



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav letadlové techniky**

**Návrh kompozitové nádrže pro studentskou  
raketu**

**Design of composite propellant tank for  
students rocket**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2024**

**Přemysl ČECHURA**

**Studijní program:** NLAK – LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA

**Studijní obor:** N071KOTE - Kosmická technika

**Vedoucí práce:** Ing. Jaromír Kučera

**Konzultant:** Ing. Bc. Zdeněk Padovec, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW, atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

podpis

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jaromíru Kučerovi za trpělivost a vstřícné vedení mé práce. Ing. Bc. Zdeňku Padovcovi Ph.D. za cenné poznámky a konzultace mých výpočtů kompozitů.

Dále bych rád poděkoval všem členům rodiny za podporu při studiu a oporu, abych se mohl věnovat dobrovolné činnosti v týmu *CTU Space Research*.

V neposlední řadě bych také rád poděkoval všem členům týmu *CTU Space Research*, hlavně Vojtovi Ježkovi, Danu Hořejšímu, Viktoru Haisovi a za spolupráci, nadšení a zážitky při práci na loňské i letošní soutěžní raketě. A hlavně bych rád poděkoval týmu za možnost stavby studentských raket v ČR, jelikož bez zázemí týmu by tento projekt nevznikl.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Čechura	Jméno: Přemysl	Osobní číslo: 482428
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávací katedra/ústav:	Ústav letadlové techniky		
Studijní program:	Letectví a kosmonautika		
Specializace:	Kosmická technika		

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh kompozitové nádrže pro studentskou raketu

Název diplomové práce anglicky:

Design of composite propellant tank for students rocket

Pokyny pro vypracování:

Proveďte:  
Rešerši požadavků a možných řešení zadané problematiky  
Předběžný návrh variant  
Výběr nevhodnější varianty  
Konstrukční návrh včetně pevnostní kontroly  
Návrh výrobního postupu

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jaromír Kučera ústav letadlové techniky FS

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

Ing. Bc. Zdeněk Padovec, Ph.D. odbor pružnosti a pevnosti FS

Datum zadání diplomové práce: 26.04.2024 Termín odevzdání diplomové práce: 24.05.2024

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jaromír Kučera  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Milan Dvořák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis oštkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Anotační list

Anotace:

Diplomová práce se zabývá návrhem nádrže na okysličovadlo pro studentskou raketu týmu CTU Space Research. Raketa je designována na soutěž European Rocketry Challenge 2024. V úvodu práce je provedena rešerše mezi ostatními soutěžními týmy a mezi řešeními v průmyslu. Konstrukce nádrže je zvolena jako tlaková nádoba typu III: Navíjená kompozitní tlaková nádoba s kovovým linerem s tvarem geodetického isotenzoidu. Výpočet kompozitní konstrukce je proveden analyticky za použití ABD matice. V závěru práce je navržen proces výroby a je proveden návrh výrobních přípravků.

Autor:	Přemysl Čechura	
Název BP/DP:	Návrh kompozitové nádrže pro studentskou raketu	
Rok vyhotovení:	2024	
Studijní program:	NLAK – LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA	
Obor studia:	N071KOTE - Kosmická technika	
Ústav:	Ústav letadlové techniky	
Vedoucí BP/DP:	Ing. Jaromír Kučera	
Konzultant:	Ing. Bc. Zdeněk Padovec, Ph.D.	
Bibliografické údaje:	počet stran	80
	počet obrázků	33
	počet grafů	14
	počet tabulek	21
	počet příloh	0
Klíčová slova:	Studentská raketa, oxid dusný, kompozitní tlaková nádoba typu III, geodetický isotenzoid, navíjená kompozitní tlaková nádoba	

## Anotation list

Anotation:

The thesis focuses on the design of an oxidizer tank for the student rocket team CTU Space Research. The rocket is designed for the European Rocketry Challenge 2024. The introduction of the thesis includes a review of solutions used by other competing teams and in the industry. The tank is designed as a Type III pressure vessel: filament-wound composite pressure vessel with a metal liner. Shape is chosen as a geodetic isotenzoid. The composite structure calculation is performed analytically using the ABD matrix. The conclusion discusses the manufacturing process and proposes manufacturing mandrel.

Author: Přemysl Čechura

Title of bachelor thesis: Design of composite propellant tank for students rocket

Academic year: 2024

University: Czech Technical University in Prague  
Faculty of Mechanical Engineering

Studijní program: NLAK – LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA

Obor studia: N071KOTE - Kosmická technika

Department: Department of Aerospace Engineering

Supervisor: Ing. Jaromír Kučera

Consultant: Ing. Bc. Zdeněk Padovec, Ph.D.

Bibliografické údaje:

počet stran	80
počet obrázků	33
počet grafů	14
počet tabulek	21
počet příloh	0

Keywords: Students rocket, nitrous oxide, type III composite pressure vessel, geodetic isotenzoid, filament-wound composite pressure vessel

# Obsah

Prohlášení .....	II
Poděkování .....	III
Anotační list.....	V
Anotation list .....	VI
1 Úvod .....	9
2 Rešerše.....	10
2.1 EuRoC a jeho požadavky .....	10
2.2 Základní návrh rakety.....	10
2.2.1 Bližší informace o raketě .....	11
2.3 Rešerše jiných raket a jejich nádrží.....	12
2.3.1 Typ I: Celokovová nádrž.....	13
2.3.2 Typ II: Vyztužená kovová nádrž .....	14
2.3.3 Typ III a Typ IV: Kompozitová nádoba s linerem .....	15
2.3.4 Typ V: celokompozitová nádrž bez vnitřního lineru .....	17
2.3.5 Typ II/III kompozitová nádrž s vlepenými víky .....	18
2.4 Zhodnocení rešerše.....	19
2.5 Výběr nejvhodnějšího typu.....	20
2.5.1 Volba hodnotících kritérií .....	21
2.5.2 Volba váhového faktoru.....	22
2.6 Výběr varianty pro detailní návrh .....	23
3 Návrh Nádrže .....	24
3.1 Parametry nádrže.....	24
3.2 Rozbor zatížení .....	25
3.2.1 Příklad 1 .....	25
3.2.2 Příklad 2 .....	26
3.2.3 Příklad 3 .....	26
3.2.4 Příklad 4 .....	26
3.3 Teorie výpočtu .....	27
3.3.1 Symetrický laminát.....	32
3.4 Vlastní analytický výpočet .....	32
3.4.1 Volba geometrie nádoby .....	32
3.4.2 Vektor liniových sil .....	33
3.4.3 Geodetický isotenzoid (GI).....	34
3.4.4 Kritérium porušení kompozitu, koeficienty bezpečnosti .....	36

3.4.5	Válcová část .....	37
3.4.6	Geoizotenzoidní víko .....	43
3.5	Ověření na ostatní případy zatížení .....	47
3.6	Finální geometrie nádoby .....	50
3.6.1	Geoisotenzoidní dóm .....	50
3.6.2	Přechod na válcovou část .....	51
3.6.3	Polární otvor .....	52
3.6.4	Liner .....	52
3.6.5	Finální model .....	52
3.7	Kovový liner .....	53
3.7.1	Vlastnosti N <sub>2</sub> O .....	53
3.7.2	Vhodné materiály .....	54
3.7.3	Svařovaný liner .....	55
3.7.4	Pokovovaný liner .....	57
3.8	Napojení do palivové soustavy a usazení do rakety .....	58
3.8.1	Přípojně rozměry .....	58
3.8.2	Rozvodné bloky .....	59
3.8.3	Připojení do nosné struktury .....	60
3.8.4	Celkový model palivové soustavy .....	61
4	Návrh a navíjecích přípravků a příprava výroby .....	62
4.1	Návrh navíjecího přípravku .....	62
4.1.1	Středová trubka .....	63
4.1.2	Navíjecí trn .....	63
4.1.3	Zajišťovací zátky .....	65
4.1.4	RADAX Přípravky .....	65
4.2	Návrh výroby .....	66
5	Závěr .....	70
	Seznam použitých obrázků .....	71
	Seznam použitých tabulek .....	72
	Seznam použitých grafů .....	73
	Seznam použitých zkratk .....	74
	Seznam použitých symbolů .....	75
	Seznam použitých programů .....	78
	Bibliografie .....	79



# 1 Úvod

Nádrže na pohonné látky jsou základním stavebním prvkem všech raket. U orbitálních raket tvoří nádrže a jejich obsah 80-99% hmotnosti celé rakety. Z Ciolkovského rovnice o principu pohonu raket v ideálním případě vyplývá, že jakákoliv hmotnost, která není palivo nebo náklad, je nadbytečná. V reálném světě toho však dosáhnout nelze, ale je zde snaha o optimalizaci všech komponent, aby měly co nejlepší vlastnosti a co nejnižší hmotnost.

Nádrže do raket se odvíjí od mise, na kterou je daná raketa navrhována. Tento návrh bude optimalizován pro studentskou raketu studentského týmu CTU Space Research (dále jen CTU SR), jež nyní funguje na fakultě Strojní ČVUT v Praze. Cílem práce tohoto týmu je vyvinout raketu a zúčastnit se mezinárodní studentské soutěže European Rocketry Challenge (dále jen EuRoC) v Portugalsku v říjnu roku 2024.

Práce obsahuje rešerši konstrukčních možností nádrží pro rakety obdobných parametrů, výběr vhodné varianty pro raketu týmu CTU SR, analytický návrh nádrže a její integraci do sestavy rakety. V návrhu je i vytvoření 3D modelu nádrže, který bude sloužit jako podklad pro výrobu. Součástí této práce je i příprava výroby navržením výrobních přípravků a diskuze samotného postupu výroby.

## 2 Rešerše

### 2.1 EuRoC a jeho požadavky

Pro účast na soutěži EuRoC je třeba splnit pravidla této soutěže, která mimo jiné udávají technické požadavky na rakety a jejich komponenty. Návrhu nádrží se týkají převážně dvě části pravidel, a to pravidlo 2.6 týkající se studentsky vyvinutých nebo upravených koupených pohonných systémů, pravidlo 4.2 týkající se studentsky vyvinutých a upravených koupených tlakových nádob a pravidlo 6.2 týkající se celkové strukturální integrity rakety. Z pravidel vyplývají následující požadavky [1].

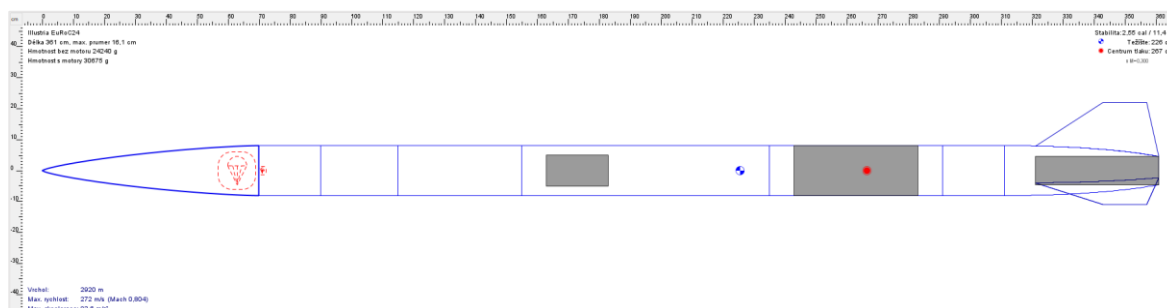
- Raketa musí být schopna natankování pohonnými látkami ve startovacím okně (90 min), a to včetně předtlakování.
- U pohonných systémů musí mít nádrž schopnost odvodu, aby nemohlo dojít k přetlakování a stavů z toho vyplývajících. Nádrže musí být možné ventilovat i dlouhodobě, například v případě dlouhodobého setrvání na startovní rampě.
- Všechny tlakové nádoby musí mít přetlakový ventil.
- Pro izotropní materiály musí být tlak porušení nádoby alespoň dvojnásobek očekávaného provozního tlaku.
- Pro nádoby z neizotropních materiálů (kompozitů, vláknově vyztužených plastů FRP, zahrnující ovíjené kovové nádoby COPV) musí být tlak porušení nádoby alespoň trojnásobek očekávaného provozního tlaku.
- Tlakové nádoby použité v soutěži musí projít tlakovou zkouškou alespoň jeden a půl násobku očekávaného provozního tlaku minimálně po dvojnásobek maximální očekávané provozní doby.
- Je doporučeno provést tlakovou zkoušku až do porušení tlakové nádoby.
- Raketa musí být navržena tak, aby vydržela provozní zatížení a zachovala si integritu za podmínek při pozemní manipulaci i v průběhu letu.
- Na žádném nosném prvku rakety nesmí být použito PVC a jiné nízkoteplotní polymery.

### 2.2 Základní návrh rakety

Pravidla EuRoCu určují, co by měly nádrže splnit, ale nic neříkají o jejich dalších vlastnostech. Pro vlastní rešerši je potřeba specifikovat základní vlastnosti rakety, do které budou integrovány. Tým CTU Space Research plánuje pro další ročník, EuRoC 2024,

soutěžít v kategorii s vrcholem ve výšce 3 km. Na základě letových požadavků a účasti týmu na soutěži EuRoC v roce 2023 s raketou Illustria, vznikl v týmu návrh nové varianty rakety.

Tento návrh vznikl za pomoci simulačního softwaru OpenRocket. Program OpenRocket je vytvořen pro simulaci letu raket s motory na pevné pohonné látky. Je však možné simulovat i let rakety s hybridním nebo kapalinovým motorem. Program dokáže pracovat s více motory zapálenými najednou. Každý motor má zde zadanou tahovou křivku a hmotnost s palivem a bez něho. Pokud motor je navržen tak, aby měl téměř nulový tah a přitom měl úbytek hmotnosti, může tak simulovat nádrže. Návrh rakety je možné vidět na Obr. 1.



Obr. 1 Návrh rakety s hybridním motorem [2]

Pro návrh, velikosti jednotlivých částí raket, dosažitelných hmotností a potřeby jednotlivých komponent, byly využity zkušenosti se stavbou předešlé rakety Illustria.

## 2.2.1 Bližší informace o raketě

Nová raketa míří na stejnou výšku jako předchozí. Bude jí hmotností velmi podobná. Vychází to na startovní hmotnost 30,6 kg, při délce 3610 mm. Abychom nemuseli v týmu dělat vše z nuly, např lepicí přípravky atd., pro zaměnitelnost sekcí a pro modulárnost celé platformy raket, zůstává z minulého roku vnější průměr, a to  $d = 161$  mm.

Raketa v loňském ročníku měla potíže s úst'ovou rychlostí na konci rampy pro jistotu stabilního letu dle pravidel. Tento problém je letos vyřešen navýšením tahu motoru, a to na  $T = 3\,000$  N. Zvýšení tahu ale neovlivní celkový impuls motoru, ten zůstává na  $I_c = 10\,000$  Ns. Stejně taky zůstávají hmotnosti okysličovadla a paliva, kde celková hmotnost pohonných látek z předběžného návrhu vychází na  $m_c = 5,56$  kg, což vychází při spalovacím poměru okysličovadla s palivem (O/F ratio) 4:1 na hmotnosti paliva  $m_f = 1,11$  kg a  $m_o = 4,44$  kg hmotnosti okysličovadla. Jako palivo naše propulsion sekce volí 3D tištěný plast

ABS. Palivo je 3D tištěné pro možnost rychlé modifikace a tím možné rychlé adaptace změn. Jako Okysličovadlo je zvolen oxid dusný  $N_2O$  v kapalném stavu. Tohoto stavu dosáhne tento plyn za pokojové teploty, tj  $20\text{ }^\circ\text{C}$  při tlaku 5MPa. Nádrže a palivová soustava tak musí být dimenzovány jako vysokotlaké tlakové nádoby [2]. Bližší parametry navrhované rakety shrnuje Tab č. 1.

Startovní hmotnost	30,6	Kg	Délka rakety	3610	mm
Celkový impuls motoru	10 000	Ns	Průměr	161	mm
Hmotnost pohonných látek	5,56	Kg			
Hmotnost paliva	1,11	Kg	Palivo	ABS	
Hmotnost okysličovadla	4,44	Kg	Okysličovadlo	$LN_2O$	
Tah motoru	3000	N			

Tab č. 1 Shrnutí parametrů návrhu rakety [2]

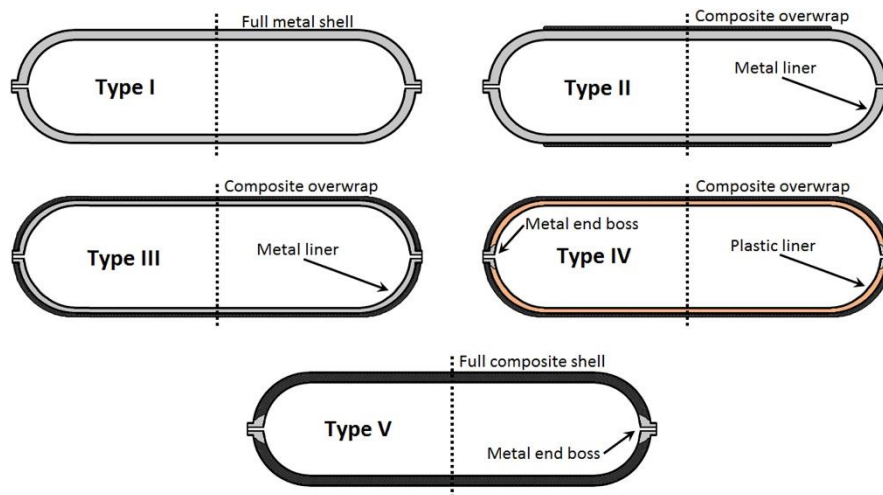
## 2.3 Rešerše jiných raket a jejich nádrží

Rešerše se bude týkat jak ostatních studentských týmů zúčastňujících se dané soutěže, tak výrobců jiných menších raket, kde jsou ještě relativně podobné jak konstrukční řešení, tak možnosti technologie výroby. Jako maximum beru raketu Elektron, která je sice už řádově větší raketou, ale její inovativní design navíjených kompozitových nádrží je možnou inspirací i pro menší měřítko.

Kvůli volbě okysličovadla kapalného oxidu dusného ( $LN_2O$ ), se kterým bude pracováno za pokojové teploty, vychází požadavek na minimální přetlak v nádrži  $p=5\text{ MPa}$ , jako tlak, při kterém se za pokojové teploty oxid dusný vyskytuje v kapalném skupenství. Pro splnění tohoto požadavku je nutné brát nádrže jako vysokotlaké tlakové nádoby. Podle normy ISO 11439:2013 můžeme rozdělit takovéto nádoby do kategorií podle jejich konstrukce [3].

- Typ I: Celokovová konstrukce tlakové nádoby
- Typ II: Kovová tlaková nádoba s výztuhou ovinutím na válcové části tlakové nádoby. Kovový liner nese až 55 % zatížení od vnitřního přetlaku.
- Typ III: Kompozitová nádoba s kovovým linerem uvnitř. Kompozit nese veškeré zatížení od vnitřního přetlaku.

- Typ IV: Kompozitová nádoba s polymerovým linerem. Kompozit nese veškeré zatížení od vnitřního přetlaku.
- Typ V: Celokompozitová nádoba bez vnitřního lineru.



Obr. 2 Typy tlakových nádob [8]

### 2.3.1 Typ I: Celokovová nádrž

Nejkonzervativnější metodou výroby nádrží je celokovová nádrž. Může být vyrobena z jednoho kusu, ale většinou je spojena z několika komponent svařením či šrouby. Tento typ nádrží se používá již od prvních raket s kapalinovým pohonem, jako byla německá V2 přes všechny balistické i orbitální, vojenské, civilní i komerční, až po největší dnešní rakety, jako jsou SLS a Super Heavy Starship.

Výhodou volby kovových nádrží jsou zejména v dnešní době dobře zvládnutá teorie o chování izotropních materiálů, a tedy jednodušší návrh, možná výroba z kusů u větších rozměrů, a tedy absence rozměrných přípravků. Pro danou velikost rakety je snadnější dostupnost a variabilita materiálů, i možnosti výroby, jelikož obráběním a svařováním kovů se zabývá v ČR mnohem více firem než například navíjením kompozitů. Svoji roli hraje i cena, kde materiál i výroba z výše uvedených důvodů je pro celokovové nádoby nižší než pro jiné typy. Tento typ nádrží je obzvláště vhodný pro použití kryogenních pohonných látek, kde při nižších teplotách vznikají velká vnitřní pnutí u kompozitních nádob. To v nádrži z jednoho (pro svařované nádrže) nebo více podobných materiálů nehrozí. Vnitřní pnutí v kompozitních konstrukcích vznikají z důvodu různých koeficientů teplotní

roztlačnosti kompozitu a případných kovových insertů, jež jsou nutné minimálně pro přidělení armatur a senzorů. Velikou nevýhodou tohoto přístupu je hmotnost, která vyjde vždy vyšší u kovů z důvodu vysokého poměru hmotnosti a pevnosti oproti kompozitům. Při použití na raketách hraje však hmotnost velmi významnou roli. Na soutěži EuRoC volí tuto variantu výroby nádrže většina týmů. Na Obr. 3 je možné vidět kovovou nádrž na oxidličovadlo (kapalný  $N_2O$ ) rakouského týmu ASTG pro jejich raketu v kategorii s dostupem 3 km, poháněnou hybridním raketovým motorem. Kuriozitou tohoto designu bylo podchlazení oxidličovadla na  $0\text{ }^\circ\text{C}$  pro zvýšení jeho hustoty. Tým ASTG v roce 2023 soutěž EuRoC s daným designem vyhrál.

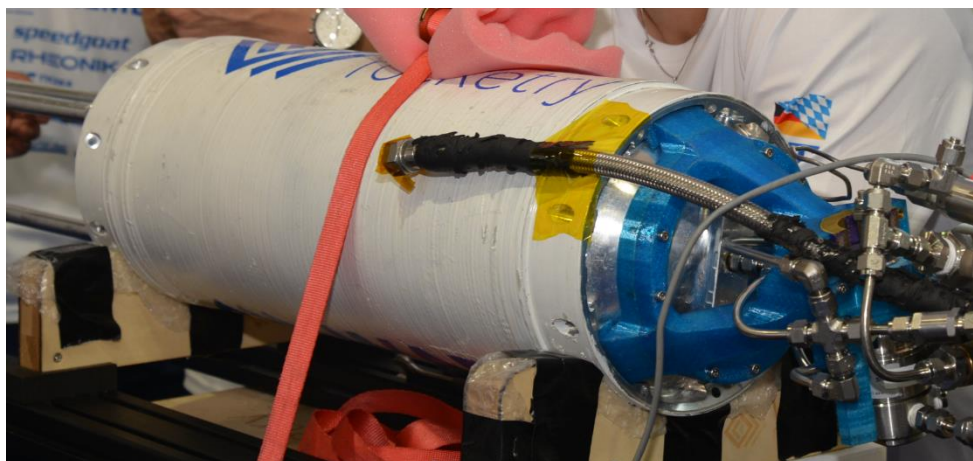


Obr. 3 Svařovaná kovová nádrž týmu ASTG [19]

### 2.3.2 Typ II: Vyztužená kovová nádrž

Tento typ nádrže je velmi podobné konstrukce jako kovová nádrž. Víčka nádrže jsou čistě kovová. Válcová část je ale vyztužená ovinutím kompozitem. Tato vyztuha je z důvodu rozložení napětí, kde obvodové napětí je dvojnásobné oproti meridiánovému. Toto ovinutí tak pomáhá přenášet obvodovou část napětí a je možné ubrat tloušťku kovu ve válcové části. Tím dojde ke značnému odlehčení nádrže.

Tento typ nádrží je také hojně využíván týmy na soutěži EuRoC. Na Obr. 4 je možné vidět tento typ nádrže použitý německým týmem WARR na soutěži EuRoC v roce 2023 pro jejich raketu s kryogenním kapalinovým motorem na kombinaci kapalného  $O_2$  jako oxidličovadla a ethanolu jako paliva.



Obr. 4 Nádrž týmu WARR (foto Autor)

### 2.3.3 Typ III a Typ IV: Kompozitová nádoba s linerem

Tyto dva typy nádrží jsou velice podobné, liší se pouze ve složení vnitřního lineru. Konstrukce těchto typů nádrží je na rozdíl od předchozích téměř celá z kompozitu. Kompozit nese všechno zatížení od vnitřního přetlaku. Liner je zde pouze jako vrstva zabráňující v kontaktu kompozitu a obsahu nádrže a zároveň u některých variant jako těsnící element, protože kompozitní vrstva je oproti kovu více propustná. Liner může být kovový, tj. ze stejných materiálů jako předchozí typy, ale jeho tloušťka je řádově od desítek mikrometrů až po jednotky milimetrů. Dále lze jako liner použít i plasty, ale pouze v případech, že jsou nereaktivní s obsahem nádrže nebo jej nedestabilizují, což je velice důležité u nádrží na okysličovadlo, jelikož některé z nich, například tekutý  $N_2O$ , či tekutý  $O_2$  mohou být i na malou kontaminaci citlivé a může hrozit až následný samovolný výbuch.

Z důvodu výrobních postupů, kdy se nádrž vyrábí ovíjením buď samotného lineru, či odstranitelného jádra s linerem, vlákny ať už uhlíkovými, aramidovými nebo skleněnými a následným vytvrzením v kompozitní strukturu, se nazývá tento typ nádrží zkratkou COPV, z anglického composite overwrapped pressure vessel, v překladu kompozitem ovinutá tlaková nádoba [3], [4].

Kvůli absenci silné kovové vrstvy je tento typ tlakových nádob výrazně lehčí, ale zároveň kvůli komplikovanosti výroby navíjením je také výrazně dražší. Navíjení je také nutné dělat strojově a dá se tak proces snadněji automatizovat.

Velikou výhodou takto vyrobené nádrže je možnost vyrobit v kuse nádrž i s navinutým límcem, který ji připojuje do zbytku rakety a tvoří tak dohromady celek nádrže i s její zástavbou a kusem trupu, během jednoho výrobního procesu. Z navíjecího stroje odejde tak téměř hotový segment rakety.

Tento typ tlakových nádob je velmi vhodný pro použití jako nádrž v raketách, ale také je nadějný pro veškerý průmysl, kde je jedním z nejrychleji rostoucím odvětvím pro použití kompozitů [5]. Použití ve velkých raketách je pro čistě kompozitové nádrže zatím jen výjimkou než pravidlem, ale nově navrhované nosiče s nimi počítají.



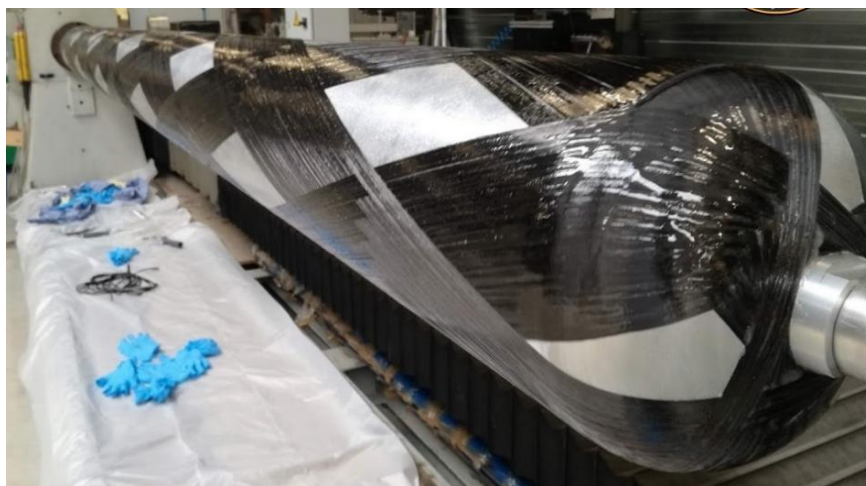
Obr. 5 Liner pro výrobu COPV nádrže [5]



Obr. 6: Segment rakety s integrovanou nádrží [20]

Nádrž tohoto designu použili studenti TU Delft ve své sondážní raketě Stratos IV viz Obr. 7. Raketa by měla pokořit výšku 32 km a je 8,2 m dlouhá, nádrž na okysličovadlo má průměr 278 mm a pojme 226,1 kg okysličovadla ve formě  $N_2O$ . Nádrž je vyrobena z hliníkového lineru tloušťky 1,5 mm a následně ovinutá uhlíkovým kompozitem [6].





*Obr. 7 Navíjení nádrže na liner pro raketu Stratos IV [7]*

### **2.3.4 Typ V: celokompozitová nádrž bez vnitřního lineru**

Cílem vývoje kompozitových nádrží je dosáhnout výroby, tak se při ní použilo pouze kopyto a ovinulo se kompozitem, je to pak jednoduše automatizovatelné, což může srážet výslednou cenu u větších sérií. Tento typ nádrží také vyjde vždy nejlehčí, protože jakýkoliv liner je hmotnost navíc, která zde není. Omezením je možnost použití pouze tam, kde nehrozí riziko při kontaktu s obsahem nádrže a pro látky, které kompozitní stěna nepropouští. Problém také může nastat u použití za kryogenních teplot, jelikož může docházet k mikrotrhlinám, degradaci a následnému poškození kompozitní stěny [8].

Pro výrobu kompozitových nádrží je možné použít kompozity jak s termosetovou, tak termoplastickou matricí. Výhodou termoplastické matrice je odpadnutí nutnosti použít pec/autokláv pro vytvrzení kompozitu, a hlavně možnost nádrží svařit z více polotovarů [9]. Výrobu samostatného dómu je možné vidět na Obr. 8.

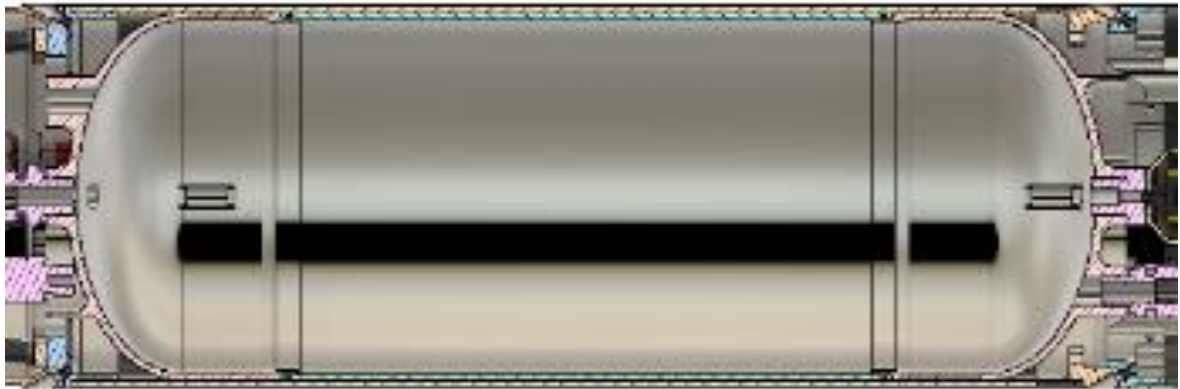


Obr. 8 Výroba dómu nádrže z uhlíkového kompozitu s termoplastickou maticí [9]

### 2.3.5 Typ II/III kompozitová nádrž s vlepenými víky

Mimo klasifikaci se nachází nádrž našeho týmu CTU Space Research na raketu Illustria. Její konstrukce je mezi nádržmi typu II a typu III. Původní návrh spočíval v navinutí kompozitové trubky, která byla spočtena pro přenesení zatížení od vnitřního přetlaku, do které se následně vlepila dvě kovová víka, vyrobená z hliníkové slitiny. Tento design umožňuje snadnou změnu objemu nádrže při postupném vývoji návrhu rakety, jelikož lze víka před zalepením v trubce libovolně posouvat. Víka nejsou ovinuta a jsou pouze zalepena, takže nádrž nesplňuje parametry ani tlakové nádoby typu II ani typu III. Tímto vlepením do trubky je také vyřešena integrace do rakety, stěnová trubka nádrže je rovněž vnější stěnou trupu rakety. Z výpočtů vyplynulo, že namáhání od vnitřního přetlaku na tuto stěnu je násobně vyšší než letové zatížení, stěna nádrže tak zároveň slouží jako strukturální část trupu rakety.

Kvůli komplikacím s kompatibilitou tekutého  $N_2O$  a kompozitní stěny byla mezi víka vlepena vrstva hliníkového lineru, na první pohled tak nádrž vypadá jako ovinutá COPV, ale její konstrukce je odlišná, protože válcová část hliníkového lineru nepřenáší zatížení a víka jsou zavinuta přímo do kompozitu přes tvarový zámek. Tento zámek byl původně navržený pro lepený spoj, víka měla být vlepena do trubky, při výrobě se ukázalo zavinutí těchto vík přímo do kompozitu jako jednodušší a pevnější. Válcová část lineru není pevně spojena s víky a je pouze nasazena a utěsněna o-kroužkem. S tímto designem (Obr. 9) se tým zúčastnil soutěže EuRoC v roce 2023 [10].



Obr. 9 Řez modelem nádrže v raketě Illustria

## 2.4 Zhodnocení rešerše

V rešerši bylo pojednáno o několika konstrukčních typech tlakových nádob pro možné použití na nádrž do rakety. V této části budou rozebrány výhody a nevýhody každého přístupu a stanovena hodnotící kritéria. Pomocí těchto kritérií bude zvoleno nejvhodnější řešení pro použití ve studentské raketě.

### Typ I

Tento typ je návrhově nejjednodušší, jelikož kovové materiály mají izotropní vlastnosti. Největší komplikací tohoto designu je nízká specifická pevnost dostupných materiálů, především slitin hliníku, a tím vychází vždy velká hmotnost. Toto lze vyřešit použitím lepších materiálů, např. titanové slitiny, u kterých je zase problematická především vysoká cena. Komplikací je také výroba, jelikož v našem týmu máme špatné zkušenosti se svařováním z hliníkových slitin a nemáme ani vlastní kapacity na jejich svařování. Při výrobě by se tak muselo jít takřka od nuly. Díky celokovové konstrukci zde nejsou žádné omezení pro kontakt s oxidizačním činidlem.

### Typ II

Z Laplaceovy rovnice (viz kapitola 3.4.1) vychází, že v radiálním směru je u tlakových nádob dvojnásobné zatížení oproti meridiánovému směru. Ovinutím se výrazně zjednoduší návrh, kompozit pomáhá přenést jednosměrné radiální zatížení a kovová stěna je tak dimenzována na nižší napětí meridiánové a není zde potřeba komplikovaný výpočet. Tento typ vychází lehčí oproti nádobám typu I. Díky možnostem jednoduchého navíjení kompozitů ve škole zde ani není komplikace s výrobou. Kompatibilita s  $N_2O$  zde také není omezena.

### **Typ III a IV**

Typ III a IV je výpočetně složitější, ale vychází výrazně lehčí oproti typům I a II, díky vyšší specifické pevnosti kompozitů a nadimenzování vrstev a jejich směrů vysokou pevností přesně podle směrů zatížení. Oproti typu V je zde ale zjednodušení, jelikož při zatížení přetlakem zajišťuje těsnost liner a může se dojít do stavu, kdy daná vrstva pevnostně vydrží, ale ztratí těsnost. Díky dřívějším zkušenostem z minulého ročníku soutěže a dlouhodobou spolupráci s firmou Compo Tech PLUS, spol. s r.o. (dále jen CompoTech), zde se neočekává komplikace s navíjením kompozitní konstrukce. Problematická je výroba kovového nebo polymerového lineru. U kovové varianty je problematická jeho výroba, jelikož pro izolaci N<sub>2</sub>O od stěny kompozitu stačí liner o tloušťce řádově několika desetin mm. U takto tenké konstrukce je pak problém s integritou při ovíjení nádoby. Problém s polymerickým linerem je hlavně s tím, že jen málo organických látek je vhodných pro kontakt s N<sub>2</sub>O. U těch, které vhodné jsou, je komplikované z nich vyrobit tenký povlak.

### **Typ V**

Zde je největší problém s návrhem, jelikož kvůli absenci lineru musí těsnost zajistit kompozitní stěna. Je tak nutné dobře navrhnout skladbu kompozitu, aby neztratil těsnost až do porušení vláken. Je zde také velký problém s kompatibilitou s N<sub>2</sub>O.

### **Typ II/III**

U tohoto typu vychází relativně dobře hmotnost, hlavně díky možnosti navíjení vláken ve směru v ose nádoby, a vychází tak nejmenší tloušťka stěny. Hmotnost mírně zvyšuje použití kovových vík a lineru uvnitř trubky. Problematická je optimalizace vík pro co nejnižší hmotnost a aby byl díl po odlehčení vyrobitelný. Což je komplikace, protože se pak jedná o relativně velký tenkostěnný třískově obráběný díl.

## **2.5 Výběr nejvhodnějšího typu**

Pro výběr nejvhodnějšího typu bylo použito metod multikriteriálního rozhodování, byla využita *metoda pořadové funkce*. Napřed byly zvoleny parametry, podle kterých se hodnotilo. Ke každému parametru byla přiřazena váha, podle jeho důležitosti. Tyto váhy byly zvoleny tak, aby jejich součet byl roven jedné. Následovalo ohodnocení typů, podle toho, jak splňují dané parametry. Byly ohodnoceny čísla od 1, jako nejhorší výsledek, po 6, jako nejlepší. Pokud byly jejich vlastnosti v daném kritériu obdobné, byly ohodnoceny stejným počtem bodů. Tyto přiřazené body byly poté vynásobeny váhou a pro každý typ

sečteny. Výsledkem je vážený počet bodů. Nejvhodnější typ má obvykle nejvíce bodů. Tato metoda nevyhodnotí vždy jeden nejlepší kus, ale jsou na ní velice dobře vidět nevhodné varianty.

### **2.5.1 Volba hodnotících kritérií**

Po předchozí rozvaze byla zvolena následující kritéria. U daných kritérií pak bylo přiřazeno hodnocení od 1 do 6, kde 6 daný typ má nejlepší vlastnosti a 1 nejhorší. Pokud nebylo možné rozhodnout, která z variant je na tom lépe, byly jim přiřazeny stejné hodnoty.

#### **Hmotnost**

Výstižnější v této fázi návrhu by bylo pojmenovat toto kritérium očekávaná hmotnost, ale kvůli přehlednosti tabulek bylo zvoleno jen hmotnost. Hmotnost takového velkého dílu u rakety je nejdůležitější kritérium. Na soutěži EuRoC je dána minimální rychlost při opuštění rampy. Motor pro novou raketu je již v pokročilé fázi návrhu a těžko se bude měnit jeho tah a je tak nutné, aby velké díly navrhované a vyráběné studenty v týmu, jako je nádrž, byly co nejlehčí, aby zbyla co největší hmotnostní rezerva pro díly, které se musí koupit a s jejichž hmotností tak nelze hýbat. Kvůli omezenému tahu motoru je důležité držet se co nejvíce prvotního hmotnostního odhadu, aby daný tah byl dostatečný k urychlení na požadovanou rychlost na rampě. Odstrašujícím případem byla raketa německého týmu na soutěži v roce 2023. Raketa měla malý tah motoru a byla příliš těžká, a tak byl tým nucen pro zajištění bezpečného letu rakety vyrobit si svojí startovní rampu s téměř dvojnásobnou délkou oproti ostatním soutěžním rampám. Všeobecně u raket je snaha minimalizovat hmotnost vlastní rakety a tím maximalizovat hmotnost užitečného nákladu, který je to důležité na dané misi. Jak bylo popsáno v rešerši, nejlépe hmotnostně vychází kompozitní nádoby, jsou tak hodnoceny nejlépe. Naproti tomu nejhůře vždy vychází čistě kovová nádoba.

#### **Náročnost výroby**

Opět by bylo vhodnější toto brát jako očekávaná náročnost. Zde byly porovnávány možnosti výroby s ohledem na předchozí zkušenosti. Nejlépe je zde na tom loňský design, kde stačí postup pouze zopakovat. Nejhůře jsou na tom nádoby s tenkým linerem, kvůli obtížím s výrobou linerů, obzvláště polymerickým a čistě svařovaná nádoba, jelikož by se musely sbírat zkušenosti s touto technologií od nuly.

#### **Kompabilita s N<sub>2</sub>O**

Kompabilita s N<sub>2</sub>O je poměrně důležitý faktor, jelikož design musí projít schválením od odborné komise soutěže, která může tým vyloučit pro nesplnění požadavků. Jelikož je N<sub>2</sub>O kromě své chemické nestability poměrně agresivní rozpouštědlo, jsou i ze strany porotců doporučeny kovové kontaktní povrchy. Všeobecně prokazování kompability s N<sub>2</sub>O u polymerů je problematické. Typy nádob s vnitřním kovovým povrchem tak obdržely nejlepší hodnocení a nejhůře byl hodnocen typ bez lineru, který je pro toto použití naprosto nevhodný.

### Složitost návrhu

Pro kovové tlakové nádoby je postup výpočtu poměrně přímočarý. Pro kompozity kvůli využití jejich silně neizotropních vlastností je výpočet mnohem složitější, obzvláště když se mění geometrie a tloušťka stěny, což nastane, pokud se jedná o celonavíjenou tlakovou nádobu. Výpočet je komplikovaný pro typ V, kde dojde k porušení nádoby při ztrátě těsnosti kompozitu, což ale nemusí znamenat porušení stěny. Přiřazení pořadí je tak poměrně jasné, nejlépe je na tom typ I a nejhůře je na tom typ V.

### 2.5.2 Volba váhového faktoru

Daným kritériím byly přiřazeny váhy podle jejich důležitosti pro návrh. Nejvyšší důležitost byla přiřazena hmotnosti. Byla zvolena váha 5. Dále je kvůli hodnocení porotců důležité prokázat kompabilitu s okysličovadlem. Pro ni byla zvolena váha 3. Náročnost výroby a složitost návrhu je oproti předchozím kritériím méně podstatná při volbě typu nádrže a byla zvolena u obou váha 1. Součet všech váhových faktorů musí být roven jedné a jsou tak váhové faktory poděleny jejich součtem.

V následujících tabulkách jsou nejprve spočtené váhy parametrů (Tab č. 2), přiřazené hodnocení variant (Tab č. 3) a následné vyhodnocení multikriteriálního rozhodování (Tab č. 4).

Tab č. 2 Volba kritérií pro výběr a jejich vah

kritéria	váha	přepočtená váha
očekávaná hmotnost	5	0,5
očekávaná náročnost výroby	1	0,1
kompabilita s okysličovadlem	3	0,3
výpočetní složitost návrhu	1	0,1
suma	10	1

Tab č. 3 Hodnocení kritérií

kritéria	typ I	typ II	typ III	typ IV	typ V	Typ II/III
	celokovová	kovová ovinutá	navíjená kov liner	navíjená poly liner	navíjená bez lineru	navíjená s víky
Očekávaná hmotnost	1	2	5	5	6	4
náročnost výroby	3	5	3	1	4	6
kompatibilita s okysličovadlem	6	6	6	3	1	6
výpočetní složitost návrhu	6	5	3	3	1	4

Tab č. 4 Vyhodnocení variant

kritéria	váha	typ I	typ II	typ III	typ IV	typ V	Typ II/III
		celokovová	kovová ovinutá	navíjená kov liner	navíjená poly liner	navíjená bez lineru	navíjená s víky
očekávaná hmotnost	0,5	0,5	1	2,5	2,5	3	2
očekávaná náročnost výroby	0,1	0,3	0,5	0,3	0,1	0,4	0,6
kompatibilita s okysličovadlem	0,3	1,8	1,8	1,8	0,9	0,3	1,8
výpočetní složitost návrhu	0,1	0,6	0,5	0,3	0,3	0,1	0,4
suma	1	3,2	3,8	4,9	3,8	3,8	4,8

## 2.6 Výběr varianty pro detailní návrh

Z multikriteriálního rozhodování vychází jako nejvhodnější varianta Typ III: nádoba s kovovým linerem. O kousek hůře vychází nádrž typu II/III, tedy s obdobnou konstrukcí, jako byla v předchozím roce. Naopak jako nejméně vhodná vychází kovová nádrž.

Nádoba typu III byla zvolena pro další pokračování návrhu, detailním konstrukčním návrhem.

## 3 Návrh nádrže

V této kapitole bude navržena vlastní kompozitová nádrž. Návrh proběhne pomocí analytického výpočtu s následnou pevnostní kontrolou pro všechny letové a manipulační stavy.

### 3.1 Parametry nádrže

Pro vlastní návrh je potřeba nejdříve definovat všechny požadavky na nádrže, jež z návrhu rakety a jejích letových parametrů vychází.

V Kapitole 2.2 Základní návrh rakety je již definována hmotnost potřebného oksličovadla pro dosažení soutěžní výšky, a to  $m_o = 4,44$  kg. Kapalný  $N_2O$  je dodáván v tlakových lahvích s tlakem 5 MPa. Při ročníku soutěže EuRoC v roce 2023, bylo týmu doporučeno dimenzovat všechny palivové soustavy na  $N_2O$  na tlak 6 MPa, pro případ, že na místě soutěže v Portugalsku při dlouhém čekání na rampě při odpalu se na sluníčku může tlaková láhev a plyn v ní zahřát, a tím může být pracovní tlak až 6 MPa. Tento tlak byl zvolen jako nominální pracovní tlak. Jelikož je to limitní provozní případ, bylo počítáno s parametry oksličovadla pro tlak 5 MPa. Parametry  $N_2O$  pro pracovní podmínky shrnuje Tab. č. 5 Vlastnosti oksličovadla. Objem oksličovadla lze pak snadno vypočít

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3.1)$$

Tab. č. 5 Vlastnosti oksličovadla

Kapalný $N_2O$ – vlastnosti		
tlak	5	MPa
hmotnost	4,44	kg
hustota	780	kg/m <sup>3</sup>
objem	0,00569	m <sup>3</sup>

Potřebný objem nádrže je zvolen větší o 20 % pro rezervu při změně parametrů rakety při dalším vývoji a je zaokrouhlen na nejbližší vyšší desetinu litru. Zvětšení nádrže má kormě zvýšení kapacity i bezpečnostní důvod. Při přechovávání látky, která je za atmosférických podmínek plynná, v kapalném stavu, je zde riziko jejího odpaření. Pokud by byla nádrž plná, kvůli fázové přeměně kapaliny na plyn, by mohlo dojít (například při prudkém zahřátí)



k obrovskému nárůstu tlaku a k porušení nádrže a následnému výbuchu. Výsledné parametry pro návrh nádrže je možné vyčíst v Tab č. 6 Výsledné parametry nádrže

Tab č. 6 Výsledné parametry nádrže

Parametry nádrže		
Objem LN <sub>2</sub> O	5,69	1
koeficient	1,20	-
objem nádrže	6,83	1
zaokrouhleno	6,90	1

## 3.2 Rozbor zatížení

Jak vyplývá ze souhrnu pravidel kapitola 2.1, nádrž musí být navržena na přetlak pracovní látky a zároveň musí vydržet letové a manipulační zatížení. Po rozboru pravidel a letu rakety byly v týmu CTU Space Research určeny následující případy zatížení:

- Příklad 1, natankovaná raketa, limitní případ zatížení
- Příklad 2, moment startu
- Příklad 3, vytažení padáku
- Příklad 4, manipulační zatížení

Nejdůležitější a největší zatížení je očekávané od přetlaku pracovní látky. Toto zatížení bude vzato jako návrhové. Pro další případy bude následně provedena pevnostní kontrola navrženého laminátu.

### 3.2.1 Příklad 1

Pravidla soutěže EuRoC určují minimální požadavky pro studentsky vyvinuté a vyrobené talkové nádoby (viz kap. 2.1). Návrhový tlak pro nádoby z anizotropních materiálů, což kompozity jsou, je trojnásobek maximálního provozního tlaku. Pro náš případ, kde pracovní přetlak je určen jako  $p_{nom} = 6 \text{ MPa}$ , to bude

$$p = 3 \cdot p_{nom} = 3 \cdot 6 = 18 \text{ MPa} \quad (3.2)$$

Tento tlak vstupuje do výpočtu kompozitní stěny jako návrhový.

### 3.2.2 Příklad 2

Tento případ byl určen jako maximální zatížení při průběhu letu, kdy k přetlaku je raketa namáhaná ještě axiální tlakovou silou. Tento případ nastane při startu natankované rakety. Při startu rakety působí krom přetlaku ještě letové zatížení tlakem od tahu motoru. Po dohoření motoru je raketa odtlakována, další případy tak už nepočítají s vnitřním přetlakem. Při startu se počítá s maximálním provozním tlakem a zatěžující silou:

$$p = 6 \text{ MPa} \quad (3.3)$$

$$F_x = -3000 \text{ N} \quad (3.4)$$

### 3.2.3 Příklad 3

Tento případ počítá s maximální tahovou silou na raketu při letu. Tento případ nastane při otevření hlavního padáku. Zatížení bylo určeno jako:

$$F_x = 5120 \text{ N} \quad (3.5)$$

### 3.2.4 Příklad 4

Tento případ počítá s namáháním při pozemní manipulaci s raketou, kdy je vodorovně a její vlastní hmotnost na ní působí ohybovým momentem. Maximální zatížení bylo určeno jako manipulační moment:

$$M_o = 500 \text{ Nm} \quad (3.6)$$

Tab. č. 7 Případy zatížení nádrže

Případ	Zatížení		
	přetlak [MPa]	síla [N]	ohybový moment [Nm]
Případ 1	18	-	-
Případ 2	6	-3000	-
Případ 3	-	5120	-
Případ 4	-	-	500

### 3.3 Teorie výpočtu

Pro analytický výpočet byl zvolen postup pomocí ABD matice. Kompozitní stěna je složena z vrstev. Na každou tuto vrstvu – laminu je pohlíženo jako na ortotropní materiál, u něhož se předpokládá, že je lineárně elastický. Pro takovýto materiál je možné psát Hookův zákon ve tvaru

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Zkráceně lze tento vztah přepsat

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{S} \boldsymbol{\sigma} \quad (3.8)$$

kde  $\boldsymbol{\varepsilon}$  je vektor deformací,  $\boldsymbol{S}$  matice poddajnosti a  $\boldsymbol{\sigma}$  vektor napětí.

Na laminu se pohlíží jako na případ rovinné napjatosti, lze pak sepsáním všech nenulových řádků Hookův zákon přepsat do tvaru

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Vzhledem k tomu, že je matice poddajnosti symetrická, musí platit

$$S_{12} = S_{21} \quad (3.10)$$

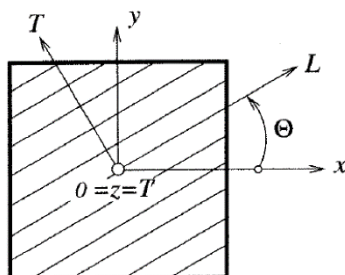
Při přepsání do souřadnicového rovinného systému laminy, kde jsou směry značeny jako podélný L, ve směru vláken výztuže a kolmý T, kolmo na směr vláken. V tomto souřadnicovém systému vůči dané lamině bude s použitím matice poddajnosti HZ vypadat

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{TL}}{E_L} & 0 \\ \frac{\nu_{LT}}{E_T} & \frac{1}{E_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

S maticí tuhosti  $\mathbf{Q}$

$$\begin{bmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} & -\frac{\nu_{TL}E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} & 0 \\ \frac{\nu_{LT}E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} & \frac{E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Pokud je lamina se svým souřadnicovým systémem TL vůči globálnímu souřadnicovému systému xy natočena o úhel  $\theta$ , je možné přecházet mezi soustavami pomocí transformační matice  $\mathbf{T}$ .



Obr. 10 Pootočení laminy [21]

Lze tak přepočítat vektor napětí  $\sigma$  pomocí transformační matice  $T_\sigma$

$$\sigma_{LT} = T_\sigma \sigma_{xy} \quad (3.13)$$

konkrétně

$$\begin{bmatrix} \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Přepočítat lze také vektor deformací pomocí transformační matice  $T_\varepsilon$

$$\varepsilon_{LT} = T_\varepsilon \varepsilon_{xy} \quad (3.15)$$

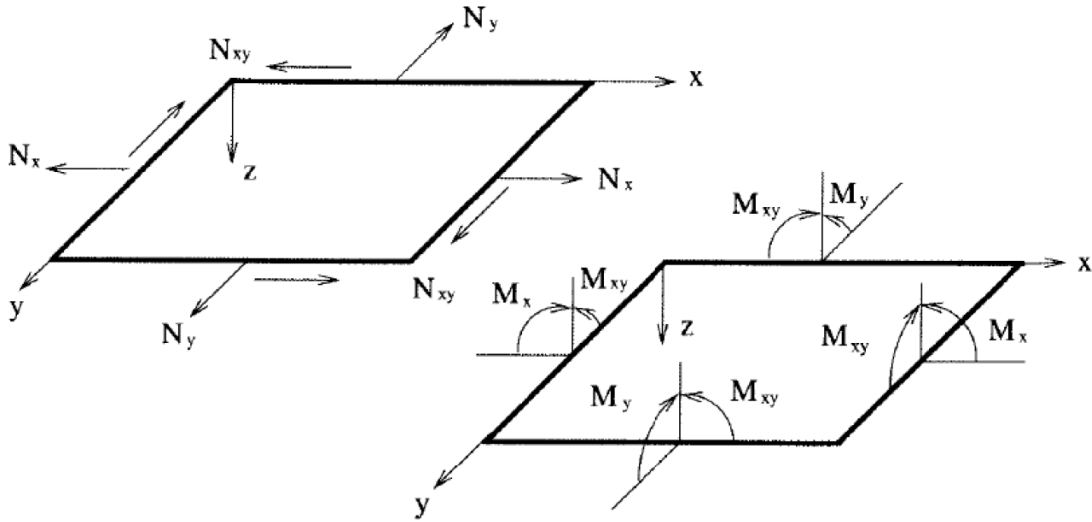
rozepsaně pak

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ 2\sin\theta\cos\theta & -2\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Dosazením do HZ pak dostáváme matici mimoosové tuhosti  $Q_{xy}$ , která určuje vlastnosti materiálu v systému xy. Tato matice dále pro přehlednost bude označována jako matice  $Q$ .

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_{xy} = \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{Q}_{LT} \mathbf{T}_\varepsilon \quad (3.17)$$

Toto platí pro jednu laminu, při složení více lamin se jednotlivé tuhosti lamin provází pomocí klasické laminátové teorie do ABD matice. Lze tak při znalosti všech sil a momentů působící na laminát vypočítat deformace, zkosity a křivosti.



Obr. 11 Zatížení elementu laminátu [11]

ABD matice pak slouží jako matice tuhosti pro celý laminát. HZ lze pak psát

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \dots \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \vdots & \mathbf{B} \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{B} & \vdots & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \dots \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ B_{11} & B_{12} & B_{13} & D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

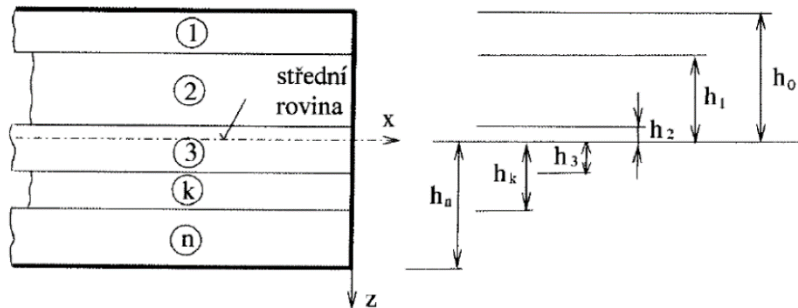
Prvky ABD matice získáme podle přepisů

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k \cdot (h_k - h_{k-1}) \quad (3.20)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k \cdot (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (3.21)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (Q_{ij})_k \cdot (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (3.22)$$

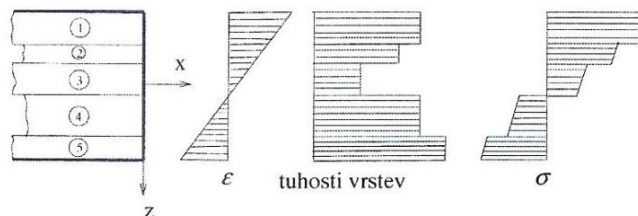
kde  $h_k$  jsou tloušťky jednotlivých vrstev počítané od střednice laminátu.



Obr. 12 Definice tlouštěk lamin kompozitní stěny [11]

Pro daný laminát je tak postup následující. Nejprve se zvolí počet vrstev, jejich tloušťky a orientace. Pak se vytvoří ABD matice pro daný laminát. Ze známých sil se utvoří vektor liniových sil a momentů. Spočítají se deformace laminátu jako

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_m^0 \\ \dots \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \vdots & \mathbf{B} \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{B} & \vdots & \mathbf{D} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \dots \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$



Obr. 13 Postup výpočtu pro získání napětí v jednotlivých vrstvách [11]

Tyto deformace platí pro všechny vrstvy. Nakonec se podle matic tuhosti v globálních souřadnicích  $\mathbf{Q}_k$  spočítají napětí v daných vrstvách a získáme tak globální napětí v každé  $k$ -té vrstvě.

$$\sigma_k = Q_k \varepsilon_m^0 \quad (3.24)$$

Přes transformační matici pak toto napětí je rozpočteno do směrů LT a je tak vyšetřeno namáhání jednotlivých lamin v jejich lokálních souřadnicových systémech. Toto napětí pak lze porovnat podle zvoleného kritéria a nadimenzovat tak laminát na dané zatížení.

$$\sigma_{LT}^k = T_{\sigma}^k \sigma_{xy}^k \quad (3.25)$$

### 3.3.1 Symetrický laminát

Pro tlakové nádoby se hojně využívá symetrická skladba laminátu. Symetrický laminát má nulovou matici B a není v něm tak vazba mezi silami a momenty. Laminát pak při zatížení silami nemá zkrut. Stěna tenkostěnné tlakové nádoby je namáhána membránově, takže je ve všech místech stěny namáhána tahem. Díky použití laminátové stěny můžou být vrstvy přesně ve směrech namáhání, tj. 0° a 90°. Tím lze efektivně využít vlastnosti vláken, a vede to ke snížení tloušťky stěny a tím pádem i hmotnosti.

## 3.4 Vlastní analytický výpočet

Vlastní výpočet laminátové stěny byl rozdělen na výpočet válcové části a části víka. Výpočet byl proveden pomocí softwaru Microsoft Excel, kde byl uskutečněn postup popsany v předchozí kapitole. Výpočet probíhal iteračním způsobem, geometrii udává střednice stěny, která byla pro první iteraci zvolena jako vnější průměr rakety. Následně byla navržena skladba a tloušťka stěny a bylo navrženo víko nádoby. Teď už měl laminát danou tloušťku a to upravilo vstupní parametry. Výpočet byl opakován, až byly odlazeny potřebné parametry kompozitní stěny.

### 3.4.1 Volba geometrie nádoby

Z teorie analýzy tenkostěnných tlakových nádob vyplývá, že namáhání bude membránové, tj. bude celá stěna namáhána na tah a průběh rozložení napětí a deformací na elementu bude pro celou tloušťku stěny stejné.

Zatížení takové nádoby popisuje Laplaceova rovnice



$$\frac{\sigma_m}{R_1} + \frac{\sigma_r}{R_2} = \frac{p}{h} \quad (3.26)$$

Jsou zde dva hlavní směry zatížení: meridiánový ve směru osy nádoby a radiální, kolmo na směr. Napětí v nich je přímo závislé na poloměru zakřivení stěny nádoby v daném směru.

Z Laplaceovy rovnice vyplývá, že pro izotropní materiály vychází pro nádobu nejlépe kulové víko, kde jsou stejné rádiusy v obou směrech. Při použití neizotropních materiálů, jako jsou kompozity, bylo vyvinuto více geometrií dómů, které reflektují jejich neizotropní vlastnosti, a geometrie tak může být optimalizována na tyto vlastnosti. Příklady jsou dóm s nulovým kolmým napětím ( $\sigma_T = 0$ ), dóm s nulovou kolmou deformací ( $\varepsilon_T = 0$ ), geodetický isotenzoid (GI) a dóm se stejnými deformacemi ( $\varepsilon_\psi = \varepsilon_\varphi$ ).

Pro naše použití nádoby s linerem byl zvolen dóm tvarem geodetického isotenzoidu, jelikož má nejlepší vlastnosti v případě, že jako porušení nádoby je brán případ porušení vláken kompozitu a nikoliv ztráta těsnosti kompozitu. Tuto těsnost v našem případě zajišťuje kovový liner [12].

### 3.4.2 Vektor liniových sil

Vlastnosti stěny závisí na poloměrech křivosti. Tyto poloměry jsou pro válcovou část shodné s osami  $x$  (v meridiánovém směru) a  $y$  (v kolmém směru), při dvojnásobném zakřivení se však otáčí směr  $y$  spolu se zakřivením nádoby (viz Obr. 12), bylo tak přestoupeno na souřadnicový systém  $\psi$ ,  $\varphi$ , a to následovně

$$\psi = x, \quad \varphi \approx y$$

Vlastní liniové síly jsou definovány [13]

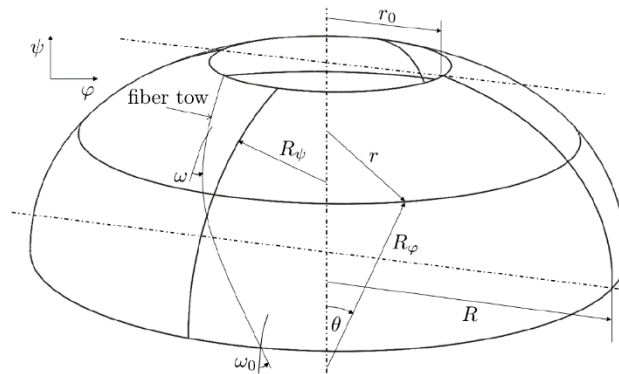
$$\sigma_\psi = \frac{N_\psi}{h} = \frac{pR_\varphi}{2} \quad (3.27)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{N_\varphi}{h} = \frac{pR_\varphi}{2} \left( 2 - \frac{R_\varphi}{R_\psi} \right) \quad (3.28)$$

Smykové napětí ve stěně jako v celku bude  $\tau_{\varphi\psi} = 0$ , pokud bude skladba stěny symetrický laminát. V každé vrstvě však vznikají smyková napětí ze vzájemného bránění si monovrstev ve volné deformaci.

### 3.4.3 Geodetický isotenzoid (GI)

Pro GI platí, že jeho skladba a úhly návinnu jsou definovány geometrií dómu, která je závislá jenom na poměru vnějšího průměru nádoby  $R$  a průměru středového otvoru  $r_0$ . Čím je otvor větší, tím větší je úhel vláken a tím hůře přenáší napětí v meridiánovém směru. Je tak snaha vytvořit nádobu s jedním menším otvorem uprostřed. Vizualizaci domu a důležitých souřadnic a rozměrů ukazuje Obr. 14.

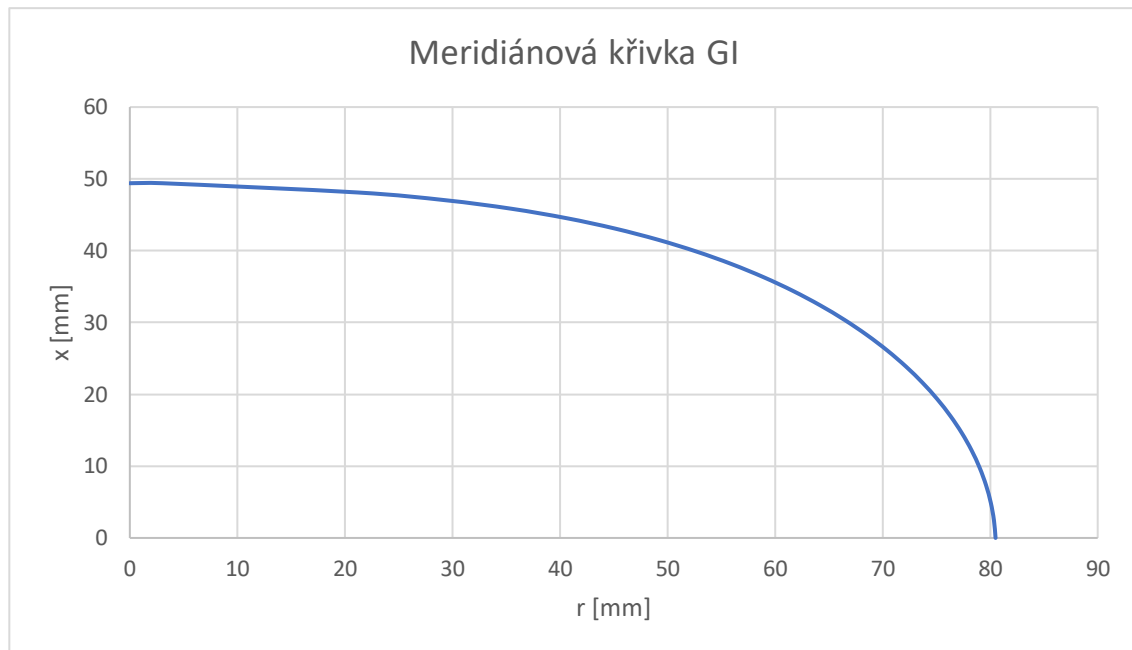


Obr. 14 Tvar dómu GI [12]

Pro obecnou rotačně symetrickou skořepinu lze psát diferenciální rovnici

$$rr'' = [1 + (r')^2] \left( \frac{N_\varphi}{N_\psi} - 2 \right) \quad (3.29)$$

kde  $r$  je daný poloměr na daném místě. Pro zadaný průběh  $N_\varphi/N_\psi = F(r)$  lze numerickou integrací získat meridiánový profil skořepiny a poloměry hlavních řezů. Pro předběžné hodnoty vizualizuje meridiánový profil Graf 1 Meridiánová křivka GI.



Graf 1 Meridiánová křivka GI

Úhel vinutí v daném bodě na skořepině je ve tvaru

$$\sin \omega = \frac{r_0}{r} \quad (3.30)$$

A tloušťku stěny můžeme určit

$$h = h_0 \frac{R \cos \omega_0}{r \cos \omega} \quad (3.31)$$

Pro geodetický isotenzoid, kvůli podmínce stejného zatížení všech vláken platí průběh zatížení na dómu

$$\frac{N_\varphi}{N_\psi} = tg^2 \omega \quad (3.32)$$

Dosažením rovnice (3.32) do rovnice (3.29) a následnou integrací lze získat poloměry hlavních řezů ve směrech  $\varphi$  a  $\psi$  [13].

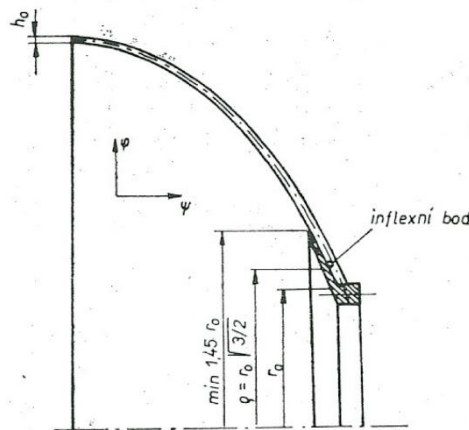
$$R_\varphi = \frac{R^3}{r^2} \sqrt{\frac{r^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2}} \quad (3.33)$$

$$R_{\psi} = \frac{R^3}{r^2} \cdot \frac{\sqrt{(r^2 - r_0^2)^3}}{\sqrt{R^2 - r_0^2} \cdot (2r^2 - 3r_0^2)} \quad (3.34)$$

Z rovnice (3.29) také vychází, že meridiánová křivka v blízkosti polárního otvoru bude mít inflexní bod

$$r_i = r_0 \sqrt{\frac{3}{2}} \quad (3.35)$$

Většina GI víka je konkávní a je namáhaná tlakem, za inflexním bodem je konvexní a je namáhaná tlakem. Pro praktický návrh byla použita metoda na základě článku [13]. „V praktických aplikacích se tento úsek nahrazuje kulovou nebo kuželovou plochou a koncová příruba se konstruuje tak, aby vyběhala až za místo inflexního bodu“ [13]. Vizualizaci tohoto problému shrnuje Obr. 15.



Obr. 15 Schéma polární příruby GI s doporučenými rozměry [13]

#### 3.4.4 Kritérium porušení kompozitu, koeficienty bezpečnosti

Kritérium porušení kompozitu úzce souvisí s volbou použitého materiálu pro výrobu. Výroba nádrží je plánována ve spolupráci s firmou CompoTech, která se zabývá navíjením kompozitních konstrukcí. Jako materiál byl zvolen kompozit z uhlíkových vláken a epoxidové matrice, konkrétně uhlíkové vlákno T700SC. Objemový podíl vláken je uvažován  $V_f = 60 \%$ .

Jako kritérium porušení pro výpočet bylo zvoleno kritérium maximálního napětí  $\sigma_{max}$ .

$$R_{pL}^- < \sigma_L < R_{pL}^+$$

$$R_{pT}^- < \sigma_T < R_{pT}^+$$

$$\tau_{dLT}^- < \tau_{LT} < \tau_{dLT}^+$$

A následně vypočteny koeficienty bezpečnosti v daných směrech zatížení jako

$$k_i = \frac{R_p^i}{\sigma_i} > 1 \quad (3.36)$$

Pro dimenzování budou vyhodnoceny koeficienty bezpečnosti pro podélné napětí, koeficient  $k_L$ , příčné, koeficient  $k_T$  a smykové, koeficient  $k_{LT}$ . Podle pravidel soutěže EuRoC jsou dané bezpečnosti zadefinovány zvětšením zatížení při definici zatěžujících případů. Koeficienty bezpečnosti tak musí být pro daný případ větší než 1.

Po konzultaci s firmou CompoTech byly zvoleny dovolené hodnoty pro materiál. Tyto hodnoty jsou shrnuty v Tab č. 8.

Tab č. 8 Zvolené meze pevnosti laminátu

mez pevnosti	Značka	Hodnota [MPa]
podélném tahu	$R_{pL}^-$	2500
podélném tlaku	$R_{pL}^+$	900
příčném tahu	$R_{pT}^+$	50
příčném tlaku	$R_{pT}^-$	230
ve smyku	$\tau_{dLT}^+ = -\tau_{dLT}^-$	100

Tyto hodnoty jsou optimistické, ale návrh dle soutěžních pravidel je dimenzován na teoretický případ a bezpečnost je zde daná koeficientem daným pravidly, tedy trojnásobkem provozního tlaku. Zároveň pravidla o tomto stavu mluví jako o stavu porušení nádoby, jsou tak vzaté lepší pevnostní hodnoty materiálu.

### 3.4.5 Válcová část

První část výpočtu tlakové nádoby se týkala válcové části. Pro válcovou část vycházející z návrhového případu (viz kapitola 3.2 Rozbor zatížení) je daný tlak  $p = 18$  MPa. Pro předběžný poloměr  $R_\varphi = 80,5$  mm liniový vektor zatěžujících sil vychází

$$\begin{bmatrix} N_\psi \\ N_\varphi \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 724,5 \\ 1449 \\ 0 \end{bmatrix} N/mm$$

Pro toto zatížení je ideální složení vláken  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , aby vlákna byla ve stejné ose jako zatížení.

Je zde výhodné použití symetrického laminátu. Byla tak zvolena skladba  $90^\circ/\pm\omega/90^\circ$ . Tato skladba se hojně využívá u tlakových nádob, protože  $90^\circ$  návin je vhodný na veliké radiální zatížení od radiální síly. Prostřední vrstva, která se navíjí dohromady s víky při jedné operaci nemůže mít úhel  $0^\circ$ , aby bylo možné vlákno navinout i přes víčka a byl tam plynulý přechod úhlu. Při tomto složení vrstev lze nádobu navinout při jedné operaci na jednom stroji. Úhel  $\pm$  vrstvy je daný úhlem na přechodu víka a válcové části.

Kvůli volbě GI tvaru víček vychází z rovnice (3.30) úhel  $\omega_0$  jako úhel, ve kterém budou podélná vlákna na válcové části. Pro nádrž byly zvoleny tyto předběžné rozměry: za  $R$  vnější poloměr rakety 80,5 mm a pro polární otvor  $r_0 = 17,5$  mm. Rozměr polárního otvoru byl zvolen tak, aby nádrž mohla být propojena se zbytkem palivové soustavy přes závit  $G 3/4$  spolu s rezervou na materiál. Úhel  $\omega_0$  pro podélná vlákna pak lze spočítat

$$\sin \omega_0 = \frac{r_0}{R} = \frac{17,5}{80,5} = 11^\circ \quad (3.37)$$

Nádoba je navíjena rowingem z uhlíkového vlákna, který má vzhledem k počtu vláken dané rozměry. Rowing lze rozprostřít na plochu a tím snížit tloušťku vrstvy, ale ne do nekonečna. Každá vrstva má tak danou minimální tloušťku, ale lze ji zvýšit menším roztažením rowingu do šířky. Pro vrstvy  $0$  a  $90^\circ$  je minimální tloušťka přibližně 0,202 mm a pro rovnovážnou dvojvrstvu  $\pm\omega$  je to 0,404 mm.

Tab. č. 9 Tloušťky navíjených vrstev

úhel návínu	tloušťka vrstvy
[ $^\circ$ ]	[mm]
0, 90	0,202
$\pm\omega$	0,404

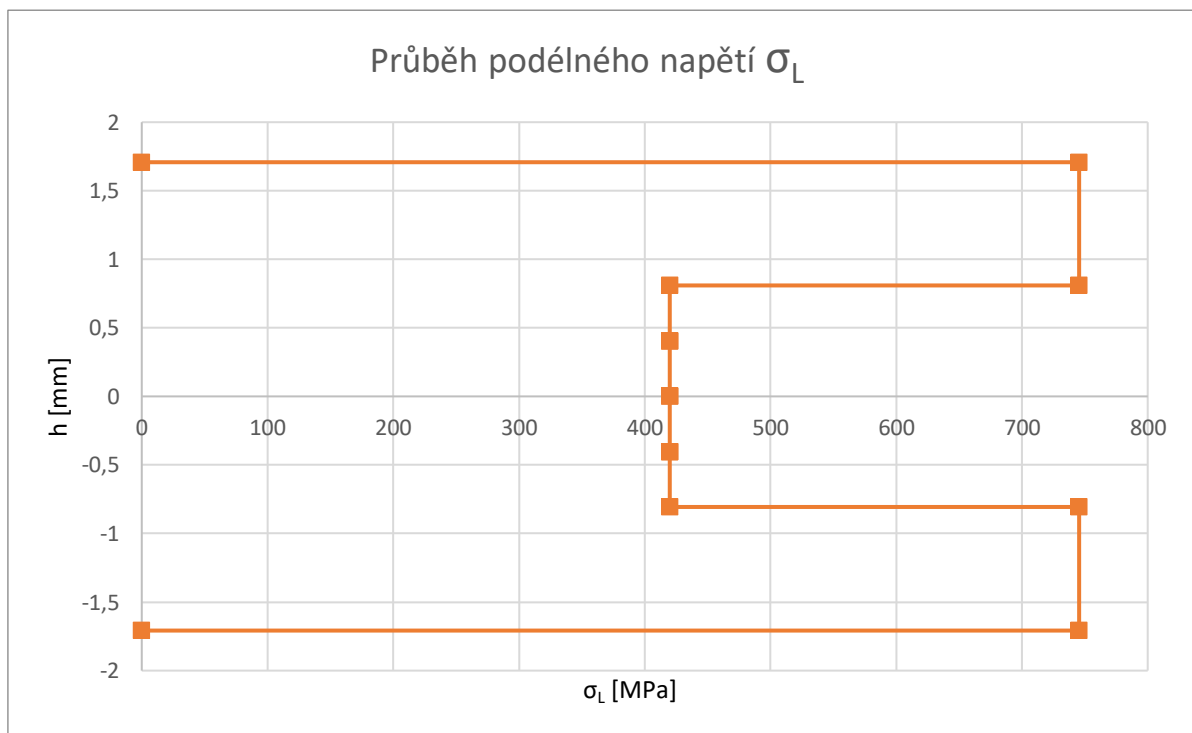
Aby byl výpočetní program univerzálnější, počítá i s B maticí. Při zadávání  $\pm$  vrstvy se musí zadat + vrstvy a – vrstvy zvlášť, zároveň symetricky se střednicí kompozitu tak, aby se

zachovaly symetrické vlastnosti laminátu. Daná  $\pm$  vrstva je tak zadána jako 4 nezávislé řádky. Skladbu znázorňuje Tab č. 10.

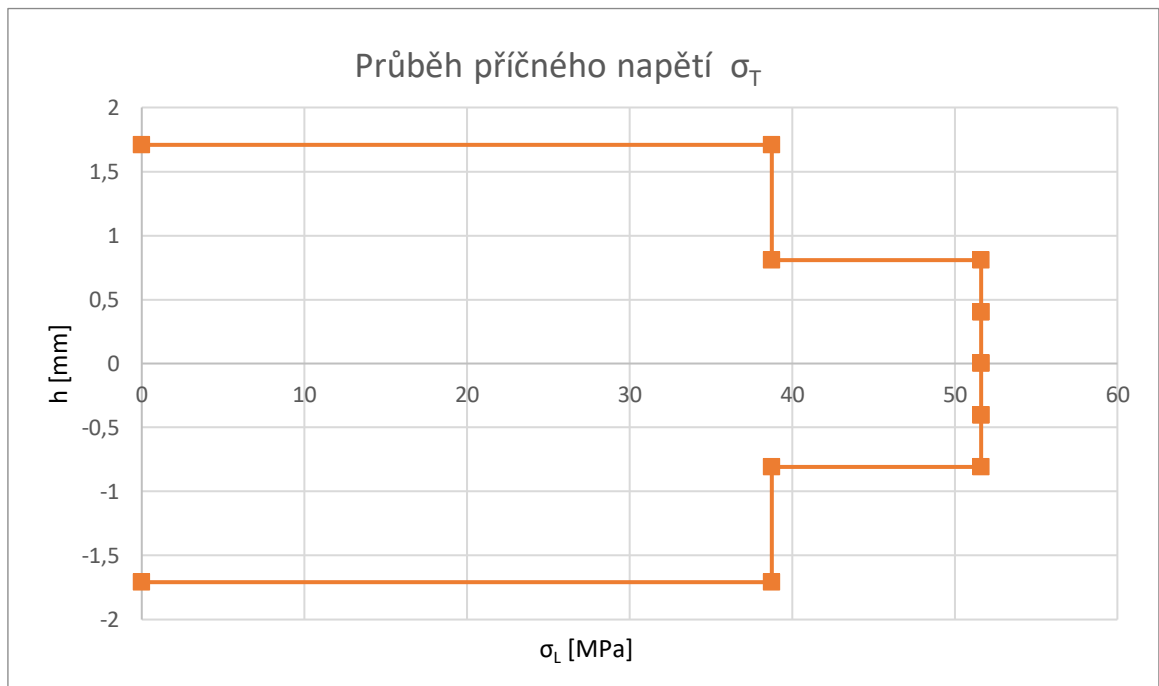
Tab č. 10 Skladba stěny navrhované nádrže

Číslo vrstvy	h	počet vrstev	omega
-	mm	-	°
1	0,9	5	90
2	0,4	1	11
3	0,4	1	-11
4	0,4	1	-11
5	0,4	1	11
6	0,9	5	90

Při tuto skladbu byl v programu spočítán průběh napětí kompozitní stěnou. Tato napětí znázorňují grafy: Graf 2, Graf 3, Graf 4.



Graf 2 Průběh  $\sigma_L$  přes kompozitní stěnu první iterace





Tab č. 11 Koeficienty bezpečnosti pro prvotní návrh

Koeficienty bezpečnosti pro prvotní návrh			
směr	L	T	LT
$R_i$	2500	50	100
$\sigma_i$	745,4624	51,62183	3,399218
$k_i$	3,35	0,97	29,42

Tyto koeficienty byly zvoleny jako dostačující k druhé iteraci výpočtu. Z první iterace je daná nově tloušťka stěny jako  $h = 3,42$  mm. Střednice materiálu je tak upravena a vychází jako  $R = 78,57$  mm. Nové hodnoty pro druhou iteraci shrnuje Tab č. 12.

Tab č. 12 Parametry stěny pro druhou iteraci

proměnná	Hodnota [mm]
h	3,42
R	78,57

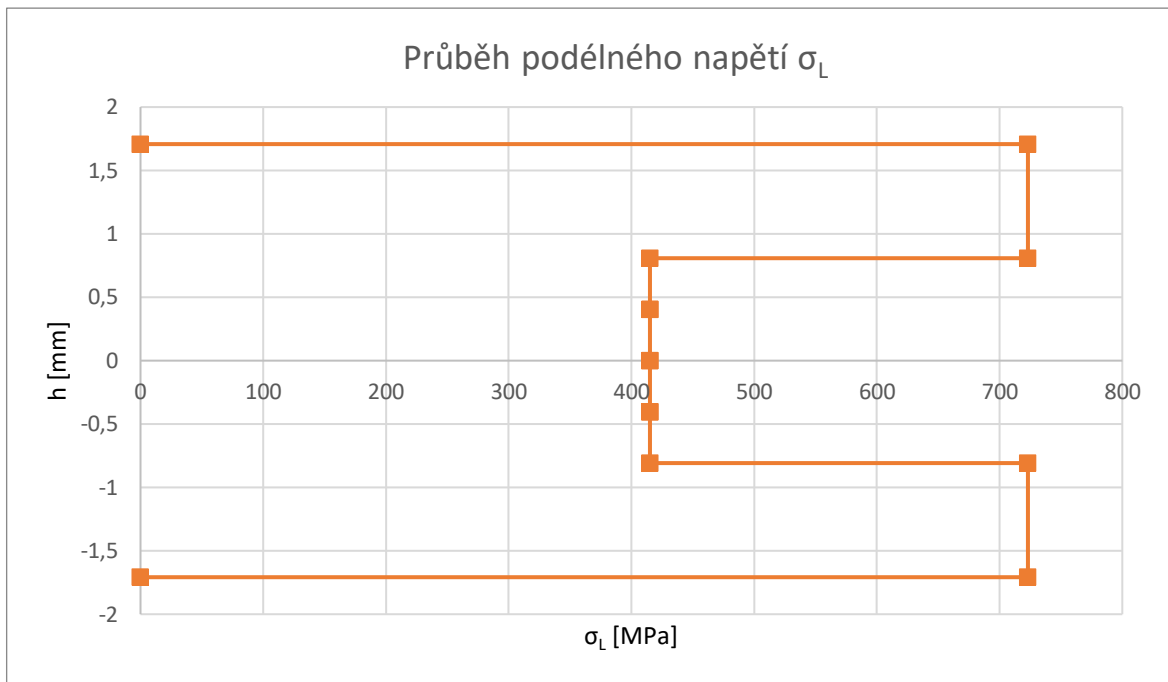
Pro tyto nové hodnoty byl přepočten nový úhel vinutí podélných vrstev, a také to upravuje vektor zatěžujících sil. Nový úhel lze vypočít

$$\sin \omega_0 = \frac{r_0}{R} = \frac{17,5}{80,5} = 12,87^\circ \quad (3.38)$$

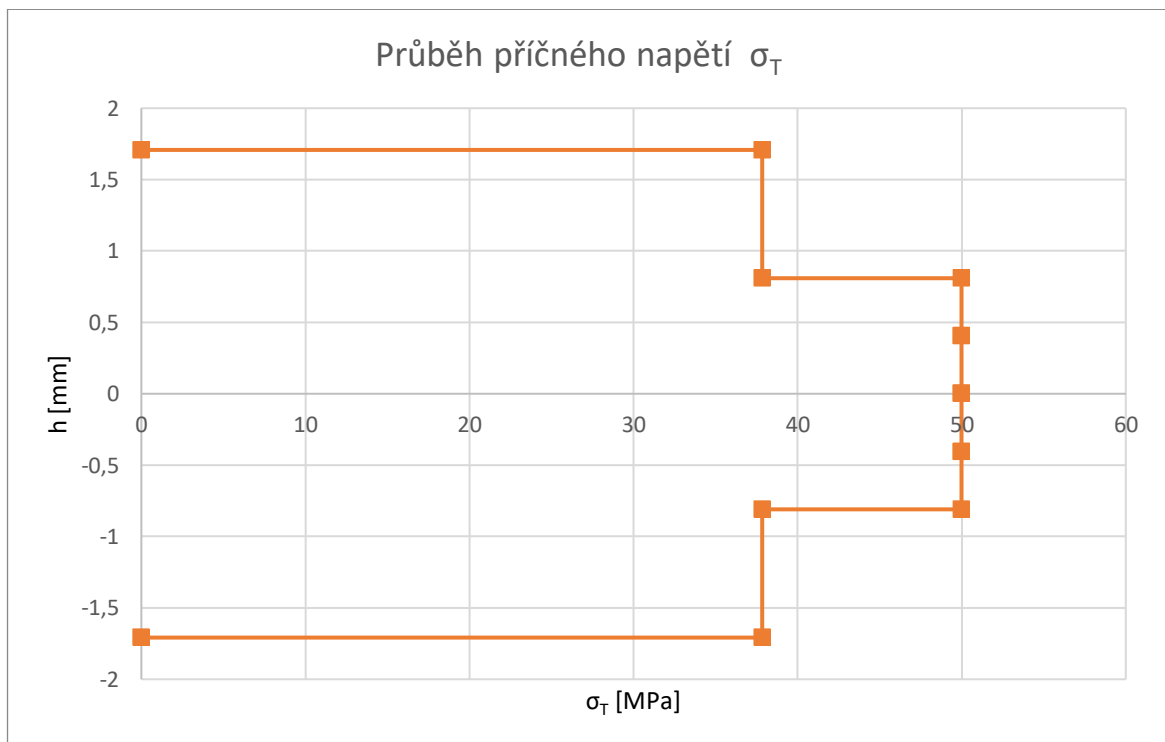
Nový vektor zatížení bude vypadat

$$\begin{bmatrix} N_\psi \\ N_\varphi \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 707,2 \\ 1414,3 \\ 0 \end{bmatrix} N/mm$$

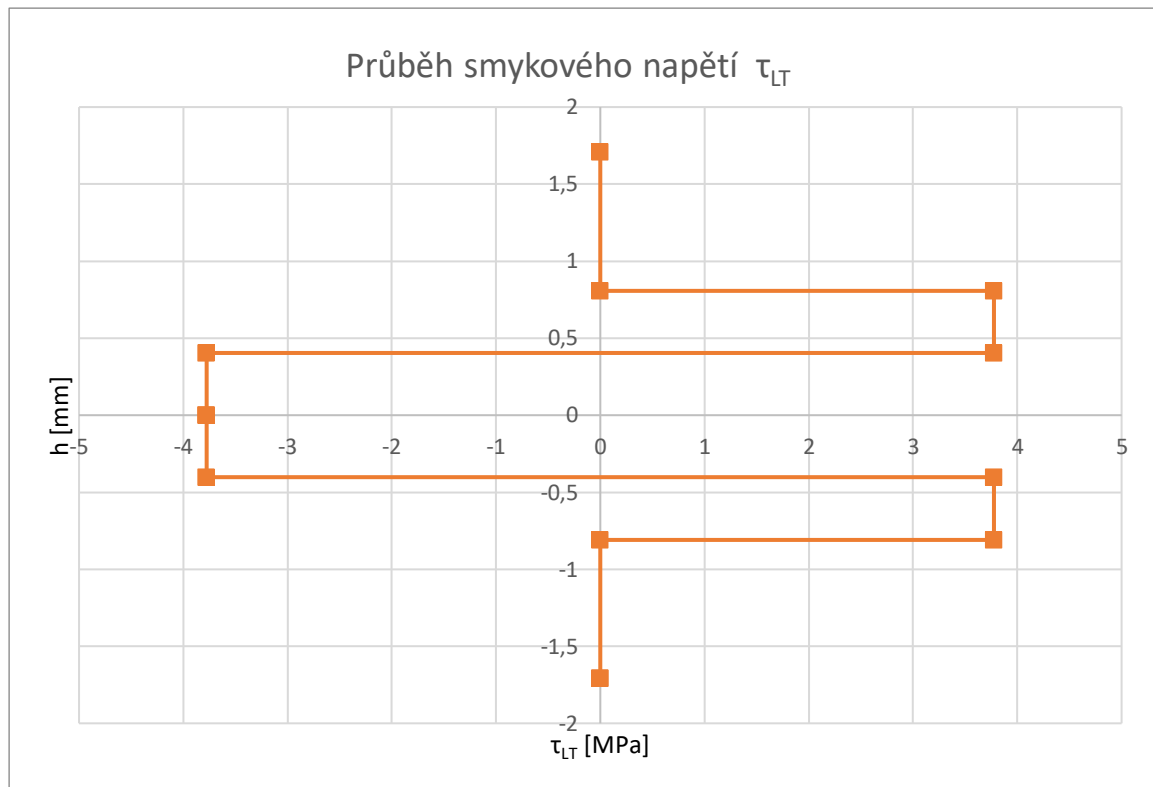
Novým vstupním parametrům stěna vyhověla, nemusí tak dojít k úpravě skladby a tlouštěk. Průběh napětí stěnou pro druhou iteraci shrnují grafy: Graf 5, Graf 6, Graf 7.



Graf 5 Průběh  $\sigma_L$  přes kompozitní stěnu druhé iterace



Graf 6 Průběh  $\sigma_T$  přes kompozitní stěnu druhé iterace



Graf 7 Průběh  $\tau_{LT}$  přes kompozitní stěnu druhé iterace

Koeficienty bezpečnosti pro druhou iteraci shrnuje Tab č. 13.

Tab č. 13 Koeficienty bezpečnosti pro druhou iteraci

Druhá iterace			
směr	L	T	LT
$R_i$	2500	50	100
$\sigma_i$	723,11	49,99	3,78
$k_i$	3,46	1,00	26,48

Nyní vychází koeficienty bezpečnosti pro všechny vrstvy. Takto navržená laminátová stěna tak splňuje všechny požadavky dané pravidly soutěže EuRoC, viz. kapitola 2.1 a dané zatížením, viz kapitola 3.2.

### 3.4.6 Geozotenzoidní víko

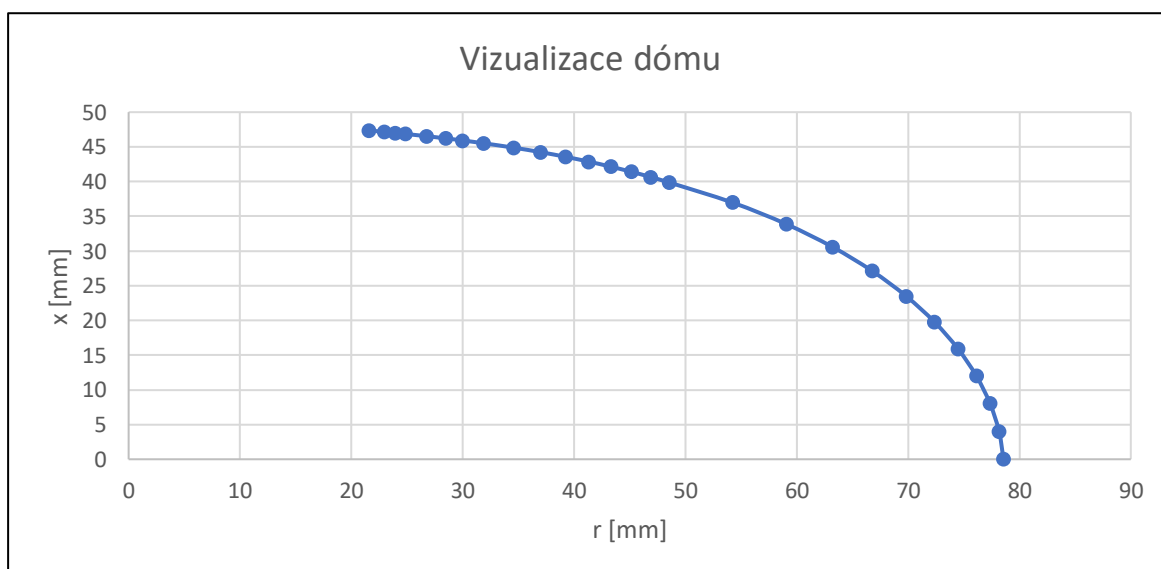
V této kapitole bude ověřeno zatížení navrženého laminátu pro geometrii geodetického izotenzoidu a aplikovány následné změny, v případě, že laminát nebude vyhovovat danému zatížení.

Z předchozí kapitoly jsou dané výchozí parametry pro tvar dómu a je daná i výchozí tloušťka stěny, tloušťkou vrstvy s podélnými vlákny. Tyto parametry shrnuje Tab č. 14.

Tab č. 14 Vstupní hodnoty pro výpočet dómu

Vstupní hodnoty pro výpočet dómu		
proměnná	hodnota	jednotka
$\omega_0$	0,23	rad
$\omega_0$	12,87	°
$R$	78,57	mm
$r_0$	17,50	mm
$h_0$	1,62	mm
$R_{inf bod}$	21,43	mm
$p$	18	MPa

Z těchto parametrů byla nejprve vypočtena geometrie střednice. Tato geometrie byla získána postupnou volbou úhlu  $\theta$ , po každý daný úhel byly získány souřadnice  $r$  a  $x$ . Krok voleného úhlu byl směrem k polárnímu otvoru volen menší, jelikož je tam rychlejší změna parametrů. Takto bylo zvoleno 27 bodů, ve kterých následně budou vypočteny parametry a vlastnosti stěny. Vizualizaci geometrie dómu je vidět na grafu Graf 8. Je zde také vidět zjemnění kroku u polárního otvoru.



Graf 8 Vizualizace meridiánové křivky G1 dómu

Pro každý z těchto bodů byly spočteny parametry potřebné jako vstupní informace pro pevnostní analýzu.

Tyto parametry jsou:

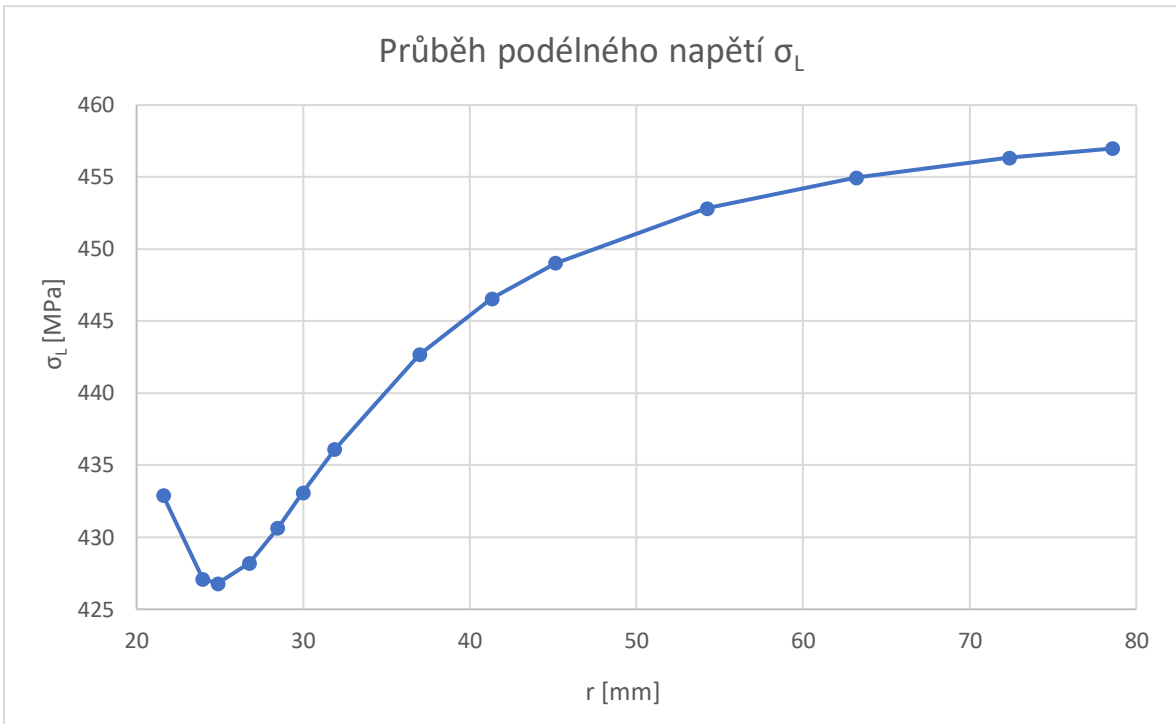
- Tloušťka stěny  $h$  vypočtená podle rovnice (3.31)
- Úhel vinutí vláken  $\omega$  dle rovnice (3.30)
- Hlavní poloměry  $R_\psi$  a  $R_\varphi$  dle rovnic (3.34), respektive (3.33)
- Hodnoty liniových sil  $N_\psi$ ,  $N_\varphi$  dle rovnic (3.27), (3.28).

Jako příklad pro prvních 5 zvolených bodů shrnuje tyto parametry Tab č. 15.

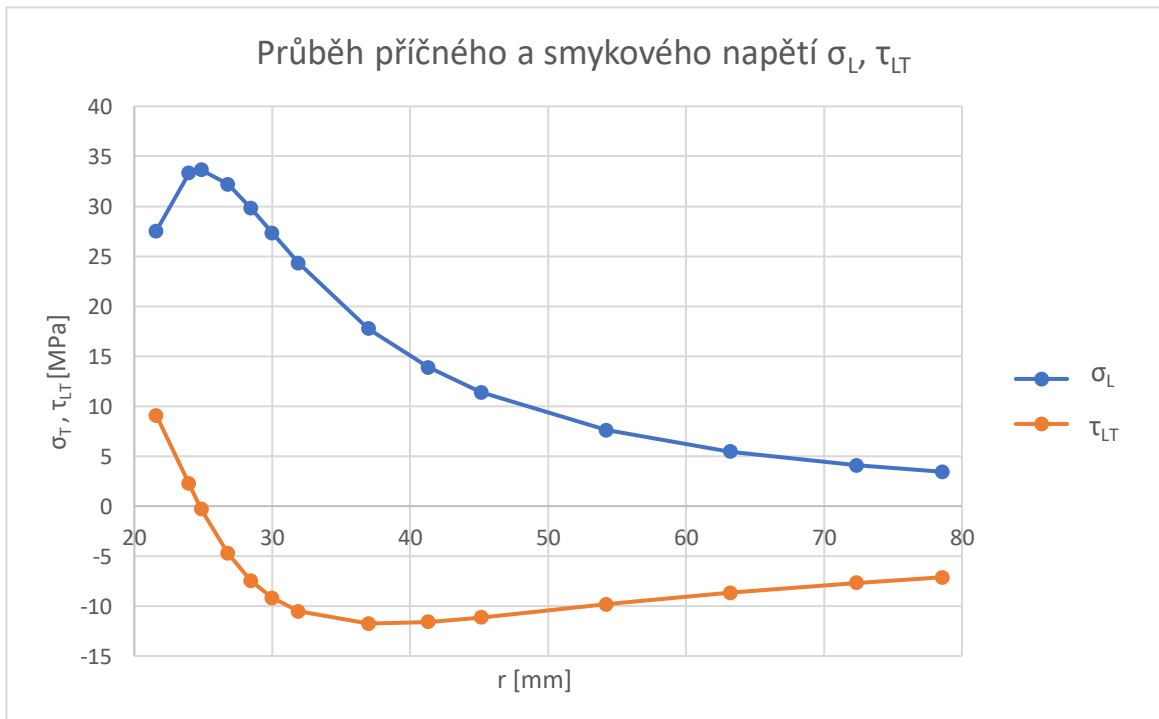
*Tab č. 15 Vypočtené parametry prvních 5 bodů*

index	$x$	$r$	$h$	$\omega$	$R_\varphi$	$R_\psi$	$N_\psi$	$N_\varphi$
-	mm	mm	mm	rad	mm	mm	N/mm	N/mm
1	0,000	78,570	1,616	0,225	78,570	40,338	707,130	36,911
2	4,034	78,165	1,625	0,226	78,955	40,548	710,599	37,498
3	8,048	77,352	1,643	0,228	79,741	40,976	717,673	38,715
4	12,023	76,122	1,671	0,232	80,958	41,641	728,624	40,658
5	15,938	74,467	1,710	0,237	82,654	42,571	743,887	43,484

Pro každý zvolený bod bylo spočteno napětí ve vláknech stejným způsobem jako pro válcovou část. Tento postup je popsán v kapitole 3.3 Teorie výpočtu. Bylo tak získáno rozložení napětí podél stěny dómu. Rozložení  $\sigma_L$ ,  $\sigma_T$  a  $\tau_{LT}$  podél souřadnice  $r$  ukazují grafy Graf 9 a Graf 10.



Graf 9 Průběh  $\sigma_L$  podél geometrie GI dómu



Graf 10 Průběh  $\sigma_T, \tau_{LT}$  podél geometrie GI dómu

Jako pevnostní kontrola zde byly spočteny koeficienty bezpečnosti pro směry L, T, LT. S měnícím se zatížením, tloušťkou stěny a úhlem navíjení  $\omega$  se mění i koeficienty bezpečnosti podél stěny GI. Byly vybrány nejhorší koeficienty v průběhu geometrie. Místa na geometrii a tyto koeficienty shrnuje tabulka. Vyznačené jsou pole s nejmenšími hodnotami koeficientů.

Tab č. 16 Nejmenší hodnoty koeficientů bezpečnosti na GI dómu

bod	x	r	$k_L$	$k_T$	$k_{LT}$
-	mm	mm	-	-	-
1	0,00	78,57	5,47	14,55	14,03
18	44,25	36,98	5,65	2,82	8,51
24	46,86	24,86	5,86	1,49	321,90

Všechny nejhorší koeficienty bezpečnosti na dómu jsou větší než 1, takto navržená stěna dómu vyhovuje pro dané zatížení a není potřeba další úpravy.

### 3.5 Ověření na ostatní případy zatížení

Na přenosu letového a manipulačního zatížení se posílí pouze válcová část nádrže, která je integrální součástí trupu. Pevnostní kontrola na ostatní případy zatížení popsané v kapitole 3.2 Rozbor zatížení, tak proběhly pouze pro válcovou část.

Hodnoty vektoru liniových sil shrnuje pro jednotlivé případy tabulka

Tab č. 17 Hodnoty vektorů liniových sil pro ostatní případy zatížení

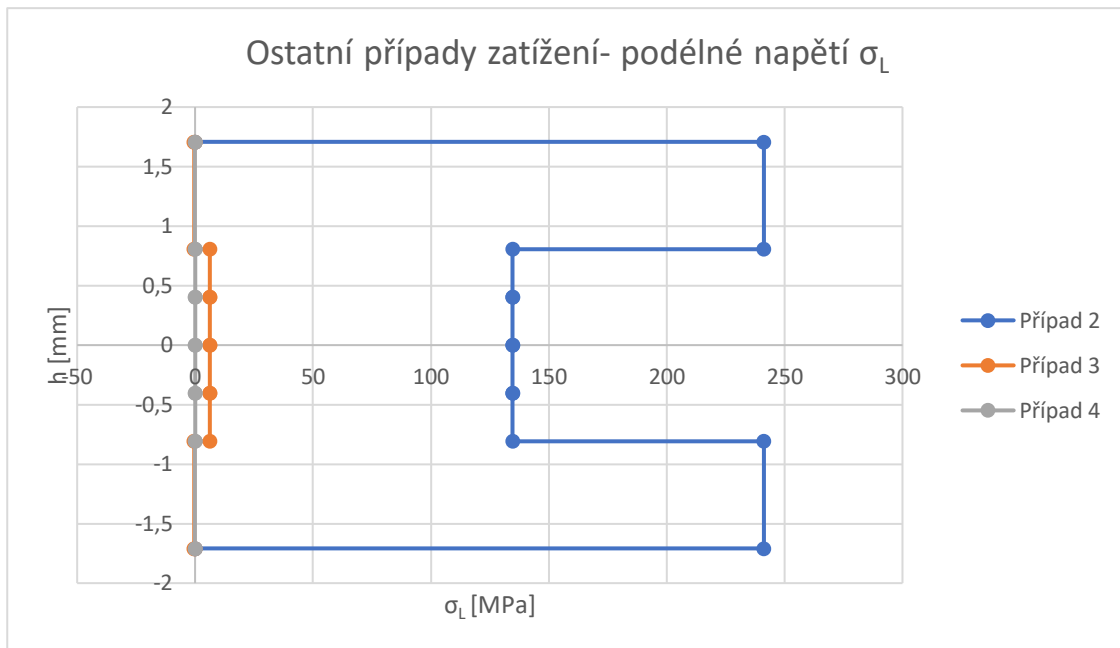
proměnné	Případ 2	Případ 3	Případ 4
$N_\psi$ [N/mm]	229,642	10,371	0
$N_\varphi$ [N/mm]	471,438	0	0
$\tau_{\psi\varphi}$ [N/mm]	0	0	0

Pro případ 4 (zatížení momentem) byla spočtena přímo deformace pomocí vztahů.

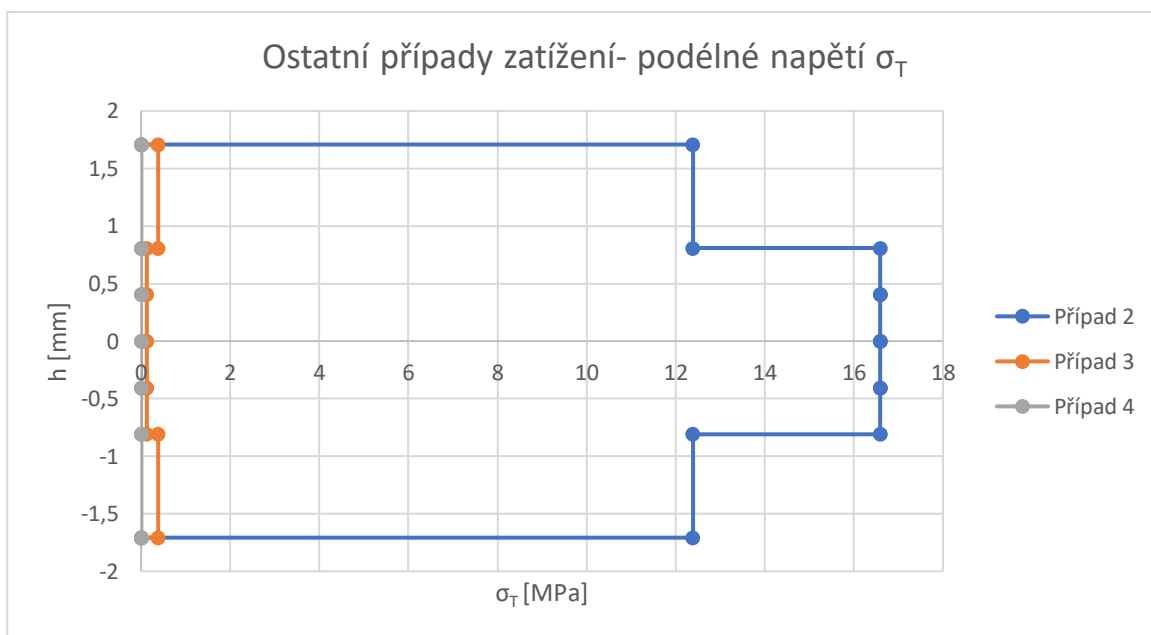
$$\sigma_{ekv} = \frac{M_0}{W_0} \quad (3.39)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{ekv}}{E_{X_{ekv}}} \quad (3.40)$$

Výsledky průběhu napětí laminátovou stěnou shrnují grafy Graf 11, Graf 12, Graf 13.

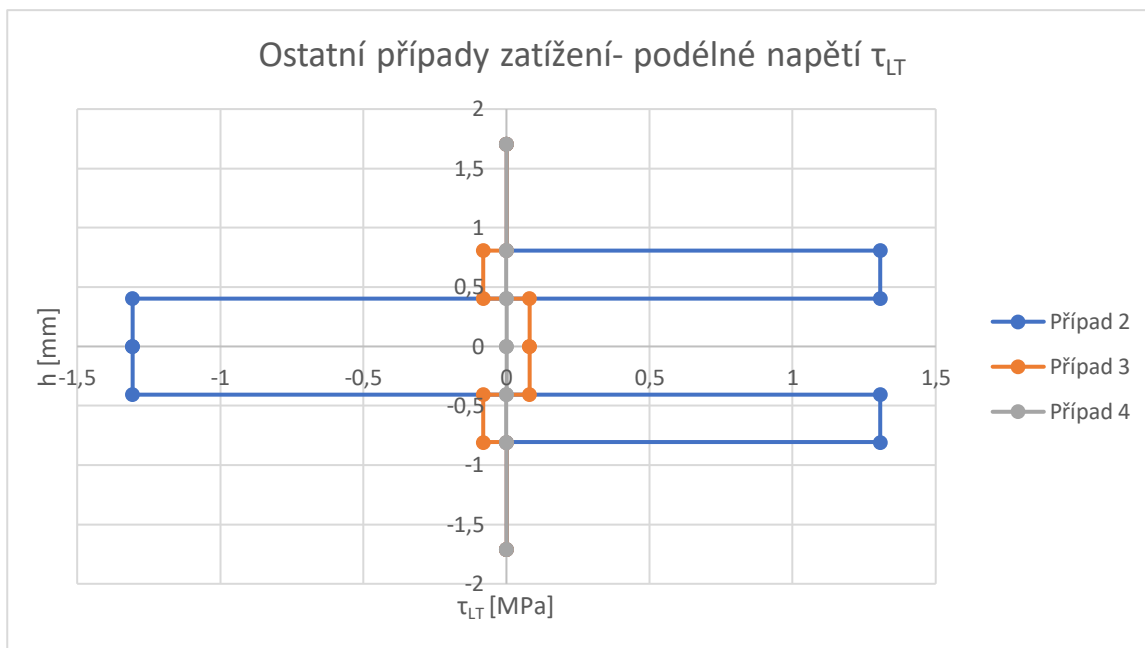


Graf 11 Podélné napětí pro ostatní případy zatížení



Graf 12 Příčné napětí pro ostatní případy zatížení





Graf 13 Smykové napětí pro ostatní případy zatížení

Bezpečnostní koeficienty vypočtené pro dané případy shrnuje tabulka

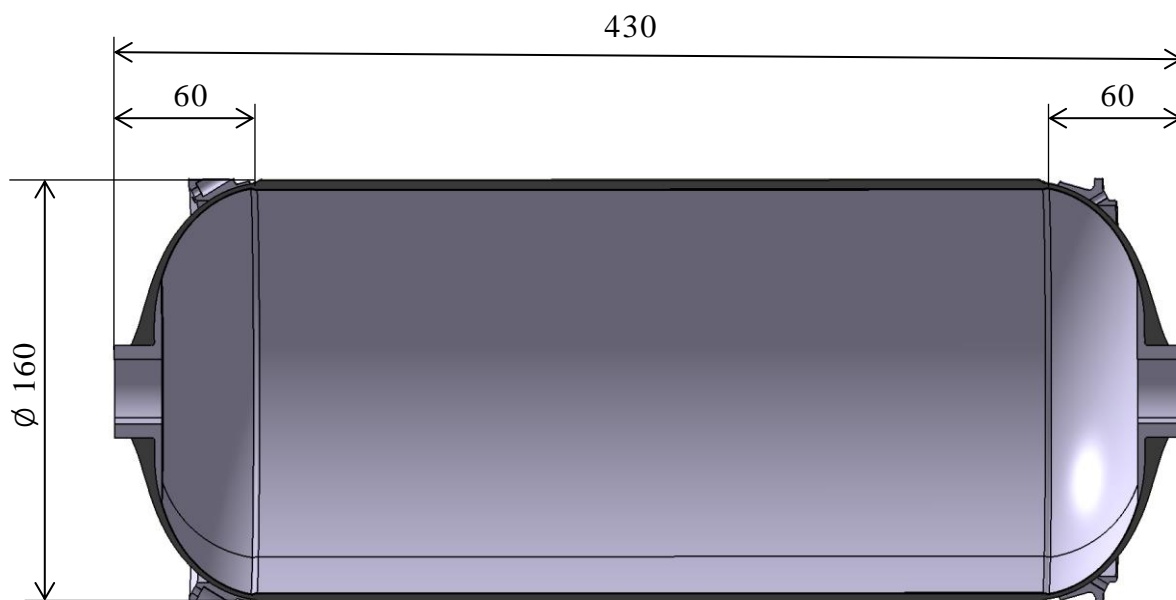
Tab. č. 18 nejvyšší hodnoty zatížení a vypočtené bezpečnostní koeficienty

směr	L	T	LT
<b>Případ 2</b>			
$R_i$	2500	50	100
$\sigma_i$	241,24	16,59	1,31
$k_i$	10,36	3,01	76,56
<b>Případ 3</b>			
$R_i$	2500	50	100
$\sigma_i$	6,26	0,38	0,08
$k_i$	399,40	130,30	1233,41
<b>Případ 4</b>			
$R_i$	2500	50	100
$\sigma_i$	0,080	0,005	0,001
$k_i$	31235,86	9979,56	104174,11

Navržená stěna vyhovuje všem ostatním letovým případům. Z grafů a koeficientů bezpečnosti je vidět, že majoritní zatížení na konstrukci je od přetlaku.

## 3.6 Finální geometrie nádoby

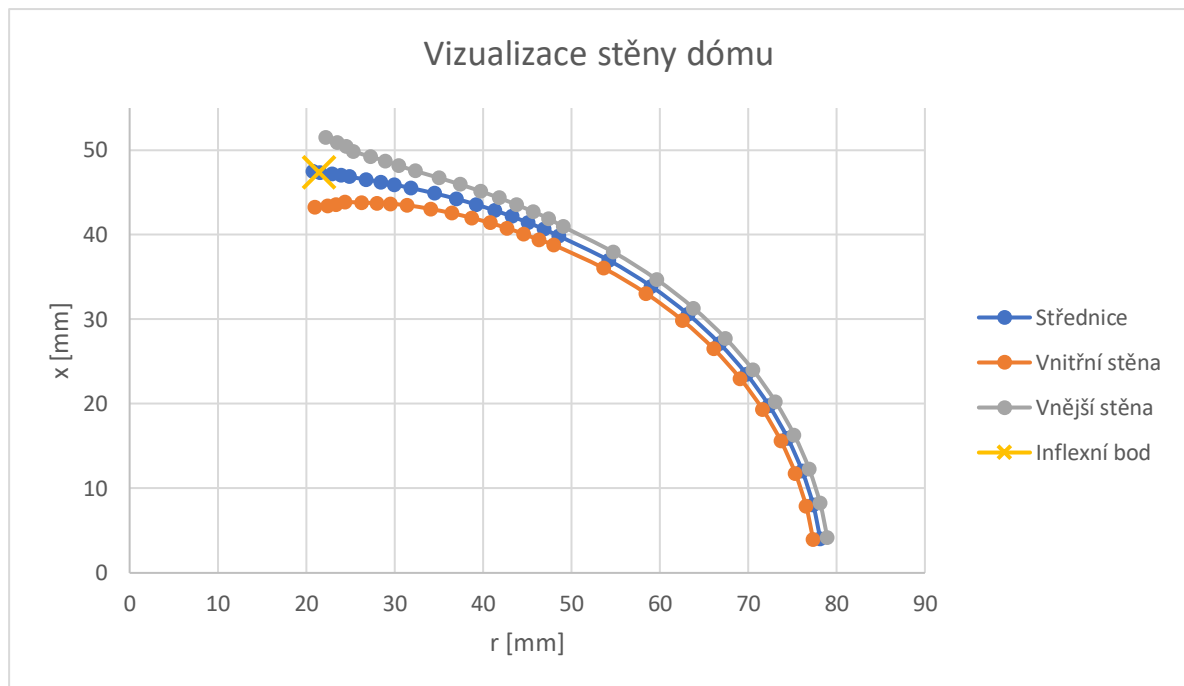
Pro další postup vzniknul 3D model nádrže pro implementaci do sestavy rakety. Model vzniknul v programu Catia V5. Model slouží také jako podklad pro výrobu. Geometrie tak musí co nejlépe odpovídat realitě.



Obr. 16 Řez detailním modelem nádrže (rozměry v mm)

### 3.6.1 Geisotenzoidní dóm

Vypočtené tloušťky stěn nám udávají bližší parametry nádrže. Při znalosti meridiánové křivky a tloušťky stěny v Excelovském výpočtovém souboru byly vytvořeny křivky dómu, střednice, vnitřní a vnější stěna. Vizualizací vyjadřuje Graf 14. Žlutě je znázorněn inflexní bod.

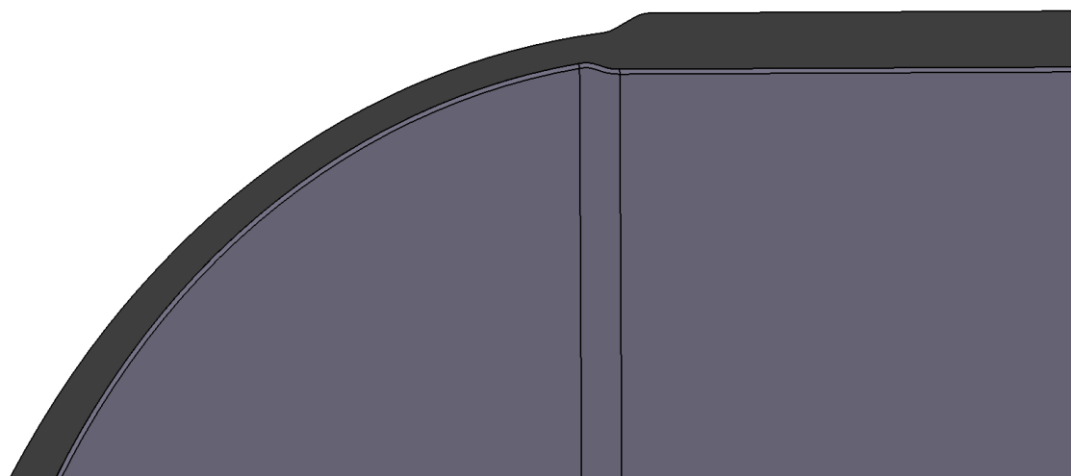


Graf 14 Vizualizace geometrie stěny důležité pro detailní model nádrže

Tyto křivky byly nahrány do CADu a sloužily jako podklad k vytvoření modelu. Celkový detailní model nádrže lze vidět na Obr. 16.

### 3.6.2 Přejít na válcovou část

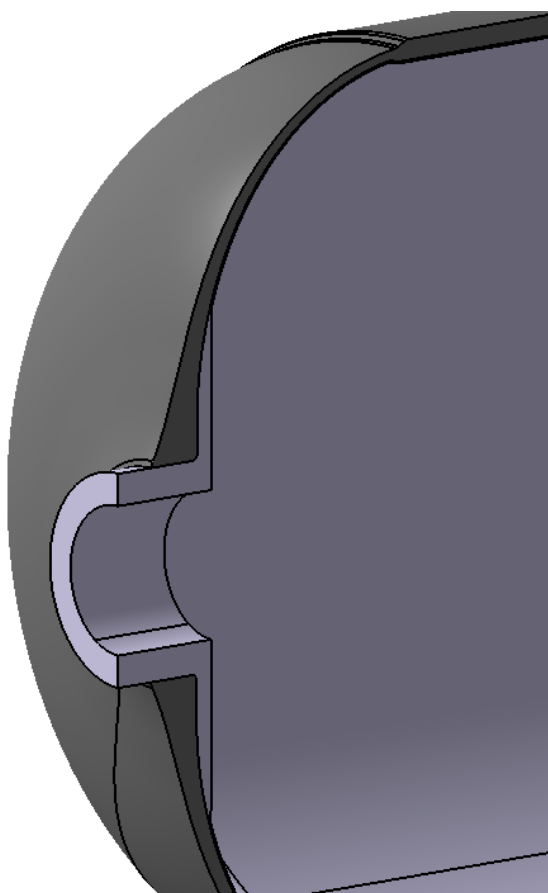
Přejít na válcovou část je kritické místo. Dochází zde ke změně geometrie a počtu vrstev. Aby zde byl plynulý přechod tuhosti, byl zde vymodelován plynulý přechod s rádiusy mezi silnější stěnou válce a stěnou dómu, viz Obr. 17.



Obr. 17 Přejítový rádius mezi dómem a válcovou částí nádrže

### 3.6.3 Polární otvor

Okolo polárního otvoru je další kritické místo. Stěna nádoby zde byla vymodelována dle definice isotenzoidu až po inflexní bod, pak s napojením kuželové plochy dle [13] až k polárnímu otvoru. Polární příruba byla navržena tak, aby sama o sobě vydržela přetlak nádoby. Límec příruby tuto tloušťku drží až do vzdálenosti  $r = 1,45 r_0$ , jak bylo doporučeno v článku [13]. Pak následuje zkosení na tloušťku lineru. Jako materiál zde byl zvolena slitina hliníku Al EN 6061. Vizualizaci této části modelu zobrazuje Obr. 18.



Obr. 18 Polární otvor s přírubou

### 3.6.4 Liner

V modelu je zobrazený kovový liner (šedý vnitřek nádrže). Tento liner bude diskutován v samostatné kapitole 3.7 Kovový liner.

### 3.6.5 Finální model

Celkový model nádrže respektuje velikosti dané požadavkem na objem nádrže v kapitole 3.1 Parametry nádrže. Její celková velikost byla ustanovena na  $l = 430\text{mm}$  od hrany příruby k druhé hraně protější příruby. Finální geometrie nádrže je vidět na obrázku Obr. 16.

## 3.7 Kovový liner

Nádrž je navrhována jako tlaková nádoba typu III s kovovým linerem. Liner zde zajišťuje těsnost, a hlavně také kompabilitu s obsahem nádrže.

### 3.7.1 Vlastnosti N<sub>2</sub>O

Oxid dusný, N<sub>2</sub>O je za normálních podmínek celkem stabilní bezbarvý plyn. Tento plyn je dobré okysličovadlo a podporuje hoření za jakýchkoli podmínek. Při zahřátí nad cca 650°C dochází ke katalytickému rozkladu na plynný dusík a atomární kyslík. Je to exotermní reakce, což může být velice nebezpečné, protože pokud se v nějakém místě začne kvůli přehřátí N<sub>2</sub>O katalyticky rozkládat, místo se ještě více zahřeje a podpoří další rozklad, což může vést až k výbuchu. Jakožto dobré okysličovadlo stačí i trocha paliva a oxid dusný s ním dokáže tvořit výbušnou směs. Z tohoto důvodu je nutné všechny části, které přijdou do styku s N<sub>2</sub>O vyčistit od všech zbytku z výroby, olejů, mazadel a perfektně odmastit.

#### Skladování

N<sub>2</sub>O má kritický bod při 36,45°C a tlaku 7,15 MPa. Je tak možné jej při pokojové teplotě skladovat a používat v kapalném stavu. N<sub>2</sub>O je i dobré rozpouštědlo, při dlouhodobé expozici dokáže rozpouštět a degradovat organické materiály a plasty. Při použití jakéhokoli materiálu je třeba se přesvědčit o jeho kompatibilitě s N<sub>2</sub>O. Pro dlouhodobé skladování jsou doporučeny nádoby z nerezové nebo uhlíkové oceli. Je nutné zajistit, aby nedošlo ke kontaminaci plynu při skladování, jak bylo popsáno výše, zvyšuje to riziko výbuchu. Pro zajištění bezpečnosti je doporučeno plyn skladovat při nižších teplotách.

#### Zdroje zapálení

Při práci je třeba dbát zvýšené opatrnosti se zdroji tepla, jisker a jiných zdrojů zapálení. Uvnitř aparatury pracující s N<sub>2</sub>O je třeba dbát na to, aby nemohlo dojít např k jiskření uvnitř aparatury. Jako riziko zapálení, kvůli katalytickému rozkladu může být i zahřátí při tlakovém rázu vzniklým rychlým zavřením ventilu. Je nutné tak všechny ventily a šoupátka otevírat a zavírat pomaleji. Riziko je vyšší při kontaktu s látkami katalyzujícími rozklad, snižují tak kritickou teplotu pro zahájení reakce až na cca 300°C [14].

#### Dostupnost, pracovní podmínky

Kapalný oxid dusný je dodáván v tlakových lahvích pod tlakem 5 MPa. Pokud lahve nemají uvnitř trubku, je nutné pro získání kapalné fáze lahev otočit vzhůru nohama.

Při použití N<sub>2</sub>O jako okysličovadla do rakety je třeba dbát zvýšené bezpečnosti. Je to práce s látkou ve vysokotlakých tlakových nádobách a zároveň s látkou, která je hořlavá a podporující hoření.

### 3.7.2 Vhodné materiály

Z vlastností N<sub>2</sub>O vychází, že ne všechny materiály jsou vhodné pro kontakt s N<sub>2</sub>O. Dle norem běžně používané konstrukční kovy nejsou omezeny pro použití na kontakt s N<sub>2</sub>O [15]. Podle Firmy *SpaceDev*, která stojí za vývojem hybridního raketového motoru pro *SpaceShipOne* s pohonnými látkami LN<sub>2</sub>O a HPTB, je doporučena pro konstrukci všech palivových systémů nerezová ocel 304 nebo 316. Firma nedoporučuje měď, nikl, platinu a další kovy, které se používají jako katalyzátory [16]. Pro kontakt s N<sub>2</sub>O lze použít i některé nekovové materiály, obecně prokazování jejich kompatibility s N<sub>2</sub>O je problematické. Norma AIGA 081/16 mluví o možnosti použití PTFE, PCTFE, FEP, PEEK, EPDM [15].

Pro konstrukci lineru byly diskutovány běžně dostupné kovy a podle vhodnosti byly rozděleny pro použití na vhodné a nevhodné. Jako vhodné byly určeny běžně dostupné konstrukční kovy, typově oceli, slitiny Al, Ti. Jako nevhodné jsou obecně ušlechtilé kovy kvůli jejich funkci katalyzátoru, a tedy snížení teploty nutné pro katalytický rozklad a neušlechtilé kovy, jelikož snadno korodují a kontaminují tak N<sub>2</sub>O, například Zn, Mg. Materiály s komentáři shrnuje tabulka.

Tab č. 19 Možné materiály pro výrobu lineru

	Výčet materiálů	Komentář
Vhodné materiály	Oceli	-
	Nerezové oceli	Doporučené [16]
	Slitiny Ti	Nebyla nalezena data o nevhodnosti
	Slitiny Al	Nedoporučené na čerpací systémy [15], jinak vhodné
	Nikl	Je sice katalyzátor, ale jeho katalytické vlastnosti jsou špatné [17]
Nevhodné materiály	Ušlechtilé kovy Pt, Pd, Rh, Au, Ag	Nalezeny přímo jako dobré katalyzátory pro rozklad N <sub>2</sub> O [14], [16]
	Neušlechtilé kovy typově Zn, Mg	Málo korozivzdorné, riziko kontaminace N <sub>2</sub> O, Mg dobře hoří

Tým CTU SR používá na rozvody okysličovačla v raketě systém od firmy *Schwer Fittings, S.r.o.* z nerezové oceli s kovovými těsněními. V minulém roce byl liner v nádrži vyroben ze slitiny Al EN 6061. Ze zkušeností týmu i z pohledu porotců soutěže jsou hliníkové slitiny považovány jako vhodné.

Byly vybrány dva přístupy výroby lineru z technologického hlediska jako dostupné a proveditelné s ohledem fyzické výroby nádrže, a to svařovaný liner a pokovovaný liner.

### **3.7.3 Svařovaný liner**

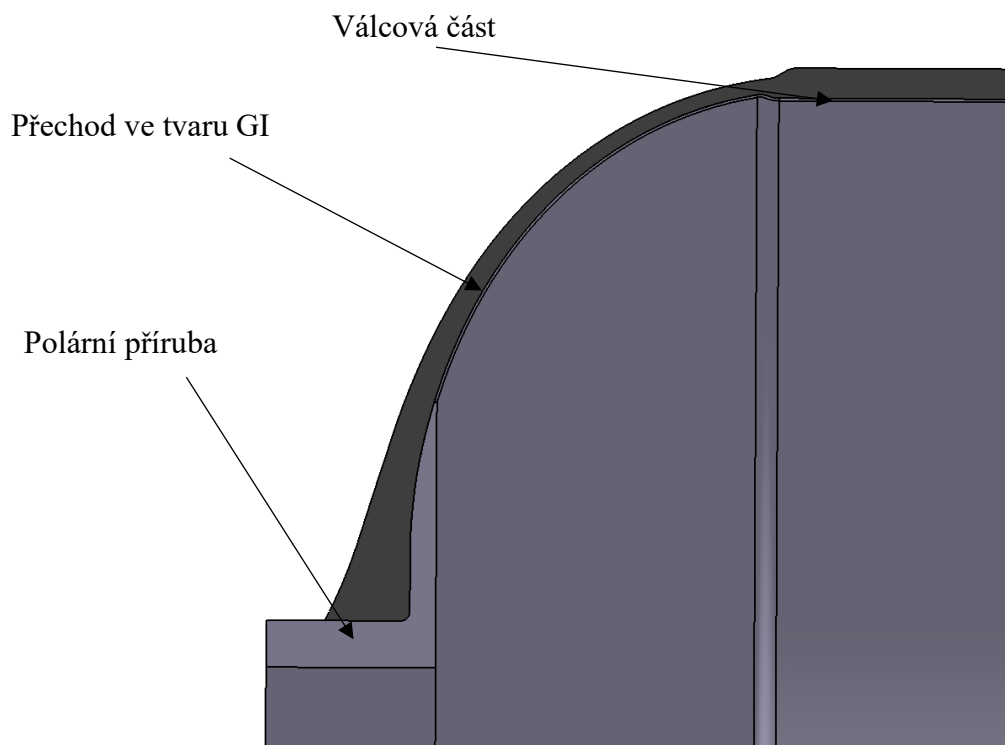
První variantou je svařovaný liner. Liner je vyroben z jednotlivých segmentů svařených dohromady. Liner nepřenáší zatížení, nemusí být pevný, ale musí těsnit, aby se  $N_2O$  nedostal do kontaktu s kompozitní stěnou. Byly rozpracovány 2 varianty, jedna ambiciózní, ale problematická na výrobu, a druhá konzervativní, která vychází z ověřeného designu z minulého roku.

#### **3.7.3.1 Ambiciózní varianta**

Pro liner stačí jen tenká vrstva na oddělení  $N_2O$  od stěny. Tenká vrstva je také lehká, což je výhodné. Při uvažované svařitelnosti plechu, za použití svařování laserem, je minimální tloušťka pro svařované díly 0,3mm. V ČR lze takový plech koupit ze slitiny Al EN AW-1050 H18. Liner byl navržen jako svařenec z následujících dílů:

- Polární příruba
- Přejechod ve tvaru GI
- Válcová část

Vizualizaci lineru lze vidět na Obr. 19.



Obr. 19 Kovový liner a jeho části

### **Polární příruba**

Polární příruba je celkem jednoduchá část. Je vyrobitelná jako třískově obráběný díl na soustruhu.

### **Přejchod ve tvaru GI**

Tento přechod je poměrně problematický. Tvar meridiánové křivky je obecný. Pro vytvoření co nejtenčího lineru, z plechu 0,3 nebo 0,5 mm je třeba hlubokého tažení plechu. Pro malou sérii jako je tato, je nejvhodnější na výrobu technologie kovotlačitelství. Výroba přípravku na vytlačení je levná a vyplatí se tak i pro jeden, dva kusy. Bohužel v dnešní době se kovotlačitelstvím zabývá jen posledních pár firem. Pokud by tuto část nebylo možné z plechu vyrobit, je připravená konzervativní varianta, která je těžší, ale s podobným návrhem má tým CTU SR zkušenosti z minulého ročníku.

### **Válcová část**

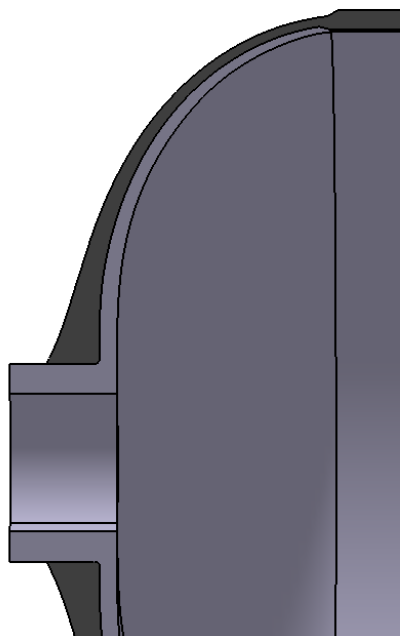
Válcová část je navržena jako plechový obdélník svinutý do trubky a svařený podélně. S výrobou této části nejsou očekávány potíže.

#### **3.7.3.2 Konzervativní varianta**

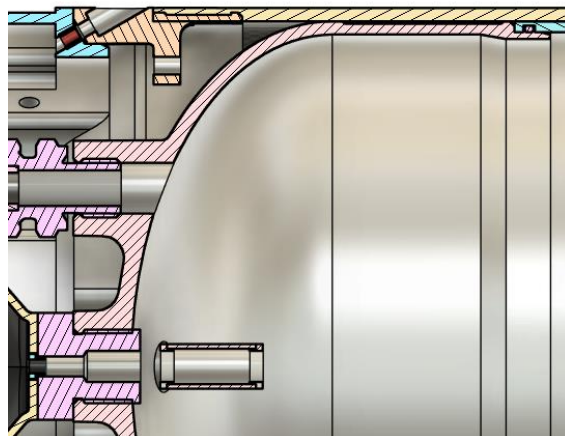
Pro konzervativní variantu zůstane stejná válcová část. Víka jsou plánována jako třískově obráběný díl. Následně se příruby přiloží k válcové části a svaří se dohromady. Na



obrázku Obr. 20 lze vidět detail konzervativní varianty, na obrázku Obr. 21 lze vidět variantu nádrže z minulého roku.



Obr. 20 Konzervativní varianta lineru



Obr. 21 řez modelem nádrže loňské rakety

### 3.7.4 Pokovovaný liner

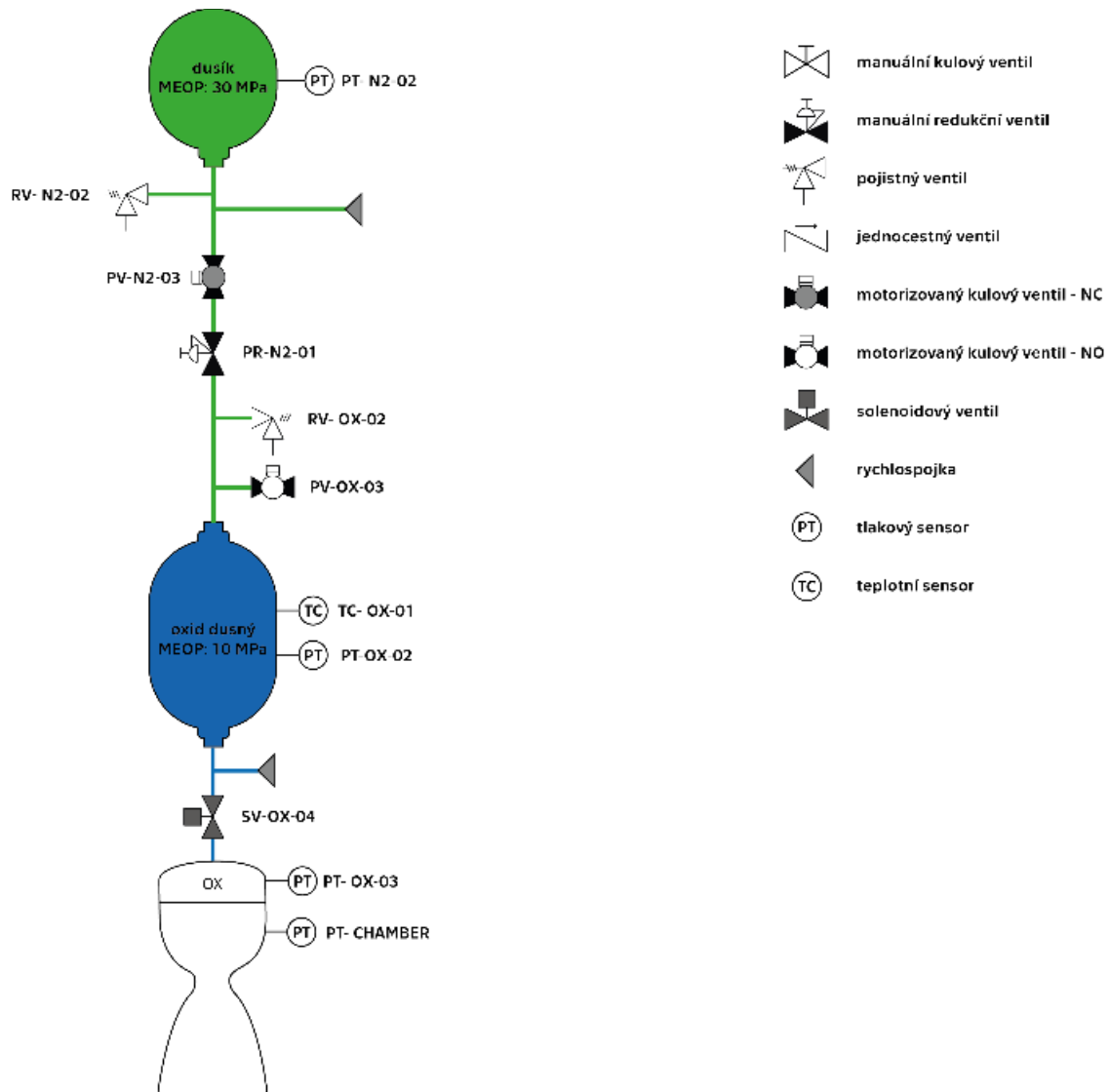
Druhá možnost výroby lineru je pomocí galvanického pokovení. Liner tak lze vyrobit velice tenký. Jelikož liner zajišťuje těsnost nádoby, měla by být vrstva silná alespoň řádově 0,1 mm. Takovouto metodu výroby COPV nádrží používá *NASA Marshall space flight center* a má tuto technologii patentovanou [18].

Postup výroby je následující:

Použije se model s požadovaným tvarem. Tento model je vyroben jako navíjecí trn. Návrh tohoto dílu popisuje kapitola 4.1 Návrh navíjecího přípravku. Poté se model složí společně s polárními přírubami a pokud je elektricky nevodivý, opatří se elektrovodivou vrstvou. Následně se pokoví v lázni a tím je liner hotový. Jako materiál vhodný pro toto použití je zvolen nikl, jelikož je vhodný na použití jako liner a dobře se galvanicky pokovuje. Pokovený liner by v řezu modelu vypadal stejně jako svařovaný, pro představu je na Obr. 19.

## 3.8 Napojení do palivové soustavy a usazení do rakety

Nádrž je integrální součástí rakety. Je napojena na palivový systém rakety. Tento systém se skládá z tlakovací části, nad nádrží a motorové části pod nádrží. Schéma rozvodů palivové soustavy znázorňuje schéma na Obr. 22.



Obr. 22 Schéma palivové soustavy rakety [2]

### 3.8.1 Přípojný rozměr

Jako přípojný rozměr do zbytku palivové soustavy byl zvolen závit G 3/4. Je zde výhodné použití G závitu, jelikož tento typ závitu lze těsnit na samotném závitě a eliminují se tak úniky vzniklé nepřesností výroby, se kterými tým v minulé sezóně bojoval. Velikost závitu byla zvolena i s ohledem na budoucí plány týmu. Závit tak bude sloužit jako standardní přípojovací rozměr na nádrže i do budoucích raket. To umožní jednodušší výrobu a kompatibilitu nových dílů se starými.

### 3.8.2 Rozvodné bloky

Ve schématu (Obr. 22) je vidět množství prvků které budou napojeny na soustavu s nádrží. Jsou rozděleny do 3 skupin. Ty, co musí být na horní straně nádrže, ty co musí být na spodní straně nádrže a ty, u kterých je umístění libovolné. Připojené prvky a jejich přípojně rozměry jsou uvedeny v tabulce Tab č. 20.

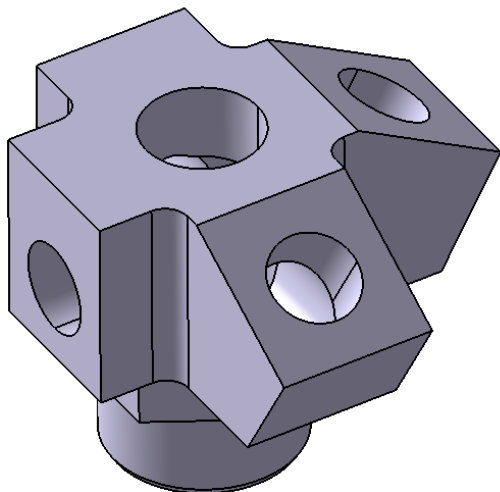
Tab č. 20 Seznam dílů připojených k nádrži a jejich přípojně rozměry

Díl	označení	přípojný rozměr
Redukční ventil	PR-N2-01	G 1/4
Pojistný ventil	RV-OX-02	G 1/4
Kulový ventil odpouštějící	PV-OX-03	G 1/4
Teplotní senzor	TC-OX-01	G 1/4
Tlakový senzor	PT-OX-02	G 1/4
Tankovací rychlospojka	trojúhelník	G 1/4
Hlavní ventil	SV-OX-04	G 3/8

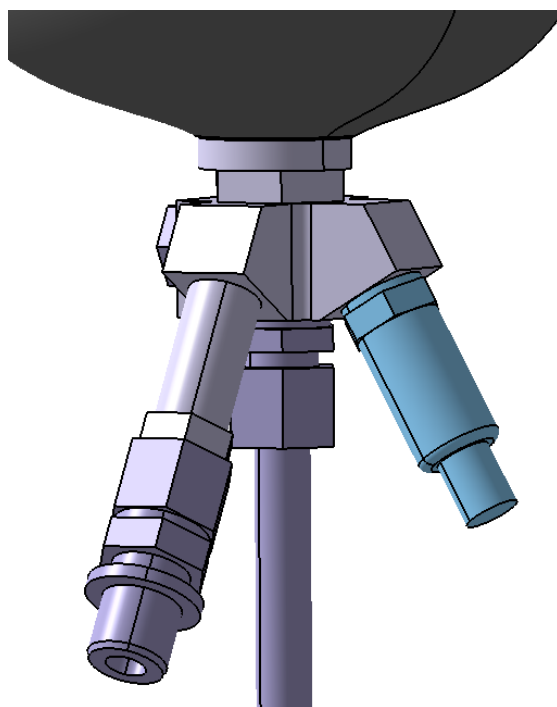
Velké množství připojených prvků palivové soustavy vytvořilo nutnost výroby rozvodných bloků s množstvím děr, jež se přišroubují do přírub na nádrži.

Pro tyto bloky jsou dané požadavky vlastnostmi palivové soustavy. Limitující je zde palivový přívod k motoru. Ten musí být minimálně na závit G 3/8, aby byly dodrženy kritické průřezy v palivové soustavě. Tento závit by měl být v ose nádrže, aby mezi nádrží a motorem byly co nejnižší tlakové ztráty. Všechny ostatní prvky je možné připojit na menší závit G 1/4. Další požadavek byl, aby tankovací rychlospojka byla ukotvena přímo do rozvodného bloku. A nevznikala by zde potřeba ji dále kotvit do nosné struktury rakety. Rychlospojka musí být pod úhlem 30° od osy rakety.

Tyto požadavky na rozvodné bloky daly vzniknout designu se čtyřmi obvodovými dírami se závitem G 1/4, jednou polární dírou se závitem G 3/8 a připojovacím závitem G 3/4 k tělu nádrže. Dvě obvodové díry jsou pod úhlem 30°, aby se zde mohly kotvit rychlospojky, a zároveň to je výhodné pro ukotvení měřících sond, které svými rozměry nemohou být kotveny v radiálním směru. Vizualizaci modelu rozvodového bloku lze vidět na obrázcích Obr. 23, Obr. 24.



Obr. 23 Rozvodný blok



Obr. 24 Osazený rozvodný blok

Rozvodny jsou navrženy dle pravidel soutěže tak, aby vydržely jak přetlak v nízkotlaké části palivového systému, tak ve vysokotlaké části. Tento díl tak bude v raketě celkem třikrát, dvakrát na palivové nádrži a jednou na tlakovací nádrži.

### 3.8.3 Připojení do nosné struktury

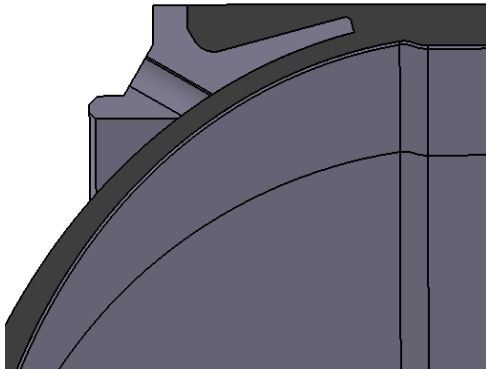
Nádrž je připojena ke zbytku nosné soustavy rakety pomocí radiálně axiálních spojů, tzv. RADAXů. Tyto spoje byly navrženy kolegou v týmu CTU SR v jeho závěrečné práci [19]. Tyto spojky jsou hliníkové prstence podél obvodu rakety se 16 šrouby.

Většina spojení stěn s RADAX spojkami v raketě jsou lepenými spoji. Při výrobě loňské rakety se však osvědčilo obejít lepení a dané prstence na tvarový zámek přímo zavinout už při navíjení nádrže do laminátové stěny. Spoj je tak méně náchylný na nepřesnosti při lepení, chyby při samotném lepení, jako například nezaschnutí lepidla, a je i únosnější.

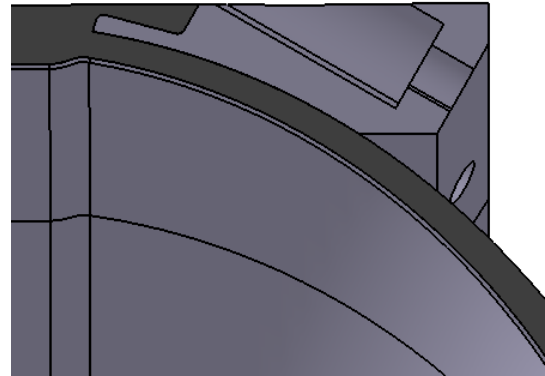
Velikou výhodou zavinování RADAXů je veliké zefektivnění výroby. Pokud je na to přizpůsobený navíjecí přípravek, lze nádrž vyrobit při jedné navíjecí operaci na jednom stroji, bez potřeby následných úprav či obrábění kontaktních rozměrů.

Geometrie tvarových zámků je přizpůsobena tak, aby byly zámkové prvky zavinuty při navíjení vnější radiální vrstvy, tj. směr 90°. Nádrž s přidělanými RADAXy by bylo vhodné převinout

tenkou krycí vrstvou s navíjecím úhlem  $\pm 45^\circ$ . Tato vrstva vylepší kvalitu povrchu, vzhled rakety, a také budou radaxy v kompozitu lépe držet. Zavinutí RADAXů je možné vidět na Obr. 25 a Obr. 26.



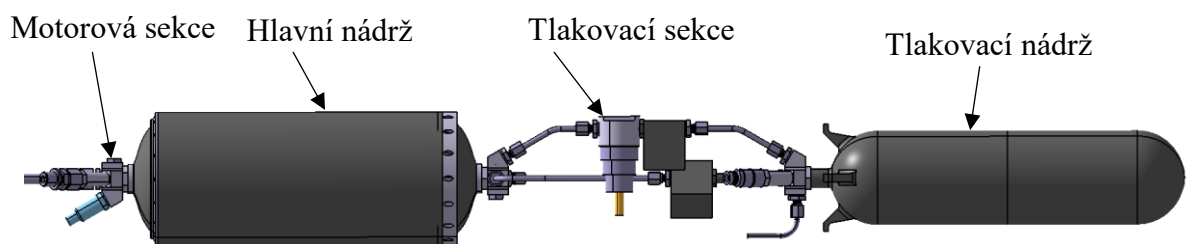
Obr. 25 Řez zavinutím spodního RADAXu



Obr. 26 Řez zavinutím horního RADAXu

### 3.8.4 Celkový model palivové soustavy

Nakonec vzniknul celkový model celé palivové soustavy. Na tomto modelu je možné vidět seskládané komponenty palivové soustavy a ověřit jejich polohy v raketě. Tento model a usazení nádrže do palivové soustavy je možné vidět na obrázcích Obr. 27 a Obr. 28.



Obr. 27 Schéma celé palivové soustavy



Obr. 28 Detail usazení nádrže v palivové soustavě

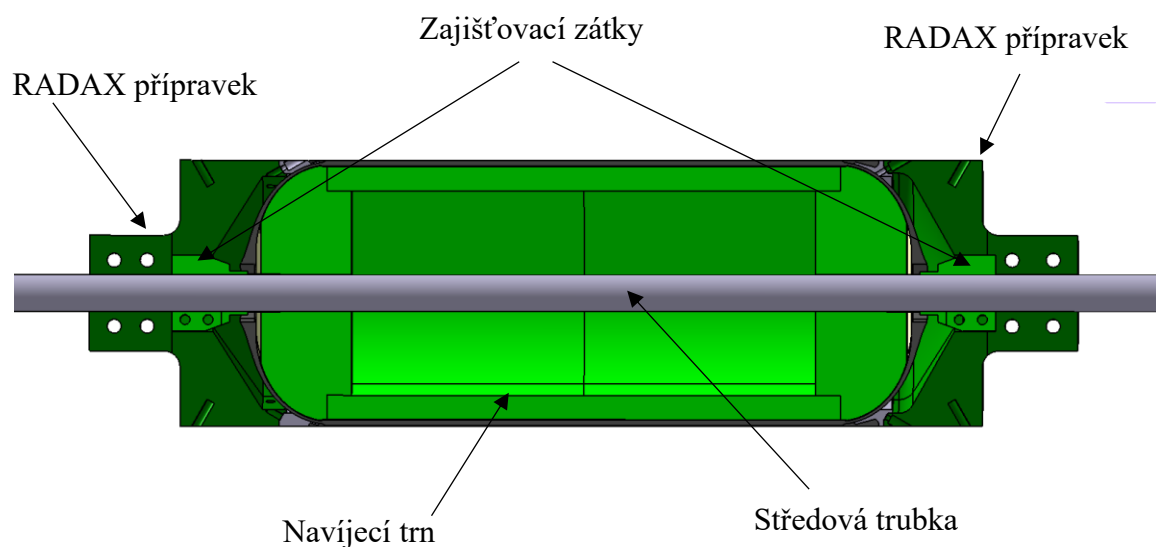
# 4 Návrh navíjecích přípravků a příprava výroby

Tato kapitola se zabývá návrhem výroby a s tím souvisejícím návrhem výrobních přípravků. Výroba je konzultována a bude realizována ve spolupráci s firmou CompoTech. Ve firmě CompoTech bude probíhat navíjení nádrže. Všechny ostatní části výroby, včetně návrhu navíjecích přípravků zajišťuje tým CTU SR a autor této práce.

## 4.1 Návrh navíjecího přípravku

Pro navíjení kompozitů je potřeba navíjecí trn, který se omotá vláknem s pryskyřicí. Po vytvrzení pryskyřice kompozit okopíruje tvar trnu a tím získá navíjená součást svoji geometrii. Toto je jednoduché u geometrií jako je trubka a podobně, kde se dá trn z vytvrzeného kompozitu vytáhnout. Hůře proveditelné to je u nádrže, která má válcový tvar a na kocích je zakončena pouze malými polárními otvory. Trn pak musí být vyndatelný pro opakované použití (například nafukovací, nebo z více částí), nebo jednorázový a následně odstranitelný, podobně jako při použití jader při odlévání. Navíjecí přípravek také musí unést síly vyvinuté při navíjení. Jelikož je nádoba vybavena linerem, může liner sloužit jako navíjecí trn. Kvůli odlehčení je liner tenký a tím pádem se může při navíjení deformovat. Aby se zabránilo zničení navíjecího přípravku je navržena podpěrná struktura, která zároveň slouží jako svařovací přípravek pro dodržení tvaru u svařovaného lineru, nebo jako model u pokovované varianty lineru.

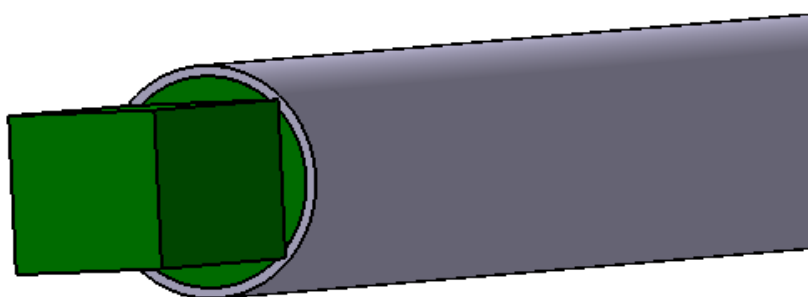
Celý navíjecí přípravek je navržen tak aby bylo možné nádrž navinout při jedné operaci na jednom stroji včetně integrace RADAX spojek. Vizualizaci celého přípravku lze vidět na obrázku Obr. 29. Přípravek se skládá z následujících prvků: středové trubky, navíjecího trnu s linerem (světle zelená), zajišťovacích zátek a RADAX přípravků (tmavě zelené).



Obr. 29 Řez modelem navíjecího přípravku

#### 4.1.1 Středová trubka

Středová trubka je základním kamenem přípravku. Na tuto trubku jsou připevněny všechny další části přípravku. Na konci trubky jsou vlepená víčka se čtyřhranem, pro přesné polohování přípravku na stroji při navíjení.

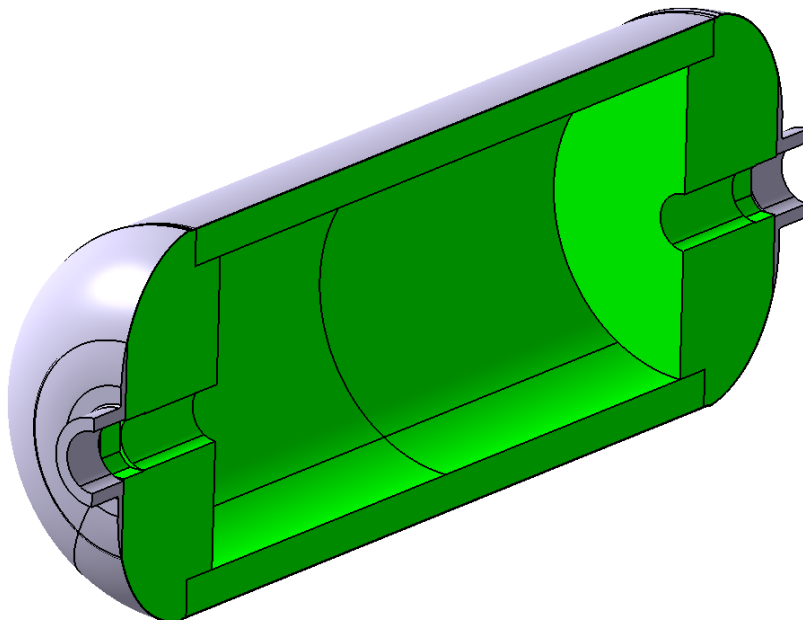


Obr. 30 Zakončení středové trubky

#### 4.1.2 Navíjecí trn

Trn slouží jako model pro tvar nádoby. Vnější povrch trnu tvoří kovový liner. Jeho výroba je popsána v kapitole 3.7 Kovový liner. Vnitřní část trnu vyztužuje kovový liner a

musí být po výrobě odstranitelná. Vizualizaci řezu jedním z návrhů je možné vidět na Obr. 31. Jsou navrženy dvě metody výroby trnu.



*Obr. 31 Řez 3D tištěným navýjecím trnem s linerem*

#### **4.1.2.1 Polystyrenový trn**

Výhodou použití polystyrenu ve formě extrudovaného polystyrenu je jeho snadná dostupnost a jednoduchost obrábění. Další velikou výhodou je oproti 3D tištěným dílům jeho snadné odleptání organickými rozpouštědly. Nevýhodou je pro přesné vytvarování trnu použití výrobních přípravků nebo ideálně číslicově řízeného stroje. Další nevýhodou je jeho malá mechanická odolnost a malá tepelná odolnost, což může být problém při svařování nádrže.

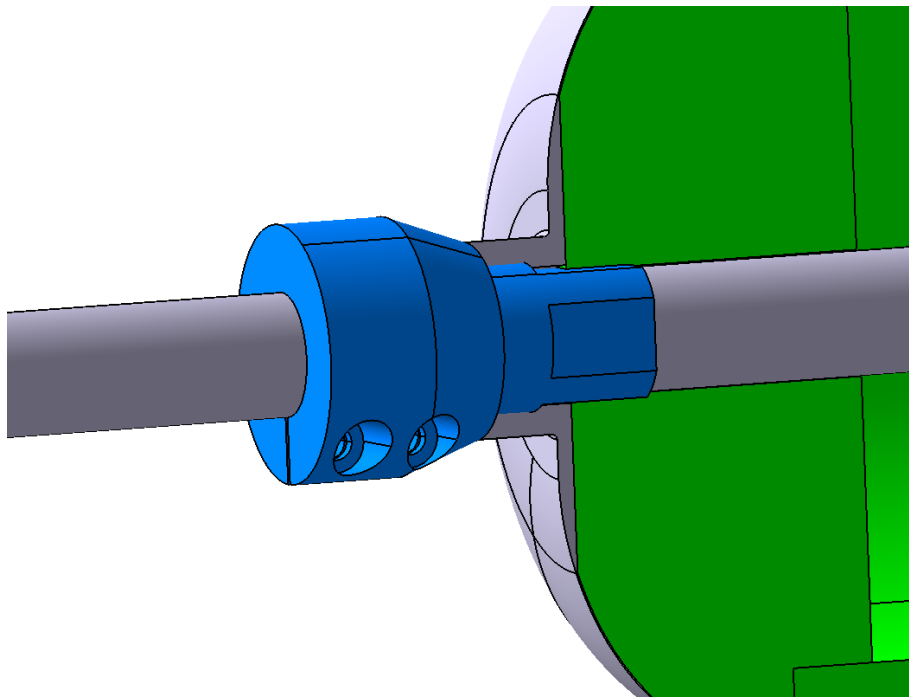
#### **4.1.2.2 3D tištěný trn**

3D tištěný trn má velkou výhodu v jednoduchosti výroby a snadné rychlé úpravy geometrie, tím i rychlosti výroby a možnosti rychlé výroby více variant. 3D tištěný díl je také pevnější než díl vyrobený z extrudovaného polystyrenu. Nevýhodou je problematictější odstranění trnu z vnitřku nádrže. Toto úskalí lze řešit volbou materiálu, ze kterého bude trn vytištěn. Na trhu jsou filameny rozpustitelné ve vodě, nebo slabých kyselinách, ale jejich cena je poměrně vysoká oproti extrudovanému polystyrenu.



### 4.1.3 Zajišťovací zátky

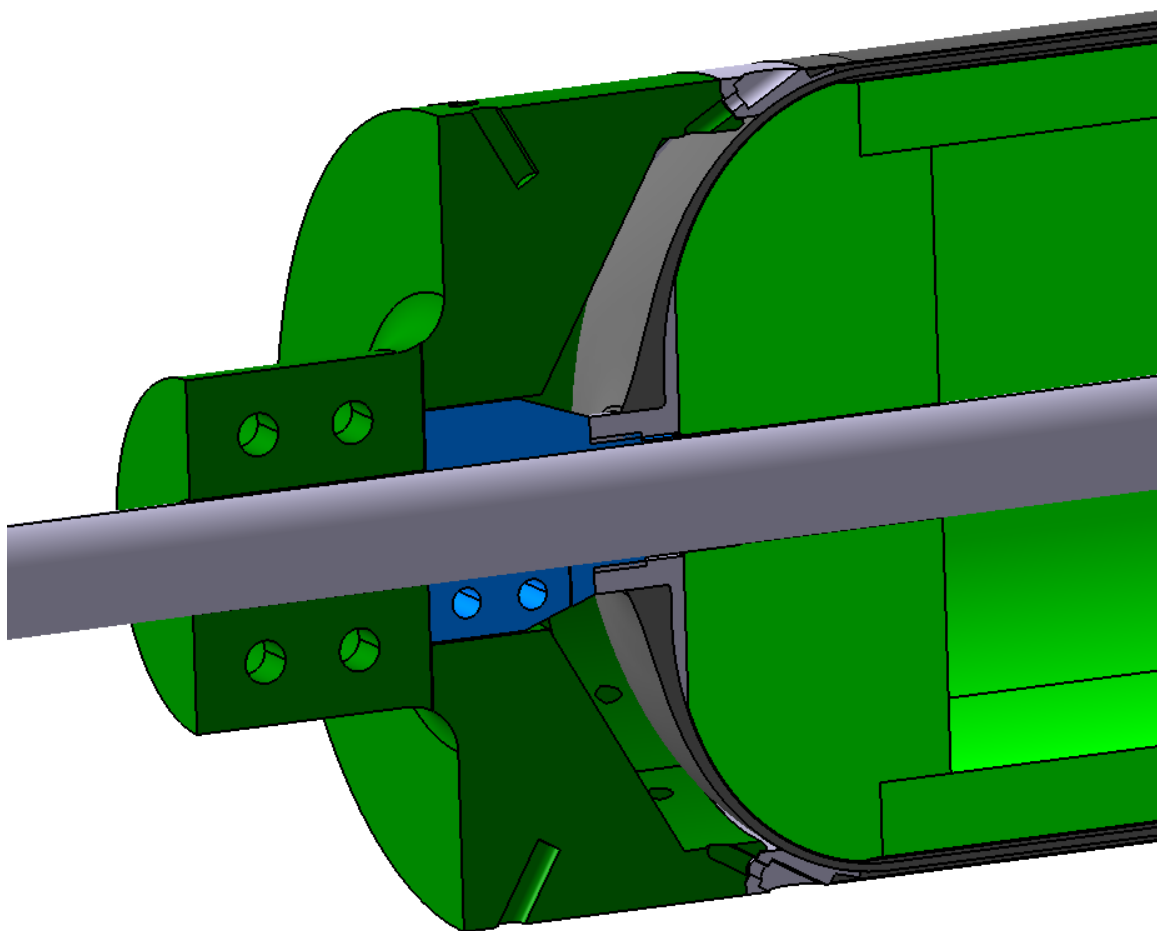
Zátky slouží k upevnění navíjecího trnu na přípravku. Zátky jsou zašroubovány do polárních přírub na lineru a mají na sobě svěrný mechanismus, jenž navíjecí trn upevní ke středové trubce. Řez detailem zajišťovací zátky upevňující navíjecí trn na středovou trubku lze vidět na Obr. 32.



*Obr. 32 Model zajišťovací zátky*

### 4.1.4 RADAX přípravky

Tyto přípravky slouží k upevnění a napolohování RADAX spojek při výrobě. Přípravky také obsahují díry pro kolíčky, aby bylo možné navinout krycí vrstvu.

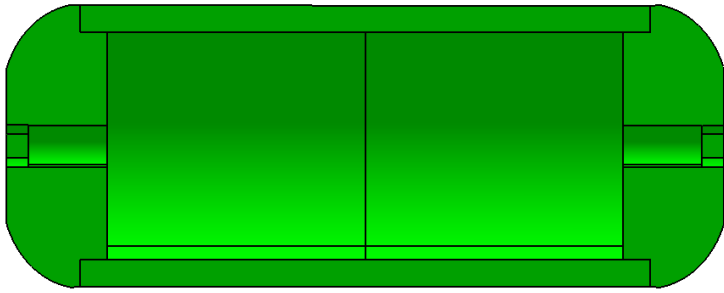
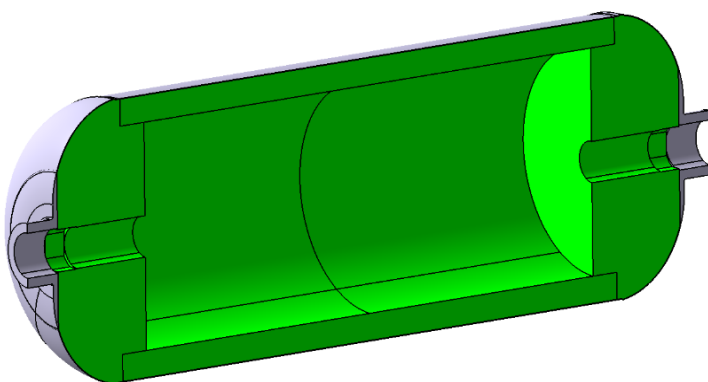
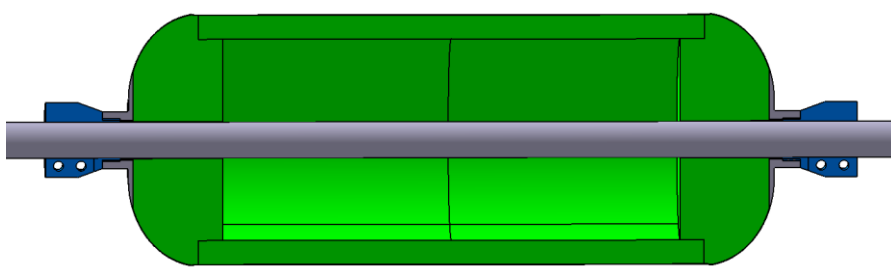


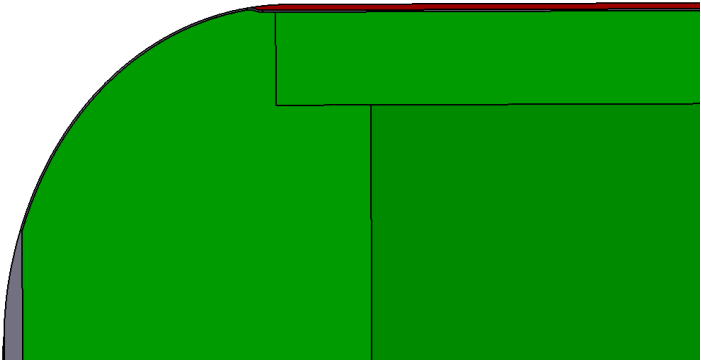
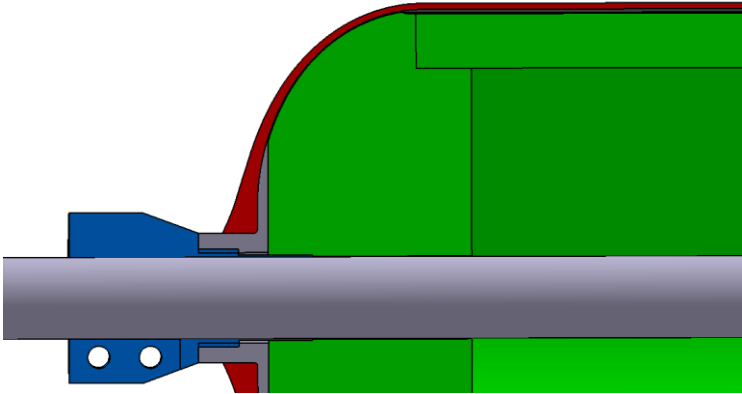
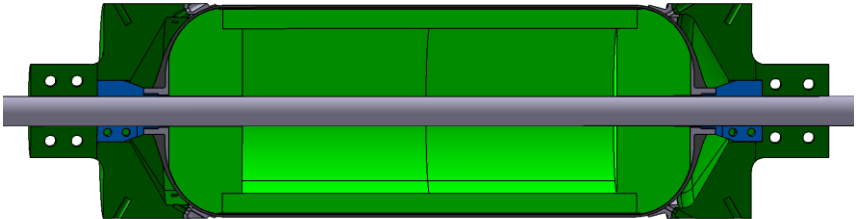
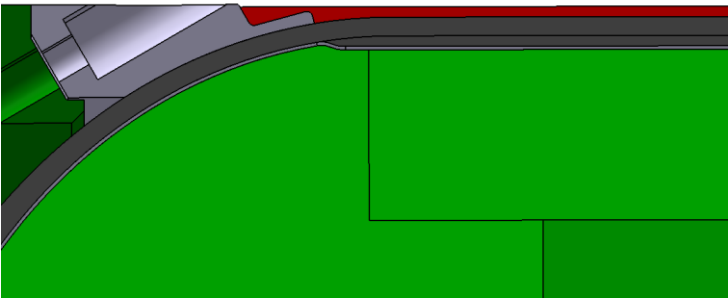
*Obr. 33 Detailní pohled na RADAX přípravek*

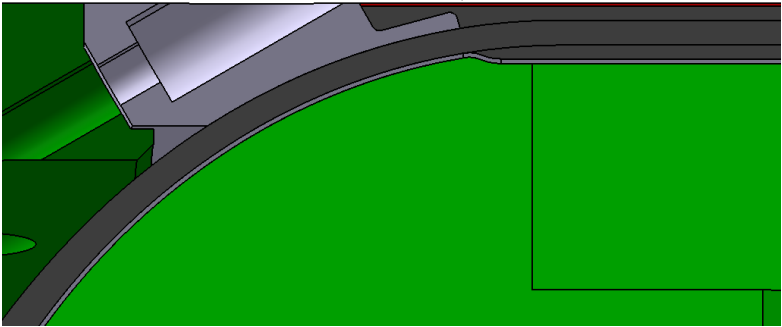
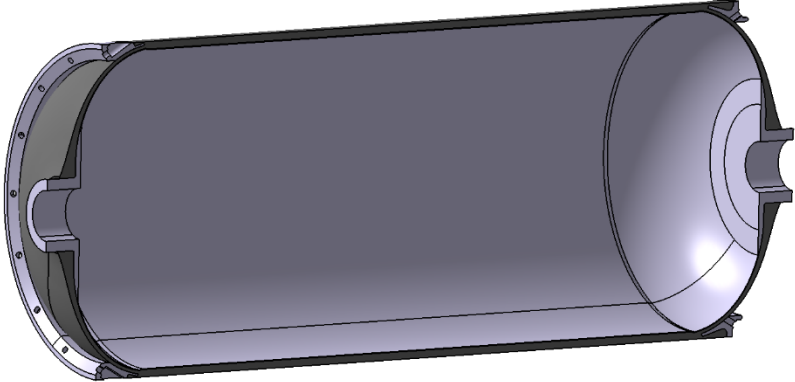

## **4.2 Návrh výroby**

Jako návrh výroby jsou zde popsány postupně výrobní kroky, viz Tab č. 21. Každý krok je doplněn obrázkem řezu modelu pro lepší vizualizaci problematiky. Při jednotlivých krocích navíjení je nová vrstva v obrázku vždy označena červeně.

Tab č. 21 Výrobní postup

Kompletace přípravku	
výrobní operace	doplňující obrázek
Výroba a kompletace trnu	
Přiložení polárních přírub, kompletace lineru (svařením z plech. kusů, nebo galvanické pokovení).	
Instalace na vodící tyč, přidělení přes zátky	
Přeměření správnosti geometrie a příprava povrchů na navíjení	<p>Přeměření důležitých rozměrů</p> <p>Zdrsnění povrchu lineru</p> <p>Očištění povrchu lineru</p> <p>Odmaštění povrchu lineru</p> <p>Separace povrchu přípravku</p>
Proces navíjení	

<p>Navinutí prvních vrstev 90°</p>	
<p>Navinutí axiálních vrstev přes dómy</p>	
<p>Přiložení RADAX spojek a zafixování jejich polohy</p>	
<p>Převinutí vrstvami 90° a zarovnání všech nerovností</p>	

<p>Navinutí krycí vrstvy <math>\pm 45^\circ</math></p>	<p>Vrstva o tloušťce 0,4mm</p> 
<p>Dokončovací operace</p>	
<p>Vytvrzení kompozitu</p>	<p>Vytvrzení 48 hodin při teplotě 23°C</p>
<p>Rozebrání přípravku a odstranění trnu</p>	
<p>Instalace nádrže do rakety</p>	

## 5 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout nádrž na okysličovadlo pro studentskou raketu týmu CTU SR na soutěž EuRoC 2024. U úvodu byly sepsány požadavky na vlastnosti nádrže plynoucí z koncepčního návrhu celé soutěžní rakety. V rešerši byly zhodnoceny jednotlivé přístupy k této problematice. Výstupem rešerše byl výběr nejvhodnějšího typu nádrže pro použití do studentské rakety. Výběr byl uskutečněn pomocí multikriteriálního rozhodování. Jako nejvhodnější se ukázala být kompozitní navíjená tlaková nádoba s kovovým linerem (typ 3).

Nádoba byla navržena podle pravidel soutěže EuRoC na trojnásobek pracovního přetlaku. Byla navržena válcová nádrž s geometrií vícečlenu jako geodetického isotenzoidu. Nádrž má objem přibližně 6,9l. Její délka je 430 mm mezi vnějšími konci přírub, při vnějším průměru 161 mm. Byl proveden analytický výpočet kompozitní stěny nádrže přes ABD matici. Navržená geometrie nádoby byla pevnostně ověřena pomocí kritéria maximálního napětí ( $\sigma_{max}$ ) na vytipované případy zatížení během závodního letu a manipulace s raketou. V rámci výpočtu byl vytvořen excelovský program, který bude možné použít v týmu CTU SR pro návrhy nádrží budoucích raket.

Výsledkem práce je také příprava výroby a navržení navíjecího přípravku pro výrobu nádrže. Za zmínku stojí inovativní přístup k výrobě, kdy je výroba, respektive přípravek navrhován tak, aby po navinutí vypadla ze stroje hotová nádrž, u které nebude třeba žádného obrábění a dokončovacích operací, a bude ji tak možné po rozebrání přípravku rovnou osadit a namontovat do rakety. Tento přístup by mohl být přínosem ve zrychlení výroby pro větší série.

Na tuto práci přímo navazuje výroba nádrže ve spolupráci s firmou *Compo Tech PLUS, spol. s r.o.*, která je stěžejním partnerem pro studentský tým CTU Space Research a její testování tak, aby se tým mohl úspěšně zúčastnit soutěže EuRoC v říjnu 2024. Jako pokračování této práce by bylo vhodné udělat detailnější analýzu navržené konstrukce například pomocí MKP analýzy, pro lepší predikci chování materiálu, případně udělat detailnější materiálový průzkum, jelikož informace o chování  $N_2O$  při kontaktu s materiály nádrže za teplot a tlaků panujících uvnitř, jsou značně omezené.

## Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Návrh rakety s hybridním motorem [2].....	11
Obr. 2 Typy tlakových nádob [8] .....	13
Obr. 3 Svařovaná kovová nádrž týmu ASTG [19] .....	14
Obr. 4 Nádrž týmu WARR (foto Autor) .....	15
Obr. 5 Liner pro výrobu COPV nádže [5].....	16
Obr. 6: Segment rakety s integrovanou nádrží [20].....	16
Obr. 7 Navíjení nádrže na liner pro raketu Stratos IV [7].....	17
Obr. 8 Výroba dómu nádrže z uhlíkového kompozitu s termoplastickou maticí [9] 18	
Obr. 9 Řez modelem nádrže v raketě Illustria.....	19
Obr. 10 pootočení laminy [21] .....	29
Obr. 11 Zatížení elemnetu laminátu [11] .....	30
Obr. 12 Definice tlouštěk lamin kompozitní stěny [11] .....	31
Obr. 13 Postup výpočtu pro získání napětí v jednotlivých vrstvách [11] .....	31
Obr. 14 Tvar dómu GI [12] .....	34
Obr. 15 Schéma polární příruby GI s doporučenými rozměry [13] .....	36
Obr. 16 Řez detailním modelem nádrže.....	50
Obr. 17 Přejíhový rádiu s mezi dómem a válcovou částí nádrže .....	51
Obr. 18 Polární otvor s přírubou.....	52
Obr. 19 Kovový liner a jeho části.....	56
Obr. 20 Konzervativní varianta lineru .....	57
Obr. 21 řez modelem nádrže loňské rakety.....	57
Obr. 22 Schéma palivové soustavy rakety [2].....	58
Obr. 23 Rozvodný blok.....	60
Obr. 24 Osazený rozvodný blok.....	60
Obr. 25 Řez zavínutím spodního RADAXu.....	61
Obr. 26 Řez zavínutím horního RADAXu.....	61
Obr. 27 Schéma celé palivové soustavy.....	61
Obr. 28 Detail usazení nádrže v palivové soustavě .....	61
Obr. 29 řez modelem navíjecího přípravku.....	63
Obr. 30 Zakončení středové trubky .....	63
Obr. 31 Řez 3D tištěným navíjecím trnem s linerem .....	64
Obr. 32 Model zajišťovací zátky .....	65

Obr. 33 Detail na RADAX přípravek .....	66
---	----

## Seznam použitých tabulek

Tab č. 1 Shrnutí parametrů návrhu rakety [2] .....	12
Tab č. 2 Volba kritérií pro výběr a jejich vah .....	22
Tab č. 3 Hodnocení kritérií .....	23
Tab č. 4 Vyhodnocení variant .....	23
Tab č. 5 Vlastnosti okysličovačla.....	24
Tab č. 6 Výsledné parametry nádrže .....	25
Tab č. 7 Případy zatížení nádrže.....	27
Tab č. 8 Zvolené meze pevnosti laminátu.....	37
Tab č. 9 Tloušťky navíjených vrstev .....	38
Tab č. 10 Skladba stěny navrhované nádrže .....	39
Tab č. 11 Koeficienty bezpečnosti pro prvotní návrh.....	41
Tab č. 12 Parametry stěny pro druhou iteraci .....	41
Tab č. 13 Koeficienty bezpečnosti pro druhou iteraci .....	43
Tab č. 14 Vstupní hodnoty pro výpočet dómu .....	44
Tab č. 15 Vypočtené parametry prvních 5 bodů .....	45
Tab č. 16 Nejmenší hodnoty koeficientů bezpečnosti na GI dómu.....	47
Tab č. 17 Hodnoty vektorů liniových sil pro ostatní případy zatížení.....	47
Tab č. 18 nejvyšší hodnoty zatížení a vypočtené bezpečnostní koeficienty .....	49
Tab č. 19 Možné materiály pro výrobu lineru.....	54
Tab č. 20 Seznam dílů připojených k nádrži a jejich přípojně rozměry .....	59
Tab č. 21 Výrobní postup.....	67



## Seznam použitých grafů

Graf 1 Meridiánová křivka GI.....	35
Graf 2 Průběh $\sigma_L$ přes kompozitní stěnu první iterace.....	39
Graf 3 Průběh $\sigma_T$ přes kompozitní stěnu první iterace.....	40
Graf 4 Průběh $\tau_{LT}$ přes kompozitní stěnu první iterace.....	40
Graf 5 Průběh $\sigma_L$ přes kompozitní stěnu druhé iterace .....	42
Graf 6 Průběh $\sigma_T$ přes kompozitní stěnu druhé iterace .....	42
Graf 7 Průběh $\tau_{LT}$ přes kompozitní stěnu druhé iterace .....	43
Graf 8 Vizualizace meridiánové křivky GI dómu .....	44
Graf 9 Průběh $\sigma_L$ podél geometrie GI dómu .....	46
Graf 10 Průběh $\sigma_L$ , $\tau_{LT}$ podél geometrie GI dómu.....	46
Graf 11 Podélné napětí pro ostatní případy zatížení.....	48
Graf 12 Příčné napětí pro ostatní případy zatížení .....	48
Graf 13 Smykové napětí pro ostatní případy zatížení.....	49
Graf 14 Vizualizace geometrie stěny důležité pro detailní model nádrže .....	51

## Seznam použitých zkratk

CTU SR	CTU Space Research
EuRoC	European Rocketry Challenge
FRP	Fiber reinforced plastics
COPV	composite overwrapped pressure vessel
PVC	Polyvinylchlorid
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
LN2O	kapalný oxid dusný
ASTG	Aerospace team Graz
WARR	WARR Rocketry
TU Delft	Delft University of Technology
CompoTech	Compo Tech PLUS, spol. s r.o.
GI	Geodetický isotenzoid
HZ	Hookův zákon
HPTB	Hydroxyl-terminated polybutadiene
AIGA	Asia Industrial Gases Association
PTFE	polytetrafluoroethylene
PCTFE	polychlorotrifluoroethylene
FEP	Fluorinated Ethylene-Propylene
PEEK	polyetheretherketone
EPDM	ethylene propylene diene monomer
NASA	National
RADAX	Radiálně axiální spojka

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Název
$A_{ij}$		Prvek A složky ABD matice
$A$		A složka ABD matice
$B_{ij}$		Prvek B složky ABD matice
$B$		B složka ABD matice
$\gamma_{LT}$		Skos ve směru LT
$D_{ij}$		Prvek D složky ABD matice
$D$		D složka ABD matice
$d$	mm	průměr rakety
$\varepsilon$		relativní deformace
$\boldsymbol{\varepsilon}$		Vektor deformace
$\varepsilon_L$		Deformace ve směru L
$\varepsilon_T$		Deformace ve směru T
$\boldsymbol{\varepsilon}_{LT}$		Vektor deformací v souřadnicích LT
$\boldsymbol{\varepsilon}_m^0$		Vektor deformací laminátu
$\boldsymbol{\varepsilon}_{xy}$		Vektor deformací v souřadnicích xy
$E_{x_{ekv}}$	Pa	Ekvivalentní modul pružnosti pro laminát ve směru x
$E_1, E_2, E_3$	Pa	modul pružnosti ve směrech 1, 2, 3
$F_x$	N	síla ve směru osy rakety
$F_y$	N	síla ve směru osy y
$\theta$	°	Úhel natočení
$h$	mm	Tloušťka stěny
$h_0$	mm	Tloušťka stěny válcové části
$h_k$	mm	Tloušťka vrstvy laminátu
$i, j, k$		indexy
$I_c$	Ns	celkový specifický impuls motoru
$\mathbf{k}$		Vektor zkrutu
$k_L$		Koeficient bezpečnosti ve směru L
$k_{LT}$		Koeficient bezpečnosti ve směru LT

$k_T$		Koeficient bezpečnosti ve směru T
$k_i$		Koeficient bezpečnosti ve směru i
L		Souřadnice ve směru podél vláken
LT		Rovina směrů LT
$M_o$	Nm	ohybový moment
$m_c$	kg	celková hmotnost pohonných látek
$m_f$	kg	hmotnost paliva
$m_o$	kg	hmotnost oksličovadla
<b>M</b>		Vektor liniových momentů
<b>N</b>		Vektor liniových sil
$N_\varphi$	N/mm	Liniová síla ve směru $\varphi$
$N_\psi$	N/mm	Liniová síla ve směru $\psi$
$\nu_{21}, \nu_{31}, \nu_{23}$		Poissonovo číslo v hlavních směrech
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	hustota
$p_{nom}$	Pa	nominální tlak v palivové soustavě
<b>Q</b>		Matice tuhosti
<b>Q</b>		Matice mimoosové tuhosti
<b>Q<sub>xy</sub></b>		Matice mimoosové tuhosti
<b>Q<sub>k</sub></b>		Matice mimoosové tuhosti dané vrstvy
$Q_{ij}$		Prvek matice tuhosti
$R_1, R_2$	Mm	Hlavní poloměry křivosti
$R_{pL}^-$	Pa	Mez pevnosti v podélném tahu (ve směru L)
$R_{pL}^+$	Pa	Mez pevnosti v podélném tlaku (ve směru L)
$R_{pT}^-$	Pa	Mez pevnosti v příčném tahu (ve směru T)
$R_{pT}^+$	Pa	Mez pevnosti v příčném tlaku (ve směru T)
$R_\varphi$	Mm	Hlavní poloměr ve směru $\varphi$
$R_\psi$	mm	Hlavní poloměr ve směru $\psi$
$r_0$	mm	Poloměr polárního otvoru
r	mm	Poloměr v souřadnicovém systému xy
R	mm	Poloměr střednice válcové části
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$	Pa	Napětí v hlavních směrech

$\sigma_L$		Napětí ve směru T
$\sigma_T$		Napětí ve směru L
$\sigma_{ekv}$	Pa	Ekvivalentní napětí
$\sigma_m$	Pa	Meridiánové napětí
$\sigma_r$	Pa	Radiální napětí
$\sigma_\varphi$	Pa	Napětí ve směru $\varphi$
$\sigma_\psi$	Pa	Napětí ve směru $\psi$
$\sigma_{LT}$		Vektor napětí v souřadnicích LT
$\sigma_{LT}^k$		Vektor napětí pro danou vrstvu v souřadnicích LT
$\sigma_k$		Vektor napětí pro danou vrstvu
$\sigma_{xy}$		Vektor napětí v souřadnicích xy
$\sigma_{xy}^k$		Vektor napětí pro danou vrstvu v souřadnicích xy
$\sigma$		Vektor napětí
$S$		Matice poddajnosti
$\tau_{dLT}^-$	Pa	Mez pevnosti ve smyku (ve směru LT)
$\tau_{LT}$		Napětí ve směru LT
$\tau_{\varphi\psi}$	Pa	Smykové napětí ve $\varphi\psi$
$T$		Souřadnice ve příčném směru na vlákna
$T_\sigma$		Transformační matice pro vektor napětí
$T$		Transformační matice
$T$	N	Tah motoru
$T_\varepsilon$		Transformační matice pro vektor deformací
$T_\sigma^k$		Transformační matice napětí pro danou vrstvu
$V_f$		Objemový podíl vláken v kompozitu
$\psi, \varphi$		Směry souřadného systému $\psi\varphi$
$\omega$	°	Úhel vinutí vlákna
$\omega_0$	°	Úhel vinutí kompozitu válcové části
$W_0$	mm <sup>3</sup>	Modul průřezu v ohybu

## **Seznam použitých programů**

Microsoft Office Word

Microsoft Office Excel

Catia V5R21

Autodesk Fusion 360

OpenRocket

# Bibliografie

- [1] D'ÁVILA, Inês; LARSEN, Jacob Skov; COSTA, Pedro a PERES, Tiago. *EUROPEAN ROCKETRY CHALLENGE DESIGN, TEST & EVALUATION GUIDE*. online. Version 4.1. 2023. Dostupné z: [https://euroc.pt/wpcontent/uploads/2023/03/PTS\\_EDU\\_EuRoC\\_ST\\_000455\\_DTEG\\_v4.1.pdf](https://euroc.pt/wpcontent/uploads/2023/03/PTS_EDU_EuRoC_ST_000455_DTEG_v4.1.pdf). [cit. 2024-02-15].
- [2] JEŽEK, Vojtěch a HOŘEJŠÍ, Daniel. *CTU Space Reseach, EuRoC 2024 preliminary rocket design*. CTU Space Reseach, 2024.
- [3] FOWLER, Calum P.; ORIFICI, Adrian C. a WANG, Chun H. A review of toroidal composite pressure vessel optimisation and damage tolerant design for high pressure gaseous fuel storage. online. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016, roč. 41, č. 47. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916330336#bib12>. [cit. 2024-02-14].
- [4] GARDINER, GINGER. Composites end markets: Pressure vessels (2022). online. 2021. Dostupné z: <https://etcwinders.com/news/compositesworld-the-markets-pressure-vessels-2022/>. [cit. 2024-02-15].
- [5] TAM, Walter H.; GRIFFIN, Paul S. a JACKSON, Arthur C. DESIGN AND MANUFACTURE OF A COMPOSITE OVERWRAPPED PRESSURANT TANK ASSEMBLY. online. 2002. Dostupné z: [https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/Pressure\\_vessels/CFRP\\_Ti\\_PV.pdf](https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/Pressure_vessels/CFRP_Ti_PV.pdf). [cit. 2024-02-16].
- [6] *Stratos IV*. online. In: Delft Aerospace Rocket Engineering. 2024. Dostupné z: <https://dare.tudelft.nl/stratos4/>. [cit. 2024-05-22].
- [7] *Under the magnifying glass*. online. 2020. Dostupné z: <https://www.facebook.com/daretudelft/photos/a.430432640351510/3603522596375816/>. [cit. 2024-05-22].
- [8] BLACK, Sara. An update on composite tanks for cryogenes. online. *Composite world*. 2005. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/an-update-on-composite-tanks-for-cryogenes>. [cit. 2024-02-15].
- [9] GARDINER, GINGER. CFRTP upper stage propellant tank. online. In: . Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/cfrtp-upper-stage-propellant-tank>. [cit. 2024-02-16].
- [10] CTU SPACE RESEARCH, . *CTU Space Research, EuRoC 2023 design rewiew*. 2023.
- [11] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vydání. Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-273-X.
- [12] PADOVEC, Z.; VONDRÁČEK, D. a MAREŠ, T. The analytical and numerical stress analysis of various domes for composite pressure vessels. *Applied and Computational Mechanics*. 2022, roč. 2022, č. 16, s. 151-166.
- [13] PADOVEC, J. Napětí ve stěnách vinutých kompozitních tlakových nádob různých meridiánových tvarů. *Strojírnoství*. 1981, roč. 31, č. 5, s. 272-280.

- [14] HAYES, Kenneth E. *THE METAL-CATALYZED DECOMPOSITION OF NITROUS OXIDE (I). DECOMPOSITION ON PURE SILVER, SILVER-GOLD, AND SILVER-CALCIUM ALLOYS*. Dostupné z: <https://cdnscepub.com/doi/pdf/10.1139/v59-080>. 1959.
- [15] ASIA INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION. *SAFE PRACTICES FOR STORAGE AND HANDLING OF NITROUS OXIDE*. 2016.
- [16] THICKSTEN, Zachary; MACKLIN, Frank a CAMPBELL, John. Handling Considerations of Nitrous Oxide in Hybrid Rocket Motor Testing. online. 2012. Dostupné z: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2008-4830>. [cit. 2024-05-21].
- [17] JIAQI, Yue a HAO, Chen. Catalytic activity prediction of different metal surfaces for N<sub>2</sub>O catalytic decomposition by density functional theory. online. *Computational and Theoretical Chemistry*. 2015, č. 1057, s. 6. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210271X15000365>. [cit. 2024-05-21].
- [18] DELAY, Tom. Making a Metal-Lined Composite-Overwrapped Pressure Vessel. *NASA Tech Briefs*. 2005, s. 1.
- [19] JEŽEK, Vojtěch. *Návrh spojů sekcí modulární studentské rakety*. Bakalářská práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2023.
- [20] *Aerospace Team Graz*. online. 2024, 13.1.2024. Dostupné z: <https://www.facebook.com/photo?fbid=1362588434626413&set=pcb.1362588471293076>. [cit. 2024-05-22].
- [21] LIU, Teresa. Torrance company is helping with a historic moon mission. This is how. online. In: *Daily Breeze*. 2023. Dostupné z: <https://www.dailybreeze.com/2023/06/06/a-torrance-company-is-helping-with-a-historic-moon-mission-this-is-how/>. [cit. 2024-05-22].