

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

NÁVRH ROBOTU PRO PRŮZKUM POD VODOU

DESIGN OF EXPLORATIVE UNDERWATER ROBOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZDENĚK VÁLEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL HOUŠKA, PH.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Zdeněk Válek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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

Návrh robotu pro průzkum pod vodou

v anglickém jazyce:

Design of explorative underwater robot

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je navrhnout robot pro průzkum zatopené části Hranické propasti.

Cíle bakalářské práce:

1. Prostudujte problematiku průzkumných robotů, zaměřte se převážně na roboty typu řízená ponorka,
2. Definujte požadavky kladené na činnost robotu, specifikujte pracovní prostředí,
3. Proveďte volbu potřebné pohonné soustavy a sensoriky,
4. Na základě bodu 2. navrhnete konstrukci robotu a provedte základní pevnostní ověření navržené konstrukce,
5. Navrženou konstrukci realizujte.

Seznam odborné literatury:

[1] <http://www.vitejte.cz/objekt.php?oid=2043&j=en>

[2] <http://www.priroda.cz/clanky.php?detail=671>

[3] <http://sonia.etsmtl.ca/en/>

[4] <http://www.ausi.org/auvs/auvs.html>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 12.11.2008

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem průzkumného robotu. Robot je navrhován speciálně pro průzkum zatopené části Hranické propasti, nejhlubší propasti ve střední Evropě. Její průzkum je komplikován řadou omezení, které musí být navrhovaný robot schopen řešit. Tato omezení se projevují zejména při návrhu soustavy snímačů. Návrh konstrukce je ovlivněn především požadavkem na maximální operační hloubku.

Abstract

This bachelor's thesis is dealing with design of an explorative robot. The robot is designed especially for the exploration of the underwater part of Hranická propast, the deepest abyss in the central Europe. Its exploration is complicated by several limitations that the robot have to challenge. These limitations take effect mainly in the design of sensor system. The design of construction is affected mostly by the maximal operating deep request.

Bibliografická citace

VÁLEK, Z. *Návrh robotu pro průzkum pod vodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že bakalářskou práci na téma *Návrh robotu pro průzkum pod vodou* jsem vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury, kterou jsem všichni citoval v seznamu literatury.

V Brně dne 29.5.2009

.....

Zdeněk Válek

Obsah

1	Motivace práce	9
2	Specifikace požadovaných parametrů.....	13
2.1	Známé parametry propasti.....	13
2.2	Požadavky kladené na robot.....	13
2.2.1	Požadavky na monitorování.....	13
2.2.2	Požadované parametry kladené na konstrukci robotu.....	14
2.2.3	Předpokládaná strategie průzkumu.....	14
3	Rešeršní studie existujících robotů pro průzkum pod vodou.....	16
3.1	Projekt Starbug.....	17
3.2	Projekt Serafina.....	17
3.3	Projekt μ Seeker.....	18
4	Návrh konstrukce.....	19
4.1	Koncepce konstrukce.....	19
4.2	Volba tvaru.....	19
4.3	Vnitřní a vnější rám.....	19
4.4	Volba základních rozměrů tlakové nádoby.....	20
4.4.1	Vnitřní rozměry.....	20
4.4.2	Vnější rozměry.....	21
4.4.3	Tloušťka stěny.....	21
4.4.4	Volba materiálu.....	22
4.5	Návrh žebrování - vzpěrná stabilita.....	23
4.5.1	Žebra na válcové části.....	23
4.5.1.1	Aproximace části nádoby přímým prutem.....	23
4.5.1.2	Návrh rozměrů prutu.....	24
4.5.1.3	Kontrola vzpěrné stability.....	25
4.5.2	Žebra na půlkulových částech.....	26
4.6	Kontrola pevnosti.....	27
4.6.1	Kontrola napětí a deformací.....	28
5	Návrh pohonné soustavy.....	32
5.1	Konfigurace efektorů.....	32
5.1.1	Vyjádření požadavků na pohyblivost.....	32
5.1.2	Uvažované konfigurace.....	32
5.1.3	Podrobný rozbor zvolené konfigurace.....	34
5.2	Určení parametrů motorů.....	34
5.2.1	Výpočet tahu motorů.....	34
5.2.2	Volba konkrétního provedení pohonu.....	34
6	Návrh snímačů a ostatního vybavení.....	37
6.1	Inerciální snímač.....	37
6.2	Kompas.....	37
6.3	Hloubkoměr.....	37
6.4	Detekce překážek a mapování.....	38
6.4.1	Kamera.....	38
6.4.2	Jednopaprskový sonar.....	38
6.4.3	Vícepaprskový sonar.....	39
6.5	Doplňkové snímače.....	40
6.5.1	Snímač teploty.....	40

6.5.2 Detektor průsaku vody.....	40
6.6 Ostatní vybavení robotu.....	41
6.7 Přehled zvoleného vybavení.....	41
7 Výroba konstrukce.....	43
8 Závěr.....	44
9 Použité veličiny.....	45
10 Použitá literatura a odkazované zdroje informací.....	48
11 Seznam zkratek.....	50
12 Seznam příloh.....	51

1 Motivace práce

Již několik desítek let se snaží vědci i amatéři zmapovat Hranickou propast. Propast je známa odnepaměti. Prohlubeň v zemi na jejímž dně je nenápadné jezírko přitahovala pozornost lidí natolik, že už v roce 1581 jsou popsány pokusy o potápění (na nádech samozřejmě). Knihu „O Vodách Hojitedlných neb Teplicech Morawských“ tehdy napsal Tomáš Jordán z Klauznburku. Další lidé se pak více či méně odborně pokoušeli hloubku jezírka změřit pomocí olovníc. Až v letech 1900-1902 odborný Hranický učitel Josef V. Šindel prováděl systematické měření a dosáhl největší hloubky 36m. O dalších 50 let později olomoucký geograf RNDr. Jaroslav Dosedla pomocí řady měření vykreslil tvar dna pomocí vrstevnic. Dle jeho názoru tůňka neměla pokračování pod skálou. Dnes už víme, že se mýlil. Domníval se, že voda v propasti je dešťová. Vyčerpání vody stejně jako průzkum potápěči zavrhl (bylo to pro něj nezajímavé).

S rozvojem sportovního potápění v ČSR koncem 50. let, se začali o Propast zajímat amatérští potápěči. První z nich byl Bohumír Kopecký, který se v roce 1961 potápěl s přístrojem vyrobeným dle návodu z časopisu ABC. Dosáhl ale hloubky jen 6 metrů. V tabulce 1 je uveden přehled ponorů od začátku až do dnes (14.listopad 2007).

Hloubka	Směs	Datum	Jméno
6m	Vzduch	1961	Bohumír Kopecký
12m	Vzduch	1963	M. Kostečka
42m	Vzduch	18.8.1963	J. Pogoda, Kvapil, Bohumil Šráček
60m	Vzduch	9.8.1964	Bohumil Šráček, Stanislav Huvar
82m	Vzduch	1966	Vilém Kocián, Ivan Gregor
88m	Vzduch	1.9.1968	Vratislav Brenza, Štefan Hany
110m	O ₂ +N ₂ +He	2.5.1981	Ing. Lubomír Benýšek, Fraňo Travěnek
50m	Vzduch	8.7.1981	Antonín Ševčík (zemřel kvůli ponoru)
134m	O ₂ +N ₂ +He	24.4.1992	Michel Pauwels (Belgičan)
155m	O ₂ +N ₂ +He	25.7.1993	Michel Pauwels (Belgičan)
130m	O ₂ +N ₂ +He	25.7.1998	MUDr. David Skoumal, Ing. Marek Haša
181m	O ₂ +N ₂ +He	17.12.2000	Krzysztof Starnawski (Polák)
122m	Různé	3.9.2005	Pavel Říha
140m	Různé	15.9.2005	Sabbath, Jan Enčev, Pavel Říha
170m	Různé	23.11.2005	Pavel Říha

Tab. 1 - Přehled ponorů [1].

Průzkumu proto pokračoval pomocí olovníc spouštěných z hloubky 50m, z místa zvaného Zubatice (obr. 3). Od roku 1968 vedl výzkum Jiří Pogoda a podařilo se naměřit hloubku 136m a 175m (1974).

Protože hloubka 175m se ukázala jako maximální dosažitelná pomocí olovníc, navrhl Pogoda zkonstruovat speciální ponorku, financovanou (cca. 300 000 Kčs) z rodinných rozpočtů. Tento návrh ale neuspěl a na základě

rozporů mezi potápěči Pogoda odešel. Přesto v roce 1980 provedl tajný ponor, při kterém spustil speciální olovnici (kluzák s křídélky) do hloubky 260m. Tento údaj se mu však nepodařilo dokázat – měřil sám.

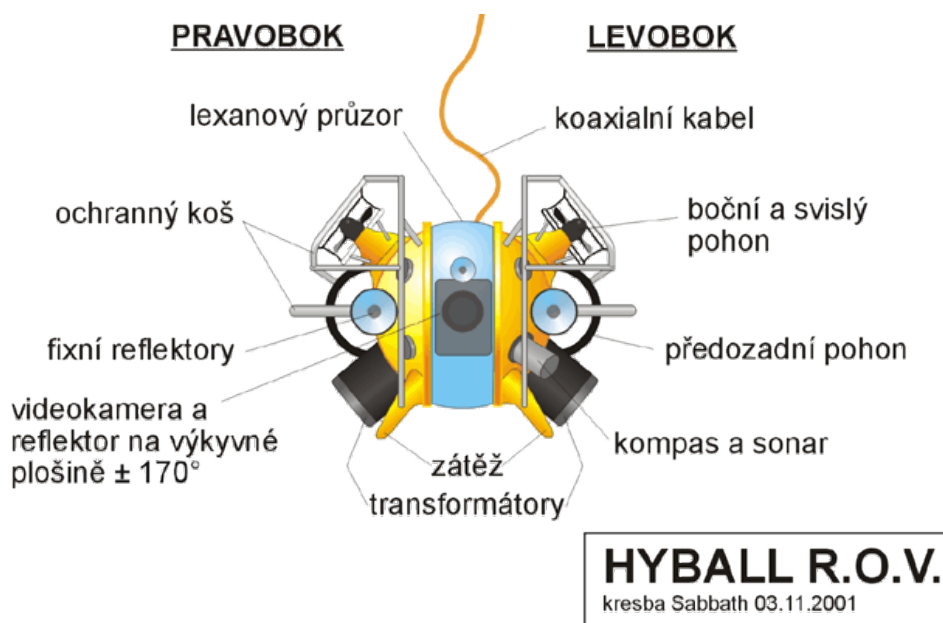
V období po odchodu Pogody se potápěči věnovali průzkumu v menších hloubkách a objevili tak prostory jako je Nebe II (1977), Rotunda Suchá (1978), Nebe I (1978).

Dne 22. 12. 1978 byla založena ZO 7-02 ČSS Hranický kras Olomouc, zabývající se potápěčským výzkumem Propasti a jeho koordinací až do dnešních dnů.

V letech 1979-80 probíhalo mapování známých částí propasti (zatopených i suchých) a odběry vzorků vod z různých hloubek.

V roce 1981 byl proveden první ponor s heliem (první amatérský ponor s heliem ve východním bloku) a bylo dosaženo hloubky 110m. Přehled ponorů s heliem je součástí tabulky 1.

V roce 1995 byl navázán kontakt s Belgičanem Carl von Basem, který financoval akci spuštění speciálního dálkově řízeného robotu R.O.V. Hyball (obr. 1). Robot byl vybaven televizní kamerou a sonarem. Dne 18. září 1995 při prvním sestupu dosáhl Hyball hloubku -180m. Po vyřešení technických problémů s hustotou vody (byl vyvážen pro práci v moři) sestoupil do hloubky 205m. Během toho ponoru došlo ale k závažným technickým problémům a uvíznutí robotu, na základě čehož sponzor od průzkumu upustil.



Obr. 1 – Robot Hyball (převzato z [1]).

V roce 2003 zapůjčila hlavní báňská záchranná stanice v Ostravě malý robot ROV MK2 Colombo (výrobce Benthos, obr. 2). Cílem bylo natočit nově objevené prostory v hlavní části propasti (LIFT) a New York. S robotem se podařilo natočit záběry z nové pukliny v hloubce 120m. Při natáčení došlo opět k uvíznutí robotu za kabel.



Obr. 2 - Robot MK2 Colombo (převzato z [2]).

V současné době probíhá výzkum pomocí potápěčů a instalovaných snímačů. Potápěči se cíleně soustředí na průzkum a ruční mapování přesného tvaru propasti, dlouhodobé měření teploty a pozorování změn v kvalitě vody.

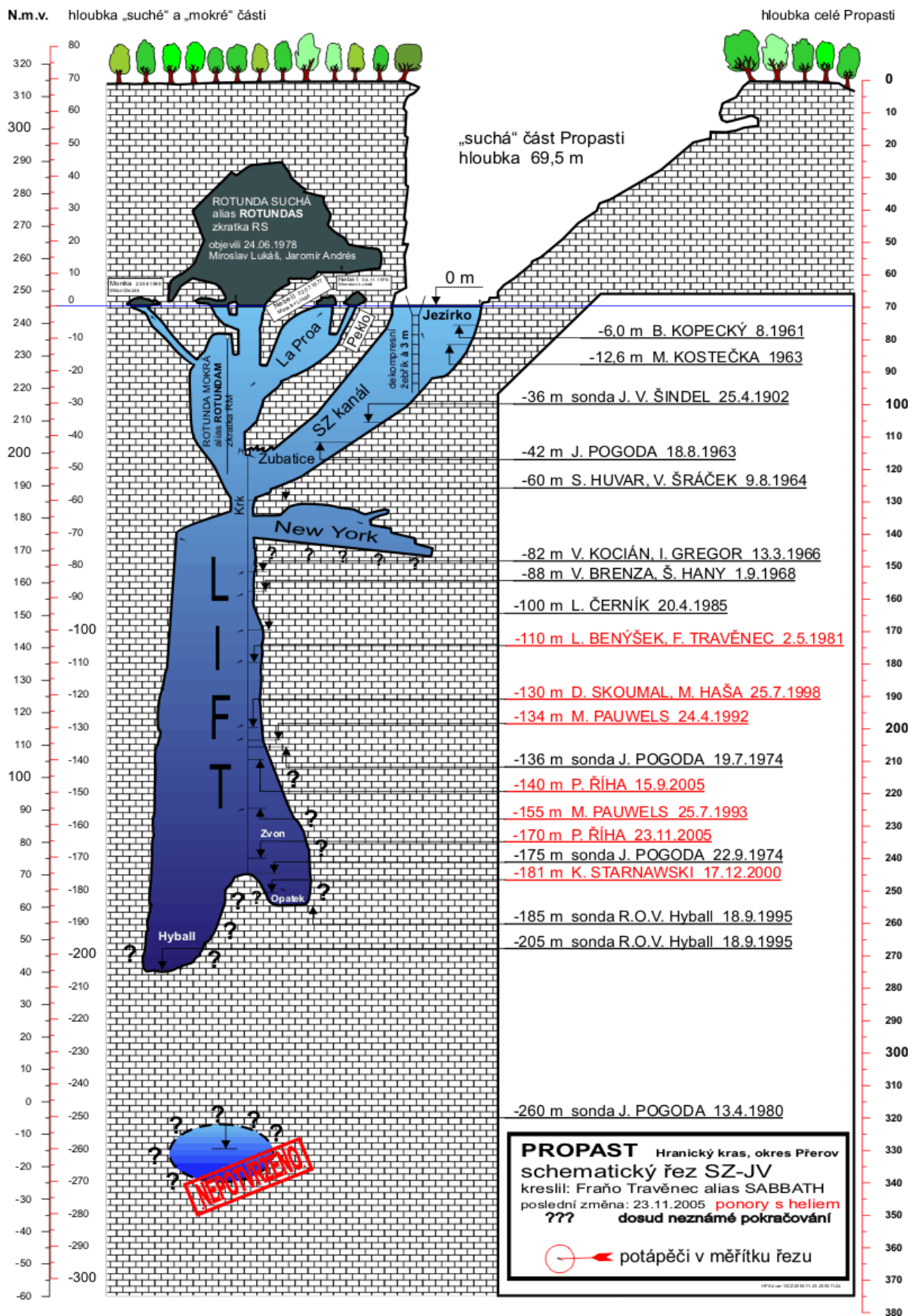
Samotné mapování probíhá pomocí hloubkoměru, provazu sloužícího jako metr a kompasu. Na Zubatici je zespodu umístěn držák lana, lano z něj visí svisle dolů (obr. 3). I tohoto lana se využívá pro měření tvaru propasti, ale lze jej využít jen v části Liftu, kde se nachází. Měří se pak ve válcových souřadnicích, kde lano je osou. Počet přesně změřených bodů bývá nízký a celkový tvar (nejčastěji průřezy) se dokresluje ručně podle paměti a zvukových poznámek. Takto zmapována je v současné době jen malá část propasti. Práce potápěčů je navíc omežována změnami viditelnosti vody.

K usnadnění práce potápěčů jsou instalovány navíc ještě dekompresní žebřík, lano vedoucí celým SZ kanálem (obr. 3) a dekompresní stan. Dekompresní stan výrazně zvyšuje bezpečnost, pohodlí i produktivitu průzkumu. Více informací o dekompresním stanu (viz. [3]).

Lidé zabývající se průzkumem propasti by průzkumný robot uvítali. Mému projektu (v případě že bude rozhodnuto robot vyrábět) ale nejsou ochotni v této fázi finančně přispívat s tím, že úspěšné dokončení projektu je nejisté. Finance ale k dispozici jsou a i když se to zatím neplánuje, v případě potřeby by mělo být možné i zakoupení hotového řešení v hodnotě do 3 milionů Kč.

Podrobnější informace o propasti jsou v [4] a [5] a v odstavci 2.1.

(Čerpáno z [1])



Obr. 3 - Schematický řez dosud známou částí propasti (převzato z [4]).

2 Specifikace požadovaných parametrů

2.1 Známé parametry propasti

Propast se nachází v oblasti geologického zlomu ve vápenci, poblíž místa s geotermálními prameny s kyselkou, která je i v propasti. Teplota vody je po celý rok téměř konstantní. Existuje zde ostré rozhraní vod s různými teplotami a složením. Od tohoto rozhraní se dokonce odrážejí zvukové vlny sonaru. Teplota vody je 16 až 24°C. Žádné vodní proudy v propasti nejsou zaznamenány.

Práce v propasti je omezoována změnami viditelnosti. Na tu mají vliv bublinky CO₂ (z nitra Země), vápník vylučující se z vody, nebo nánosy rozvířené pohybem potápěčů (robotů). Tyto nánosy se ustálí za přibližně 14 dní. To je proto minimální doba mezi jednotlivými ponory. Ostatní zakalení je závislé na podmínkách, jako je teplota, momentální složení vody a hloubka. Bublinky se vylučují jen v horních vrstvách vody, oblast jejich vylučování je jasně ohraničena a výška této hranice se mění. Viditelnost se pohybuje v rozmezí 1 až 70m.

Známé části byly částečně zmapovány dvěma roboty a potápěči. Znalost jejich tvaru a rozměrů lze využít pro navigaci. Rozměry jeskyní se v příčném průřezu pohybují od přibližně dvou metrů do několika desítek. Stěny propasti jsou tvořeny vápencem, který má členitou strukturu. Místy lze narazit i na hromadu zříceného kamení. Hloubka propasti je neznámá. Zatím bylo dosaženo hloubky 300m pod hladinou, ale na základě geologického výzkumu se připouští až 700 metrů.

V propasti se nachází několik stromů, které dovnitř spadly již před dlouhou dobou. Poloha některých stromů je nestabilní a hrozí jejich pád do nižších prostor. Kromě stromů okolní příroda do propasti neustále přidává listí a podobné nečistoty. Tyto tvoří souvislou vrstvu na hladině a těsně pod ní. V malé koncentraci se listy vznášejí i hlouběji pod hladinou. Nakonec potápěči do propasti instalovali několik zařízení. Většina z nich by neměla nijak překážet, jsou na stěnách, nebo je jejich poloha dobře definována. Některé jsou ovšem nebezpečné, jde zejména o staré provázky z olovnic. Některých zařízení (např. svislé lano v Liftu) je možné využít ve prospěch robotu, jako referenční bod.

2.2 Požadavky kladené na robot

2.2.1 Požadavky na monitorování

Robot má za úkol prozkoumat a zmapovat zatopenou Hranickou propast. Hlavní cíle jsou:

- změřit hloubku propasti,
- zjistit tvar všech dostupných částí,
- změřit teplotu vody v neprobádaných místech,
- pořídit videozáznamy nebo fotografie.

Výstupem má být údaj o hloubce propasti, její trojrozměrný model, teplotní mapa a fotografie, které budou sloužit odborníkům k dalšímu výzkumu a bude-li to možné, nanesou se na 3D model.

Kromě získání uvedených informací musí snímače splnit i požadavky na navigaci. Snímače pro detekci překážek musí zůstat funkční i v případě, že dojde ke snížení viditelnosti. Sonar, který byl v propasti odzkoušen, byl shledán nepoužitelným. Musí se proto najít jiné řešení, nebo sonar s jinými parametry.

2.2.2 Požadované parametry kladené na konstrukci robotu

Na základě známých parametrů propasti musí robot splňovat minimálně tyto požadavky:

- Plášť robotu musí vydržet tlak vodního sloupce v maximální předpokládané hloubce 700m (7MPa).
- Dosud nejmenší známý průměr chodby propasti je cca 2m, lze předpokládat další zmenšování. Proto bylo definováno omezení rozměrů robotu na maximálně 1m pro všechny rozměry včetně příslušenství.
- Robot musí být schopný manévrovat i na místě a při velmi nízké rychlosti (potřeba otočit se v úzké chodbě).
- Použití kabelu pro řízení a napájení je po zkušenostech z minulosti nevhodné. Kabel je náchylný k uvíznutí a rovněž omezuje dostupnost robotu. Dále může způsobovat rozvířování a uvolňování usazenin, které omezují viditelnost. Použití rádiového spojení se jeví také jako nevhodné. Proto musí být robot autonomní s chytrým záchranným algoritmem.
- Aby bylo možno navigovat pomocí sonarů, či laserů a fotografovat, je nutné zachovat co nejlepší viditelnost. Robot proto musí vířit vodu co nejméně. Z toho vyplývá mimo jiné co nejnižší hydrodynamický odpor robotu, nízká rychlost pohybu, pozvolné rozbíhání a zastavování motorů, pozvolné změny kurzu a navigace robotu středem chodby (rovnoměrná vzdálenost od stěn).

2.2.3 Předpokládaná strategie průzkumu

Předpokládaným největším problémem robotu je jeho autonomnost a schopnost se po splnění úkolu vrátit. Možnost záchrany robotu pomocí potápěčů je možná jen do relativně malé hloubky (cca 100m). Selhání návratu by proto mohlo znamenat trvalou ztrátu robotu. Cena robotu proto nebude vyšší, než bude nutné a průzkum bude rozdělen do několika fází:

- Před samotným průzkumem propasti bude robot důkladně odzkoušen na otevřené vodě a v prostředí podobném propasti. Bude provedena kalibrace snímačů i navigace. Autonomie bude prověřena nejdříve v počítačovém simulátoru (ten je již hotový).
- Až bude robot dostatečně spolehlivý, uskuteční se série ponorů v

Hranické propasti v oblasti jezírka. Bude se zjišťovat, zda a nakolik jsou základní funkce narušeny zdejším prostředím.

- V další fázi bude proveden pokus o mapování, přičemž robot bude směřován do oblasti Rotunda mokrá a bude mít nastaveno omezení hloubky. V těchto prostorách záchrana možná je. Algoritmy robotu (včetně návratového) se zde doladí.

- V předposlední fázi bude robot vyslán na průzkum spodních a nezmapovaných částí propasti.

- Až doposud byl robot provozován s minimálním vybavením. V poslední fázi může být vybavení robotu doplněno o kvalitnější mapovací zařízení (předpokládám, že bude velmi drahé). Tvar propasti bude již znám, takže bude možné vyhnout se nebezpečným místům.

3 Rešeršní studie existujících robotů pro průzkum pod vodou

V tabulce 2 je uveden přehled nalezených ROV/AUV, které nejlépe vyhovují požadavkům na průzkum Hranické propasti.

Jméno	AUV ROV	m / kg	Rozměr y /cm	Hloubka /m	Počet motorů	Využití	Obrázek
Sonia	AUV	24	100×38 ×42	150	6	Univerzální	
Starbug	AUV	26	1,2	100	6	Průzkum korálového útesu	
Kambara	AUV				5	Pozorování, inspekce, výzkum	
Serafina	AUV	6	45×21×1 4	3,5	5	Vývoj malých AUV	
Duke robotics	AUV	22	Φ40×35	Méně než 100	4	Soutěže	
Gavia	AUV	48	Φ20×170	200 ÷ 2000	1	Univerzální	
Nano Seeker	AUV	0,4	Φ3×15	Méně než 100		Neuvedeno	
μSeeker	AUV	7	cca 50×20×1 0	Méně než 100	2	Soutěže	
Bluefin	AUV	60	cca Φ22×150	Méně než 100	1	Univerzální	
MiniROVER MK II	ROV	45	50×42×3 4	304	3	Univerzální	viz. obr. 2
Hyball	ROV			cca 400	4	Univerzální	viz. obr. 1

Tab. 2 - Nalezené roboty (obrázky převzaty z webových stránek projektů).

Při průzkumu trhu nebyl nalezen robot (ponorka), který by splňoval požadované parametry pro průzkum Hranické propasti.

Podle [6] existuje na světě přibližně 270 projektů malých AUV. 150 z nich jsou projekty vojenské. Ze zbylých 130 projektů je většina amatérských či studentských a jsou konstruovány pro velmi malé hloubky. Dokumentace či vlastnosti mnoha robotů nejsou z různých důvodů zveřejněny.

Na základě neúspěšného průzkumu trhu bylo rozhodnuto prozkoumat možnost stavby vlastního robotu-ponorky speciálně určeného pro průzkum Hranické propasti. Proto se dále zaměřím na hledání použitelných prvků v existujících AUV/ROV projektech. Budu hledat nejvhodnější konstrukce rámu a pláště, konfigurace motorů či kormidel, systémy snímačů a konkrétní součástky. Následuje výčet projektů se zajímavými prvky.

3.1 Projekt Starbug

Projekt Starbug mají na starosti Matthew Dunbabin, Jonathan Roberts, Kane Usher a Peter Corke z centra CSIRO ICT. Cílem projektu Starbug je šetrný průzkum korálových útesů. Robot je určen pro práci v moři, blízko dna, pro jehož průzkum i pro navigaci je vybaven stereovizní kamerou.

Tento projekt se svým zaměřením značně liší od mého, jedná se o robot určený do malých hloubek. Společnými požadavky jsou především velmi dobrá manévrovatelnost a malé rozměry. Zajímavé jsou zejména použité motory (obr. 4) a jejich rozmístění.



Obr. 4 - Vertikální motor robotu Starbug.

Použití dvou tlakových nádob není pro můj projekt přínosné. Ovšem, bude-li v budoucnu potřeba výrazně rozšířit vybavení robotu, může se přídavná nádoba použít.

3.2 Projekt Serafina

Jedná se o projekt týmu studentů a profesorů z ANU. Cílem je vytvořit flotilu malých, AUV, které mají jednotlivě malé nosnosti a schopnosti, ale dohromady jsou schopny nahradit větší, plně vybavený robot. Technickými cíli jsou vysoká pohyblivost, robustnost a dostatečný výpočetní výkon. Více viz. [7].

Stejně jako já tento projekt usiluje o malé rozměry, robustnost a velkou pohyblivost. Daly by se použít stejné motory. Vzhledem k velikosti robotu předpokládám, že i snímače budou malé, tedy vhodné pro mé účely.

3.3 Projekt μ Seeker

Tento projekt je řešen Jonem Hylandsem ze společnosti HUV [8]. μ Seeker je robot určený především na soutěže AUV, pro malé hloubky. Je dostatečně malý a podmínky autora pro výrobu jsou podobné. Filosofii projektu jsou malé rozměry a jednoduchost.

Na projektu jsou zajímavé především sonary (obr. 5). Jsou velice jednoduché, malé a lehké. Mohly by proto být vhodné i pro můj projekt. Jejich výrobce ale již neexistuje a proto se nedají získat. Možná se ale podaří získat podobné.



Obr. 5 - Miniaturní čidla sonarů.

4 Návrh konstrukce

Návrh konstrukce vychází z bodů 2.2.2, především se jedná o:

- odolnost vůči vnějšímu tlaku a utěsnění,
- rovnováha vztlaku a tíhové síly,
- odpor vody (dynamické tření),
- prostor pro komponenty umístěné uvnitř tlakové nádoby,
- přístup k jednotlivým komponentám,
- způsob upevnění vnitřního i vnějšího vybavení k plášti,
- náklady na výrobu.

4.1 Koncepce konstrukce

Na základě požadovaných parametrů a omezení, jsem zvolil následující koncepci konstrukce robotu.

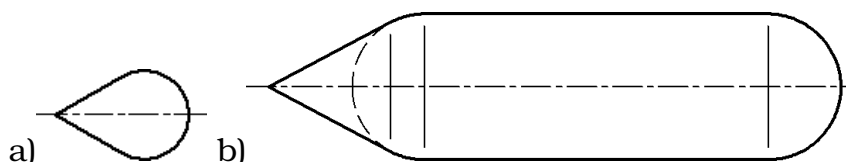
Hlavní součástí bude tlaková nádoba. Většina komponentů bude umístěna uvnitř a nebude tak vystavena tlaku ani vodě. Motory a některé snímače budou umístěny vně tlakové nádoby, budou utěsněny zvlášť.

4.2 Volba tvaru

Příčný průřez tlakové nádoby bude kruhový, protože nejlépe odolává tlaku. Odolnost vůči tlaku bude dále zvýšena použitím příčných žebër. Žebra budou umístěna na vnitřní straně kvůli hmotnosti. Bylo rozhodnuto optimalizovat robot pro pohyb v jedné ose, proto bude mít protáhlý tvar. Odpor vody se určí dle (1), koeficient C_x dle tvaru z tabulky (viz. [9]). Podélný řez byl zvolen podle hydrodynamického odporu vody (obr. 6a) a upraven s přihlédnutím ke složitosti obrábění (obr. 6b).

$$F_{Rv} = \frac{1}{2} C_x \rho_v S_{rc} v_{max}^2 \quad (1)$$

Protože značnou část komponent vně tlakové nádoby lze umístit libovolně (snímač tlaku, kompas, elektronika apod.), budou oba její konce půlkulové a budou na nich namontovány plastové kryty. Zmíněné komponenty budou připevněny na vnitřní straně krytů, takže nebudou zvyšovat odpor vody.



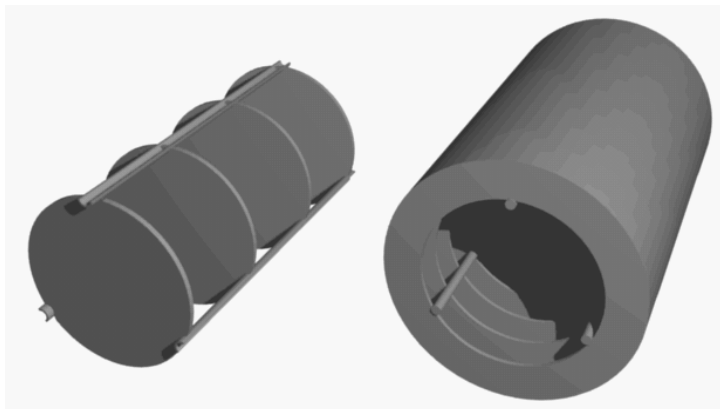
Obr. 6 - Navržený vnější tvar.

4.3 Vnitřní a vnější rám

Vnější rám se bude skládat z plastových krytů zmíněných v předchozím odstavci. Prostory pod kryty budou zaplaveny vodou. Motory a sonary budou připevněny přímo k tlakové nádobě. Součástí vnějšího rámu budou i drátěné

nárazníky chránící průzor, motory a sonary před přímým nárazem. Jejich tvar musí být takový, aby se minimalizovalo riziko zachycení robotu.

Vnitřní rám bude konstrukce složená z příček a tyčí. Na příčkách bude vše přimontované. Rám bude ze dřeva nebo plastu a bude možné jej vysunout.

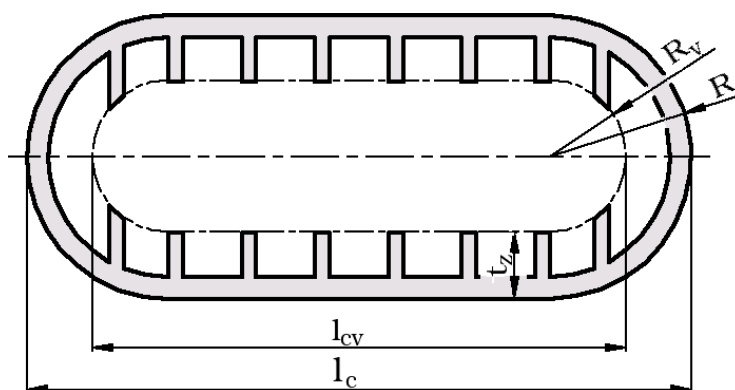


Obr. 7 - Vnitřní rám a jeho uložení v tlakové nádobě.

4.4 Volba základních rozměrů tlakové nádoby

Jde o rozměry viz. obr. 8. Velikost vnitřních rozměrů závisí na rozměrech a uspořádání vnitřních komponent. Vnější rozměry závisí na vnitřních a tloušťce t_z , kterou pro zjednodušení návrhu volím $t_z = 0,4R$.

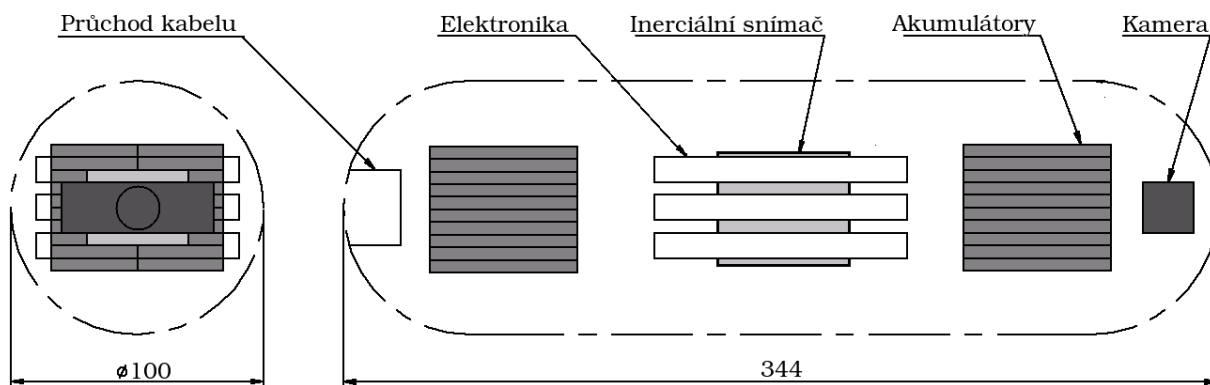
Je nutné dodržet omezení velikosti robotu na jeden metr. Příliš malý robot by byl náchylnější na nepřesnosti (ve výrobě, v seřízení) a výběr komponent by byl mnohem menší. Proto jsou zvoleny minimální rozměry: $l_{cmin} = 616\text{mm}$, $R_{min} = 75\text{mm}$.



Obr. 8 - Základní rozměry.

4.4.1 Vnitřní rozměry

Nyní je zapotřebí znát rozměry komponent robotu, proto byla provedena jejich volba (body 5 a 6). Uspořádání zvolených komponent uvnitř nádoby bylo načrtnuto (obr. 9). Některé je možné zmenšit nebo vměstnat do menšího prostoru, ale není k tomu důvod. Vejdou se do minimálních rozměrů. Akumulátory jsou zobrazeny ve větším množství. Jejich přesouváním, přidáváním a ubíráním bude robot vyvažován.



Obr. 9 - Uspořádání vnitřních komponent.

4.4.2 Vnější rozměry

Požadavky na vnitřní prostor umožňují použít zvolené minimální rozměry (bod 4.3). Bude použit polotovár o průměru 150mm. Po obrobení bude konečný vnější průměr 146mm. Konečné vnější rozměry jsou: $R = 73\text{mm}$, $l_c = 616\text{mm}$.

4.4.3 Tloušťka stěny

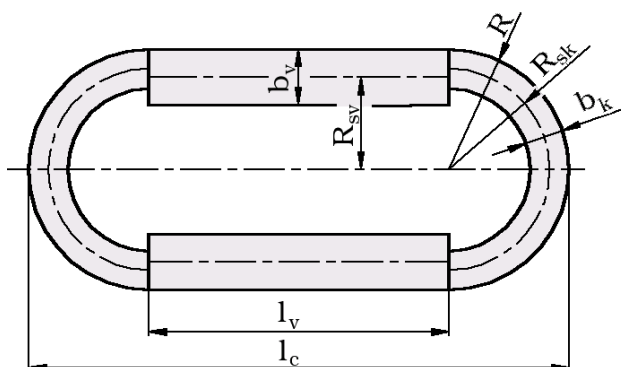
Celková hmotnost zvolených komponent (bez tlakové nádoby) je 1730g (viz. tab. 8), po připočtení rezervy je to 1900g. Hmotnost vody vytlačené nádobou je 9477g. Hmotnost robotu a vytlačené vody se musí rovnat, na tlakovou nádobu zůstává 7577g. Nádobu bude rozebíratelná (přístup dovnitř) a bude obsahovat rám pro okno a průchodku kabelu. Na tyto prvky předpokládám přídavek 500g materiálu. Pro samotnou skořepinu tedy zbylo $m_m = 7077\text{g}$, objem $V_m = 901500\text{mm}^3$.

Pro návrh tloušťky stěny bude tlaková nádoba zjednodušena na bezmomentovou skořepinu, žebra zatím nebudou uvažována. Postup určení tloušťky stěn byl následující:

- Určení přibližné tloušťky stěny, $b_c = 3,19\text{mm}$ (2).

$$b_c \approx \frac{V_m}{S_{nv}} \quad (2)$$

- Určení přibližné polohy střednicové plochy. Bude $b_c/2$ pod vnějším povrchem. Výsledek: $R_{sk} \approx R_{sv} \approx 71,4\text{mm}$, délka l_v bude zachována.



Obr. 10 - Stěny tlakové nádoby (použití žebra se zde neuvažuje).

$$b_c \approx \frac{V_m}{S_{nv}} \quad (2)$$

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} \quad (3)$$

$$S_{nv} = 4\pi R^2 + 2\pi R l_v \quad (4)$$

• Určení výsledných vnitřních účinků (VVÚ) pro střednicovou plochu. Je uvažován tvárný materiál, proto bude redukované napětí určováno dle podmínky $\max \tau$. Z této podmínky vyplývá, že velikost redukovaného napětí závisí (u navrhovaného tělesa) pouze na silách kolmých k rovině podélného řezu. Výsledek: $f_k = 261,2 \text{Nmm}^{-1}$, $f_v = 511 \text{Nmm}^{-1}$ (5 až 9).

$$f = \frac{F}{l} \quad (5)$$

$$F_k = (\pi R^2) \cdot p_v \quad (6)$$

$$l_k = 2\pi R_{sk} \quad (7)$$

$$F_v = (2R l_v) \cdot p_v \quad (8)$$

$$l_v = 2l_v \quad (9)$$

• Určení přesné tloušťky stěny. Tloušťku stěny nelze volit podle dovoleného napětí (množství materiálu je omezeno). Dostupný materiál bude rozprostřen po střednicové ploše tak, aby napětí σ bylo všude stejné. Výsledek: $b_k = 1,89 \text{mm}$, $b_v = 3,7 \text{mm}$ (10, 12). Půlkulová část je díky poloviční tloušťce dvakrát náchylnější na výrobní nepřesnosti, proto bylo rozhodnuto zvětšit b_k na $2,4 \text{mm}$, po přepočtu je $b_v = 3,54 \text{mm}$.

$$(f = \sigma b, \sigma_k = \sigma_v) \Rightarrow \left(\frac{f_k}{f_v} = \frac{b_k}{b_v} \right) \quad (10)$$

$$b_k = \frac{f_k}{f_v} b_v \quad (11)$$

$$V_m \approx b_k S_{ks} + b_v S_{vs} \quad (12)$$

$$S_{ks} = 4\pi R_s^2 \quad (13)$$

$$S_{vs} = 2\pi R_s l_{va} \quad (14)$$

4.4.4 Volba materiálu

Z vypočtených tloušťek bylo určeno nejvyšší redukované napětí $\sigma_v = 144 \text{MPa}$ (15). Materiál byl zvolen na základě tohoto napětí a požadavku na dobrou svařitelnost a obrobitelnost. Zvolen byl materiál ČSN 41 1523.1.

$$\sigma = \frac{f}{b} \quad (15)$$

Mez kluzu (R_e):	333 MPa
Hustota (ρ_m):	7850 kgm ⁻³
Poissonův koeficient (μ):	0,29
Modul pružnosti (E):	2,1×10 ⁵ MPa
EN ekvivalent:	S355JR

Tab. 3 - Vlastnosti materiálu 11 523.1.

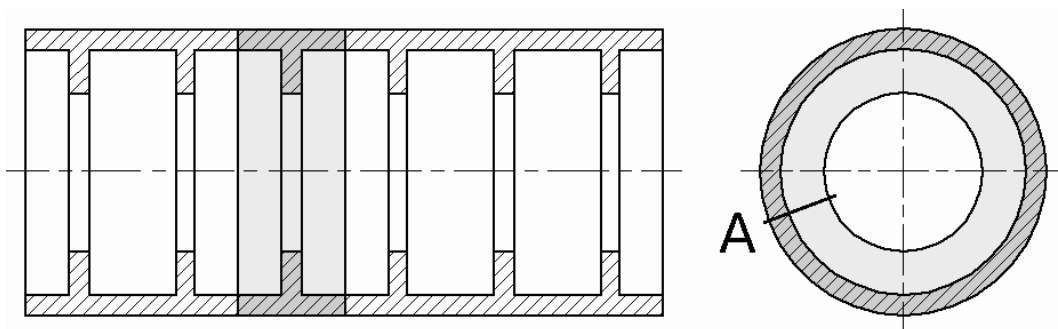
4.5 Návrh žebrování - vzpěrná stabilita

Navržená skořepina má nedostatečnou vzpěrnou stabilitu (je možné ověřit následujícím postupem), proto bude vzpěrná stabilita zvýšena pomocí žeber. Byl zvolen obdélníkový tvar průřezu žebra.

Ztráta vzpěrné stability (zborcení) hrozí zejména v příčném průřezu, proto bude stabilita kontrolována právě u něj.

Protože nelze přidat další materiál, je materiál na žebra odebrán ze skořepiny. Kulová a válcová část nádoby mají odlišné vlastnosti, proto budou řešeny zvlášť.

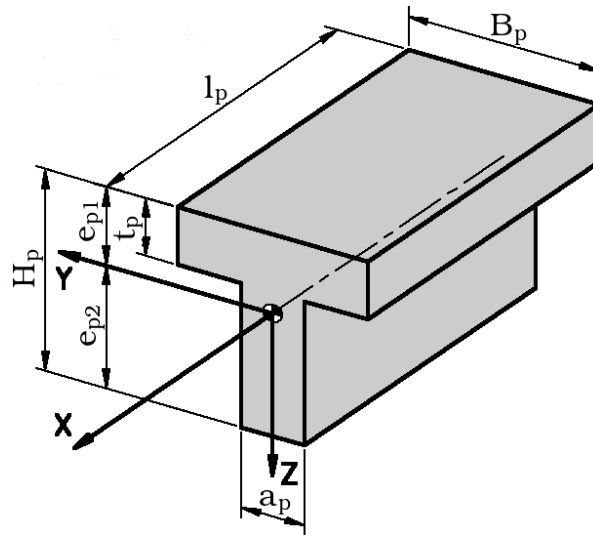
4.5.1 Žebra na válcové části



Obr. 11 - Nádoba s žebry a její opakující se úsek - uzavřený prut.

4.5.1.1 Aproximace části nádoby přímým prutem

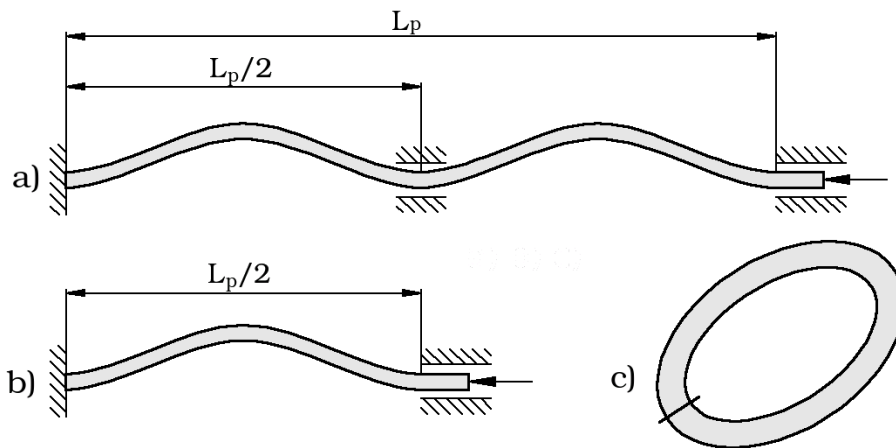
Analytický výpočet vzpěrné stability je možný jen pro přímé pruty, resp. desky. Válcovou nádobu lze považovat za zakřivenou, uzavřenou desku, její úsek za zakřivený a uzavřený prut, který je plně rotačně symetrický. Rotačně symetrické pruty obvykle lze aproximovat přímými, lze to i v tomto případě. Odpovídající přímý prut je na obr. 12, jeho délka byla určena dle (16). Protože se používá aproximace, bude výsledek pouze orientační a bude vhodné jej zkontrolovat experimentem nebo pomocí metody konečných prvků (MKP).



Obr. 12 - Rozměry a souřadnicový systém aproximujícího prutu.

$$l_p = 2\pi R \quad (16)$$

Uložení konců prutu, které nejlépe napodobuje chování uzavřeného prstence, je na obr. 13a, pro výpočet se použije uložení z obr. 13b.



Obr. 13 - Ekvivalentní deformace prutu a prstence, uložení konců.

4.5.1.2 Návrh rozměrů prutu

Klíčové jsou rozměry a_p , B_p a t_p . Ostatní jsou na nich závislé (18 až 22). Vztahy (17, 21) vycházejí z objemu původního zakřiveného prutu.

$$V_p = 2\pi R_s B_p b_v \quad (17)$$

$$V_p = \pi \left(R^2 - (R - t_p)^2 \right) B_p + \pi \left((R - t_p)^2 - (R - H_p)^2 \right) a_p \quad (18)$$

$$b_p = B_p - a_p \quad (19)$$

$$e_{p1} = \frac{a_p H_p^2 + b_p t_p^2}{2(a_p H_p + b_p t_p)} \quad (20)$$

$$e_{p2} = H_p - e_{p1} \quad (21)$$

$$h_p = e_{p1} - t_p \quad (22)$$

Rozměr t_p byl určen podle dovoleného napětí v podélné ose nádoby. Bezpečnost $k_{pot} = 3$ je volena vyšší, protože napětí nebude homogenní.

Výsledek (po zaokrouhlení): $t_p = 2,4\text{mm}$ (23 až 26).

$$F_{p\sigma t} = \pi R^2 p_v \quad (23)$$

$$S_{p\sigma t} = \pi (R^2 - (R - t_p)^2) \quad (24)$$

$$\sigma_{p\sigma t} = \frac{F_{p\sigma t}}{S_{p\sigma t}} \quad (25)$$

$$k_{p\sigma t} = \frac{\sigma_K}{\sigma_{p\sigma t}} \quad (26)$$

Vzorce na výpočet vzpěrné stability neplatí pro tenkostěnné profily, je nutné dodržet podmínky (27 a 28). Z podmínky (27) byla určena hodnota $B_p = 24\text{mm}$.

$$10 t_p \geq B_p \quad (27)$$

$$10 a_p \geq H_p \quad (28)$$

Zbývající rozměry byly zvoleny stejným způsobem. Kvůli méně příznivým okolnostem na vnitřním průměru žebra byla podmínka (28) upravena na (29). Výsledek (po zaokrouhlení): $a_p = 2\text{mm}$, $H_p = 16\text{mm}$.

$$8 a_p = H_p \quad (29)$$

4.5.1.3 Kontrola vzpěrné stability

Hodnoty a vzorce pro výpočet jsou převzaty z [10], [11] a [12]. Jak již bylo zmíněno, prut je součástí desky a proto lze tvrdit, že $I_{\min} = I_{py}$. Výsledek: $\lambda = 67,0$, $k_{pv} = 1,93$ (30 až 37). Tento výsledek je pouze orientační.

$$I_{py} = \frac{1}{3} (B_p e_{p1}^3 - b_p h_p^3 + a_p e_{p2}^3) \quad (30)$$

$$S_p = t_p B_p + a_p (H_p - t_p) \quad (31)$$

$$i_{pmin} = \sqrt{\frac{I_{py}}{S_p}} \quad (32)$$

$$l_{p0} = \frac{l_p}{2} c_p \quad (33)$$

$$\lambda = \frac{l_{p0}}{i_{pmin}} \quad (34)$$

$$\lambda_m = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_u}} \quad (35)$$

Tetmajerova-Jasinského rovnice (pro $60 < \lambda < \lambda_m$):

$$\sigma_{pkr} = \sigma_K - \frac{\sigma_K - \sigma_u}{\lambda_m} \lambda \quad (36)$$

$$F_{pkr} = \sigma_{pkr} S_p \quad (37)$$

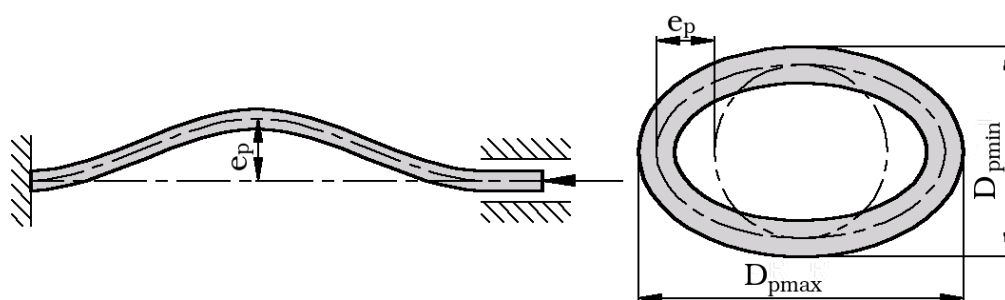
Z (38) lze určit bezpečnost i v případě, že prut nebude dokonale kruhový (resp. bude zatížen mimo střednici). Výsledkem je závislost obr. 15. Konkrétní bezpečnost bude zjištěna podle e_p naměřeného na vyrobené

tlakové nádobě (obr. 14). Tato bezpečnost je opět pouze orientační.

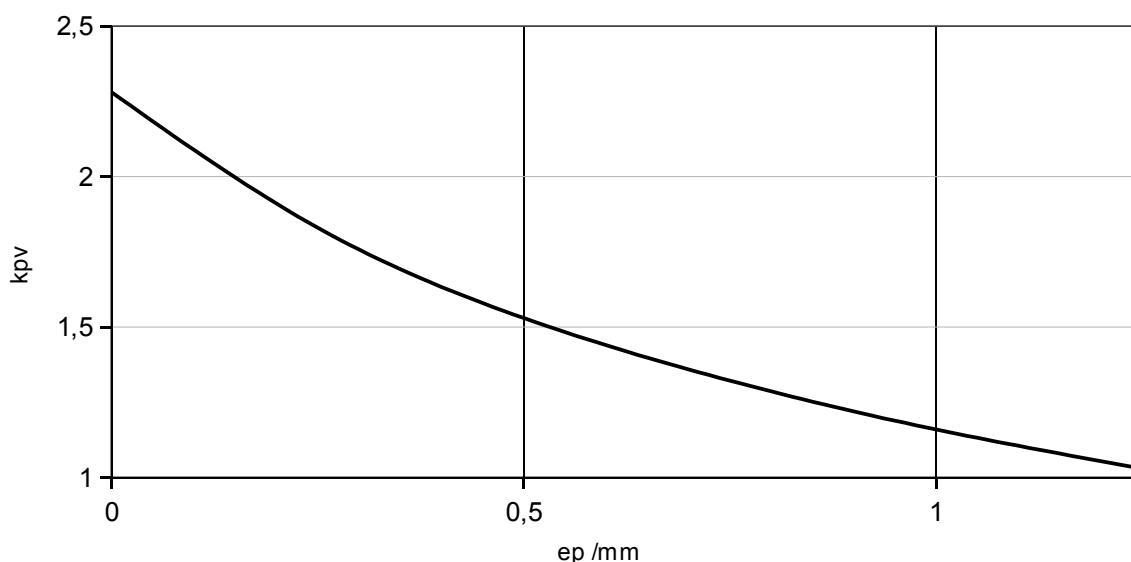
$$\sigma_{psec} = \frac{F_p}{S_p} \left[1 + \left(e_p \frac{e_{p2}}{i_{pmin}^2} \right) \sec \left(\frac{l_{p0}}{2i_{pmin}} \sqrt{\frac{F_p}{E S_p}} \right) \right] \quad (38)$$

$$k_{pv} = \frac{\sigma_K}{\sigma_{psec}} \quad (39)$$

$$e_p \approx \frac{D_{pmax} - D_{pmin}}{2} \quad (40)$$



Obr. 14 - Odchylka od přímosti u prutu a prstence (výrobní vada).



Obr. 15 - Bezpečnost prutu v závislosti na odchylce od přímosti.

4.5.2 Žebra na půlkulových částech

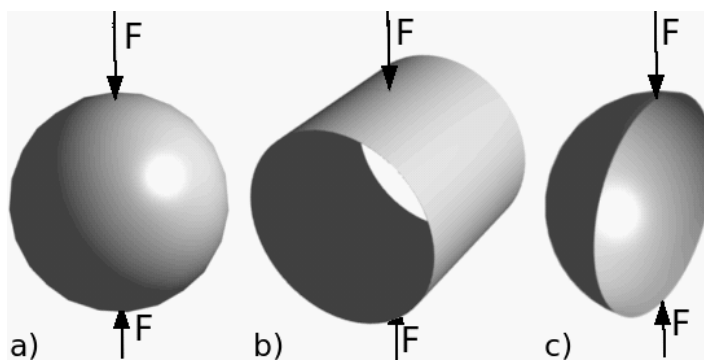
Půlkulovou plochu nelze nahradit jednodušším tělesem (prutem, deskou), proto bude řešena intuitivně.

Tenká skořepina má nejmenší tuhost a stabilitu obvykle v ohybu. Kulová skořepina se prostým ohybem deformovat nemůže. Ohyb je vždy doprovázen dalšími deformacemi s větší tuhostí. Při nerovnoměrném zatížení (obr. 16a) se kulová skořepina deformuje o několik řádů méně, než válcová s obdobnými parametry (obr. 16b). Lze se proto domnívat, že i vzpěrná stabilita bude u koule o několik řádů větší. Podle této úvahy je stabilita kulové plochy tloušťky $b_k = 2,4$ mm dostatečná i bez žebířků.

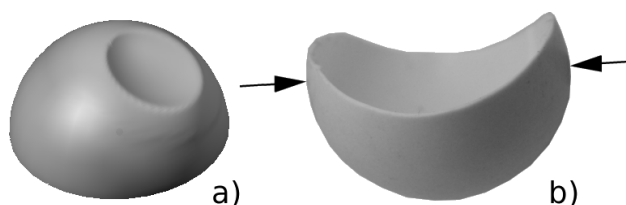
Pro tlakovou nádobu bude použita půlkulová skořepina. Tuhost a

stabilita polokoule se za určitých okolností (obr. 17b) blíží tuhosti a stabilitě válce. Polokouli lze stabilizovat tuhým spojením s válcovou částí, nebo umístěním žebra do jejího okraje. Bylo rozhodnuto použít obě možnosti.

Vlivem narušení kulové symetrie může dojít k promáčknutí (obr. 17a), případně dalším deformacím. Žebra na polokouli by způsobila narušení kulové symetrie, proto nebudou použita. Stejné narušení může způsobit i rám okna. Ab bylo narušení co nejmenší, musí být jeho tuhost srovnatelná s tuhostí původní skořepiny.



Obr. 16 - Zatěžování různých skořepin.



Obr. 17 - Různé způsoby deformace půlkulové skořepiny.

Nakonec bylo rozhodnuto vyrobit půlkulové skořepiny bez žebor, žebro bude jen na jejich okrajích. Tloušťka skořepiny zůstává 2,4mm.

Z technologických důvodů bude tlaková nádoba vyrobena v pěti úsecích, které se později svaří, resp. sešroubují. V místě spoje bylo úmyslně posíleno žebro, aby se minimalizovala deformace vzniklá při svařování.

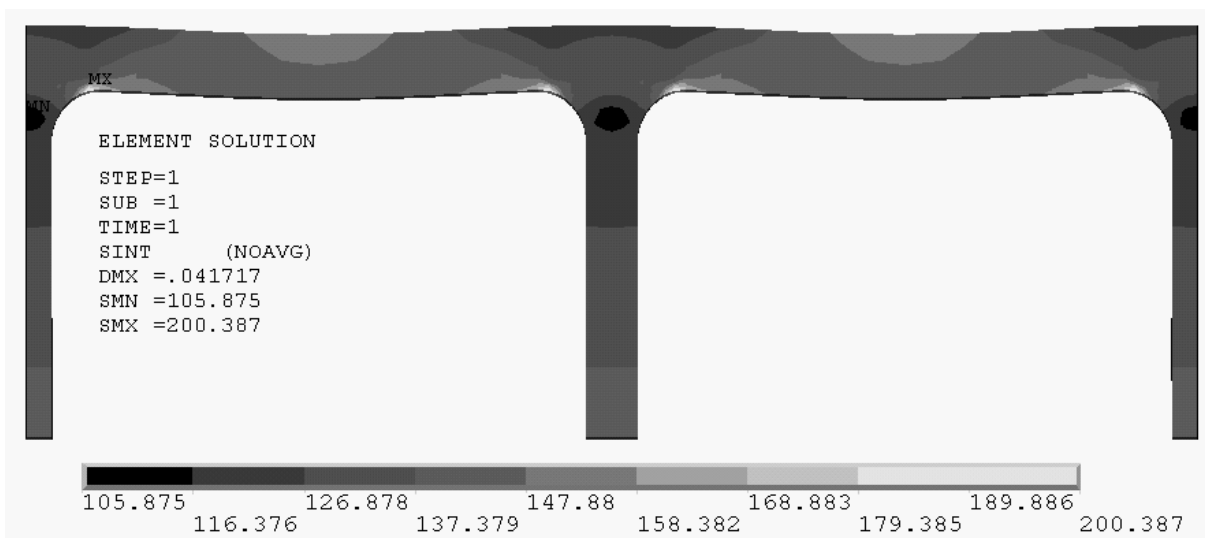
Na základě navržených tvarů a rozměrů byl zhotoven výkres sestavení tlakové nádoby. Podle tohoto výkresu byla přepočtena hmotnost: $m_m = 7609\text{g}$. Překročení hmotnosti o 32g je vzhledem k rezervě přijatelné. Zbývající hmotnostní rezerva je 138g.

4.6 Kontrola pevnosti

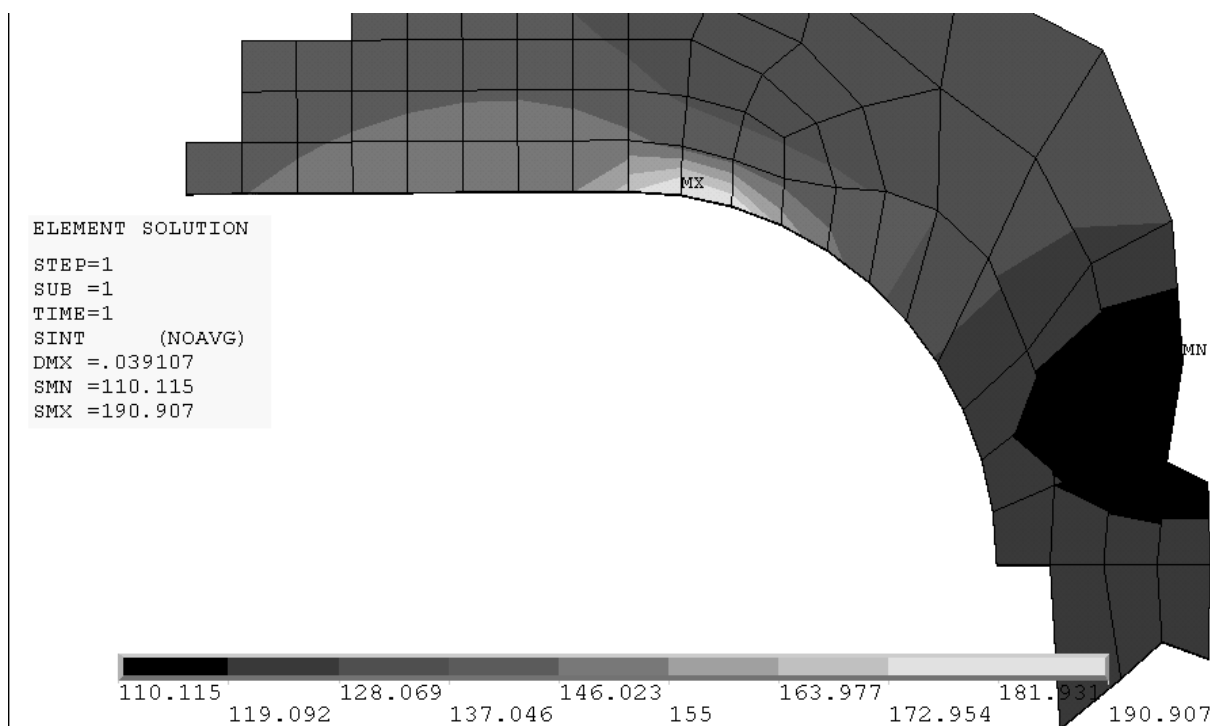
Ověření pevnosti bylo provedeno pomocí programu ANSYS, verze 10.0. V první fázi byla kontrolována pevnost a deformace podle lineární teorie pružnosti. V druhé fázi byla kontrolována vzpěrná stabilita. Druhou fázi se nepodařilo úspěšně dokončit, výpočet nekonvergoval. Na základě předchozích odhadů bezpečnosti bylo rozhodnuto zkontrolovat vzpěrnou stabilitu tlakovou zkouškou vyrobené nádoby. Zde jsou proto uvedeny jen výsledky z první fáze.

4.6.1 Kontrola napětí a deformací

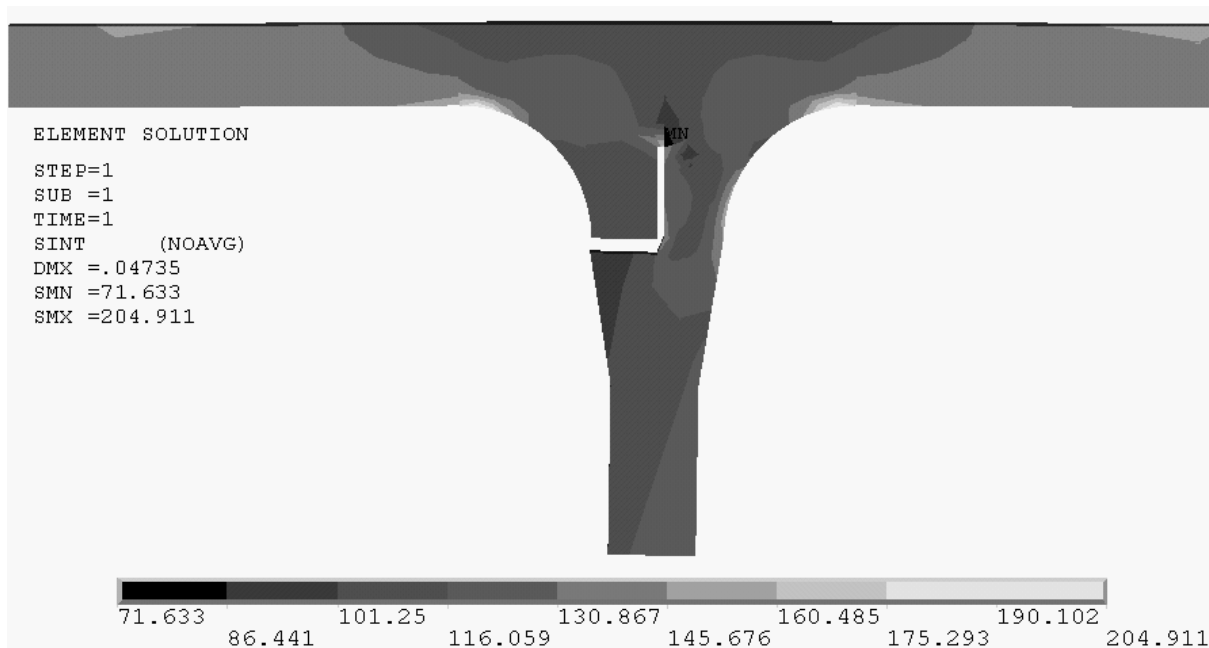
Nádoba byla pro výpočet rozdělena na několik prvků, jejichž napojení na zbytek nádoby bylo napodobeno pomocí symetrie. Tyto prvky pak byly každý zvlášť odsimulovány a vyhodnoceny. Výsledky simulací jsou na obr. 18 až 24. Redukované napětí bylo určováno podle podmínky $\max \tau$ (Stress intensity). Všechny úseky jsou zobrazeny v podélném řezu.



Obr. 18 - Redukované napětí žebra a jeho okolí. Největší napětí je u kořene žebra, ovšem pouze na vnitřní straně tlakové nádoby. Jedná se o napětí tlakové, takže by nemělo dojít k únavě materiálu.



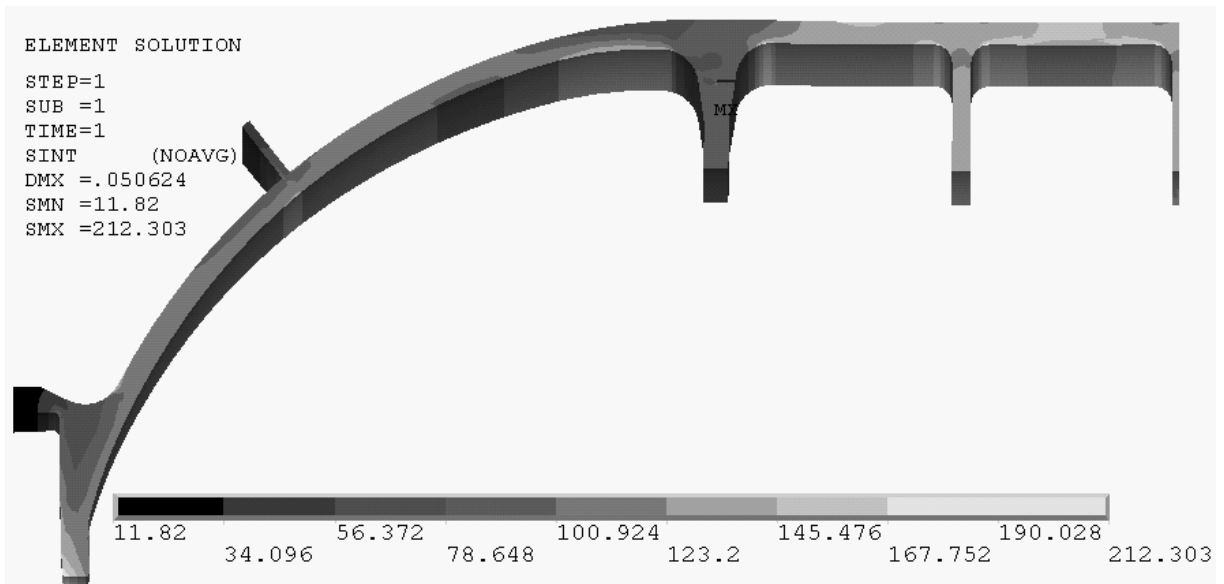
Obr. 19 - Detail - redukované napětí u kořene žebra.



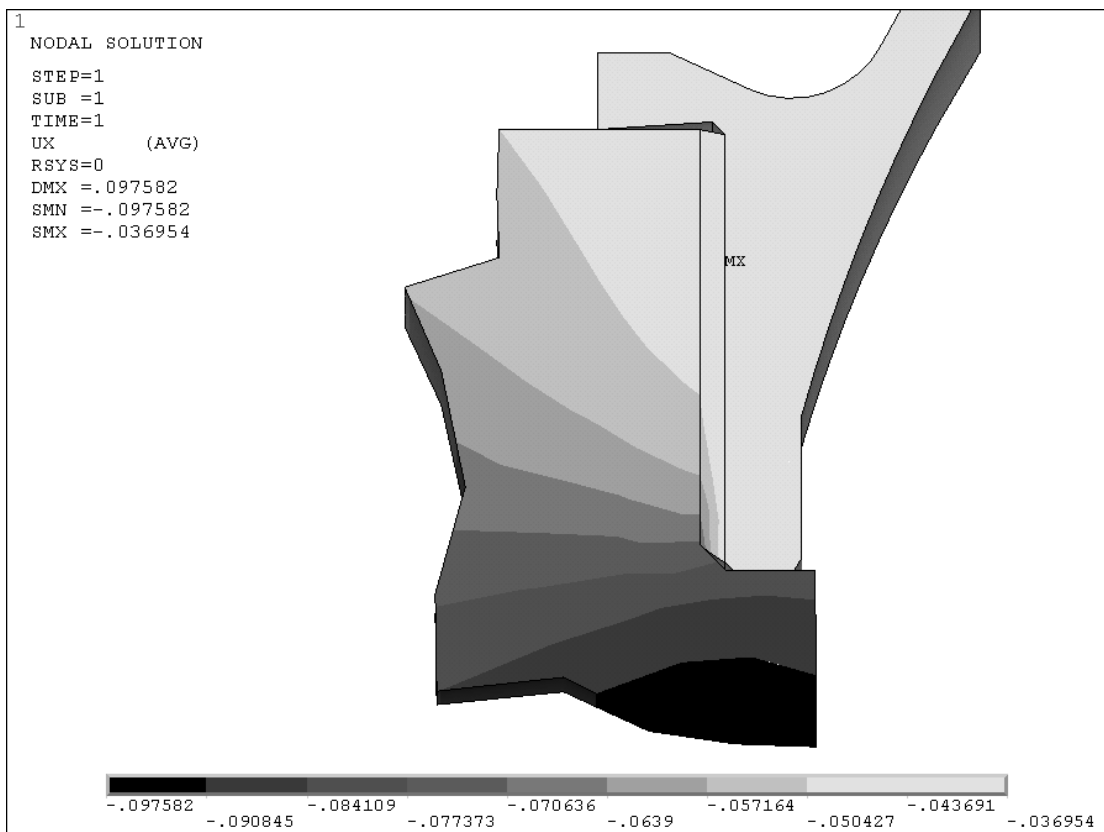
Obr. 20 - Redukované napětí ve svarovém spoji. Největší napětí je u kořene svaru. Vypočtená hodnota je nepřesná, neboť není možné přesně namodelovat situaci v daném místě. Teoreticky je v místě svaru jen tlakové napětí, takže by neměla vzniknout únava. Pro jistotu zde ale budou umístěny detektory průsaku vody, které případnou trhlinu odhalí.



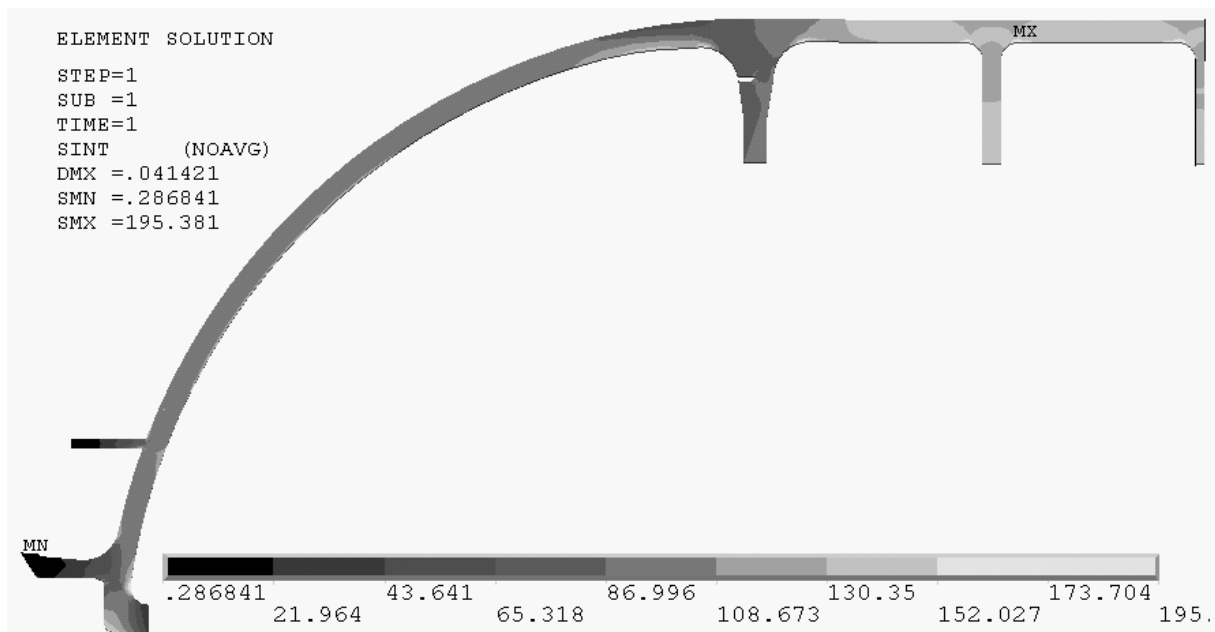
Obr. 21 - Redukované napětí v místě závitového spoje. Čela jsou na sebe přitlačena po celé ploše. Závit se deformací uvolňuje, proto se na výsledku neprojeví a nebyl modelován. Největší napětí je u kořene žebra a na čelech obou dílů.



Obr. 22 - Redukované napětí na přední polokouli. Napětí na polokouli je přibližně homogenní, takže základní předpoklad pro stabilitu koule byl splněn. Největší extrémny vznikají opět u kořene žebra a svaru, nově i u hrany rámu okna.



Obr. 23 - Detail - posuvy v oblasti rámu okna. Zde je vidět, že největší rozdíl je na šířce rámu 0,03 milimetru. Pryžová podložka vyrovnávající rozdíly v deformaci je na menším průměru 0,03 mm stlačena.



Obr. 24 - Redukované napětí na zadní polokouli. Zde je situace podobná, jako na přední.

Největší zjištěné napětí je 232 MPa (obr. 21). Tomu odpovídá bezpečnost $k_k = 1,43$. Celková bezpečnost konstrukce tlakové nádoby podle všech provedených výpočtů je 1,43 (pro $e_p < 0,6\text{mm}$). Tuto bezpečnost lze akceptovat a návrh tlakové nádoby lze prozatím považovat za úspěšně dokončený. Zbývá ověřit vzpěrnou stabilitu, přinejmenším na koncích tlakové nádoby.

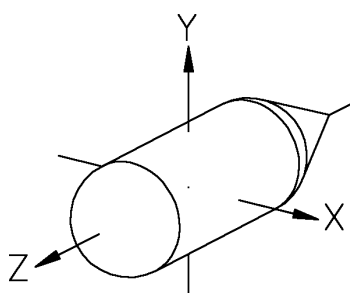
$$k_k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} \quad (41)$$

5 Návrh pohonné soustavy

5.1 Konfigurace efektorů

5.1.1 Vyjádření požadavků na pohyblivost

Robot se pohybuje v trojrozměrném prostoru, vznáší se ve vodě, proto má 6 stupňů volnosti. Svým tvarem je robot předurčen pro translaci v ose Z. Její řízení je nutné. Klíčové jsou i rotace v osách X a Y určující směr pohybu. Translace v osách X a Y jsou vhodné jen ke stabilizaci polohy při nízké rychlosti. Řízení rotace v ose Z je důležité. Podle požadavků na konstrukci (odstavec 2.3.4) musí být poloha říditelná i při nulové, nebo nízké rychlosti.

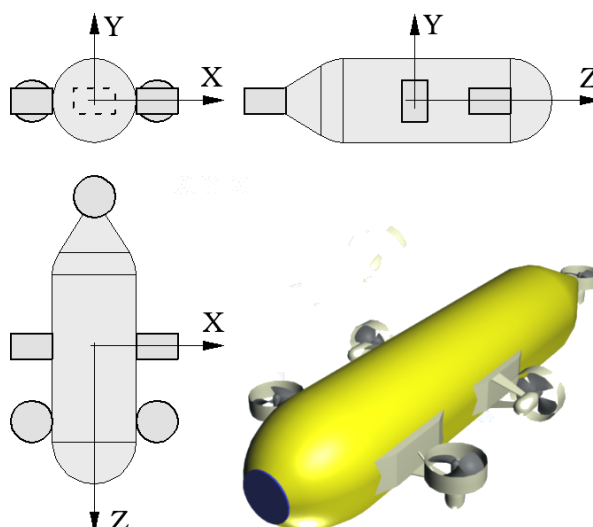


Obr. 25 - Lokální souřadný systém robotu.

5.1.2 Uvažované konfigurace

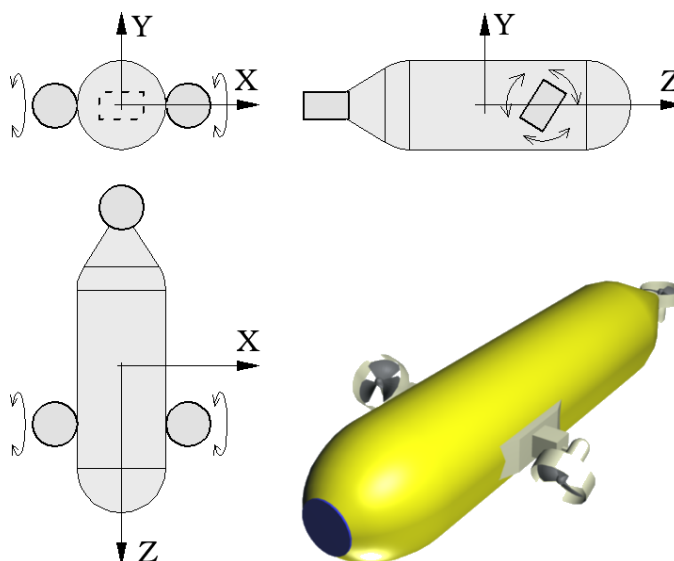
Systémů uspořádání motorů (konfigurací), které vyhovují uvedeným požadavkům je mnoho. Nejzajímavější z nich jsou vypsány níže, jsou uvedeny jejich výhody a nevýhody. Z uvedených možností byla zvolena poslední uvedená (obr. 29).

- Konfiguraci z obr. 26 používají Serafina a Cambara. Řízeno je najednou 5 souřadnic. Nevýhodou je, že na pohybu v ose Z se podílejí jen dva motory. Použité pohonné jednotky jsou tzv. trysky (anglicky thrusters).



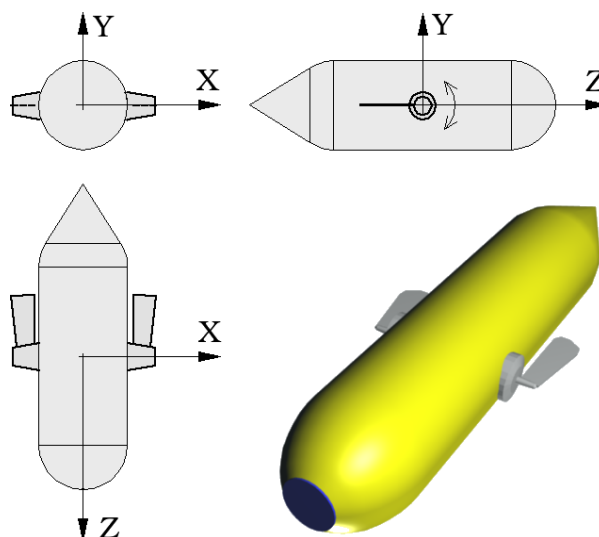
Obr. 26 - Konfigurace motorů Serafiny a Cambary.

- Na obr. 27 je podobná konfigurace. Dvě trysky na každé straně jsou nahrazeny jednou naklápěcí. Nevýhodou je potřeba dvou druhů motorů: trysky a serva.



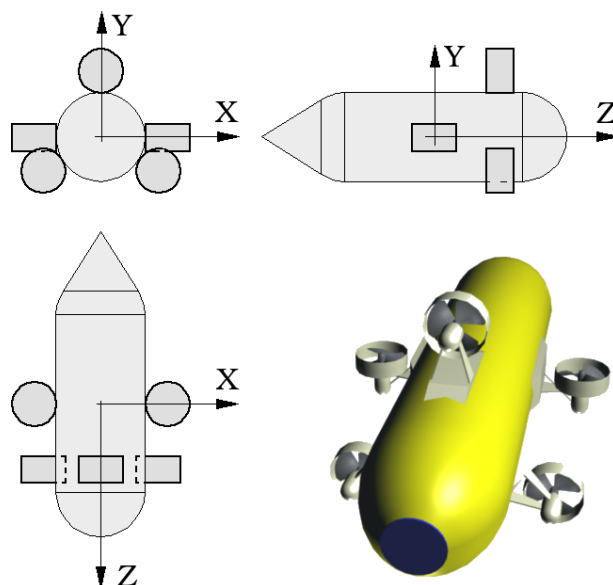
Obr. 27 - Konfigurace motorů se dvěma servy.

- Následující řešení (obr. 28) umožňuje pomocí dvou motorů řídit 5 souřadnic. Pohon je řešen dvěma ploutvema, které se otáčejí kolem osy X. Kmitavým pohybem vznikne tah, trvalejším natočením se změjí směr tahu. Nebezpečí zablokování ploutve nečistotami je menší, než u lodního šroubu. Nevýhodou je nedostatek informací o tomto druhu pohonu.



Obr. 28 - Konfigurace motorů se dvěma ploutvema.

- Poslední konfigurace (obr. 29) je podobná první popsané. Na pohybu vpřed se podílí tři motory a je tak k dispozici větší síla.



Obr. 29 - Konfigurace motorů se třemi motory v ose Z.

5.1.3 Podrobný rozbor zvolené konfigurace

Řízeno je 5 souřadnic. Řízení translace v ose X je možné jen po natočení robotu o 90° kolem osy Z. Maximální velikosti sil, které dokážou motory vyvinout v jednotlivých osách jsou:

$$F_{pX} = 0 \quad (42)$$

$$F_{pY} = 2 F_{th} \quad (43)$$

$$F_{pZ} = 3 F_{th} \quad (44)$$

Rotace ve všech třech osách jsou zajišťovány diferenciálně, opačným tahem nejméně dvou motorů. Maximální velikosti krouticích momentů jsou:

$$M_{pX} = 2 F_{thr} r_{th} \quad (45)$$

$$M_{pY} = 2 F_{thr} r_{th} \sin(60^\circ) \quad (46)$$

$$M_{pZ} = 2 F_{thr} r_{th} \quad (47)$$

Momenty a síly lze vyvíjet i současně, v tom případě ale nebudou dosaženy maximální hodnoty.

5.2 Určení parametrů motorů

5.2.1 Výpočet tahu motorů

Velikost síly tahu motoru je určena podle požadavku na rychlost plavby $v_{\max} = 0,5 \text{ms}^{-1}$ v ose Z. Požadována je $F_{th} = 0,84 \text{N}$ (1, 44).

5.2.2 Volba konkrétního provedení pohonu

Nejmenší komerčně dostupná pohonná jednotka (tzv. tryska), kterou se podařilo nalézt, je BTD150 od SeaBotix. I tato tryska je pro navrhovaný robot

příliš těžká, proto nevyhovuje. Srovnání jejich parametrů je v tabulce 4.

	BTD150	Požadováno
Hmotnost	350 g	35 g
Tah	22 N	0,84 N
Hloubka	150 m	700 m
Příkon	110 w	7 w
Průměr vrtule	78 mm	

Tab. 4 - Parametry trysky BTD 150.

Menší roboty jsou obvykle osazeny tryskami vlastní výroby. Výrobou trysky se zabývá literatura [13], ze které je možno čerpat.

Vhodná tryska nebyla nalezena, proto bylo rozhodnuto navrhnout a vyrobit vlastní. Pro výrobu trysky bude použit modelářský motor a modelářská lodní vrtule. Motor musí být zapouzdřen a utěsněn, aby se do něj nedostala voda. Odolnost vůči tlaku bude zajištěna zalitím vnitřku motoru olejem. Běžně dostupné DC motory nelze zalít (viz. [13]), proto bude použit EC motor. Ztráty třením budou minimalizovány provozem při nízkých otáčkách.

Zvolen byl motor RAY C2028/20. Kvůli zapouzdření je nutné z motoru odstranit přečnívající úchytky a vyměnit hřídel za delší.

Napájení	9 V
Max. otáčky	210 s ⁻¹
Výkon	90 W
Moment	cca 130 Nmm
Průměr	20,2 mm
Délka	28 mm
Hmotnost	22 g

Tab. 5 - Parametry motoru RAY C2028/20.



Obr. 30 - Motor RAY C2028/20 (převzato z [15]).

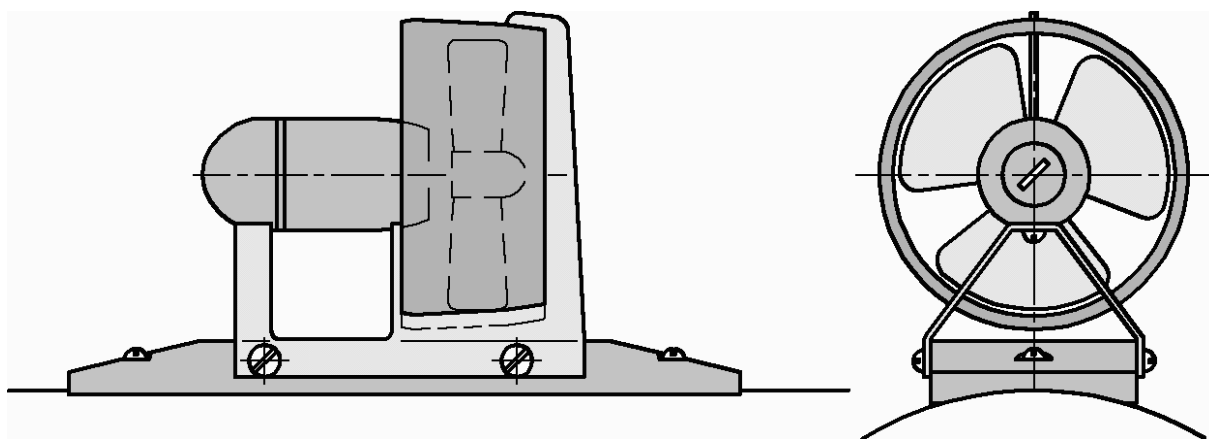
Lodní vrtule byla rovněž volena s ohledem na nižší otáčky. Zvolena byla vrtule značky Robbe vhodná pro provoz v trysce. Její parametry jsou: průměr 60mm, stoupání 45mm a závit M4.



Obr. 31 - Zvolená lodní vrtule (převzato z [16]).

Pro zvolenou vrtuli byly naměřeny při požadovaném tahu otáčky 16s^{-1} a kroutící moment $11,8\text{Nmm}$. Otáčky i moment budou při rychlosti robotu v_{max} větší. Odhadem 27s^{-1} , 30Nmm .

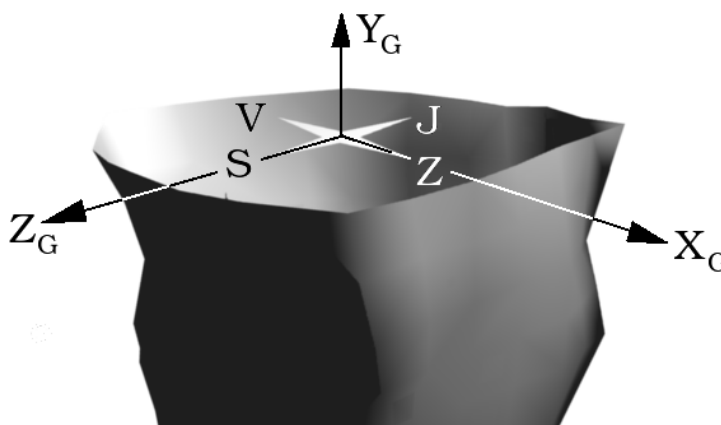
Definitivně lze parametry trysky určit měřením po výrobě prototypu. Hmotnost trysky bude přibližně 36g (ve vodě). Motor bude řízen regulátorem pro trojfázové EC motory bez snímačů. Regulátor bude umístěn v patě držáku motoru.



Obr. 32 - Navrhovaná tryska.

6 Návrh snímačů a ostatního vybavení

Pro navigaci je nutné znát polohu a rychlost robotu a polohu překážek, zejména stěn propasti. Přímé měření polohy je možné jen u rotací (pomocí inklinometru, kompasu a gyroskopu) a u translace v ose Y_G (pomocí hloubkoměru). Poloha v osách X_G a Z_G dostupnými metodami přímo měřit nejde a proto se určí nepřímě. K tomu bylo rozhodnuto použít několik metod. Jedná se o matematický model robotu, integraci zrychlení (akcelerometr) a použití opěrných bodů (například svislé lano v Liftu). Matematický model pak musí obsahovat algoritmy pro sloučení získaných informací a kontrolu jejich správnosti. Pro detekci překážek byl zvolen sonar. Robot bude obsahovat i snímače sloužící čistě pro mapování (kameru a teploměr).



Obr. 33 - Globální souřadný systém, jeho počátek je na hladině jezírka.

6.1 Inerciální snímač

Inerciální snímač bude současně plnit funkci inklinometru, akcelerometru a gyroskopu. Bylo rozhodnuto použít provedení RLVBIMU 01 [25], které umožňuje dostatečně přesné měření natočení robotu (ve směru osy Y_G s pomocí kompasu). Spolu s matematickým modelem chování robotu umožní určit přibližnou polohu robotu v osách X_G a Y_G .

6.2 Kompas

Kompas bude sestaven ze třech os magnetometru (hallový sondy). Promítnutím vektoru siločar zemského magnetického pole do již známé vodorovné roviny bude zjištěn azimut natočení robotu.

Jelikož je tlaková nádoba vyrobena z magnetické oceli, musí se kompas umístit vně, co nejdále od ní a nakalibrovat. Volím provedení HMC1055. Veškeré informace potřebné pro stavbu kompasu jsou v [17].

6.3 Hloubkoměr

Pro měření hloubky bude použit snímač absolutního tlaku. Zvoleno bylo provedení 3L výrobce KELLER. Jeho rozsah je 10MPa (1000m), dosažitelná přesnost 2,5m. Více viz. [18].



Obr. 36 - Snímač tlaku KELLER 3L (převzato z [18]).

6.4 Detekce překážek a mapování

6.4.1 Kamera

Kamera bude sloužit k pořizování fotografií, případně videozáznamu. Musí umožňovat snadné ukládání dat a řízení zpracování obrazu (nastavení citlivosti, času závěrky, zaostření). Pro případné dálkové ovládání je nutná i schopnost obraz přenášet. Dalším požadavkem je vysoká citlivost umožňující menší příkon světla. Těmto požadavkům vyhovují digitální fotoaparáty Canon, ke kterým existuje upravený firmware [19]. K dispozici je model A430 mající relativně malé rozměry a hmotnost. Jeho rozměry lze dále přizpůsobit (viz. [20] a obr. 37). Tento model byl zvolen. S kamerou souvisí i osvětlení. Budou použity LED moduly o příkonu 3, nebo 5W.

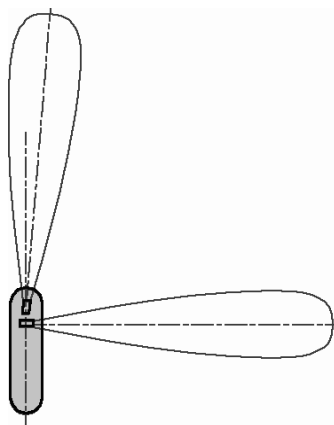


Obr. 37 - Rozebraný fotoaparát Canon A430 (převzato z [20]).

6.4.2 Jednopaprskový sonar

Pro navigaci lze použít soustavu jednoduchých, tzv. jednopaprskových sonarů. Jedno měření může trvat i několik sekund (bude-li pro ověření opakováno) a jednotlivé sonary musí měřit postupně. Větší množství sonarů tedy měření výrazně nezrychlí, pouze jej usnadní (robot se nebude muset otáčet).

K určení potřebných parametrů byla použita literatura [22] a [23], zvolen byl sonar CTG1255, který pronikne nečistotami o rozměru až 5mm. Vzhledem k jeho hmotnosti a ceně bude použit v minimálním množství. Tyto sonary budou přimontovány k tlakové nádobě napevno (obr. 38). Maximální operační hloubka tohoto sonaru je stanovena na 634m. Případné dosažení hloubky 700m proto bude riskantní a bude provedeno až v závěrečné fázi průzkumu.



Obr. 38 - Rozmístění sonarů CTG 1255. Robot se bude otáčet podle osy Z.

Nominální frekvence	175 kHz
Šířka pásma	7 kHz
Úhel „paprsku“	20°
Max. příkon	40 W
Průměr	31,75 mm
Délka	63,5 mm
Operační hloubka	634 m
Hmotnost (voda)	max. cca 300 g
Cena (rok 2009)	£ 690-00 (~20 000 Kč)

Tab. 6 - Vlastnosti sonaru CTG1255.



Obr. 39 - Sonar CTG1255.

6.4.3 Vícepaprskový sonar

Vícepaprskový (multi-beam) sonar najednou měří celou řadu vzdáleností, čímž šetří čas. Další výhodou je větší rozlišení umožňující podrobnější mapování. S touto výhodou souvisí neschopnost sonaru proniknout většími nečistotami.

Zvolen byl sonar Micron DST [24], který pronikne jen nečistotami do 1,5mm. Jeho použití tedy není možné při rozvíření usazenin a proto není vhodný pro navigaci. Bude použit v kombinaci s CTG1255 a sloužit bude čistě pro mapování. Robot bude v prvních fázích průzkumu provozován bez tohoto sonaru, je proto možné odložit i jeho nákup.

Průměr	56mm
Délka	78mm
Hmotnost (voda)	180g
Operační hloubka	750m
Úhel „paprsku“	3°
Úhel záběru	35°
Měřitelná vzdálenost	2 ÷ 75m
Frekvence	650 ÷ 750kHz
Napájení	od 12V, 2.5VA
Komunikace	RS 485, RS 232
Komunikace	Specifikovaný protokol

Tab. 7 - Vlastnosti sonaru Micron DST.



Obr. 40 - Sonar Micron DST (převzato z [24]).

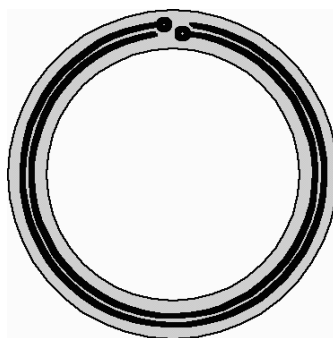
6.5 Doplnkové snímače

6.5.1 Snímač teploty

Bude použit integrovaného obvod DS18B20 s digitálním výstupem. Bude umístěn tak, aby byl obtékán měřenou vodou.

6.5.2 Detektor průsaku vody

Detektor průsaku bude umístěn ve všech místech, kde průsak vody hrozí (rám okna, příruba, průchod kabelu, svarové spoje). Bude mít podobu tištěného spoje (obr. 41) s přiloženou bavlněnou textilií, která může být pro zvýšení citlivosti napuštěna solí. Pro správnou funkčnost se musí zajistit, aby v robotu nekondenzovala voda.



Obr. 41 - Snímač průsaku.

6.6 Ostatní vybavení robotu

Jde zejména o akumulátory a elektroniku včetně hlavního počítače.

Požadovaná kapacita akumulátorů závisí na následujících hodnotách. Tyto hodnoty byly odhadnuty:

- dojezd $s_m = 2000\text{m}$,
- rychlost $v_{\max} = 0,5\text{ms}^{-1}$,
- doba plavby $t_m = 6000\text{s}$ (předpokládá se, že robot nepojede pořád plnou rychlostí),
- spotřeba počítačů, snímačů a reflektorů $P_e = 18\text{W}$,
- poloměr tlakové nádoby $R = 75\text{mm}$, celková čelní plocha vnějších komponent $S_{\text{kom}} = 36\text{cm}^2$,
- celkový součinitel odporu prostředí $C_x = 1$,
- hustota vody $\rho_v = 998\text{kgm}^{-3}$,
- účinnost pohonů $\eta_{pp} = 6\%$ (zjištěno experimentem).

$$W_b = \frac{W}{\eta_{pp}} + P_e t_m \quad (48)$$

$$W = F_{Rv} s_m \quad (49)$$

$$S_{rc} = \pi R^2 + S_{\text{kom}} \quad (50)$$

Z výpočtu (1, 48 až 50) vyšla kapacita $W_b = 197\text{kJ}$, což odpovídá dvanácti článkům E-tec s parametry 3,7V a 1,2Ah.

Elektronika se skládá z regulátorů motorů, snímačů, hlavního počítače, řízení napájení a komunikačních sběrnic. Její hmotnost v tabulce 8 je odhadnuta.

Veškeré vnější obvody budou zality v silikonovém lepidle. Musí to být provedeno tak, aby nikde nezůstala vzduchová mezera. Ta by způsobila deformace, případně i poškození. Zalité obvody se musí před použitím odzkoušet v tlakové komoře.

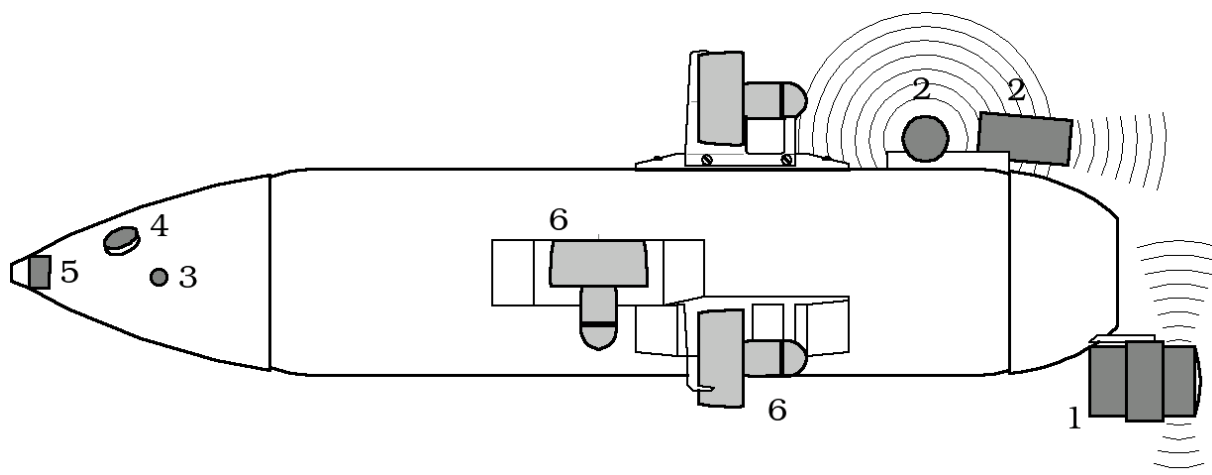
6.7 Přehled zvoleného vybavení

Podařilo se nalézt nebo navrhnout všechny potřebné komponenty. V tabulce 8 je jejich přehled.

Pořizovací cena sonarů je mnohem vyšší, než cena ostatních komponent, má proto zásadní vliv na pořizovací náklady robotu.

Součást	Provedení	Počet	Cena hlavních součástí	Celková hmotnost
Tlaková nádoba	Vlastní výroba	1	2 850 Kč	7609g
Inerciální snímač	RLVBIMU 01	1		100g
Kompas	HMC1055	1	750 Kč	5g
Hloubkoměr	Keller 3L	1	2 619 Kč	5g
Kamera	PowerShot A430	1	2 200 Kč	130g
Sonar	CTG1255	2	41 960 Kč	600g
	Micron DST	1	117 070 Kč	180g
Teploměr	DS18B20	1	50 Kč	1g
Det. průsaku	Vlastní výroba	5		20g
Tryska	Vlastní výroba	5	3 000 Kč	36g
Vnější rám	Vlastní výroba	1		75g
Vnější elektronika	Vlastní výroba	1		75g
Osvětlení	Výkonová LED	2	200 Kč	5g
Vnitřní rám	Vlastní výroba	1		200g
Vnitř, elektronika	Vlastní výroba	1		100g
Akumulátor	E-tec 3,7V, 1.2Ah	12	3 500 Kč	288g
Celkem:			171 349 Kč	9391g

Tab. 8 - Přehled zvolených komponent



Obr. 42 - Rozmístění vnějších komponent (bokorys). 1-Sonar Micron DST, 2-Sonar CTG1255, 3-Teploměr, 4-Hloubkoměr, 5-Kompas, 6-Motor.

7 Výroba konstrukce

Hlavním dílem konstrukce je tlaková nádoba skládající se z pěti úseků. Tyto úseky byly soustruženy každý zvlášť. Při soustružení vznikl jediný problém. Hotová nádoba byla po zvážení o 60g těžší. Protože zbývající hmotnostní rezerva robotu je už jen 138g, Bylo rozhodnuto rezervu zachovat. Nádoba proto byla o 60g odlehčena. Délka žeber H_p tím byla zkrácena o 0,5mm.



Obr. 44 - Úseky válcové části, nahrubovaný a hotový.

Další fází výroby bylo spojení jednotlivých úseků svařováním. Svařováním budou připevněny i držáky motorů a sonarů. Zde vznikl problém s dodávkou motorů, která se opozdila a nebylo proto možné ověřit použitelnost navržených pohonných jednotek. Kvůli tomu nebylo jasné, jaké úchytky pro pohony budou nakonec použity a proto byla výroba pozastavena ve fázi montáže.

Po svaření bylo nutné provést kontrolu kruhovitosti ve spojích. Podle grafu obr. 13 je při bezpečnosti $k_{pv} = 1,5$ maximální přípustný rozdíl poloměrů $e_{pmax} = 0,5mm$. Po svaření bylo provedeno žíhání na odstranění vnitřního pnutí a po něm další kontrola kruhovitosti.

Posledním krokem výroby tlakové nádoby byla povrchová úprava provedená nátěrem (nástríkem) několika vrstev syntetického emailu. V místě styku přední a zadní části nádoby a v drážkách pro o-kroužky barva není. Povrch v těchto místech bude zakonzervován voskem, nebo tuhým mazivem.

Po vytvrnutí barvy bude na tlakovou nádobu namontován průzor a průchodka kabelu. Tím se nádoba uzavře a bude možné provést tlakovou zkoušku. Po tlakové zkoušce se začnou montovat ostatní komponenty.

8 Závěr

Tato práce se zabývá návrhem robotu pro podvodní průzkum Hranické propasti. Na začátku práce je provedeno krátké shrnutí historie průzkumu Hranické propasti a proveden výčet nutných vlastností, které robot pro tento účel musí splňovat. Poté je proveden průzkum existujících robotů - ponorek a jsou shrnuty jejich vlastnosti. Protože žádný z dostupných robotů nesplňuje dané požadavky, bylo přistoupeno k vývoji vlastního robotu. Následuje popis navrhovaného řešení a jsou provedeny potřebné pevnostní výpočty navržené konstrukce. Poté je provedeno upřesnění pohonné soustavy a volba základních snímačů. V závěru práce je proveden popis výroby trupu robotu.

V průběhu řešení práce jsem se podrobně seznámil s problematikou průzkumných robotů, nabyté znalosti jsem využil při návrhu vlastního robotu. O prostředí Hranické propasti se podařilo získat dostatek informací a na základě těchto informací byly definovány požadavky na robot a jeho provoz. Podle definovaných požadavků se podařilo zvolit vyhovující provedení všech potřebných snímačů. Navržené pohonné jednotky také splňují všechny požadavky. I návrh konstrukce byl úspěšně dokončen a na základě navržených rozměrů byla zhotovena výkresová dokumentace. Pevnostní ověření bylo uzavřeno s tím, že z kontrolovaných hledisek tlaková nádoba vyhovuje a ještě bude provedena tlaková zkouška. Samotná realizace konstrukce byla kvůli zpoždění dodávky motorů přerušena ve fázi montáže a bude dokončena, jakmile budou motory k dispozici.

Po dokončení montáže tlakové nádoby a ověření její pevnosti budou na robot osazeny pohony a základní elektronika. To umožní začít se zkouškami a seřizováním navigace. Tato fáze bude probíhat na přehradě, kde je možné robot vylovit. Postupně budou na robot přidávány senzory a konstrukce robotu bude upravována podle získaných zkušeností. Bude probíhat i vývoj autonomie robotu. K průzkumu Hranické propasti dojde, až bude robot celkově připraven.

9 Použité veličiny

\vec{a}	[ms ⁻²]	Vektor zrychlení robotu
a_p	[mm]	Rozměr viz. obr. 11
b	[mm]	Tloušťka stěny
b_c	[mm]	Tloušťka stěny pro celou nádobu (průměrná)
b_k	[mm]	Tloušťka stěny půlkulové části tlakové nádoby
B_p	[mm]	Rozměr viz. obr. 11
b_p	[mm]	Rozměr viz. obr. 11 a (22)
b_v	[mm]	Tloušťka stěny válcové části tlakové nádoby
C_X		Koeficient tvaru pro odpor prostředí, viz. [9]
D_{pmax}	[mm]	Největší naměřený vnější průměr na úseku s jedním žebrem
D_{pmin}	[mm]	Nejmenší naměřený vnější průměr na úseku s jedním žebrem
E	[MPa]	Modul pružnosti materiálu v tahu
e_p	[mm]	Vybočení prutu (prstence), vyosení síly, viz. obr. 14
e_{p1}	[mm]	Rozměr viz. obr. 11
e_{p2}	[mm]	Rozměr viz. obr. 11
F	[N]	Síla
f	[Nmm ⁻¹]	Liniová síla
F_k	[N]	Síla působící kolmo na podélný řez kulové části tl. nádoby
f_k	[Nmm ⁻¹]	Liniová síla působící kolmo na podélný řez kulové části tl. nádoby
F_p	[N]	Skutečná síla působící v prutu
F_{pkr}	[N]	Kritická síla zatížení prutu
F_{pX}	[N]	Maximální síla od motorů působící v ose X
F_{pY}	[N]	Maximální síla od motorů působící v ose Y
F_{pZ}	[N]	Maximální síla od motorů působící v ose Z
F_{pot}	[N]	Síla od tlaku vody stlačující tlakovou nádobu podélně
F_{Rv}	[N]	Síla odporu prostředí (tření tekutiny)
F_v	[N]	Síla působící kolmo na podélný řez válcové části tl. nádoby
f_v	[Nmm ⁻¹]	Liniová síla působící kolmo na podélný řez válcové části tl. nádoby
F_{th}	[N]	Maximální síla jednoho motoru
F_{thr}	[N]	Maximální síla jednoho motoru na zpětný chod
\vec{g}	[ms ⁻²]	Vektor gravitačního zrychlení
H_p	[mm]	Rozměr viz. obr. 11
h_p	[mm]	Rozměr viz. obr. 11 a (25)
I_{min}	[mm ⁴]	Minimální kvadratický moment průřezu prutu
i_{pmin}	[mm]	Kvadratický poloměr průřezu prutu
I_{py}	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu prutu v ose Y
k_k		Bezpečnost tlakové nádoby vůči meznímu stavu pružnosti
k_{pv}		Bezpečnost prutu na vzpěr
k_{pot}		Bezpečnost pro tlakové napětí ve směru podélné osy mezi žebry
l	[mm]	Délka
l_c	[mm]	Celková délka tlakové nádoby
l_k	[mm]	Celková délka stěn půlkulových části tl. nádoby v podélném řezu

l_p	[mm]	Rozměr viz. obr. 11
l_{p0}	[mm]	Redukovaná délka prutu
l_v	[mm]	Celková délka stěn válcové části tl. nádoby v podélném řezu
l_v	[mm]	Délka válcové části tlakové nádoby
m	[kg]	Hmotnost
m_m	[g]	Hmotnost materiálu tlakové nádoby
M_{pX}	[Nmm]	Maximální moment od motorů působící na robot v ose X
M_{pY}	[Nmm]	Maximální moment od motorů působící na robot v ose Y
M_{pZ}	[Nmm]	Maximální moment od motorů působící na robot v ose Z
P_e	[W]	Příkon veškeré elektroniky robotu, snímačů a světlometů
P_{lv}	[mm]	Stoupání závitu lodní vrtule
p_v	[MPa]	Hydrostatický tlak vody (v hloubce 700m)
R	[mm]	Vnější poloměr tlakové nádoby (válcové i půlkulové části)
R_e	[MPa]	Napětí na mezi kluzu materiálu
R_{sk}	[mm]	Poloměr střednicové plochy stěny půlkulových částí
R_{sv}	[mm]	Poloměr střednicové plochy stěny válcové části
R_v	[mm]	Vnitřní poloměr tlakové nádoby s žebry
r_{th}	[mm]	Vzdálenost osy motoru od Z osy robotu
S_{kom}	[m ²]	Celková čelní plocha komponent umístěných vně robotu
S_{ks}	[mm ²]	Velikost střednicové plochy půlkulových částí
s_m	[m]	Maximální uražená dráha robotu během jedné mise
S_{nv}	[mm ²]	Plocha vnějšího povrchu tlakové nádoby robotu
S_p	[mm ²]	Plocha průřezu prutu
S_{pot}	[mm ²]	Plocha příčného průřezu tlakové nádoby mezi žebry
S_{rc}	[m ²]	Celková čelní plocha robotu
S_{vs}	mm ²	Velikost střednicové plochy válcové části
t_m	[s]	Maximální doba plavby
t_p	[mm]	Rozměr viz. obr. 11
t_z	[mm]	Tloušťka stěny i s žebry
V_m	[mm ³]	Objem materiálu tlakové nádoby
v_{max}	[ms ⁻¹]	Maximální rychlost pohybu robotu
V_p	[mm ³]	Objem prstence viz. obr. 10
v_r	[ms ⁻¹]	Rychlost pohybu robotu
W	[kJ]	Energie/práce
W_b	[kJ]	Využitelná energie (kapacita) akumulátorů
X	[m]	Osa lokálního souřadného systému robotu
X_G	[m]	Osa globálního souřadného systému
Y	[m]	Osa lokálního souřadného systému robotu
Y_G	[m]	Osa globálního souřadného systému
Z	[m]	Osa lokálního souřadného systému robotu
Z_G	[m]	Osa globálního souřadného systému
η_{pp}		Předběžná účinnost pohonu
λ		Štíhlost prutu
λ_m		Mezní štíhlost prutu
ρ_m	[kgm ⁻³]	Hustota materiálu tlakové nádoby
ρ_v	[kgm ⁻³]	Hustota vody
σ	[MPa]	Napětí v materiálu
σ_k	[MPa]	Napětí v materiálu válcové části tl. nádoby
σ_K	[MPa]	Kritické napětí materiálu v tahu (mez kluzu)

σ_{\max} [MPa]	Maximální napětí zjištěné na tlakové nádobě
σ_{pkr} [MPa]	Kritické napětí působící v průřezu prutu
σ_{psec} [MPa]	Napětí v krajním vlákně profilu prutu
σ_{pot} [MPa]	Napětí materiálu mezi žebry vyvolané silou v ose nádoby
σ_u [MPa]	Mez úměrnosti materiálu
σ_v [MPa]	Napětí v materiálu kulové části tl. nádoby

10 Použitá literatura a odkazované zdroje informací

- [1] TRAVĚNEC, Fraňo. *Historie výzkumů Hranické propasti* [online]. 2001-11-03 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://propast.speleo.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2005022501>>
- [2] SKOUMAL, David. *Miniponorka MK2 Colombo zkoumala Hranickou propast* [online]. 2003-08-30 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://propast.speleo.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2005030312>>
- [3] RIEDL, Pavel. *Instalace dekompresního stanu v Hranické propasti* [online]. 2007-05-19 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://propast.speleo.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007050001>>
- [4] ČSS ZO 7-02 *Speleopotápěčská skupina Hranický kras Olomouc* [online]. [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://propast.speleo.cz/phprs/index.php>>
- [5] Česká televize. *Planeta Věda : Hranická propast* [online]. 2007-09-09 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://www.ceskatelevize.cz/vysilani/11.09.2007/207411058200028-16:00-2-planeta-veda-hranicka-propast.html?streamtype=RH>>
- [6] *Marine technology reporter*. New York: New Wave Media, 2007. ISSN 1559-7415. Dostupné z: <<http://www.seadiscovery.com/>>
- [7] *The Australian National University - Information Engineering - Serafina* [online]. 2006-11-02 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://users.rsise.anu.edu.au/~serafina/>>
- [8] HYLANDS, Jon. *Hylands Underwater Vehicles* [online]. [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://www.huv.com/>>
- [9] Příspěvatelé Wikipedie. *Součinitel odporu - Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2009-04-28 14:49 UTC [cit. 2009-05-10]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sou%C4%8Dinitel_odporu&oldid=3901035>
- [10] LEINVEBER, Jan, VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky : Pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 1. vyd. Úvaly: Albra, 2003. 868 s. ISBN 80-86490-74-2
- [11] *Vzpěr přímých prutů* [online]. 2009-01-27 [cit. 2009-04-05]. Dostupné z: <<http://www.mitcalc.com/doc/buckling/help/cz/bucklingtxt.htm>>.
- [12] ŘEZNÍČEK, Jan. *Přednášky z pružnosti a pevnosti 1* [online]. 2008-05-22 [cit. 2009-01-27]. Dostupné z:

- <http://pruznost.unas.cz/PP_I.pdf>.
- [13] BOENIG, William, KALMAN, Eric. *Low Cost Truster : Development of a low cost thruster for the Santa Clara University ROV Program*. Santa Clara, 2004. 74s.
- [15] *RCM Pelikán (e-shop)* [online]. [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://www.rcm-pelikan.cz>>
- [16] *Hobby E-shop : RC modely pro radost* [online]. [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://www.hobbyeshop.cz>>
- [17] Honeywell. *3-Axis Compass Sensor Set* [online]. Rev A. 2005 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/hmc1055.pdf>>
- [18] KELLER AG für Druckmesstechnik. *KELLER AG fuer Druckmesstechnik; pressure sensors, pressure transmitters, digital manometers, pressure metrology* [online]. [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://www.keller-druck.com>>
- [19] *CHDK Wiki* [online]. [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>>
- [20] *Probando Camara Canon PowerShot A430 desarmada* [online]. 2008-12-12 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <<http://www.youtube.com/watch?v=Ez0DhTXP7uU>>
- [21] KELLER AG für Druckmesstechnik. *Piezoresistive OEM Pressure transducers : with laser welded media isolation diaphragm* [online]. [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <http://www.keller-druck.cz/picts/pdf/engl/3L_10L_e.pdf>
- [22] LUAN, Jessica. *Development of a Small Sonar Altimeter and Constant Altitude Controller for a Miniature Autonomous Underwater Vehicle*. Blacksburg, Virginia, 2005. 70s.
- [23] L-3 Communications SeaBeam Instruments. *Multibeam Sonar Theory of Operation*. 14s.
- [24] Trittech International Limited. *Trittech Micron DST Sonar : Small ROV Obstacle Avoidance Sonar* [online]. 2009-05-11 [cit. 2009-05-19]. Dostupné z: <http://www.tritech.co.uk/products/products-micron_sonar.htm>
- [25] *VBOX, 3 Axis Inertial Measurement Unit* [online]. 2008, květen [cit. 2009-05-27]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/mediaaccess/RLVBIMU01_DATA.pdf>

11 Seznam zkratek

ROV	Remotely operated vehicle (Dálkově řízené vozidlo, používá se v kontextu s vodními roboty)
AUV	Autonomous underwater vehicle (Autonomní ponorné vozidlo)
ANU	Australian National University (Australská národní univerzita)
HUV	Hylands Underwater Vehicles (Hylandovy podvodní vozidla - název firmy)
SONAR	Sound Navigation And Ranging (Zvuková navigace a zaměřování)
LIDAR	Light Detection And Ranging (Světelná detekce a zaměřování)
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australská národní vědecká agentura)
ICT	Information and Communication Technologies (Informační a komunikační technologie)
VVÚ	Výsledné vnitřní účinky
LED	Light Emission Diod (Dioda vyzařující světlo)

12 Seznam příloh

Součástí této bakalářské práce jsou následující přílohy:

- Příloha A:** Datový nosič CD obsahující elektronickou verzi práce. Nosič dále obsahuje modely programu ANSYS použité pro pevnostní ověření tlakové nádoby.