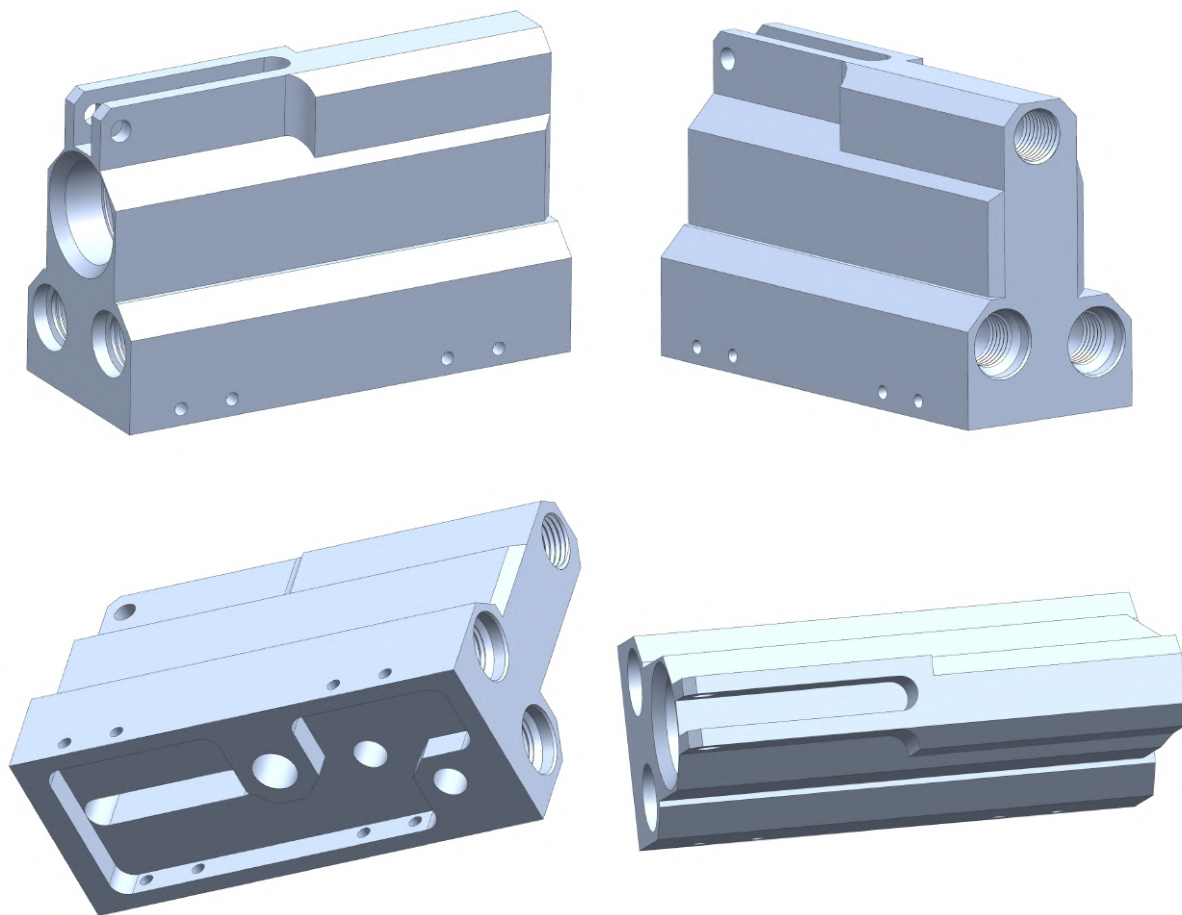
Mechanismus páky se skládá z páky a binárního členu, který zajišťuje správnou kinematiku mechanismu, resp. zabraňuje vyvracení pístní tyče během pumpování. Spojení členů mechanismu je zajištěno čepy. Páka je vyrobena z uhlíkového kompozitu, binární člen je duralový.



Obr. 3.5: Rozměrová obálka původní pumpy

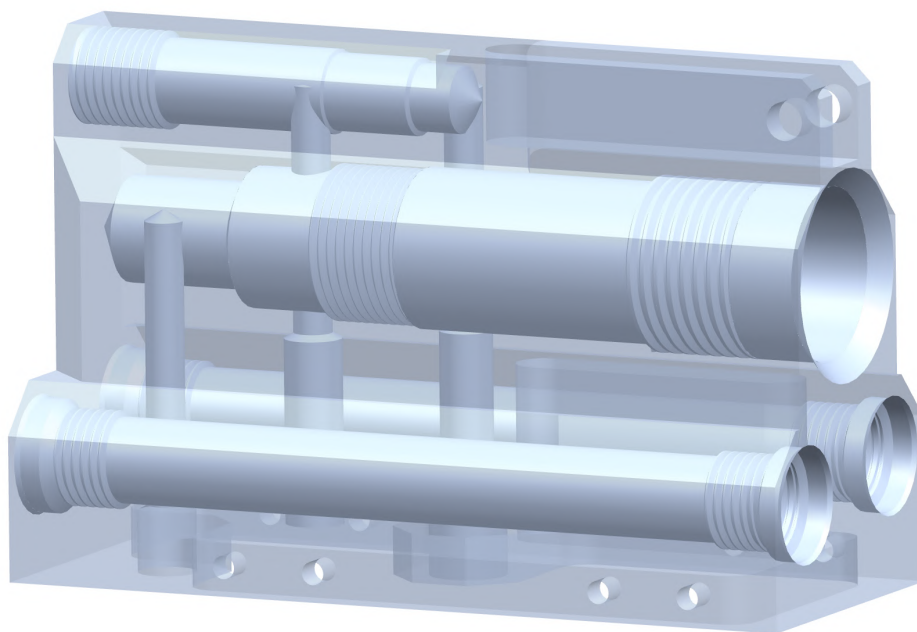
### 3.2.2 Tělo pumpy

Tělo pumpy použité v letovém prototypu letadla UL-39 Albi bylo kompletně vyrobeno v laboratoři Ústavu letadlové techniky ČVUT. Jako polotovar byl použit kvádr z duralu, který byl následně obroben konvenčními metodami jak pro plnění své funkce, tedy byly navrtány kanály pro distribuci hydraulické kapaliny, tak zvnějšku pro snížení hmotnosti.



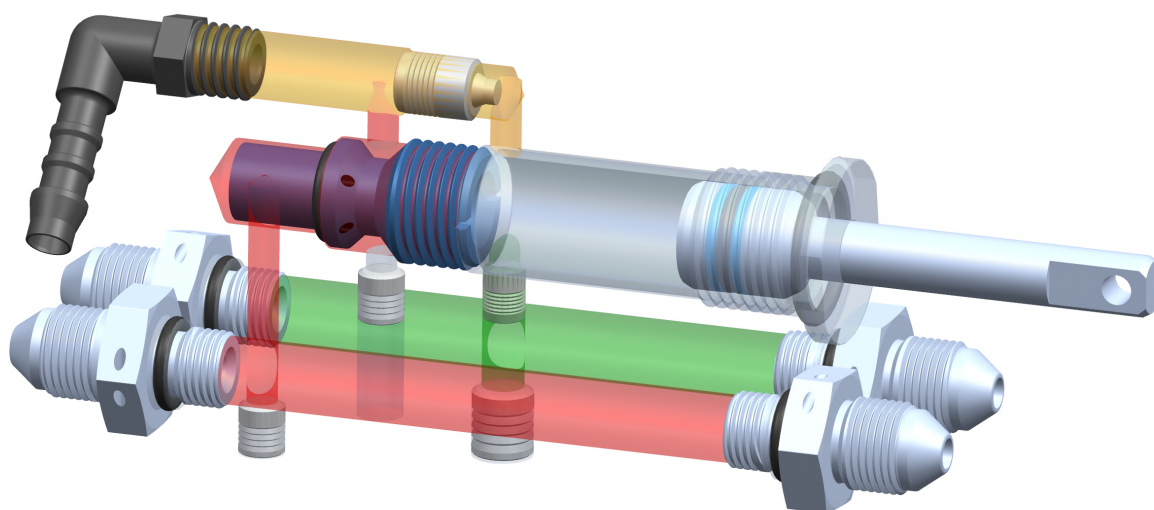
Obr. 3.6: Konvenčně obrobené tělo pumpy

Vnitřními kanály jsou prostor pro válec pístu a řízený zpětný ventil, tlaková větev, odpadní větev a kanál přepadu. Jednotlivé vnitřní prostory jsou propojeny vnitřními vrtanými kanálky. Tyto kanálky jsou v místech navrtání stěn těla pumpy utěsněny natloukacími zátkami.



Obr. 3.7: Vnitřní kanály v původním těle pumpy

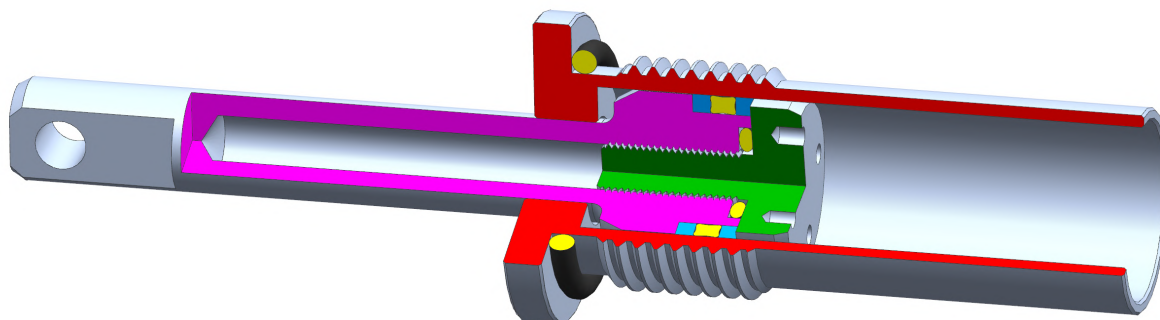
Na obrázku 3.8 je zeleně vyznačena tlaková větev, červeně odpadní větev a oranžově větev přepadu.



Obr. 3.8: Schema funkce vnitřních kanálů původního těla pumpy

### 3.2.3 Sestava pístu

Píst je součástí vyvrtané pístní tyče. Pro navrtání pístní tyče, a usnadnění navléknutí tuhého X-kroužku a opěrných kroužků těsnění, je víko pístu separátní díl. Spojení víka pístu s pístem je zajištěno závitem. Ten utěsněna pomocí O-kroužku. Jako válec pístu slouží obrobená vložka z duralu upevněná do těla pumpy pomocí závitu. Válec zajišťuje hladký chod pístní tyče a hydraulické těsnění pístu. Po zašroubování je vložka v těle pumpy utěsněna pomocí O-kroužku.

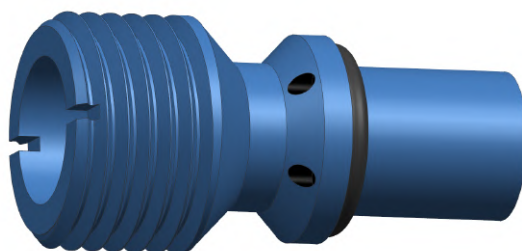


Obr. 3.9: Sestava pístu

## 3.2.4 Hydraulické komponenty

### 3.2.4.1 Řízený zpětný ventil

Řízený zpětný ventil umožňuje distribuci kapaliny hydraulickým systémem pouze během tahu páky, tedy tlaku pístu. Tlakem kapaliny je zpětný ventil otevřen a tím je umožněn přesun kapaliny odpadní větví zpět do nádrže. Ventil je v těle pumpy upevněn pomocí závitu a utěsněn O-kroužkem.

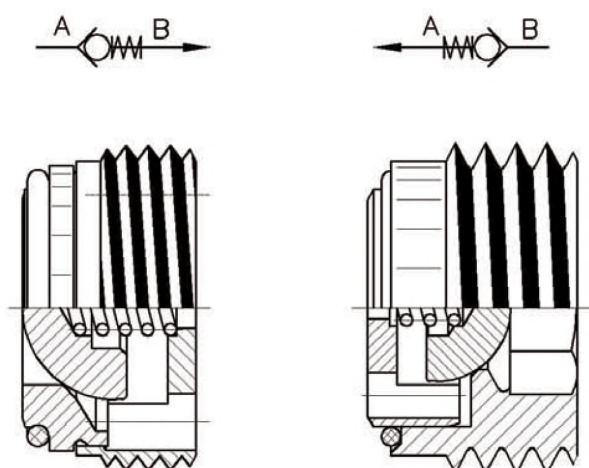


Obr. 3.10: Řízený zpětný ventil

### 3.2.4.2 Zpětné ventily

Původně byly pro jednosměrnou distribuci hydraulické kapaliny použity natloukací zpětné ventily.

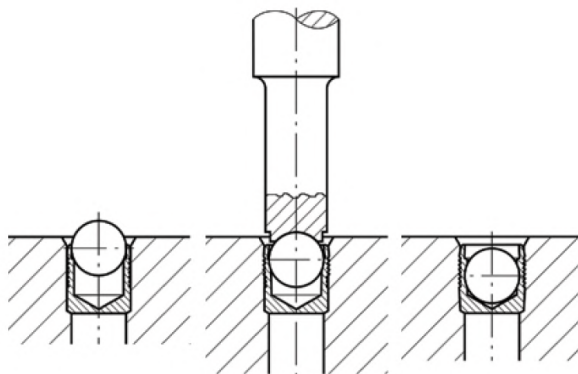
Natloukací ventily se ukázaly být, vzhledem k jejich vysokým otevíracím tlakům, neúčinné. Byly proto dodatečně odvrtnuty a nahrazeny za ventily se závitem utěsněné O-kroužky dosedajícími na kuželové plochy čel zúžení kanálů.



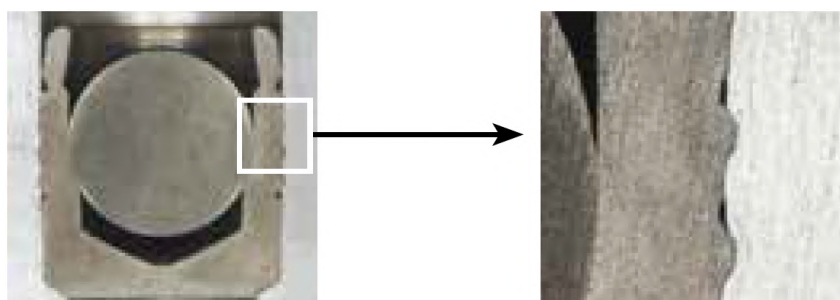
Obr. 3.11: Ventily se závitem s popisem směru průchodu kapaliny [14]

### 3.2.4.3 Natloukací zátky

Natloukací zátky fungují tak, že se do správně navrtného ústí kanálu vloží válcová záslepka, do níž se po ustavení natluče koule, která záslepku radiálně zatlačí do materiálu. Do vnější stěny záslepky jsou vystruženy drážky, které po zatlačení do materiálu vytváří labyrintové těsnění.



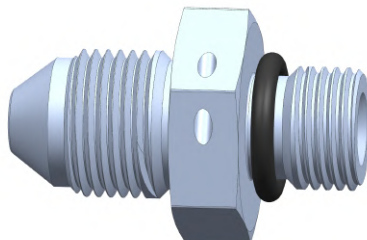
Obr. 3.12: Postup instalace natloukací zátky [16]



Obr. 3.13: Fotografie řezu labyrintového těsnění natloukací zátky [16]

#### 3.2.4.4 Spojovací armatury

Spojovací armatury byly vyrobeny na Ústavu letadlové techniky ČVUT dle oborové normy letecké, konkrétně ONL 3941[3] a ONL 3942[4].



Obr. 3.14: Spojovací armatura dle ONL 3941[3] a ONL 3942[4]

#### 3.2.4.5 Hadicová vsuvka

Hadicová vsuvka slouží jako propojovací armatura mezi tělem pumpy a nádrží s hydraulickou kapalinou. Po zašroubování do těla pumpy je na vsuvku natlačena hadice vedoucí k nádrži. Hadice na vsuvce je zajištěna stahovacím kroužkem.



Obr. 3.15: Úhlová hadicová vsuvka [15]



# 4 Rekonstrukce pumpy pro aditivní technologii

Rekonstrukce se zabývala zcela novým konstrukčním návrhem těla pumpy tak, aby výroba mohla proběhnout aditivní technologií, která umožňuje efektivnější rozložení hmoty, tedy i snížení hmotnosti vyráběné součásti. Vzhledem k velkému množství kritérií, která měla být splněna, se předpokládaly návrhy více verzí, které by řešily postupně vznikající problémy. Kompletní návrh byl vypracován v CAD systému Siemens NX.

## 4.1 Cíle rekonstrukce

Hlavním cílem bylo navrhnout tělo pumpy znatelně nižší hmotnosti v porovnání se stávajícím řešením. Místo postupně obráběného monobloku materiálu byly zvoleny vhodné cesty distribuce hydraulické kapaliny a ty byly obaleny minimální potřebnou hmotou materiálu. Zadána byla výchozí tloušťka stěny 2 mm.

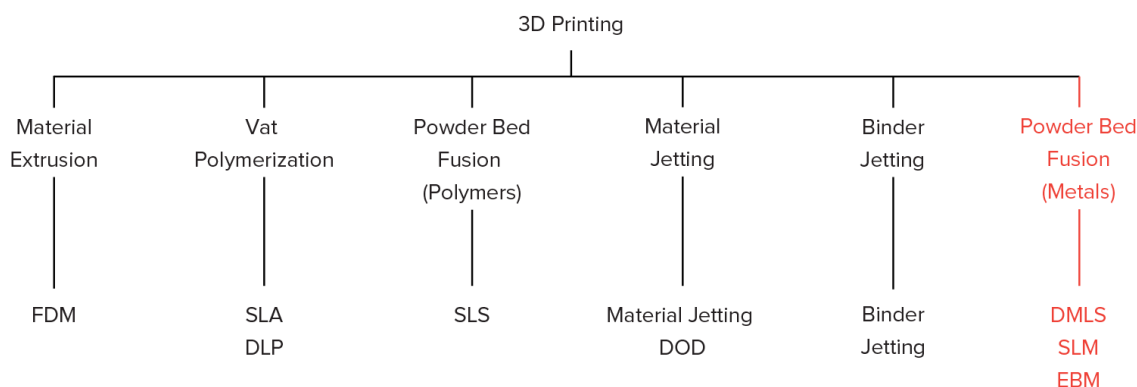
Dalším cílem bylo navrhnout tělo pumpy co nejkompaktnější. To je dáno charakterem prostoru umístění, tedy interiérem malého sportovního letadla. Bylo třeba počítat s přípojovacími rozměry převlečných matic trubek samotného hydraulického systému. Tyto trubky mohou být pro potřebu připojení tvarovány, ideálně do co nejkratších cest, ale po zapozicování by nemělo docházet k následnému násilnému ohýbání. Proto by mělo být připojení trubek do těla pumpy přímé, bez potřeby trubky směřovat jinam a zabírat tím větší prostorovou obálku.

Z pohledu technologie bylo cílem navrhnout ideální konstrukci pro výrobu aditivními technologiemi, tedy konstrukci, která se při stavbě udrží sama bez potřeby podpírání. Tímto se kromě úspory materiálu sníží i náklady spojené s nastavením tiskových procesů a fyzickým odstraňováním systému podpor.

## 4.2 Základní kritéria konstrukce pro výrobu aditivními technologiemi

Aditivní technologie umožňují na základě analýzy zatížení navrhnout konstrukci součásti minimální hmotnosti a maximálně efektivního rozložení hmoty. Tato technologie má ale samozřejmě mnoho pravidel a omezení. Během procesu návrhu se postupně odkrývají úskalí snahy skloubit požadavky na funkci komponentu s jeho minimální tvarovou rozložitostí.

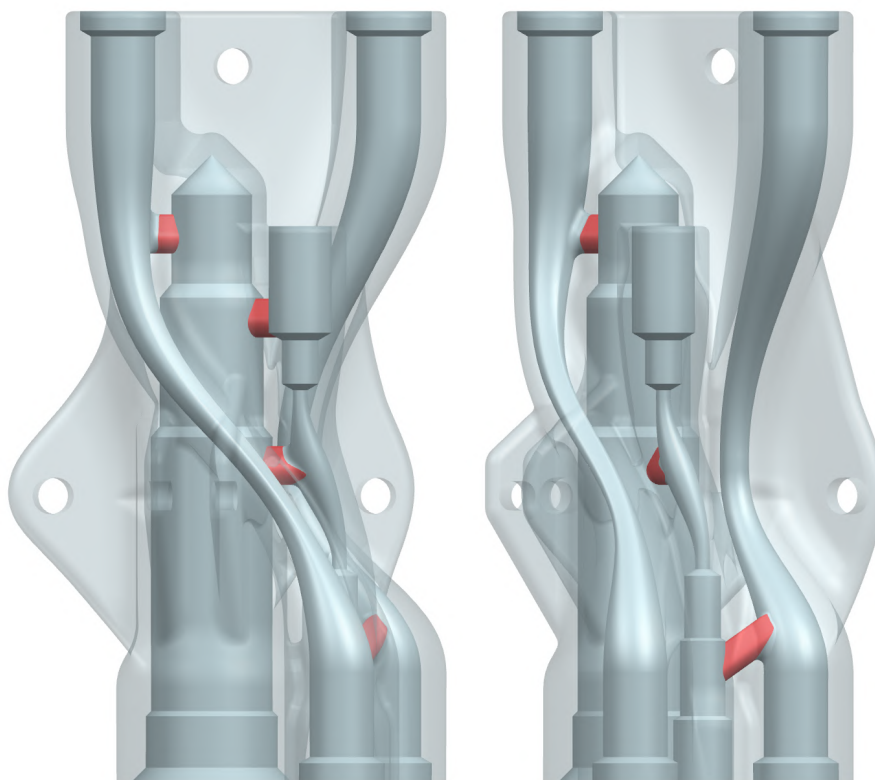
Tato úskalí se liší dle konkrétní aditivní technologie, jejíž volba je převážně dána materiálem a způsobem zatížení součásti. Na obrázku 4.1 [17] jsou vyznačeny technologie používané k tisku různých materiálů, červeně jsou vyznačeny technologie tisku kovu na bázi prášku. V případě mírně zatížených komponentů, používaných v leteckém průmyslu, jsou žádoucím materiálem slitiny hliníku. Zde se předpokládá použití technologie spékání vrstev práškového kovu laserem. Jedná se tedy o formu svařování velkého množství dílčích vrstev, což vnáší do dílů značné vnitřní napětí, a finální součást je třeba tepelně zpracovat, aby byla eliminována možnost rozpadu komponentu podél některé z vrstev vlivem cyklického zatěžování.



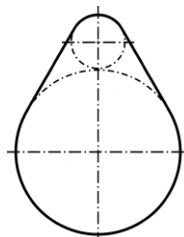
Obr. 4.1: Aditivní technologie používané pro tisk různých materiálů [17]

Modelem konstrukce vyrobené aditivní technologií, která vyroste bez potřeby dodatečných podpor, může být například součást konstantního průřezu se svislým vektorem růstu. Toto je však obecně s přihlédnutím na funkci nereálné. Je tedy třeba při návrhu pracovat s co nejmenšími úhly šikmých částí komponentu, ideálně menšími než  $40^\circ$ , vůči vektoru růstu.

Problematické pro tuto technologii může být také udržení přesnosti, ve strojírenství důležitého, kruhového průřezu. Vlivem skokových změn teploty při tisku, společně s rozdíly v rozměrech rovinných průřezů, se může kruhový průřez nacházející se v rovině jedné vrstvy práškového kovu mírně deformovat. Pokud se kruhový průřez nachází v rovnoběžné rovině k vektoru růstu, je velice pravděpodobné, že u průměrů v řádu vyšších jednotek milimetrů bude potřeba tuto klenbu vystavět s pomocí podpor, které mohou být složitě odstranitelné, nebo dokonce neodstranitelné v případě soustavy vnitřních kanálů dílu. V případě, že kruhový průřez není vyžadován, je vhodné volit průřez jiného tvaru. Ideální je tvar kosočtverce s ostrými úhly ve směru růstu. Tento průřez může dobře fungovat například v aplikaci na vnitřních kanálech chlazení forem pro odlévání. V případě tenkostěnných kanálů může způsobovat problémy, protože hrany fungují jako tzv. intenzifikátory napětí, a hrozí zde možnost poškození způsobené únavou materiálu. Existují však alternativy. Na obrázku 4.3 je průřez použitý u vnitřních příčných propojovacích kanálů finální verze nového těla pumpy. Je tvořený dvěma kružnicemi, dolní násobně většího průměru než horní, ohraničenými tečnými přímkami s úhlem nárůstu  $30^\circ$ .

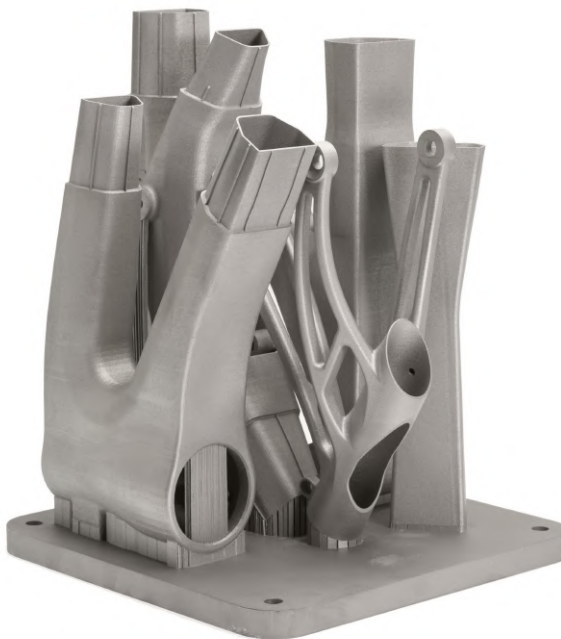


Obr. 4.2: Příčné propojovací kanály ve finálním návrhu rekonstrukce těla



Obr. 4.3: Průřez propojovacích kanálů použitý ve finální verzi navrhovaného těla pumpy

System podpor je dalším úskalím při konstrukci součástí určených k výrobě aditivními technologiemi. Umožňuje například vystavení tvarů, které jsou ve směru růstu převísle od hlavní části komponentu. To znamená, že vznikají odděleně od zbytku komponentu, což bez podepření není fyzicky možné, protože takto vytvořené místo by se během tisku uvolnilo v prostoru a vznikl by zmetek. Podpory také umožňují bezproblémový vznik tvarů, které jsou šikmé pod větším úhlem než  $40^\circ$  nebo jsou i kolmé k vektoru růstu. Charakter podpor se liší podle potřebné aplikace. Mohou to být plné nebo duté sloupky různých profilů, žebra různých průřezů, vzpěry nebo blány, které mohou být plné nebo vystavěny jako síť s jednotlivými oky různých tvarů. Příklady využití různých typů podpor jsou vidět na obrázcích 4.4 [18] a 4.5 [19].



Obr. 4.4: Použití plných podpor [18]



Obr. 4.5: Použití síťovaných podpor [19]

Kov používaný pro výrobu pomocí aditivní technologie má charakter prášku se zrnky o velikosti  $\approx 25\mu m$ . Nevyužitý objem materiálu lze v omezené míře znovu použít. Na opětovné použití má vliv především míra opalu, ke kterému dochází v oblasti blízké hranici svařované vrstvy součásti. Na obrázku 4.6 [20] je vidět proces ruční separace finálního výtisku od přebývajícího práškového kovu. Toto samozřejmě platí i pro systém podpor. Čím rozměrnější systém podpor je potřeba, tím více materiálu je ve vrstvě svařováno, a tím pádem i míra opalu v jedné vrstvě je větší. Podpory jsou po odstranění z výsledného komponentu odpadem.



Obr. 4.6: Separace tisku od přebývajícího práškového kovu [20]

Technologickým parametrem komponentu vyráběného aditivní technologií je i cena. Jako u všech ostatních výrobních technologií se cena produktu odvíjí od počtu kusů v sérii, případně počtu sérií. Zařízení pro výrobu, tedy tiskárny, mají pracovní plochu tzv. paletu, jejíž plocha společně s pracovní výškou vymezuje velikost největšího možného dílu a zároveň počet kusů vyrobených během jednoho tisku. Je žádoucí tuto paletu plošně efektivně zaplnit, jako je vidět na obrázku 4.4 [18]. Tím se maximálně sníží cena za kus, protože množství práškového kovu pro jeden tisk se odvíjí od výšky nejvyššího tisknutého dílu nezávisle na počtu dílů nacházejících se na paletě, protože pracovní prostor je vždy potřeba práškem kovu zcela vyplnit. Do ceny se počítají i lidské zdroje potřebné pro přípravu tiskového souboru, odstranění systému podpor a dokončovací tepelné zpracování. V tiskovém souboru jsou nadefinovány CAD modelu součásti parametry průběhu tisku, případně vhodný systém podpor. Zde je výhoda, že jednou vytvořený soubor je možné použít znovu bez jakéhokoli omezení. Během odstraňování podpor nesmí dojít k poškození součásti. Nezbytné je také tepelné zpracování pro odstranění vnitřního napětí, jež vzniká během svařování jednotlivých vrstev materiálu.

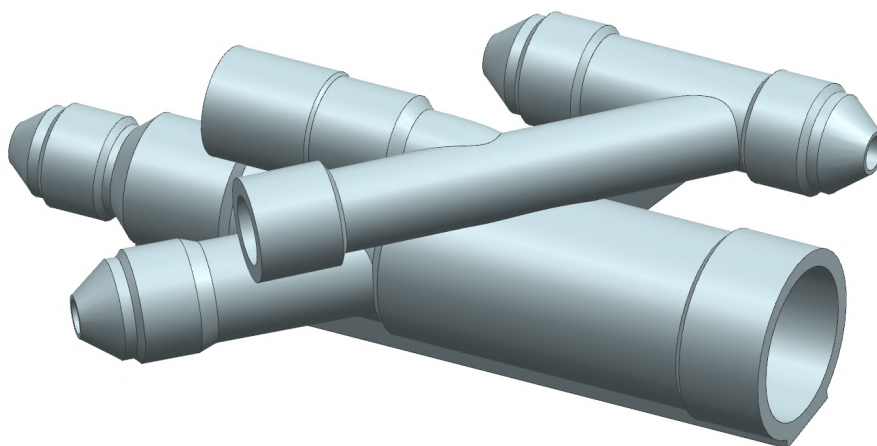
## 4.3 Geneze návrhu rekonstrukce

Návrh konstrukce pro výrobu aditivní technologií, která se během tisku udrží bez systému podpor přináší úskalí, která se nedají předem odhadnout. Původní idea se může projevit jako zcestná až během modelování, kdy je model graficky zobrazen a je možné sledovat prostorové úhly nárůstu materiálu.

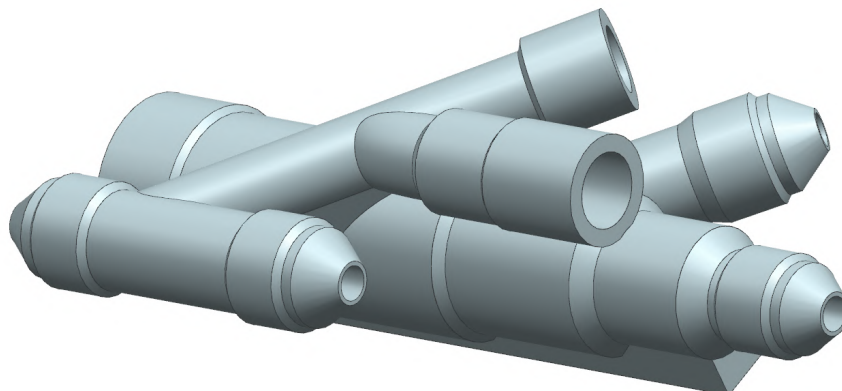
Během konstrukce musel být radikálně změněn přístup k původní koncepci sestavy pumpy, protože pro vývojovou verzi letadla byl nahrazen sidestick řízení za řídicí páku. Prostor mezi nohama pilota, kde byla pumpa původně, tedy nemohl být brán v úvahu pro umístění nové pumpy.

### 4.3.1 Verze 1

Prvotní návrh (obrázky 4.7 - 4.8) byl postaven na ideji pouze obalit již existující kanály materiálem, tam, kde je to možné, kanály zredukovat pouze na přechodová hrdla, a jako součást těla vytisknout i připojovací armatury hydrauliky, na které měl být následně vyřezán závit. Tento koncept je nepoužitelný, protože by hrdla musela být po vytištění složitě obráběna pro dosažení kvality povrchu kuželových ploch, které po našroubování převlečných matic slouží k utěsnění.



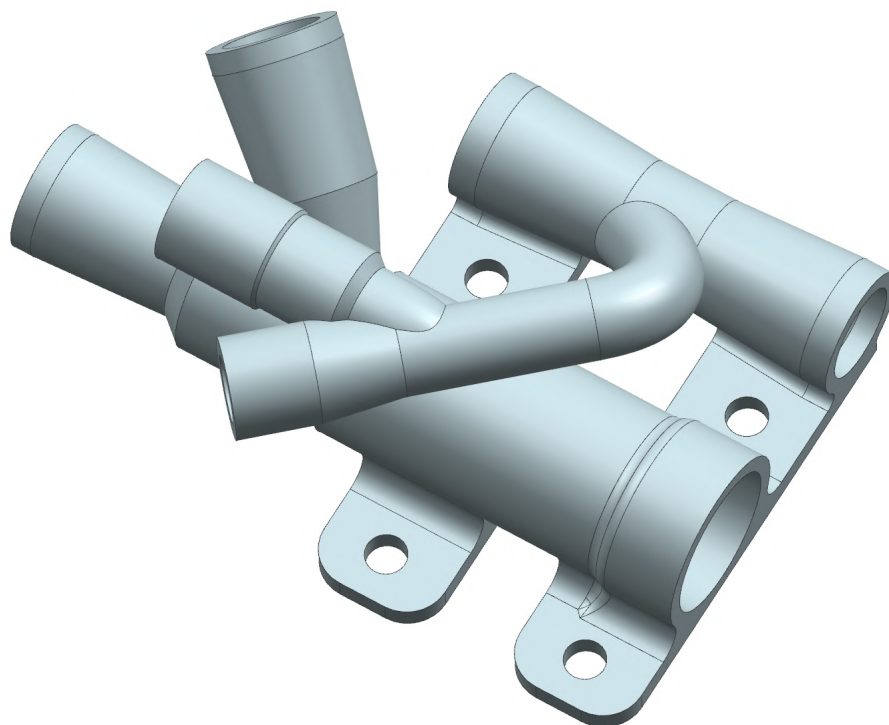
Obr. 4.7: Verze 1 - pohled zepředu zprava shora



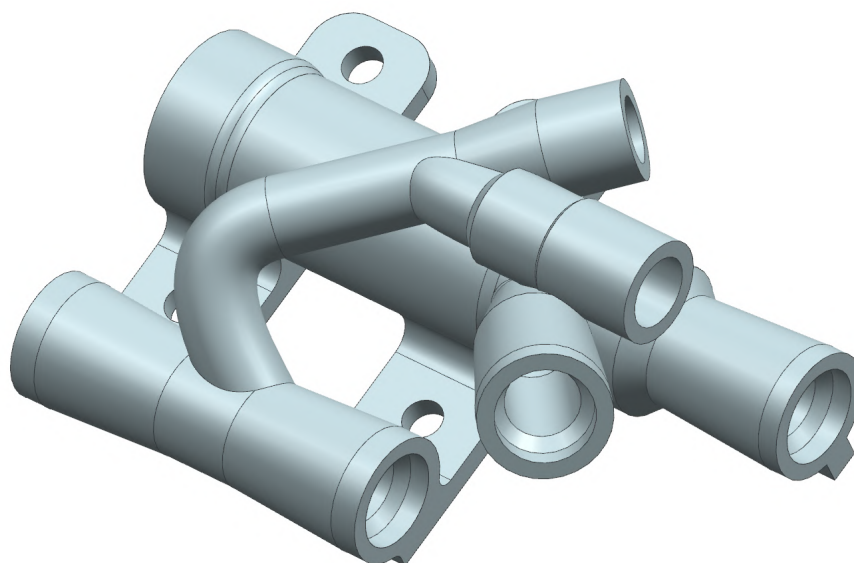
Obr. 4.8: Verze 1 - pohled zezadu zleva shora

### 4.3.2 Verze 2

Alternativním přístupem (obrázky 4.9 - 4.10) bylo přemístění tlakové větve dál od hlavního prostoru pro válec. Takto vzniklý prostor byl využit pro umístění úchytů pro montáž do kokpitu. Tisk by vyžadoval rozsáhlou soustavu podpor. Navíc na šikmá hrdla by se těžko řezal závit a trubky hydraulického systému by musely být složitě tvarované. Další nevýhodou by bylo, že zpětný ventil v propojovacím kanále by musel být hodně hluboko, což by vedlo k nepohodlné instalaci zpětného ventilu.



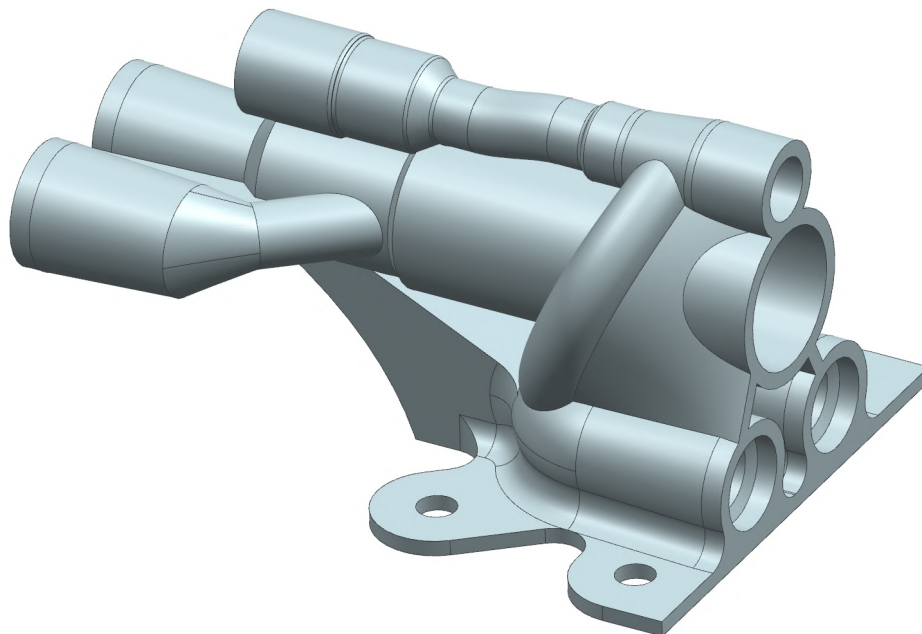
Obr. 4.9: Verze 2 - pohled zepředu zprava shora



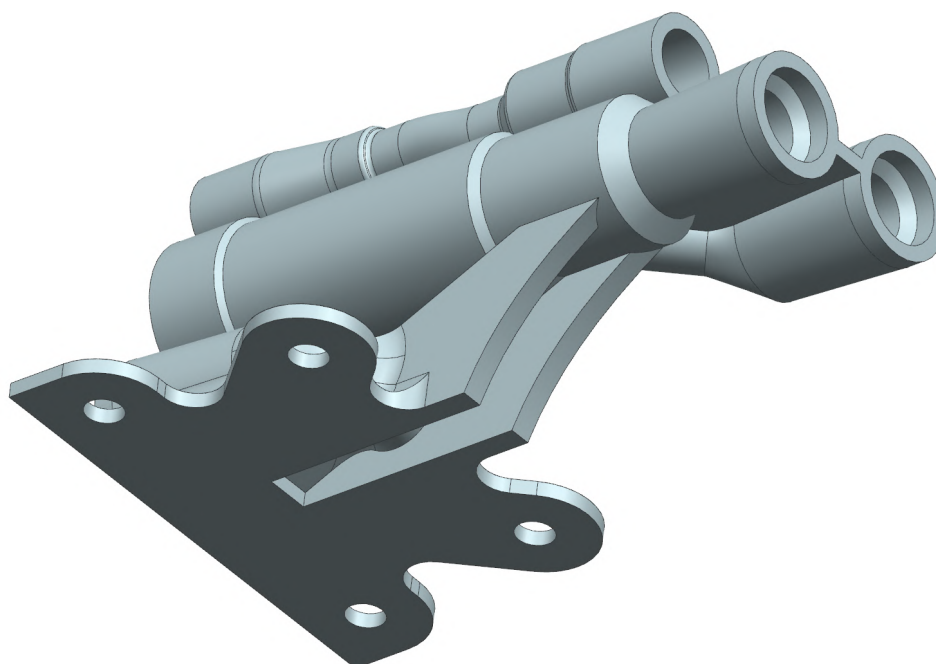
Obr. 4.10: Verze 2 - pohled zezadu zleva shora

### 4.3.3 Verze 3

Následující úprava (obrázky 4.11 a 4.12) zásadně změnila orientaci distribuce hydraulické kapaliny. Původní tělo pumpy mělo tlakovou a odpadní větev orientovanou rovnoběžně s prostorem pro válec pístu. Kanál tlakové větve byl zkrácen a stočen do tvaru "U". Pro zachování logiky připojení pumpy k hydraulickému systému byla podobným způsobem přeorientována i odpadní větev. Tlaková větev byla po vzoru původní konstrukce přesunuta pod prostor válce a všechna připojovací hrdla narovnána rovnoběžně s válcem pístu pro snazší obrábění.



Obr. 4.11: Verze 3 - pohled zepředu zprava shora

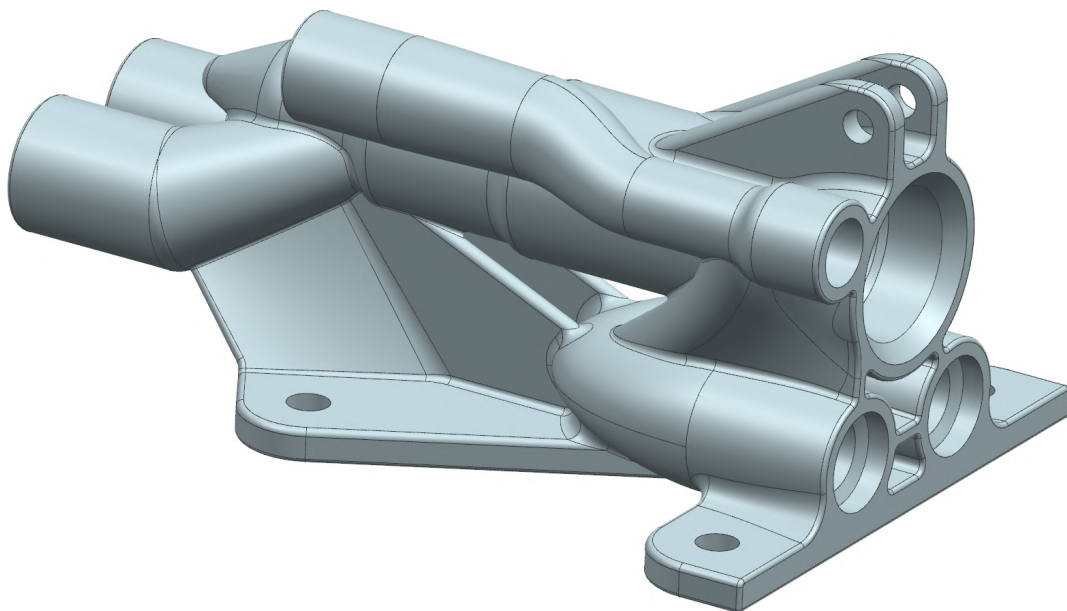


Obr. 4.12: Verze 3 - pohled zezadu zleva zdola

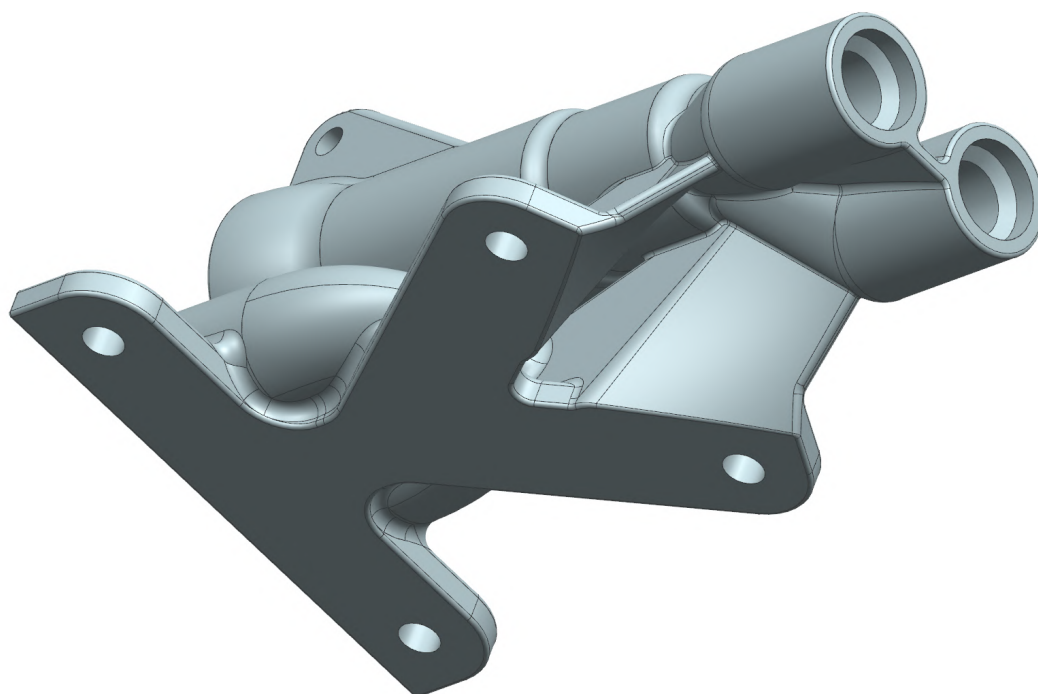


#### 4.3.4 Verze 4

Koncepce byla následně upravena (obrázky 4.13 a 4.14) pro smysluplné uložení čepu páky. Kanál pro zpětný ventil od tlakové větve byl přesunut na stranu, aby se uvolnilo místo pro žebra s dírami pro čep. Připojovací kanály odpadní větve byly přesunuty symetricky kolem osy válce a tvar podpůrných žebér jim byl přizpůsoben spolu s úchyty pro montáž do kokpitu.



Obr. 4.13: Verze 4 - pohled zepředu zprava shora

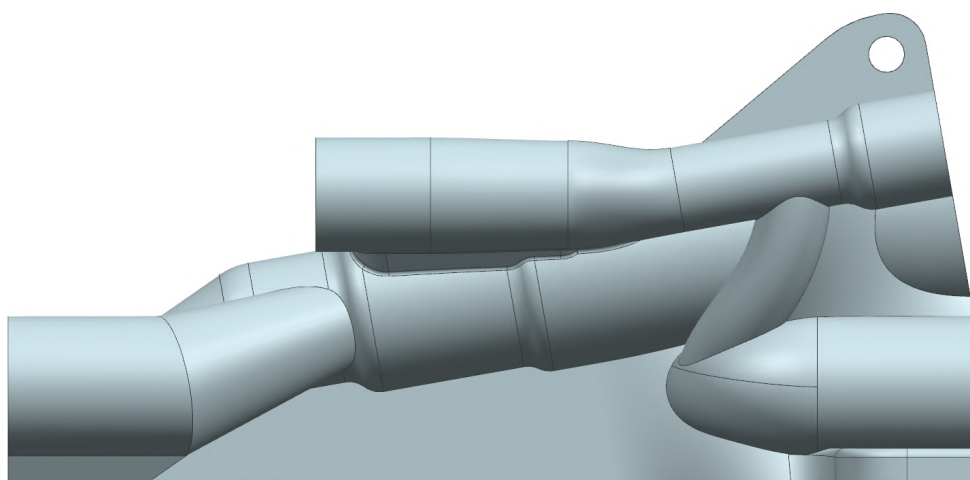


Obr. 4.14: Verze 4 - pohled zezadu zleva zdola

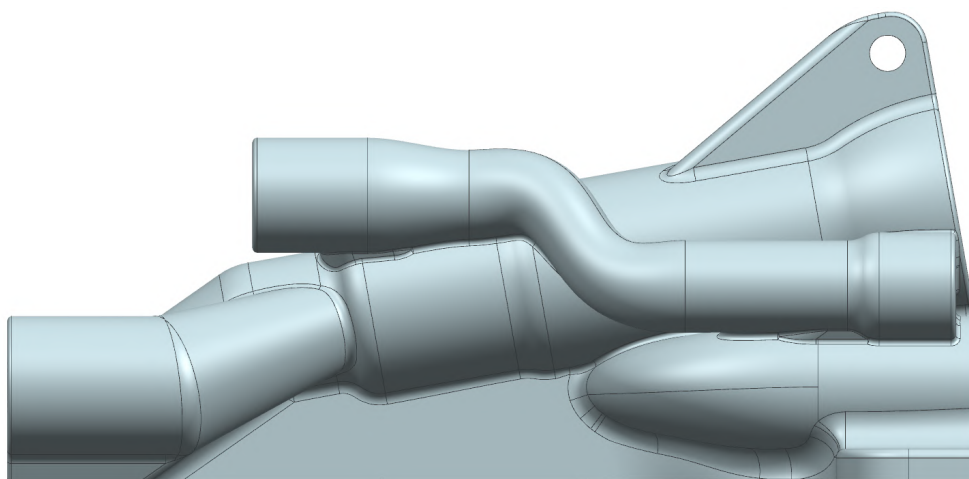
### 4.3.5 Verze 5 a Verze 6

Další úpravy následovaly, protože se ukázalo, že by hmotnostní úspora těla Verze 4 nebyla příliš výrazná oproti konvenčně obrobenému tělu. Úspory hmotnosti Verze 5 bylo dále dosaženo zredukováním montážních úchytů ze čtyř na tři. Za předpokladu, že tři šrouby stačí pro upevnění, se tím logicky ušetří i hmotnost spojovacího materiálu. Prostor pro válec byl nakloněn, šikmá žebra byla nahrazena jednoduchou svislou výztuhou v rovině mechanismu pro zachycení ohybu. Nejprve byl kanál pro zpětný ventil od tlakové větve navržen s osou rovnoběžnou s osou prostoru pro válec.

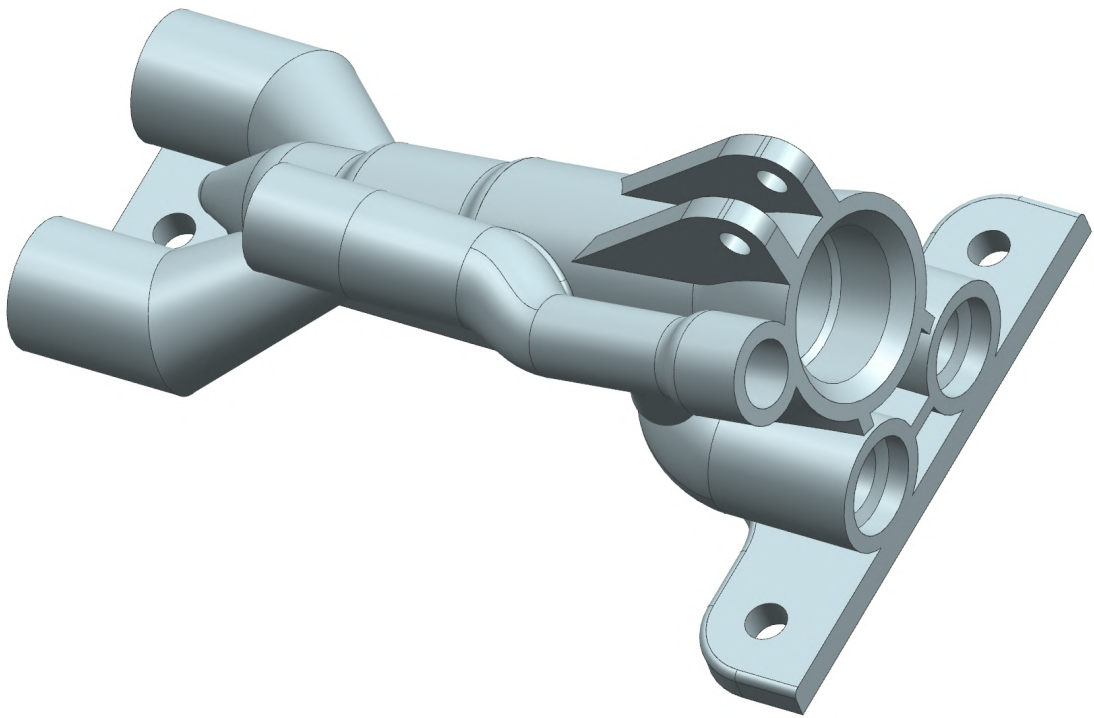
Tento kanál byl u Verze 6 přesunut níž a narovnan, čímž byla snížena hmotnost o stěnu propojovacího kanálu tlakové větve a kanálu pro ventil. Zjednodušily se tím také následné obráběcí operace. Problematickým by mohlo být místo prohnutí kanálu mezi zpětnými ventily. Pro tisk je zde velký úhel nárůstu materiálu a je možné, že by toto místo muselo být podepřeno. Srovnání verzí 5 a 6 je vidět na obrázcích 4.15 - 4.22.



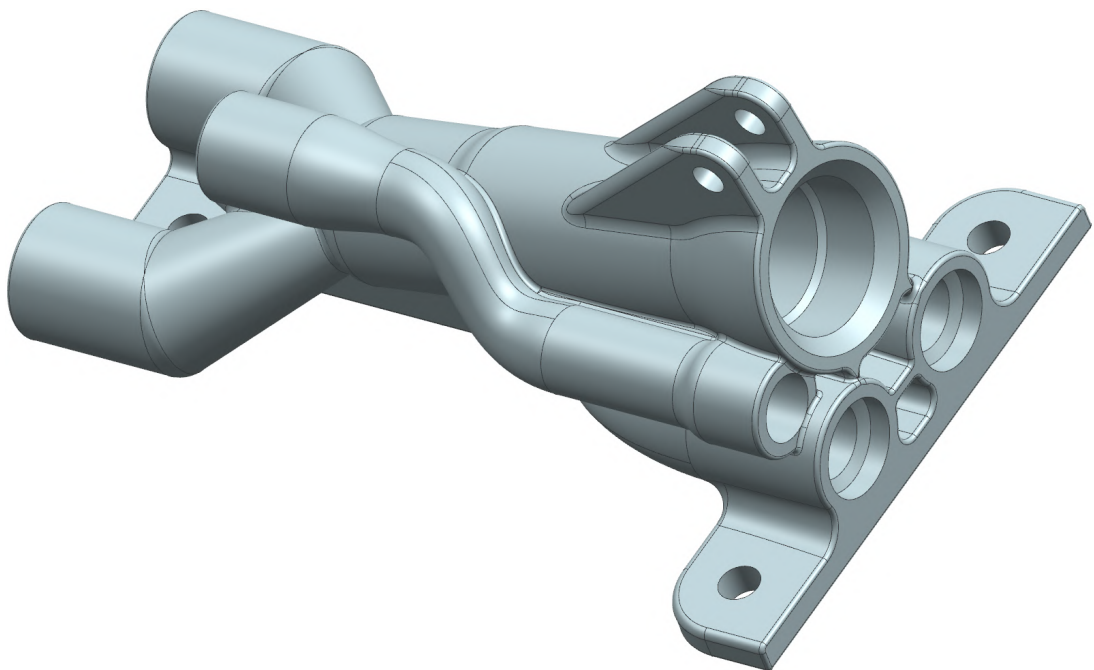
Obr. 4.15: Verze 5 - pohled zprava



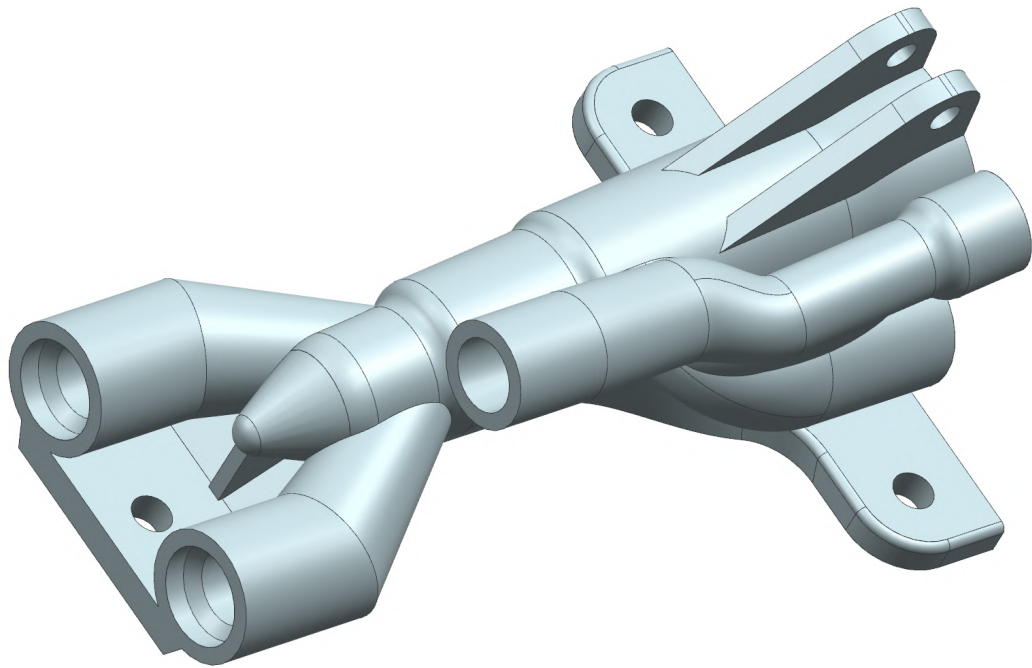
Obr. 4.16: Verze 6 - pohled zprava



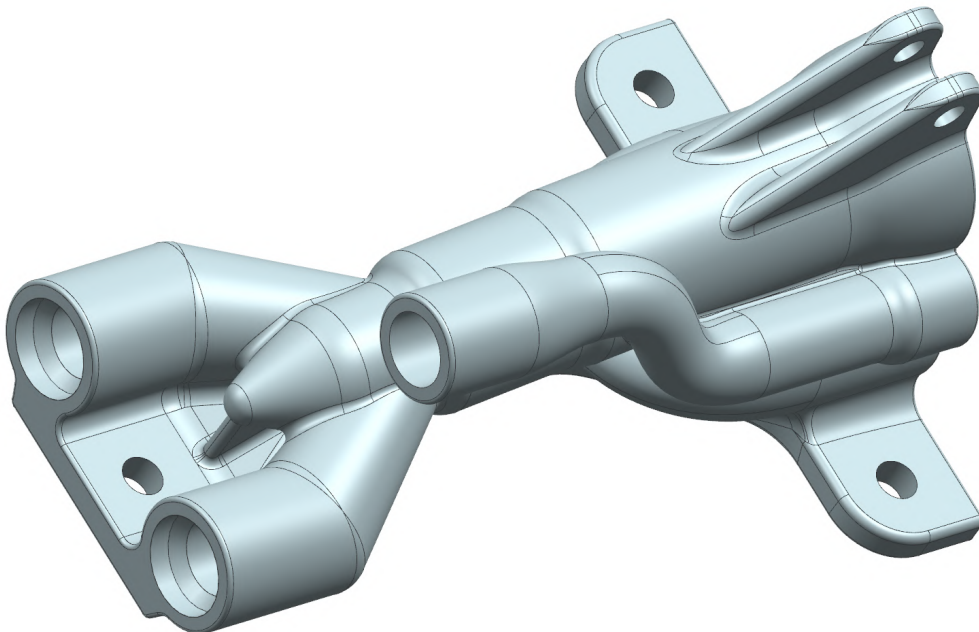
Obr. 4.17: Verze 5 - pohled zepředu zprava shora



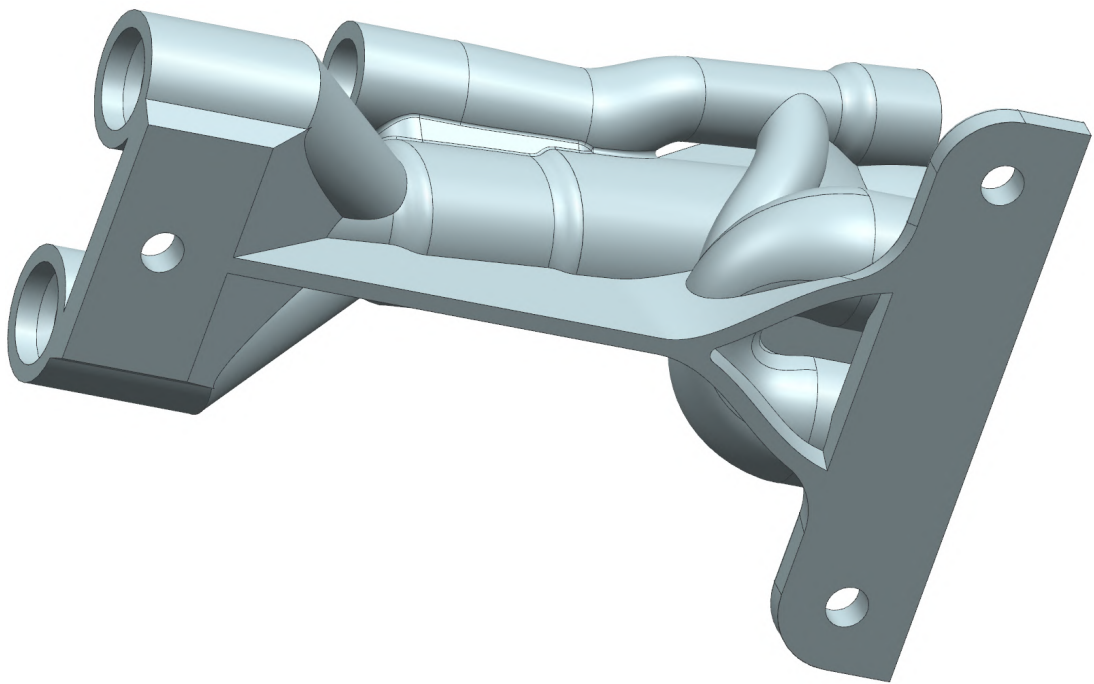
Obr. 4.18: Verze 6 - pohled zepředu zprava shora



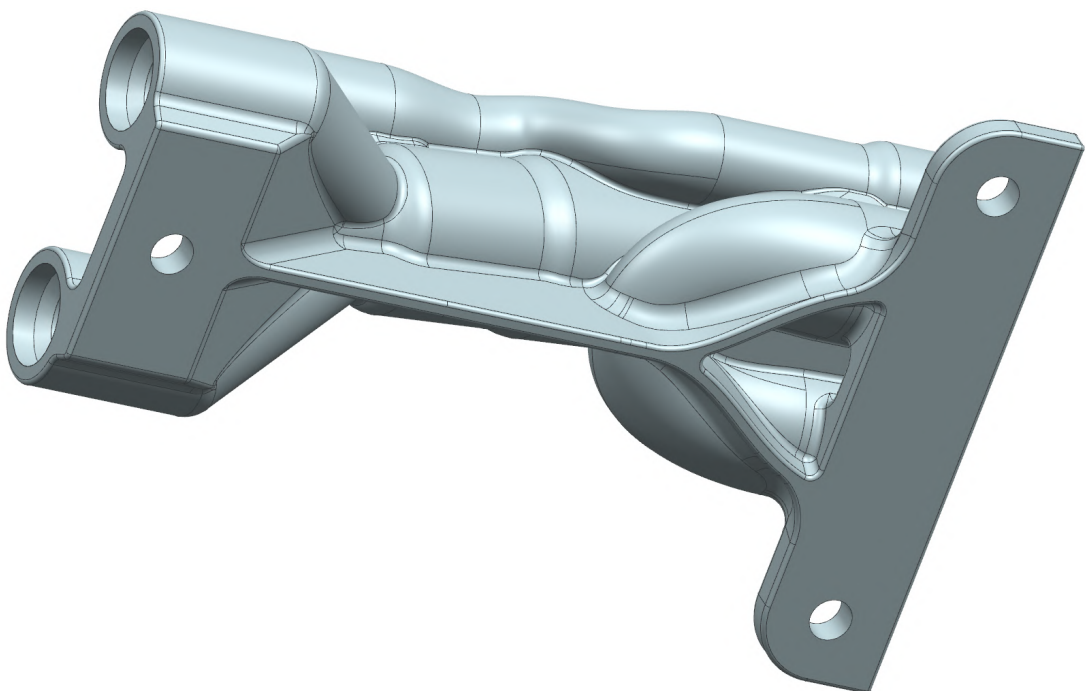
Obr. 4.19: Verze 5 - pohled zezadu zprava shora



Obr. 4.20: Verze 6 - pohled zezadu zprava shora



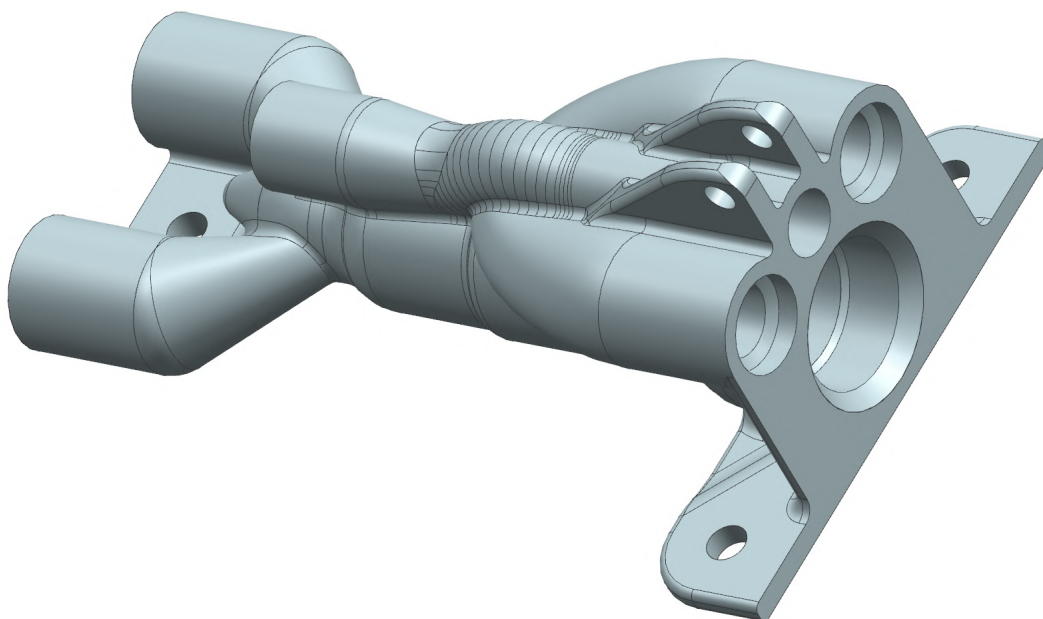
Obr. 4.21: Verze 5 - pohled zezadu zprava zdola



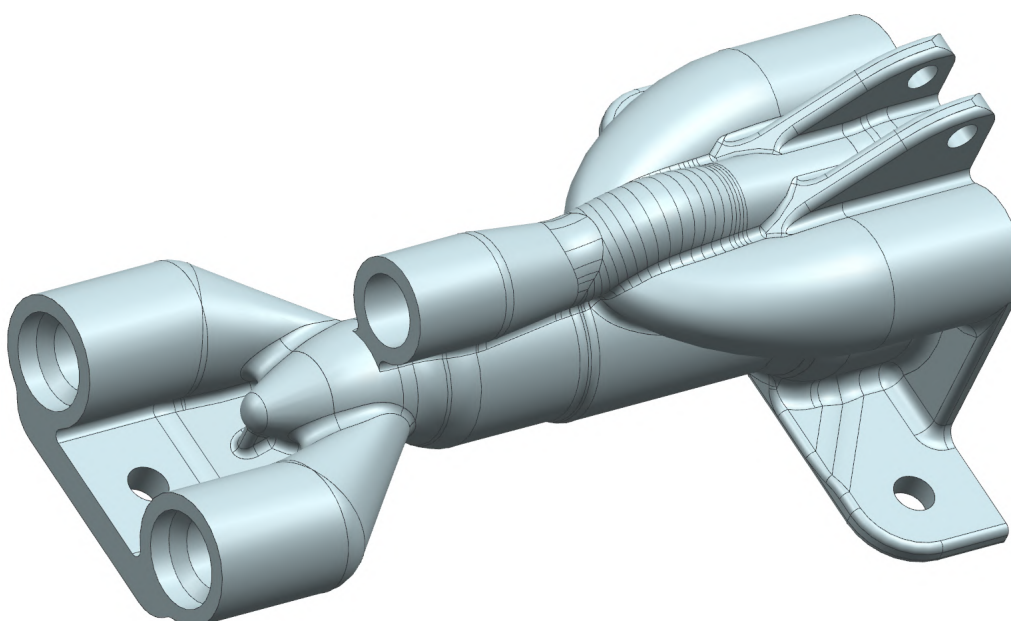
Obr. 4.22: Verze 6 - pohled zezadu zprava zdola

#### 4.3.6 Verze 7 - pracovní verze pro UL-39 Albi

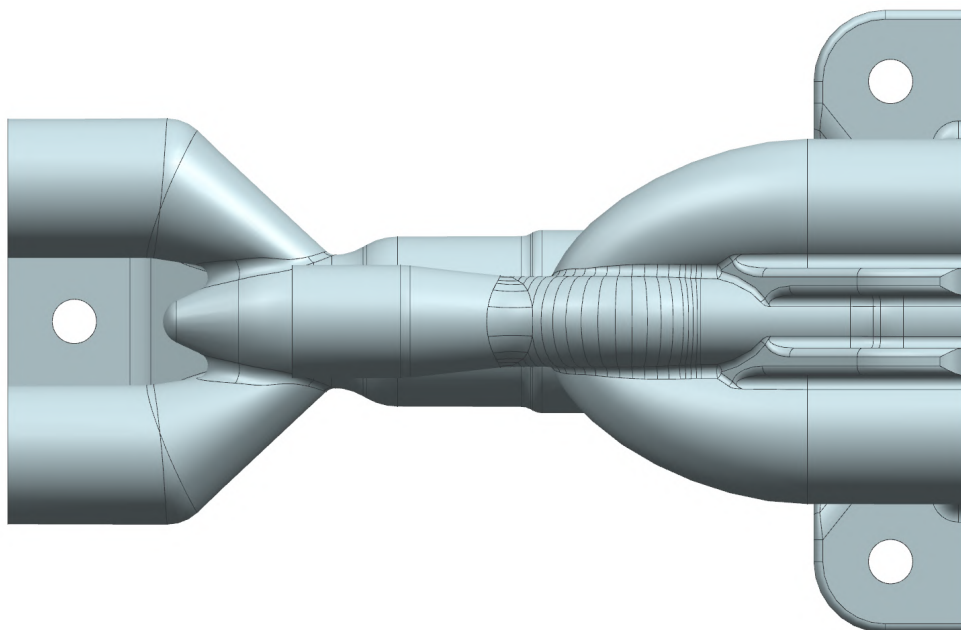
Předchozí verze těla pumpy měly tlakovou větev umístěnou pod ústím prostoru pro válec. S nainstalovaným mechanismem páky by to způsobovalo zhoršený přístup k propojovacím armaturám. Proto byl prostor pro válec narovnan a umístěn na úroveň roviny montáže. Kanál tlakové větve byl přesunut nad tento prostor a kanál pro umístění zpětného ventilu od tlakové větve byl napozicován mezi její hrdla. Díky tomu by byly armatury přístupné i s namontovaným mechanismem páky. Na rozhraní takto umístěných tří kanálů byla navržena žebra s dírami pro čep páky. Hrdla tlakové větve byla propojena s úchyty pro montáž pomocí plných žeber, která při tisku vyrostou přímo z roviny tisku.



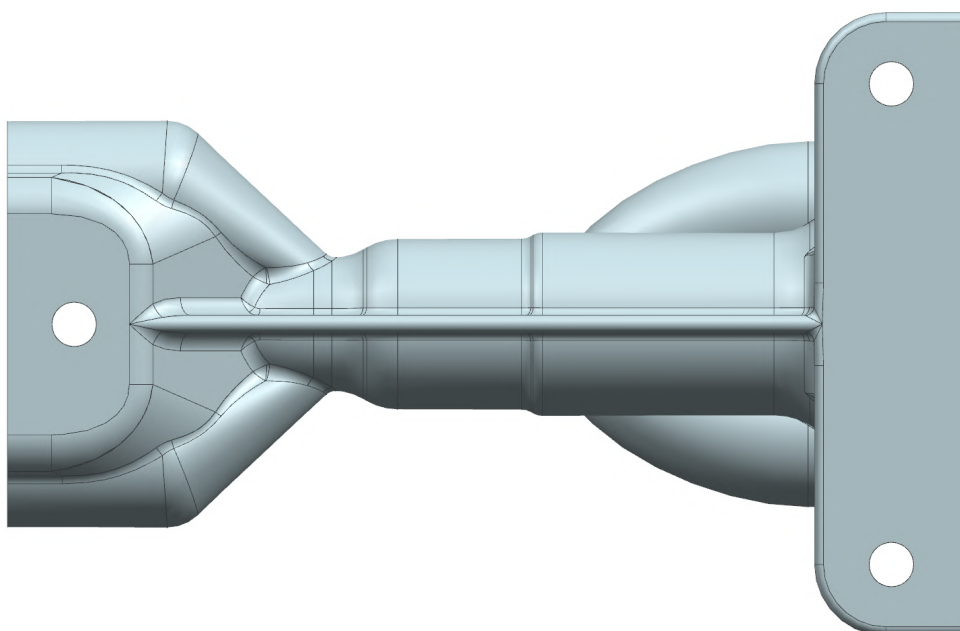
Obr. 4.23: Verze 7 - pohled zepředu zprava shora



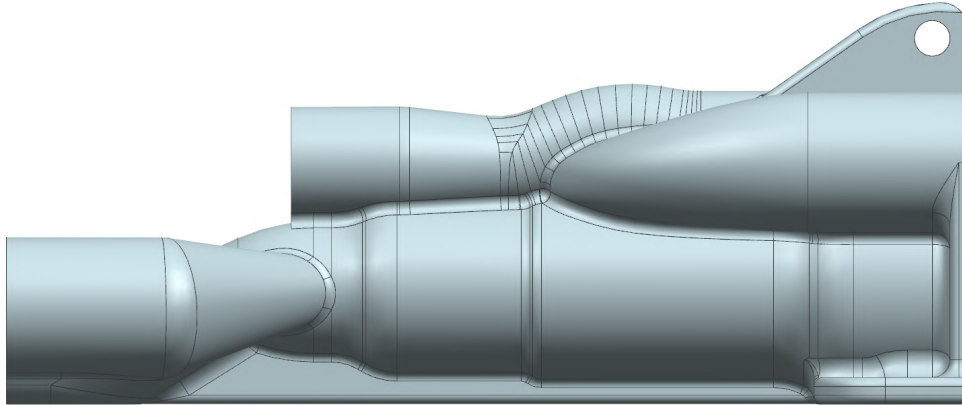
Obr. 4.24: Verze 7 - pohled zezadu zprava shora



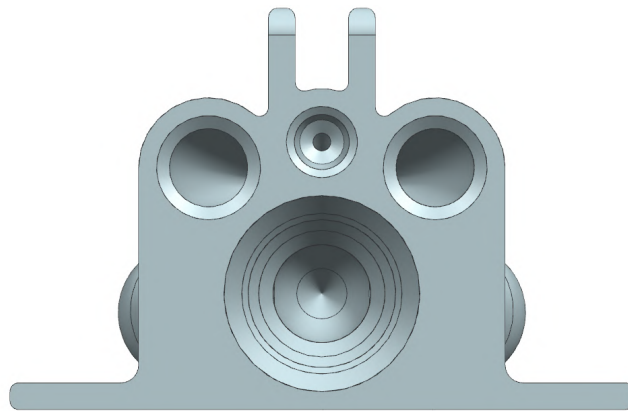
Obr. 4.25: Verze 7 - pohled shora



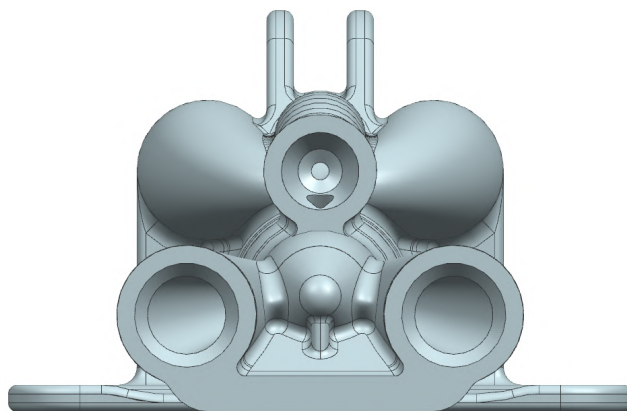
Obr. 4.26: Verze 7 - pohled zdola



Obr. 4.27: Verze 7 - pohled zprava



Obr. 4.28: Verze 7 - pohled zepředu



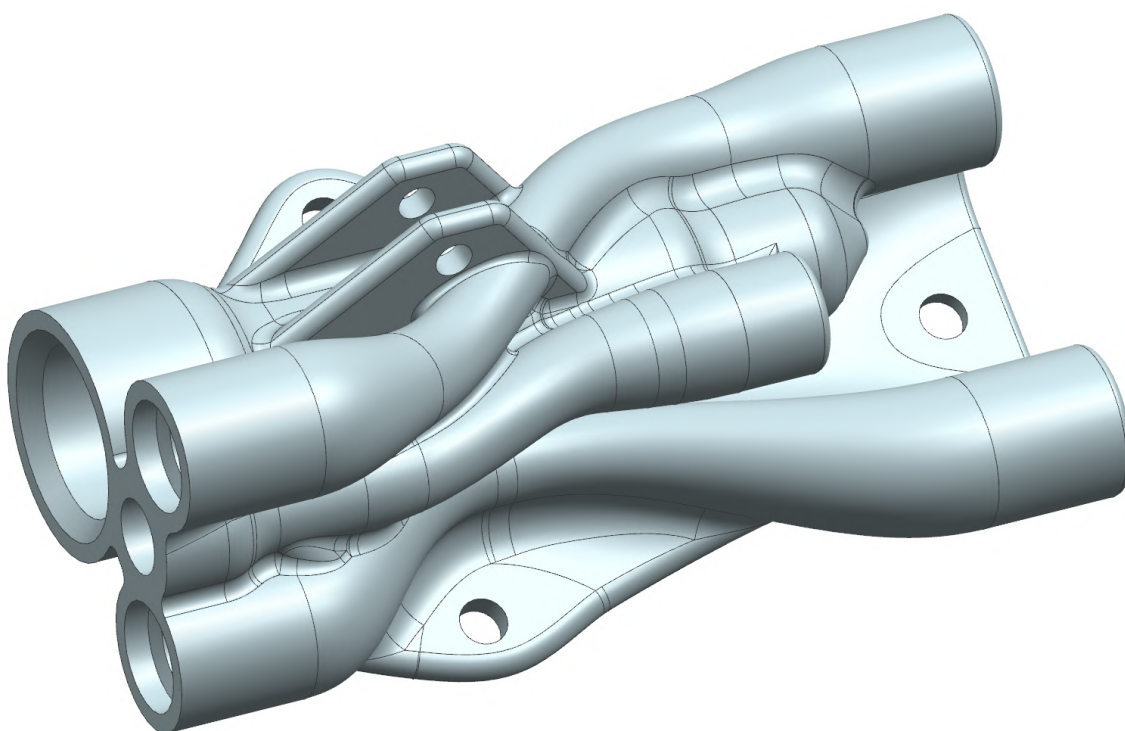
Obr. 4.29: Verze 7 - pohled zezadu



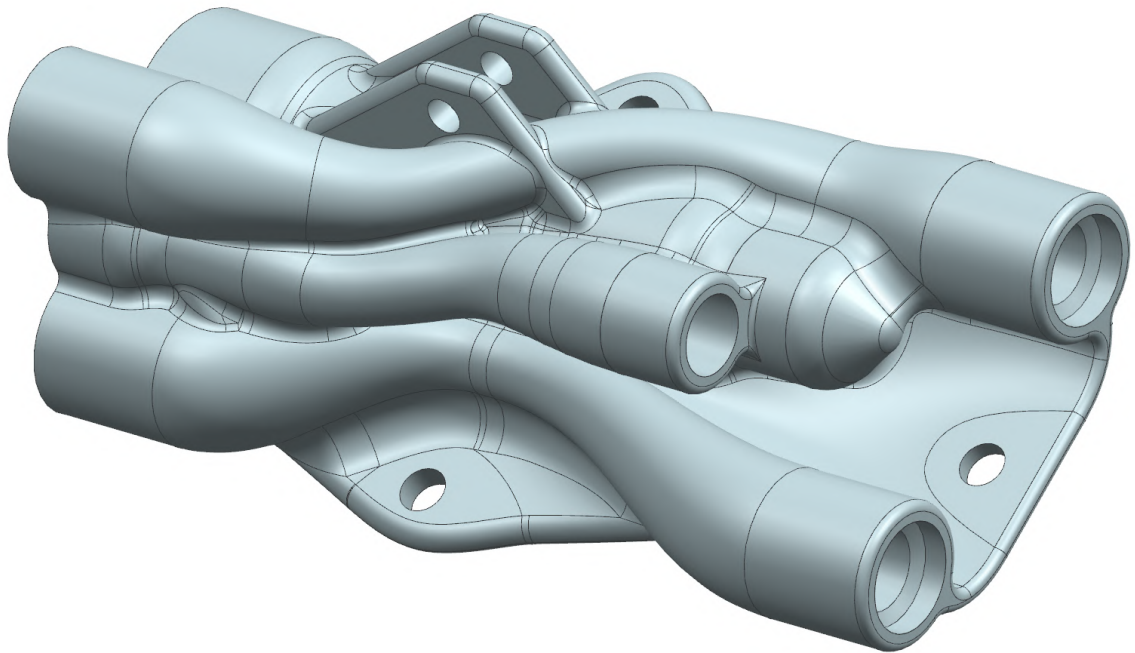
#### 4.3.7 Verze 8 - finální verze pro UL-39 Albi II

Standardně drží pilot za letu v pravé ruce knipl a levou rukou ovládá plyn a ostatní přístroje. V případě nutnosti nouzového vysunutí podvozku by pilot měl být schopen dosáhnout na páku nouzového vysouvání bez jakýchkoliv obtíží. Proto bylo potřeba nalézt pro páku nouzového vysouvání podvozku umístění na levé straně kokpitu. Vzhledem k nedostatku prostoru byl zvolen charakter táhla vysouvaného z levé strany palubní desky. Pro maximální zjednodušení byl uvažován rovinný mechanismus. Na palubní desce byl vybrán bod, ze kterého by mělo být vysouváno táhlo. Tímto bodem byla protnuta rovina tak, aby bylo možné do ní umístit mechanismus a tělo pumpy, ležící v této rovině, uchytit k bočnici kokpitu.

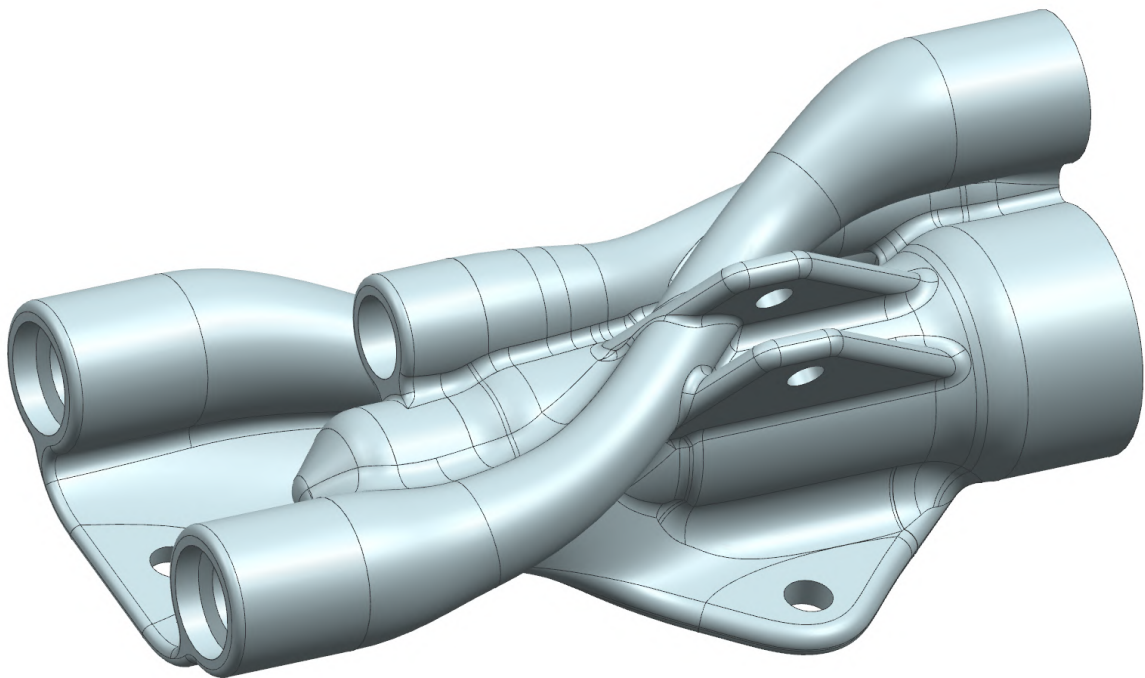
Umístění těla pumpy do obecného místa v prostoru společně s volbou roviny mechanismu definovalo na těle pozici uložení čepu pro binární člen. Tělo pumpy je přístupné pouze z jedné strany, proto byly všechny kanály vytvářovány tak, aby převlečné matice trubek hydrauliky i spojovací armatury byly přístupné pro případ odpojení od hydraulického systému bez nutnosti demontáže mechanismu.



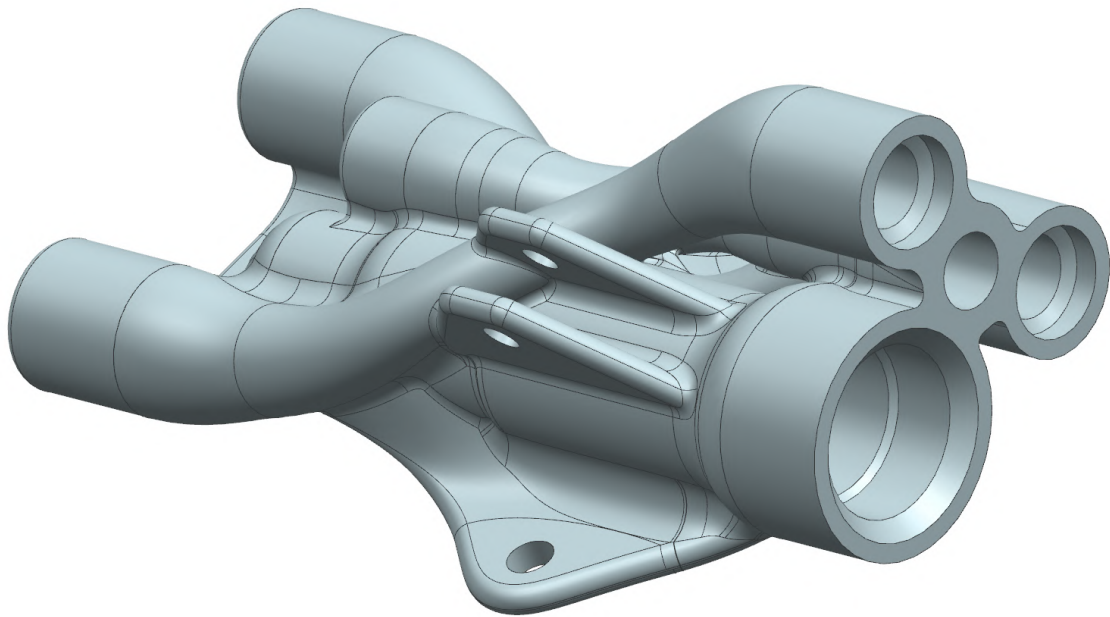
Obr. 4.30: Verze 8 - pohled zepředu zleva shora



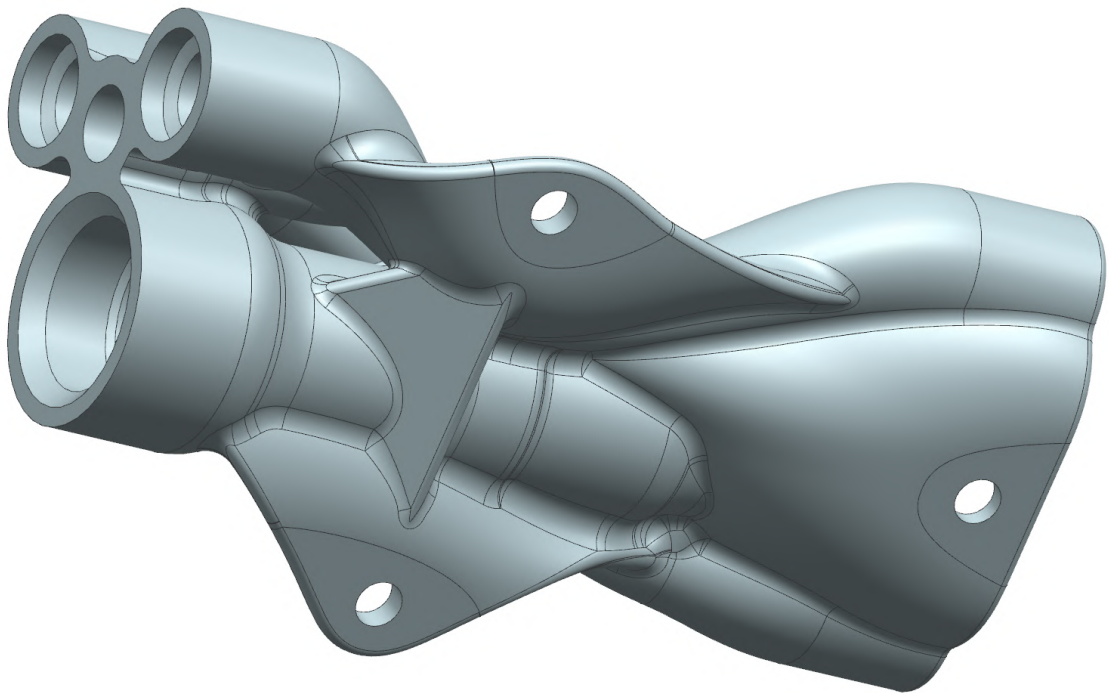
Obr. 4.31: Verze 8 - pohled zezadu zleva shora



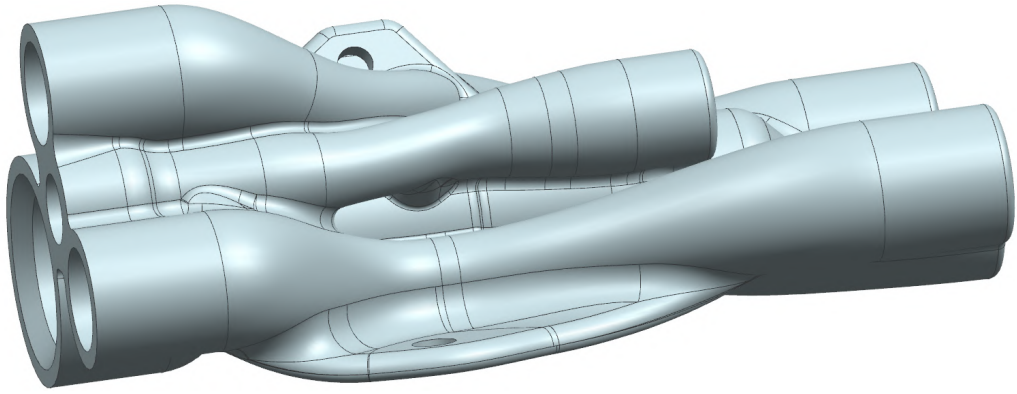
Obr. 4.32: Verze 8 - pohled zezadu zprava shora



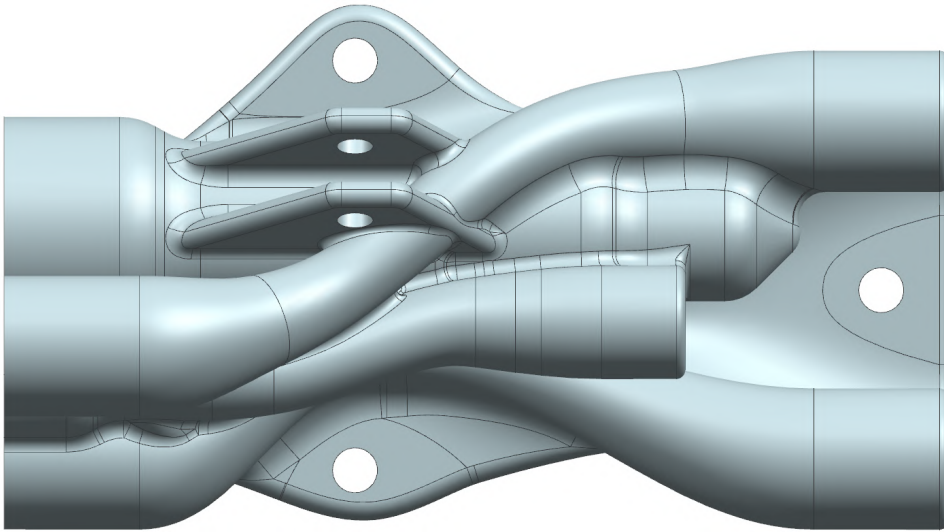
Obr. 4.33: Verze 8 - pohled zepředu zprava shora



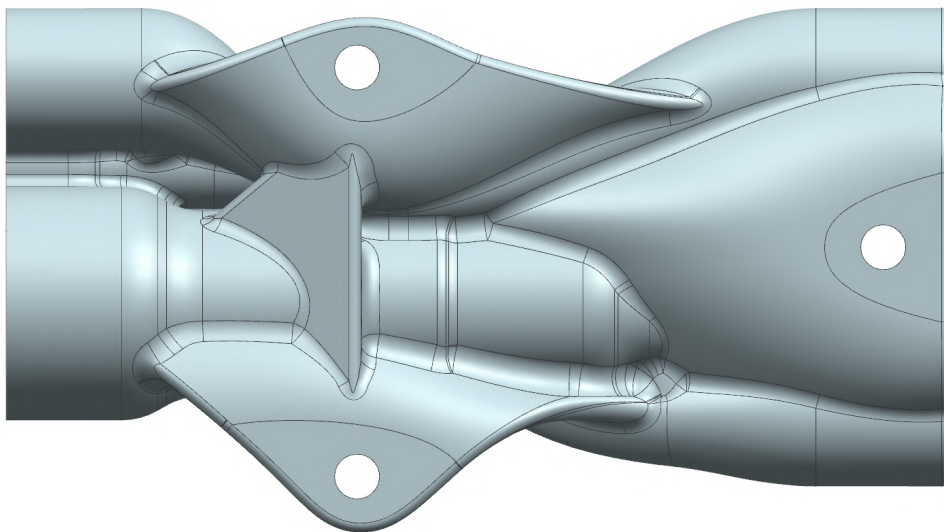
Obr. 4.34: Verze 8 - pohled zepředu zleva zdola



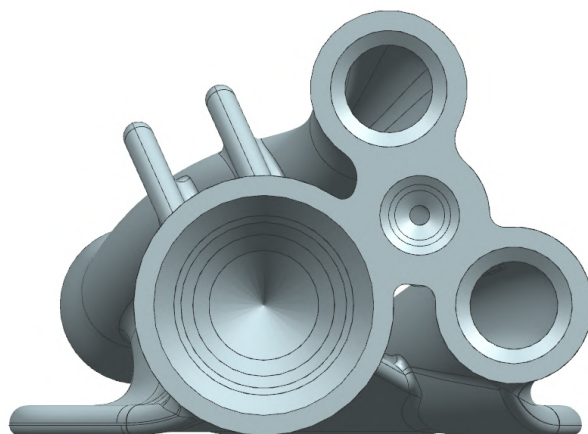
Obr. 4.35: Verze 8 - pohled zleva



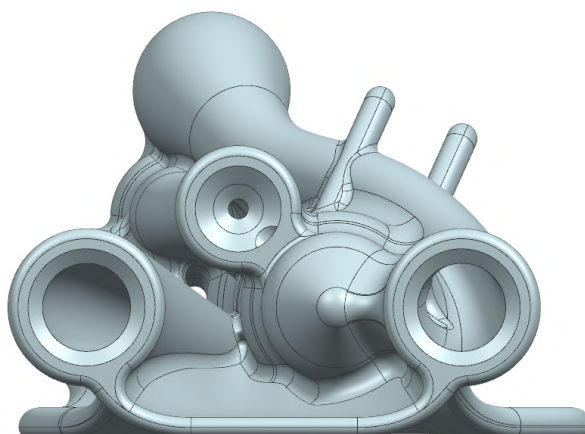
Obr. 4.36: Verze 8 - pohled shora



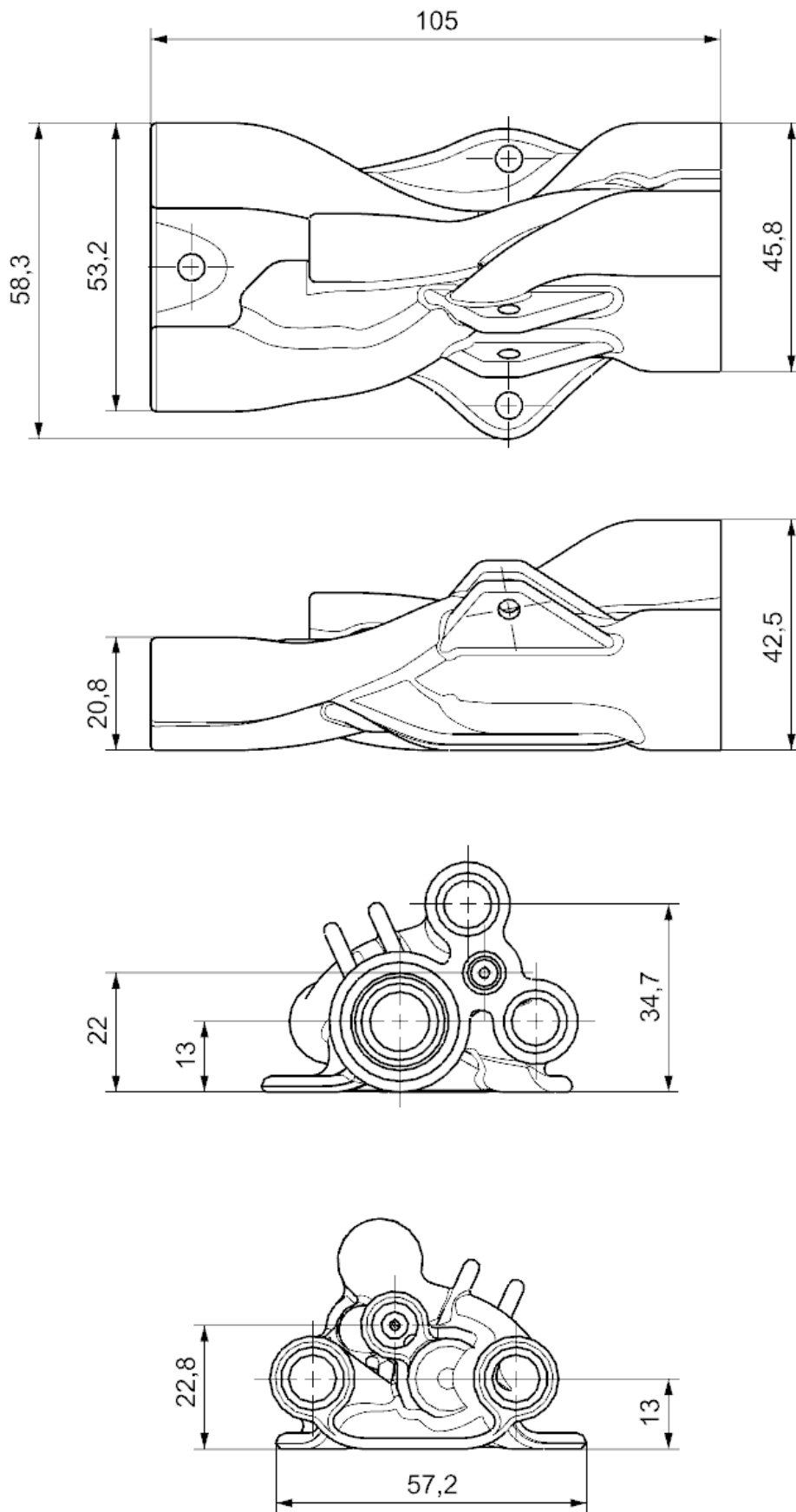
Obr. 4.37: Verze 8 - pohled zdola



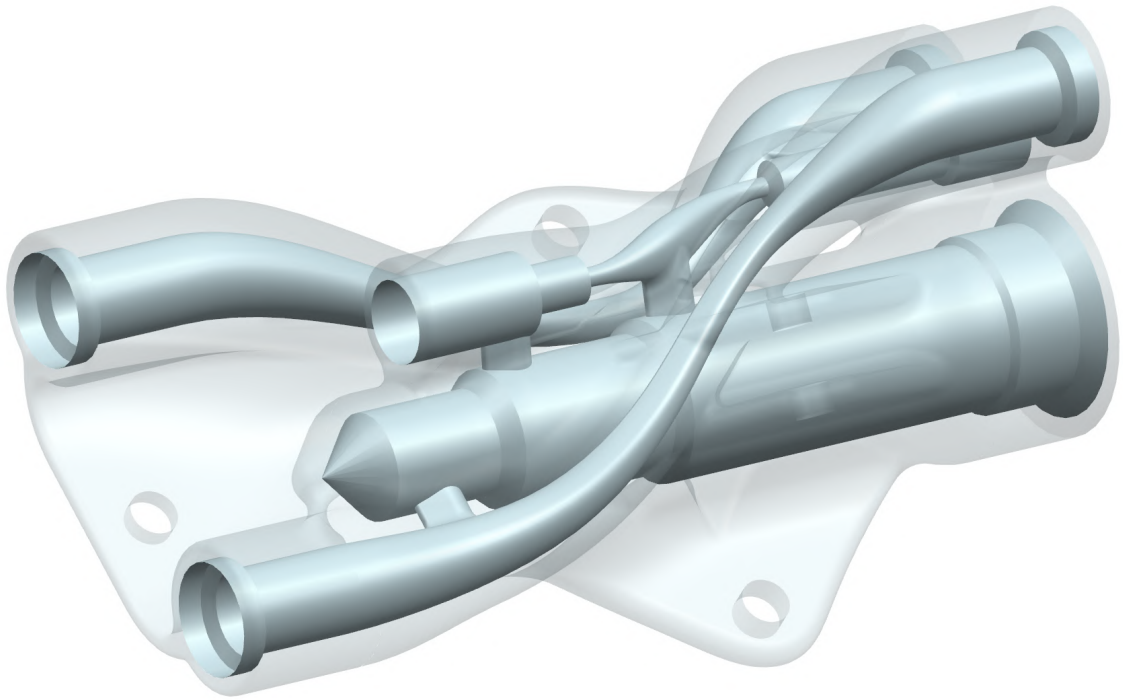
Obr. 4.38: Verze 8 - pohled zepředu



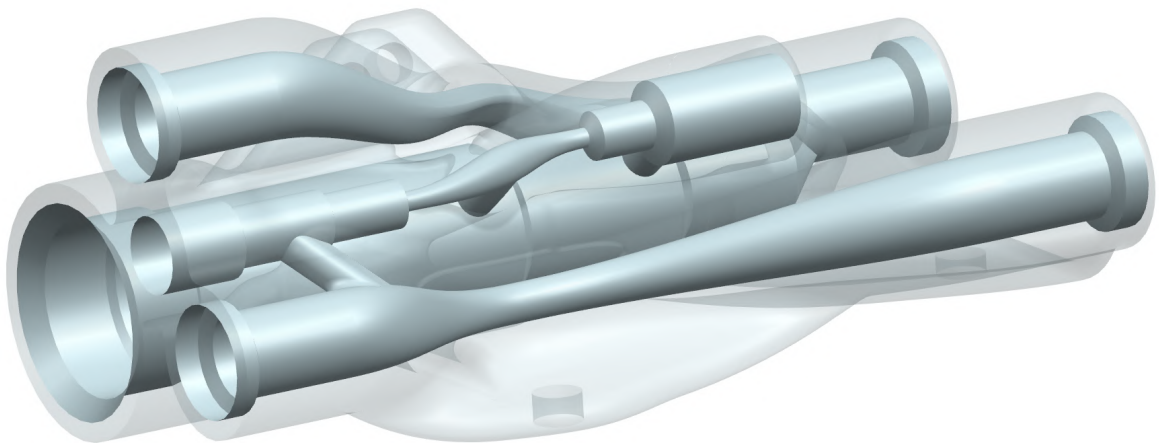
Obr. 4.39: Verze 8 - pohled zezadu



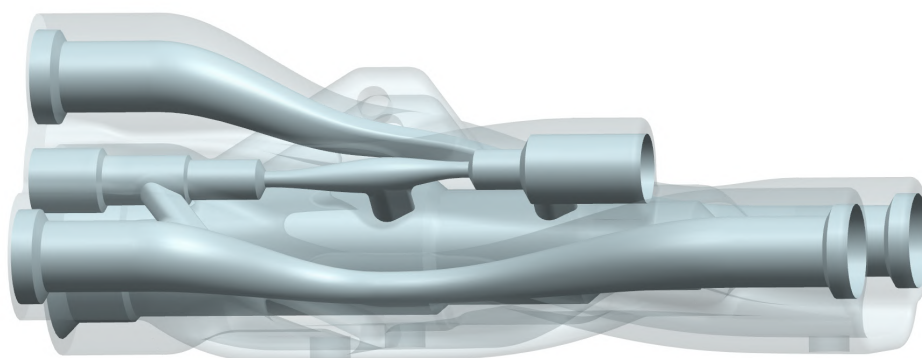
Obr. 4.40: Rozměrová obálka tištěného těla



Obr. 4.41: Vnitřní kanály finálního návrhu těla pumpy - pohled zezadu zprava shora

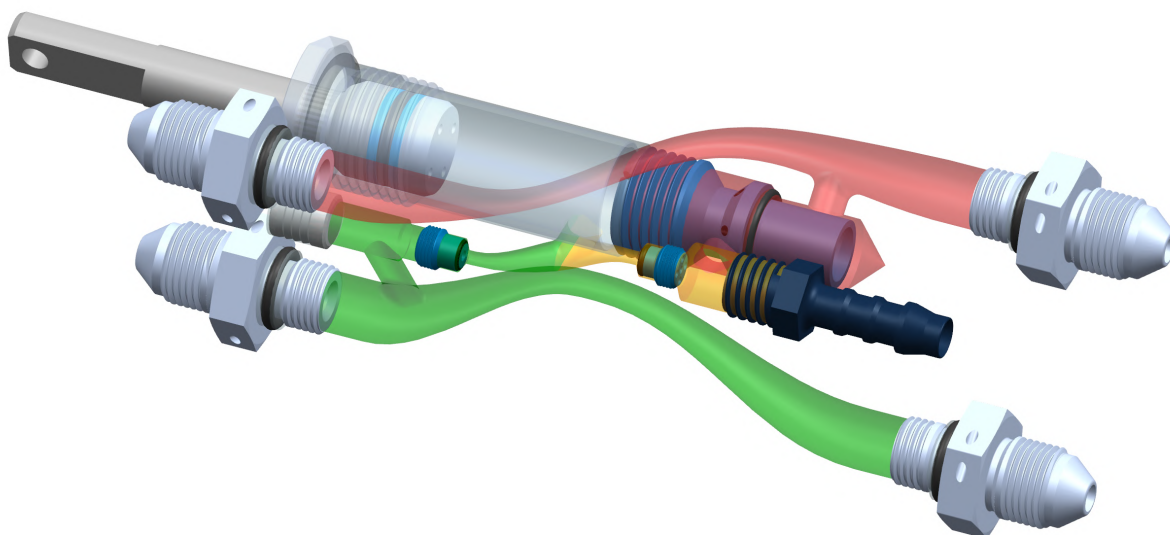


Obr. 4.42: Vnitřní kanály finálního návrhu těla pumpy - pohled zepředu zleva

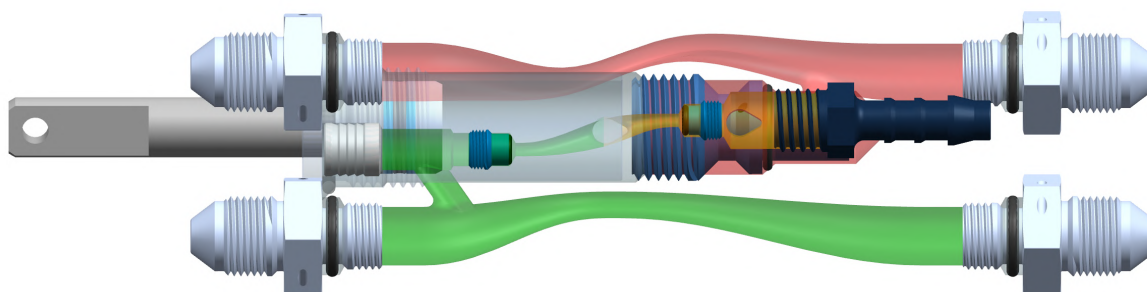


Obr. 4.43: Vnitřní kanály finálního návrhu těla pumpy - pohled zleva

Na obrázcích 4.44 a 4.45 je zeleně vyznačena tlaková větev, červeně odpadní větev a oranžově větev přepadu.

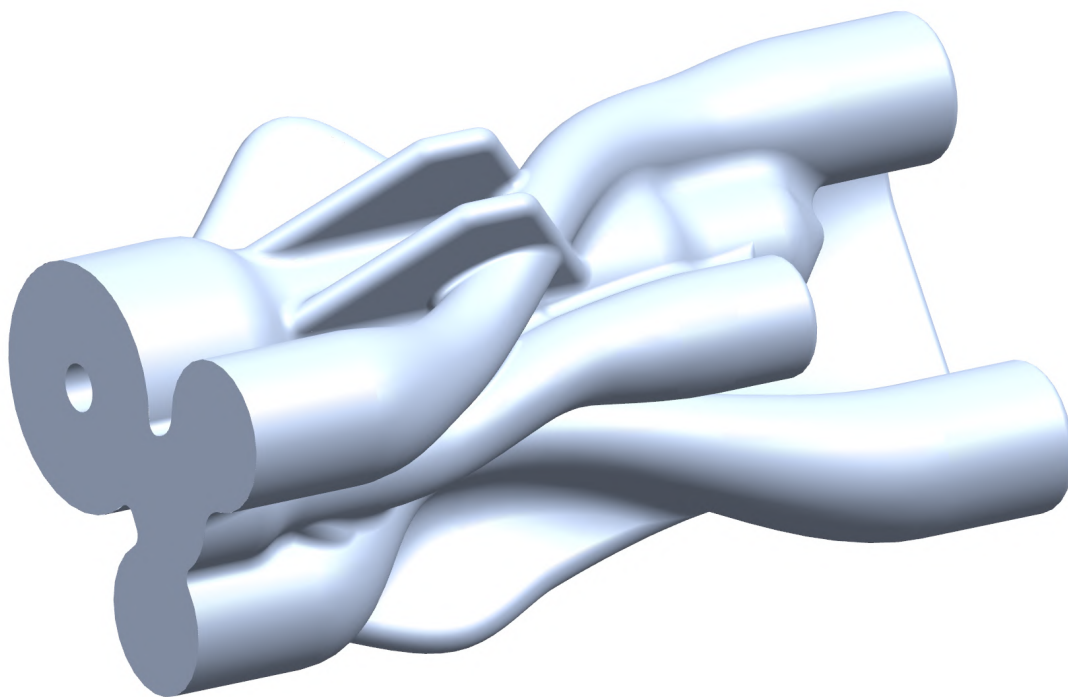


Obr. 4.44: Schéma funkce vnitřních kanálů vytištěného těla pumpy - pohled zezadu zleva shora

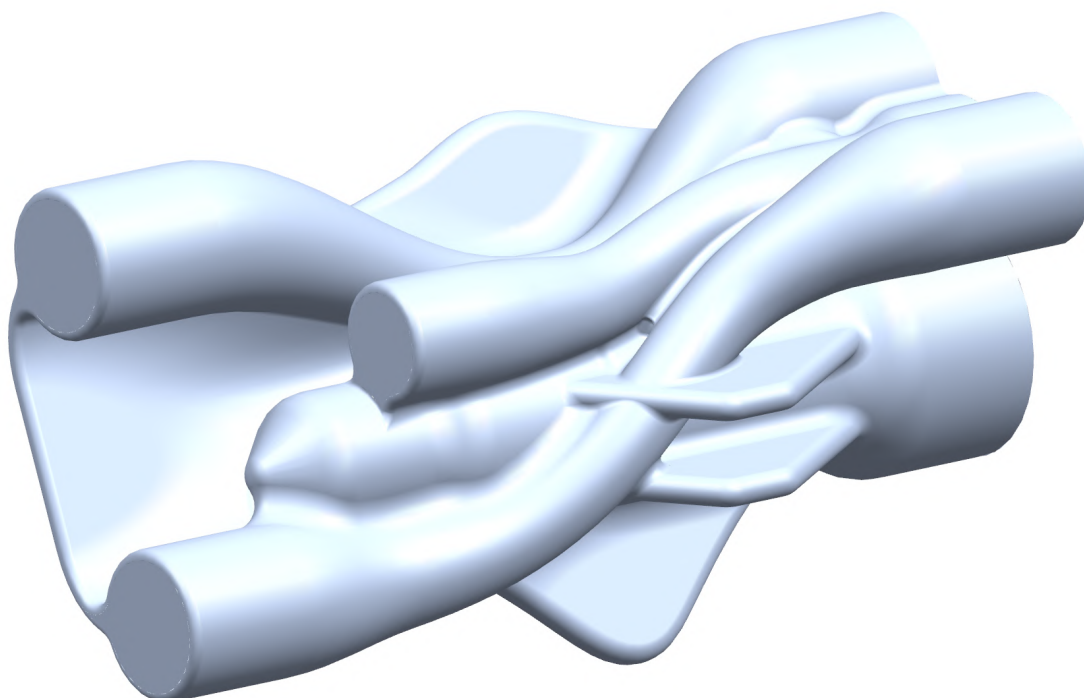


Obr. 4.45: Schéma funkce vnitřních kanálů vytištěného těla pumpy - pohled zleva



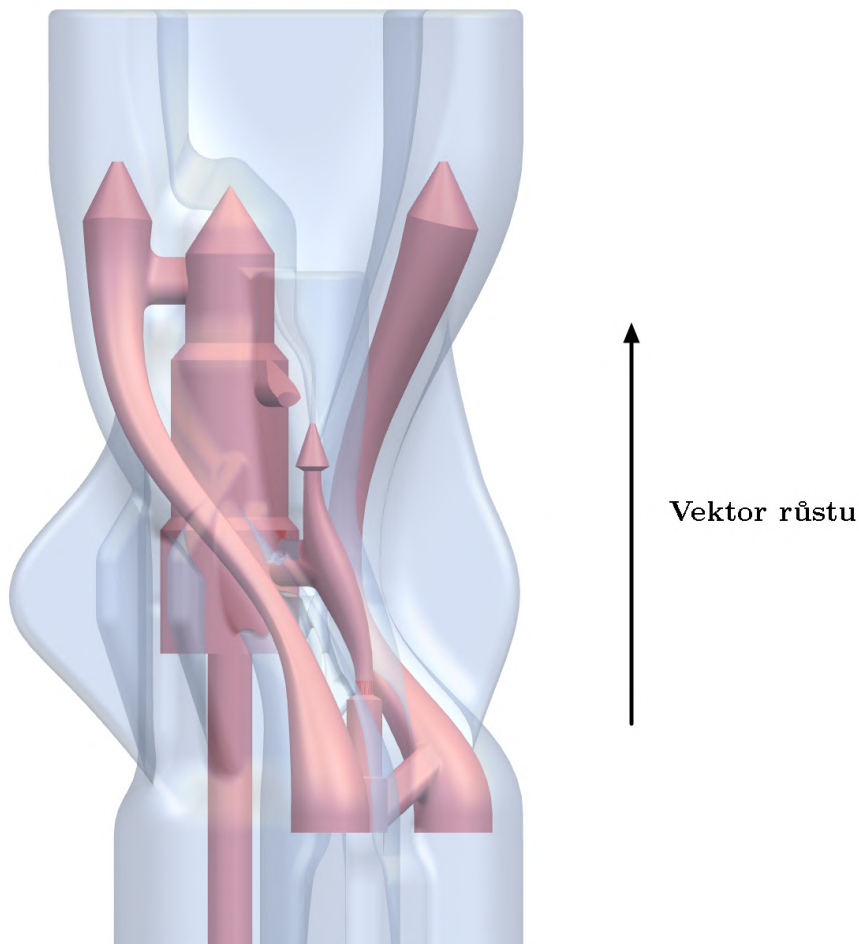


Obr. 4.46: Finální výtisk - pohled zepředu zleva shora



Obr. 4.47: Finální výtisk - pohled zezadu zprava shora

Vzhledem k tomu, že sestava pumpy se skládá z řady komponentů, které jsou s tělem pumpy spojeny normalizovanými prvky, je třeba tělo pumpy vyrobené aditivní technologií následně obrobit. Obráběcími operacemi jsou vrtání děr a řezání závitů. Tomuto byla uzpůsobena příprava tvaru tisknutého těla pumpy. Otvory určené k obrobení byly zmenšeny o přídavek na obrábění. Hrdla armatur byla uzavřena hmotou určenou k následnému odvrtání. V místech horních vrstev tisku vzhledem k vektoru růstu bylo uzavření hrdel navrženo tak, aby nevznikaly převislé plochy normálové k vektoru růstu, případně plochy s velkým úhlem nárůstu.



Obr. 4.48: Vnitřní uspořádání kanálů vytištěného těla

Vzhledem k radikální změně tvaru těla pumpy byla místo úhlové hadicové vsuvky použita přímá.



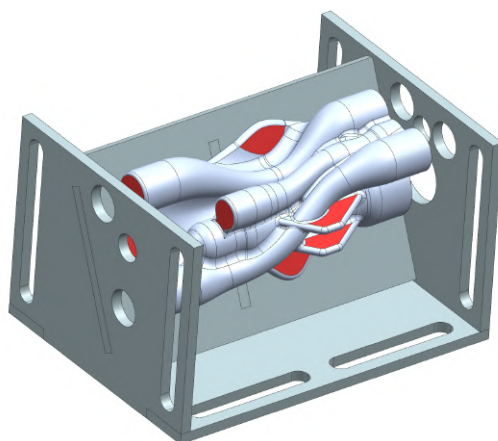
Obr. 4.49: Přímá hadicová vsuvka [15]

## 4.4 Obrobení výtisku těla pumpy

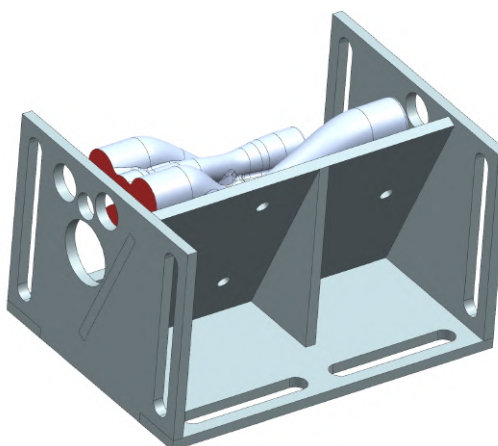
Aditivní technologie vzbuzují dojem, že s jejich využitím je možné snadno dosáhnout jakéhokoli tvaru a jeho optimalizací dosáhnout i optimálních mechanických vlastností součástí. Nesmí být však opomíjeno, že takto vyrobené komponenty je třeba následně umístit do větších sestav, kde se předpokládá, že většina dílů byla vyrobena konvenčními výrobními postupy.

### 4.4.1 Koncepční návrh vrtacího přípravku

V případě spojení pomocí šroubů je třeba navrhnout vrtací přípravek, který zajistí, že šroubové spoje budou díky přesně navrtaným díram smontovatelné. V případě těla pumpy musí také vyvrtaná hrdla pro armatury hydrauliky správně navazovat na vytištěné vnitřní kanály a to samé platí i pro hlavní prostor pro zašroubování vložky, tedy válce pístu. Na obrázcích 4.50 a 4.51 jsou plochy k obrábění vyznačeny červeně. Návrh tohoto konkrétního přípravku je myšlen pouze jako tvarový koncept, použitelný pro následující postup obrábění. Jedná se o svařenec desek vyřezaných ze silného ocelového plechu laserem nebo vodním paprskem. Aby se přípravek nezkroutil, je svařený bodovými svary.



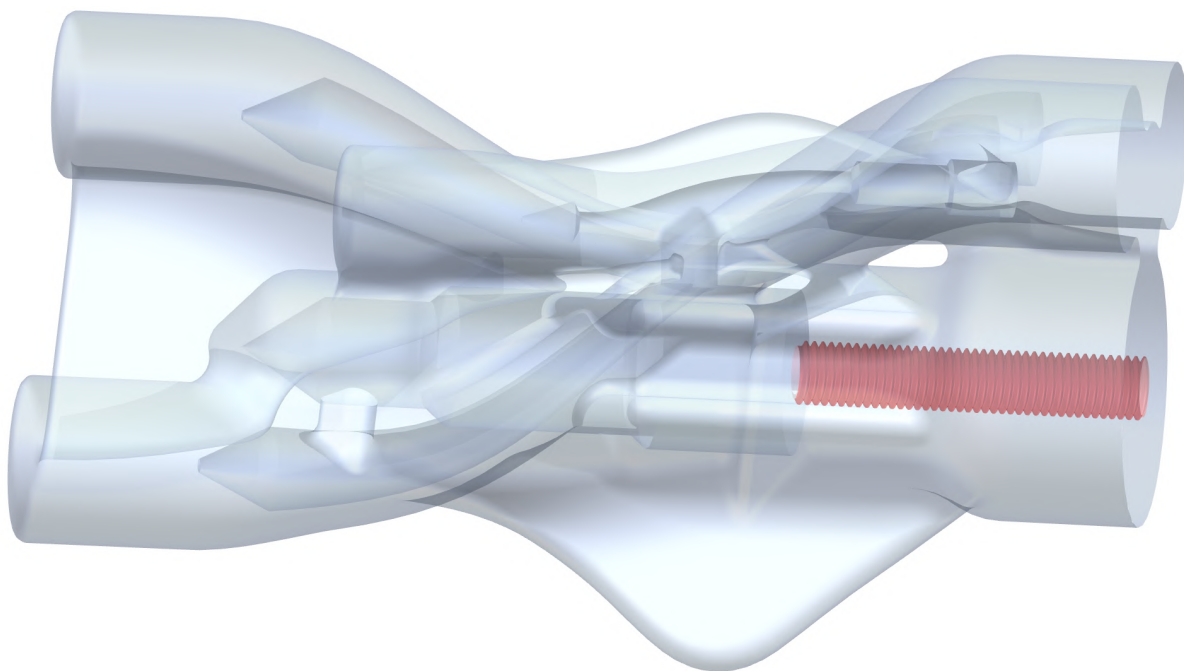
Obr. 4.50: Koncepční návrh vrtacího přípravku - pohled zepředu zleva shora



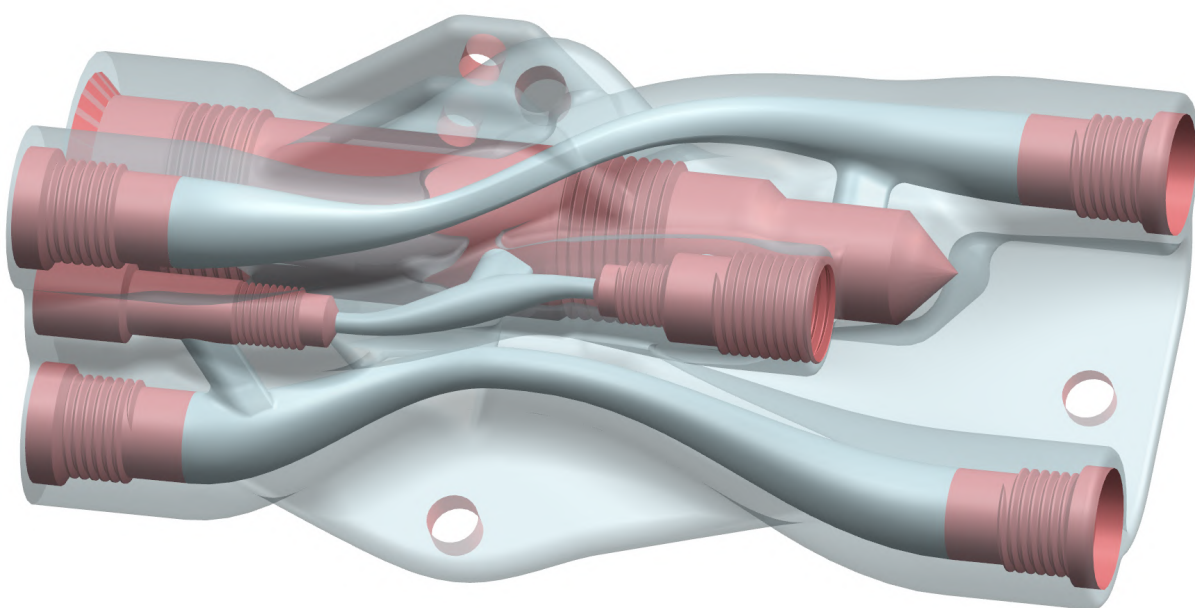
Obr. 4.51: Koncepční návrh vrtacího přípravku- pohled zezadu zleva shora

#### 4.4.2 Postup obrábění

- 1) Ruční vyřezání průchozího závitu skrz vytištěnou díru v ose prostoru pro válec
- 2) Přišroubování těla pumpy k přípravku dlouhým šroubem. Opření ploch úchytů pumpy společně s upevněním pomocí dlouhého šroubu by mělo zajistit tuhé a nehybné zapozicování dílu k přípravku
- 3) Ruční vyvrtání tří průchozích děr pro uchycení těla pumpy k bočnici interiéru
- 4) Demontáž těla pumpy od přípravku vyšroubováním dlouhého šroubu
- 5) Upnutí těla pumpy k přípravku pomocí tří lícovaných šroubů a matic přes nově vyvrtané díry
- 6) Upnutí vrtacího přípravku do T drážek stojanové vrtačky přes spodní lišty přípravku
- 7) Vyvrtání průchozích děr v žebrech těla pumpy pro čep binárního členu ovládacího mechanismu
- 8) Přeupnutí vrtacího přípravku do T drážek stojanové vrtačky přes drážku v pravé bočnici přípravku
- 9) Vyvrtání díry pro zpětný ventil v kanálu přepadu
- 10) Vyvrtání díry pro závit hubice připojení hadice od nádrže s hydraulickou kapalinou
- 11) Vyvrtání díry pro první armaturu hydrauliky
- 12) Vyvrtání díry pro druhou armaturu hydrauliky
- 13) Vyřezání závitu pro zpětný ventil v kanálu přepadu
- 14) Vyřezání závitu pro hubici připojení hadice od nádrže s hydraulickou kapalinou
- 15) Vyřezání závitu pro první armaturu hydrauliky
- 16) Vyřezání závitu pro druhou armaturu hydrauliky
- 17) Přeupnutí do T drážek stojanové vrtačky přes drážku v levé bočnici přípravku
- 18) Vyvrtání díry odpadní větve za řízeným zpětným ventilem
- 19) Vyvrtání díry pro závit řízeného zpětného ventilu
- 20) Vyvrtání díry pro prostor válce
- 21) Vyvrtání díry pro závit uchycení vložky, tedy válce pístu
- 22) Vyvrtání sražení pro utěsnění vložky, tedy válce pístu, O-kroužkem
- 23) Vyvrtání díry pro zpětný ventil tlakové větve
- 23) Vyvrtání díry propojovacího kanálu mezi zpětným ventilem a ucpávkou tlakové větve
- 24) Vyvrtání díry pro ucpávku tlakové větve
- 25) Vyvrtání díry pro první armaturu hydrauliky
- 26) Vyvrtání díry pro druhou armaturu hydrauliky
- 27) Vyřezání závitu pro zpětný ventil tlakové větve
- 28) Vyřezání závitu pro první armaturu hydrauliky
- 29) Vyřezání závitu pro druhou armaturu hydrauliky



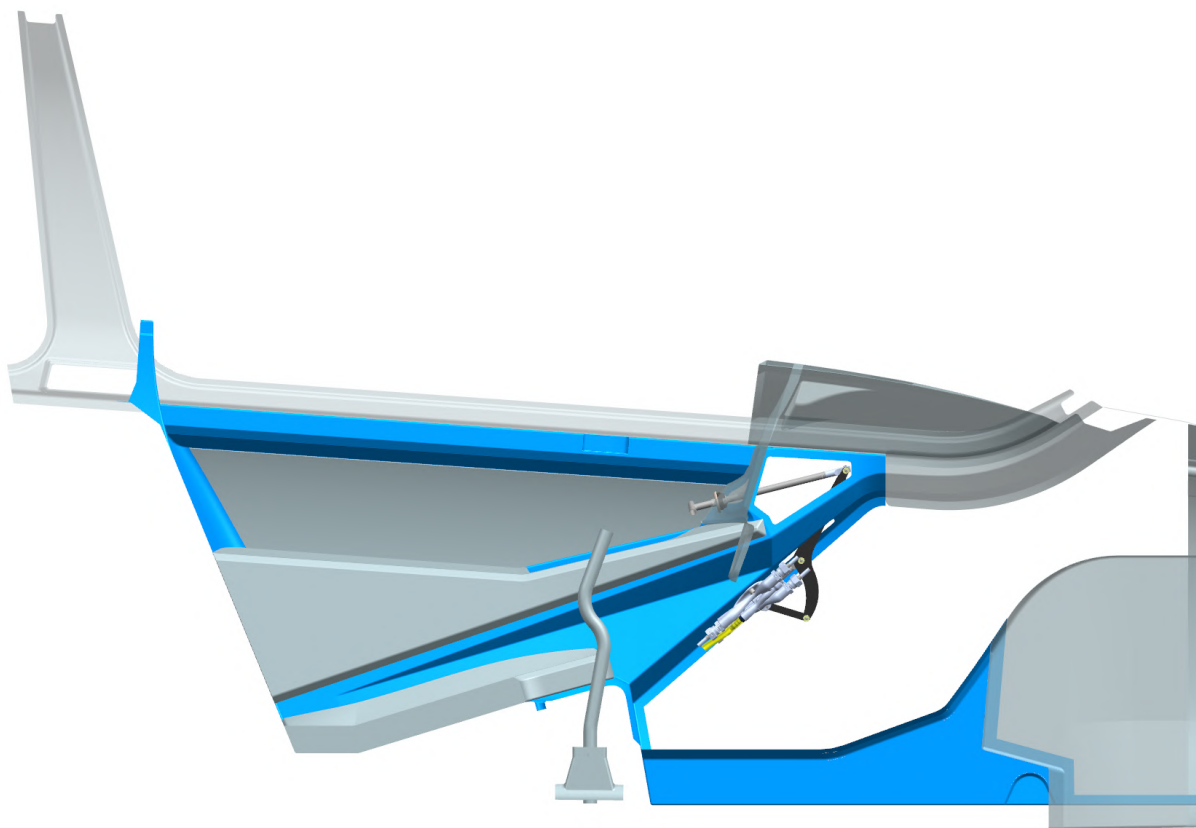
Obr. 4.52: Závit vyřezaný do výtisku těla pumpy pro prvotní upnutí



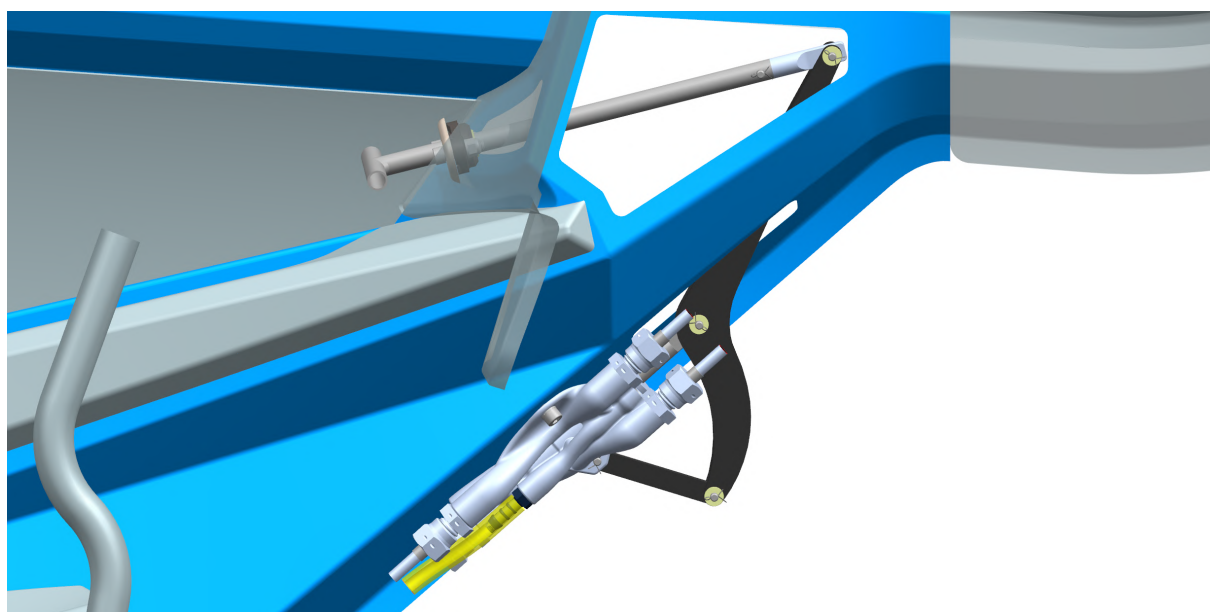
Obr. 4.53: Tělo pumpy po dokončení všech obráběcích operací

## 4.5 Úprava interiéru pro montáž

Obrázky 4.54 a 4.55 zobrazují pumpu instalovanou v bočnici interiéru.

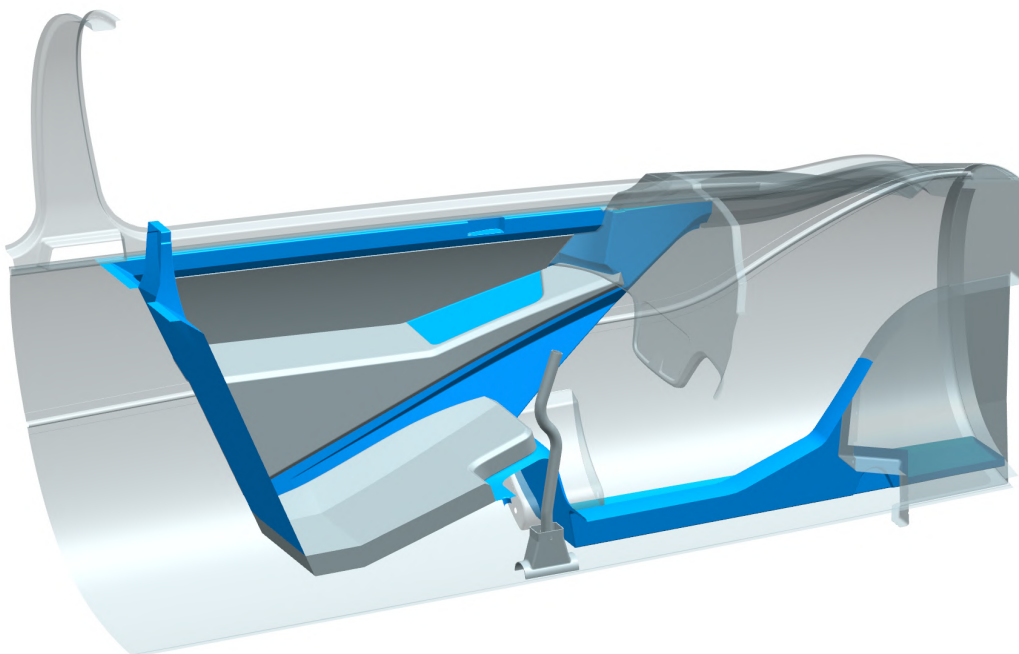


Obr. 4.54: Nainstalovaná sestava pumpy - pohled z dálky

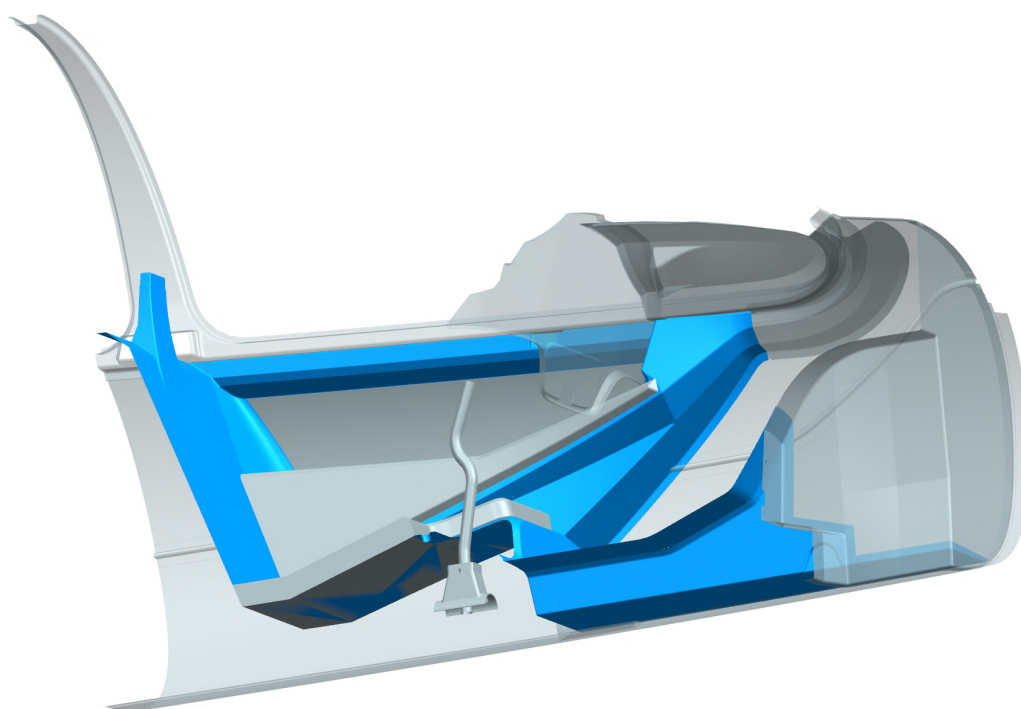


Obr. 4.55: Nainstalovaná sestava pumpy - pohled z blízka

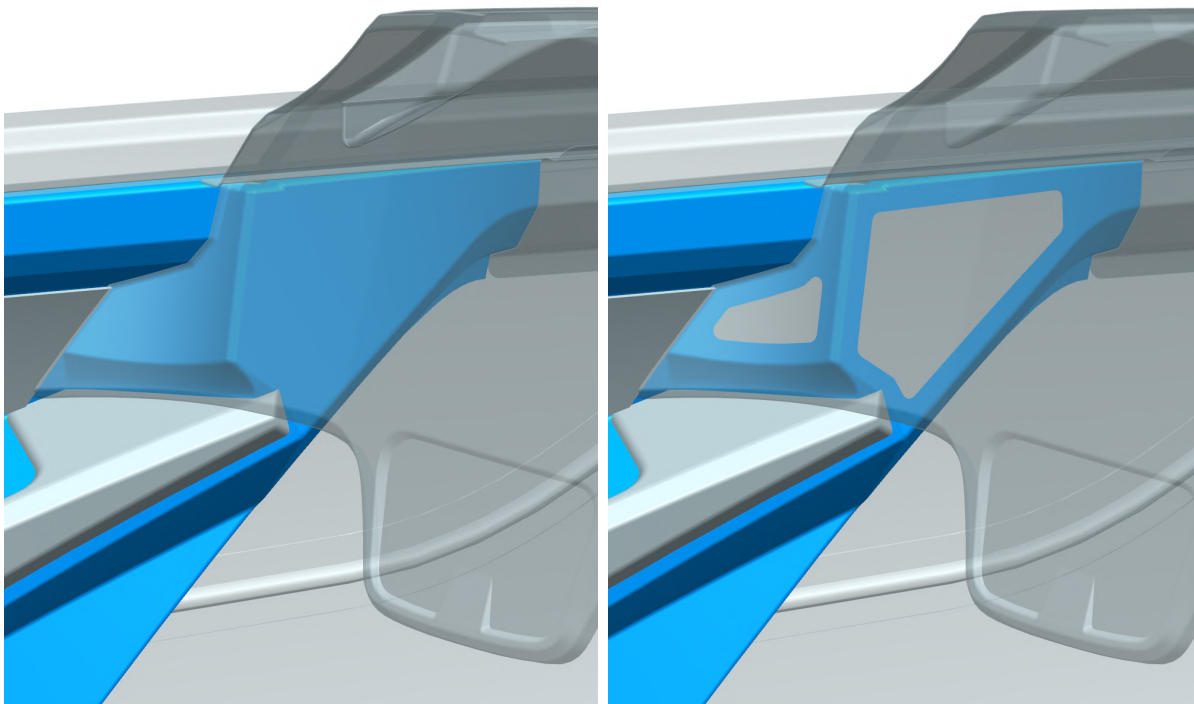
Pro instalaci sestavy pumpy je třeba v interiéru vytvořit montážní otvory. Na obrázcích 4.56-4.58 a dále 4.60-4.63 je díl pro úpravu znázorněn modrou barvou.



Obr. 4.56: Díl interiéru pro úpravu - pohled zezadu zprava shora

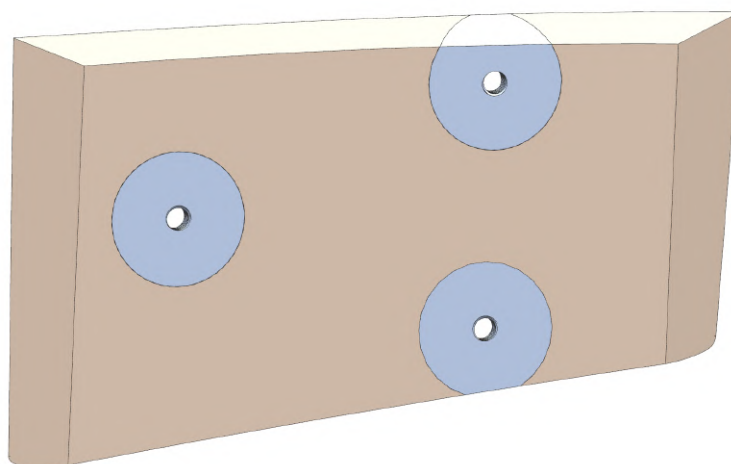


Obr. 4.57: Díl interiéru pro úpravu - pohled zepředu zprava zdola



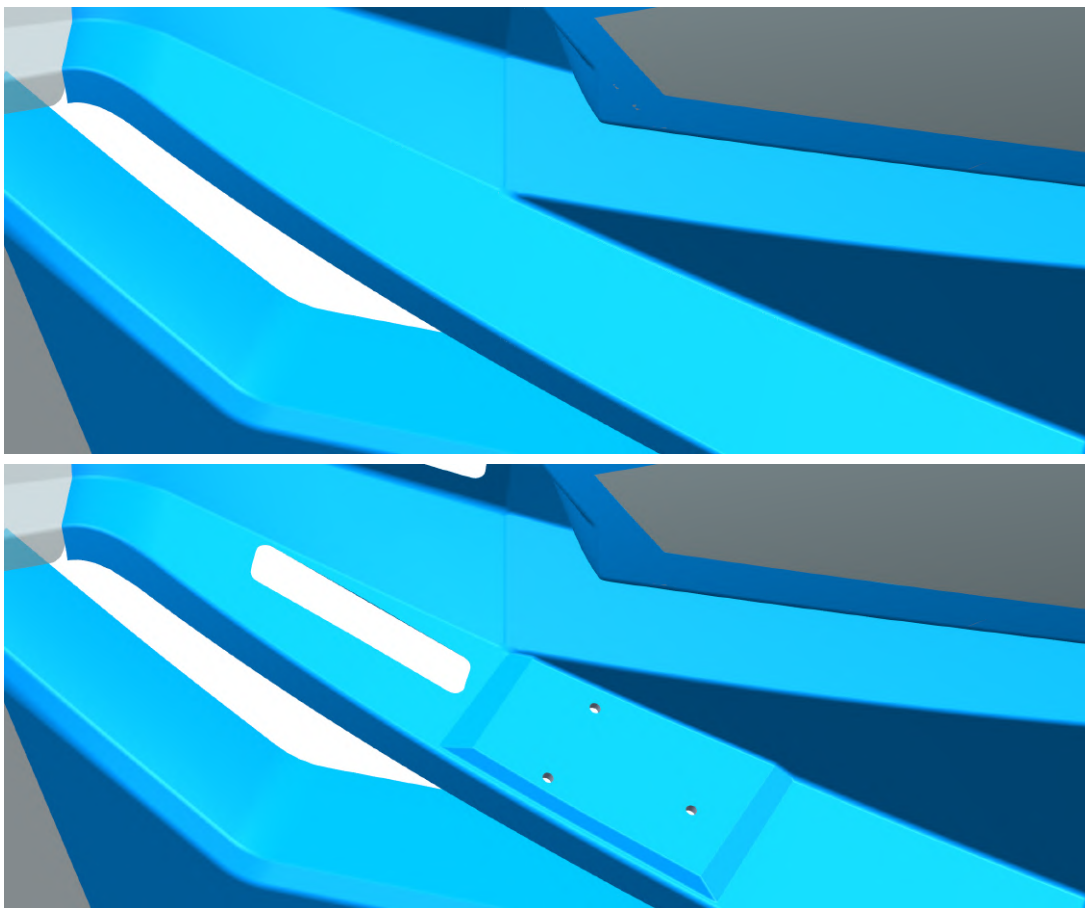
Obr. 4.58: Montážní otvory za palubní deskou

Pro uchycení těla pumpy do bočnice by měl sloužit zalaminovaný překližkový insert s vlepenými duralovými vložkami s dírami se závitem.

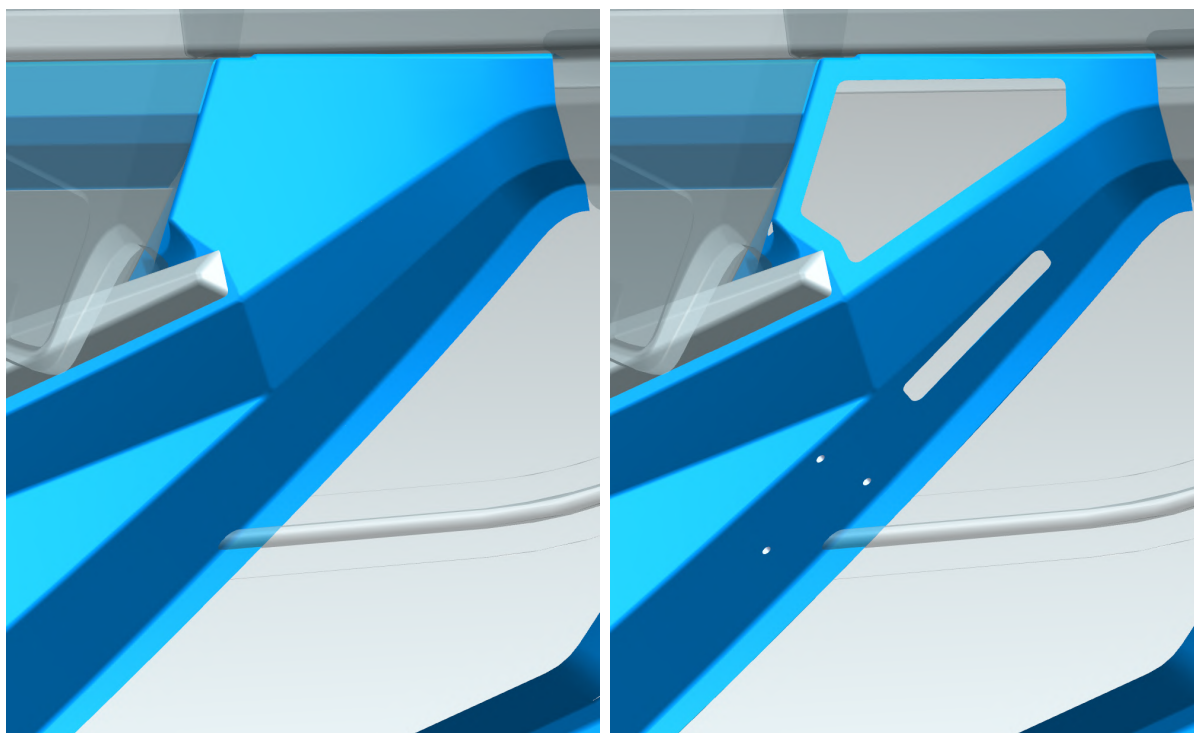


Obr. 4.59: Návrh překližkového insertu s duralovými vložkami



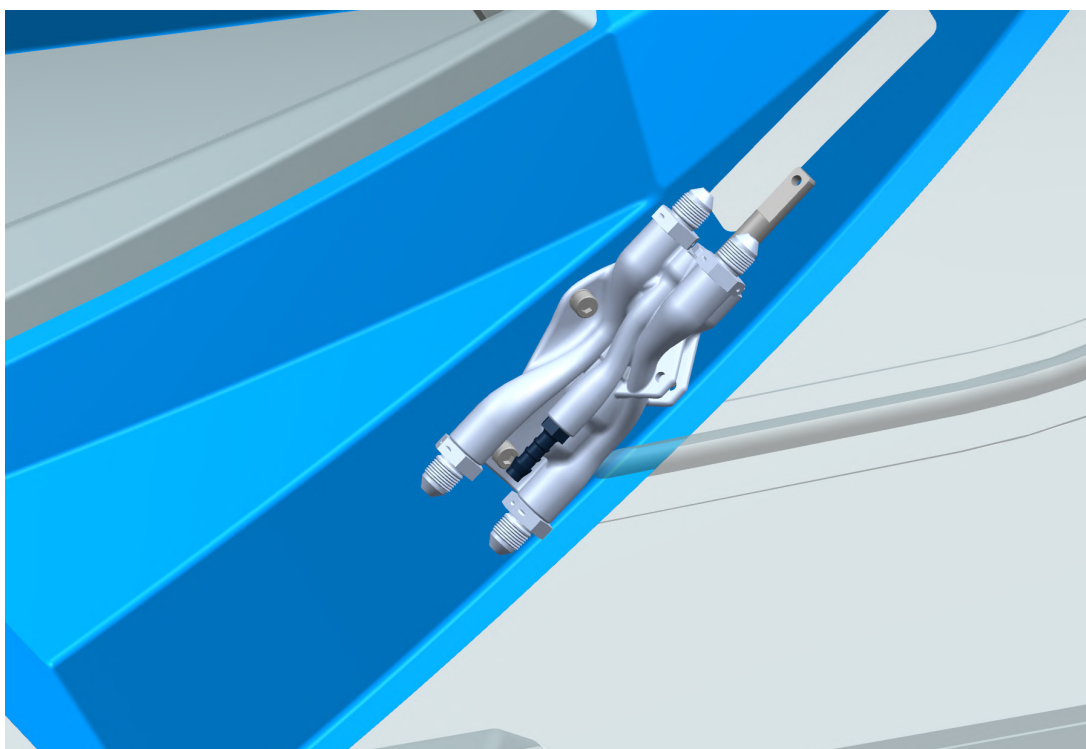


Obr. 4.60: Zalaminovaný překližkový insert a otvor pro chod páky

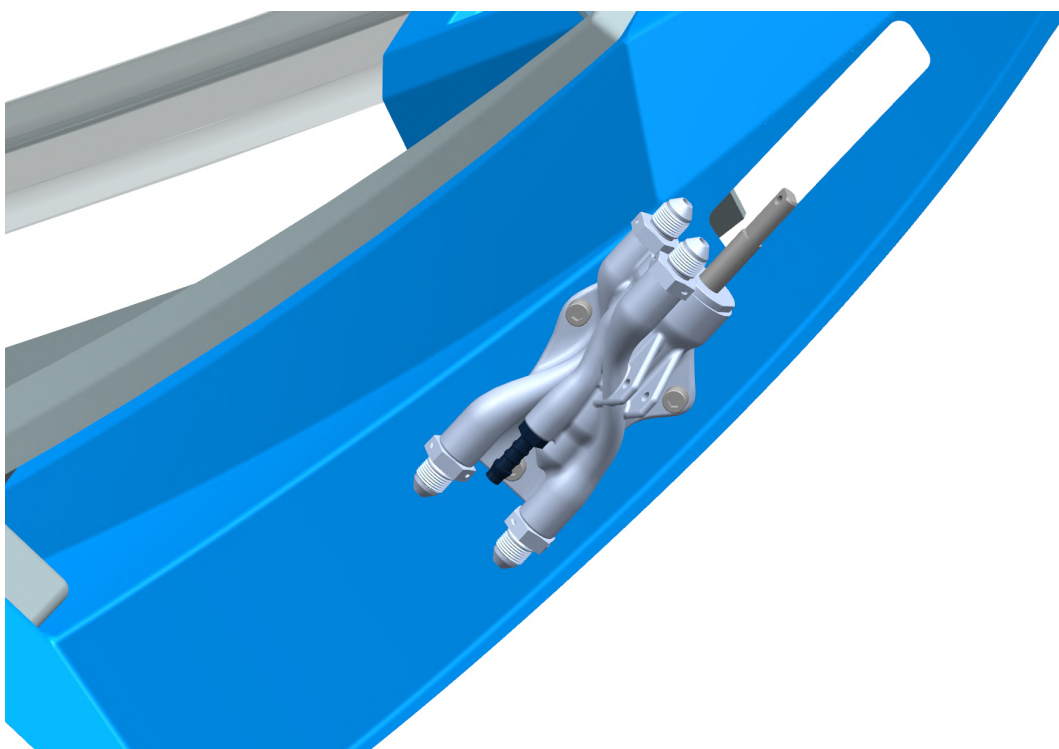


Obr. 4.61: Díry v překližkovém insertu a otvor pro chod páky

Tělo pumpy je k zalaminovanému insertu přišroubováno třemi šrouby M5 s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem ISO 4762 [5] s pojištěním proti vyšroubování v podobě pružných podložek ČSN 02 1740 [5].



Obr. 4.62: Připevněná pumpa bez ovládacího mechanismu - pohled z boku

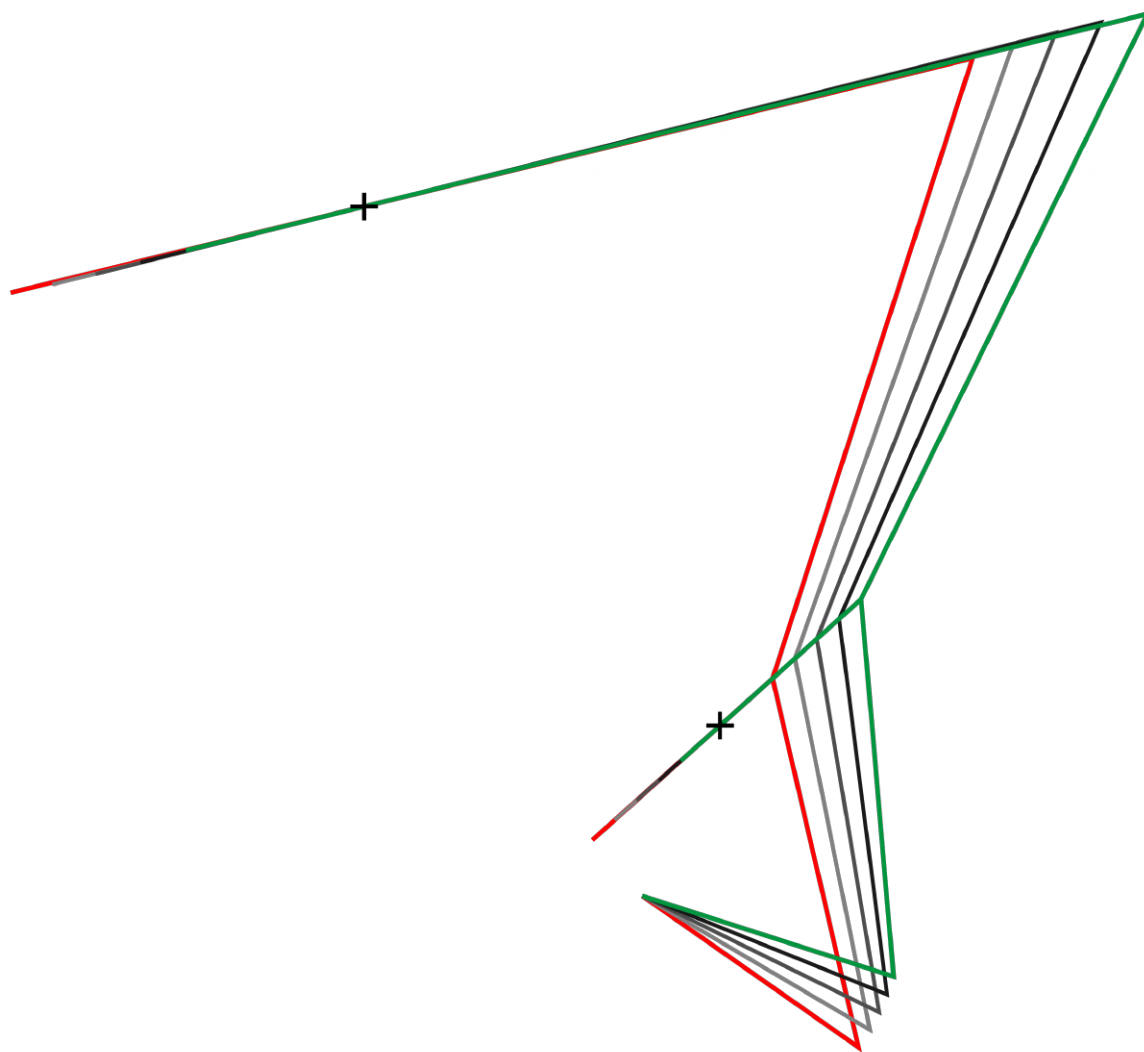


Obr. 4.63: Připevněná pumpa bez ovládacího mechanismu - pohled od podlahy

## 4.6 Návrh mechanismu

Návrh mechanismu byl proveden v modulu Motion Simulation CAD/CAM softwaru Siemens NX. Táhlo, píst, páka a binární člen byly nahrazeny čarami, kloubové ložisko a válec pístu byly nahrazeny body svazbenými s příslušnými čarami posuvnými vazbami. Bodu představujícímu kloubové ložisko byla umožněna rotace v rovině. Hlavním cílem bylo zajistit plynulý, ideálně rovnoměrný, chod pístu a zároveň minimální změnu úhlu táhla v kloubovém ložisku.

Po dosažení požadované geometrie byl ještě mechanismus mírně upraven tak, aby délkové rozměry jednotlivých členů nabývaly celočíselných hodnot, a bylo tak možné je vyrobit. Z takto navrženého mechanismu byly následně odměřeny závislé úhly a vzdálenosti v pěti postupných polohách potřebné pro následnou statickou analýzu.



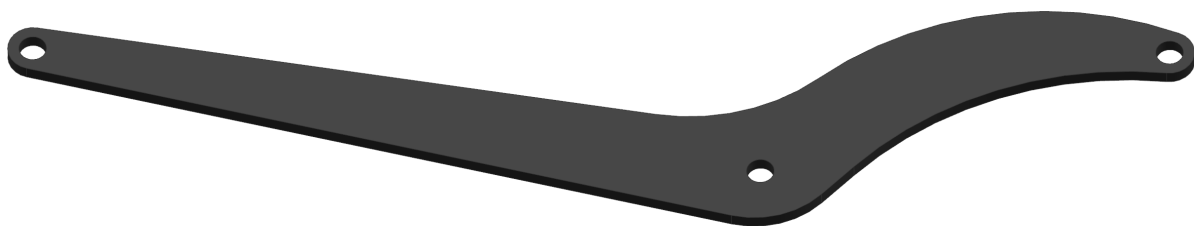
Obr. 4.64: Schéma chodu mechanismu

### 4.6.1 Konstrukce páky

Páka mechanismu byla navržena jako sestava čtyř dílů vyřezaných z desky uhlíkového kompozitu. Jedná se o dvě bočnice a dvě vložky, které po slepení tvoří tuhý komponent odolávající ohybovému namáhání. Prohnutí dolního ramene páky bylo navrženo, aby páka během zasouvání pístu nekolidovala s víkem válce a zároveň při plném zasunutí pístu čelní plocha páky sloužila jako doraz.

V místech uložení čepů je páka opatřena kluznými pouzdry iglide®[11] od firmy igus®. Pro spojení s táhlem, pístem a binárním členem byl zvolen jako spojovací materiál čep s hlavou ISO 2341 [5]. Axiální pojištění čepů zajišťují závlačky ISO 1234 [5].

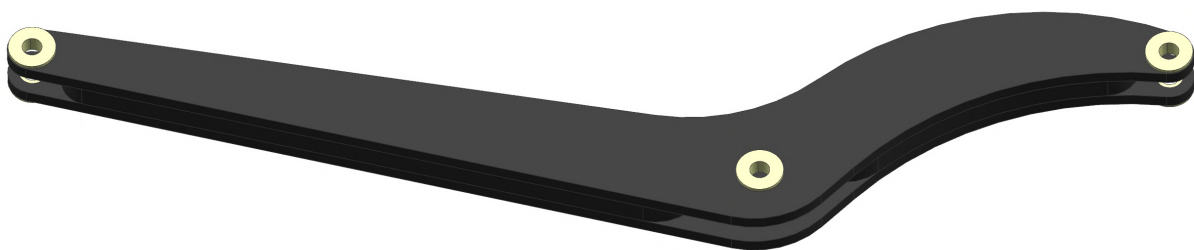
Materiálové charakteristiky uhlíkové tkaniny jsou uvedeny v tabulce 4.1 [22].



Obr. 4.65: Boční deska páky



Obr. 4.66: Vložky páky



Obr. 4.67: Sestava páky

Mez pevnosti tkaniny $R_m[N/mm^2]$	520
Koeficient bezpečnosti $k[1]$	1.875

Tab. 4.1: Materiálové vlastnosti použité uhlíkové tkaniny [22]

## 4.6.2 Konstrukce binárního členu

Binární člen je zamýšlen jako výřez z desky uhlíkového kompozitu. Uložení čepů je opatřeno kluznými pouzdry iglide®[11] od firmy igus®. V místě spoje s tělem pumpy je spojení vyřešeno pomocí čepu s hlavou ISO 2341 [5] se závlačkou ISO 1234 [5] jako axiálním pojištěním. Pro výrobu byl použit stejný uhlíkový kompozit jako v případě páky. Mechanické vlastnosti použité uhlíkové tkaniny jsou uvedeny v tabulce 4.1 [22].



Obr. 4.68: Binární člen

## 4.6.3 Konstrukce pístu

Návrh pístu a válce je totožný s původní koncepcí ruční pumpy použité na letovém prototypu letadla UL-39 Albi dle podkapitoly 3.2.3. Změny v geometrii proběhly pouze v délce pístní tyče a rozměrech jejího průřezu. Vzhledem k umístění těla pumpy vůči táhlu mechanismu je píst namáhán nejen na tah/tlak, ale i na ohyb. Vzhledem k ohybovému namáhání je píst navržen jako obrobek z oceli ČSN 15 130.1 [22]. Víko pístu i válec jsou uvažovány jako obrobky z duralu EN AW-2024 T3 [22]. Mechanické vlastnosti zvolené oceli a duralu jsou v tabulkách 4.2 a 4.3.

Mez kluzu $R_{p0,2min}[N/mm^2]$	436
Mez pevnosti $R_m[N/mm^2]$	669
Modul pružnosti E $[N/mm^2]$	$2,1 \cdot 10^{-5}$

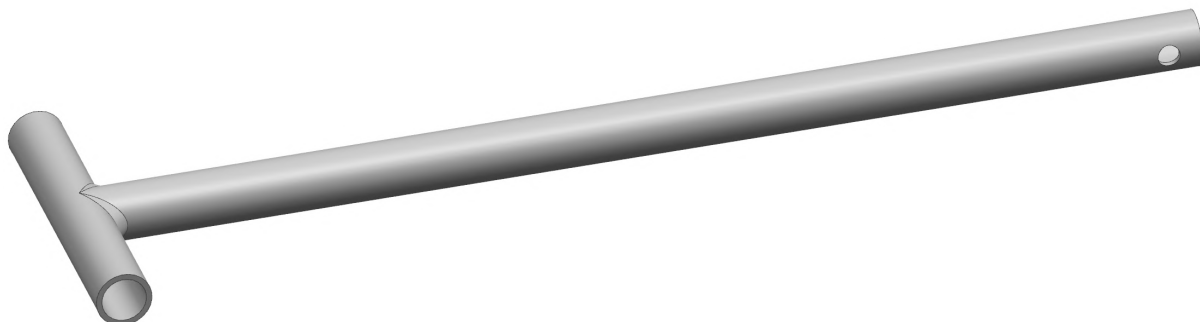
Tab. 4.2: Mechanické vlastnosti oceli ČSN 15 130.1 po normalizačním žíhání [22]

Mez kluzu $R_{p0,2min}[N/mm^2]$	269-330
Mez pevnosti $R_m[N/mm^2]$	434-455
Modul pružnosti E $[N/mm^2]$	$0,742 \cdot 10^{-5}$
Poissonovo číslo $\mu$ [1]	0,33

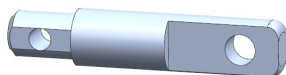
Tab. 4.3: Materiálové vlastnosti duralu EN AW-2024 T3 [22]

#### 4.6.4 Konstrukce táhla

Táhlo bylo navrženo jako sestava svařence dvou ocelových trubek o rozměru průřezu  $\varnothing D = 10$ ,  $\varnothing d = 9$  a duralového obrobku spojky táhla a páky. Mechanické vlastnosti zvolené oceli ČSN 15 130.1 [22] a duralu EN AW-2024 T3 [22] jsou uvedeny v tabulkách 4.2 [22] a 4.3 [22]. Do palubní desky bylo táhlo uloženo pomocí kloubového ložiska igubal® [10] od firmy igus®.

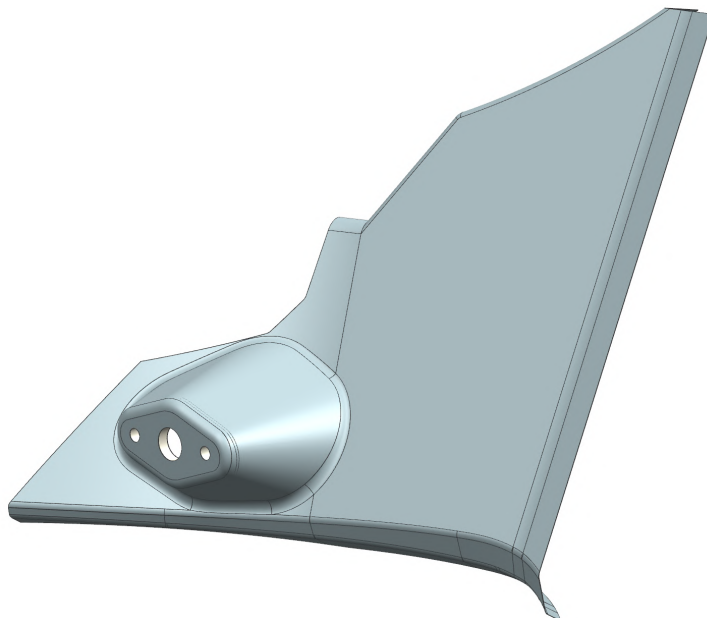


Obr. 4.69: Svařenec táhla

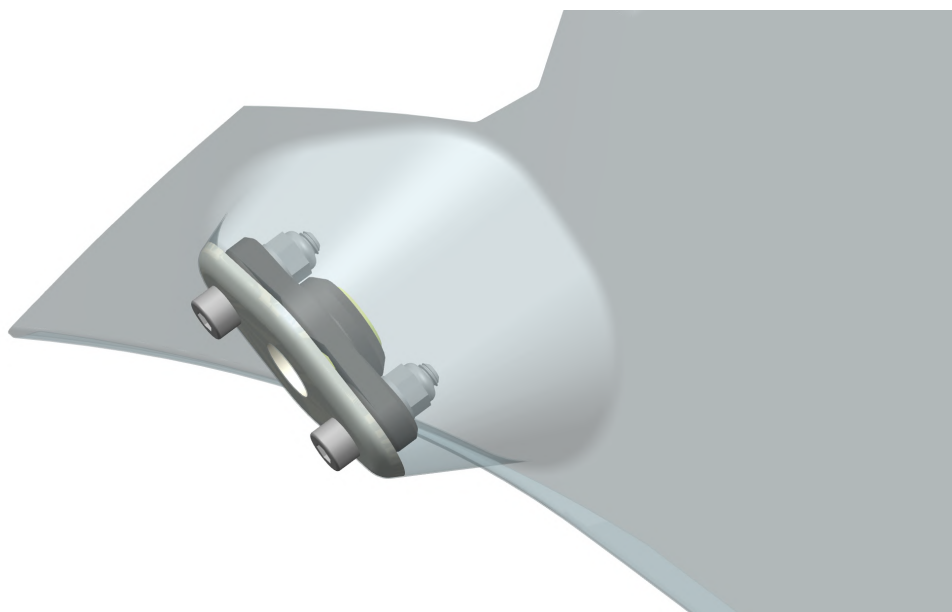


Obr. 4.70: Spojka táhla a páky

Vzhledem k tomu, že kloubové ložisko<sup>®</sup> [10] má omezenou úhlovou výchylku, bylo třeba upravit palubní desku. Byl vytvořen výstupek s čelní rovinou kolmou k rovině mechanismu. Ložisko je přes přírubu upevněno k palubní desce pomocí dvou šroubů s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M4 ISO 4762 [5], podložek ISO 7090 [5] a samojistných šestihranných matic ISO 7040 [5] přes zalaminovaný překližkový insert.

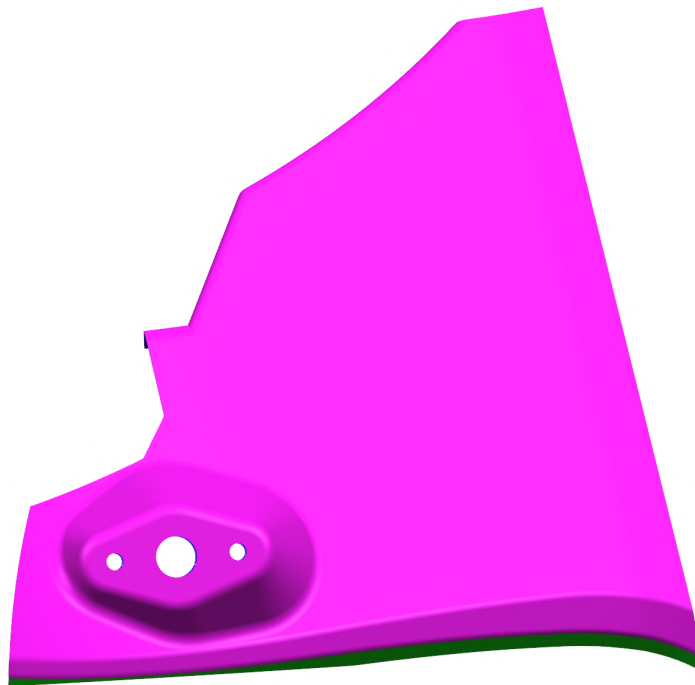


Obr. 4.71: Výstupek pro montáž kloubového ložiska

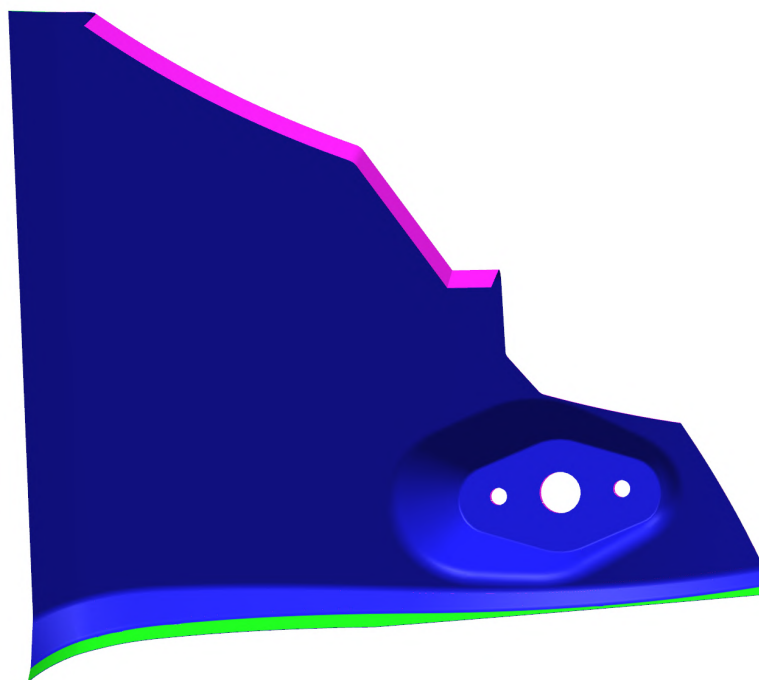


Obr. 4.72: Namontované kloubové ložisko

Pomocí analýzy úhlových odchylek bylo ověřeno, že je upravený díl palubní desky zaformovatelný. Fialovou a modrou barvou jsou vyznačeny odchylky větší než  $0,01^\circ$  na jednu stranu od vektoru normálového k dělicí rovině. Zelenou jsou vyznačeny plochy rovnoběžné s tímto vektorem. Vzhledem k tomu, že rozhraní fialové a modré barvy jde po hraně okraje dílu, je díl palubní desky s výstupkem zaformovatelný.



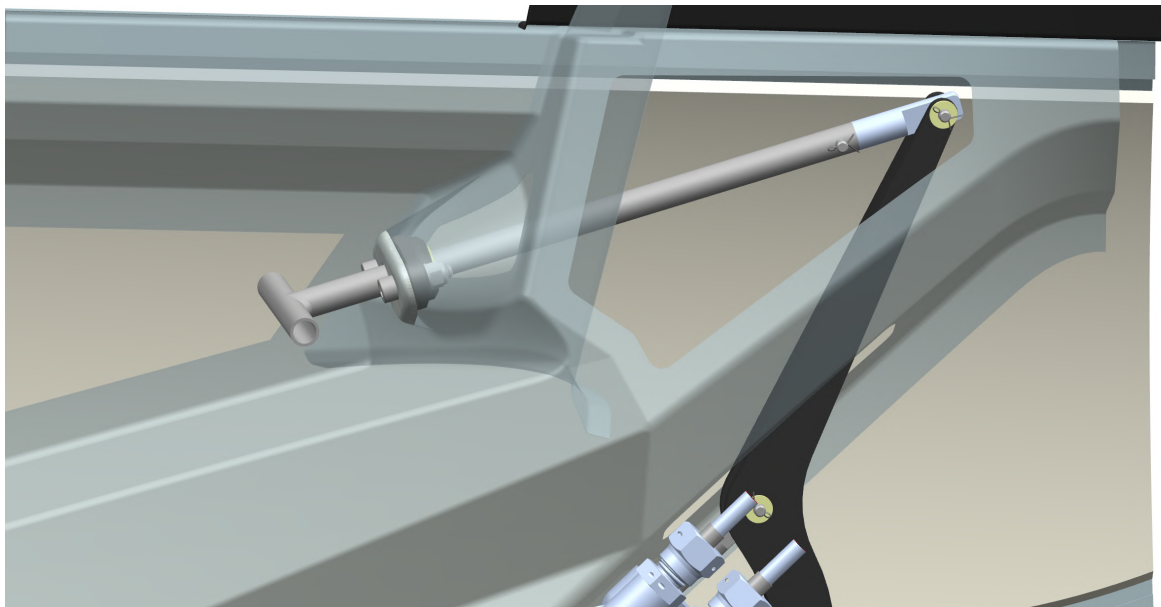
Obr. 4.73: Analýza zaformovatelnosti palubní desky - pohled zepředu



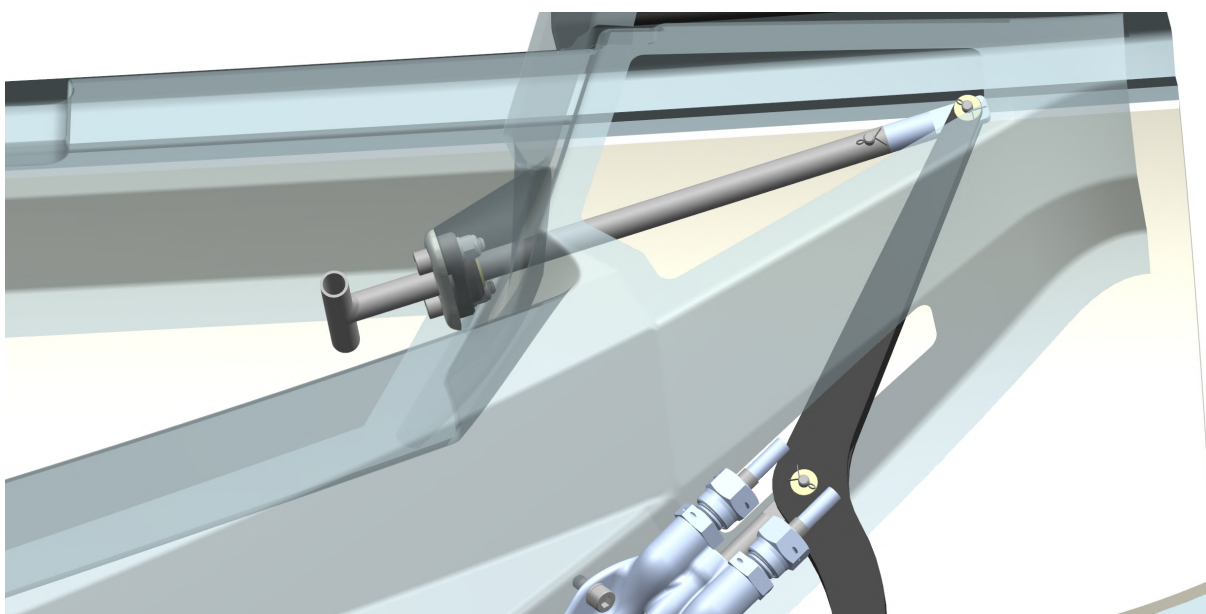
Obr. 4.74: Analýza zaformovatelnosti palubní desky - pohled zezadu



Před montáží je páka s binárním členem a pístem upevněna k tělu pumpy, přišroubovanému k bočnici interiéru. K zapozicované páce je montážním otvorem za palubní deskou připevněn díl spojky pomocí čepu s hlavou ISO 2341 [5] a závlačkou ISO 1234 [5]. Poté je trubka táhla vedením ložiska zasunuta do palubní desky a přes stejný montážní otvor je táhlo se spojkou spojeno pomocí čepu s hlavou ISO 2341 [5] a závlačkou ISO 1234 [5].

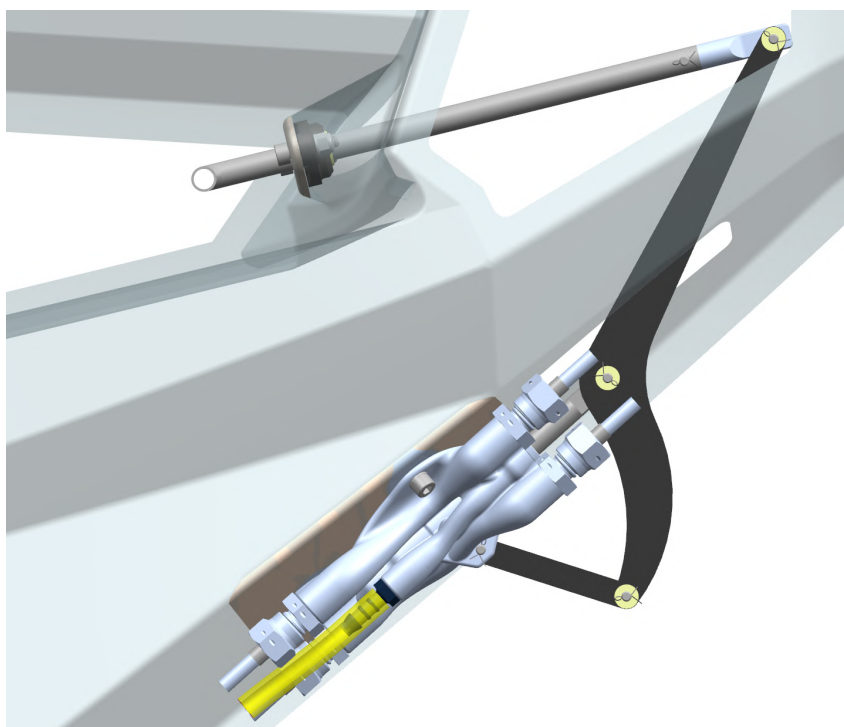


Obr. 4.75: Instalované táhlo - pohled shora

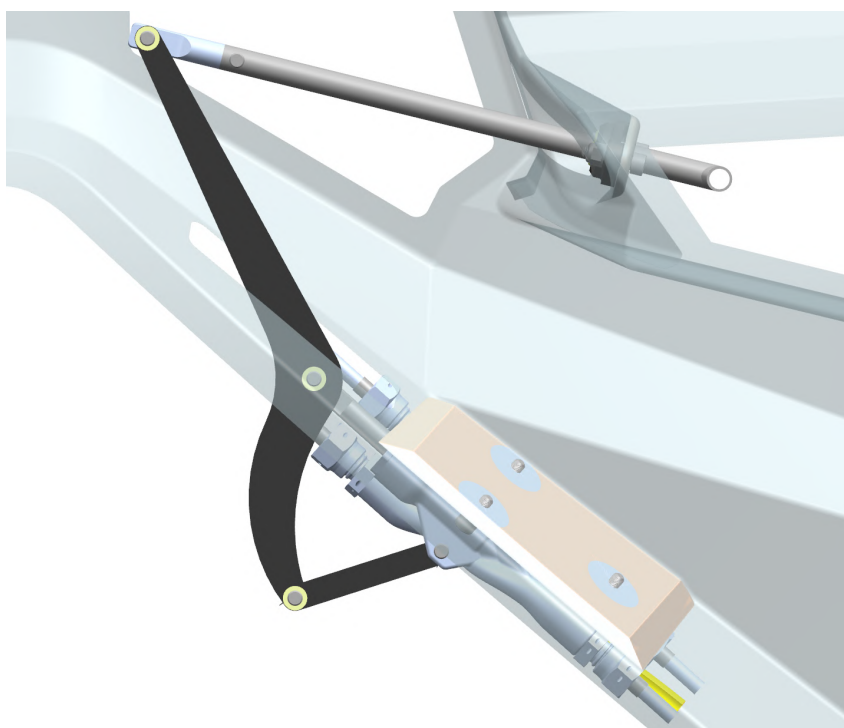


Obr. 4.76: Instalované táhlo - pohled zdola

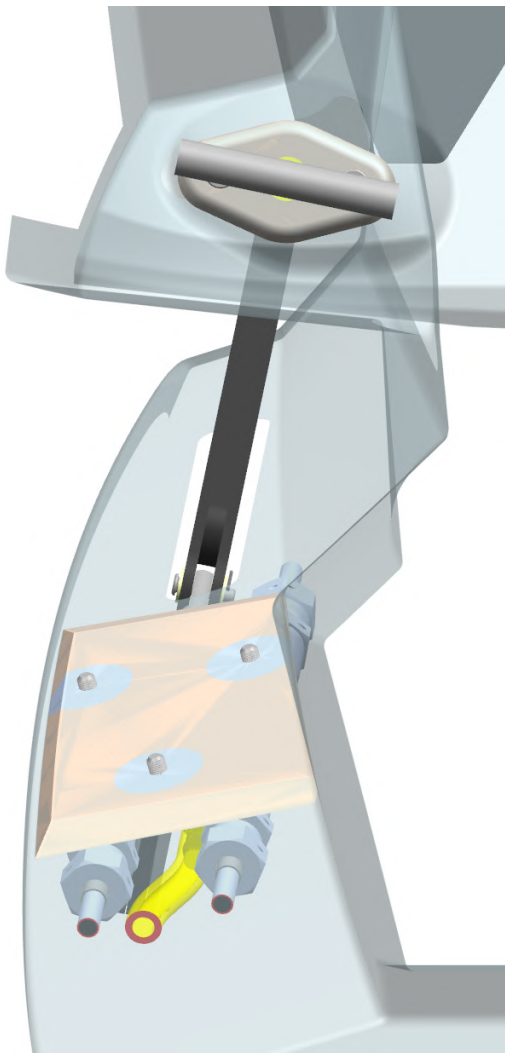
## 4.7 Celková sestava pumpy



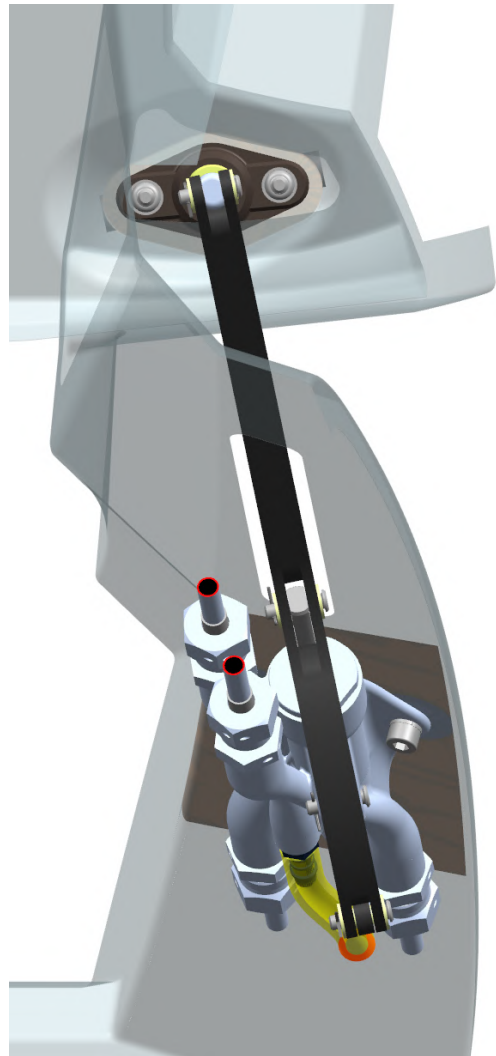
Obr. 4.77: Sestava pumpy - pohled z kabiny



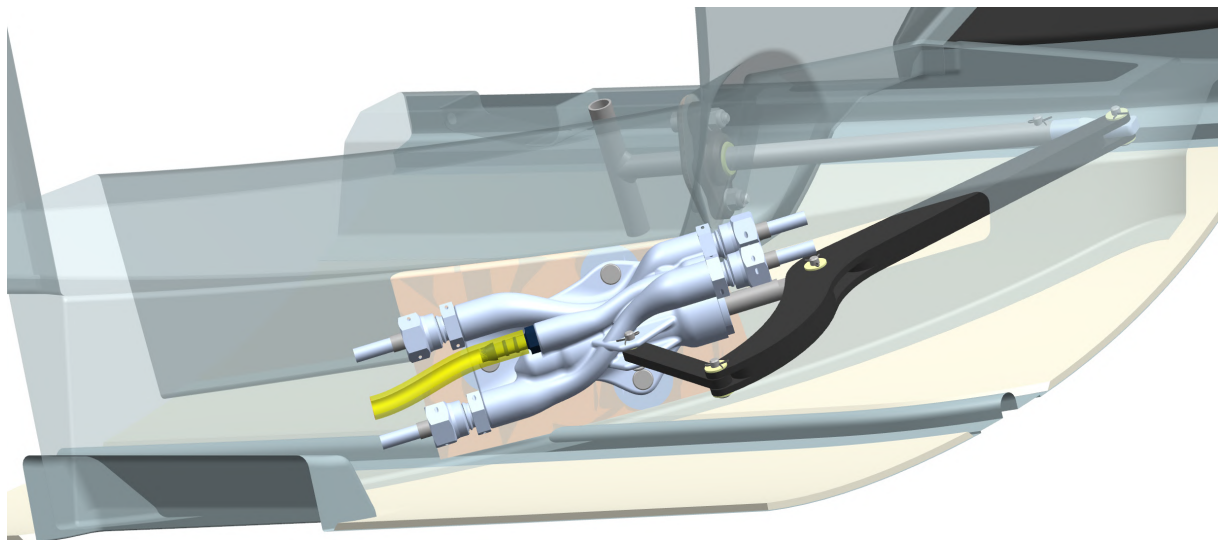
Obr. 4.78: Sestava pumpy - pohled z vnějšku



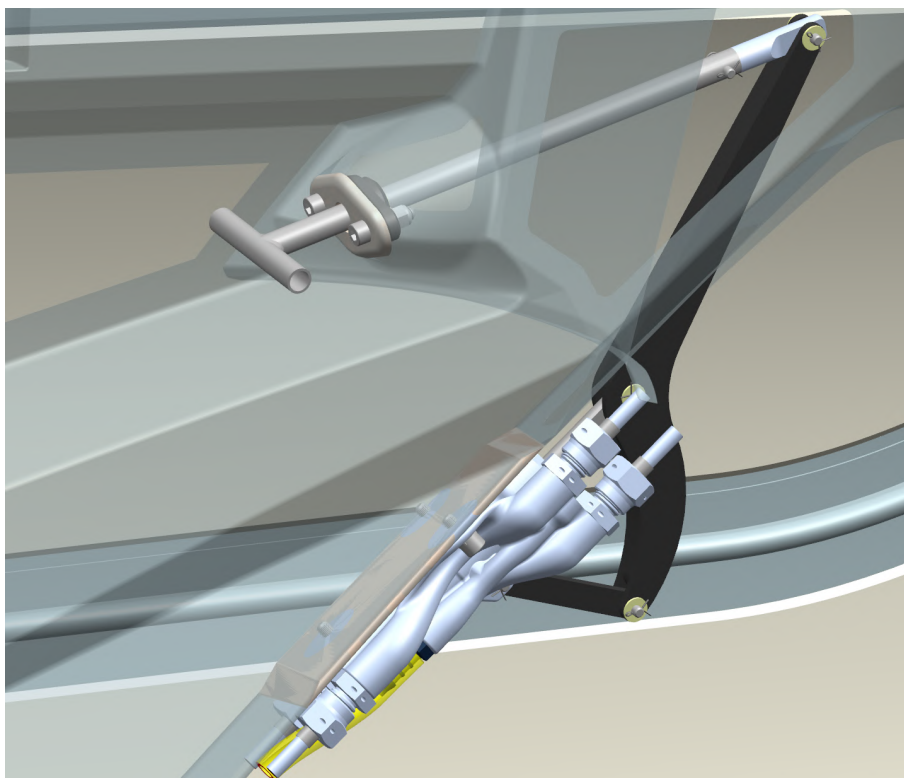
Obr. 4.79: Sestava pumpy - pohled ve směru letu



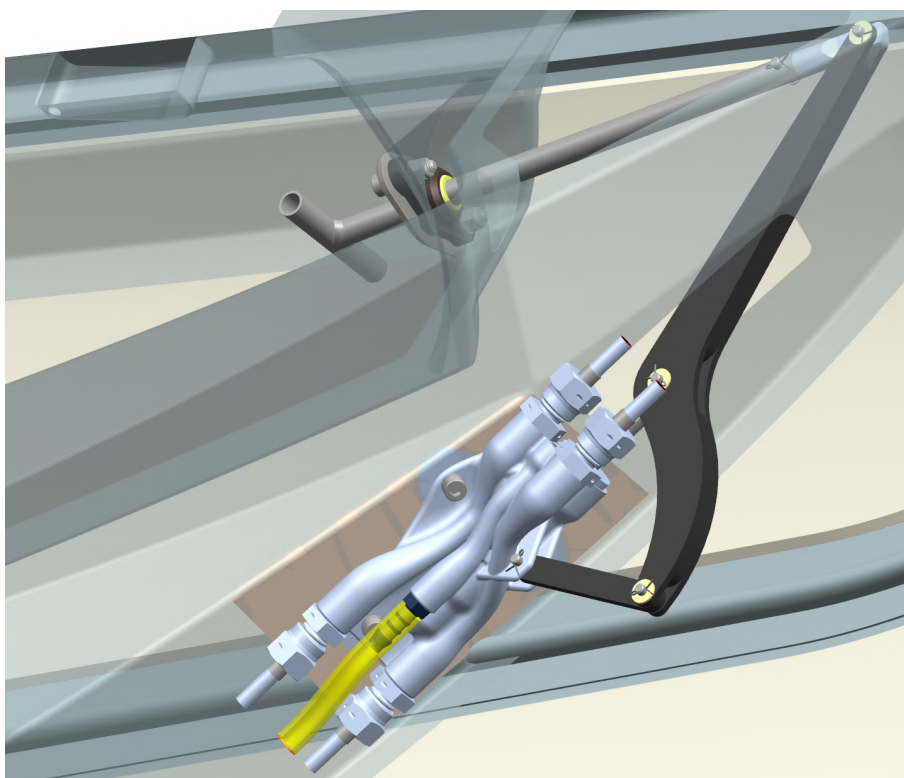
Obr. 4.80: Sestava pumpy - pohled proti směru letu



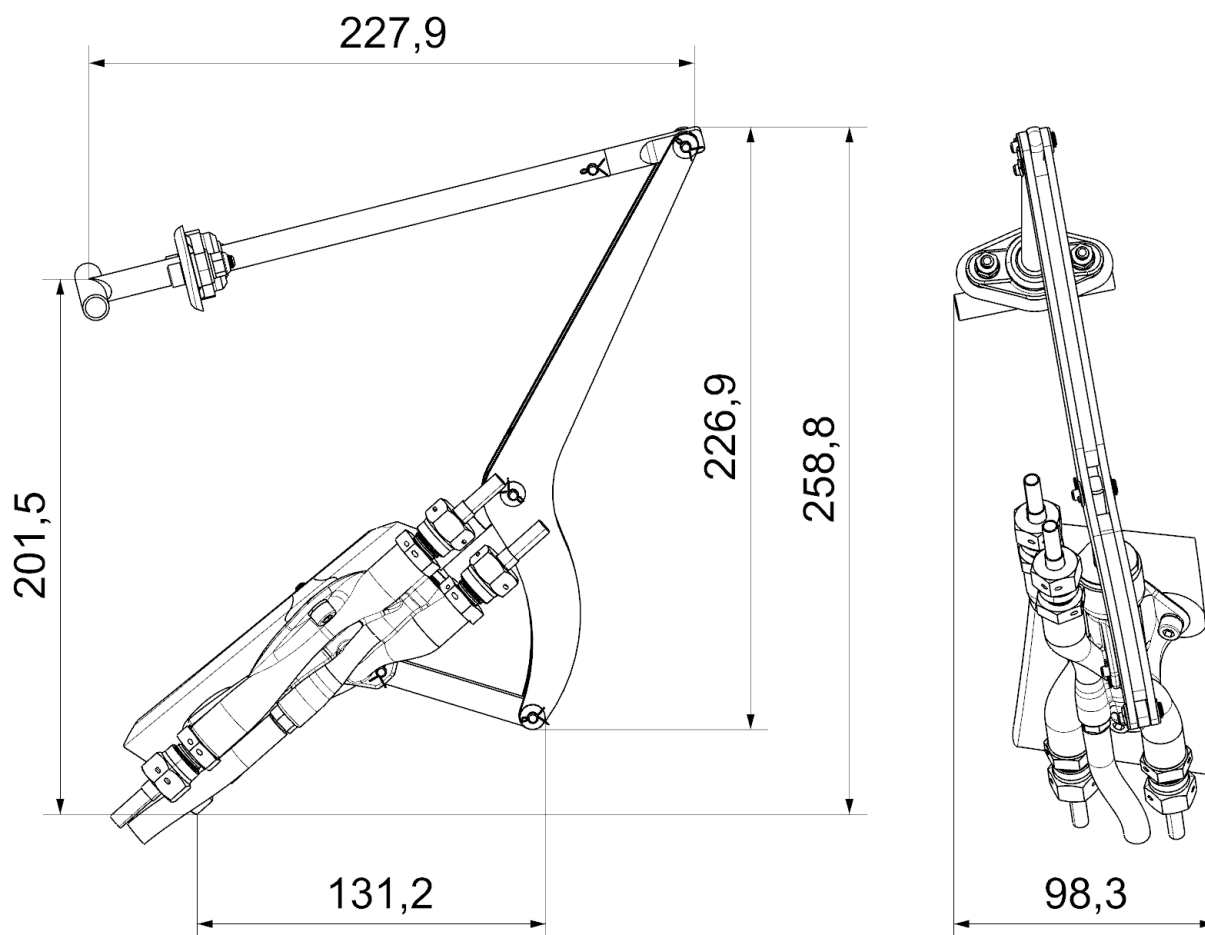
Obr. 4.81: Sestava pumpy - pohled normálový k rovině upevnění



Obr. 4.82: Sestava pumpy - pohled od pilota



Obr. 4.83: Sestava pumpy - pohled od pedálu



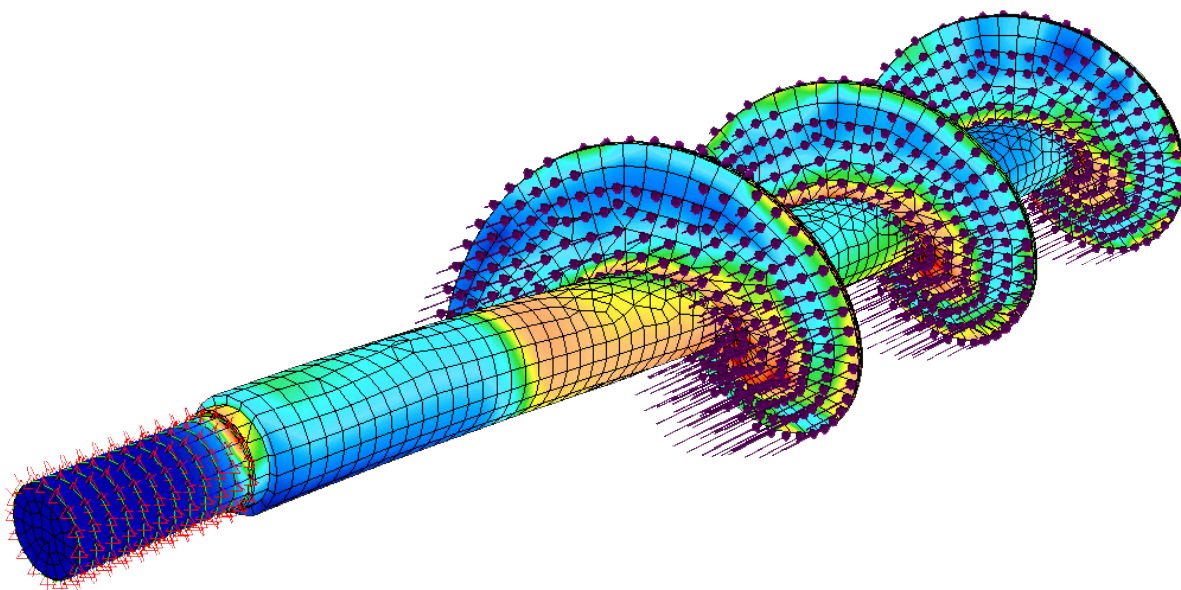
Obr. 4.84: Rozměrová obálka návrhu sestavy nové pumpy

## 5 Zatížení a pevnostní kontrola pumpy

Táhlo a pístní tyč byly uvažovány jako konvenčně vyrobené komponenty a jejich rozměry byly kontrolovány ručním výpočtem.

To samé platí o kontrole rozměrů spojovacího materiálu. Čepy mechanismu byly zkontrolovány pro kombinaci ohybu a smyku. Kontrola šroubů proběhla zjednodušeně pouze pro napětí v tahu/tlaku od zatěžujících sil, přepočítaných do rovnoběžného směru s osami šroubů. Páka a binární člen mechanismu, zamýšlené jako díly z uhlíkového kompozitu, byly stejně jako tělo pumpy podrobené FEM analýze.

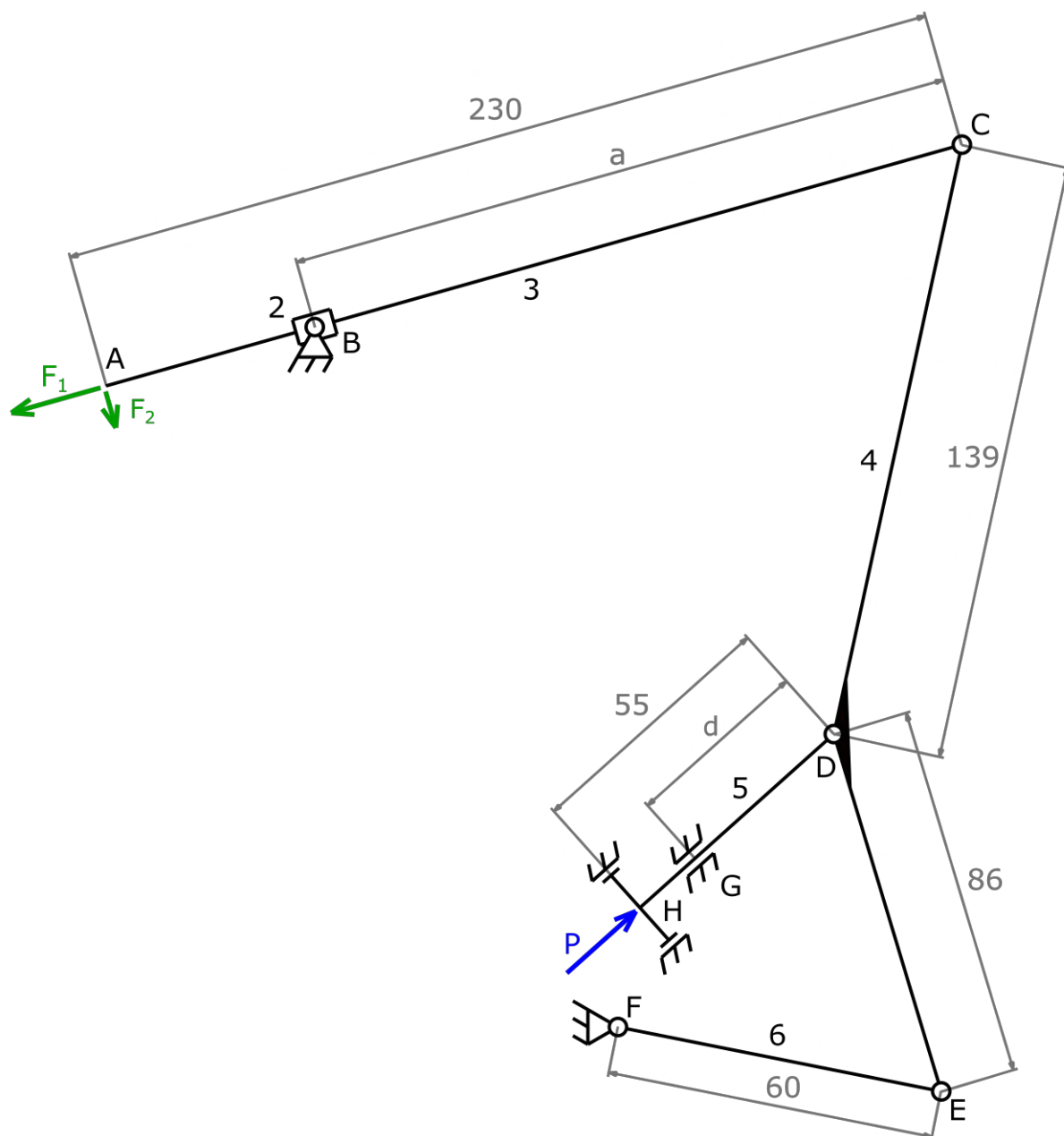
Finite Element Method, zkráceně FEM, česky metoda konečných prvků, je metoda umožňující velice přesnou analýzu komplexně zatížených komponentů i celých sestav. Princip spočívá v rozdělení součásti na velké množství velice malých, geometricky jednoduchých, prvků. Taktο vzniklá síť objektů je poté upevněna v prostoru příslušným počtem tzv. okrajových podmínek. Okrajové podmínky snižují v daných místech, okrajích, počet stupňů volnosti znemožněním příslušných kombinací posuvů a rotací. Následně je na takto ošetřenou součást aplikováno zatížení. Během procesu výpočtu je zatížení rozpočítáno mezi jednotlivými prvky. Výstupem je distribuce napětí, reakčních sil nebo deformace. FEM analýza je aplikovatelná i na chování kapalin či termodynamických procesů.



Obr. 5.1: Příklad aplikace FEM analýzy, sítě, okrajových podmínek a zatížení [21]

## 5.1 Statická analýza sestavy pumpy

Dle vzorce 5.1 uvedeného ve skriptech Mechanika A[6, str. 58, vzorec (4.2)] se jedná o mechanismus s 1 stupněm volnosti. Táhlo bylo zatíženo osovou silou  $F_1$  a pro rozšířenou kontrolu pevnosti i příčnou silou  $F_2$ . Síla  $F_2$  byla pro účel návrhu zvolena jako 30% hodnoty síly  $F_1$ . Jako účinek uvádějící soustavu do rovnováhy byla zavedena síla  $P$  působící v ose pístu. Statická analýza byla provedena v pěti postupných polohách mechanismu, vždy po 25% chodu pístu, zobrazených na obrázku 4.64.

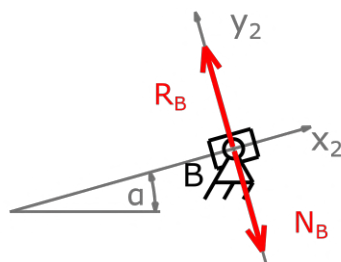


Obr. 5.2: Schéma ruční pumpy

$$\begin{aligned}
 n &= 3 \cdot (u - 1) - 3 \cdot vp - 2 \cdot (r + p + v) - 1 \cdot o \\
 &= 3 \cdot (6 - 1) - 3 \cdot 0 - 2 \cdot (5 + 2 + 0) - 1 \cdot 0 = 1
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

### 5.1.1 Uvolnění kloubového ložiska

Globální souřadnicový systém byl převeden na lokální systém táhla pootočením o úhel  $\alpha$ . Kloubové ložisko s válcovým vedením zjevně přeneše pouze sílu normálovou k ose vedení.

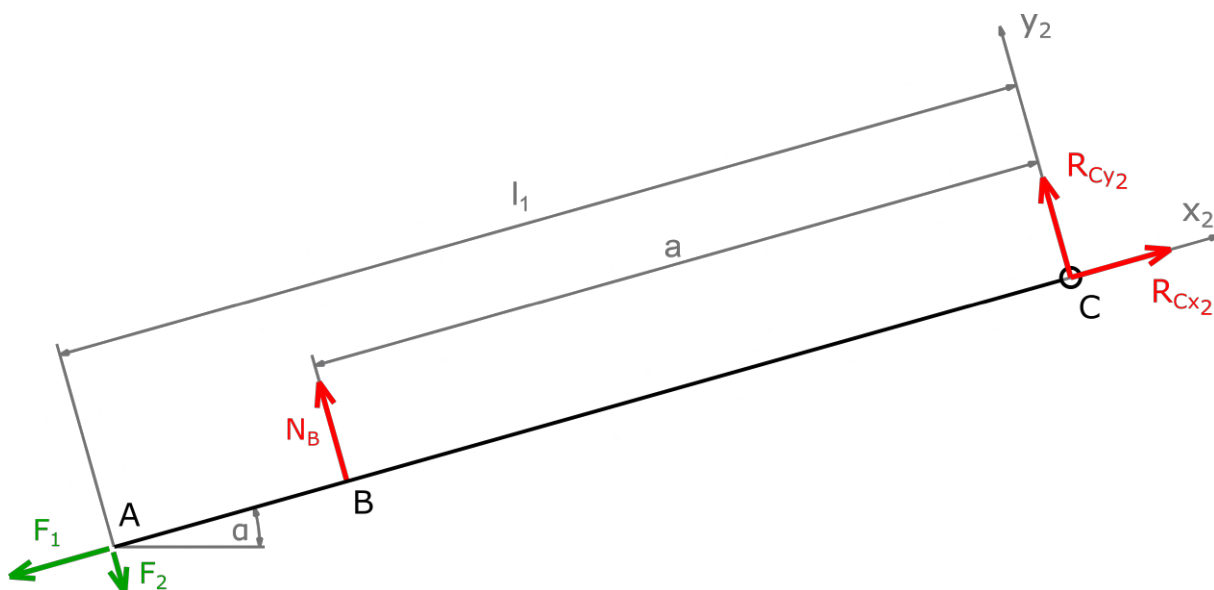


Obr. 5.3: Uvolnění kloubového ložiska

$$\sum F_{y2} : N_B - R_B = 0 \quad (5.2)$$

### 5.1.2 Uvolnění táhla

Dle předpisu UL 2 nesmí být návrhová síla pilota zatěžující páky a kruhové ovládače sekundárního řízení neopřenu paží bez využití tělesné hmotnosti pro návrh nižší než 350N [2, UL 2 § 405 Sekundární soustavy řízení]. Zde byly vyšetřovány hodnoty reakčních sil  $N_B$  v kloubovém ložisku normálové k ose táhla,  $R_{Cx2}$  a  $R_{Cy2}$  v čepu .



Obr. 5.4: Uvolnění táhla

$$\sum F_{x2} : -F_1 + R_{Cx2} = 0 \quad (5.3)$$

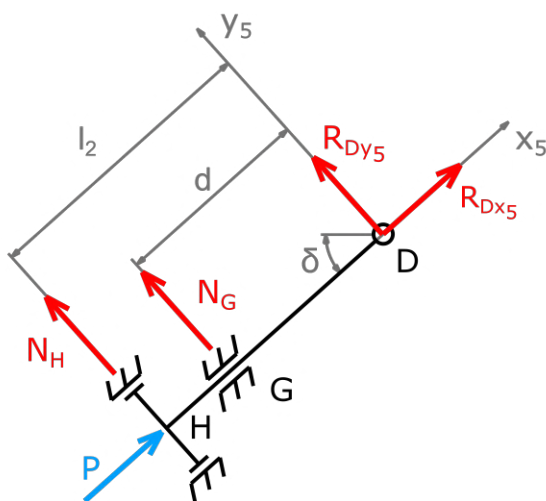
$$\sum F_{y2} : -F_2 + R_B + R_{Cy2} = 0 \quad (5.4)$$

$$\sum M_C : F_2 \cdot l_1 - N_B \cdot a = 0 \quad (5.5)$$



### 5.1.3 Uvolnění pístu

Souřadnicový systém byl pro tuto část úlohy otočen o úhel  $\delta$ . Pístní tyč i píst byly uloženy posuvnou vazbou ve válci, zašroubovaném do těla pumpy, odtud tedy reakční síly  $N_G$  a  $N_H$  normálové k ose pístní tyče. Síla  $P$  v ose pístu uvedla celou soustavu do rovnováhy.



Obr. 5.5: Uvolnění pístu

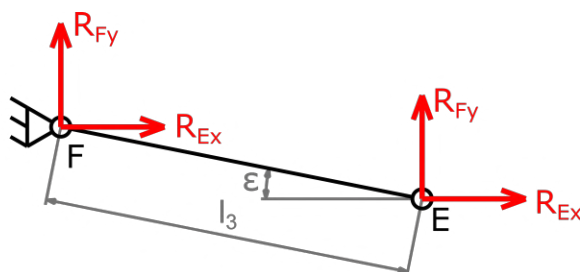
$$\sum F_{x5} : P + R_{Dx} = 0 \quad (5.6)$$

$$\sum F_{y5} : R_{Dy} + N_G + N_H = 0 \quad (5.7)$$

$$\sum M_D : -N_G \cdot d - N_H \cdot l_2 = 0 \quad (5.8)$$

### 5.1.4 Uvolnění binárního členu

Binární člen byl uvolněn v globálním souřadnicovém systému. Je známo, že binární člen přeneše pouze tahovou nebo tlakovou sílu. Vektory výsledných reakčních sil  $R_E$  a  $R_F$  v čepích tedy leží pod známým úhlem a jsou vůči sobě opačně orientované. Z rovnice momentové rovnováhy lze odvodit rovnici závislosti mezi složkami  $x$  a  $y$  reakční síly  $R_E$ .

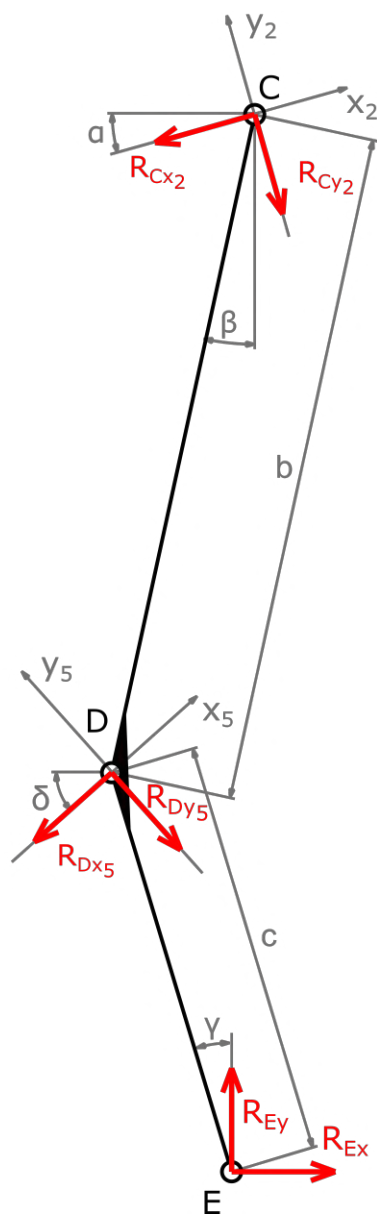


Obr. 5.6: Uvolnění binárního členu

$$R_{Ey} = -R_{Ex} \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon) \quad (5.9)$$

### 5.1.5 Uvolnění páky

Reakční síly  $R_{Cx2}$  a  $R_{Cy2}$  od táhla a  $R_{Dx5}$  a  $R_{Dy5}$  od pístní tyče byly transformovány z lokálních souřadnicových systémů jednotlivých členů do globálního souřadnicového systému.



Obr. 5.7: Uvolnění páky před transformací složek reakčních sil do globálního souřadnicového systému

$$\sum F_x : R_{Cy2} \cdot \sin(\alpha) - R_{Cx2} \cdot \cos(\alpha) + R_{Dx5} \cdot \cos(\delta) + R_{Dy5} \cdot \sin(\delta) + R_{Ex} = 0 \quad (5.10)$$

$$\sum F_y : -R_{Cx2} \cdot \sin(\alpha) - R_{Cy2} \cdot \cos(\alpha) + R_{Dx5} \cdot \sin(\delta) - R_{Dy5} \cdot \sin(\delta) + R_{Ey} = 0 \quad (5.11)$$

$$\sum M_D : R_{Cx2} \cdot b \cdot \cos(\alpha + \beta) - R_{Cy2} \cdot b \cdot \sin(\alpha + \beta) + R_{Ey} \cdot c \cdot \sin(\gamma) + R_{Ex} \cdot c \cdot \cos(\gamma) = 0 \quad (5.12)$$

## 5.1.6 Výsledky statické analýzy

Výpočet byl proveden pomocí softwaru MATLAB. Rovnice rovnováhy byly převedeny na vhodný počet rovnic závislostí a soustav nezávislých rovnic pro maticový výpočet neznámých. Výsledky je možno odečíst z tabulek 5.2 a 5.3.

%	$a[mm]$	$d[mm]$	$\alpha[^\circ]$	$\beta[^\circ]$	$\gamma[^\circ]$	$\varepsilon[^\circ]$
0	183,2606	43	13,8115	25,4895	5,5105	17,7728
25	172,5241	36,25	14,0295	23,1185	7,8815	21,9610
50	162,0457	29,5	14,1015	20,9431	10,0569	26,1732
75	151,9135	22,75	14,0002	18,9862	12,0138	30,481
100	142,2705	16	17,2943	17,2943	13,7057	34,9808

Tab. 5.1: Hodnoty závislých rozměrů odměřené z CAD modelu, obrázek 5.2

%	$N_B = (-R_B)$	$R_{Cx2} = (-F_1)$	$R_{Cy2}$	$R_{Dx} = (-P)$	$R_{Dy}$	$N_G$	$N_H$	$R_{Ex} = (-R_{Fx})$	$R_{Ey} = (-R_{Fy})$
0	132	350	(-27)	(-589)	688	(-3154)	2465	(-552)	178
25	140	350	(-35)	(-586)	789	(-2315)	1526	(-615)	248
50	149	350	(-44)	(-581)	924	(-1993)	1069	(-699)	344
75	159	350	(-54)	(-572)	1116	(-1902)	787	(-818)	481
100	170	350	(-65)	(-558)	1418	(-1999)	582	(-1006)	704

Tab. 5.2: Hodnoty složek reakčních sil [N] zaokrouhlené na celá čísla

%	$R_C$	$R_D$	$R_E = (-R_F)$
0	351	906	580
25	352	983	663
50	353	1091	779
75	354	1254	949
100	356	1524	1228

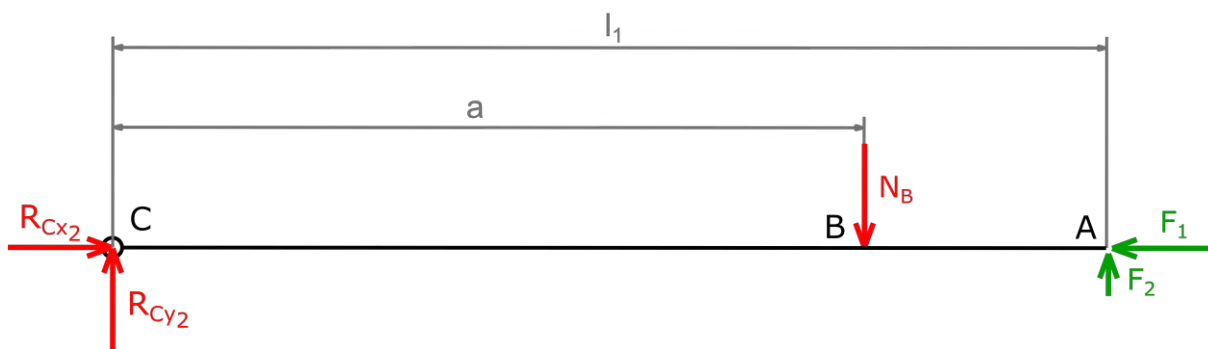
Tab. 5.3: Hodnoty výsledných reakčních sil [N] v čepích zaokrouhlené na celá čísla

## 5.2 Pevnostní kontrola členů mechanismu

Rozměry jednotlivých součástí byly navrženy s ohledem na proporce a dostupné rozměry pro montáž. Také se v některých ohledech vycházelo z momentálního řešení, např. průměry čepů kloubů nebo tvar a většina rozměrů válce pístu zůstaly stejné. Kontrolované členy mechanismu byly ocelová trubka táhla, páka mechanismu a binární člen z uhlíkového kompozitu, vyvrtaná duralová pístní tyč, čepy v kloubech a šrouby pro uchycení těla pumpy k překližkovému insertu zalaminovaném v bočnici interiéru. Únosnost kloubového ložiska [10] a kluzných pouzder čepů mechanismu [11] jsou deklarovány výrobcem. Výrobce určuje i spojovací materiál.

### 5.2.1 Kontrola pevnosti táhla

Namáhání táhla mechanismu se na první pohled jeví jako stabilitní problém, jelikož se jedná o relativně štíhlou trubku zjevně namáhanou osovou silou. Uvažované zatížení má však charakter obecné rovinné síly. Tuto sílu je možné rozložit na osovou a příčnou složku, čímž se dle skript Pružnost a pevnost II [8, str. 245] úloha mění na kombinované namáhání ohybu a tahu/tlaku. Kromě ohybového momentu od příčné síly  $F_2$  se zde tedy projeví také přídavný ohybový moment způsobený osovou silou  $F_1$  působící na vzdálenosti maximálního průhybu táhla.



Obr. 5.8: Schéma namáhání táhla kombinací tahu/tlaku s ohybem

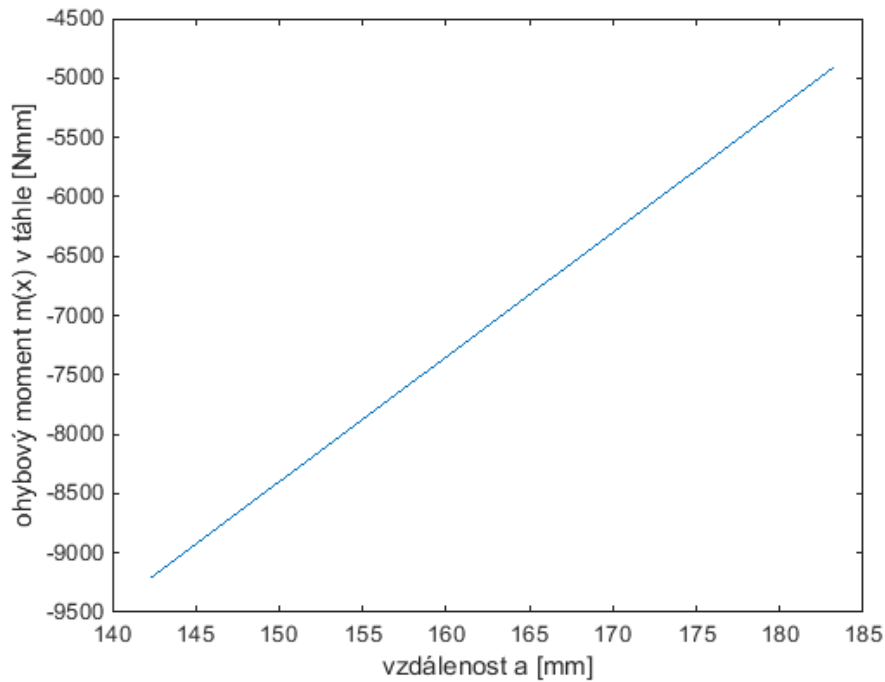
Dle skript Pružnost a pevnost II [8, str. 244, vzorec (12.2)] platí

$$M(x) = m(x) + N \cdot y(x) \quad (5.13)$$

kde  $m(x)$  je ohybový moment od příčné síly,  $N$  je osová síla a  $y(x)$  je průhyb závislý na vyšetřovaném místě. Moment  $m(x)$  byl vypočten v pěti postupných polohách pístu. Proto byla pro další výpočty  $m(x)$  nahrazena souřadnice  $x$  za  $n\%$  vysunutí pístu.

$$m(x) = m(n\%) = R_{cy2}(n\%) \cdot a(n\%) \quad (5.14)$$

Graf na obrázku 5.9 zobrazuje zjednodušený průběh ohybového momentu  $m(x)$  v táhle od příčné síly  $R_{Cy2}$  v závislosti na vysunutí, tedy v závislosti na vzdálenosti  $a$ , v pěti postupných polohách. Je vidět, že největší zatížení nastane ve chvíli působení síly pilota na úplně vysunutém táhle, tedy ve chvíli, kdy je vzdálenost  $a$  nejmenší. Z charakteru zatížení je jasné, že maximální ohybový moment vznikne v místě  $B$ . Vzhledem k tomu, že se v tomto místě nevyskytuje osamělý ohybový moment, nevznikne zde skoková změna v průběhu celkového ohybového momentu, a stačí proto vypočítat maximum ohybového momentu pouze z jedné strany.



Obr. 5.9: Průběh ohybového momentu v uložení táhla

Z tabulek 5.1 a 5.2 byly do vzorce 5.14 dosazeny hodnoty příslušné reakční síly a rozměru  $a$  a vypočten maximální ohybový moment

$$\begin{aligned}
 m_{max} &= |m(100\%)| = |R_{Cy2}(100\%) \cdot a(100\%)| = \\
 &= |(-65) \cdot 142.2705| \doteq 9212N \cdot mm
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

Pro výpočet maximálního průhybu táhla byla použita úplná diferenciální rovnice průhybové čáry. Výpočet proběhl pro polohu  $a(100)$ , tedy polohu největšího ohybového zatížení. Vypočteny byly postupně oba intervaly zleva. Pro interval  $x_I \in (0; a)$  platí

$$v^{IV}(x) = 0 \quad (5.16)$$

$$v^{III}(x) = 0 + C_1 \quad (5.17)$$

$$v^{II}(x) = 0 + C_1 \cdot x_I + C_2 \quad (5.18)$$

$$v^I(x) = 0 + C_1 \cdot \frac{x_I^2}{2} + C_2 \cdot x_I + C_3 \quad (5.19)$$

$$v(x) = 0 + C_1 \cdot \frac{x_I^3}{6} + C_2 \cdot \frac{x_I^2}{2} + C_3 \cdot x_I + C_4 \quad (5.20)$$

a analogicky pro interval  $x_{II} \in (a; l_1)$

$$v^{IV}(x) = 0 \quad (5.21)$$

$$v^{III}(x) = 0 + C_5 \quad (5.22)$$

$$v^{II}(x) = 0 + C_5 \cdot x_{II} + C_6 \quad (5.23)$$

$$v^I(x) = 0 + C_5 \cdot \frac{x_{II}^2}{2} + C_6 \cdot x_{II} + C_7 \quad (5.24)$$

$$v(x) = 0 + C_5 \cdot \frac{x_{II}^3}{6} + C_6 \cdot \frac{x_{II}^2}{2} + C_7 \cdot x_{II} + C_8 \quad (5.25)$$

Okrajové podmínky v místě 0

$$v_I(0) = 0; v_I^{II}(0) = 0; v_I^{III}(0) = \frac{R_{Cy2}}{E \cdot J_z} \quad (5.26)$$

Okrajové podmínky v místě  $a$

$$v_I(a) = v_{II}(a) = 0; v_I^I(a) = v_{II}^I(a); v_I^{II}(a) = v_{II}^{II}(a) \quad (5.27)$$

Okrajové podmínky v místě  $l_1$

$$v_{II}^{II}(l_1) = 0; v_{II}^{III}(l_1) = \frac{(-F_2)}{E \cdot J_z} \quad (5.28)$$

$E$  [ $N/mm^2$ ] je Youngův modul pružnosti materiálu a  $J_z$  [ $mm^4$ ] je kvadratický moment průřezu v ohybu k ose  $z$ .

Po dosazení vhodných okrajových podmínek do vzorců 5.16 - 5.25 byly obdrženy následující integrační konstanty

$$C_1 = \frac{R_{Cy2}}{E \cdot J_z} \quad (5.29)$$

$$C_2 = 0 \quad (5.30)$$

$$C_3 = \frac{(-R_{Cy2}) \cdot a^2}{6 \cdot E \cdot J_z} \quad (5.31)$$

$$C_4 = 0 \quad (5.32)$$

$$C_5 = \frac{(-F_2)}{E \cdot J_z} \quad (5.33)$$

$$C_6 = \frac{F_2 \cdot l_1}{E \cdot J_z} \quad (5.34)$$

$$C_7 = \frac{2 \cdot R_{Cy2} \cdot a^2}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{F_2 \cdot a \cdot (2 \cdot l_1 - a)}{2 \cdot E \cdot J_z} \quad (5.35)$$

$$C_8 = \frac{F_2 \cdot a^2 \cdot (3 \cdot l_1 - 2 \cdot a)}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{2 \cdot R_{Cy2} \cdot a^3}{6 \cdot E \cdot J_z} \quad (5.36)$$

Výsledná rovnice průhybové čáry pro interval  $x_I \in (0; a)$  je tedy po dosazení konstant 5.29-5.36 do rovnice 5.20

$$v_I(x) = \frac{R_{Cy2}}{E \cdot J_z} \cdot \frac{x_I^3}{6} + \frac{(-R_{Cy2}) \cdot a^2}{6 \cdot E \cdot J_z} \cdot x_I \quad (5.37)$$

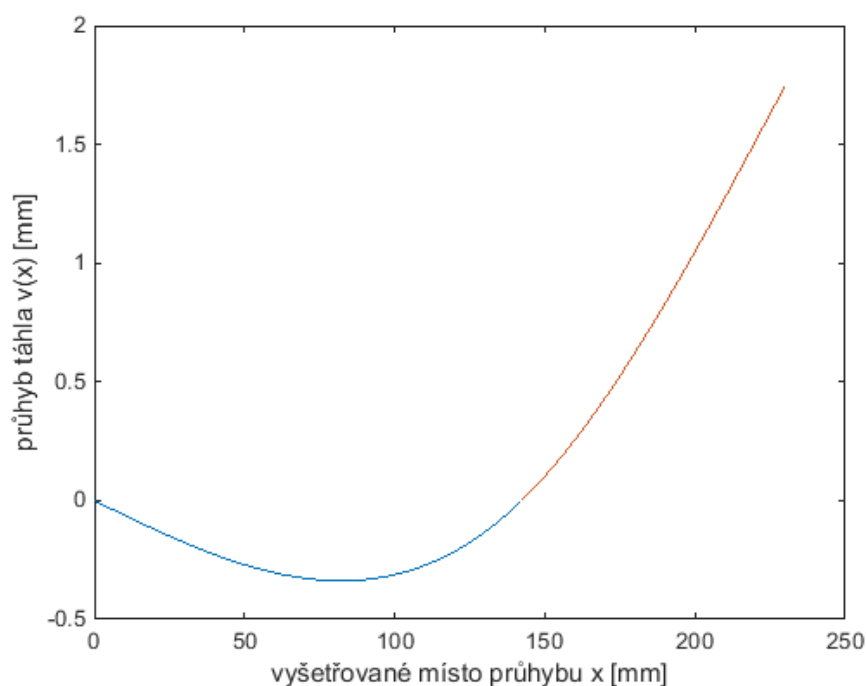
a pro interval  $x_{II} \in (a; l_1)$  je po dosazení konstant 5.29-5.36 do rovnice 5.25

$$v_{II}(x) = \frac{(-F_2)}{E \cdot J_z} \cdot \frac{x_{II}^3}{6} + \frac{F_2 \cdot l_1}{E \cdot J_z} \cdot \frac{x_{II}^2}{2} + \left( \frac{2 \cdot R_{Cy2} \cdot a^2}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{F_2 \cdot a \cdot (2 \cdot l_1 - a)}{2 \cdot E \cdot J_z} \right) \cdot x_{II} + \frac{F_2 \cdot a^2 \cdot (3 \cdot l_1 - 2 \cdot a)}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{2 \cdot R_{Cy2} \cdot a^3}{6 \cdot E \cdot J_z} \quad (5.38)$$

kde  $E = 2,1 \cdot 10^5 N/mm^2$  a

$$J_z = \frac{\pi \cdot (D_t^4 - d_t^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (10^4 - 9^4)}{64} = 168,812 mm^4 \quad (5.39)$$

Na obrázku 5.10 je grafem zobrazena průhybová čára táhla. Modře byl vyznačen interval  $x_I \in (0; a)$  a oranžově interval  $x_{II} \in (a; l_1)$ . Maximální průhyb nastává v místě působení síly od pilota.



Obr. 5.10: Průhybová čára táhla

$$\begin{aligned}
 v_{max} = v_{II}(l_1) &= \frac{(-F_2)}{E \cdot J_z} \cdot \frac{l_1^3}{6} + \frac{F_2 \cdot l_1}{E \cdot J_z} \cdot \frac{l_1^2}{2} \\
 &+ \left( \frac{2 \cdot R_{Cy2}(100\%) \cdot a^2}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{F_2 \cdot a \cdot (2 \cdot l_1 - a)}{2 \cdot E \cdot J_z} \right) \cdot l_1 \\
 &+ \frac{F_2 \cdot a^2 \cdot (3 \cdot l_1 - 2 \cdot a)}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{2 \cdot R_{Cy2}(100\%) \cdot a^3}{6 \cdot E \cdot J_z} \\
 &= \frac{(-105)}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 168,812} \cdot \frac{230^3}{6} + \frac{105 \cdot 230}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 168,812} \cdot \frac{230^2}{2} \\
 &+ \left( \frac{2 \cdot 65 \cdot 142.2705^2}{6 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 168,812} - \frac{105 \cdot 142.2705 \cdot (2 \cdot 230 - 142.2705)}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 168,812} \right) \cdot 230 \\
 &+ \frac{105 \cdot 142.2705^2 \cdot (3 \cdot 230 - 2 \cdot 142.2705)}{6 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 168,812} - \frac{2 \cdot 65 \cdot 142.2705^3}{6 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 168,812} \\
 &= 1,747 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{5.40}$$

Ve skutečnosti je průhyb táhla orientovaný ve směru působení síly  $F_2$ .



Přídavný ohybový moment od osově síly  $F_1$  je

$$N \cdot y_{max} = F_1 \cdot v_{II}(l_1) = 350 \cdot 1,747 = 611,45 N \cdot mm \quad (5.41)$$

a celkový maximální ohybový moment pak po dosazení do vzorce 5.13

$$M(100\%) = m(100\%) + F_1 \cdot v_{II}(l_1) = 9212 + 350 \cdot 1,747 \doteq 9823 N \cdot mm \quad (5.42)$$

Dle skript Pružnost a pevnost II [8, str. 245, vzorec (12.3)] platí

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_o} + \frac{N}{S} \leq \sigma_D \quad (5.43)$$

$W_o [mm^3]$  je podle skript Pružnost a pevnost I [7, str. 212, vzorec (10.15.)] modul průřezu v ohybu

$$W_o = \frac{J_z}{e} \quad (5.44)$$

kde  $e$  je nejvzdálenější místo průřezu od neutrální osy. Pro kruhový průřez platí  $e = \frac{D}{2}$ .

V tomto případě tedy

$$W_o = \frac{J_z}{\frac{D_t}{2}} = \frac{168,812}{\frac{10}{2}} = 33,762 mm^3 \quad (5.45)$$

$S [mm^2]$  je plocha průřezu trubky

$$S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \quad (5.46)$$

a tedy pro průřez táhla platí

$$S = \frac{\pi \cdot (D_t^2 - d_t^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (10^2 - 9^2)}{4} = 14,923 mm^2 \quad (5.47)$$

Maximální napětí v táhle je po dosazení všech hodnot do vzorce 5.43

$$\sigma_{max} = \frac{M(100)}{W_o} + \frac{F_1}{S} = \frac{9823}{33,7624} + \frac{350}{14,923} = 314 N/mm^2 \quad (5.48)$$

Dle tabulky 4.2 je  $\sigma_K = 669 N/mm^2$  pro ocel použitou při výrobě táhla. Při použití koeficientu bezpečnosti  $k = 1,5$  platí

$$\sigma_D \leq \frac{\sigma_K}{k} = \frac{669}{1,5} = 446 N/mm^2 \quad (5.49)$$

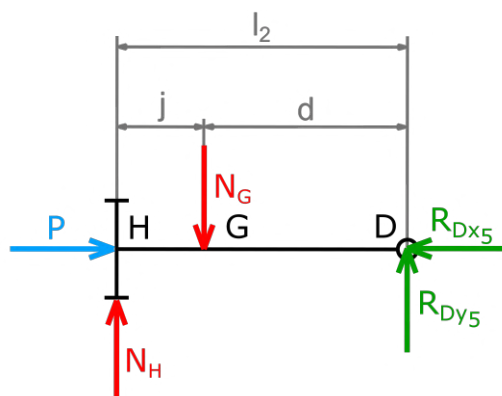
a pevnostní podmínka

$$\sigma_{max} = 314,4 \leq \sigma_D = 446 \quad (5.50)$$

je splněna.

## 5.2.2 Kontrola pevnosti pístní tyče

Kontrola pístní tyče proběhla obdobně jako kontrola táhla.

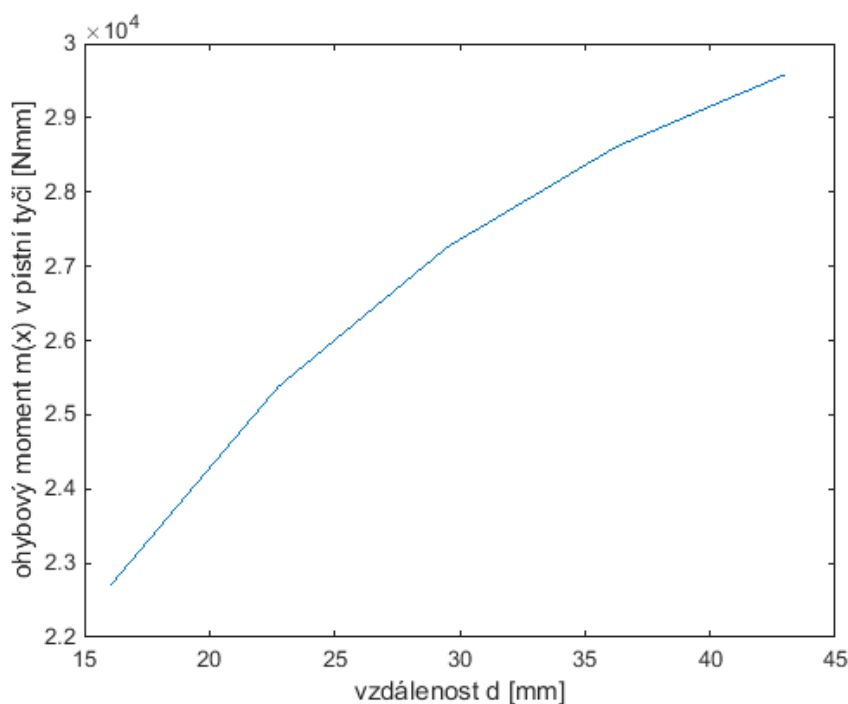


Obr. 5.11: Schéma namáhání pístu kombinací tahu/tlaku s ohybem

Pro konkrétní případ zatížení ohybovým momentem platí

$$m(n\%) = R_{Dy5}(n\%) \cdot d(n\%) \quad (5.51)$$

Graf na obrázku 5.12 zobrazuje zjednodušený průběh ohybového momentu  $m(x)$  v pístní tyči od příčné síly  $R_{Dy5}$  v závislosti na vysunutí, tedy v závislosti na vzdálenosti  $d$ , v pěti postupných polohách. Největší ohybový moment nastává ve chvíli úplně vysunuté pístní tyče, tedy ve chvíli, kdy je vzdálenost  $d$  největší. Z charakteru zatížení je jasné, že maximální ohybový moment vznikne v místě  $G$ .



Obr. 5.12: Průběh ohybového momentu ve vedení pístu

Z tabulek 5.1 a 5.2 byly do vzorce 5.51 dosazeny hodnoty příslušné reakční síly a rozměru  $d$  a vypočten maximální ohybový moment

$$\begin{aligned} m_{max} = m(0\%) &= |R_{Dy5}(0\%) \cdot d(0\%)| = \\ &= 688,0326 \cdot 43 \doteq 29585N \cdot mm \end{aligned} \quad (5.52)$$

Pro výpočet maximálního průhybu pístití tyče byla použita úplná diferenciální rovnice průhybové čáry. Okrajové podmínky se zdají být oproti táhlu jiné, vzhledem k posuvnému uložení pístitu ve válci, nicméně konstrukční vůle mezi pístitem a válcem, umožňující těsnění pomocí pístitních kroužků, dovoluje pístitu mírné natočení. Proto byl při výpočtu úplné diferenciální rovnice průhybové čáry použit totožný postup. Výpočet proběhl pro polohu  $d(0\%)$ , tedy polohu největšího ohybového zatížení.

Vypočteny byly postupně oba intervaly zleva, proto byla zavedena vzdálenost  $j = l_2 - d$ . Pro interval  $x_I \in (0; j)$  platí rovnice 5.16-5.20 a pro interval  $x_{II} \in (j; l_2)$  platí rovnice 5.21-5.25.

Okrajové podmínky v místě 0

$$v_I(0) = 0; v_I^{II}(0) = 0; v_I^{III}(0) = \frac{N_H}{E \cdot J_z} \quad (5.53)$$

Okrajové podmínky v místě  $j$

$$v_I(j) = v_{II}(j) = 0; v_I^I(j) = v_{II}^I(j); v_I^{II}(j) = v_{II}^{II}(j) \quad (5.54)$$

Okrajové podmínky v místě  $l_2$

$$v_{II}^{II}(l_2) = 0; v_{II}^{III}(l_2) = \frac{(-R_{Dy5})}{E \cdot J_z} \quad (5.55)$$

$E$  [ $N/mm^2$ ] je Youngův modul pružnosti materiálu a  $J_z$  [ $mm^4$ ] je kvadratický moment průřezu v ohybu k ose  $z$ .

Po dosazení vhodných okrajových podmínek do vzorců 5.16 - 5.25 byly obdrženy následující integrační konstanty

$$C_1 = \frac{N_H}{E \cdot J_z} \quad (5.56)$$

$$C_2 = 0 \quad (5.57)$$

$$C_3 = \frac{(-N_H) \cdot j^2}{6 \cdot E \cdot J_z} \quad (5.58)$$

$$C_4 = 0 \quad (5.59)$$

$$C_5 = \frac{(-R_{Dy5})}{E \cdot J_z} \quad (5.60)$$

$$C_6 = \frac{R_{Dy5} \cdot l_2}{E \cdot J_z} \quad (5.61)$$

$$C_7 = \frac{2 \cdot N_H \cdot j^2}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{R_{Dy5} \cdot j \cdot (2 \cdot l_2 - j)}{2 \cdot E \cdot J_z} \quad (5.62)$$

$$C_8 = \frac{R_{Dy5} \cdot j^2 \cdot (3 \cdot l_2 - 2 \cdot j)}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{2 \cdot N_H \cdot j^3}{6 \cdot E \cdot J_z} \quad (5.63)$$

Výsledná rovnice průhybové čáry pro interval  $x_I \in (0; j)$  je tedy po dosazení konstant 5.56-5.63 do rovnice 5.20

$$v_I(x) = \frac{N_H}{E \cdot J_z} \cdot \frac{x_I^3}{6} + \frac{(-N_H) \cdot j^2}{6 \cdot E \cdot J_z} \cdot x_I \quad (5.64)$$

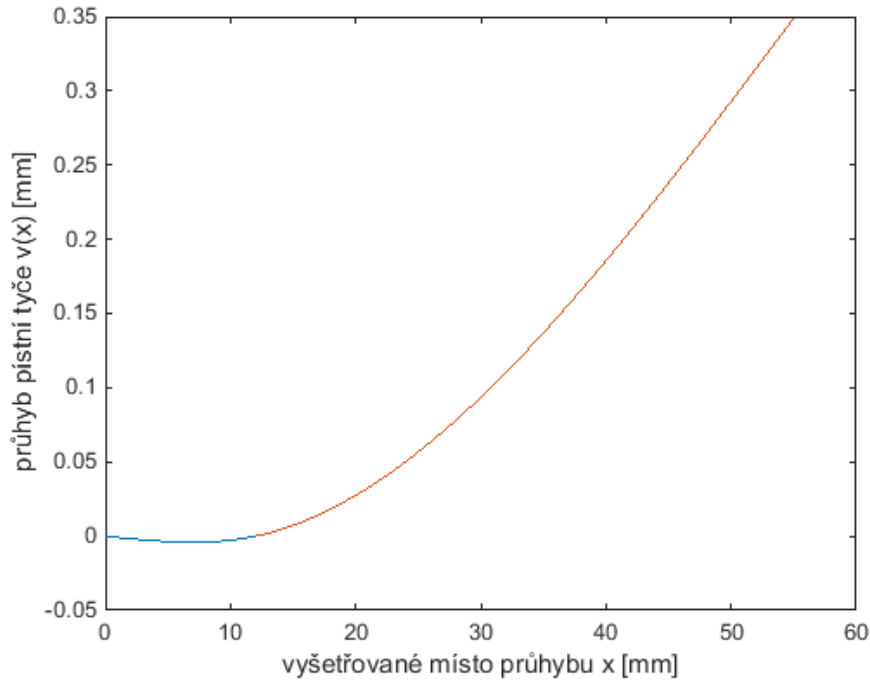
a pro interval  $x_{II} \in (j; l_2)$  je po dosazení konstant 5.56-5.63 do rovnice 5.25

$$v_{II}(x) = \frac{(-R_{Dy5})}{E \cdot J_z} \cdot \frac{x_{II}^3}{6} + \frac{R_{Dy5} \cdot l_2}{E \cdot J_z} \cdot \frac{x_{II}^2}{2} + \left( \frac{2 \cdot N_H \cdot j^2}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{R_{Dy5} \cdot j \cdot (2 \cdot l_2 - j)}{2 \cdot E \cdot J_z} \right) \cdot x_{II} + \frac{R_{Dy5} \cdot j^2 \cdot (3 \cdot l_2 - 2 \cdot j)}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{2 \cdot N_H \cdot j^3}{6 \cdot E \cdot J_z} \quad (5.65)$$

kde  $E = 2,1 \cdot 10^5 N/mm^2$  a

$$J_z = \frac{\pi \cdot (D_p^4 - d_p^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (9^4 - 3^4)}{64} = 318,086 mm^4 \quad (5.66)$$

Na obrázku 5.13 je grafem zobrazena průhybová čára pístní tyče. Modře byl vyznačen interval  $x_I \in (0; j)$  a oranžově interval  $x_{II} \in (j; l_2)$ . Maximální průhyb nastává v místě čepu spoje páky a pístní tyče.



Obr. 5.13: Průhybová čára pístní tyče

$$\begin{aligned}
 v_{max} = v_{II}(l_2) &= \frac{(-R_{Dy5}(0\%))}{E \cdot J_z} \cdot \frac{l_2^3}{6} + \frac{R_{Dy5}(0\%) \cdot l_2}{E \cdot J_z} \cdot \frac{l_2^2}{2} \\
 &+ \left( \frac{2 \cdot N_H(0\%) \cdot j^2}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{R_{Dy5}(0\%) \cdot j \cdot (2 \cdot l_2 - j)}{2 \cdot E \cdot J_z} \right) \cdot l_2 \\
 &+ \frac{R_{Dy5}(0\%) \cdot j^2 \cdot (3 \cdot l_2 - 2 \cdot j)}{6 \cdot E \cdot J_z} - \frac{2 \cdot N_H(0\%) \cdot j^3}{6 \cdot E \cdot J_z} \\
 &= \frac{(-688)}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 318,086} \cdot \frac{55^3}{6} + \frac{688 \cdot 55}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 168,812} \cdot \frac{55^2}{2} \\
 &+ \left( \frac{2 \cdot 2465 \cdot 12^2}{6 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 318,086} - \frac{688 \cdot 12 \cdot (2 \cdot 55 - 12)}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 318,086} \right) \cdot 55 \\
 &+ \frac{688 \cdot 12^2 \cdot (3 \cdot 55 - 2 \cdot 12)}{6 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 318,086} - \frac{2 \cdot 2465 \cdot 12^3}{6 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 318,086} \\
 &= 0,349 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{5.67}$$

Ve skutečnosti je průhyb pístní tyče orientovaný ve směru působení reakční síly  $R_{Dy5}$ .

Přídavný ohybový moment od osově síly  $R_{Dx5}(0\%)$  je po dosazení z tabulky 5.2

$$|N \cdot y_{max}| = |R_{Dx5}(0\%) \cdot v_{max}| = |(-589) \cdot 0,349| \doteq 206 N \cdot mm \quad (5.68)$$

a celkový maximální ohybový moment pak po dosazení do vzorce 5.13

$$M(0) = m(0\%) + |R_{Dx5}(0\%)| \cdot v_{II}(l_2) = 29585 + 206 \doteq 29791 N \cdot mm \quad (5.69)$$

Po dosazení do vzorce 5.44

$$W_o = \frac{J_z}{\frac{D_p}{2}} = \frac{318,086}{\frac{9}{2}} = 70,686 mm^3 \quad (5.70)$$

a následně do vzorce 5.46

$$S = \frac{\pi \cdot (D_p^2 - d_p^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (9^2 - 3^2)}{4} = 56,549 mm^2 \quad (5.71)$$

platí po dosazení do vzorce 5.43

$$\sigma_{max} = \frac{M(0\%)}{W_o} + \frac{|R_{Dx5}(0\%)|}{S} = \frac{29791}{70,686} + \frac{|(-589)|}{56,549} \doteq 432 N/mm^2 \quad (5.72)$$

Po dosazení do vzorce 5.49 a následné aplikaci na vzorec 5.43 je pevnostní podmínka

$$\sigma_{max} = 432 \leq \sigma_D = 446 \quad (5.73)$$

splněna.

### 5.2.3 Dimenzování čepů

Čepy je třeba kontrolovat na stříh a ohyb. Všechny čepy v mechanismu mají stejný průřez, aby byla konstrukce technologicky jednoduchá. Proto byl vybrán pro kontrolu nejvíce namáhaný čep mechanismu. Dle tabulky 5.3 je to čep spojující páku a pístní tyč, ve kterém působí reakční síla  $R_D$ .

Plocha průřezu čepu je

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} = 12,566 \text{ mm}^2 \quad (5.74)$$

Smykové napětí je potom

$$\tau = \frac{R_D}{S} = \frac{1524}{12,566} = 121,28 \text{ N/mm}^2 \quad (5.75)$$

Kvadratický moment průřezu čepu je

$$J_z = \frac{\pi \cdot D^4}{64} = \frac{\pi \cdot 4^4}{64} = 12,566 \text{ mm}^4 \quad (5.76)$$

Modul průřezu v ohybu je

$$W_o = \frac{J_z}{\frac{D}{2}} = \frac{12,566}{\frac{4}{2}} = 6,283 \text{ mm}^3 \quad (5.77)$$

Ohybové napětí je dle skript Pružnost a pevnost I [7, str. 212, vzorec (10.14.)]

$$\sigma_{max} = \frac{M_o}{W_o} = \frac{\frac{R_D}{2} \cdot l}{W_o} = \frac{\frac{1524}{2} \cdot 4}{6,283} = 485,119 \text{ N/mm}^2 \quad (5.78)$$

kde  $\frac{R_D}{2}$  [N] je síla vyvozující ohybový moment a  $l$  [mm] je vzdálenost působíště síly v kluzném pouzdře spoje od místa maximálního ohybového momentu v čepu.

Redukované napětí je podle skript Pružnost a pevnost I [7, str. 378]

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + (\alpha \cdot \tau)^2} \quad (5.79)$$

kde dle skript Pružnost a pevnost I [7, str. 374]  $\alpha = 2$  při aplikaci teorie  $\tau_{max}$  a po dosazení tedy

$$\sigma_{red} = \sqrt{485,119^2 + (2 \cdot 121,28)^2} = 514,531 \text{ N/mm}^2 \quad (5.80)$$

Mez pevnosti materiálu pro čep  $\varnothing 4$  tedy musí být při použití koeficientu bezpečnosti  $k = 1,5$

$$\sigma_k \geq \sigma_{red} \cdot k = 514,531 \cdot 1,5 = 771,796 \text{ N/mm}^2 \quad (5.81)$$

Použitím čepů  $\varnothing 5$  stejným postupem

$$\sigma_k \geq 407,321 \text{ N/mm}^2 \quad (5.82)$$

Pak by ale bylo třeba mírně pozměnit konstrukci jednotlivých členů ovládacího mechanismu pro spojení pomocí větších čepů.

## 5.2.4 Dimenzování šroubů

Síly působící na tělo pumpy rovnoběžně s osami šroubů jsou reakce  $N_G$  a složka  $R_{F\xi}$  reakční síly  $R_F$ . Po dosazení z tabulky 5.3 je

$$R_{F\xi}(100\%) = R_F(100\%) \cdot \sin \cdot (\delta + \varepsilon) = 1228 \cdot \sin(41,8443 + 34,9808) = 1195,7N \quad (5.83)$$

Po dosazení z tabulky 5.2 je

$$F_{os} = |N_G(100\%)| + R_{F\xi}(100\%) = |-1999| + 1195,7 = 3194,7N \quad (5.84)$$

Průměr jádra šroubu M5 je dle strojnických tabulek [5]  $d_3 = 4,019mm$ . Plocha průřezu je tedy

$$S_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} = \frac{\pi \cdot 4,019^2}{4} = 12,686mm^2 \quad (5.85)$$

Napětí v tahu/tlaku jednoho šroubu je potom

$$\sigma = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_{os}}{S_3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3194,7}{12,686} = 83,942N/mm^2 \quad (5.86)$$

Mez pevnosti materiálu šroubů při použití koeficientu bezpečnosti  $k=1,5$  potom musí být

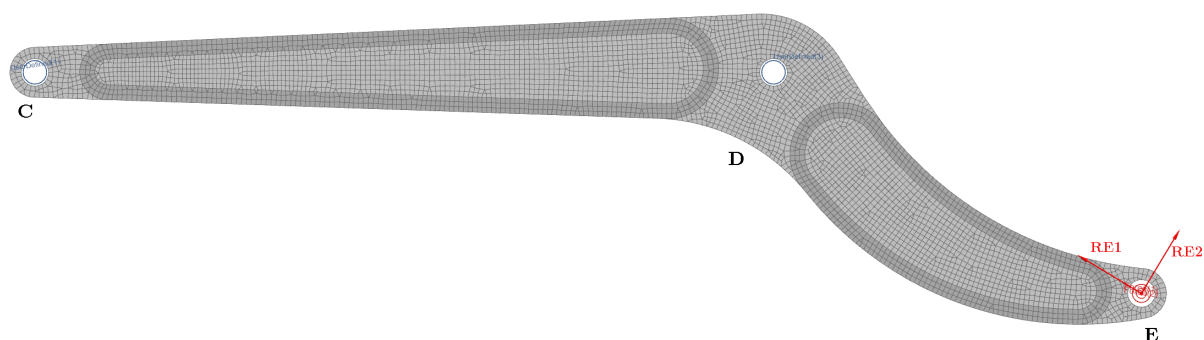
$$\sigma_k \geq \sigma \cdot k = 72,311 \cdot 1,5 = 125,913N/mm^2 \quad (5.87)$$



## 5.2.5 Kontrola pevnosti páky

Vzhledem k tomu, že páka je vyrobena z uhlíkového kompozitu, u kterého je velice složité určit Youngův modul pružnosti, byla kontrola provedena pomocí FEM analýzy. Byly vytvořeny rovinné plochy představující bočnice a vložky páky. Tyto plochy byly převedeny na rovinné konečné prvky. Dále byla definována tloušťka jedné vrstvy a počet vrstev pro skladbu celkového komponentu. Poté byl zadán materiál pomocí předdefinovaného souboru [22] s materiálovými charakteristikami konkrétního uhlíkového kompozitu.

U páky nabývá ohybový moment svého maxima vždy v místě středního čepu. Proto byly okrajové podmínky definovány jako zamezení všech posuvů a rotací, kromě rotace okolo os čepů, v místech středního a jednoho krajního čepu. V místě druhého krajního čepu bylo definováno zatížení jako složky reakce  $R_E$ , jedna ležící na spojnici středů rotace čepů v místech  $D$  a  $E$  a druhá k ní kolmá.



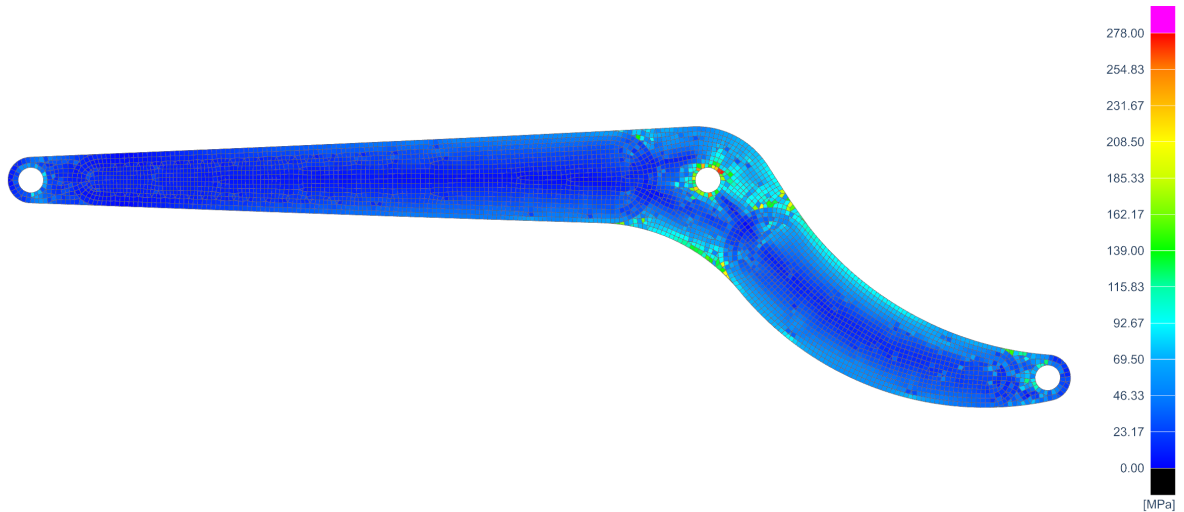
Obr. 5.14: Rozdělení ploch součástí páky na konečné prvky, aplikace okrajových podmínek a zatížení

Po dosazení z tabulky 4.1 je dovolené napětí

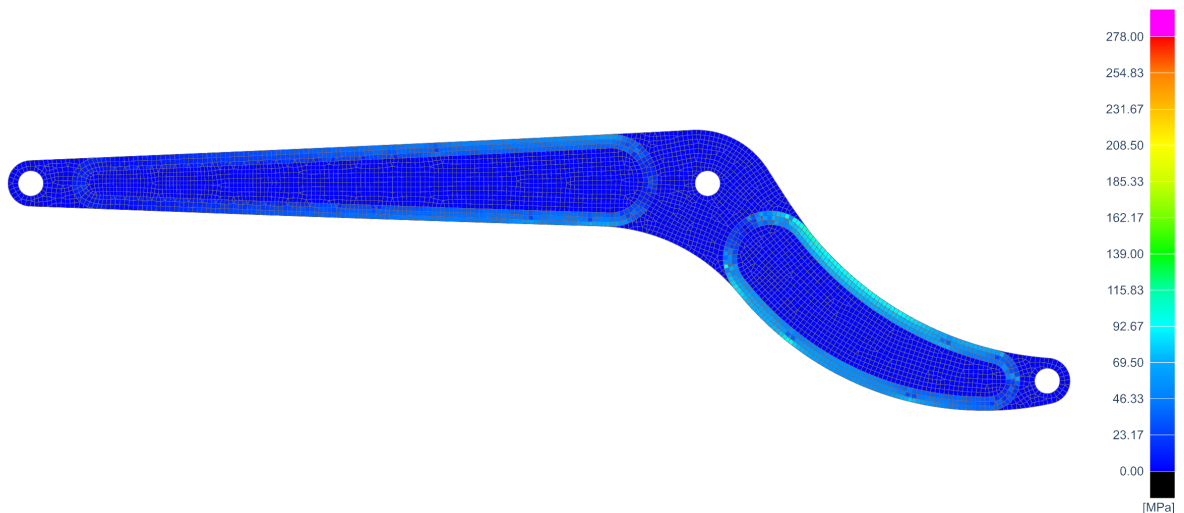
$$\sigma_D = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{520}{1,875} = 277,33N/mm^2 \quad (5.88)$$

Hodnota  $\sigma_D = 280N/mm^2$  byla pro grafický výstup nastavena jako horní hranice. Elementy zatížené větším redukovaným napětím než  $\sigma_D$  byly zobrazeny fialovou barvou. V elementech přilehlých k místům okrajových podmínek je možné vidět koncentraci většího než dovoleného napětí. To je dáno ovlivněním průběhu napětí právě okrajovými podmínkami. Tyto elementy nejsou uvažovány jako relevantní pro analýzu.

Je evidentní, že jak desky, tak vložky vyhovují pevnostní podmínce  $\sigma_{max} \leq \sigma_D$ .



Obr. 5.15: Rozložení napětí v deskách páky

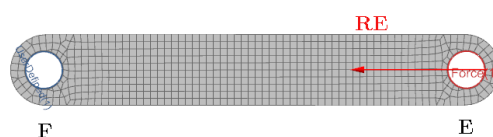


Obr. 5.16: Rozložení napětí ve vložkách páky

## 5.2.6 Kontrola pevnosti binárního členu

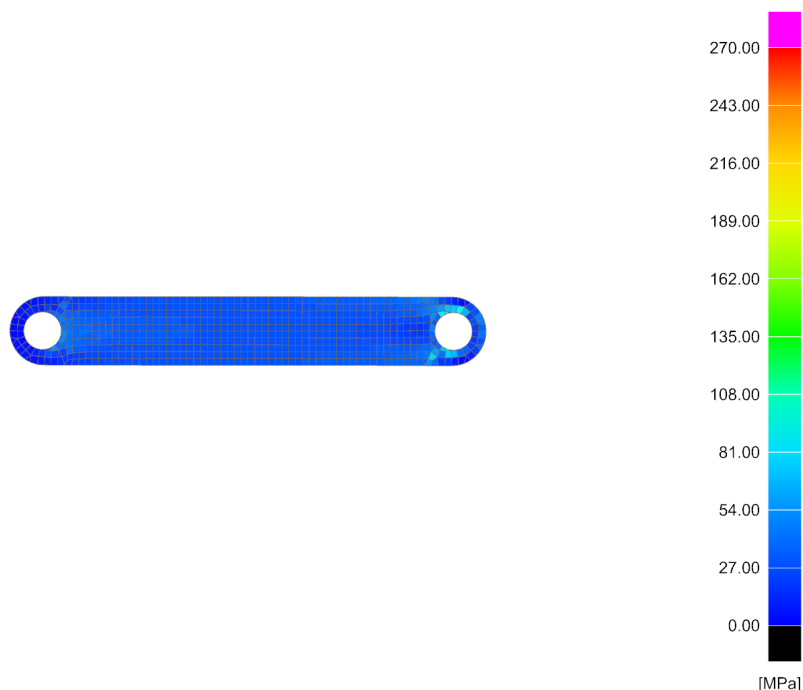
Binární člen byl uvažován jako výřez z desky uhlíkového kompozitu shodných materiálových charakteristik jako v případě páky dle tabulky 4.1. Definice materiálu pomocí předdefinovaného souboru [22] proběhla stejně jako u páky.

Okrajové podmínky byly definovány jako zamezení všech posuvů a rotací, kromě rotace okolo osy čepu v místě  $F$ . Vzhledem k tomu, že se jedná o binární člen, bylo zatížení definováno jako reakční síla  $R_E$  působící na spojnici středů rotace čepů v místech E a F.



Obr. 5.17: Rozdělení plochy binárního členu na konečné prvky, aplikace okrajových podmínek a zatížení

Po zanedbání elementů ovlivněných okrajovými podmínkami binární člen vyhověl pevnostní podmínce  $\sigma_{max} \leq \sigma_D$  dle rovnice 5.88.



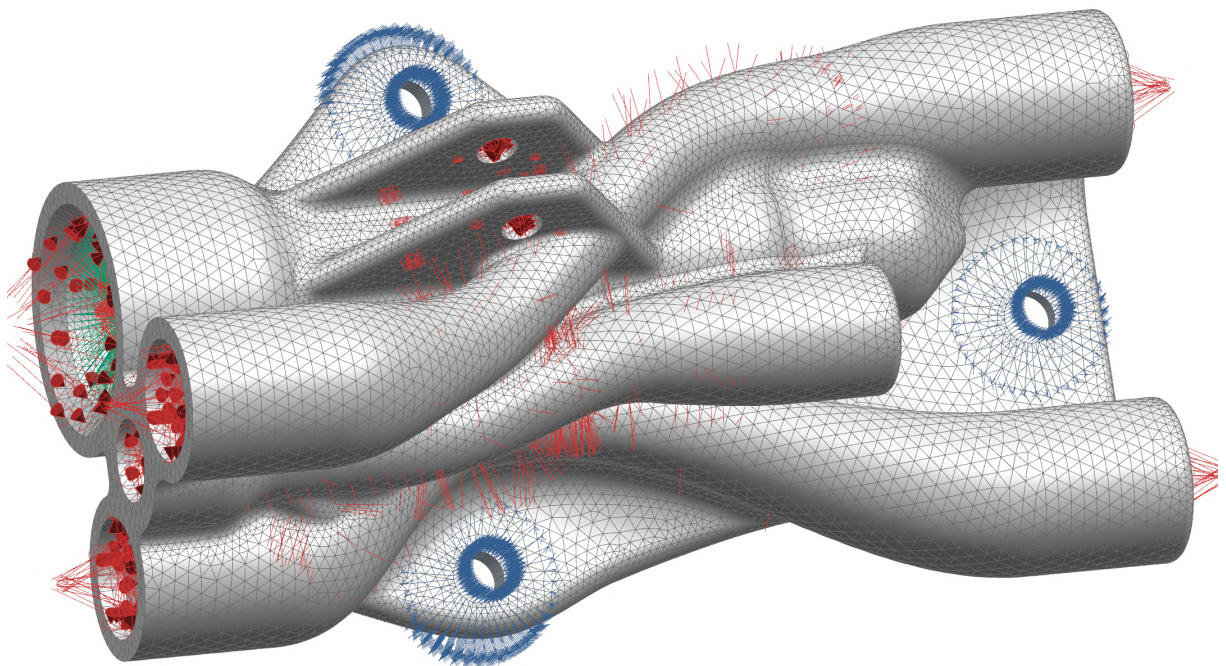
Obr. 5.18: Rozložení napětí v binárním členu

### 5.3 FEM analýza tištěného těla pumpy

Jako vstupy pro FEM analýzu byly použity hodnoty sil přenesených mechanismem na tělo pumpy získaných statickou analýzou v 0% a 100% zasunutí pístu pro porovnání krajních hodnot zatížení. Osová síla v pístu byla převedena na tlak kapaliny.

Model těla pumpy byl převeden na konečné prvky. Okrajové podmínky byly definovány jako zamezení všech posuvů a rotací, kromě rotací okolo os šroubů, v místech děr pro uchycení těla pumpy k bočnici interiéru.

Jako zatížení byly definovány reakční síly,  $R_F$  působící v uložení čepu v místě  $F$  a  $N_G$  působící normálově k ose válce v místě upevnění vložky pomocí závitů. Dále byl definován bod v těžišti válcové plochy představující závit pro vložku válce. Následně byl připojen jako element sítě konečných prvků. Takto vytvořený bod byl použit jako působiště silové dvojice ohybového momentu působící na tělo pumpy od pístní tyče.



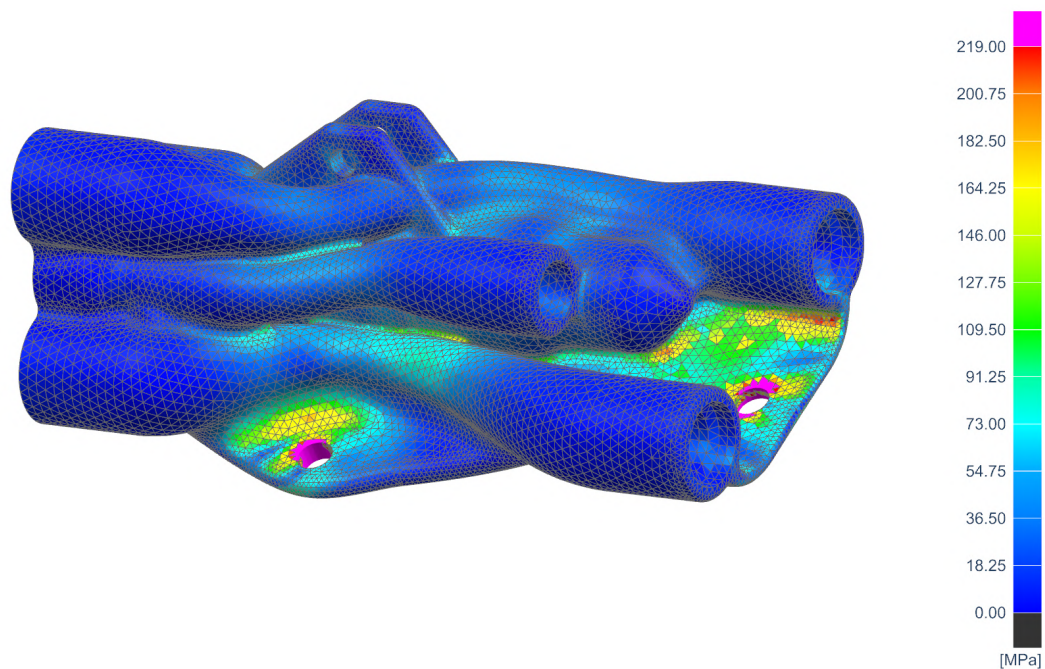
Obr. 5.19: Rozdělení modelu těla pumpy na konečné prvky, aplikace okrajových podmínek a zatížení

V softwaru Siemens NX byl vytvořen soubor s materiálovými charakteristikami dle datasheetu práškové hliníkové slitiny CL30/31 od firmy Concept Laser [12]. Jedná se o materiál ve formě prášku určený pro výrobu komponentů pomocí aditivní technologie. Dle datasheetu výrobce je mez pevnosti tohoto materiálu  $329 \text{ N/mm}^2$  [12]. Při použití koeficientu bezpečnosti  $k = 1,5$  musí platit pevnostní podmínka

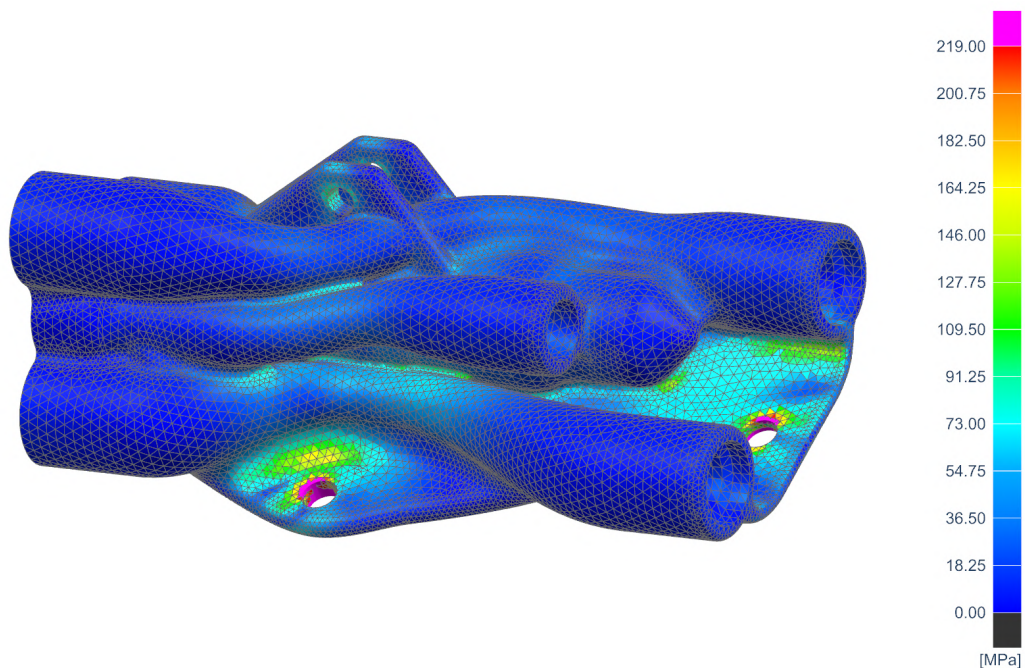
$$\sigma_{max} \leq \sigma_D = \frac{\sigma_k}{k} = \frac{329}{1,5} \doteq 219 \text{ N/mm}^2 \quad (5.89)$$

Hliníkových slitin ve formě prášku pro výrobu aditivními technologiemi je však na trhu více. Některé z nich mají vyšší mez pevnosti. Například slitina AlSi7Mg od firmy GE Additive má dle datasheetu mez pevnosti  $400 \pm 30 \text{ N/mm}^2$  [13].

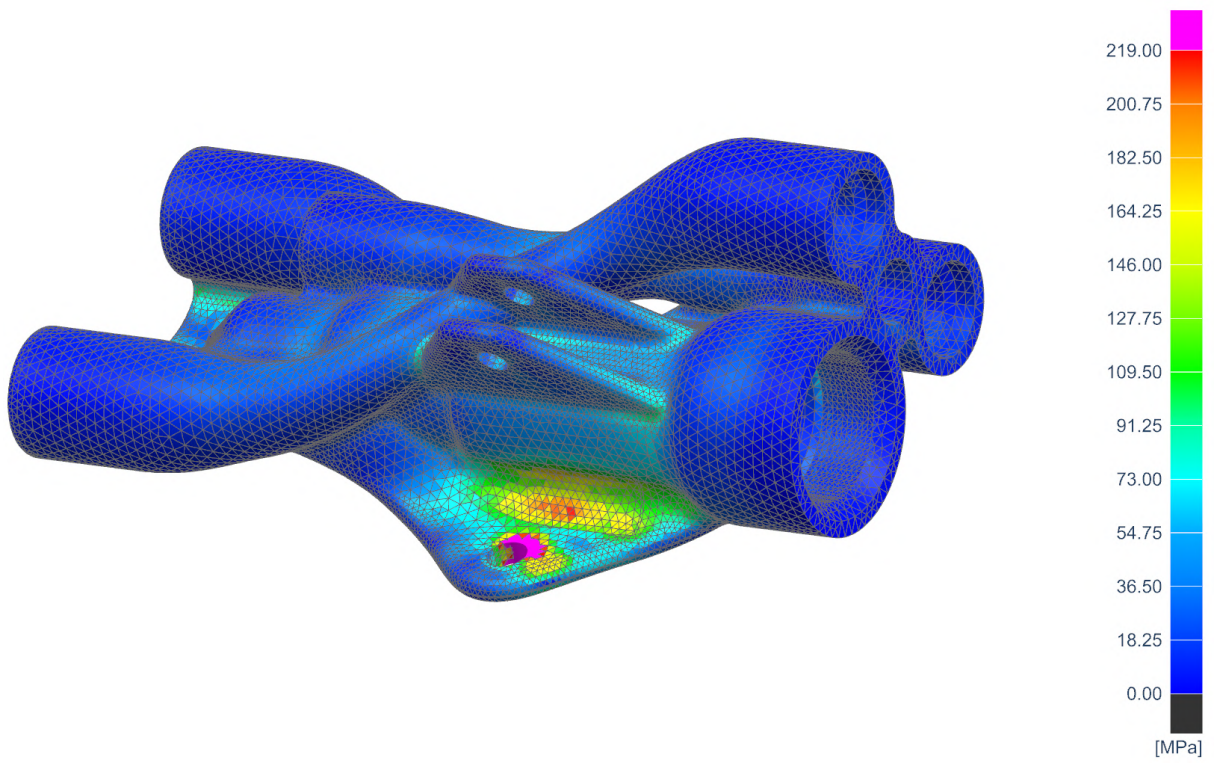
Hodnota  $\sigma_D$  ze rovnice 5.89 byla pro grafický výstup nastavena jako horní hranice. Elementy zatížené větším napětím byly zobrazeny fialovou barvou. Vysoká koncentrace napětí v místech okrajových podmínek nebyly pro výsledky analýzy uvažovány. Z obrázků 5.20 - 5.27 je vidět, že tělo pumpy splňuje pevnostní podmínku 5.89, nicméně výsledek analýzy vykazuje v konkrétních místech extrém. Jedná se o přechodová místa mezi úchyty a hlavním tělesem, kde dochází k prudkému nárůstu hmoty. Tyto koncentrace napětí by bylo možné redukovat vyhlazením přechodů.



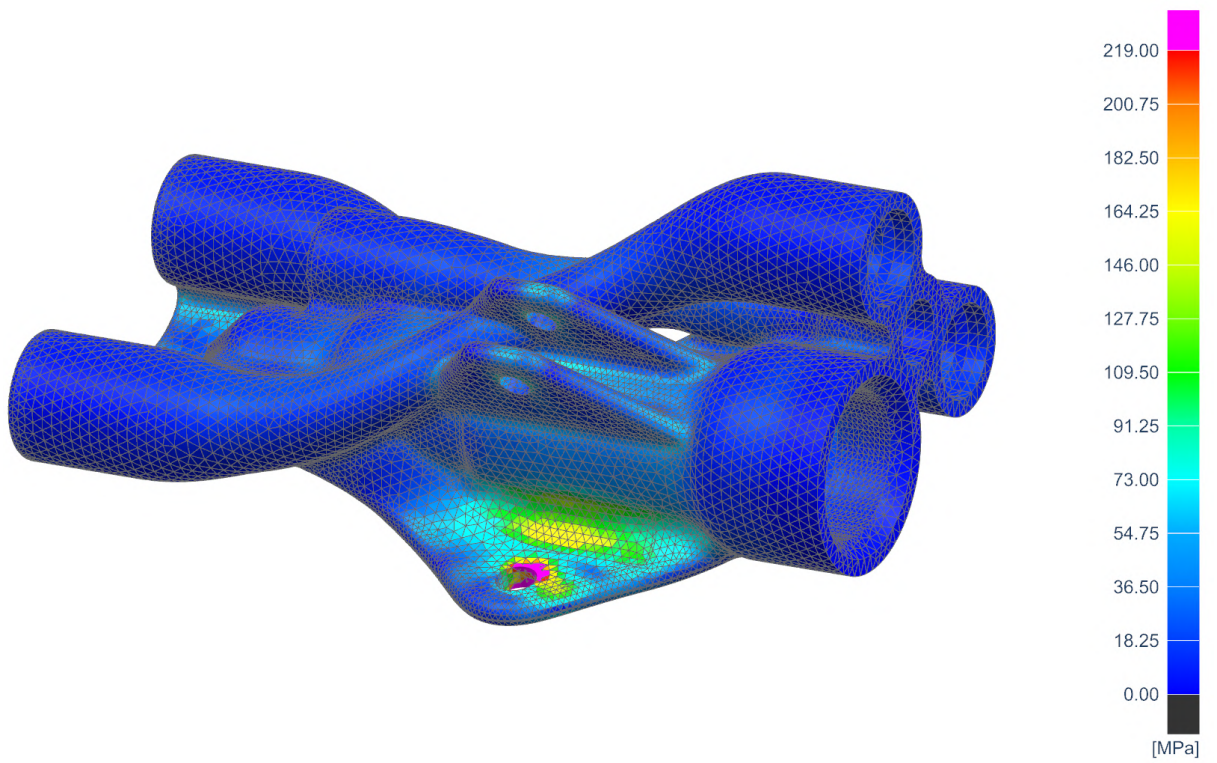
Obr. 5.20: Distribuce napětí v těle při 0% zasunutí pístu - pohled zezadu zleva shora



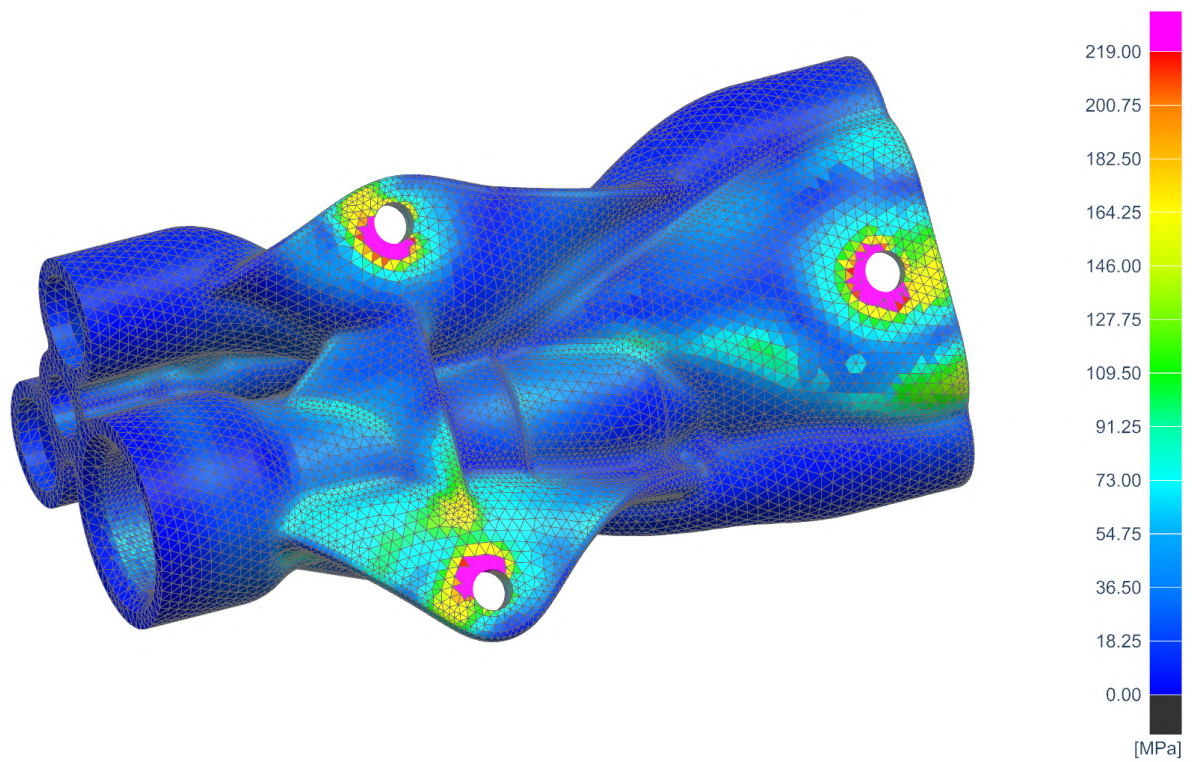
Obr. 5.21: Distribuce napětí v těle při 100% zasunutí pístu - pohled zezadu zleva shora



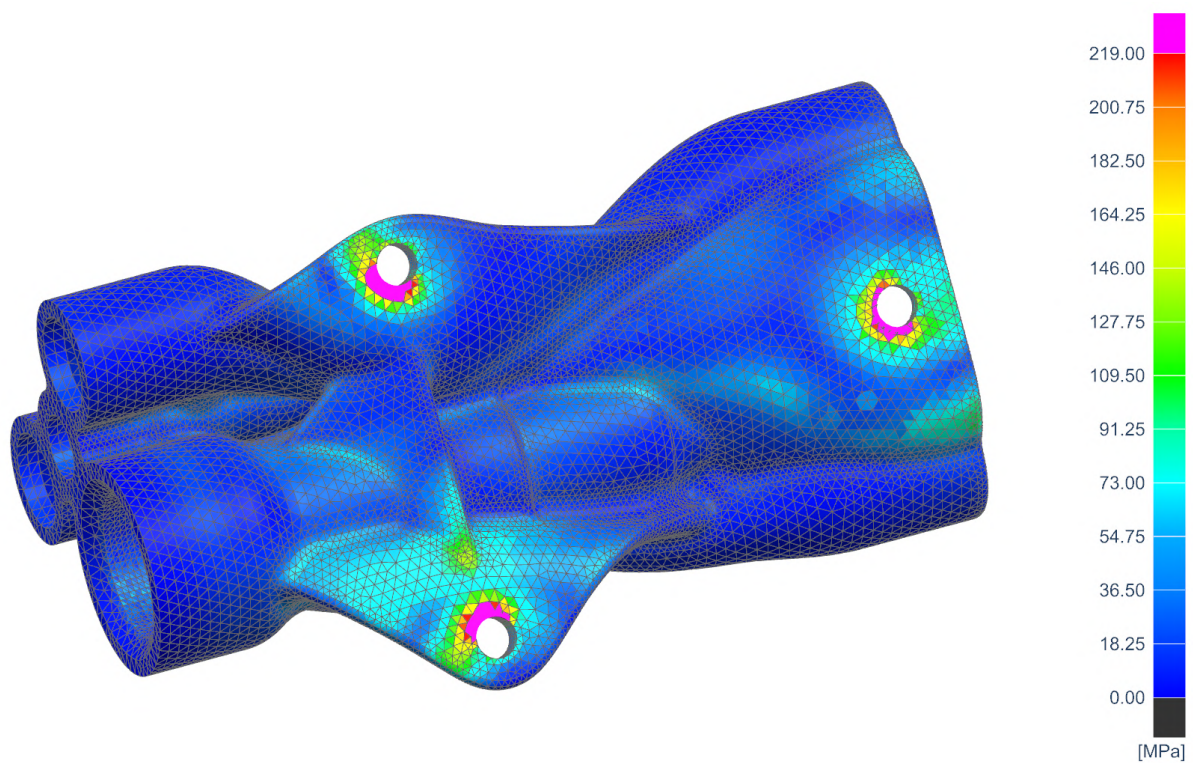
Obr. 5.22: Distribuce napětí v těle při 0% zasunutí pístu - pohled zepředu zprava shora



Obr. 5.23: Distribuce napětí v těle při 100% zasunutí pístu - pohled zepředu zprava shora

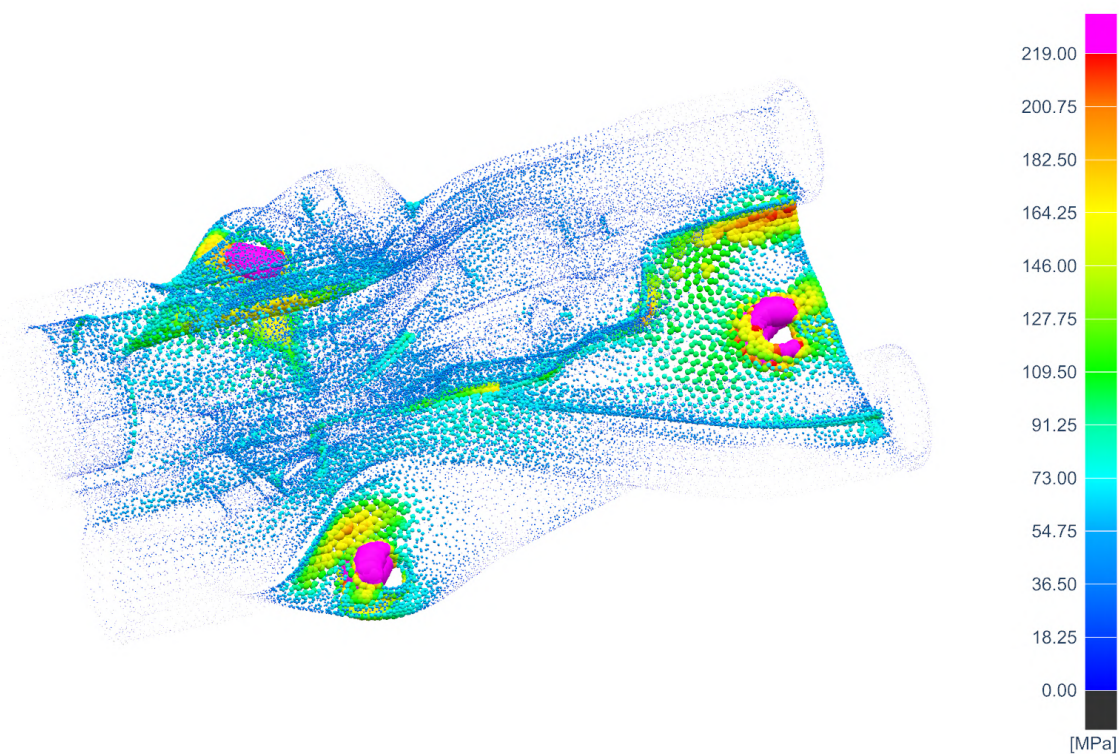


Obr. 5.24: Distribuce napětí v těle při 0% zasunutí pístu - pohled zepředu zdola

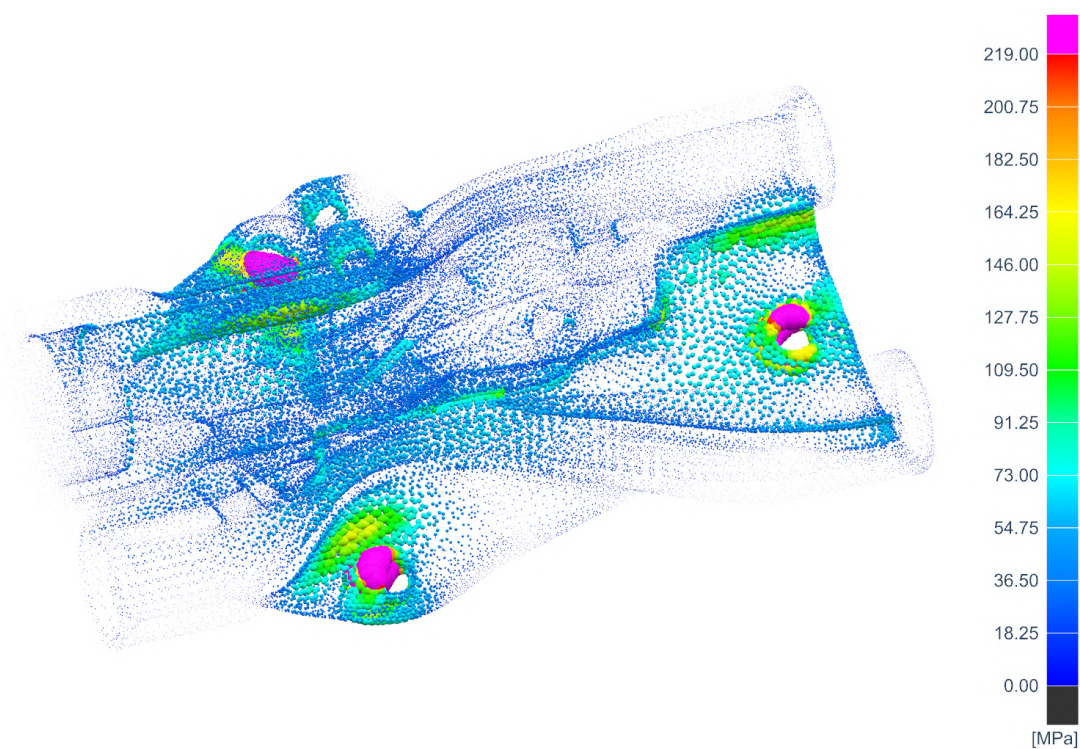


Obr. 5.25: Distribuce napětí v těle při 100% zasunutí pístu - pohled zepředu zdola

Pro vizuální kontrolu distribuce napětí ve vnitřních kanálech bylo změněno zobrazení, jak je vidět na obrázcích 5.26 a 5.27. Do těžiště každého elementu byla umístěna koule, jejíž velikost a barva odpovídají hodnotě napětí.



Obr. 5.26: Distribuce napětí v těle při 0% zasunutí pístu - pohled zepředu zleva shora



Obr. 5.27: Distribuce napětí v těle při 100% zasunutí pístu - pohled zepředu zleva shora



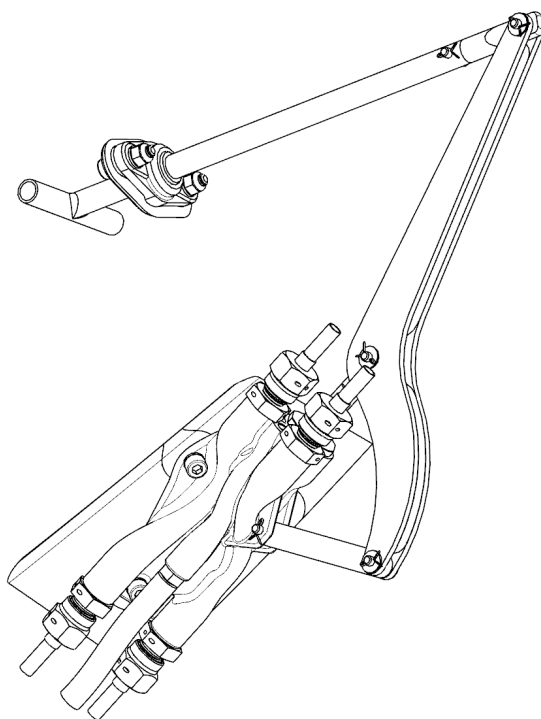
## 6 Hmotový rozbor

Postupnými úpravami návrhu těla pumpy bylo dosaženo výrazného snížení hmotnosti, nicméně hmotnostní rozbor vychází pouze z teoretického modelu. V rámci návrhu nebylo tělo pumpy vyrobeno. Je pravděpodobné, že by výsledný tvar bylo třeba dále upravit na základě reálné zkušenosti z výroby.

Původní konvenčně obrobené tělo váží dle analýzy softwaru Siemens NX po zadefinování materiálových charakteristik  $m = 0,1987 \text{ kg}$ . Návrh těla pumpy pro výrobu aditivní technologií váží na základě stejné analýzy  $m = 0,1175 \text{ kg}$ .

Výsledná teoretická úspora hmotnosti je tedy  $\approx 41\%$ .

Je třeba zopakovat, že během návrhu musela být radikálně změněna koncepce mechanismu. Pákový mechanismus umístěný mezi nohama pilota byl nahrazen mechanismem ovládaným táhlem, umístěným na palubní desce. Přizpůsobením mechanismu geometrii bočnice interiéru došlo k zavedení značného ohybového namáhání pístní tyče, což vedlo k zesílení její konstrukce, čímž vzrostla celková hmotnost mechanismu. I tak bylo zvoleno ovládání pístu pomocí pákového mechanismu.



Obr. 6.1: Liniové zobrazení sestavy pumpy

Je na místě uvážit, zda by nebylo možné dosáhnout nižší hmotnosti a zjednodušení mechanismu ustoupením od mechanismu ovládaným pákou. Alternativou by mohla být radikální změna konstrukce sestavy pístu. Upevněním těla pumpy přímo na zadní stěnu palubní desky a využitím pístní tyče jako táhla by byl úplně odstraněn celý mechanismus. Bylo by však třeba nadimenzovat sestavu pístu tak, aby pilot nemusel přemáhat nepřiměřené síly během pumpování.

# Literatura

- [1] Evropská agentura pro bezpečnost letectví: *Certifikační specifikace pro velmi lehké letouny, CS-VLA*. Amendment 1. Evropská agentura pro bezpečnost letectví, 2009. [cit. 9. 7. 2019]. URL <[https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2019/07/CS-VLA\\_konsolidovane\\_amdt\\_1\\_opr1CR\\_CZ.pdf](https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2019/07/CS-VLA_konsolidovane_amdt_1_opr1CR_CZ.pdf)>
- [2] Letecká amatérská asociace ČR na základě pověření Ministerstvem dopravy ČR: *UL 2 - Část I., Požadavky letové způsobilosti SLZ, Ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. Letecká amatérská asociace ČR, 2019. [cit. 9. 7. 2019]. URL <[http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2%20C4%8D%C3%A1st%20I\\_26.3.2019.pdf](http://www.laacr.cz/SiteCollectionDocuments/predpisy/UL2%20C4%8D%C3%A1st%20I_26.3.2019.pdf)>
- [3] Výzkumný a zkušební letecký ústav Letňany: *ONL 3941, Šroubení pro potrubí a hadice, Přehled*. Výzkumný a zkušební letecký ústav Letňany, květen 1968
- [4] Výzkumný a zkušební letecký ústav Letňany: *ONL 3942, Šroubení pro potrubí a hadice, Závity a konstrukční rozměry*. Výzkumný a zkušební letecký ústav Letňany, prosinec 2000
- [5] Ing. Jiří Leinveber, Ing. Pavel Vávra: *Strojnické tabulky*. ALBRA - pedagogické nakladatelství, 2011
- [6] Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc., Prof. Ing. Vladimír Stejskal, CSc., Doc. Ing. Jiří Březina, CSc.: *Mechanika A*. Česká technika - nakladatelství ČVUT, leden 2007
- [7] prof. Ing. Emanuel Hájek, CSc. a kolektiv: *Pružnost a pevnost I*. Ediční středisko ČVUT, říjen 1981
- [8] Kolektiv: *Pružnost a pevnost II*. Ediční středisko ČVUT, srpen 1980
- [9] TL-ULTRALIGHT, s.r.o. . *Stream - Pilot's Operating Handbook - UL aircraft category* [online]. ©2017. [cit. 9. 7. 2019]. URL <<http://www.tl-ultralight.cz/file/edee/prilohy/ke-stazeni/poh-stream-ul-na-web.pdf>>
- [10] igus®. *igubal® Online Catalog* [online]. ©2016. [cit. 9. 7. 2019]. URL <[https://www.igus.com/contentData/Product\\_Files/Download/pdf/2016%20igubal%20complete.pdf](https://www.igus.com/contentData/Product_Files/Download/pdf/2016%20igubal%20complete.pdf)>
- [11] igus®. *iglide® Online Catalog* [online]. ©2016. [cit. 9. 7. 2019]. URL <[https://www.igus.com/contentData/Product\\_Files/Download/pdf/2016%20iglide%20section.pdf](https://www.igus.com/contentData/Product_Files/Download/pdf/2016%20iglide%20section.pdf)>
- [12] Concept Laser GmbH. *CL 30AL / CL 31AL Aluminium alloys Datasheet* [online]. ©2017. [cit. 29. 7. 2019]. URL <[https://www.concept-laser.de/fileadmin/user\\_upload/Datasheet\\_CL\\_30AL.pdf](https://www.concept-laser.de/fileadmin/user_upload/Datasheet_CL_30AL.pdf)>

- [13] GE Additive. *GE Additive AlSi7Mg Datasheet* [online]. [cit. 29. 7. 2019]. URL <[https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2019-07/GEAP\\_AlSi7Mg\\_DS\\_EN\\_A4\\_1.pdf](https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2019-07/GEAP_AlSi7Mg_DS_EN_A4_1.pdf)>
- [14] Paro Software. *HydroWer Check Valves* [online]. ©2007. [cit. 29. 7. 2019]. URL <[https://paro-nl.com/library/library/datasheets\\_support/Hydrower/ruckschlag2.pdf/datasheet.html](https://paro-nl.com/library/library/datasheets_support/Hydrower/ruckschlag2.pdf/datasheet.html)>
- [15] STASTO Automation s.r.o. . *hadicové vsuvky - PA6 případně POM* [online]. [cit. 29. 7. 2019]. URL <[https://www.stasto.eu/crmablage/dokumenteweb/Fitinky%20PA6POM\\_156058\\_3\\_58\\_CS\\_V1.pdf](https://www.stasto.eu/crmablage/dokumenteweb/Fitinky%20PA6POM_156058_3_58_CS_V1.pdf)>
- [16] SFC KOENIG®. *SFC KOENIG® Product Catalog* [online]. ©2019. [cit. 29. 7. 2019]. URL <[https://www.sfckoenig.com/wp-content/uploads/2019/01/SFC\\_Catalog\\_2019\\_EN.pdf](https://www.sfckoenig.com/wp-content/uploads/2019/01/SFC_Catalog_2019_EN.pdf)>
- [17] DMLS Tree. In: *Introduction to Metal 3D printing* [online]. 3D Hubs B.V. . [cit. 26. 7. 2019]. URL <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>>
- [18] Small batch manufacturing of a bicycle frame using SLM. Courtesy: Renishaw and Empire Cycles. In: *Introduction to Metal 3D printing* [online]. 3D Hubs B.V. . [cit. 26. 7. 2019]. URL <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>>
- [19] A metal bracket before support removal oriented in a 45o angle. Courtesy: Concept Laser. Courtesy: Renishaw and Empire Cycles. In: *Introduction to Metal 3D printing. Courtesy: Concept Laser* [online]. 3D Hubs B.V. . [cit. 26. 7. 2019]. URL <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>>
- [20] Removing the powder around metal parts produced by the SLM printing process. Courtesy: Renishaw and Empire Cycles. In: *Introduction to Metal 3D printing. Courtesy: Concept Laser* [online]. 3D Hubs B.V. . [cit. 26. 7. 2019]. URL <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>>
- [21] fea. In: *Cálculo por elementos finitos* [online]. J2MECH. [cit. 26. 7. 2019]. URL <<https://www.j2mech.com/servicio-de-calculo-por-elementos-finitos/>>
- [22] Informaci poskytl Ústav letadlové techniky Fakulty strojní ČVUT (Karlovo nám. 13, Praha 2, 121 35).