



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# KONSTRUKČNÍ NÁVRH A PEVNOSTNÍ KONTROLA PODVOZKU S LYŽEMI PRO LETOUN S KRÁTKÝM VZLETEM A PŘISTÁNÍM

STRUCTURAL DESIGN AND STRESS ANALYSIS OF SKI LANDING GEAR FOR AIRPLANE WITH SHORT TAKE-OFF  
AND LANDING

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vladimír Hostinský

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Katrňák

BRNO 2022

## Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Bc. Vladimír Hostinský**  
Studijní program: Letecká a kosmická technika  
Studijní obor: Stavba letadel  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Katrňák**  
Akademický rok: 2021/22

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 diplomové práce:

### **Konstrukční návrh a pevnostní kontrola podvozku s lyžemi pro letoun s krátkým vzletem a přistáním**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Proveďte podrobný konstrukční návrh a pevnostní kontrolu řešení podvozku s lyžemi pro letoun s krátkým vzletem a přistáním STOL v kategorii UL–2 a LSA.

#### **Cíle diplomové práce:**

- Návrh koncepčního řešení hlavního podvozku s lyžemi pro letoun typu STOL.
- Návrh konstrukčního řešení lyže a uchycení k hlavnímu podvozku.
- Stanovení základních hmotnostních konfigurací a centrází letounu.
- Návrh zatížení hlavního podvozku s lyžemi dle předpisů pro kategorii UL–2 a LSA.
- Pevnostní kontrola lyže a hlavního podvozku pomocí metody konečných prvků.

#### **Seznam doporučené literatury:**

UL 2 - I. část. Požadavky letové způsobilosti SLZ, Ultralehké letouny řízené aerodynamicky. Praha: Letecká amatérská asociace ČR LAA, 2002-10-17.

CS-LSA, Amendment 1. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Light Sport Aeroplanes. European Aviation Safety Agency EASA, 2013-07-29.

MERTL, V. Konstrukce a projektování letadel. Brno: PC-DIR Real, 2000, 133 stran. ISBN 80-214-1789-7.

CURREY, N. S. Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988. ISBN 9780930403416.

JENKINSIN, L. R. Aircraft design projects for engineering students. AIAA American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003, 371 stran. ISBN 1-56347-619-3.

PAZMANY, L. Landing Gear Design for Light aircraft – Volume I. First edition. San Diego, California: Pazmany Aircraft Corporation, 1986. 245 stran. ISBN 0-9616777-0-8.

NOVÁK, J. Návrh podvozku VUT200 TwinCobra. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Letecký ústav. Vedoucí práce Tomáš Katrňák.

FORMAN, T. Modifikace přistávacího zařízení letounu Irbis. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Letecký ústav. Vedoucí práce Jan Šplíchal.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Cílem této diplomové práce je návrh podvozku s lyžemi pro letoun STOL Cruiser a pevnostní kontrola tohoto podvozku s přihlédnutím k předpisům UL-2 a CS-LSA.

První část práce sleduje postup návrhu od konceptu po konstrukční návrh. Jsou v ní rozvedena rozhodnutí a důvody, které vedly k finální podobě návrhu.

V druhé části je určeno zatížení podvozku vyplývající z předpisů a provedena kontrola zatížení kritických bodů konstrukce. Detailněji je popsána analýza zatížení těla lyže pomocí MKP a následné úpravy skladby kompozitu.

## Klíčová slova

podvozek, lyže, STOL, ultralehký letoun, kompozitní materiál, CFRP

## Abstract

The aim of this thesis is a design of a ski landing gear for the STOL Cruiser airplane and strength analysis of its parts with consideration of UL-2 and CS-LSA regulation requirements.

First part follows the design process from a concept to detailed design. Decisions taken during the process and reasons behind them are discussed.

In second part requirements of regulations for said aircraft's landing gear are summarized and forces acting on the landing gear are calculated. This calculation is followed by a strength analysis of critical parts. Analysis of composite body of the ski carried out with a use of FEA and optimalization of its composite material layout is presented in a more detailed way.

## Key words

landing gear, ski, STOL, ultralight aircraft, composite material, CFRP

## Bibliografická citace diplomové práce

HOSTINSKÝ, Vladimír. *Konstrukční návrh a pevnostní kontrola podvozku s lyžemi pro letoun s krátkým vzletem a přistáním* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139910>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Tomáš Katrňák.

## Poděkování

Těm, co mně pomohli.

---

**Prohlášení o původnosti**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma: „Konstrukční návrh a pevnostní kontrola podvozku s lyžemi pro letoun s krátkým vzletem a přistáním“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, jež jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno.....

.....

(Podpis autora)

## Obsah

1. Úvod .....	5
1.1 Charakteristika podvozku s lyžemi .....	5
1.2 Charakteristika letounu STOL Cruiser .....	6
1.3 Předpokládané použití letounu .....	7
2. Konceptuální návrh podvozku .....	7
2.1 Základní části podvozku s lyžemi a jejich předběžný návrh .....	7
2.2 Celkový koncept .....	11
3. Konstrukční návrh .....	12
3.1 Hlavní rozměry .....	12
3.2 Spojení skluznice s tělem .....	13
3.3 Otvor pro kolo hlavního podvozku .....	13
3.4 Podstava .....	14
3.5 Spojení podstavy s tělem lyže .....	14
3.6 Uložení osy lyže .....	15
3.7 Ochranné kolečko a jeho montáž .....	16
3.8 Horní uchycení lanek .....	17
3.9 Přední oko lanka .....	18
3.10 Výsledný návrh .....	18
4. Návrh zatížení hlavního podvozku dle předpisů UL-2 a CS-LSA .....	19
4.1 Volba přísnějšího předpisu a horšího případu zatížení .....	19
4.2 Výpočet předepsaného provozního zatížení .....	19
4.2.1 Výpočet tíhové síly .....	19
4.2.2 Základní případ zatížení .....	19
4.2.3 Boční zatížení podvozku .....	22
4.3 Určení početního zatížení pro běžné součásti .....	22
4.4 Výpočet početního zatížení pro součásti z kompozitních materiálů .....	23
4.5 Volba horšího případu přistání .....	24
5. Přepočtení velikosti zatížení s ohledem na deformaci podvozkové nohy .....	24
5.1 Určení deformace podvozkové nohy .....	24
5.1.1 Síly při základním případě zatížení .....	26
5.1.2 Síly pro případ bočního zatížení .....	27
6. Pevnostní kontrola a optimalizace podvozku .....	28
6.1 Určení kritických bodů konstrukce .....	28
6.2 Kontrola zatížení v těle lyže, optimalizace skladby kompozitu .....	28
6.2.1 Model těla .....	28
6.2.2 Síť prvků .....	28
6.2.3 Vlastnosti materiálu a prvotní návrh skladby .....	30
6.2.4 Tvorba okrajových podmínek a náhradních zatížení .....	31
6.2.5 Výsledek výpočtu při provozním zatížení a optimalizace skladby .....	32
6.2.6 Kontrola pevnosti těla lyže .....	35
6.3 Kontrola zatížení v ose .....	38
6.3.1 Tvorba modelu a sítě .....	39
6.3.2 Materiál osy a jeho vlastnosti .....	39
6.3.3 Zatížení osy .....	39
6.3.4 Kontrola napětí v ose .....	40

---

6.3.5	Analytická kontrola výsledku .....	40
6.4	Analytická pevnostní kontrola dalších součástí .....	42
6.4.1	Porušení bočnice podstavy ohybovým napětím.....	42
6.4.2	Porušení svaru vymešovacího kroužku .....	43
6.5	Výsledky pevnostní kontroly .....	44
7.	Závěr.....	44
7.1	Budoucí vývoj.....	44
8.	Použitá literatura.....	48
Příloha A:	Stanovení základních hmotnostních konfigurací a centrází letounu .....	49
Příloha B:	Algoritmus pro výpočet zatížení a RF v jednotlivých vrstvách kompozitu .....	51

## 1. Úvod

Využití zamrzlého jezera uprostřed divočiny jako plnohodnotné přistávací dráhy nebo přistání na sněhových pláních mezi vrcholky hor je pro nás Středoevropany počin, na který se rádi podíváme na videu. V praxi u nás nicméně k podobným kouskům moc nedochází. Tím by mohl být snadno vysvětlen i fakt, že naprostá většina výrobců podvozků s lyžemi pro ultralehká letadla je situována mimo Evropu, ponejvíce ve Spojených státech amerických, kde se jejich výrobky dočkají největšího využití. Podobné dogma by mohlo platit i o kategorii letounů s krátkým vzletem a přistáním. V naší republice se těžko dočkají plného využití svého potenciálu, i přesto se zde však vyvíjejí a vyrábějí. Jedním z nejnovějších přírůstků do této kategorie je i v současnosti vyvíjený letoun STOL Cruiser společnosti Direct Fly. Po zhodnocení průzkumu trhu ohledně vhodného podvozku s lyžemi pro tento letoun, který proběhl v rámci mé bakalářské práce [1], mi bylo společností nabídnuto, zda bych nechtěl navrhnout podvozek nový, jež by pak mohl být dodáván společně s letounem. Tak vzniklo téma mé diplomové práce.

Práce si klade za cíl návrh podvozku s lyžemi pro letoun s krátkým vzletem a přistáním. Návrh bude zpracován od počáteční konceptuální volby uspořádání až po kompletní konstrukční řešení a následnou optimalizaci a pevnostní kontrolu, která by měla být přípravou k certifikaci podvozku.

Jak již bylo zmíněno, podvozkem s lyžemi pro letoun STOL Cruiser se zabývala už má bakalářská práce [1]. Jejím obsahem bylo z velké většiny zhodnocení vyráběných modelů podvozků s lyžemi a výběr toho nejvhodnějšího pro daný letoun. Výsledky rešerše jsou stále platné a budou proto použity jako teoretický základ i pro tuto práci. Úkolem bakalářské práce byl i návrh spojení lyže s podvozkovou nohou. Jeho koncept bude z části zachován, ale konstrukční detaily a rozměry založené na pevnostních výpočtech bude třeba přepracovat.

### 1.1 Charakteristika podvozku s lyžemi

Primárním použitím podvozků s lyžemi je přistávání, vzlet a pohyb letounu po zasněženém či částečně zasněženém povrchu. U nemnoha typů letounů se lze setkat i s jejich použitím pro přistání na travnaté plochy, povětšinou se jedná o lehké sportovní kluzáky. [1]

Ve většině případů je podvozek s lyžemi montován na, nebo namísto podvozku kolového, čímž jsou zachovány původní uspořádání a geometrie podvozku letounu.

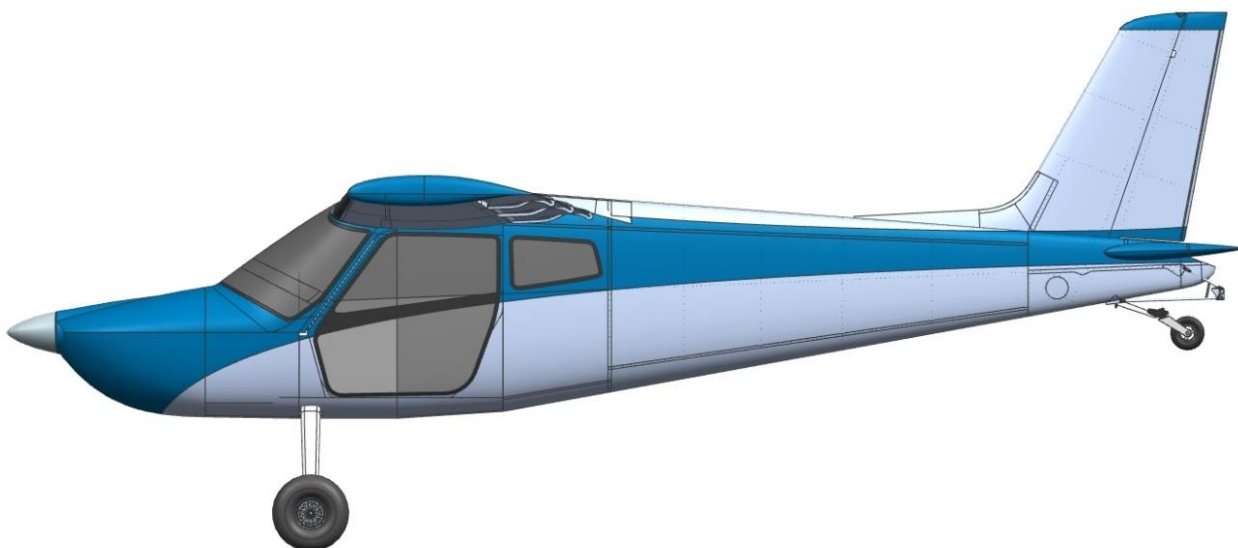
Vzhledem k dřívější dohodě s vedením firmy a rešerši zpracované v mé BP [1] bude návrh počítat pouze s typem uspořádání podvozku s pevnou lyží a pneumatikou vyčnívající pod skluznici. Tento typ vyhovuje nejlépe určení letounu, jeho kategorii a mimo jiné se také pohybuje v odpovídající relaci výrobní ceny.





Obr. 1 – Příklad podvozku s lyžemi – Summit Aircraft LSA Ski [1]

## 1.2 Charakteristika letounu STOL Cruiser



Obr. 2 - Boční pohled na letoun STOL Cruiser [2]

STOL Cruiser je současným projektem společnosti DirectFly. Jedná se o celokovový hornoplošník vyvíjený s požadavkem krátkého vzletu a přistání. Lichoběžníkové křídlo letounu je navrženo jako samonosné (tj. bez šikmých vzpěr, jež by zvyšovaly odpor). Kvůli snížení pádové rychlosti bude křídlo vybaveno Fowlerovými vztlačovými klapkami. Ve výchozím provedení je letoun osazen pohonnou jednotkou Rotax 912 ULs, konstrukční řešení však počítá i s využitím výkonnějších verzí. Plánována je certifikace letounu v kategoriích LSA a UL-2. Podvozek letounu je ostruhového typu. Řízení na zemi je zajištěno brzděním hlavních kol a říditelnou ostruhou. [1]

### 1.3 Předpokládané použití letounu

Konstrukce letounu se snahou o dosažení krátké dráhy přistání i vzletu a předpoklad použití pneumatik o větším rozměru ho zařazuje do kategorie tzv. bush planes, která si v posledních letech získala velkou oblibu v oblasti sportovního/rekreačního létání. Dříve obvyklé využití těchto letadel pro dopravu materiálu a osob do odlehlých oblastí je nicméně na ústupu a většinu těchto činností převzaly helikoptéry. Konstrukční uspořádání umožňuje bush planes operovat z polních letišť i neupravených ploch v podobě např. říčních koryt. Vybavení takového letounu podvozkiem s lyžemi rozšiřuje jeho pole působnosti i na přistávání na ledovcových plošinách či zamrzlých jezerech. Takto vybavené letouny pak nacházejí využití mezi komunitou pilotů v oblastech jako je Aljaška, sever Kanady či Sibiř. V našich zeměpisných šířkách se jich využívá povětšinou jen ve vysokohorských oblastech. [1]



*Obr. 3 - lyžemi vybavený ‚bush plane‘ Piper Pacer  
na ledovci Surprise glacier v Chugach mountains na Aljašce [3]*

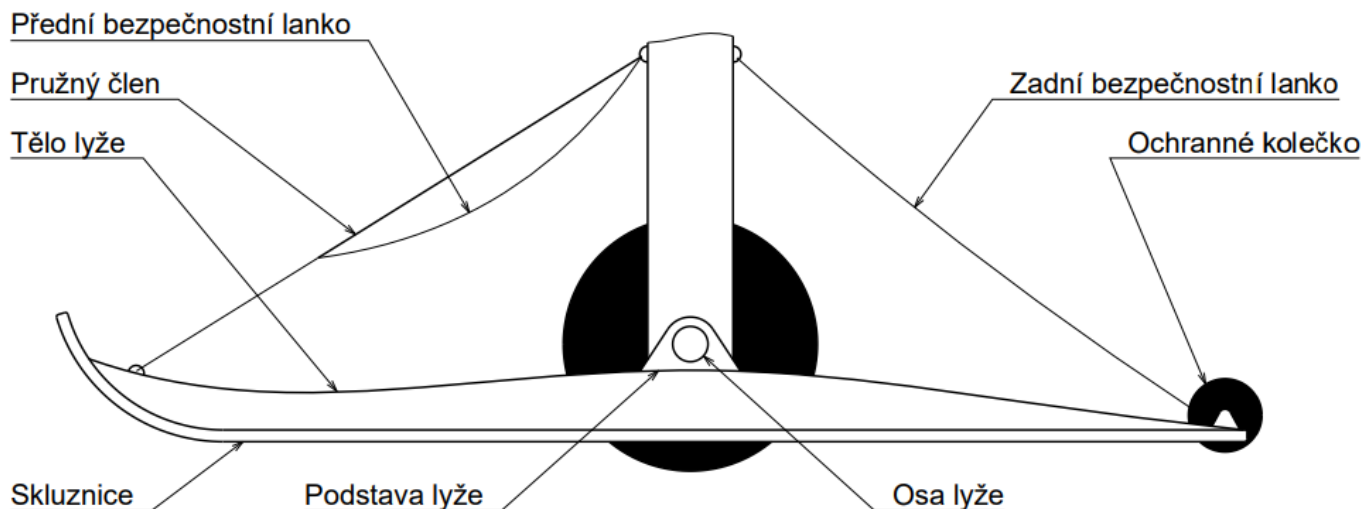
## 2. Konceptuální návrh podvozku

Tato kapitola je do mé práce umístěna, aby co nejlépe popsala počátek návrhu podvozku s lyžemi a pomohla s odůvodněním volby jeho základního uspořádání. Jejím vyústěním by měl být obecný návrh uspořádání podvozku a jeho částí a hrubá představa o materiálu, tvaru a způsobu výroby jednotlivých součástí.

### 2.1 Základní části podvozku s lyžemi a jejich předběžný návrh

Oddíly jednotlivých součástí v této kapitole jsou uvedeny stručným shrnutím výsledků rešerše pro danou součást – její funkci v podvozku a v praxi používanými řešeními. Po ní následuje rozbor nejvhodnějšího řešení pro nově navrhovaný podvozek.

Na obr. 4 je pro lepší přehlednost zobrazeno schéma typického podvozku s lyžemi a jeho hlavních částí.



Obr. 4 – Základní části podvozku s lyžemi

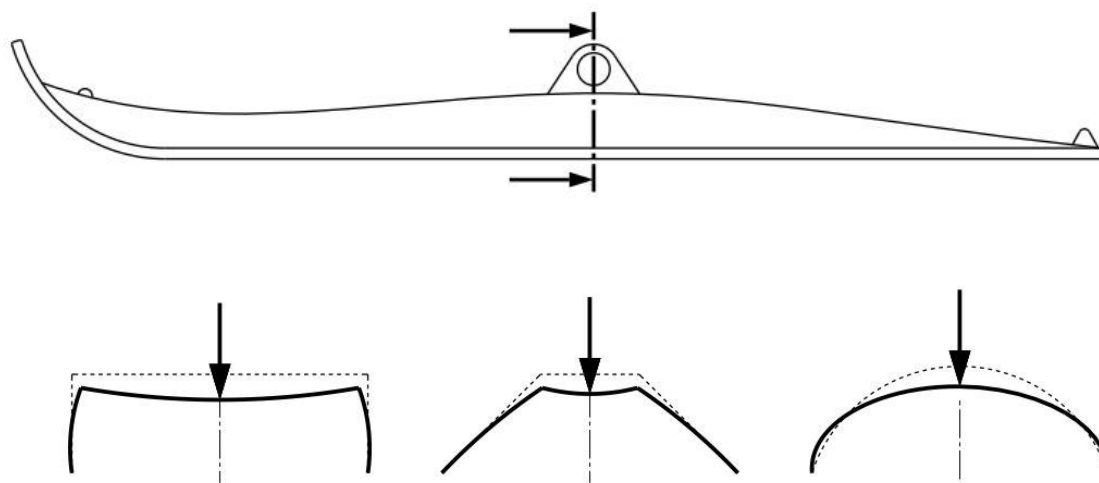
### Tělo lyže

Tělo lyže tvoří ústřední součást podvozku, na kterou je napojena většina ostatních součástí. Přenáší zatížení z plochy skluznice a koncentruje ho na místo, odkud se dále přenáší až na nohu podvozku. Mělo by také zajišťovat tvarovou stabilitu celé lyže a být schopno alespoň částečně pohlcovat nárazy od přistání.

Dříve používaná řešení ze dřeva jsou již dávno překonána konstrukcemi z duralu, kompozitními skořepinami nebo kombinacemi obojího.

Celková konstrukce podvozku se bude výrazně odvíjet od volby materiálu těla lyže. Jako nejvhodnější materiály se jeví slitina hliníku nebo vláknový kompozit, oba vzhledem ke své vysoké měrné pevnosti. Tělo tvořené svařencem z hliníkových trubek bylo zvažováno, vůči kompozitní skořepině má však mnohé nevýhody. Patří mezi ně například o něco vyšší odhadovaná hmotnost výsledné konstrukce (vyplývající z předběžného výpočtu) nebo menší možnost optimalizace rozložení hmoty materiálu na základě jeho zatížení. Výhody skořepinového těla ospravedlňují i jeho vyšší cenu a vyšší náklady na zavedení výroby.

Tvar skořepiny by měl sloužit k co nejvýhodnějšímu přenosu zatížení mezi skluznicí a podstavou. První podstatnou geometrickou charakteristikou těla je jeho příčný průřez. Zvažované průřezy jsou znázorněny na obrázku 5. Schéma v horní části obrázku znázorňuje umístění příčného řezu.



Obr. 5 – Možné příčné průřezy a jejich deformace

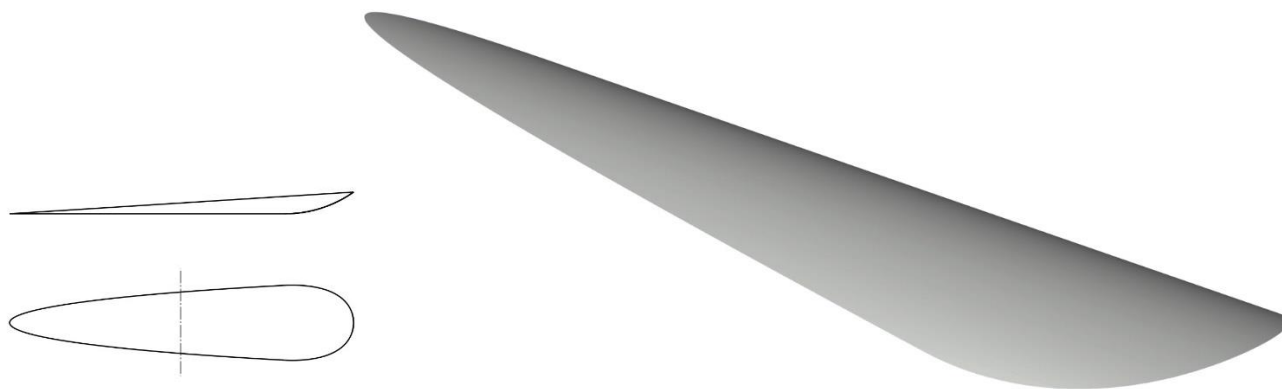
Obdélníkový a lichoběžníkový průřez lze nalézt na konkurenčních typech lyží, což ale rozhodně neznamená, že jsou výhodnější. V ostrých ‚rozích‘ může docházet k výrazné koncentraci napětí a přímé stěny mohou podléhat nebezpečným deformacím následkem ztráty vzpěrné stability. Vzhledem k těmto faktorům se jako výhodnější zdá použití průřezu ve tvaru oblouku (pravý na obrázku 5), který nebude namáhán vzpěrem a neobsahuje místa koncentrace napětí. Výroba obloukového průřezu vkládáním vrstev kompozitu do formy není o nic složitější než výroba prvních dvou možností. Mírně složitější bude jen navazování dalších součástí na tento tvar.

Jak se dále v textu ukáže, předchozí úvahu o tvaru průřezu mírně degraduje nutnost umístění výřezu pro pneumatiku do nejvíce namáhaného místa těla lyže, čímž v něm vznikne svíslá stěna (viz následující kapitoly). Obloukový průřez bude nicméně zachován na zbylých částech lyže a měl by výrazně přispět při budoucí optimalizaci lokálních složení kompozitu a snad tím i snížit výslednou hmotnost lyže.

Co se velikosti profilu týče, první tendencí by bylo zachování jednotné výšky po celé délce těla lyže. Toto řešení je nicméně značně nevýhodné, jelikož přední část potřebuje mít podstatně vyšší tužší profil, který by podpořil ohnutou špičku skluznice prorážející sněh, zadní část naopak vyžaduje profil snížený, který přispěje svou pružností k pohlcování nárazu ochranného kolečka na asfalt přistávací dráhy.

Dalším faktorem při volbě obecného tvaru těla lyže je jeho půdorysný tvar, který bude dost podstatně kopírován i tvarem skluznice. Většina plochy skluznice by se měla nacházet před osou otáčení, aby nedocházelo k zabořování špičky lyže do sněhu.

Zhodnocením myšlenek z předchozích odstavců vznikl předběžný tvar těla znázorněný na obrázku 6.



Obr. 6 – Obecný návrh tvaru těla lyže

Špice těla na obrázku už je seříznuta kvůli zdvihnutí přední části skluznice. Čerchovaná čára v náčrtu znázorňuje předpokládané umístění osy otáčení lyže.

### Skluznice

Skluznice je v přímém kontaktu se sněhem nebo ledem a měla by po nich zajišťovat hladký pohyb. Musí tedy být vyrobena z materiálu odolného proti otěru, schopného pohybu po sněhu s co nejmenším třením a zároveň co nejméně náchylného k přimrzání. Bývá proto vyráběna z ohýbané desky z odolného polyethylenu, například UHMW. Od dříve používaných duralových nebo ocelových plechů se u malých letounů už téměř upustilo kvůli jejich špatné 'klouzavosti' a složitosti jejich povlakování jiným materiálem.

Hlavními návrhovými parametry skluznice jsou, kromě materiálu, její plocha, tvar a tloušťka. Plocha je vcelku podstatným parametrem, jelikož nepřímo určuje plošné zatížení sněhu, tedy míru toho, jak moc se bude letadlo ve sněhu 'propadat'. Tvar je třeba volit tak, aby nevytvářel ostré hrany kolmé na pohyb, které by se mohly zařezávat do sněhu. Tloušťka skluznice udává přípustnou míru opotřebení.

K tělu lyže je skluznice většinou nýtována, což usnadňuje její případnou výměnu.

V návaznosti na charakter těla je nejvýhodnější volbou materiálu pro skluznici polyethylen UHMW. S jeho používáním jsou dobré zkušenosti a je dostupný ve vhodné podobě tenkých desek, které je možno řezat do potřebného tvaru. Díky jeho pružnosti jej lze snadno ohnout vzhůru na špici lyže.

Tvar skluznice bude kopírovat půdorysný tvar těla a mírně ho přesahovat, aby se zvýšila užitná plocha skluznice a zároveň byl chráněn okraj kompozitního těla.

### Podstava lyže

Ložiska umožňující rotaci lyže na ose jsou povětšinou umístěna v lyžové podstavě, občas pak přímo v těle lyže. Použití vyměnitelných podstav o více výškách může pomoci se zachováním přesahu pneumatiky pod skluznici při použití pneumatik o různých rozměrech. Podstava bývá svařencem z duralových nebo ocelových částí nebo odlitkem.

Zvažovány byly tři možné způsoby zastání funkce podstavy – podstava svařená z plochých duralových součástí opatřená trubkovým ložem pro ložiska (na obr. 7 vlevo), ložiskové pouzdro usazené přímo do kompozitního těla lyže (obr. 7 uprostřed) a podstava odlévaná z jednoho kusu (vpravo).





Obr. 7 – Zvažované podstavy lyže

Prostřední možnost byla rychle odložena jako nemyslitelná, jelikož neumožňuje výměnu podstavy a tím ani možnost změny používaného rozměru pneumatiky bez výměny celé lyže. Ze zbývajících dvou možností byla vybrána svařovaná podstava kvůli jednoduchosti výroby, hmotnostní úspoře a menší pravděpodobnosti vad v materiálu (u plechových polotovarů ve srovnání s materiálem odlévané součásti).

### Osa lyže

Přenáší napětí z ložisek podstavy na podvozkovou nohu – z pevnostního hlediska se jedná o nejkritičtější prvek. Musí zároveň přenést požadované napětí, dovolit rotaci lyže v ložiscích a umožnit axiální zajištění ložisek na ose. Její návrh se výrazně odvíjí od typu podvozkové nohy umístěné na letounu. Většinou se jedná o soustruženou součást z oceli nebo duralu.

Je uvažována jako soustružená součást. Její upevnění k podvozkové noze bude, pokud to rozměry součástí dovolí, realizováno přes podložku, která umožní montáž lyže bez nutnosti demontáže kola podvozku.

### Bezpečnostní lanka

Vymezují krajní polohy náklonu lyže kolem osy. Používají se ocelová lanka, jejichž doporučenou tloušťku, délku a způsoby zakončení a napojení udává oběžník FAA AC43-13-2B [4]. Lanka budou volena s přihlédnutím k němu.

### Pružný člen na předním lanku

Zajišťuje lyži v pozici se zdvihnutou přední částí, což ji chrání před zabořením pod sněh. Také zamezuje kmitání lyže během letu. Většinou ho tvoří gumový prvek nebo ocelová pružina. Jeho doporučené parametry lze také nalézt opět v FAA AC43-13-2B [4].

### Ochranné kolečko

Chrání konec skluznice před opotřebením vznikajícím kontaktem s asfaltem při přistání na pneumatiku. Není nutným prvkem podvozku, převážná většina podvozků s lyžemi s pneumatikou procházející skrze skluznici jím ale disponuje. U lyží se širším koncem se využívají i dvě kolečka umístěná vedle sebe na konci lyže.

Ochranné kolečko bude nakupováno jako vyrobený celek i s ložiskem – jedná se o nejjednodušší a nejekonomičtější řešení.

Jeho uchycení k tělu bylo, podobně jako podstava, uvažováno součástmi laminovanými do kompozitního těla při výrobě. Z důvodu náročnosti takové výroby bylo nakonec zvoleno uchycení dvojicí ohýbaných součástí ve tvaru L.

## 2.2 Celkový koncept

Z předběžného rozboru vyplývá návrh lyže s tělem z kompozitní skořepiny opatřeným skluznicí z polyethylenu a svařovanou duralovou podstavou. Montáž kolečka bude realizována ohýbanými duralovými konzolami, osa lyže bude opatřena podložkou pro montáž. Na tomto konceptu bude dále stavět detailní návrh, který už se bude dopodrobna zabývat realizací jednotlivých konstrukčních uzlů a nebude muset tápat mezi různými základními představami provedení.

### 3. Konstrukční návrh

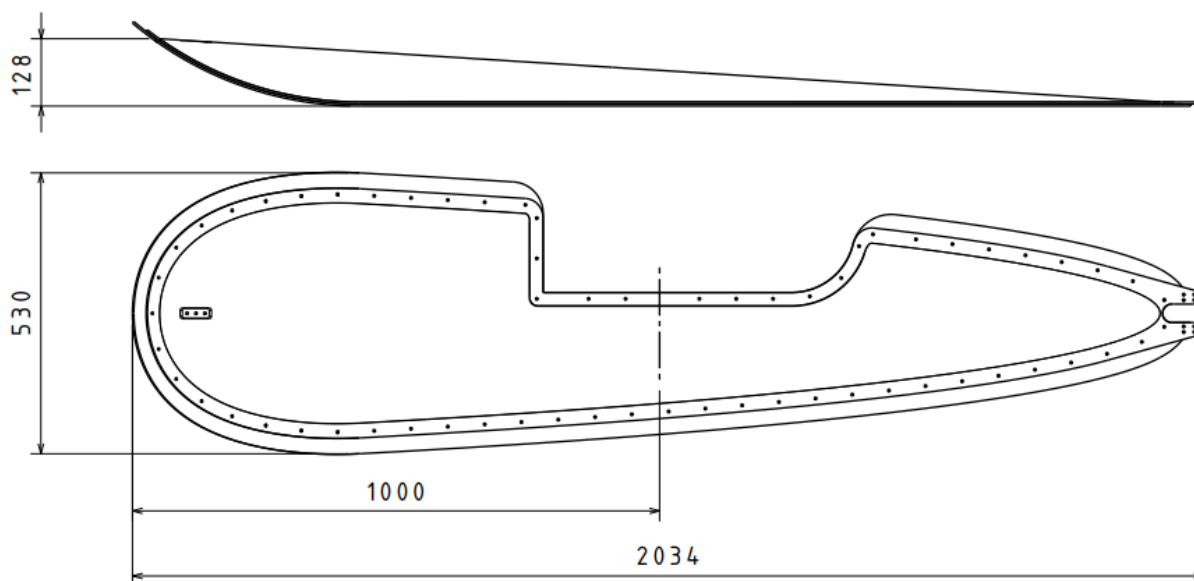
Následující podkapitoly ilustrují podrobnosti návrhů jednotlivých konstrukčních uzlů s přihlédnutím k provozním podmínkám, návazností mezi díly a k rozhodnutím učiněným v minulé kapitole.

#### 3.1 Hlavní rozměry

Aby lyže nepůsobila na sněhovou pokrývku příliš velkým plošným zatížením a nebořila se do ní, byly hlavní rozměry určeny na základě přibližně spočtených plošných zatížení v praxi používaných lyží, určených z údajů sebraných v mé bakalářské práci [1]. Jejich hodnoty jsou k nalezení v tabulce 1. Plošné zatížení je vypočteno z maximální vzletové hmotnosti letounu na daném podvozku s lyžemi.

Tab. 1 Odhady plošných zatížení lyží obdobné kategorie

Výrobce	Typ	Rozměry [mm]	Přibližná plocha [m <sup>2</sup> ]	Maximální vzletová hmotnost letounu [kg]	Plošné zatížení [kg/m <sup>2</sup> ]
Airglas	LW2500	508 x 1879,6	0,955	998	502
Summit Aircraft	LSA Ski	558,8 x 1803,4	1,008	600	297
TrickAir	Sport 1500	457,2 x 1651	0,755	680	450
Datum	1500	565 x 1630	0,589	772	655

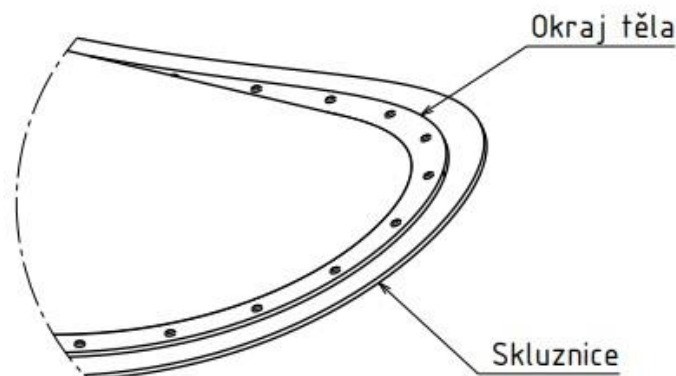


Obr. 8 – Hlavní rozměry lyže

Z hodnot výše byla zvolena celková délka lyže (cca 2000 mm) a šířka lyže (530 mm), při kterých je přibližně dosahované plošné zatížení rovno 283 kg/m<sup>2</sup> – hodnota nižší než u nejpříznivějšího používaného řešení. Výška těla lyže je volena odhadem s přihlédnutím k jeho pevnosti a tuhosti. Osa lyže je umístěna přibližně v polovině délky lyže tak, aby byla větší plocha skluznice umístěna před ní a lyže neměla tendenci se bořit špicí do sněhu.

### 3.2 Spojení skluznice s tělem

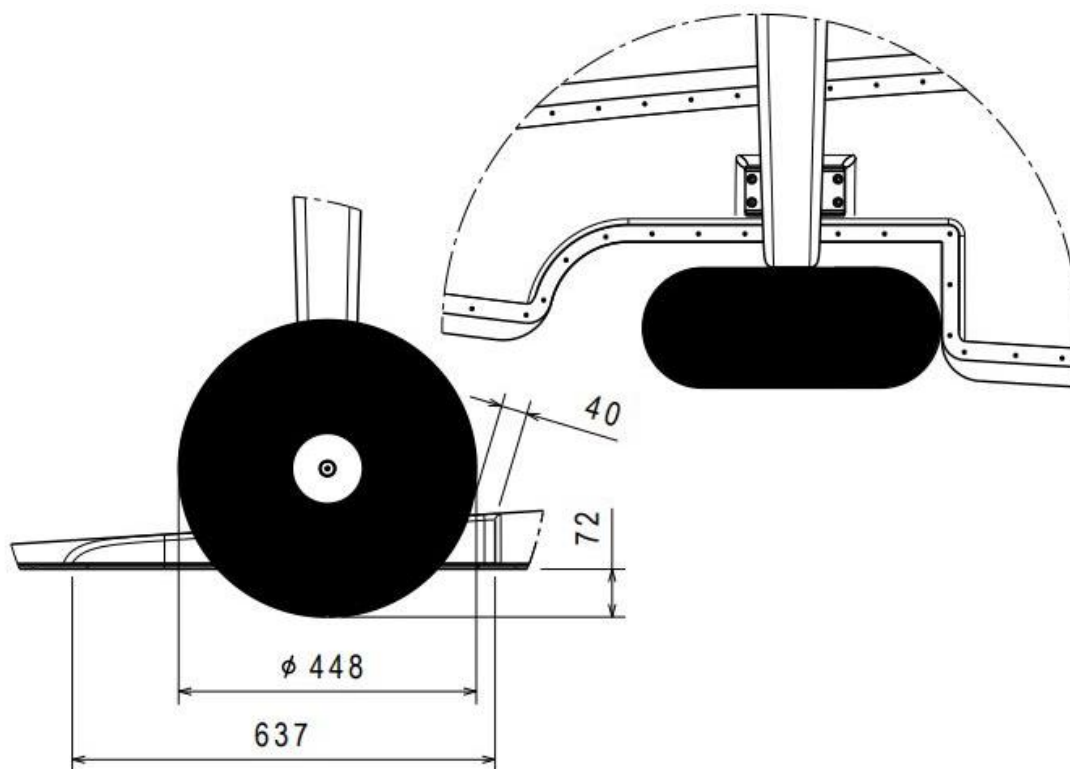
Spojení je realizováno za pomoci nýtů umístěných v rozšířeném lemu kompozitního těla. Na obrázku 9 je řešení ilustrováno na detailu špičky lyže. Zvolený přesah polyethylenové skluznice (30 mm) je nutno otestovat v provozních podmínkách a případně jeho rozměr upravit. Skluznice bude řezána z deskového polotovaru, tudíž by případná úprava tvaru neměla způsobit větší potíže.



Obr. 9 – Okraj lyže s nýtovým spojem

### 3.3 Otvor pro kolo hlavního podvozku

Je největším narušením plochy lyže. Jeho rozměr odpovídá rozměru největší velikosti používané pneumatiky (Carlisle Turf Glide 8.00–6) zvětšené o mezeru, která je třeba pro zamezení kupení sněhu na okraji kompozitního těla lyže. Mezera má v nejužším místě 40 mm. Tvar zadní části otvoru (viditelný na obr.10) je tvořen radiem, který zamezí ,zařezávání se' okraje skluznice pod sněh.

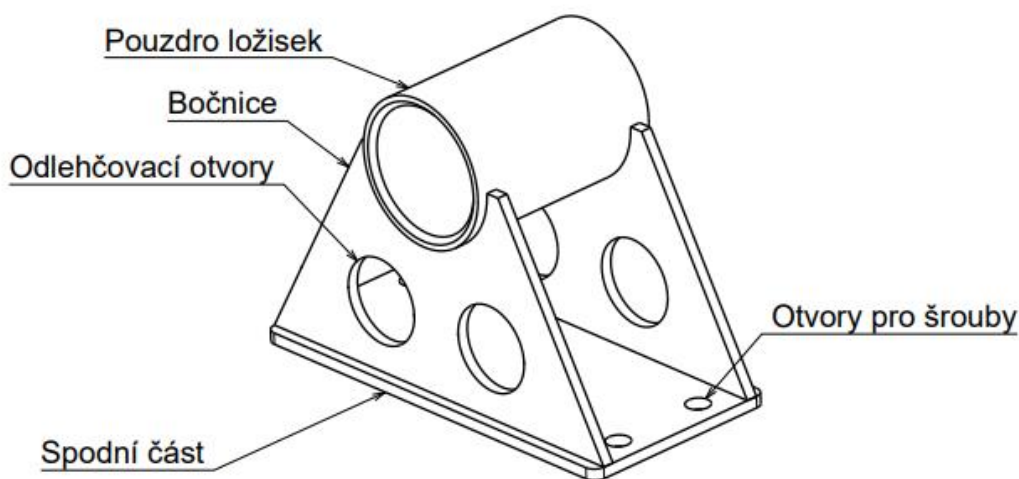


Obr. 10 – Otvor pro pneumatiku



### 3.4 Podstava

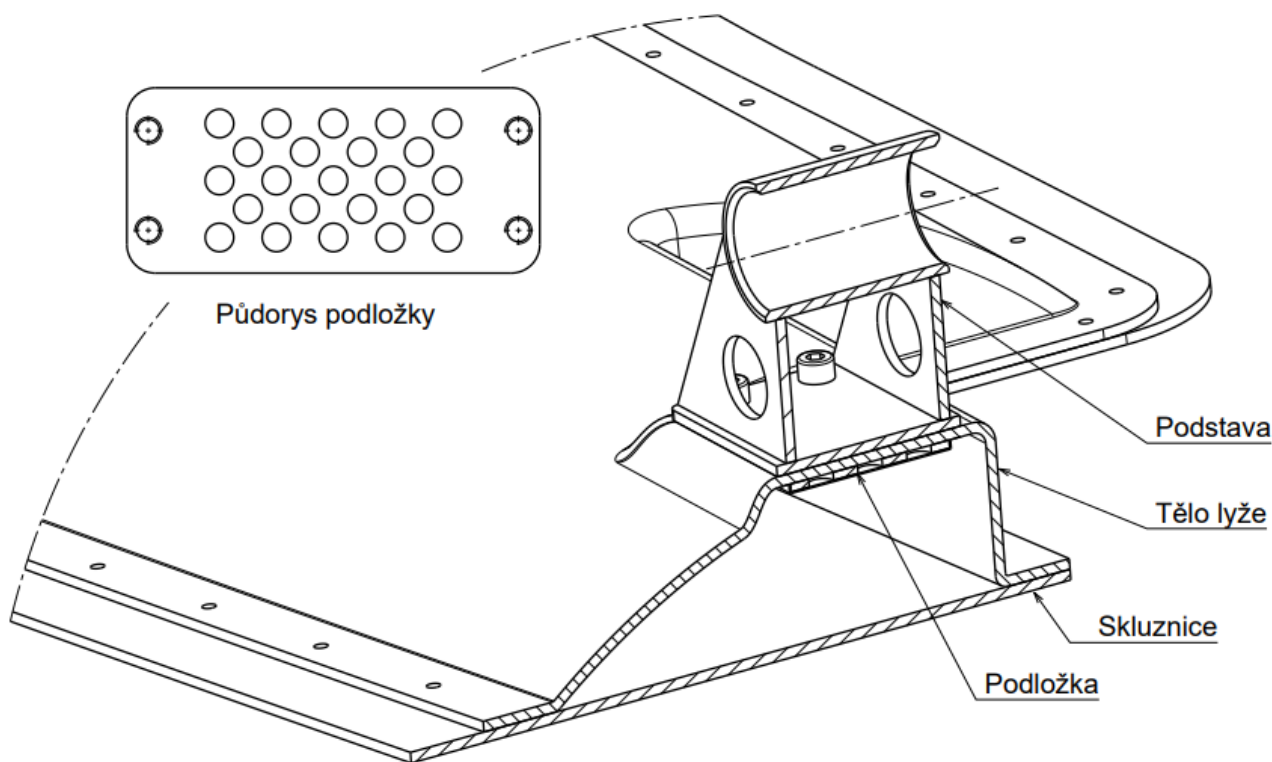
Podstavu lyže (obr. 11) tvoří několik plechových součástí spojených pomocí svarů a pouzdro pro ložiska. Polotovarem pro výrobu jednotlivých součástí je 4 mm plech ze slitiny hliníku 5754. Spodní plocha podstavy kopíruje obrys plochy lože vytvořeného na tělu lyže a obsahuje otvory pro montážní šrouby. Na ni jsou koutovými svary navařeny dvě bočnice lichoběžníkového tvaru. Otvory v bočnicích slouží k odlehčení celé součásti. Vybrání v zúžené části bočnic umožňuje navaření soustruženého ložiskového pouzdra. Výška ložiskového pouzdra nad podložkou je dána rozměrem pneumatiky a jejím vysunutím pod rovinu skluznice. V případě pneumatiky Carlisle Turf Glide 8.00 - 6, se kterou se počítá v návrhu, je tento rozměr 84 mm. V budoucnu je plánována výroba dalších rozměrů, proto je podstava navržena jako vyměnitelná. Průměr otvoru pro ložiska udávají vnější rozměry ložisek, ty v prvotním návrhu vycházejí z průměru osy lyže a během další optimalizace se mohou měnit.



Obr. 11 – Návrh podstavy

### 3.5 Spojení podstavy s tělem lyže

Umístění podstavy lyže vůči podélné ose těla je voleno tak, aby se noha podvozku přiblížila co možná nejbližší k ose, a tím vznikl na ose co nejmenší ohybový moment. Podstava bude k tělu lyže připevněna pomocí čtveřice šroubů M8 uchycených do duralové podložky zalaminované do těla lyže při výrobě. Podložka i její umístění jsou znázorněny na obrázku 12. Otvory ve střední části podložky slouží ke zlepšení adheze mezi podložkou a matricí kompozitu.



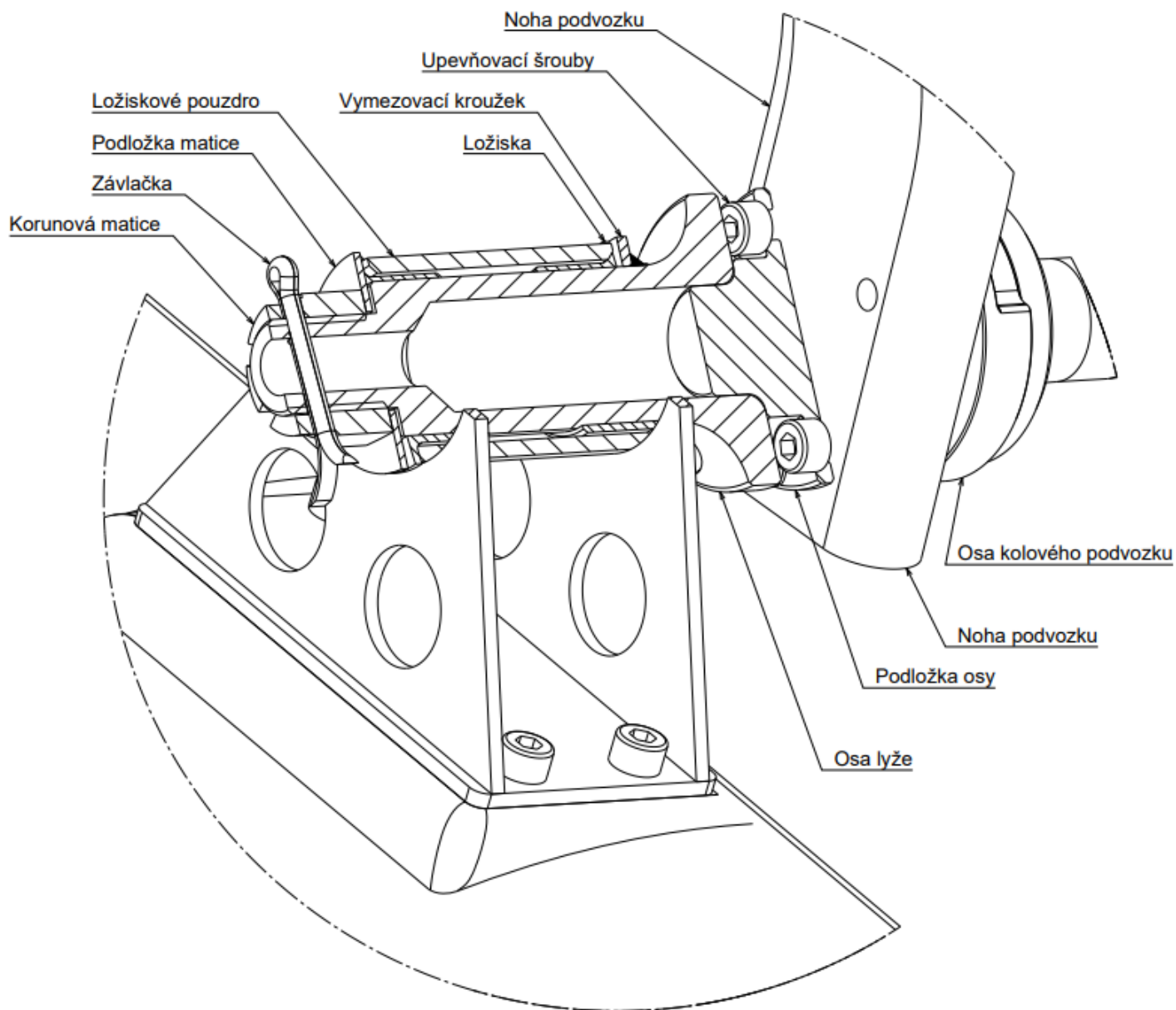
Obr. 12 – Řez řešením upevnění podstavy k tělu lyže a půdorys podložky

### 3.6 Uložení osy lyže

Pro usnadnění demontáže podvozku s lyžemi bude na noze podvozku umístěna podložka s otvory se závity, která bude na nohu připojena pomocí stejných šroubů jako osa kolového podvozku. Na tuto podložku bude teprve šrouby montována rozšířená strana osy lyže.

Podložka je konstruována jako rotační součást s vystouplým středem zajišťujícím vystředění osy lyže a zvýšení bezpečnosti při povolání některého ze šroubů. Čtyři otvory se závity ve zvýšené části umožňují připevnění osy lyže a zbylé čtyři slouží k upevnění podložky k podvozkové noze.

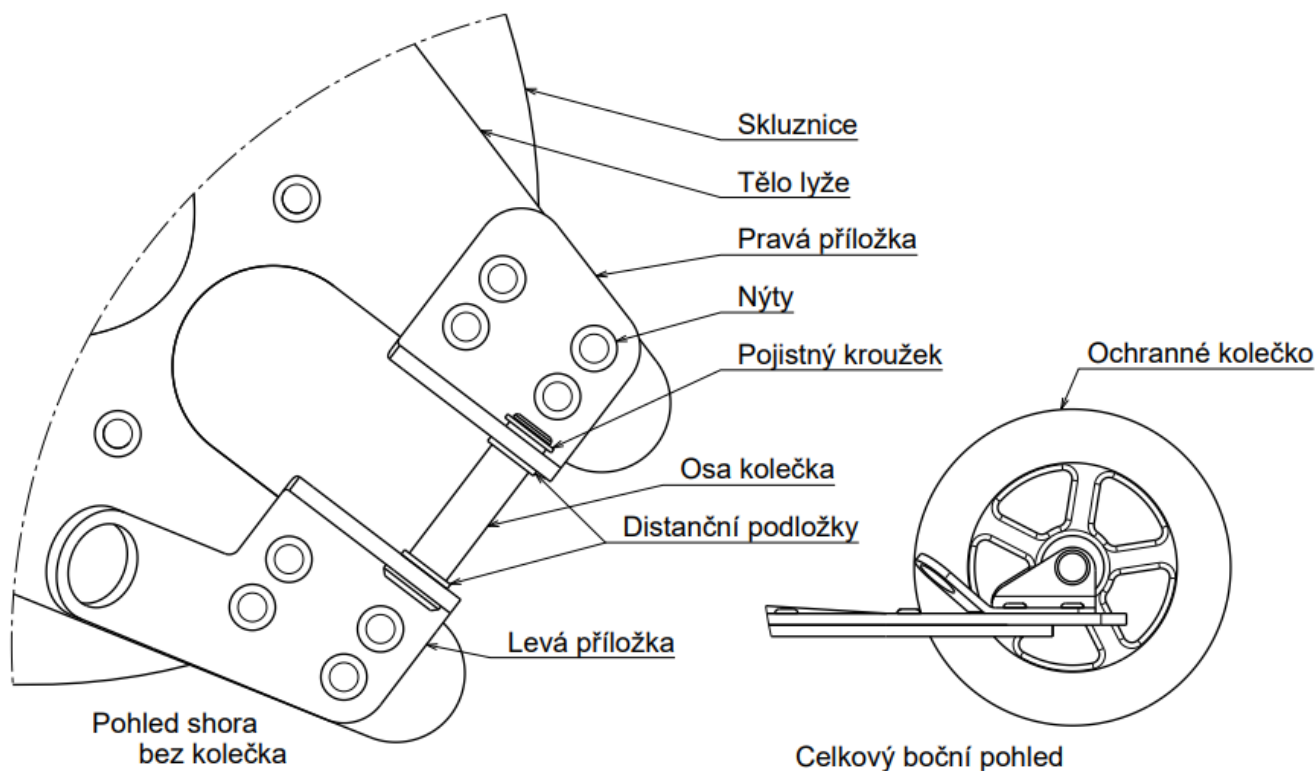
V prvotním návrhu (obr. 13) je osa vyrobena jako dutá soustružená součást, na které je navařen vymezačící kroužek, aby bylo zabráněno pohybu ložisek v axiálním směru. Pro zajištění z druhého směru je na ose umístěna korunová matice, jejíž montáž je umožněna příslušným závitem a dírou pro závlačku. Montáž k podložce na podvozkové noze je zajištěna čtyřmi šrouby. Postupné rozšiřování průměru pomáhá zabránit kumulaci napětí, ke kterému by došlo při prudké změně. V prvotním návrhu se počítá s využitím osy z duralu. Rozměry a materiál osy se však můžou měnit v závislosti na výsledcích pevnostní zkoušky.



Obr. 13 – Řez řešením upevnění podstavy k tělu lyže a půdorys podložky

### 3.7 Ochranné kolečko a jeho montáž

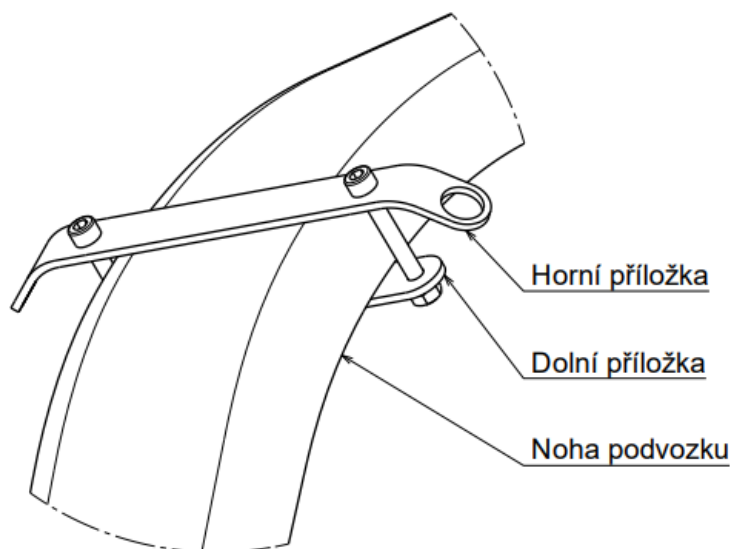
Ochranné kolečko o průměru 110 mm je nakupováno i s vlisovanými ložisky a umístěno na tradičně řešené soustružené ose o průměru 8 mm. Osa prochází dvěma příložkami (viz obr. 14) a axiálně je zajištěna pojistným kroužkem. Ohýbané příložky jsou vyráběny z 3 mm silného plechu. Levá z nich plní zároveň funkci oka pro zadní bezpečnostní lanko. O bezpečné uchycení příložek k tělu lyže se starají dvě čtveřice trhacích nýtů se záпустnou hlavou.



Obr. 14 – Pohled shora i boční na uchycení ochranného kolečka

### 3.8 Horní uchycení lanek

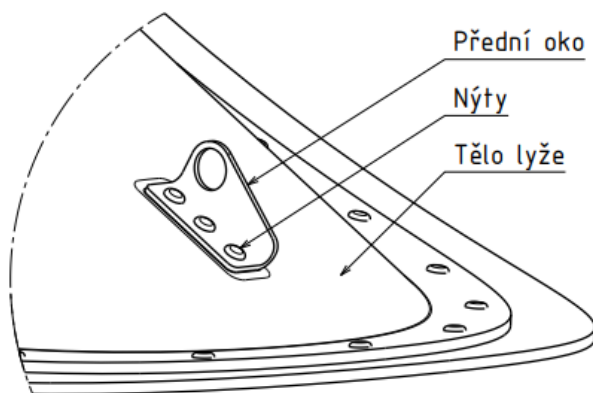
Oka pro bezpečnostní lanka budou umístěna do ploché duralové součásti přichycené ve vrchní části podvozkové nohy (Obr. 15). Tato příložka bude upevněna pomocí dvojice šroubů M6 a plochého protikusy. Tvar ohybu je odvozen od tvaru kompozitní nohy. Pro ověření, zda při tomto umístění ok nedojde k překročení limitních úhlů, které doporučuje FAA [4], byla použita obdobná grafická metoda jako v mé bakalářské práci [1].



Obr. 15 – Detail uchycení ok bezpečnostních lanek

### 3.9 Přední oko lanka

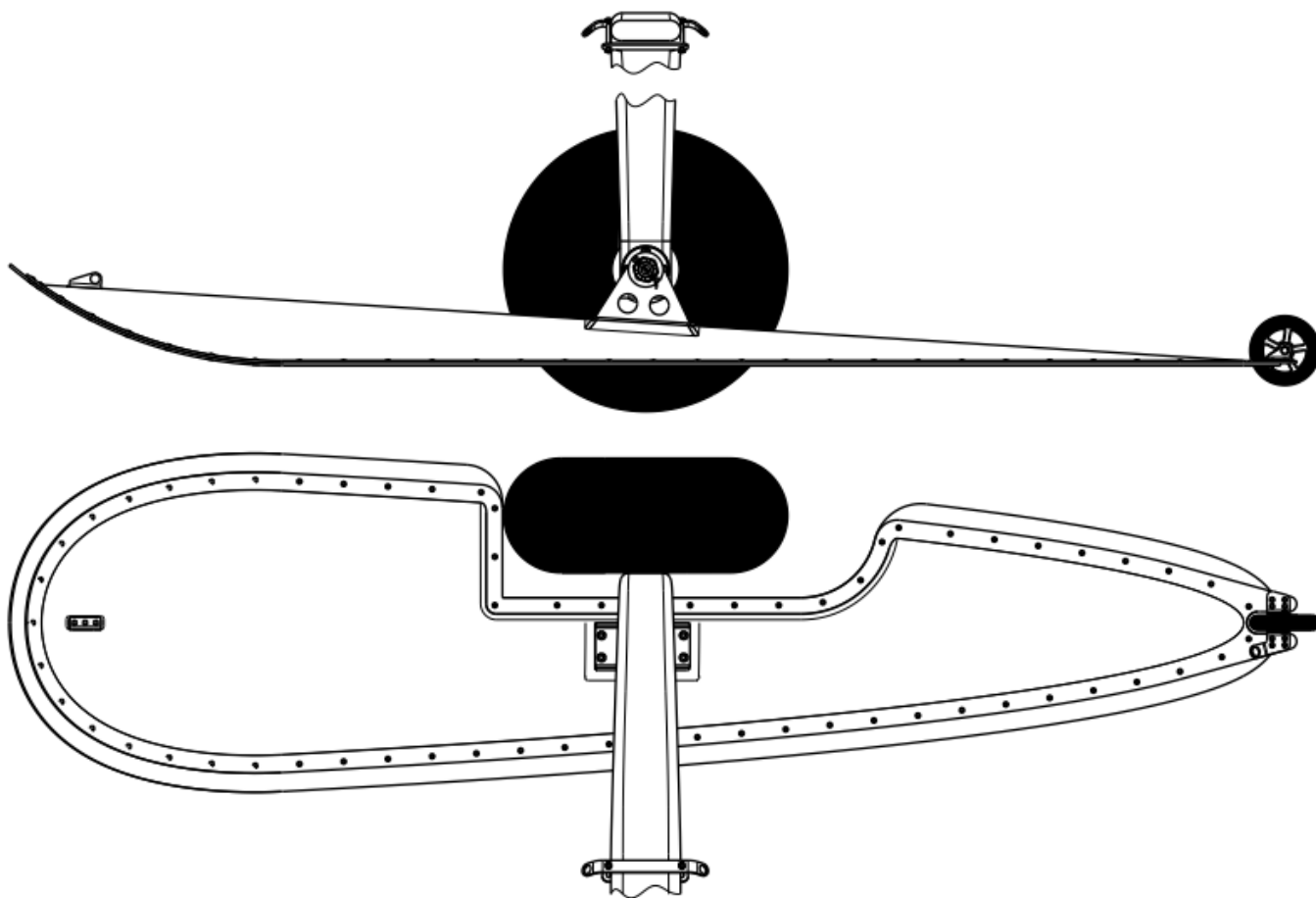
Uchycení lanka v přední části (obr. 16) je zajištěno za pomoci ohýbaného oka připevněného nýty do rovné plochy (k tomu účelu vytvořené) na těle lyže. Trojice trhacích nýtů a zalaminovaný duralový protikus zamezí případnému vytržení oka.



Obr. 16 – Přední část lyže s okem pro lanko

### 3.10 Výsledný návrh

Závěrem této kapitoly je detailnější návrh celé sestavy lyže, na který v následujících kapitolách naváže optimalizace na základě pevnostních výpočtů, během které dojde k doladění kritických rozměrů konstrukce.



Obr. 17 – Celkový pohled na návrh lyže

#### 4. Návrh zatížení hlavního podvozku dle předpisů UL-2 a CS-LSA

Vzhledem k plánované certifikaci letounu podle předpisu UL-2 a CS-LSA, bude podle nich určeno i početní zatížení podvozku. Po zvolení předpisu s přísnějšími podmínkami bude proveden výpočet početního zatížení zvláště pro kompozitní a pro kovové součásti. Po něm bude následovat pevnostní kontrola kritických bodů konstrukce a jejich optimalizace.

##### 4.1 Volba přísnějšího předpisu a horšího případu zatížení

Z definic provozních zatížení v daných předpisech [5], [6] je zřejmé, že při základním způsobu zatěžování jsou hodnoty zatěžujících sil dle CS-LSA přibližně o 19% vyšší než dle UL-2. Dále proto bude výpočet probíhat podle předpisu CS-LSA.

Výpočet má být proveden pro nejméně příznivý případ zatížení podvozku. Kvůli zachování tohoto konzervativního předpokladu bude počítáno s letounem v konfiguraci, která je čistě teoretická a v reálném případě by k ní nemělo docházet. Letoun bude zatížen maximální vzletovou hmotností a jeho těžiště bude v nejpřednější pozici, kde se dle hmotnostního rozboru (v Příloze A této práce) může nacházet, tedy v 21,27 %  $c_{SAT}$ .

Zatížení bude počítáno pro případ vodorovného přistání a přistání s velkým úhlem náběhu, jak uvádí předpis.

##### 4.2 Výpočet přeepsaného provozního zatížení

Předpis CS-LSA [6] se odkazuje na podmínky obsažené v ASTM F2245 – 18 [7], dle kterých bude proveden následující výpočet. Ze zjevných důvodů z něj byly vybrány jen výpočty aplikovatelné na podvozek s lyžemi. Jako vstupní parametry výpočtu poslouží hodnoty poskytnuté výrobcem letounu. Značení veličin odpovídá použité normě nebo běžným konvencím.

###### 4.2.1 Výpočet tíhové síly

Tíhová síla je dána:

$$W = m_{TOW} \cdot g$$

kde:  $m_{TOW}$  ... je maximální vzletová hmotnost. Pro kategorii LSA a daný letoun je 600 kg,

$g$  ... je tíhové zrychlení, je rovno 9,81 N/m<sup>2</sup>.

Pak:

$$W = 600 \cdot 9,81 = 5886 \text{ N}$$

###### 4.2.2 Základní případ zatížení

Výpočet začíná určením pádové výšky  $h$ :

$$h = 0,0132 \sqrt{\frac{W}{S}}$$

kde:  $W$  ... je tíhová síla [N],

$S$  ... je plocha křídel, (poskytnuta výrobcem) rovna 13,064 m<sup>2</sup>.

$$h = 0,0132 \sqrt{\frac{5886}{13,064}} = 0,280 \text{ m}$$

Výsledná hodnota musí být vyšší než 0,23 metru, čehož spočtená hodnota dosahuje.

Následuje výpočet provozního násobku zatížení na kolech podvozku:

$$n_j = \frac{h + \frac{d}{3}}{e_f \cdot d}$$

kde:  $d$  ...celková dráha tlumení. Pro daný letoun 300 mm.

$e_f$  ...účinnost tlumiče. Bude použita normou stanovená hodnota pro pružinové tlumiče 0,5.

Poté je výsledek roven:

$$n_j = \frac{0,280 + \frac{0,3}{3}}{0,5 \cdot 0,3} = 2,53$$

A provozní násobek zatížení:

$$n = n_j + \frac{2}{3}$$

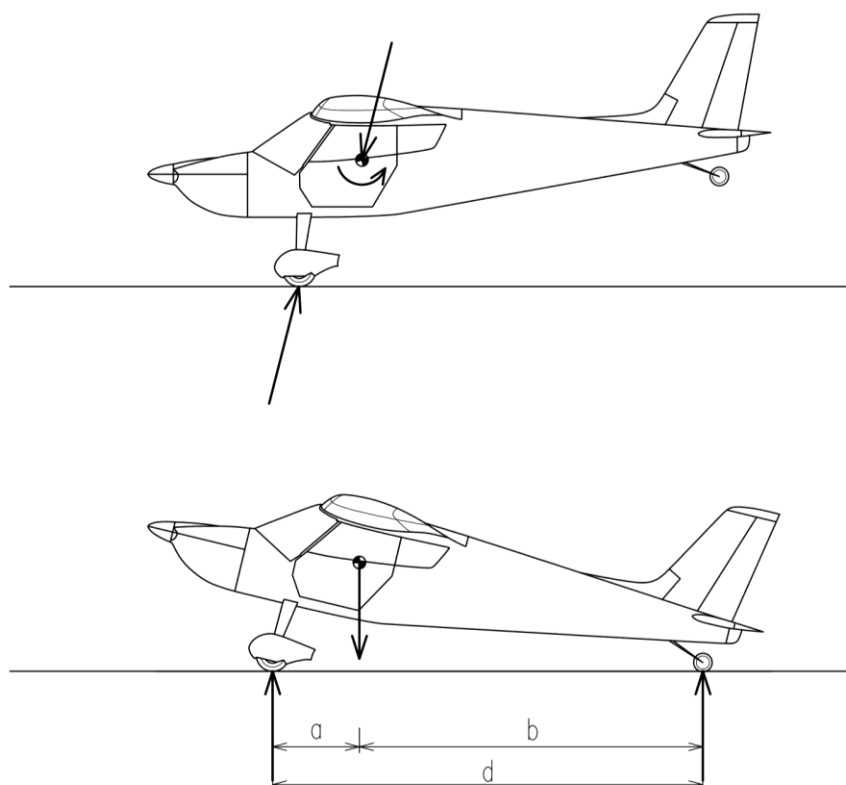
$$n = 2,53 + \frac{2}{3} = 3,2$$

Podmínky základního případu zatížení definuje předpis následovně:

Tab. 2 Základní podmínky zatížení

		Vodorovné přistání	Přistání s velkým úhlem náběhu
Svislá složka síly v těžišti letounu	[N]	$n \cdot W$	$n \cdot W$
Vodorovná složka síly v těžišti letounu	[N]	$K \cdot n \cdot W$	0
Příčná složka v těžišti letounu	[N]	0	0
Stlačení tlumičů podvozku	[%]	100	100
Stlačení pneumatiky	[-]	Statické	Statické
Svislá složka síly na kola hlavního podvozku	[N]	$(n-L) \cdot W$	$(n-L) \cdot W \cdot b/d$
Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku	[N]	$K \cdot n \cdot W$	0

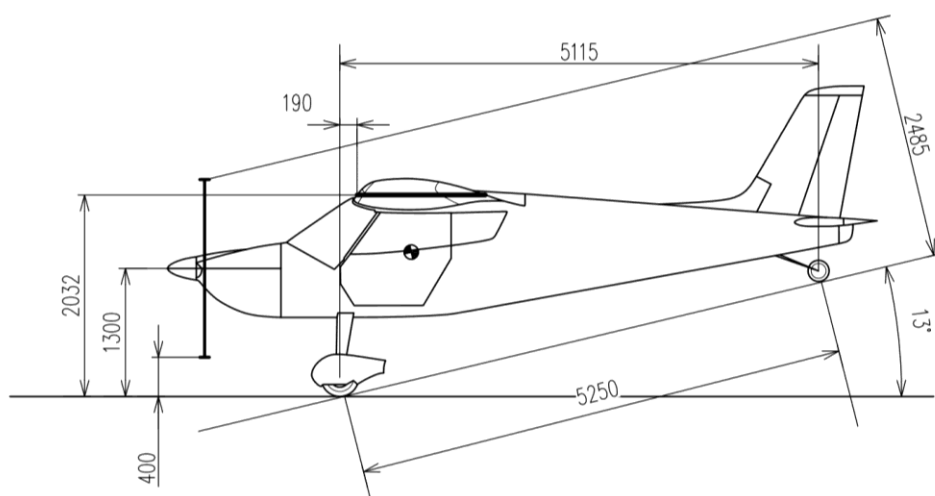
Umístění sil pro oba případy zatížení je ilustrováno v následujícím obrázku:



Obr. 18 – Schématické znázornění obou případů přistání

Hodnoty a významy veličin zmiňovaných v tab. 2 jsou:

- K ...součinitel daný předpisem. Jeho hodnota je 0,25.
- L ...poměr předpokládaného vztlaku k tíhové síle, dle ASTM roven  $\frac{2}{3}$ .
- b ...vzdálenost těžiště od zadního kola v případě přistání na 3 body, je rovna 4469 mm. Byla určena přepočtem z nejextrémnější pozice těžiště v Příloze A pomocí základních proporcí letounu (popsaných v obr.19).
- d ...rozvor podvozku 5250 mm. Jeho změny vlivem stlačení podvozku jsou tak malé, že mohou být zanedbány.



Obr. 19 – Základní geometrie letounu



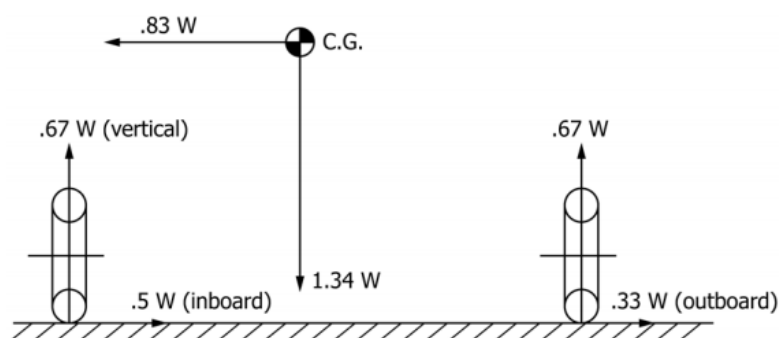
Dosažením hodnot do tabulky 2 lze získat hodnoty provozních zatížení:

Tab. 3 Výsledné provozní síly

		Vodorovné přistání	Přistání s velkým úhlem náběhu
Svislá složka síly v těžišti letounu	[N]	18835	18835
Vodorovná složka síly v těžišti letounu	[N]	4709	0
Příčná složka v těžišti letounu	[N]	0	0
Svislá složka síly na kola hlavního podvozku	[N]	14911	12693
Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku	[N]	4709	0

#### 4.2.3 Boční zatížení podvozku

Po základním případě zatížení předepisuje příslušná ASTM [7] ještě zatěžovací případ s bočním zatížením hlavního podvozku. Velikosti sil jsou v předpisu definovány pomocí následujícího obrázku.



Obr. 20 – Boční zatížení [7]

Vypočtené velikosti sil jsou v následující tabulce:

Tab. 4 Výsledné provozní síly při bočním zatížení

1.34 W	[N]	7887,2
.84 W	[N]	4885,4
.67 W	[N]	3943,6
.33 W	[N]	1942,4
.5 W	[N]	2943

#### 4.3 Určení početního zatížení pro běžné součásti

Početní zatížení pro součásti z běžných materiálů (v tomto případě převážně z duralové slitiny) je určeno zvětšením zatížení provozního o součinitel bezpečnosti 1,5.

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 5 a 6.

Tab. 5 Výsledné početní síly dle LSA

		Vodorovné přistání	Přistání s velkým úhlem náběhu
Svislá složka síly v těžišti letounu	[N]	28253	28253
Vodorovná složka síly v těžišti letounu	[N]	7064	0
Příčná složka v těžišti letounu	[N]	0	0
Svislá složka síly na kola hlavního podvozku	[N]	22367	19040
Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku	[N]	7064	0

Tab. 6 Výsledné početní síly při bočním zatížení dle LSA

1.34 W	[N]	11831
.84 W	[N]	7328
.67 W	[N]	5915
.33 W	[N]	2914
.5 W	[N]	4414

#### 4.4 Výpočet početního zatížení pro součásti z kompozitních materiálů

V případě konstrukcí z kompozitních materiálů je třeba počítat s rozdílným součinitelem bezpečnosti než u součástí z běžných materiálů. Předpis UL-2 [5] doslova uvádí, že:

*Součinitel bezpečnosti  $f$  pro kompozitové konstrukce je v rozmezí 1,5 až 2,25, to znamená zvyšující součinitel 1 až 1,5.*

*Použití zvyšujícího součinitele závisí na:*

- součásti či dílu, na který bude vztahován,*
- přesnosti výpočtů a jejich spolehlivosti,*
- předložených zkouškách vzorků kompozitového materiálu a jejich výsledcích, a*
- ověření výroby, kontrolních postupech a zkušenostech výrobce.*

*O použití příslušného zvyšujícího součinitele bezpečnosti rozhodne Technická komise ve spolupráci s hlavním technikem a odborným oponentem projektu. U amatérských staveb rozhodne o použití součinitele hlavní technik s technikem stavebního dozoru.*

Z tohoto vyjádření je obtížné bez předchozích zkušeností vyvodit přesnou hodnotu součinitele. Proto na základě publikace Kompozitní konstrukce v letectví [8] volím navyšující součinitel 1,25, což je hodnota běžně používaná pro konstrukce ultralehkých letadel, u nichž se počítá s pevnostními zkouškami se zohledněním vlivu teploty. Hodnota součinitele bezpečnosti je potom 1,875. Přepočtem s použitím tohoto součinitele vznikly následující hodnoty:

Tab. 7 Výsledné početní síly pro kompozitní součásti

		Vodorovné přistání	Přistání s velkým úhlem náběhu
Svislá složka síly v těžišti letounu	[N]	35316	35316
Vodorovná složka síly v těžišti letounu	[N]	8829	0
Příčná složka v těžišti letounu	[N]	0	0
Svislá složka síly na kola hlavního podvozku	[N]	27958	23799
Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku	[N]	8829	0

Tab. 8 Výsledné početní síly pro kompozitní součásti při bočním zatížení

1.34 W	[N]	14789
.84 W	[N]	9160
.67 W	[N]	7394
.33 W	[N]	3642
.5 W	[N]	5518

#### 4.5 Volba horšího případu přistání

Z předchozích výpočtů je zřejmé, že v případě vodorovného přistání je zatížení podvozku větší než u přistání s velkým úhlem náběhu a dále bude proto počítáno jen s ním.

### 5. Přepočet velikosti zatížení s ohledem na deformaci podvozkové nohy

Během zatěžování dochází k deformaci podvozkové nohy, se kterou se mění způsob zatěžování spodní části podvozku. Pro přibližnou představu, k jak velké deformaci dochází, bude třeba vytvořit matematický model závislosti úhlu deformace podvozkové nohy na velikosti zatěžující síly. Od něj se potom bude odvíjet úprava velikostí a směru zatížení pro další výpočty.

#### 5.1 Určení deformace podvozkové nohy

Model deformace nohy bude tvořen na základě údajů z pádových zkoušek podvozku. Rozdílné chování kompozitních materiálů při rychlém a kvazistatickém zatěžování není v tomto případě tak výrazné, aby významně ovlivnilo výsledek výpočtu. Pro přesnější výsledky by bylo vhodné vytvořit model chování na základě výsledků statických zkoušek, ty však nejsou v tomto případě k dispozici, jelikož zkouška ještě neproběhla.

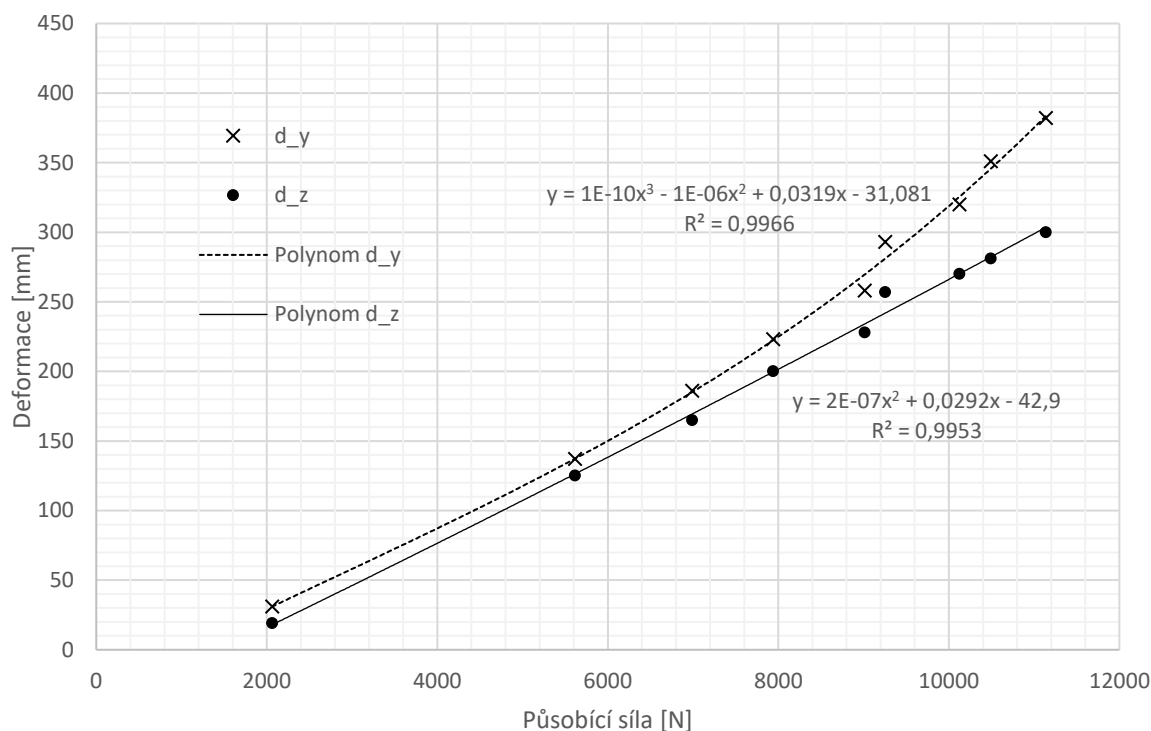
Z deformací ve směru svislém i bočním byly pomocí videozáznamu stanoveny následující hodnoty reakční síly:

Tab. 9 Vypočtené hodnoty silové reakce podvozku z pádové zkoušky

Číslo shozu	$d_y$ [mm]	$d_z$ [mm]	$R_y$ [N]
0	31	19	2061.4
1	137	125	5615.6
2	186	165	6987.3
3	223	200	7939.9
4	258	228	9011.2
5	293	257	9251.7
6	320	270	10124.6
7	351	281	10492.6
8	382	300	11135.6

Kde:  $d_y$  ... je deformace v bočním směru,  
 $d_z$  ... je deformace ve vertikálním směru,  
 $R_y$  ... je silová reakce na kole podvozku,

Z hodnot v tabulce 9 lze neobtěžnou aproximací získat polynomy reprezentující závislosti deformací v obou směrech na reakci na kole podvozku, která působí stejným způsobem jako zatěžující síla. Srovnání polynomu s reálnými hodnotami ze zkoušky je ilustrováno následujícím grafem:



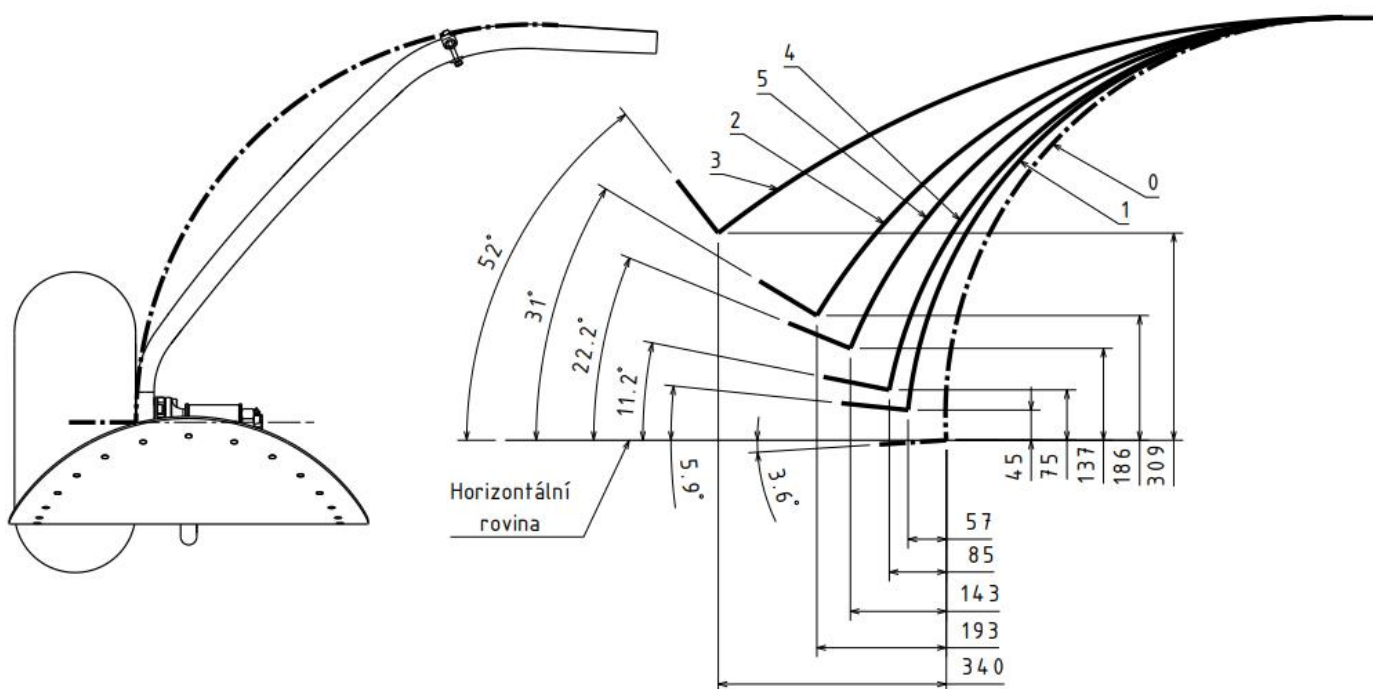
Obr. 21 – Závislost deformace nohy na zatížení vertikální silou

Hodnotu deformace je třeba určit pro různé případy zatížení a zvláště pro kompozitní a běžné součásti. Jedná se o zatížení jedné podvozkové nohy, tudíž bylo třeba hodnoty pro základní případ určené v předchozí kapitole dělit dvěma. Hodnoty posunutí konce podvozkové nohy určené z polynomů v obr. 21 jsou uspořádány v následující tabulce:

Tab. 10 Hodnoty deformací pro různé případy zatížení:

č.	Vertikální složka zatížení	Běžné součásti				Kompozitní součásti			
		R <sub>z</sub> [N]	d <sub>y</sub> [mm]	d <sub>z</sub> [mm]	φ [°]	R <sub>z</sub> [N]	d <sub>y</sub> [mm]	d <sub>z</sub> [mm]	φ [°]
0	Bez zatížení	0	0	0	-3,6	0	0	0	-3,6
1	Statické	2943	57	45	5,9	2943	57	45	5,9
2	Provozní při zákl. případě dle LSA	7456	193	186	31	7456	193	186	31
3	Početní při zákl. případě dle LSA	11184	340	309	52	13979	493	404	66,5
4	Provozní při bočním zatížení	3944	85	75	11,2	3944	85	75	11,2
5	Početní při bočním zatížení	5915	143	137	22,2	7394	191	184	30,6

Úhel φ v tabulce značí náklon osy lyže. Byl určen graficky – metodou znázorněnou na obr. 22. Noha lyže byla pro zjednodušení nahrazena obloukem a osa na něj kolmou přímkou (obr. 22, vlevo nahoře). Vykreslením obou složek deformací vznikly body znázorňující polohu konce osy při daném zatížení. K nim vedený oblouk, tečný k pevně uchycenému hornímu konci nohy, přibližně vykreslil deformaci nohy a na jeho spodní konec vedená kolmice pak směřování osy podvozku, z něhož byl odečten úhel náklonu osy vůči vodorovné rovině. Odkazy s čísly označují jednotlivé případy zatížení. Na obr. 22 je znázorněno jen určení úhlů pro běžné součásti, určení pro součást z kompozitů proběhlo stejným způsobem.

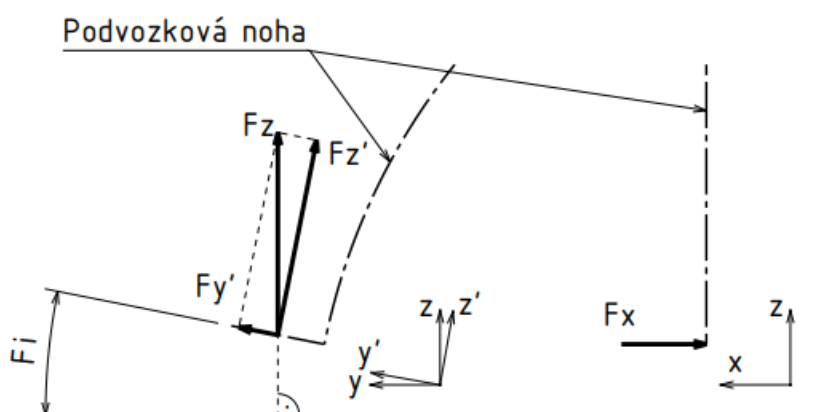


Obr. 22 – Grafické určení úhlu natočení osy lyže při změnách zatížení

Jak je vidět z obr. 22 (nejvíce z případu zatížení č.3), nemodeluje tato metoda deformaci podvozkové nohy přesně. Z nedostatku lepších dat nicméně musí být brána jako dostatečná pro předběžný výpočet. Až budou k dispozici data a záznamy ze statické zkoušky, bude třeba provést výpočet znovu a přesněji.

### 5.1.1 Síly při základním případě zatížení

Po určení předpokládaného úhlu deformace je třeba převést zatížení určená z předpisu do nového souřadného systému, který bude natočen o úhel natočení konce nohy.



Obr. 23 – Přepočet sil

Směr os  $x$ ,  $y$  a  $z$  je shodný s osami běžného souřadného systému letounu. Osy  $x'$  ( $= x$ ),  $y'$  a  $z'$  popisují natočený souřadný systém, v němž budou probíhat pevnostní výpočty.

Při základním způsobu zatížení a vodorovném přistání působí na podvozek podle předpisu síly:

$F_X$ ... Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku, rozdělená rovnoměrně mezi dvě podvozkové nohy

$F_Z$ ... Svislá složka síly na kola hlavního podvozku, rozdělená rovnoměrně mezi dvě podvozkové nohy

Změna směru působení  $F_X$  byla zanedbána už v předchozích krocích, pozměněnou  $F_Z'$  a nově vzniklou  $F_Y'$  lze určit podle vztahů:

$$F_Y' = F_Z \cdot \sin\Phi$$

$$F_Z' = F_Z \cdot \cos\Phi$$

Tab. 11 Velikosti sil pro základní případ zatížení:

	$F_X$ [N]	$F_Z$ [N]	$\phi$ [°]	$F_Y'$ [N]	$F_Z'$ [N]
Provozní zatížení	2355	7456	31	3840	6391
Početní zatížení pro běžné součásti	3532	11184	52	8813	6885
Početní zatížení pro kompozitní součásti	4415	13979	66,5	12820	5574

### 5.1.2 Síly pro případ bočního zatížení

Síly působící při bočním zatížení byly přepočteny obdobně jako v případě zatížení základního, jen k nim byla započítána i boční složka zatížení:

$$F_Y' = F_Z \cdot \sin\Phi + F_Y \cdot \cos\Phi$$

$$F_Z' = F_Z \cdot \cos\Phi + F_Y \cdot \sin\Phi$$

Tab. 12 Velikosti sil pro boční zatížení směrem ‚ven‘ a ‚dovnitř‘:

		$F_Y$ [N]	$F_Z$ [N]	$\phi$ [°]	$F_Y'$ [N]	$F_Z'$ [N]
Případ zatížení ‚ven‘	Provozní zatížení	1942,4	3943,6	11,2	2671	4246
	Početní zatížení pro běžné součásti	2914	5915	22,2	4933	6578
	Početní zatížení pro kompozitní součásti	3642	7394	30,6	6899	8218
Případ zatížení ‚dovnitř‘	Provozní zatížení	2943	3943,6	11,2	-2121	4440
	Početní zatížení pro běžné součásti	4414	5915	22,2	-1852	7144
	Početní zatížení pro kompozitní součásti	5518	7394	30,6	-986	9173

## 6. Pevnostní kontrola a optimalizace podvozku

Kontrola pevnosti konstrukce bude provedena pro případy zatížení určené v předchozí kapitole a budou při ní kontrolována napětí ve zvolených kritických bodech konstrukce. Kontrola pevnosti součástí bude provedena metodou konečných prvků za pomoci softwaru MSC Patran a MSC Nastran nebo tradiční početní metodou dle toho, která metoda bude v daném místě vhodná.

Kontrola pevnosti podvozkové nohy provedena nebude, jelikož byla již posouzena při návrhu klasického podvozku a podvozek s lyžemi na ní nevyvíjí větší ohybová zatížení než podvozek původní. Zatížení krutem při poježdění ve sněhu jsou těžko předvídatelná a jejich kontrola proto proběhne experimentálně.

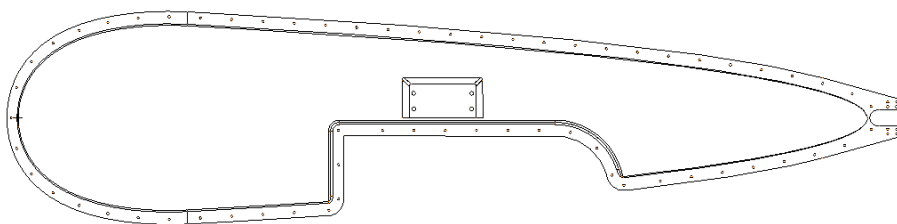
### 6.1 Určení kritických bodů konstrukce

Jako nejpravděpodobnější příčina pevnostního selhání celého podvozku se jeví poškození kompozitního těla. Za tuto příčinu se dále řadí následky působení napětí v ohybu a smyku na ose lyže, poškození bočnic podstavy a porušení svaru u vymežovacího kroužku.

### 6.2 Kontrola zatížení v těle lyže, optimalizace skladby kompozitu

Pro kontrolu pevnosti a deformace kompozitního těla je nejvhodnější možností řešení pomocí metody konečných prvků (MKP). Postup pevnostní kontroly pomocí MKP je v dnešní době již vcelku unifikovanou záležitostí. Začíná úpravou modelu součásti nebo sestavy v prostředí CAD. Ten by měl být upraven tak, aby si zachoval charakteristiky podstatné z pevnostního hlediska a zároveň neobsahoval prvky z tohoto hlediska zbytečné. Dále následuje tvorba sítě prvků o konečné velikosti (tzv. meshing, tvorba sítě), která bude tvarově reprezentovat daný model. Prvkům jsou pak přiřazeny charakteristiky materiálu. Aplikací zatížení a okrajových podmínek na síť tvořenou jednotlivými prvky lze určit deformaci prvků a přeneseně i celého modelu. Z deformací prvků lze pak určit napětí v nich, na základě kterého lze vyhodnotit pevnostní kontrolu. Optimalizace tvaru součásti je jen iteračním procesem (ať automatizovaným, nebo ne) pevnostních kontrol a změn geometrie nebo vlastností materiálu na základě jejich výsledků.

#### 6.2.1 Model těla



Obr. 24 – Zjednodušený model těla lyže v prostředí MSC Patran

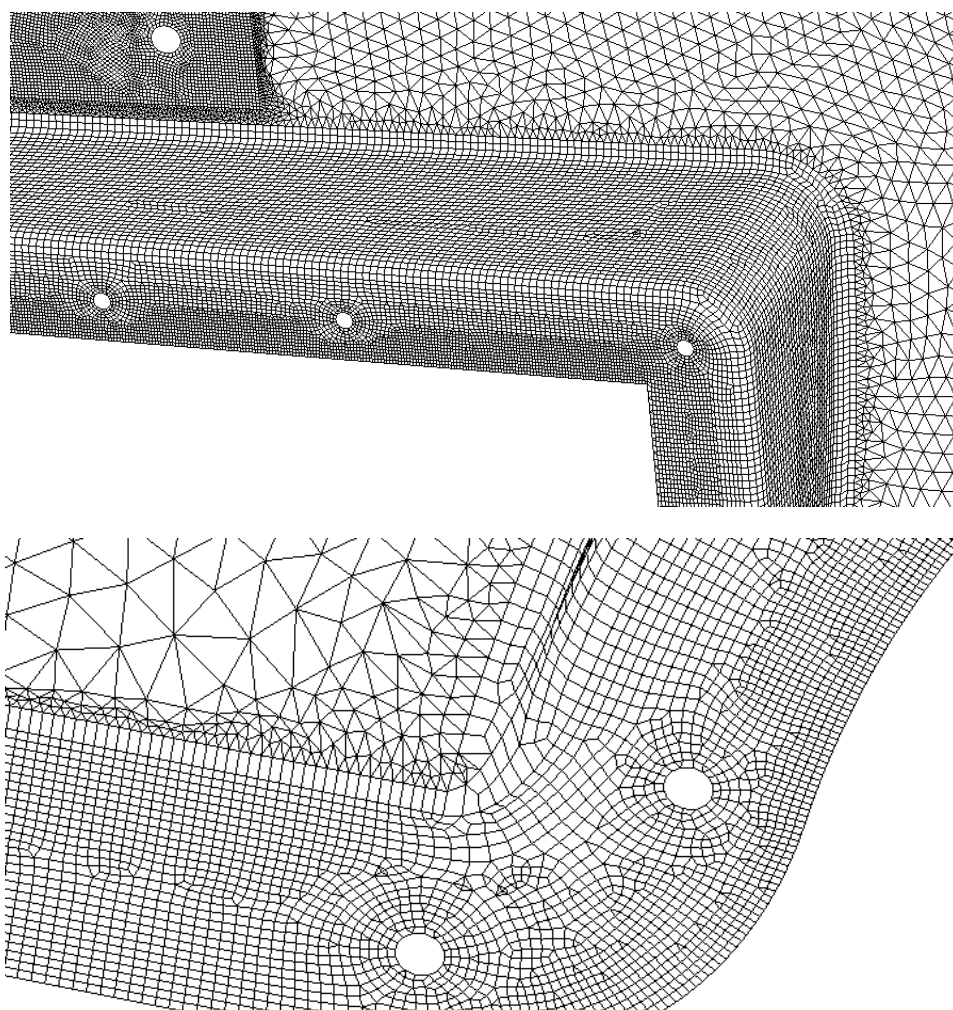
Způsoby návrhu těla lyže byly blíže popsány v předchozích kapitolách. Na základě těchto parametrů vznikl model plochy v prostředí konstrukčního softwaru Catia V5. Model byl zjednodušen o části nepodstatné z hlediska pevnosti, například prolis pro přední oko bezpečnostního lanka. Následoval převod plochy do prostředí MSC Patran (obr.24), kde bude sloužit jako základ pro další modelování.

#### 6.2.2 Síť prvků

Síť prvků vznikla pomocí automatického algoritmu (jehož vstupem byla základní plocha) a manuálních úprav. Cílem byla co nejsolidnější 2D skořepinová síť, které by se snadno přiřazovaly vlastnosti kompozitu. Počáteční pokusy o využití algoritmu IsoMesh a tvorbu pouze čtvercových elementů typu QUAD4 (které by mohly poskytnout přesnější výsledky) selhaly kvůli složitým tvarům modelu. Nástroj buď nebyl schopen síť vytvořit, nebo po jejím vytvoření vzniklo mnoho příliš zdeformovaných elementů.



Dalším postupem proto byla postupná tvorba sítě. Na předpokládaných kritických místech a silně deformovaných plochách byly sítě vytvořeny pomocí algoritmu Hybrid, který kombinuje vlastnosti algoritmů IsoMesh a Paver tak, aby byl úspěšný i na tvarově náročných plochách a okrajích a zároveň utvořil vhodně pravidelnou síť tam, kde je to možné. [9] Výsledkem jsou kombinované sítě tvořené elementy QUAD4 a trojúhelníkovými TRIA3 s globální délkou hrany mezi 0,1 a 1 mm, která byla volena dle složitosti povrchu. Pro úsporu výpočetního času byly tyto jednotlivé sítě (umístěné nejčastěji v okrajích těla) spojeny sítí elementů TRIA3 o větší globální hraně (8 mm) opisujících hladkou vrchní plochu těla (viz obr. 25).



Obr. 25 – Příklady přechodů mezi sítěmi – přední hrana otvoru pro pneumatiku (a lože podstavy v levé části) a detail zadní hrany otvoru

Před samotnou analýzou je nutné zkontrolovat několik parametrů sítě prvků. Ověřuje se souvislost sítě, duplicita uzlů sítě a tvar elementů. Kontroly se provádějí automatizovanými nástroji a první dvě proběhly bez větších potíží. Jako nejproblematičtější se ukázala kontrola tvaru prvků. Přílišná odchylka od ideálního tvaru prvku (zde rovinný čtverec nebo rovnostranný trojúhelník) má za následek snížení přesnosti výpočtu. Řešič MSC Patran stanovuje pro zachování relevance výsledků následující limitní parametry:

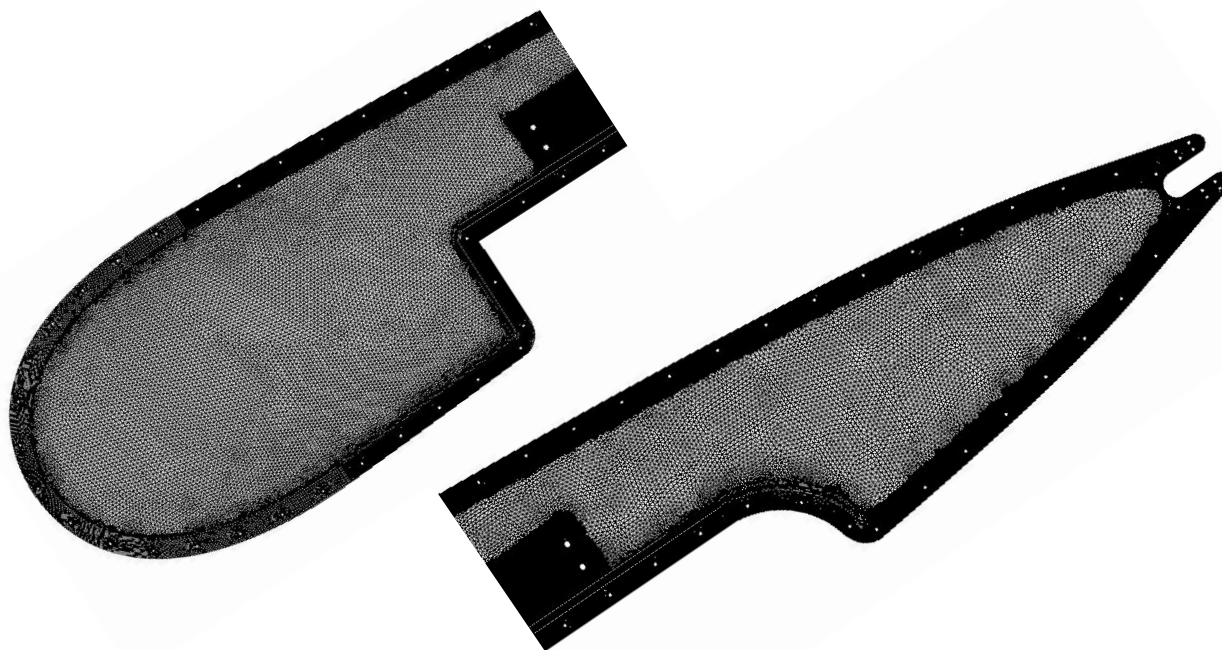


Tab. 13 Limitní parametry elementů sítě

Parametr	Tria	Quad
Poměr stran	5	5
Úhel zkosení	10	30
Kolmé posunutí	0,15	0,15
Tečné posunutí	0,15	0,15
Úhel sklonu	-	0,05
Zúžení	-	0,5

Touto kontrolou neprošly v původní síti stovky až tisíce prvků. Postupným testováním různých parametrů sítě na jednotlivých površích se podařilo vytvořit celkovou síť, ve které kontrolou tvaru neprošly jen desítky prvků. Na takový počet se již dalo individuálně zaměřit a upravit jejich geometrii (popřípadě geometrii okolních prvků) manuálně. Ručním zjemňováním sítě v místech výskytu těchto bodů byla vytvořena finální síť, kterou bylo možné použít k výpočtu.

Výslednou síť tvoří 204012 prvků, ze kterých je 70,2 % typu quad. Kombinací vhodné volby typů sítě a odstraněním nezátížených detailů bylo ve výsledku uspořeno přibližně 60 % elementů ve srovnání s předběžnými modely a podstatně se snížil i nutný výpočetní čas.



Obr. 26 – Celkový pohled na síť prvků, tmavé plochy reprezentují plochy s větší koncentrací prvků

### 6.2.3 Vlastnosti materiálu a prvotní návrh skladby

Dalším krokem výpočtu je přiřazení materiálových vlastností síti prvků. Nevhodnějším materiálem pro tělo lyže se zdá být kompozit tvořený uhlíkovými vlákny a epoxidovou maticí díky jeho schopnosti pohlcovat rázy a jeho nízké měrné hmotnosti a vysoké pevnosti. Po konzultaci s budoucím výrobcem kompozitního

těla volím za základní materiál uhlíko-epoxidový prepreg s označením GG630TTJ IMP503 34 italského výrobce Impregnatex Compositi. Jedná o materiál tkaný způsobem twill 2x2 s následujícími vlastnostmi:

Tab. 14 Vlastnosti použitého uhlíkového prepregu

Maximální napětí v ohybu	700	MPa
Maximální napětí v tahu	750	MPa
Maximální napětí ve smyku	56	MPa
Modul pružnosti	60	GPa
Poissonova konstanta	0,3	-
Modul pružnosti ve smyku mezi vrstvami	5,6	GPa
Tloušťka vrstvy	0,6	mm

Vlastnosti materiálu jsou stejné v obou směrech vláken. Pro zjednodušení výroby budou použity jen vrstvy s natočením o  $0^\circ$  a  $45^\circ$  od střední osy těla lyže. První návrh počítá se skladbou kompozitu  $[45/0/45]_S$  o celkové tloušťce 3 mm. Tato symetrická skladba je volena, protože u ní nedochází k borcení (zprohýbání) vlivem změny teploty nebo zatížením v rovině laminátu. [8] Prvotní počet vrstev je volen odhadem tak, aby součást neohrožovala náhodná zatížení při manipulaci nebo nárazy odletujícího ledu a šterku.

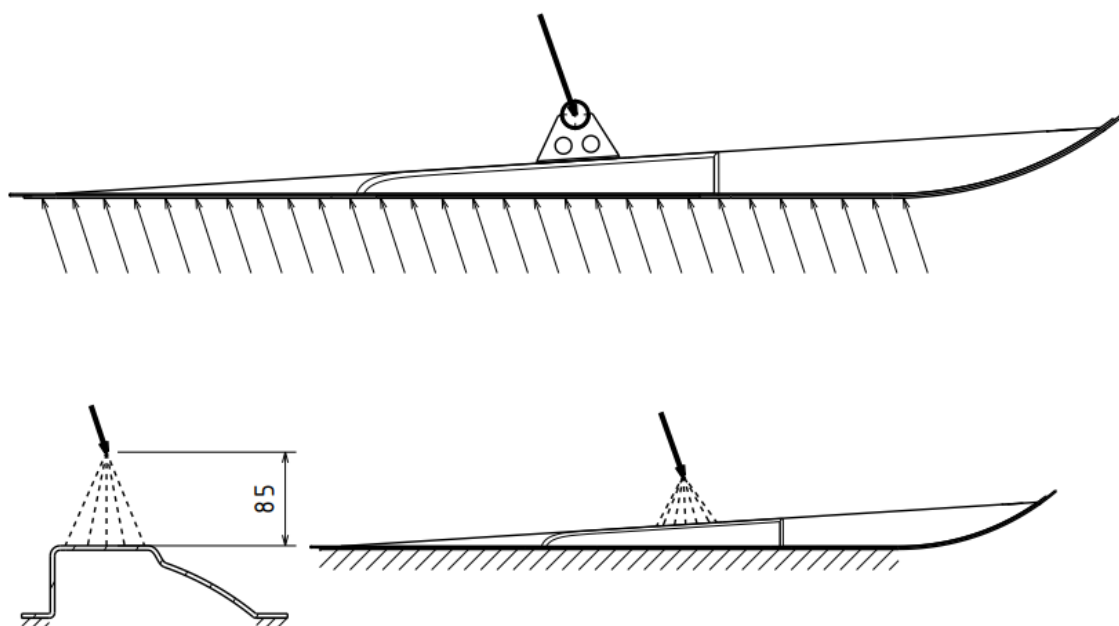
Jelikož výrobce materiálu neposkytuje informaci o maximálním tlakovém zatížení  $\sigma_{pmax}$ , bude pro výpočet použita hodnota poloviny maximálního napětí v tahu  $\sigma_{tmax}$ :

$$\sigma_{pmax} = 0,5 \cdot \sigma_{tmax} = 0,5 \cdot 750 = 375 \text{ MPa}$$

Poměr těchto hodnot je většinou větší, tudíž bude výpočet konzervativnější.

#### 6.2.4 Tvorba okrajových podmínek a náhradních zatížení

Tělo je koncipováno tak, aby přenášelo zatížení způsobené přistávacím rázem na skluznici a koncentrovalo ho do spodní plochy podstavu (jak je schematicky znázorněno v horní části Obr. 27). Přes podstavu se potom nese až na osu lyže. Od toho se bude odvíjet i volba náhradního zatížení a podepření modelu při výpočtu.



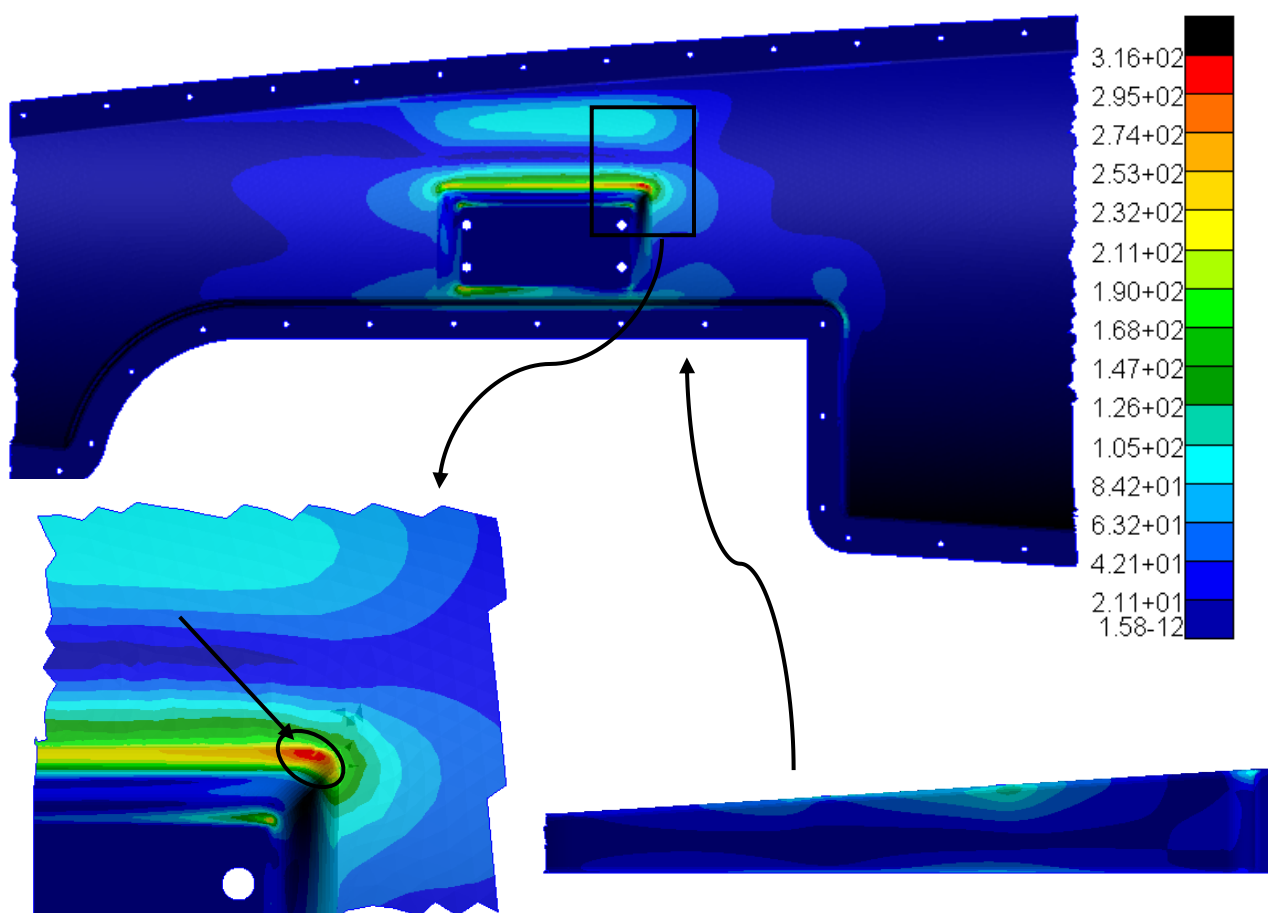
Obr. 27 – Schéma náhrady zatížení těla lyže

Ve výpočetním modelu bude reakce na předepsané zatížení nahrazena silou působící na bod pevně spojený se všemi uzly sítě v ploše lože podstavy. Bod působení síly je vybrán ve výšce osy podstavy (85 mm), aby byly do výpočtu zahrnuty i momenty způsobené ramenem této výšky. Spojení bodu působení s uzly sítě je zprostředkováno pevným spojením typu RBE2 (čárkovanými čarami na Obr. 27), které zabezpečí obdobnou distribuci zatížení jako podstava lyže v reálném případě.

Zatížení směrem od skluznice je nahrazeno vetknutím okrajů těla lyže, které zabrání i deformaci okrajů směrem od středu stejně jako přítomnost nanýtované skluznice. Na obr. 27 dole je znázorněno zatěžování tak, jak bude aplikováno na model při výpočtu (řez je veden v místě lože podstavy).

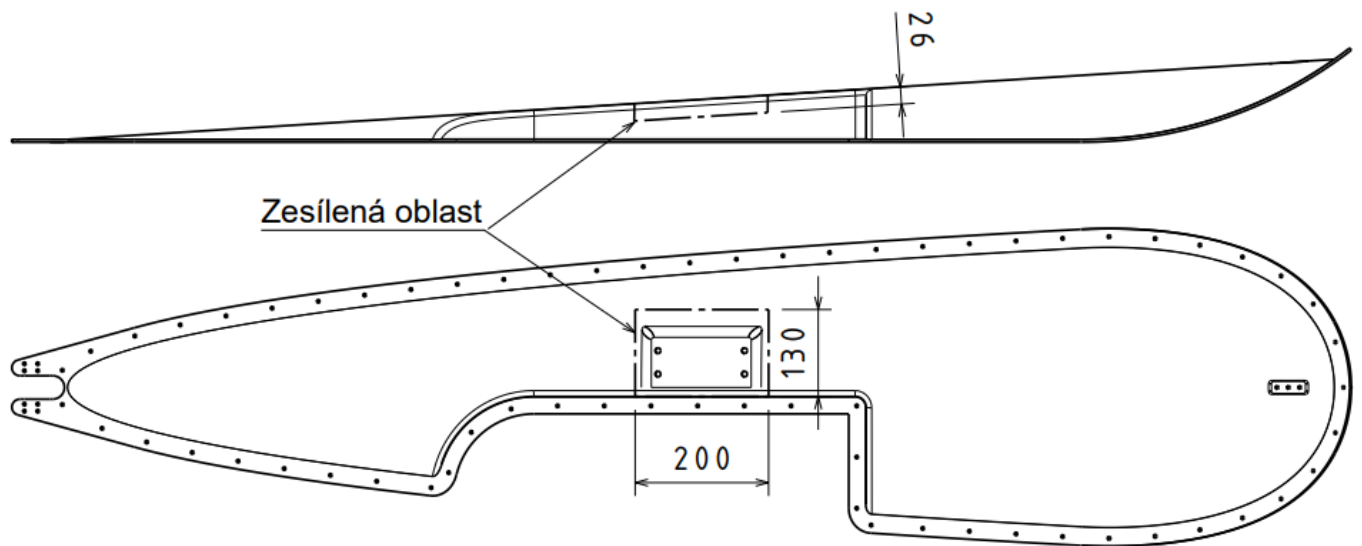
### 6.2.5 Výsledek výpočtu při provozním zatížení a optimalizace skladby

Optimalizace skladby proběhne při provozním zatížení. Ke zběžnému posouzení míst s větší koncentrací napětí bude využito ekvivalentní napětí určené pomocí kritéria von Mises, jehož výpočet proběhl pomocí nelineárního řešiče Nastran 106. Toto kritérium není voleno, protože by správně popisovalo namáhání kompozitního materiálu, ale jelikož nejlépe ilustruje víceosé napětí v prvcích sítě. Kontrola pevnosti v další kapitole bude už provedena na základě jednotlivých složek napětí.



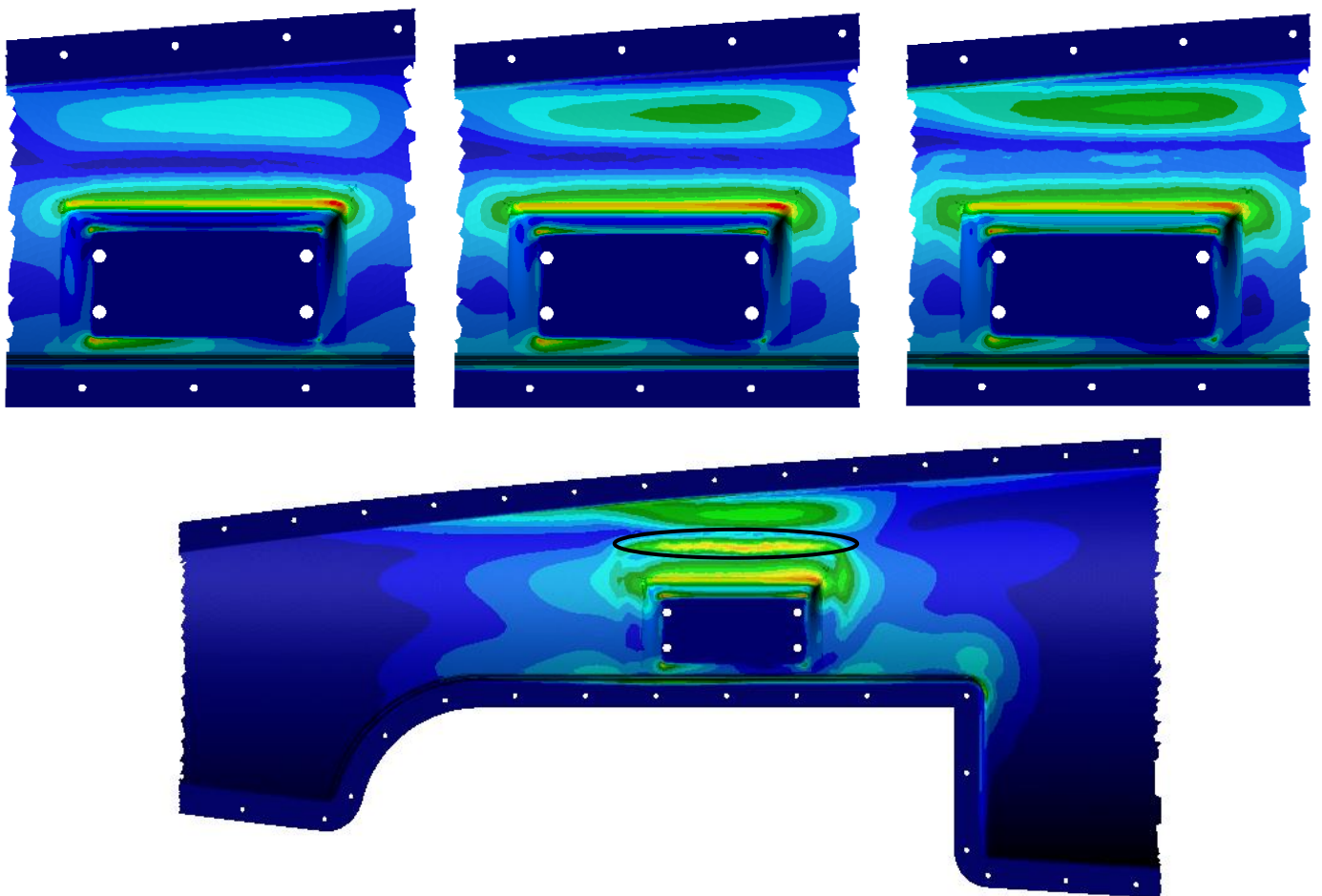
Obr. 28 – Napětí ve střední části lyže. Napětí na koncích lyže je zanedbatelně nízké. Ve spodní části obrázku je detail části s maximálním napětím a boční pohled do otvoru pro pneumatiku.

Z průběhu zatížení je jasné vidět, že části na okrajích lože podstavy jsou zatíženy výrazně více než okolí lože. Na základě těchto výsledků navrhuji zesílení lože podstavy a jejího nejbližšího okolí dalšími vrstvami materiálu (viz obr. 29). Toto řešení by mělo zajistit rovnoměrnější rozložení napětí.



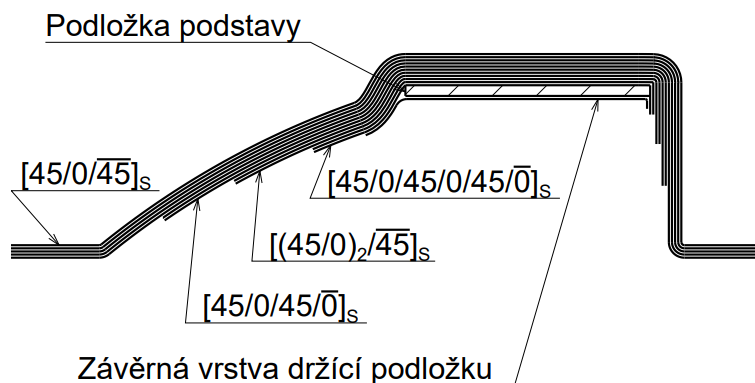
Obr. 29 – Návrh vyztužení střední části těla

Následující obrázek ukazuje původní návrh (vlevo) a poté výsledky po vyztužení vrstvami [45/0], [45/0/45/0] a [45/0/45/0/45/0] v oblasti vyznačené v obr. 29. Z obrázku 30 je vidět, že dochází k postupnému přesunu větších napětí dál od lože podstavy. Největší koncentrace napětí zůstává na stejném místě, ale u čtvrtého případu už je napětí zredukované na méně než třetinu stavu před úpravou.



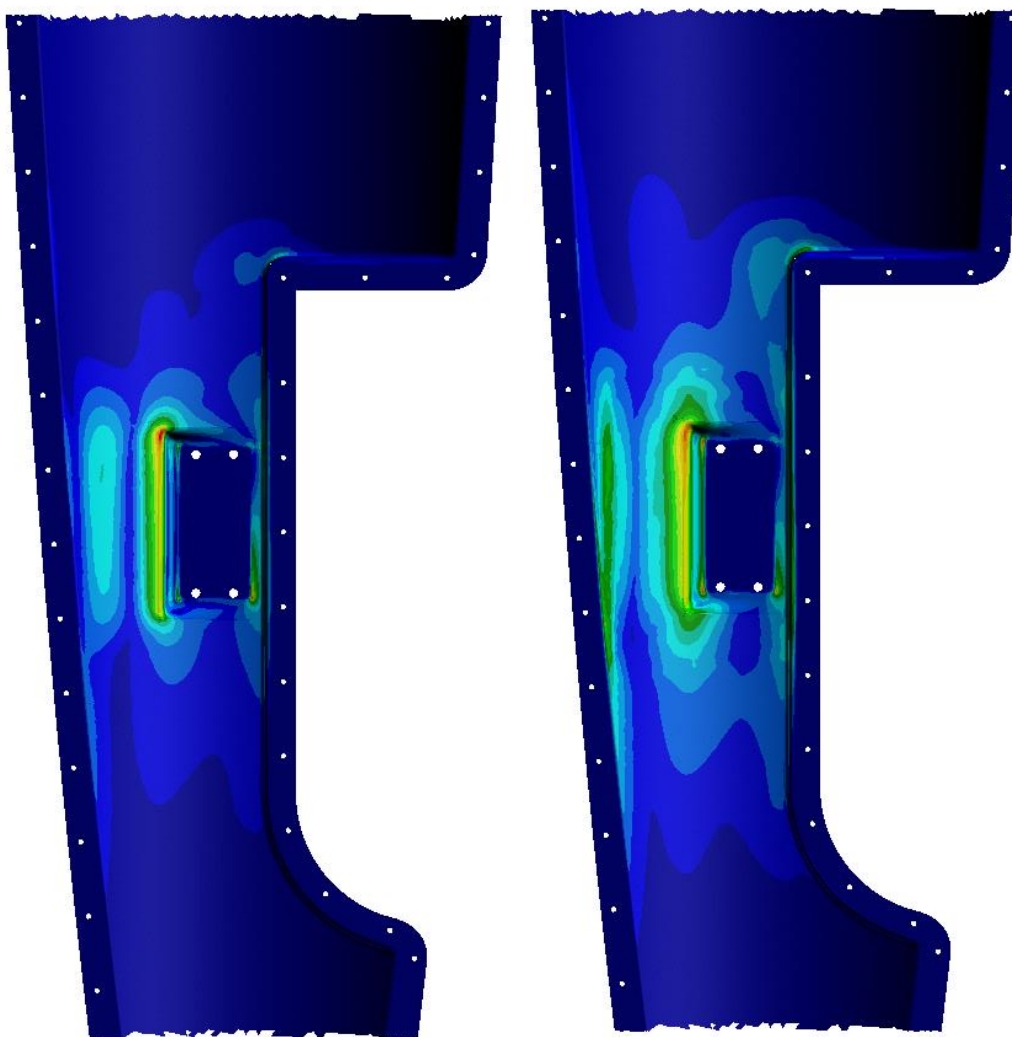
Obr. 30 – Postupné přidávání vrstev materiálu

Přidáním vrstev lze rozložit napětí příznivěji, tloušťka výsledného kompozitu začne však narůstat a začíná se projevovat ostrý přechod tloušťek (označen v obr. 30). Dalším postupem je proto vytvoření plynulejšího přechodu mezi přidaným materiálem a tělem lyže (obr. 31). Ve stejném obrázku je znázorněno i uchycení zalaminované podložky podstavy jednou další vrstvou.



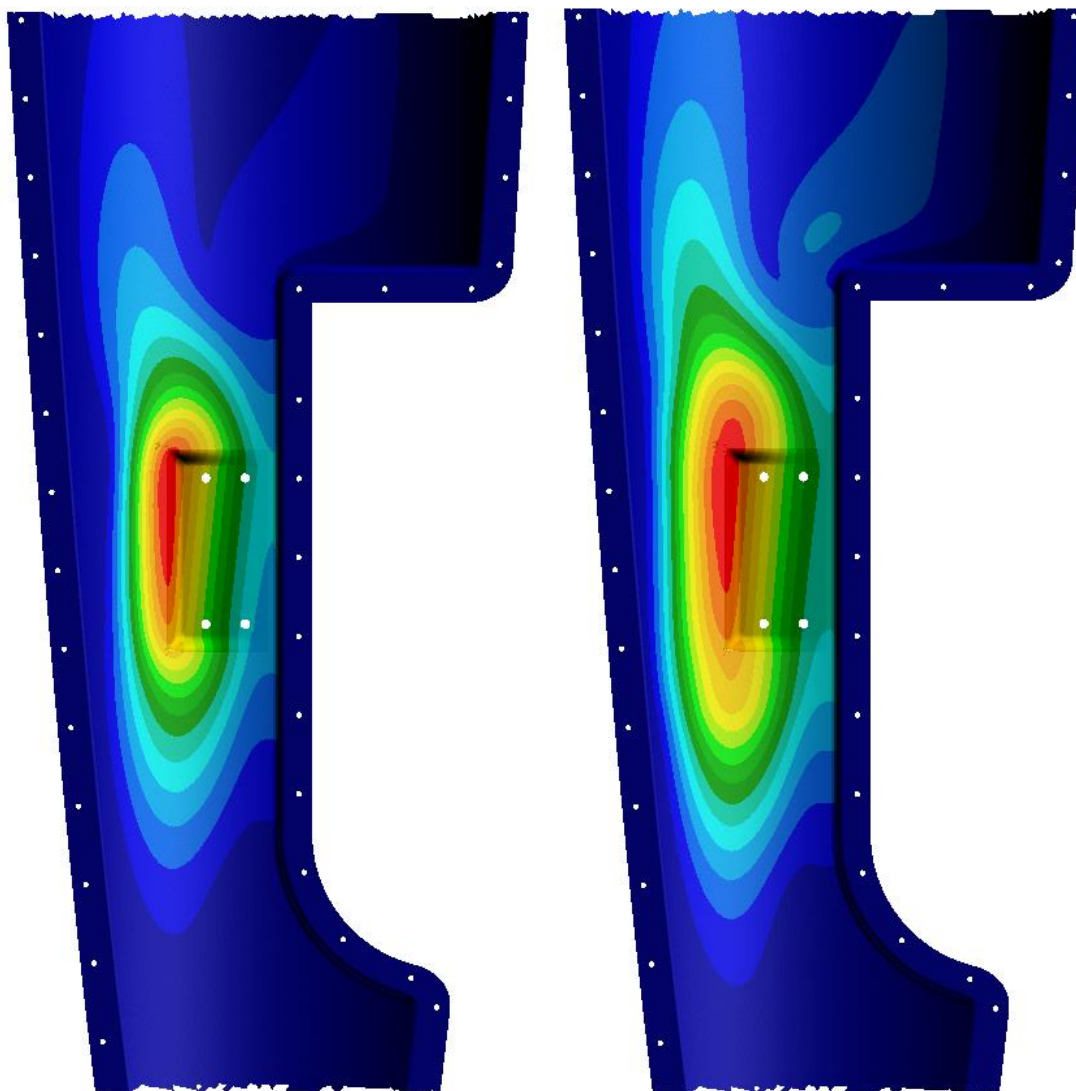
Obr. 31 – Plynulejší přechod

Tato finální úprava eliminovala koncentraci napětí na okraji vyztužené části, jak je vidět na obr. 32 vpravo. Na stejné ilustraci vlevo je pro srovnání znázorněno rozložení napětí v prvotním návrhu. Ještě více než na průběhu napětí se změna skladby projevila na průběhu deformací (obr. 33). Zmírnila se jejich velikost a zvětšila plocha jejich výskytu.



Obr. 32 – Rozložení napětí na prvém a finálním návrhu skladby





Obr. 33 – Rozložení deformací na prvním a finálním návrhu skladby

Výsledkem optimalizace skladby kompozitu je snížení maximálních napětí o procenta uvedená v tabulce 15 a snížení maximální deformace o 70 %. Dále pak i příznivá změna rozložení napětí a deformací po ploše těla, která zmírňuje koncentraci napětí, a tím pomáhá zvýšit bezpečnost celé konstrukce.

Tab. 15 Změny maximálních napětí v jednotlivých složkách

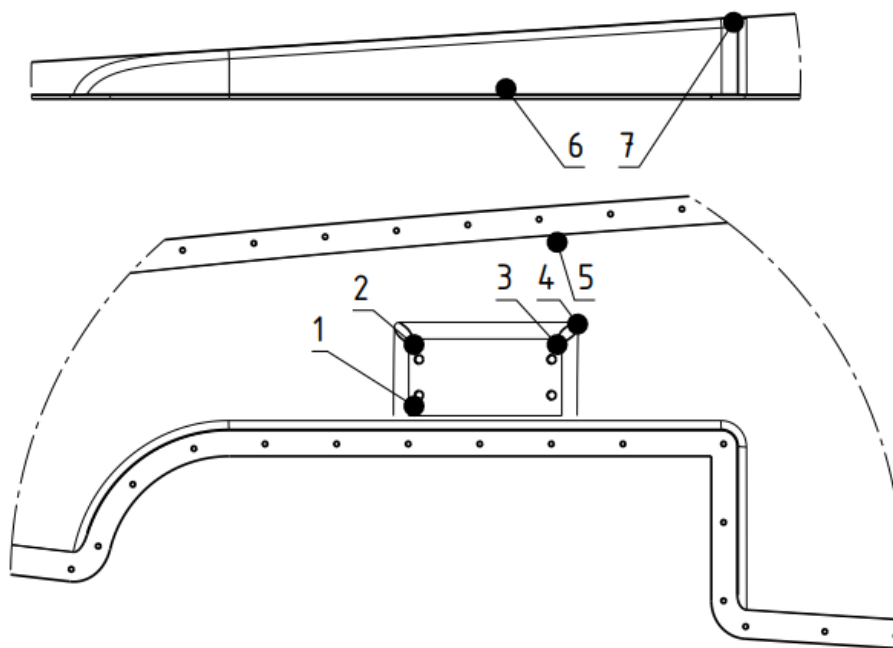
	První návrh	Poslední návrh	Rozdíl
Maximální napětí ve směru X [MPa]	240	65,4	73 %
Maximální napětí ve směru Y [MPa]	306	85,7	72 %
Maximální smykové napětí XY [MPa]	61,5	19,9	68 %

## 6.2.6 Kontrola pevnosti těla lyže

Kontrola pevnosti proběhne nejprve pro případ provozního zatížení pro základní případ zatížení, poté pro zatížení boční. Určení napětí v materiálu proběhne opět v kombinaci programů MSC Patran a Nastran. Na

základě výsledků tohoto výpočtu budou určeny kritické body a v nich bude kontrolováno napětí v jednotlivých vrstvách kompozitu pomocí algoritmu psaného pro program Matlab. Program přepočítává napětí ve vrstvách materiálu v souladu s Klasickou teorií laminátů a jako podklad k jeho vytvoření posloužila publikace Kompozitní konstrukce v letectví [8]. Kód algoritmu je umístěn v příloze B. Kontrola bude provedena pouze vůči mezním stavům pevnosti, jelikož deformace součástí jsou nízké.

Jako nejpravděpodobnější body poruchy byla vybrána místa označená v obr. 34. Jedná se o místa s globálními nebo lokálními extrémními složkami napětí.



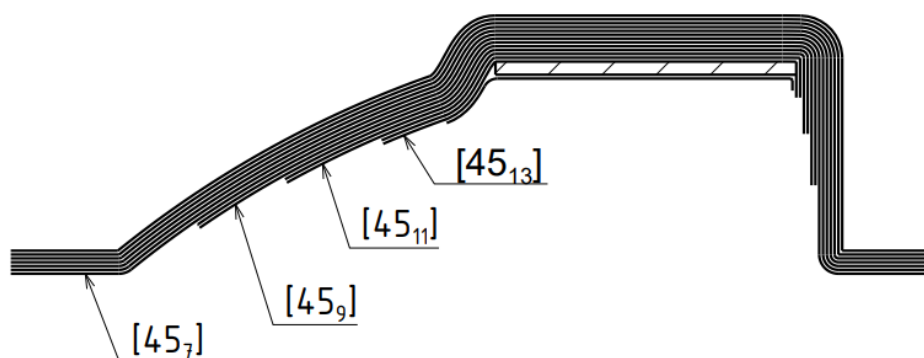
Obr. 34 – Kritické body na těle lyže

Napětí v těchto bodech při provozním zatížení je uspořádáno v tabulce 16. Napětí v bodech bylo pomocí algoritmu pro program Matlab přepočítáno na napětí ve směru jednotlivých vrstev materiálu a z těchto napětí byl srovnáním s maximálními napětími v materiálu uvedenými v části 6.2.3 vypočten součinitel rezervy vůči meznímu stavu porušení první vrstvy (FPF). Nejnížší součinitel rezervy pro každý bod je uveden v posledním sloupci tabulky.

Tab. 16 Napětí v kritických bodech při provozním zatížení

Bod	Složky napětí v kritických bodech [MPa]			Minimální RF
	X	Y	XY	
1	96,9	123	-16	0,34
2	-71,4	-111	-7,44	0,42
3	-70	-121	11,6	0,40
4	-57,4	-87,9	21,6	0,53
5	-25,5	-58,6	-2,63	0,93
6	-35,9	-73,1	4,75	0,71
7	-27	-31,6	-11,9	1,29

Ve většině bodů překročilo napětí maximální mezní hodnotu. Ve všech případech šlo o smykové napětí ve vrstvách. Bude tedy nutno přikročit k dalším úpravám skladby. Po více iteracích s rozdílným natočením a počtem vrstev vyšlo z hlediska napětí nejvýhodněji následující řešení:



Obr. 35 – Změna skladby

Jak je vidět z obr. 35, došlo ke zvýšení počtu vrstev a využití pouze vrstev ve směru 45°. Výsledná napětí a součinitelé rezervy v kritických bodech potom jsou:

Tab. 17 Napětí v kritických bodech při provozním zatížení po změnách ve skladbě

Bod	Složky napětí v kritických bodech [MPa]			Minimální RF
	X	Y	XY	
1	84,6	86,3	-9,25	6,1
2	-51,1	-55,2	-18	3,1
3	-76,8	-86,3	8,7	4,1
4	-42,1	-41,3	22,4	2,5
5	-24,6	-31,3	-6,44	8,7
6	-38,9	-45,1	1,22	7,8
7	-16,9	-12,1	-8,48	6,6

Tab. 18 Napětí v kritických bodech při provozním zatížení při případě bočního zatížení ,dovnitř‘

Bod	Složky napětí v kritických bodech [MPa]			Minimální RF
	X	Y	XY	
1	-16,4	-16,7	-0,27	20,0
2	-27,1	-29,1	-4,12	12,0
4	-11,9	-12	2,83	19,8
7	-8,32	-6,11	-4,03	13,9

Tab. 19 Napětí v kritických bodech při provozním zatížení při případě bočního zatížení ,ven‘

Bod	Složky napětí v kritických bodech [MPa]			Minimální RF
	X	Y	XY	
1	29,1	24,5	-0,26	25,8
2	-65	-70	-6,71	5,0
4	-22,2	-40,7	13,7	4,1
7	-1,06	-14,4	-7,05	7,9

V tomto případě už tělo vyhovělo a je možné přistoupit k výpočtu při početním zatížení:



Tab. 20 Napětí v kritických bodech při početním zatížení po změnách ve skladbě

Bod	Složky napětí v kritických bodech [MPa]			Minimální RF
	X	Y	XY	
1	160	164	-17,3	3,2
2	-145	-158	-11,3	2,2
3	-142	-167	19,4	2,1
4	-87,1	-85	61,5	0,9

V bodě 4 dochází opět k porušení vrstvy. Řešením bude přidání vrstvy a opakování výpočtu. Tentokrát jen pro napětí při početním zatížení, jelikož únosnost se přidáním vrstvy nesníží.

Tab. 21 Napětí v kritických bodech při početním zatížení po změnách ve skladbě

Bod	Složky napětí v kritických bodech [MPa]			Minimální RF
	X	Y	XY	
1	156	160	-16,2	3,5
2	-139	-151	-11	2,3
3	-139	-162	18,9	2,2
4	-84,1	-81,7	53,5	1,05
5	-33,5	-45,3	-16,8	3,3
6	-59,1	-68,5	1,65	5,1
7	-25,4	-186	-13,7	1,9

Tab. 22 Napětí v kritických bodech při početním zatížení při případě bočního zatížení ,dovnitř‘

Bod	Složky napětí v kritických bodech [MPa]			Minimální RF
	X	Y	XY	
1	-25,3	-25,7	-0,75	13,6
2	-44,6	-47,7	-6,63	7,3
4	-14,4	-24,7	7,79	7,2
7	-8,02	-7,57	-6,26	8,9

Tab. 23 Napětí v kritických bodech při početním zatížení při případě bočního zatížení ,ven‘

Bod	Složky napětí v kritických bodech [MPa]			Minimální RF
	X	Y	XY	
1	48,3	41,0	-0,34	15,5
2	-107	-116	-10,9	3,0
4	-51,4	-49,3	25,4	2,2
7	-14,0	-13,3	-10,9	5,1

Součást tedy po několika úpravách vyhověla kontrole a dokáže bezpečně přenést dané provozní i početní zatížení. Minimální součinitel rezervy vůči meznímu stavu porušení první vrstvy při početním zatížení je pouze 1,05. Jelikož ale nebude v provozu k takovým zatížením součásti docházet, je i tato (téměř hraniční) hodnota přijatelná.

### 6.3 Kontrola zatížení v ose

Jako jeden z kritických bodů konstrukce byla vytipována i osa. V následující části bude proto kontrolováno napětí v ní. Kontrola proběhne opět za pomoci MKP a kombinace softwaru MSC Patran a Nastran.

### 6.3.1 Tvorba modelu a sítě

Model geometrie byl opět vytvořen programem Catia V5. Následovalo jeho převedení do prostředí MSC Patran a tvorba sítě na jeho základu. Síť je tentokrát objemová, tvořená prvky Tet10 o maximální hraně 1,7 mm. Tvořena byla plně automaticky nástrojem TetMesh.

### 6.3.2 Materiál osy a jeho vlastnosti

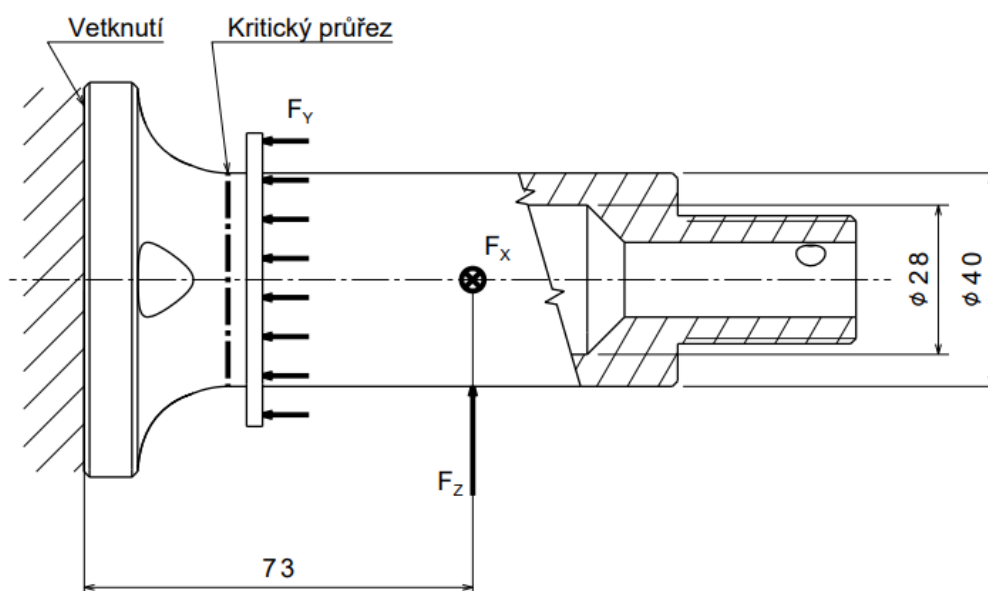
Jako materiál osy byl zvolen dural, specifičtěji slitina 2024 s tepelnou úpravou T4. Jeho vlastnosti významně pro výpočet jsou v tab. 24.

Tab. 24 Vlastnosti 2024T4

Modul pružnosti	E	76000	MPa
Poissonova konstanta	$\mu$	0,3	-
Mez pevnosti	$R_m$	408	MPa
Mez pružnosti	$R_{P0,2}$	262	MPa

### 6.3.3 Zatížení osy

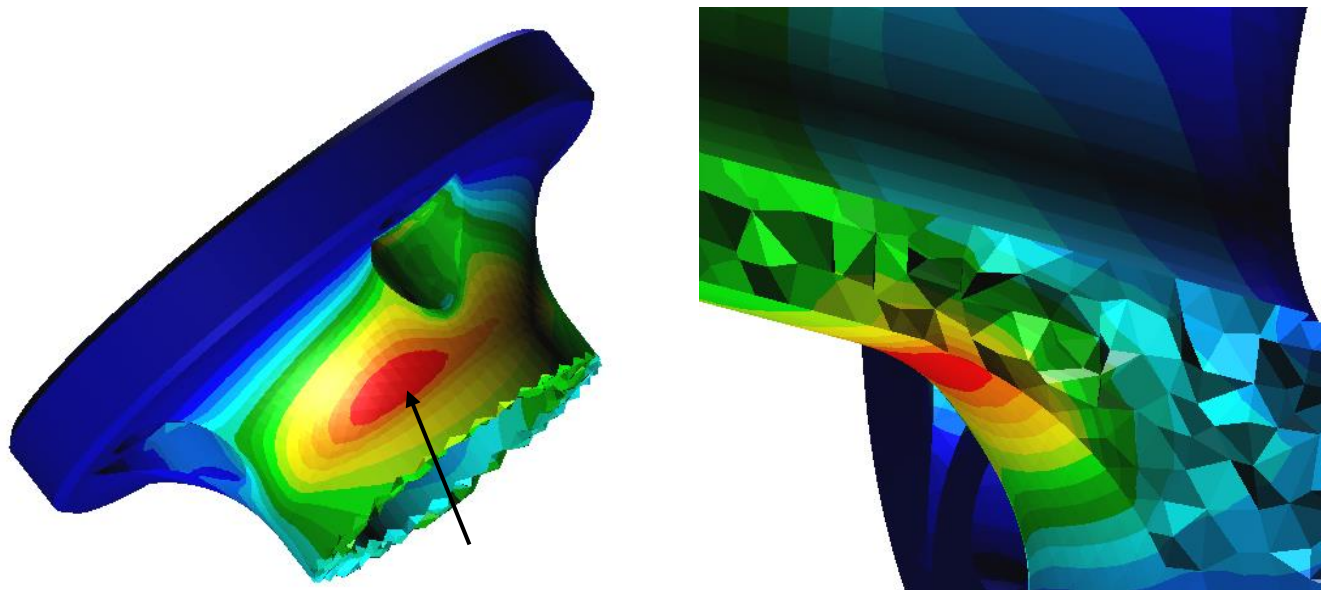
Nejhorším je z pohledu zatížení osy základní případ zatížení. S ním bude při kontrole také počítáno. Při tomto zatížení působí na osu tři síly – síly kolmo na osu osy ( $F_x$ ,  $F_z$ ) a síla přenášená navařeným kroužkem ( $F_y$ ). Znázorněny jsou na obr. 36. Nejpravděpodobnějším místem selhání osy je místo na počátku rozšiřující se části (Obr. 36). Síly  $F_x$  a  $F_z$  budou umístěny do působivé na povrchu osy ve střední vzdálenosti mezi ložisky, aby bylo v kritickém průřezu dosaženo ekvivalentního zatížení jako při přenosu síly přes plochy ložisek. Síla působící na kroužek bude rovnoměrně rozložena na prvky sítě modelu v místě, kde by se na reálné součásti nacházel svar. Připevnění osy na podložku pomocí čtveřice šroubů nahrazuje vetknutí plochy.



Obr. 36 – Schéma geometrie a zatížení osy lyže

### 6.3.4 Kontrola napětí v ose

Model a jeho zatížení popsané výše byly zpracovány statickým lineárním řešičem (Nastran 101), jelikož se nepředpokládá velký vliv deformací na výsledek.



Obr. 37 – Místo největšího zatížení a detail průběhu zatížení v podélném řezu osou

Výsledná napětí jsou zobrazována v podobě ekvivalentu dle kritéria HMH. Výsledné nejvyšší napětí získané tímto způsobem je 116 MPa ( $\sigma_{ek}$ ) a nachází se na očekávaném místě (označeném na obr. 37).

Výsledný součinitel rezervy vůči meznímu stavu plastických deformací je potom roven:

$$RF = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{ek}} = \frac{262}{116} = 2,26$$

Což je hodnota vyhovující; přesto ale překvapivě nízká, proto bude následovat ještě analytická kontrola výsledku.

### 6.3.5 Analytická kontrola výsledku

Pro její účel mohou být síly  $F_X$  a  $F_Z$  nahrazeny jedinou se společným působištěm (vyšetřovaná část osy je rotační součástí):

$$F = \sqrt{F_X^2 + F_Z^2} = \sqrt{3532^2 + 6885^2} = 7739,5 \text{ N}$$

V kritickém bodě osy působí smykové napětí, napětí ohybem a napětí tlakem. Určeny jsou následovně:

#### Určení tečného napětí smykem:

$d$  ...je vnější průměr osy v místě kritického průřezu [mm]

$d_2$  ...je průměr otvoru v ose [mm]

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi(d^2 - d_2^2)}{4}} = \frac{7739,5}{\frac{\pi(40^2 - 28^2)}{4}} = 12,1 \text{ MPa}$$

**Určení normálového napětí ohybem:**

$X_F$  ... je vzdálenost kritického průřezu od působíště náhradní výslednice sil  $F$ , zde 46 mm.

$$\sigma_0 = \frac{M_0 \cdot y}{J_X} = \frac{F \cdot X_F \cdot \frac{d}{2}}{\frac{\pi(d^4 - d_2^4)}{64}} = \frac{7739,5 \cdot 46 \cdot \frac{40}{2}}{\frac{\pi(40^4 - 28^4)}{64}} = 74,6 \text{ MPa}$$

**Zhodnocení vlivu koncentrace napětí:**

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_0$$

$K_T$  ... tvarový součinitel určen dle Shigleyho [10]:

$$\left(\frac{D}{d} = 1,875; \frac{r}{d} = 0,425\right) \Rightarrow K_t \cong 1,3$$

$$\sigma_{\max} = K_t \cdot \sigma_0 = 1,3 \cdot 74,6 = 96,9 \text{ MPa}$$

**Určení tlakového napětí vyvolaného silou  $F_Y$ :**

$$\sigma_P = \frac{F_Y}{S} = \frac{F_Y}{\frac{\pi(d^2 - d_2^2)}{4}} = \frac{8813}{\frac{\pi(40^2 - 28^2)}{4}} = 13,8 \text{ MPa}$$

**Určení celkového napětí:**

Nejprve zjistíme hodnotu normálového napětí na zatíženější straně osy:

$$\sigma_c = \sigma_{\max} + \sigma_P = 96,9 + 13,7 = 110,6 \text{ MPa}$$

K určení výsledného maximálního napětí je použita teorie HMM stejně jako v analýze MKP:

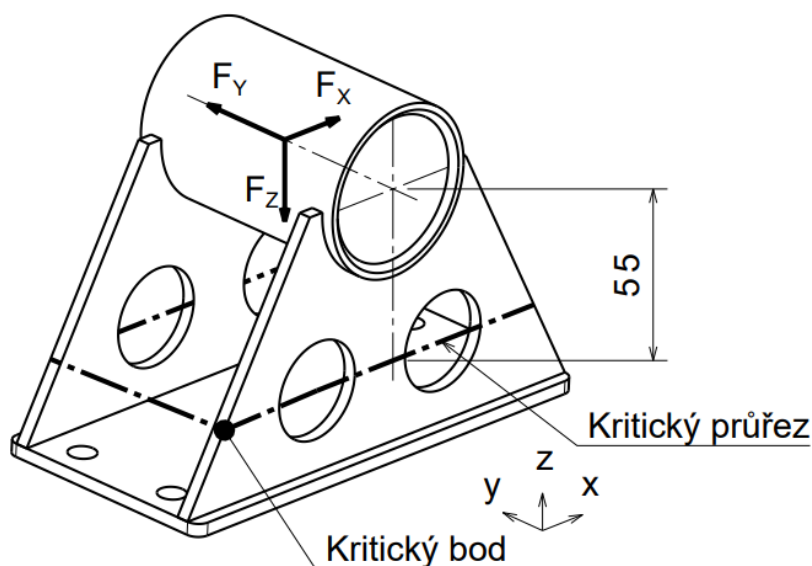
$$\sigma' = \sqrt{\sigma_c^2 + 3\tau^2} = \sqrt{110,6^2 + 3 \cdot 12,1^2} = 111,3 \text{ MPa}$$

$$RF = \frac{R_m}{\sigma'} = \frac{262}{111,3} = 2,35$$

Součást opět vyhověla a jelikož se výsledky obou výpočtů liší jen o necelá 4 %, lze výsledek považovat za platný.

## 6.4 Analytická pevnostní kontrola dalších součástí

### 6.4.1 Porušení bočnice podstavy ohybovým napětím



Obr. 38 – Schéma zatížení podstavy

Vybrán je nejhorší případ zatížení pro danou součást – podstava je zatížena početnými silami základního případu zatížení. Směry působení sil jsou znázorněny v obrázku 38.

$$\begin{aligned} F_x &= 3532 \text{ N} \\ F_y &= 8813 \text{ N} \\ F_z &= 6885 \text{ N} \end{aligned}$$

Kritický průřez součásti prochází středy odlehčovacích otvorů, od působíště síly  $F_x$  je vzdálen o  $h = 55$  mm. Plocha  $A$  průřezu jedné bočnice v tomto místě je rovna  $250 \text{ mm}^2$  a vzdálenost středních os těchto průřezů  $e_p = 63$  mm. Kvadratický moment průřezu vůči ose  $y$  (určený pomocí programu Catia V5) je roven  $J_y = 889600 \text{ mm}^4$ . Kritické body se nacházejí v místech, kde se sčítají maximální hodnoty napětí ohybových momentů (jeden je označen na obr. 38, druhý je umístěn symetricky na nejbvzdálenější hraně průřezu), od osy  $y$  jsou vzdáleny o  $x = 61,25$  mm. Napětí v nich lze určit následovně:

#### Maximální ohybové napětí vzhledem k ose $x$

Zjednodušeným výpočtem pro pásnice lze určit maximální ohybové napětí vzhledem k ose  $x$  vznikající v průřezu:

$$\sigma_{ox} = \frac{M_{ox}}{A \cdot e_p} = \frac{F_y \cdot h}{A \cdot e_p} = \frac{8813 \cdot 55}{250 \cdot 63} = 30,8 \text{ MPa}$$

#### Maximální ohybové napětí vzhledem k ose $y$

$$\sigma_{oy} = \frac{M_o \cdot y}{J_y} = \frac{F_x \cdot h \cdot x}{J_y} = \frac{3532 \cdot 55 \cdot 61,25}{889600} = 13,4 \text{ MPa}$$

#### Tlakové napětí

$$\sigma_T = \frac{F_Z}{A} = \frac{6885}{250 \cdot 2} = 13,8 \text{ MPa}$$

### Smyková napětí

$$\tau_X = \frac{F_X}{A} = \frac{3532}{250 \cdot 2} = 7,1 \text{ MPa}$$

$$\tau_Y = \frac{F_Y}{A} = \frac{8813}{250 \cdot 2} = 17,6 \text{ MPa}$$

Maximální celkové smykové napětí v průřezu lze pak určit jako prostý vektorový součet těchto dvou:

$$\tau = \sqrt{\tau_X^2 + \tau_Y^2} = \sqrt{7,1^2 + 17,6^2} = 19,0 \text{ MPa}$$

### Celková napětí

Hodnoty napětí v kritických průřezích jsou v souladu s teorií HMM rovny:

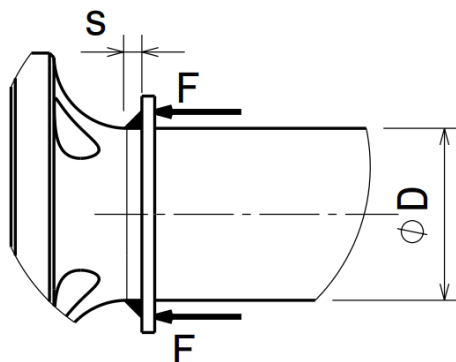
$$\sigma_{\max} = \sqrt{(\sigma_T \pm (\sigma_{ox} + \sigma_{OY}))^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(13,8 \pm (30,8 + 13,4))^2 + 3 \cdot 19^2} = 66,6 \text{ MPa (44,8 MPa)}$$

Z vyššího napětí je součinitel rezervy vůči meznímu stavu plastických deformací:

$$RF = \frac{R_m}{\sigma_{\max}} = \frac{262}{66,6} = 3,9$$

Součást tedy vyhověla.

### 6.4.2 Porušení svaru vymežovacího kroužku



Obr. 39 – Schéma zatížení kroužku.  
Síla je rovnoměrně rozložena po ploše kroužku,  
zde je zakreslena jen orientačně.

Dalším možným bodem selhání je svár vymežovacího kroužku. Kontrolu na „stržení“ přivařeného kroužku z osy lyže lze snadno provést analytickým způsobem:

Určení plochy svaru:

$$S = \pi \cdot d \cdot s = \pi \cdot 40 \cdot 3 = 376,99 \text{ mm}^2,$$

kde  $s$  je šířka svaru,  $d$  průměr osy.

Početní síla  $F_Y$  ze základního případu zatížení je největší síla, kterou by měl svár vydržet:

$$F_Y = 8813N$$

Napětí ve smyku ve svaru kroužku při tomto zatížení je rovno:

$$\tau = \frac{F_Y}{S} = \frac{8813}{376,99} = 23,4 \text{ MPa}$$

a součinitel rezervy vůči meznímu stavu plastických deformací:

$$RF = \frac{262}{23,4} = 11,2$$

Spoj tedy vyhověl.

## 6.5 Výsledky pevnostní kontroly

Byl proveden rozbor kritických bodů konstrukce a byly vypočteny součinitele pevnosti v nich při vybraných případech zatížení. Provedenou kontrolou pevnosti prošly úspěšně všechny součásti. Nejnižší rezerva v pevnosti je 5 % v těle lyže při početním zatížení.

## 7. Závěr

Závěrem lze zhodnotit, že proces prvotního návrhu podvozku lze považovat za ukončený. Tato práce ilustruje návrh od zakončení rešerše stavu trhu přes koncepční návrh podvozku a zhodnocení variant řešení jednotlivých jeho součástí až ke konstrukčnímu návrhu, který je konkretizován rozměry a detaily konstrukce jednotlivých částí podvozku a konstrukčních uzlů. Ne všechny tyto detaily byly v práci zmiňovány, i přes to jsou vyřešeny – bez nich by mohlo jen těžko dojít k výrobě. Proběhla optimalizace skladby kompozitního těla za pomoci výsledků napětí získaných MKP metodou. Výsledkem úprav geometrie je lepší využití materiálu ve výsledné součásti a příznivější rozložení napětí v něm. Dále byla provedena kontrola pevnosti osy lyže obdobnou metodou. Další součásti byly kontrolovány analytickou metodou. Navržené řešení vyhovělo předběžné pevnostní kontrole a je připraveno na další postup (výsledný návrh je zobrazen na obrázcích 40 až 44).

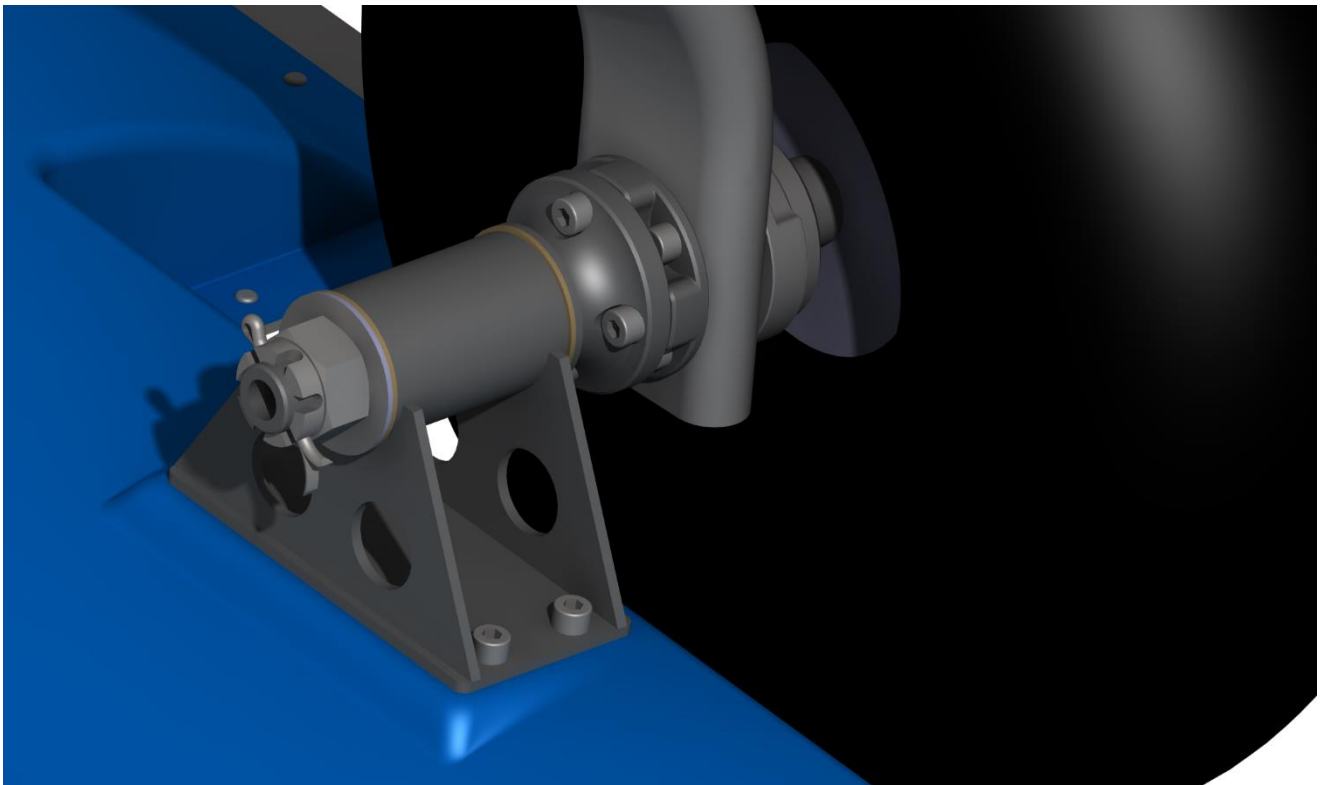
### 7.1 Budoucí vývoj

Dalším směřováním projektu bude získání kvalitnějších dat ze statické zkoušky kolového podvozku a příprava výroby, ke které už byly v době tvorby této práce položeny základy v podobě prvních výrobních výkresů a počátku konzultování výrobních postupů s výrobcem. Očekávat lze změnu materiálu těla po dalším jednání s výrobcem – pevnější materiál by umožnil uspořit hmotnost, která s počtem vrstev narostla. Po dokončení teoretických návrhů bude třeba přistoupit k výrobě prototypu a pevnostním zkouškám podvozku, na základě kterých může dojít k dalším změnám návrhu. Završí-li podvozek úspěšně certifikaci dle daných předpisů, bude následovat dlouhodobé testování prototypu v provozních podmínkách, ze kterého pravděpodobně také vzejdou další podněty k úpravám. Optimalizovat se bude například přichycení bezpečnostních lanek nebo šířka okraje skluznice. Výsledkem by pak měl být podvozek s lyžemi schopný bezpečného a spolehlivého provozu.

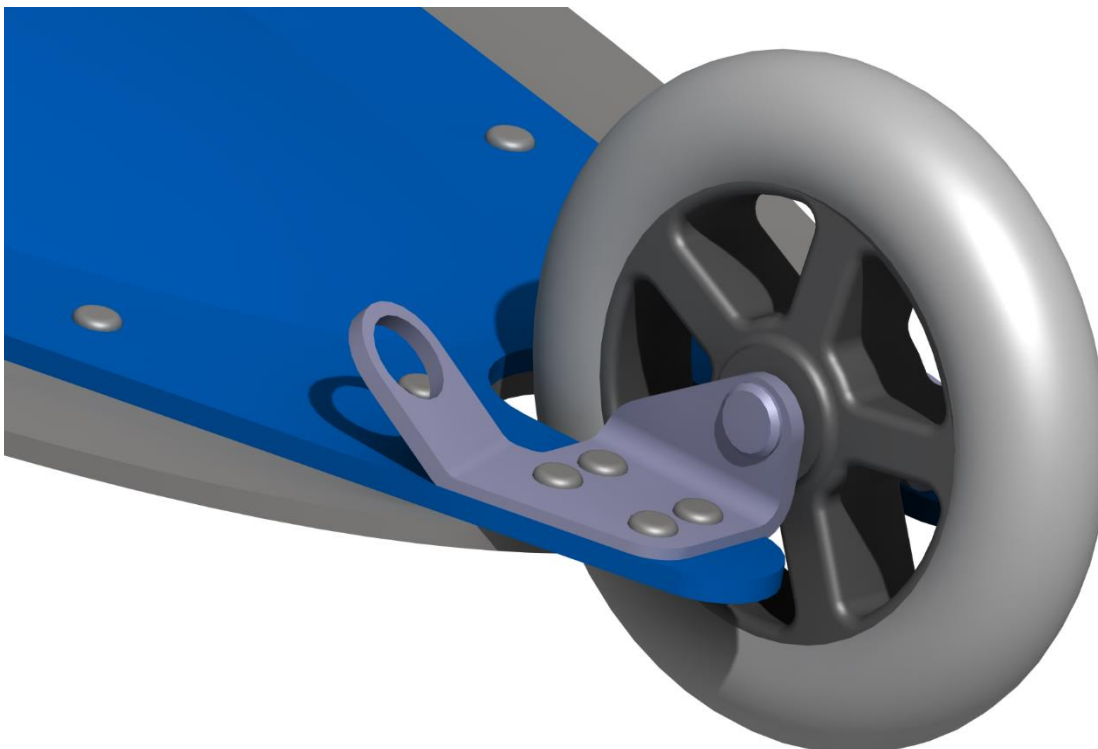




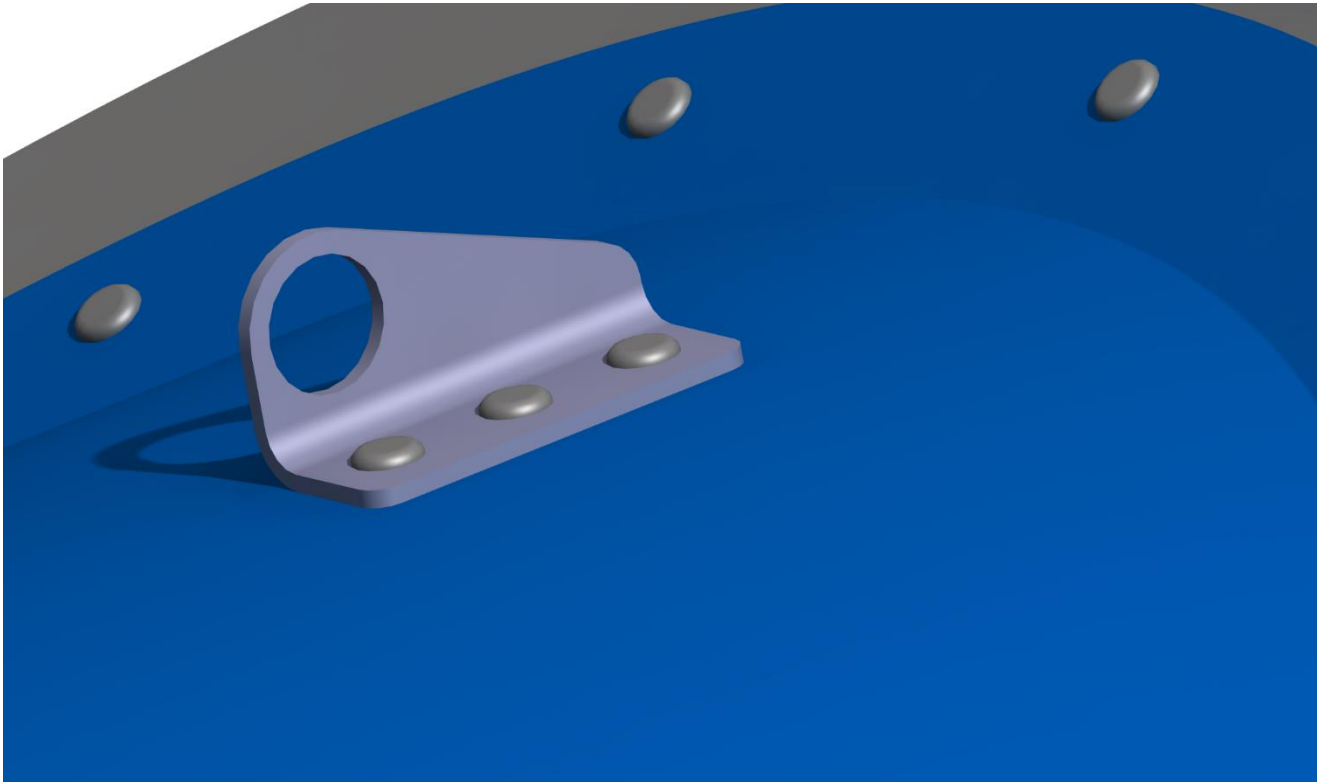
*Obr. 40 – Celkový pohled na výsledný návrh*



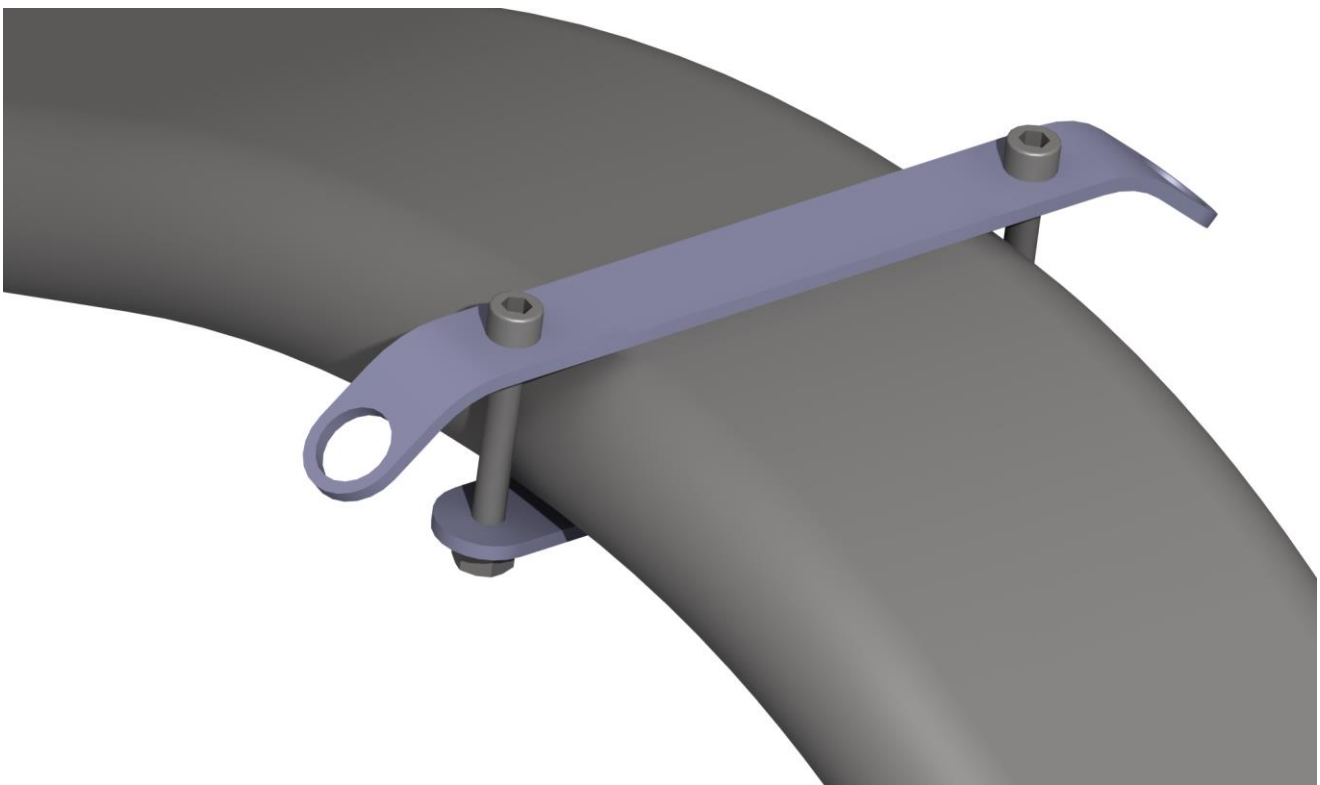
*Obr. 41 – Detail řešení osy lyže*



*Obr. 42 – Detail upevnění bezpečnostního kolečka*



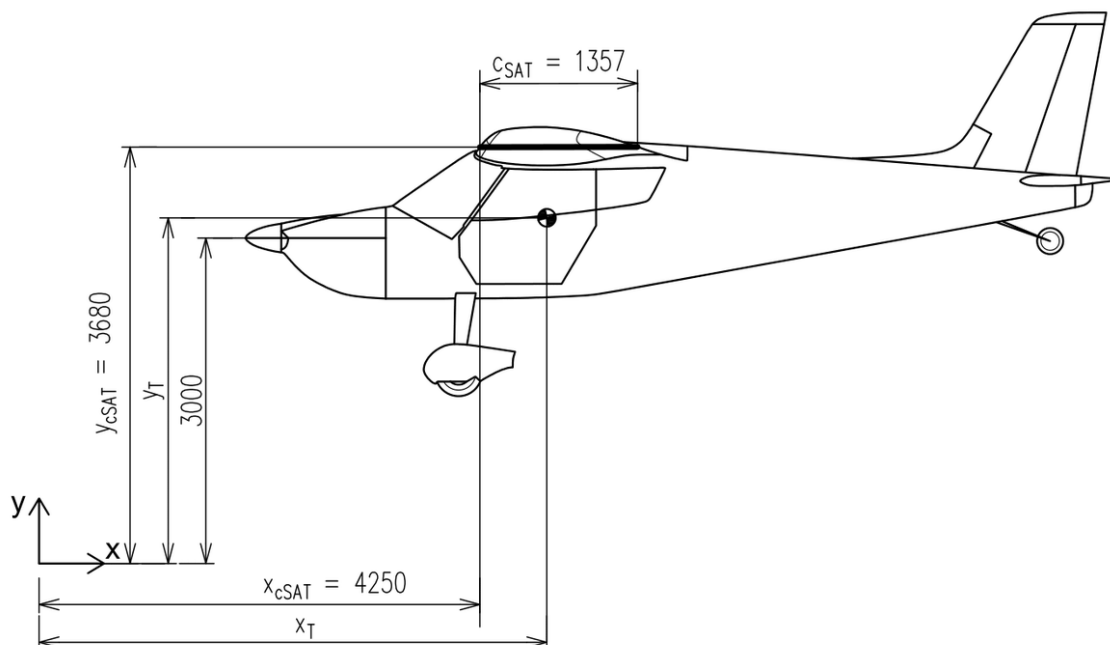
*Obr. 43 – Detail uchycení oka předního lanka*



*Obr. 44 – Navrhované uchycení bezpečnostních lanek*

## 8. Použitá literatura

- [1] HOSTINSKÝ, Vladimír. *Návrh podvozku s lyžemi pro letoun s krátkým vzletem a přistáním* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-09-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/125364>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Ing. Tomáš Katrňák.
- [2] DIRECT FLY. STOL CRUISER. In: *Oficiální web společnosti Direct Fly* [online]. 2022 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://directfly.cz/stol-cruiser/>
- [3] VIVION, Michael. Ski Flying. In: *Backcountrypilot.org* [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://backcountrypilot.org/knowledge-base/pilots/ski-flying>
- [4] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *AC43-13-2B: Acceptable Methods, Techniques, and Practices - Aircraft Alterations* [online]. In: . 2020 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC%2043.13-2B.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC%2043.13-2B.pdf)
- [5] *UL-2: Část I. - Požadavky letové způsobilosti SLZ – ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. 2009-01. Praha: LAA ČR, 2009.
- [6] *CS-LSA: Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Light Sport Aeroplanes. Amendment 1*. Kolín nad Rýnem: EASA, 2013.
- [7] *ASTM F2245-18: Standard Specification for Design and Performance of a Light Sport Airplane*. 2018. West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- [8] JURAČKA, Jaroslav. *Kompozitní konstrukce v letectví: Studijní podklad pro studenty 1. ročníku magisterského studia oboru Letecká technika specializace Stavba letadel*. LU01-2007-OST.ST. Brno, 2021.
- [9] MSC SOFTWARE. Basic Concepts and Definitions. In: *Patran 2021 - Online Help* [online]. [help.mscsoftware.com](https://help.mscsoftware.com), 2022 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: [https://help.mscsoftware.com/bundle/patran\\_2021/page/combined\\_book/pug/mesh/TOC.Basic.Concepts.and1.xhtml](https://help.mscsoftware.com/bundle/patran_2021/page/combined_book/pug/mesh/TOC.Basic.Concepts.and1.xhtml)
- [10] BUDYNAS, Richard G. (Richard Gordon), J. Keith NISBETT, Kiatfa TANGCHAICHIT a Joseph Edward SHIGLEY. *Shigley's mechanical engineering design*. Eleventh edition in SI units. New York: McGraw Hill, 2021, xix, 1095 stran : ilustrace, plány ; 26 cm. ISBN 978-981-315-898-6.

**Příloha A: Stanovení základních hmotnostních konfigurací a centrází letounu**

Obr. 45 – Umístění souřadného systému

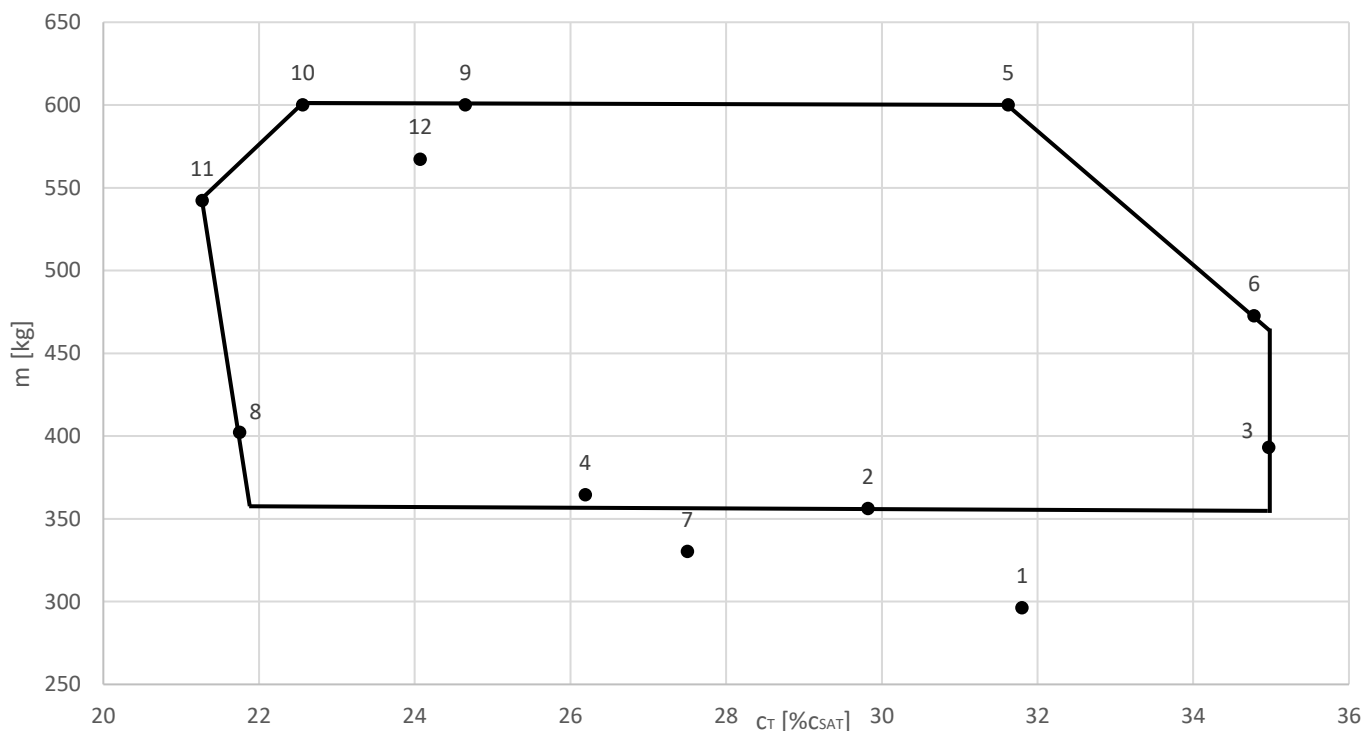
V tabulce 25 jsou uvedeny základní hmotnostní konfigurace letounu a jejich výsledné centráže. Tabulka byla vypracována na základě informací poskytnutých výrobcem, souřadnice těžiště v ní obsažené jsou vztaženy k souřadnému systému na obr. 40. V závěru přílohy je umístěn přibližný centrální diagram letounu (obr. 41) vycházející z tab. 25.

Jednotlivé sloupce tabulky obsahují:

Konfigurace	...zběžné označení konfigurace,
Motor	...v konstrukci letounu se počítá se zástavbou motoru Rotax 912 ULS nebo 915 iS,
$m_{pil}$	...hmotnost pilotů,
$m_{pal}$	...souhrnná hmotnost paliva,
$m_{zav}$	...hmotnost zavazadel,
$m_{zs}$	...hmotnost záchranného systému,
$\Delta m_{vrt}$	...diference ve hmotnostech stavitelné a pevné vrtule
$m$	...celková hmotnost letounu
$x_T$	...horizontální souřadnice těžiště
$y_T$	...vertikální souřadnice těžiště
$c_T$	...horizontální pozice těžiště vztažená k délce střední aerodynamické tělvy křídla

Tab. 25 Základní hmotnostní konfigurace

Č.	Konfigurace	Motor	$m_{pil}$ [kg]	$m_{pal}$ [kg]	$m_{zav}$ [kg]	$m_{mot}$ [kg]	$m_{zS}$ [kg]	$\Delta m_{vrt}$ [kg]	$m$ [kg]	$x_T$ [mm]	$y_T$ [mm]	$c_T$ [% $c_{sat}$ ]
1	Prázdný letoun s motorem a pevnou vrtulí (PV)	912 ULS	0	0	0	80,1	0	0	296,1	4681	3191	31,8
2	Prázdný letoun s lehkým pilotem a PV	912 ULS	60	0	0	80,1	0	0	356,1	4654	3153	29,82
3	Letoun s lehkým pilotem, zavazadly a záchranným systémem (ZS) a PV	912 ULS	60	0	25	80,1	12	0	393,1	4724	3142	34,97
4	Prázdný letoun s lehkým pilotem a stavitelnou vrtulí (SV)	912 ULS	60	0	0	80,1	12	8,4	364,5	4605	3150	26,19
5	Letoun na maximální vzletové hmotnosti s ZS a PV	912 ULS	191,9	75	25	80,1	12	0	600	4679	3176	31,62
6	Letoun s maximálním množstvím paliva, zavazadly a ZS	912 ULS	64,4	75	25	80,1	12	0	472,5	4722	3233	34,78
7	Prázdný letoun s pevnou vrtulí a ZS	915 iS	0	0	0	102,2	12	0	330,2	4622	3180	27,5
8	Prázdný letoun s lehkým pilotem, SV a ZS	915 iS	60	0	0	105,7	12	8,4	402,1	4545	3142	21,75
9	Letoun na plné vzletové hmotnosti se SV a ZS	915 iS	200	32,9	25	105,7	12	8,4	600	4584	3118	24,65
10	Letoun na plné vzletové hmotnosti bez zavazadel se SV a ZS	915 iS	200	57,9	0	105,7	12	8,4	600	4556	3157	22,56
11	Letoun bez paliva, se dvěma piloty na hmotnostním limitu a se SV a ZS.	915 iS	200	0	0	105,7	12	8,4	542,1	4538	3096	21,27
12	Letoun bez paliva, se dvěma piloty, zavazadly a se SV a ZS.	915 iS	200	0	25	105,7	12	8,4	567,1	4576	3083	24,07



Obr. 46 – Přibližný centrážní diagram letounu, konfigurace 1 a 7 jsou neletové

**Příloha B: Algoritmus pro výpočet zatížení a RF v jednotlivých vrstvách kompozitu**

Algoritmus počítá dle Klasické teorie laminátů, počítá vzniklé deformace a napětí ve vrstvách kompozitu ze vstupních dat o kompozitním materiálu a působícím zatížení. Syntaxí odpovídá programům Matlab a Octave.

```

clc;
clear all;

%Parametry laminatu
E=zeros(13, 6);

v=13; %Pocet vrstev
E(1,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(2,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(3,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(4,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(5,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(6,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(7,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(8,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(9,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(10,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(11,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(12,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];
E(13,:)= [60000 60000 0.3 5600 0.6 0];

%[0 0 0 0 0 0]

%Poisson v 2. smeru
Mi21=E(:,3).*(E(:,2)/E(:,1));

%Maximalni napeti - tah
SigMax=zeros(3,13);
SigMax(:,1)= [750;750;56];
SigMax(:,2)= [750;750;56];
SigMax(:,3)= [750;750;56];
SigMax(:,4)= [750;750;56];
SigMax(:,5)= [750;750;56];
SigMax(:,6)= [750;750;56];
SigMax(:,7)= [750;750;56];
SigMax(:,8)= [750;750;56];
SigMax(:,9)= [750;750;56];
SigMax(:,10)= [750;750;56];
SigMax(:,11)= [750;750;56];
SigMax(:,12)= [750;750;56];
SigMax(:,13)= [750;750;56];

%Maximalni napeti - tlak
SigMaxP=zeros(3,13);
SigMaxP(:,1)= [350;350;56];
SigMaxP(:,2)= [350;350;56];
SigMaxP(:,3)= [350;350;56];
SigMaxP(:,4)= [350;350;56];
SigMaxP(:,5)= [350;350;56];
SigMaxP(:,6)= [350;350;56];
SigMaxP(:,7)= [350;350;56];
SigMaxP(:,8)= [350;350;56];
SigMaxP(:,9)= [350;350;56];
SigMaxP(:,10)= [350;350;56];
SigMaxP(:,11)= [350;350;56];
SigMaxP(:,12)= [350;350;56];
SigMaxP(:,13)= [350;350;56];

```



```

%Maximalni deformace -tah
DefMax=zeros(3,13);
DefMax(:,1)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,2)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,3)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,4)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,5)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,6)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,7)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,8)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,9)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,10)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,11)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,12)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax(:,13)= [1.05;0.5;1.4];
DefMax=DefMax.*0.01;

%Maximalni deformace -tlak
DefMaxP=zeros(3,13);
DefMaxP(:,1)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,2)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,3)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,4)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,5)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,6)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,7)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,8)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,9)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,10)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,11)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,12)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP(:,13)= [0.85;2.5;1.4];
DefMaxP=DefMaxP.*0.01;

%Matice tuhosti vrstvy
Q=zeros(3,3,v);
for n=1:v;
Q(1,1,n)=E(n,1)/(1-(E(n,3)*Mi21(n)));
Q(2,1,n)=[E(n,3).*(E(n,1)/(1-E(n,3).*Mi21(n)))]';
Q(1,2,n)=[Mi21(n).*(E(n,1)/(1-E(n,3).*Mi21(n)))]';
Q(2,2,n)=[E(n,2)/(1-E(n,3).*Mi21(n))];
Q(3,3,n)=E(n,4);
end

% VSTUP MATICE TUHOSTI
%Q=

%Matice poddajnosti v 12
S=zeros(3,3,v);
for n=1:v
S(:,:,n)=inv(Q(:,:,n));
end

% Transformace matice tuhosti do XY
QX=zeros(3,3,v);
f=cosd(E(:,6));
g=sind(E(:,6));

for n=1:v
QX(1,1,n)=Q(1,1,n)*f(n)^4+Q(2,2,n)*g(n)^4+Q(1,2,n)*2*f(n)^2*g(n).^2+Q(3,3,n)*4*f(n)^2*g(n)^2;
QX(2,2,n)=Q(1,1,n)*g(n)^4+Q(2,2,n)*f(n)^4+Q(1,2,n)*2*f(n)^2*g(n).^2+Q(3,3,n)*4*f(n)^2*g(n)^2;

```

```

QX(1,2,n)=Q(1,1,n)*f(n)^2*g(n)^2+Q(2,2,n)*f(n)^2*g(n)^2+Q(1,2,n)*(f(n)^4+g(n)^4)-
Q(3,3,n)*4*f(n)^2*g(n)^2;
QX(3,3,n)=Q(1,1,n)*f(n)^2*g(n)^2+Q(2,2,n)*f(n)^2*g(n)^2-Q(1,2,n)*2*f(n)^2*g(n)^2+Q(3,3,n)*(f(n)^2-
g(n)^2)^2;
QX(1,3,n)=Q(1,1,n)*f(n)^3*g(n)-Q(2,2,n)*f(n)*g(n)^3+Q(1,2,n)*(f(n)*g(n)^3-
f(n)^3*g(n))+Q(3,3,n)*2*(f(n)*g(n)^3-f(n)^3*g(n));
QX(2,3,n)=Q(1,1,n)*f(n)*g(n)^3-Q(2,2,n)*f(n)^3*g(n)+Q(1,2,n)*(f(n)^3*g(n)-
f(n)*g(n)^3)+Q(3,3,n)*2*(f(n)^3*g(n)-f(n)*g(n)^3);
QX(2,1,n)=QX(1,2,n);
QX(3,1,n)=QX(1,3,n);
QX(3,2,n)=QX(2,3,n);
end

%Matice poddajnosti v XY
SX=zeros(3,3,v);
for n=1:v
SX(:,n)=inv(QX(:,n));
end

% Vektor vrstev
z0=0.5*sum(E(1:v,5));
H=zeros(v+1,1);
m=0;
for n=1:v
H(n)=m-z0;
m=m+E(n,5);
end
H(v+1)=z0;
t=sum(E(1:v,5));

%Matice tuhosti lamimantu
A=zeros(3);
B=zeros(3);
D=zeros(3);
%A
for y=1:3;
for q=1:3;
for n=1:v;
A(q,y)=A(q,y)+QX(q,y,n)*(H(n+1)-H(n));
end
end
end
%B
for y=1:3;
for q=1:3;
for n=1:v;
B(q,y)=B(q,y)+0.5* QX(q,y,n)*(H(n+1)^2-H(n)^2);
end
end
end
%D
for y=1:3;
for q=1:3;
for n=1:v;
D(q,y)=D(q,y)+(1/3)* QX(q,y,n)*(H(n+1)^3-H(n)^3);
end
end
end
%ABBD
ABBD=zeros(6);
ABBD(1:3,1:3)=A;
ABBD(4:6,1:3)=B;
ABBD(1:3,4:6)=B;
ABBD(4:6,4:6)=D;

```

```

%Matice poddajnosti
abbd=inv(ABBD);

%VSTUPNI ZATIZENI
q=zeros(6,1);
q(1:3)=[-14;-13.3;-10.9]*t;

%Deformace stredy vrstvy
Def=abbd*q;
DefVX=zeros(3,v);
for n=1:v
DefVX(1:3,n)=Def(1:3)+(0.5.*(H(n+1)+H(n)).*Def(4:6));
end

%Napeti ve vrstve
Sig=zeros(3,v);
for n=1:v
Sig(:,n)=(QX(:,n))*DefVX(:,n);
end

%Zadani napeti v kompozitu
%Sig=[240,306,61.5];

%Transformacni matice
T=zeros(3,3,v);
for n=1:v
T(1,:,n)=[f(n)^2 g(n)^2 2*g(n)*f(n)];
T(2,:,n)=[g(n)^2 f(n)^2 -2*g(n)*f(n)];
T(3,:,n)=[2*g(n)*f(n) g(n)*f(n) f(n)^2-g(n)^2];
end

%Napeti ve smeru materialu
SigV=zeros(3,v);
for n=1:v
SigV(:,n)= T(:,n)*Sig(:,n);
end

%Deformace vrstvy ve smeru materialu
DefV=zeros(3,v);
T_TInv=T;
for n=1:v
T_TInv(:,n)=inv(T(:,n).');
DefV(:,n)= T_TInv(:,n)*DefVX(:,n);
end

%ReserveFactor deformaci
RFDef=zeros(3,v);
for i=1:3
for j=1:v
if DefV(i,j)>=0
RFDef(i,j)=DefMax(i,j)/DefV(i,j);
elseif DefV(i,j)<0
RFDef(i,j)=DefMaxP(i,j)/DefV(i,j);
endif
endfor
endfor

%ReserveFactor napeti
RFSig=zeros(3,v);
for i=1:3
for j=1:v
if SigV(i,j)>=0

```

```
    RFSig(i,j)=SigMax(i,j)/SigV(i,j);  
elseif SigV(i,j)<0  
    RFSig(i,j)=SigMaxP(i,j)/SigV(i,j);  
endif  
endfor  
endfor
```