



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Návrh přistávacího zařízení
rychlostního letounu**

**Design of a racing aircraft landing
gear**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

RICHARD ŠIROKÝ

Studijní program: N3958 Letectví a kosmonautika
Studijní obor: 3906T008 Letadlová a kosmická technika
Vedoucí práce: Ing. Jiří Brabec PhD.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Široký** Jméno: **Richard** Osobní číslo: **465911**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh přistavacího zařízení rychlostního letounu

Název diplomové práce anglicky:

Design of a racing aircraft landing gear

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Konstrukční návrh hlavního podvozku
- 2) Stanovení zatížení
- 3) Dimenzování
- 4) Hmotový rozbor

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Brabec, Ph.D., ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Návrh přistávacího zařízení rychlostního letounu“ vypracoval(a) samostatně pod vedením Ing. Jiřího Brabce, PhD., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 1.1. 2022

Richard Široký

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval své rodině, která mě po celou dobu neúnavně podporovala a umožnila mi celé studium uskutečnit. Chci rovněž velmi poděkovat svému vedoucímu práce za veškeré rady, ochotu a trpělivost při konzultacích. Rovněž bych rád poděkoval celému Ústavu letadlové techniky za velmi dobrou přípravu do problematiky letadlových konstrukcí, bez které by pro mě nebylo možné tuto práci napsat.

Anotační list

Jméno autora:	Richard Široký
Název DP:	Návrh přistávacího zařízení rychlostního letounu
Rok:	2022
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí DP:	Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
Rozsah DP:	60 stran, 42 obrázků, 21 tabulek
Klíčová slova:	podvozek, podvozková noha, letadlová konstrukce, zatížení, pevnostní návrh, metoda konečných prvků
Anotace:	Tato diplomová práce se zabývá návrhem hlavního podvozku rychlostního letounu. První část práce je věnovaná detailnímu konstrukčnímu návrhu podvozku. Druhá část stanovuje statické zatížení dle stavebního předpisu. V třetí části je provedeno dimenzování podvozku, analytické a pomocí MKP výpočtu. Poslední část se zabývá rozložením hmot.

Annotation sheet

Author:	Richard Široký
Title of MT:	Design of a racing aircraft landing gear
Academic year:	2021
Department:	Department of Aerospace Engineering
Supervisor:	Ing. Jiří Brabec, Ph.D.
Extend:	60 pages, 42 figures, 21 tables
Keywords:	landing gear, solid-spring gear, aircraft design, loads, strenght, final element method
Annotation:	This thesis deals with a design of the main landing gear of a racing aircraft. First part of the thesis is dedicated to the detailed construction design. Second part specifies the static load according to the design specifications. In third part the analytical and FEM dimensioning is done. Last part deals with the mass distribution.

Obsah

1 Úvod	1
2 Návrh konstrukce	2
2.1. Pružnice	3
2.2. Závěsy podvozková noha – motorové lože	10
2.3. Kolo, brzda, osa	11
2.4. Aerodynamické kryty	12
2.5. Sestava	13
2.6. Technologie.....	14
3 Stanovení zatížení	16
3.1. Síly působící na kola hlavního podvozku	17
3.2. Silové účinky v noze letounu	24
4 Dimenzování podvozku.....	32
4.1. Dimenzování pružné nohy	32
4.1.1. Analytické dimenzování pásnic	33
4.1.2. Analytické dimenzování stojin	38
4.1.3. Výpočet pomocí metody konečných prvků	41
4.2. Dimenzování spoje podvozková noha – kolová osa	51
4.3. Dimenzování závěsů do trupu letounu.....	53
5 Hmotový rozbor	54
6 Závěr	57
7 Použité zdroje	58

1 Úvod

Úkolem této diplomové práce je návrh konstrukce hlavního podvozku jednomístného letounu. Letadlo je určeno k překonávání světových rychlostních rekordů Mezinárodní letecké federace FAI, v kategorii C-la/o. Práce navazuje na práci Ing. Jakuba Valenty [1], který vypracoval koncepční návrh letounu. Dále také navazuje na práci Bc. Kláry Osičkové [2], která provedla především aerodynamickou CFD analýzu a základní odhad zatížení a dimenzí. Konstrukce podvozku podléhá stavebnímu předpisu *UL2 1. část*.

V této práci je dále rozebrána celá konstrukce do větších detailů. Výpočet zatížení je rozšířen o všechny důležité body hmotové obálky. Samotná konstrukce a výpočet dimenzí rovněž cílí na dosažení provozního násobku, který bude menší než 4.

Dimenzování konstrukce je zaměřeno především na pružnou nohu, která je stěžejním prvkem celé konstrukce a její dimenze zpětně ovlivňují velikost zatížení, které je závislé na jejím průhybu.

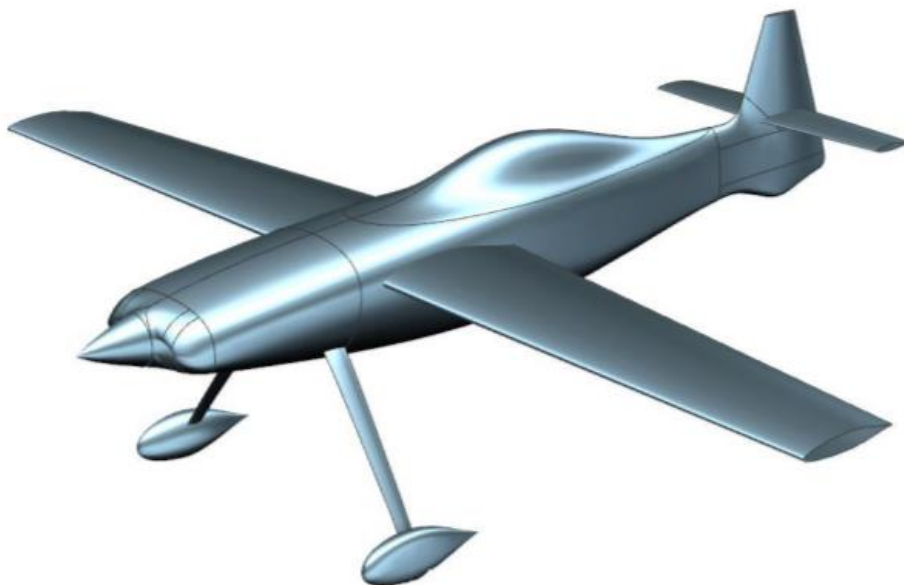
Požadovaným nástrojem k určení dimenzí je MKP analýza, která při správném návrhu podává nejméně spolehlivější výsledky pevnostního výpočtu, a to včetně průhybu nohy ve svislém směru s požadovanou přesností, který by se jinou metodou jen těžko získával.

Analytických výpočtů je využito pro určení výchozích rozměrů pro MKP výpočet. Vzhledem k tomu, že samotná konstrukce je na hranici toho, co by se dalo považovat za konstrukci tenkostěnnou, nelze tyto zjednodušené výpočty považovat jako průkazné.

Jako u většiny prací zabývajících se konstrukcí letadlových částí, je i u této práce součástí konstrukčního návrhu i hmotový rozbor, mapující hmotnost a polohy těžišť jednotlivých dílů, které jsou potřebné pro další zpřesnění zatížení a návrh mechaniky letu pro celý letoun.

2 Návrh konstrukce

Tato kapitola se věnuje konstrukci hlavního podvozku rychlostního letounu. Jedná se o návrh celé sestavy od závěsů do hlavní konstrukce až po podvozková kola a jejich aerodynamické kryty. Jde o předběžný koncept bez zohlednění dimenzí ovlivňujících pevnostní návrh, které jsou napočítány v kapitole 4.

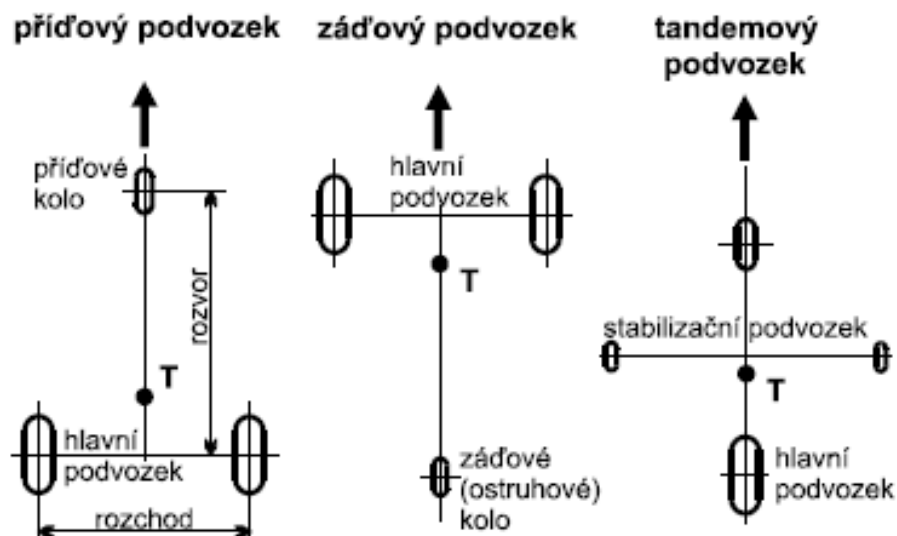


Obr. 1 Konceptní 3D model Ing. Valenty [1]

Nejprve je třeba definovat zadání, které vychází z diplomové práce Ing. Jakuba Valenty zabývající se konceptním návrhem celého letounu a bakalářské práce Bc. Kláry Osičkové, jejíž téma je rovněž návrh přistávacího zařízení letadla vycházejícího z diplomové práce Jakuba Valenty. Z práce [1] jsou pro konstrukční návrh důležité především informace týkající se letounu. Tedy že se jedná o jednomístný, jednomotorový, vrtulový letoun kategorie UL 2 s maximální vzletovou hmotností 345 kg, který je určený k překonávání rychlostních rekordů. Rovněž je důležitý konceptní 3D model udávající hrubý tvar letadla a přibližnou polohu jednotlivých částí vůči sobě a vůči těžišti. Z práce [2] je převzata především geometrie a tvar vnějších částí podvozku, z důvodu zachování jejího aerodynamického návrhu. Tvar a geometrie jsou modifikovány jen minimálně, aby byla zmíněná aerodynamika zachována. Celkový návrh jednotlivých konstrukčních částí je v této práci částečně pozmeněn a rozpracován do větších detailů.

Mezi nejužívanější uspořádání, tedy polohu podvozkových kol vůči sobě a těžišti, je možné zařadit příďový, záďový a tandemový podvozek. U většiny dnešních letounů spadající do kategorie *UL2 1. část*, jako ten z [1], lze nalézt variantu příďového podvozku. Přesto je voleným uspořádáním podvozku ostruhové uspořádání (záďové uspořádání), viz [1]. Důvodem je především určení letounu pro rychlostní lety.

Záďový podvozek, nebo-li normální tricykl, je takové uspořádání, kde se hlavní podvozek nachází před těžištěm a místo kola předového je použito ostruhy. Ta se nachází na ocasní části letounu. Výhodou tohoto uspořádání je především nižší hmotnost ostruhy v porovnání s předovým kolem a nižší aerodynamický odpor (v případě, že je předové kolo pevné). Letoun rovněž nemusí brzdit tak intenzivně, jako je tomu u předového podvozku, a to z důvodu vyššího aerodynamického odporu při přistání. Tyto výhody jsou důvodem volby ostruhového uspořádání. Nevýhodami je horší výhled a manipulace při pojíždění a při vzletu. [4], [5]



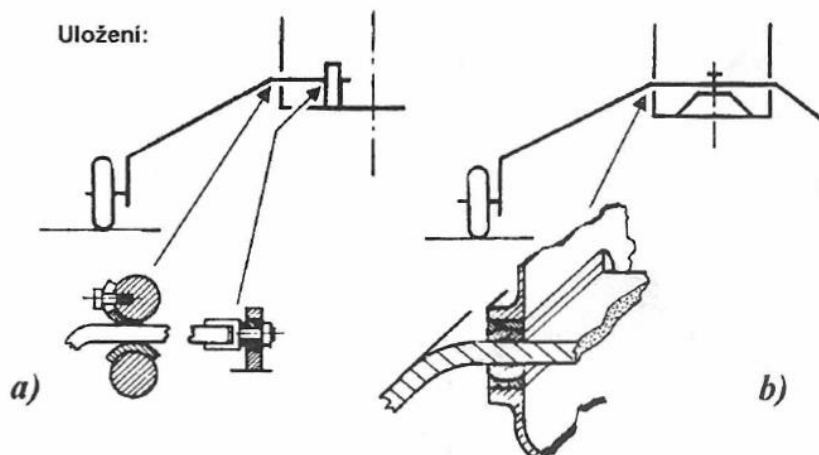
Obr. 2 Základní koncepty podvozku [4]

Dalším možným členěním je na podvozek pevný a zatahovací. Zatahovací podvozek dává výhodu snížení aerodynamického odporu letounu. Mechanismus sloužící k zatahování je však poměrně těžký v porovnání s pevným podvozkem a vyžaduje vyčlenění prostoru na podvozkové šachty, což by vzhledem k tomu, že se jedná o jednomístný středoplošník, bylo problematické. Negativa zatahovacího podvozku by tak převážila nad pozitivy. Z těchto důvodů byla zvolena varianta pevného podvozku. [4]

2.1. Pružnice

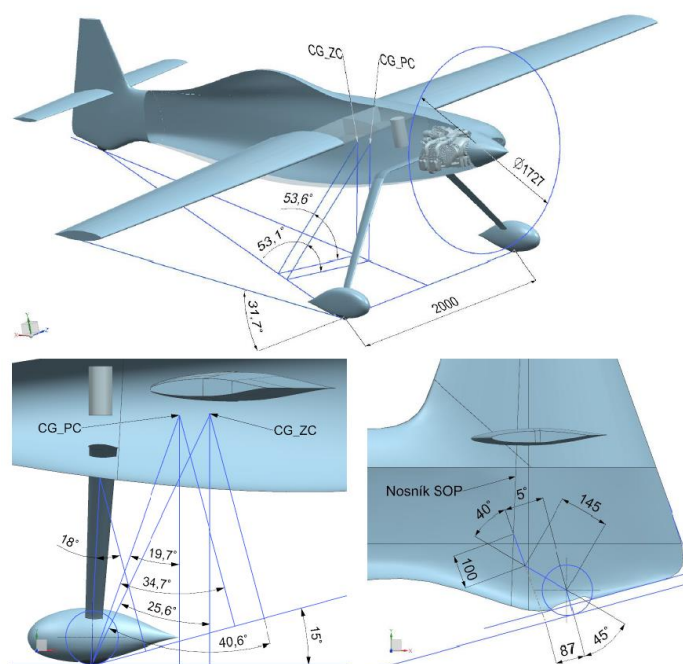
Nepostradatelnou součástí podvozku každého letadla je konstrukční díl, který umožňuje přenos zatížení mezi hlavní konstrukcí (trupem) a podvozkovými koly (přistávacím povrchem). Tato součást se zároveň spolu s pneumatikami podílí na tlumení nárazu a následné disipaci energie při přistání. Nejpoužívanější a hmotnostně nejvýhodnější v současnosti využívanou variantou u takto lehkých letadel s pevným podvozkem je použití pružné nohy fungující na principu „listové pružiny“. Toto velmi jednoduché řešení nevyžaduje instalaci dalšího tlumícího členu a větší část energie se akumuluje do pružného ohybu podvozkové nohy. Zároveň má relativně nízký aerodynamický odpor v porovnání s jiným, například příhradovým řešením. [6]

Je třeba rozhodnout, zda půjde o pružnici dělenou (Obr. 3.a) nebo nedělenou (Obr. 3.b). Rozdělené nohy vyžadují masivnější závěsy pro přenos silových účinků do trupu, protože oproti nedělené noze musí přenést i velký ohybový moment. Toto uspořádání přesto vychází v mnoha případech jako lehčí varianta, především v případech vícemístných letounů se sedadly vedle sebe, které mají velkou relativní šířku trupu. Vzhledem k tomu, že navrhované letadlo je pouze jednomístné a maximální konstrukčně možná vzdálenost závěsů je přibližně 420 mm, je téměř jisté, že nedělná pružnice vyjde hmotnostně lépe než dělená. Proto je voleno stejné řešení podvozku, jako v [2], tedy průběžná pružinová noha. [5]



Obr. 3 Schéma děleného (a) a neděleného (b) pružinového podvozku [5]

Dále byl řešen celkový tvar a geometrie pružnice. Byl proveden průzkum užívaných tvarů pružnic u existujících letadel a byly zvoleny tři nejčastěji používané tvary hrubé geometrie. Byly navrženy tak, aby odpovídaly navrženým úhlům a rozměrům v [1], viz Obr. 4.



Obr. 4 Geometrie ostruhového podvozku [1]

Byly vytvořeny parametrické 3D modely v CAD softwaru *Siemens NX* pro všechny tři koncepty. Ty dostaly technické označení A, B a C, viz *Obr. 5, 6 a 7*. Návrhy modelů jsou jen koncepční a složeny pouze z ploch. Nedávají tedy žádnou informaci o tloušťkách jednotlivých stěn a o detailech konstrukce. Tato forma bude výhodná zejména pro následné dimenzování pomocí MKP výpočtu, viz kapitola 4.1.3. Další postup celé práce bude popsán pro koncept A, který nejvíce kopíruje původně navržený tvar. Pro koncepty B a C bude obdobný a výsledky budou umístěny v přílohách práce. Schémata, viz dále, jsou pro další varianty umístěny v *Příloze 1*.



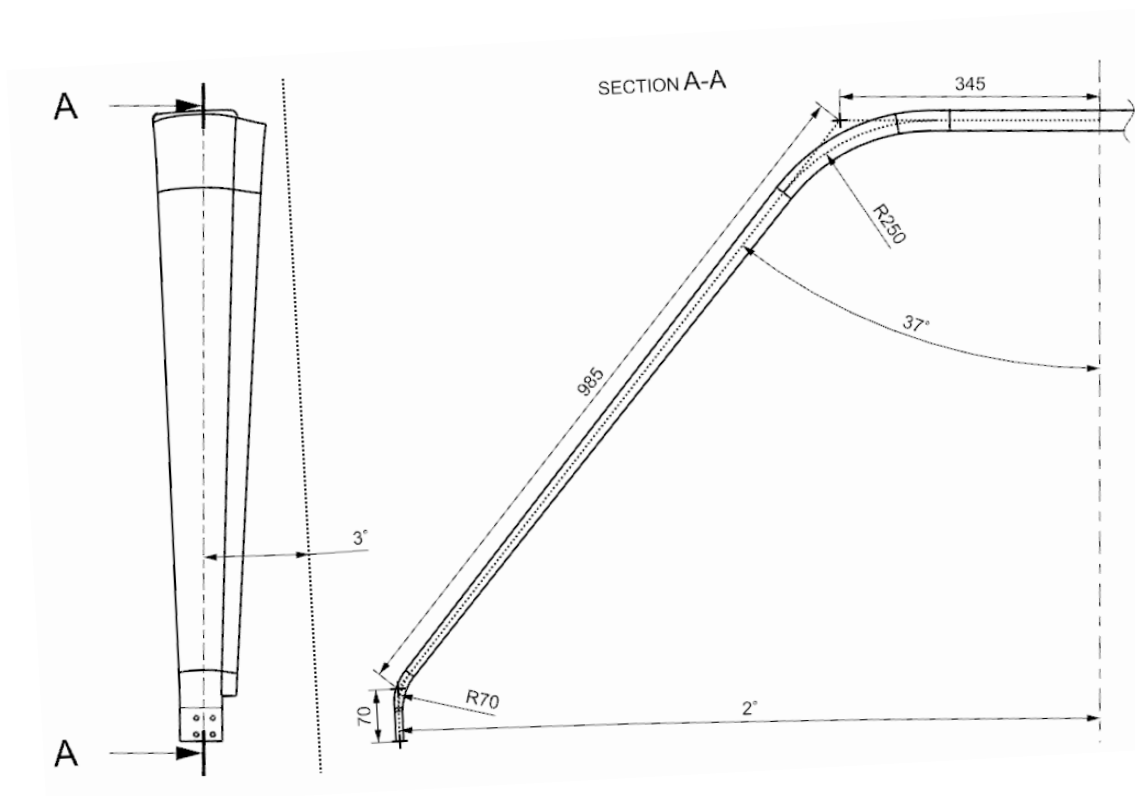
Obr. 5 Model pružinové nohy zpracovaný v systému Siemens NX, koncept A



Obr. 6 Model pružinové nohy zpracovaný v systému Siemens NX, koncept B



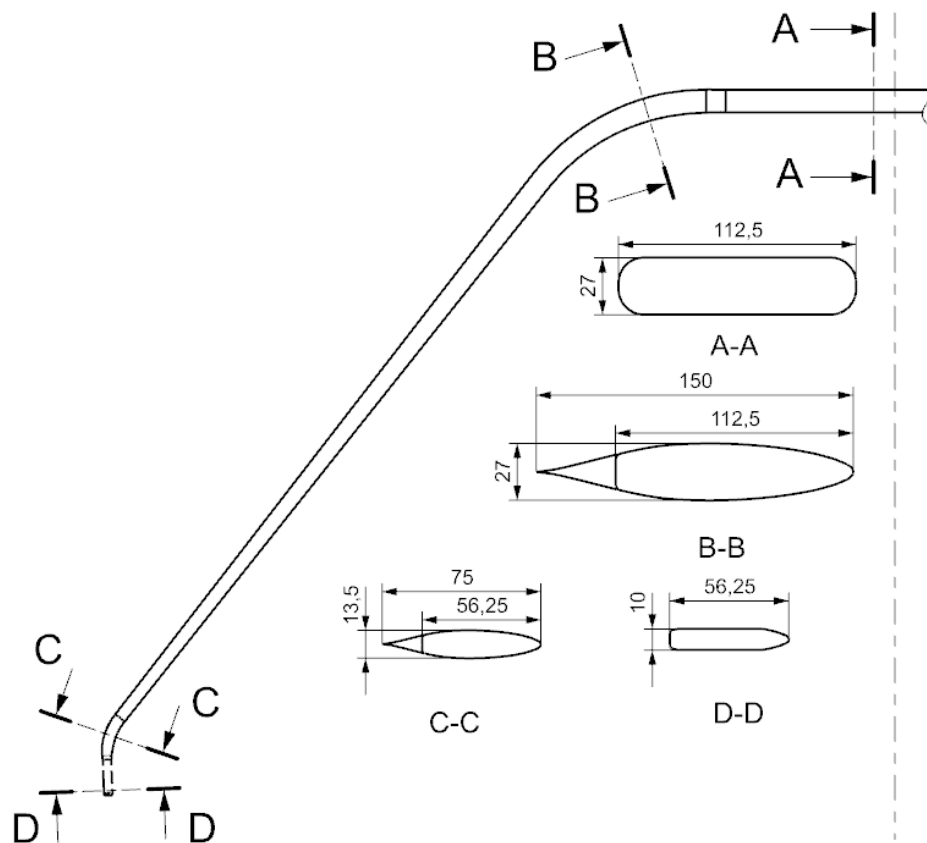
Obr. 7 Model pružinové nohy zpracovaný v systému Siemens NX, koncept C
Schéma obsahující hlavní rozměry nohy je znázorněno na Obr. 8.



Obr. 8 Schéma základních rozměrů

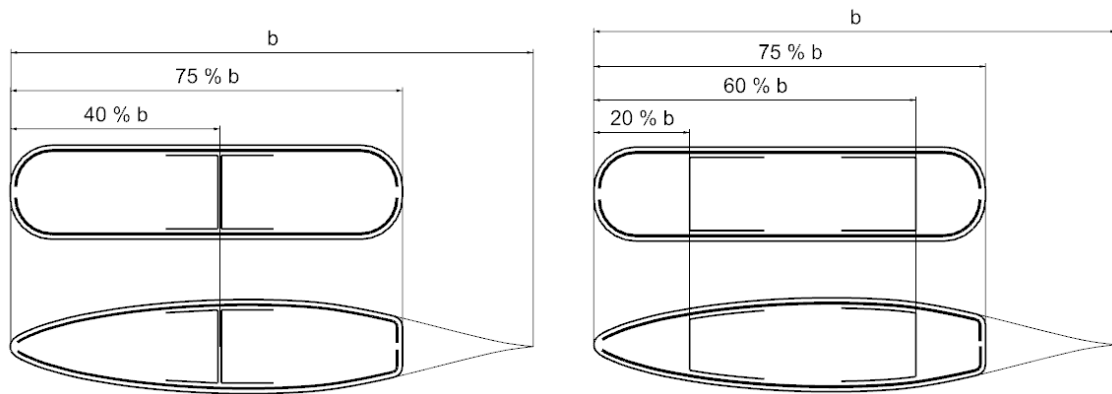
Rovněž je třeba zmínit, že se jedná o kompozitní konstrukci, protože tato skutečnost má vliv na celý koncept podvozkové nohy. Kompozit byl volen především z důvodu hmotnostní úspory. Proces výroby také bude pro navržený tvar nohy jednodušší, než by tomu bylo v případě použití kovových slitin. Výroba a použité materiály budou detailněji diskutovány v dalších kapitolách diplomové práce.

Jako tvar průřezu pružnice byl v práci [1] stanoven letecký symetrický profil s označením *NACA 66(3)-018*. Hloubka navrženého profilu je 150 mm v místě roviny symetrie. Dále se lineárně mění po celé délce pružnice až na hodnotu 75 mm v místě napojení osy kola. Využití leteckého profilu sice pomůže snížit aerodynamický odpor nohy, nese s sebou však konstrukční problémy. Bylo by totiž v celku problematické, konstruovat takový závěs, který by byl schopný spolehlivě přenést zatížení do trupu bez vzniku koncentrátorů napětí na povrchu průběžné nohy, které by mohly způsobit delaminaci. Proto v místě, kde je pružnice vodorovná, přechází na tvar zaobleného obdélníku o konstantní hloubce 150 mm, viz *Obr. 9 pohled A*. Další komplikací by bylo spojení osy kola a podvozkové nohy pomocí šroubů, kde je rovněž vyžadována rovinná plocha. V těchto místech průřez přechází na upravený profil, viz. *Obr. 9, pohled D*. [2]



Obr. 9 Vybrané průřezy podvozkové nohy zobrazující vnější tvar

Noha je navrhnutá jako nosíková konstrukce. Skládá se ze dvou pásnic, které je třeba propojit stojinou. Pásnice, dále technicky označovány jako „horní“ a „dolní“, budou rozprostřeny po celém obvodu průřezu. Pro další návrh jsou uvažovány dvě varianty. První s jedinou stojinou a druhá se stojinami dvěma. Varianty budou v kapitolách věnující se dimenzování vzájemně srovnávány. Varianty jsou znázorněny na *Obr. 10*. Obrázek neobsahuje informaci o tloušťkách jednotlivých komponent, které jsou dány typem tkaniny, počtem vrstev a technologií výroby. Počet vrstev závisí na pevnostním návrhu a budou dimenzovány v kapitole 4.

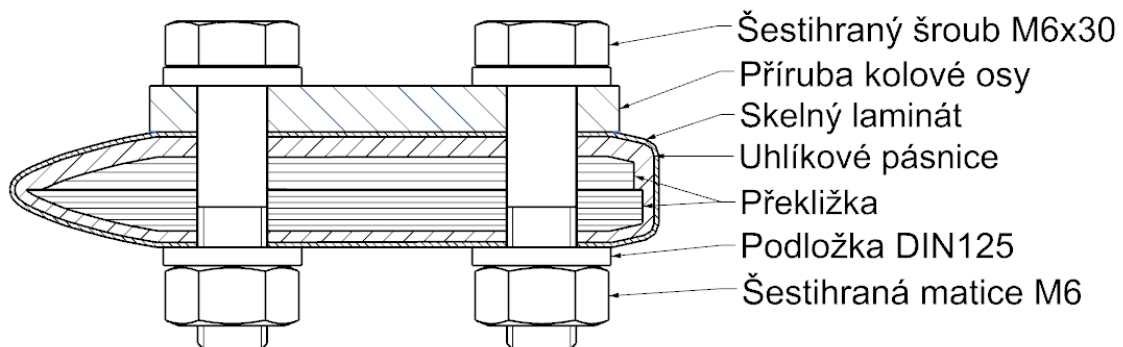


Obr. 10 Schéma průřezu nohy zobrazující návrh vnitřku nohy ve dvou variantách

Je uvažováno, že část nohy v okolí odtokové hrany profilu se nikterak nepodílí na přenosu zatížení a má jen aerodynamický účel. Bude tvořena třemi vrstvami skelné tkaniny. Vzniklou dutinu lze využít pro vedení hadiček k brzdovému systému kol.

Příčné výztuhy jsou umístěny pouze na koncích pružnice. Plní závěrnou funkci. Budou tvořeny ze tří vrstev skelné tkaniny.

V místě, kde je noha spojena s osou kola pomocí šroubů, je třeba zalaminovat insert z překližky z důvodu zabránění delaminace a správnému přenesení silových účinků ze spojovacích součástí do kompozitní konstrukce podvozkové nohy. Spojení s osou a vnitřní skladba v místě šroubů je schematicky naznačena na Obr. 11.



Obr. 11 Schéma spojení nohy s kolovou osou a skladby nohy v tomto místě

Pásnice budou pravděpodobně nejvíce namáhaným dílem. I přes tuto skutečnost stojí za úvahu volba podstatně méně pevné skelné tkaniny, a to z toho důvodu, že její modul pružnosti je přibližně 3x menší a umožní tedy větší stlačení nohy, což má za následek snížení provozního násobku, viz. kapitola 3. Z důvodu poměrně malého průřezu podvozkové nohy a malé stavební výšky převážila potřeba vysoké pevnosti a pásnice budou složeny z vrstev jednosměrné uhlíkové tkaniny 200 g/m² 12K.

Stojiny přenášející smykové zatížení budou složeny ze skelné plátňové tkaniny 163 g/m² v orientaci $\pm 45^\circ$.

Povrchová vrstva potahu bude z jemnější tkaniny z důvodu lepší kvality povrchu. Zvolenou tkaninou je skelná plátňová 80 g/m² v orientaci $\pm 45^\circ$. Pro

zlepšení kvality povrchu bude rovněž použit epoxidový gelcoat *EG 100– T*. Další dvě vrstvy potahu budou tvořeny rovněž sklenou tkaninou s plátňovou vazbou 163 g/m^2 v orientaci $\pm 45^\circ$. Ty jsou použity především z důvodu soudružnosti celé konstrukce a nemají větší pevnostní význam.

Tkaniny budou syceny epoxidovou pryskyřicí *L 285 MGS* certifikovanou pro letecké použití a tužidlem *MGS 286*. Prvky, které bude při výrobě potřeba lepit, budou lepeny dvousložkovým epoxidem *Hysol EA9394*. [8]

Použité materiály jsou voleny z katalogu společnosti *Havel Composites* a jsou certifikovány pro užití v leteckém průmyslu. Charakteristické vlastnosti tkanin a epoxidů jsou znázorněny v *Tab. 1 a 2*. [8]

Tkanina	Materiál	Plošná hustota [g/m^2]	Typ vazby	Pevnost v tahu (oreintační) [N/mm^2]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Hustota [kg/m^3]
Aeroglass	Sklo E	80	plátňová	3400	73	2600
Aeroglass	Sklo E	163	plátňová	3400	73	2600
Uhlíková vlákna	Uhlík HS	200	jednosměrná	4810	240	1800

Tab. 1 Základní vlastnosti volených tkanin [8], [9]

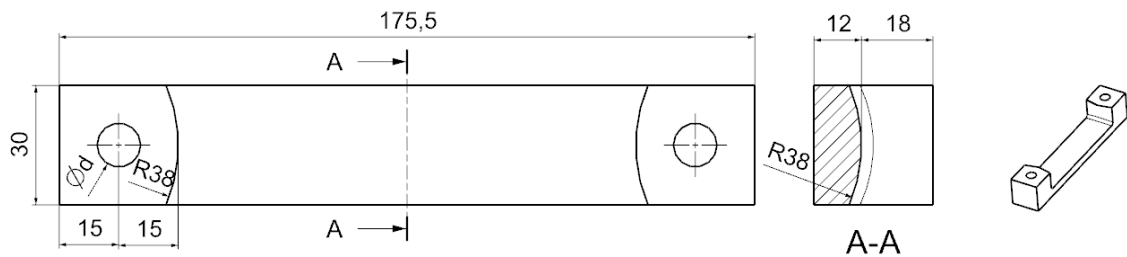
Matrice/lepidlo	Materiál	Pevnost ve smyku [N/mm^2]	Hustota [kg/m^3]
L 285 MGS	Dvousložkový epoxid	-	1230
Hysol EA9394	Dvousložkový epoxid	28.9	1500

Tab. 2 Základní vlastnosti volených matic a lepidel [8]

2.2. Závěsy podvozková noha – motorové lože

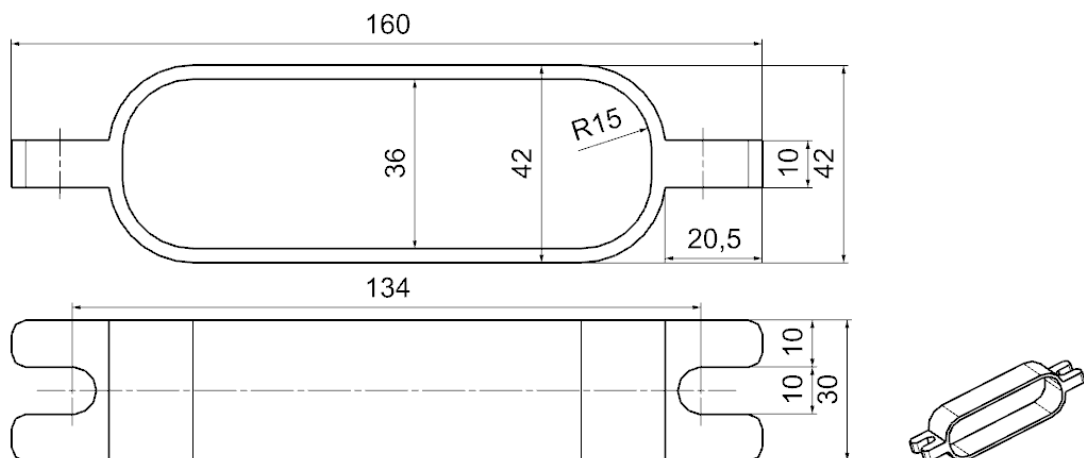
Závěsy sloužící k přenosu silových účinků z podvozku do zbylé konstrukce letounu budou celkem tři. Umožňují spojení podvozku s motorovým ložem letounu pomocí šroubového spoje.

Dva, které budou umístěny symetricky ve vzdálenosti 180 mm od osy symetrie zprostředkovávají přenos sil ve směru osy x a y . Rovněž přenáší i kroutící moment. Jsou navrženy tak, aby nebránily natočení v obou směrech, které je způsobené ohybem. Každý závěs se skládá ze dvou stejných částí ze slitiny hliníku *EN AW-2024 T3* svírajících pružnici. Jsou to bloky, jejichž stěny dotýkající se nohy mají rádius, viz *Obr. 12*. Velikost šroubů a s tím související velikost díry d závisí na samotném spojení se zbytkem konstrukce a není tedy zatím definována. Aby nedošlo k nežádoucímu poškození, tak je v místě styku umístěná pryžová vložka, která umožní roznést napětí do větší plochy.



Obr. 12 Návrh dílu tvořícího závěs přenášející síly ve směru osy x a y

Třetí závěs by měl přenášet pouze sílu ve směru osy z , aniž by zachytával ohybové momenty. Na nohu bude umístěn před slepením obou polovin podvozku, případně navléknut. Skládá se z dílu vyrobeného ze slitiny hliníku *EN AW-2024 T3*, viz *Obr. 13*. Jako protikus připevněný do zbylé konstrukce je použit lícovaný šroub, který je spojený s motorovým ložem. Díl je nalepen na nohu pomocí lepidla *Hysol EA9394*. Lepený spoj je kontrolován v kapitole 4.



Obr. 13 Návrh dílu tvořícího závěs přenášející sílu ve směru osy z

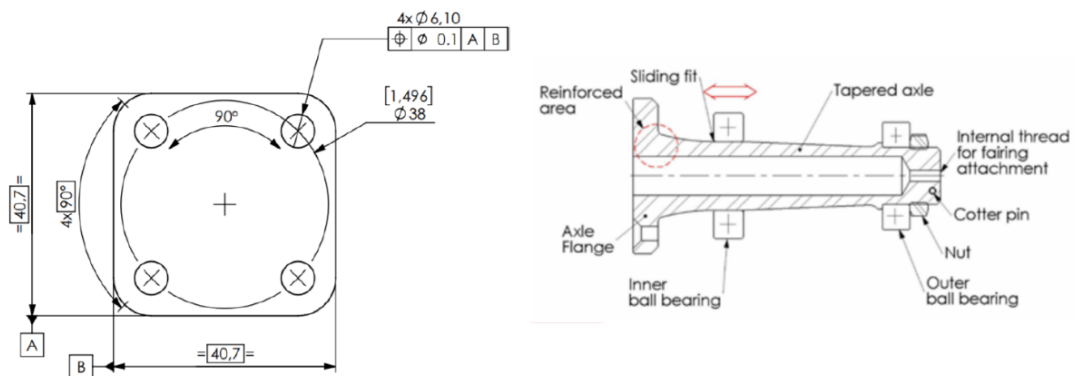
2.3. Kolo, brzda, osa

Sestava kola a k němu příslušných komponent, jako je sestava brzdy, pneumatika a osa kola byly určeny již v [2]. Všechny díly jsou z důvodu jednoduchosti voleny z katalogu výrobce Beringer.

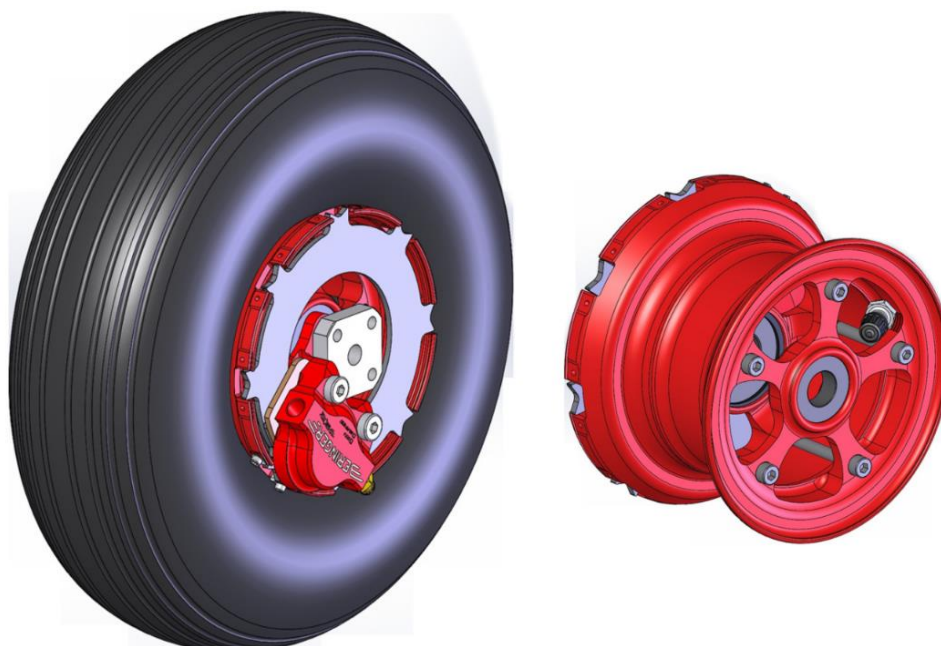
Ráfek kola má v katalogu označení RF-013, jehož dimenze jsou šířka 3,5" a průměr 4". Je určený pro letouny kategorie UL až do MTOW 500 kg. Jeho maximální statické zatížení je 230 kg. Ke kolům jsou rovněž zvoleny brzdy, skládající se z třmenu s katalogovým označením EA-009 a kotouče DSC-013. [7]

Kolu byla také volená vhodná pneumatika PAG 02 s největším průměrem 10,3" a největší šíří 3,5". Pneumatika je bezdušová. [7]

Pro tuto velikost kola výrobce doporučuje jediný typ kolové osy a to FUS-006.4. Jde o kuželovitou osu. Její maximální statická únosnost je 300 kg. V ose jsou připravené díry pro šroubový spoj s podvozkovou nohou, uvažuje se použití metrických šroubů M6. Pro zajištění kola je na ose umístěn vnější závit M15x1 a samotné zajištění je provedeno pomocí matky se závlačkou. V ose je rovněž umístěn závit M5 pro připevnění aerodynamických krytů kol. [7]



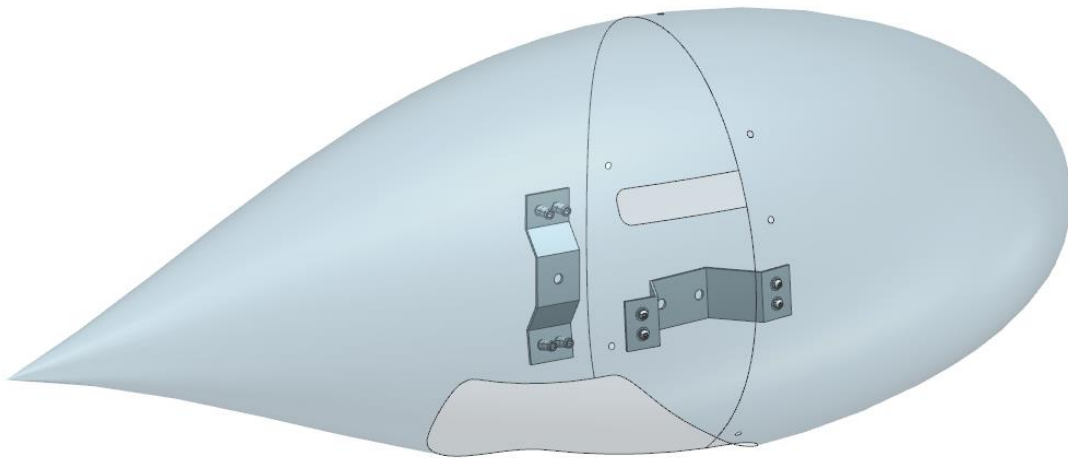
Obr. 14 Schéma kolové osy FUS-006.4 [7]



Obr. 15 Schéma sestavy kola, brzdy, osy a přidružených dílů [7]

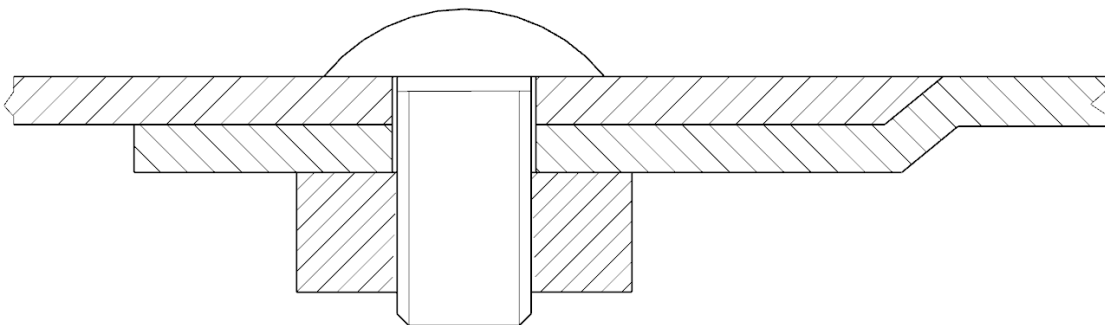
2.4. Aerodynamické kryty

Tvar aerodynamických krytů byl stanoven v [2]. Konstrukční řešení však nebylo detailně popsáno. Samotný kryt bude konstruován z kompozitu o dvou vrstvách sklené plátnové tkaniny 163 g/m^2 v orientaci $0^\circ, 90^\circ$ a $\pm 45^\circ$. Na povrch bude stejně jako u podvozkové nohy umístěna jemnější plátnová tkanina 80 g/m^2 v orientaci $\pm 45^\circ$. Jako matrice bude použita rovněž epoxidová pryskyřice *L 285 MGS* a gelcoat *EG 100 – T* pro zkvalitnění povrchu. Návrh konstrukce aerodynamického krytu zjednodušený do plochy včetně prvků sloužících k jeho připojení do sestavy lze vidět na *Obr. 16*.



Obr. 16 Sestava aerodynamického krytu

Aerodynamický kryt kola by měl být navržen tak, aby umožnil přístup a servis podvozkového kola. Tato problematika byla vyřešena děleným krytem na dvě části, které jsou rozebíratelně spojené pomocí šesti šroubů s půlkulatou hlavou a nalepovacích matic. Detail spojení v řezu lze vidět na *Obr. 17*.



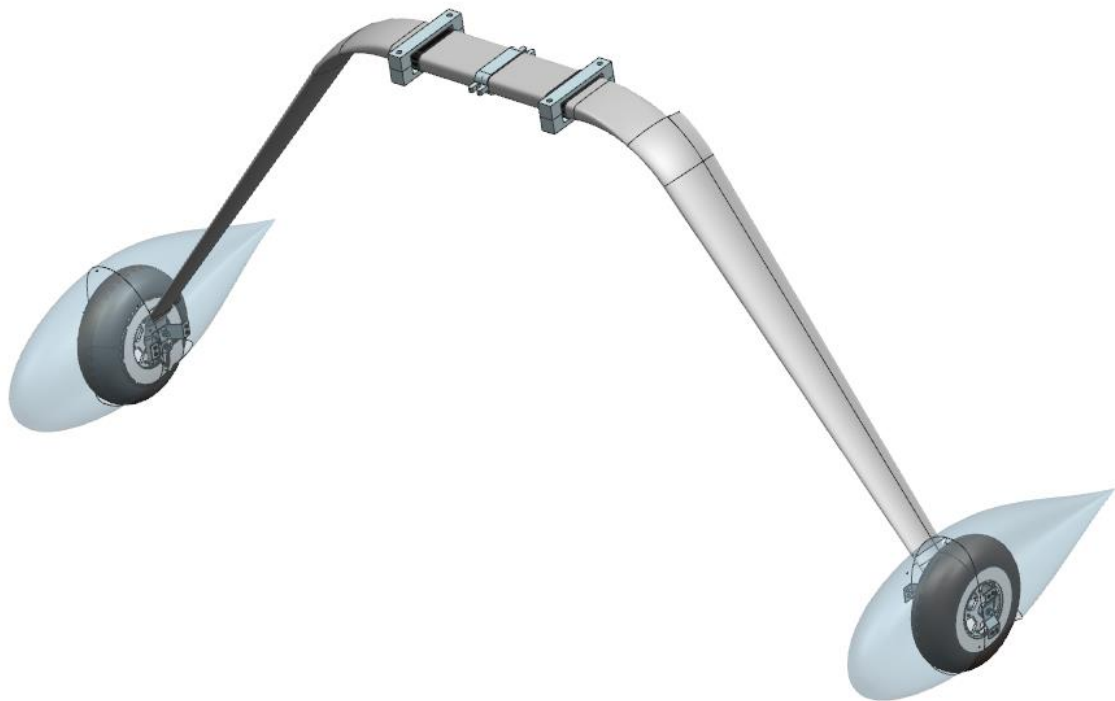
Obr. 17 Způsob spojení dvou rozebíratelných částí krytu

Spojení se zbytkem konstrukce bude zprostředkováno pomocí tvarovaných kusů plechu ze slitiny hliníku. Jeden bude připojen ke konci kolové osy a druhý prostřednictvím šroubů spojujících osu s podvozkovou nohou, viz kapitola 2.5 dále. Tvar a návrh těchto plechů je pouze orientační, jejich konstrukci by bylo vhodné upravit po případném pořízení sestavy kola (či jeho dokumentace) a to

z důvodů neznalosti přesných rozměrů. Spojení plechu a krytu je řešeno obdobným způsobem jako spojení dvou částí krytu, místo nalepovacích matic lze použít matice nýtované. V místě spoje bude kompozit zesílen dalšími dvěma vrstvami skelné tkaniny 163 g/m².

2.5. Sestava

V této podkapitole je zobrazen 3D model sestavy všech komponentů podvozku, *Obr. 18*. Je zde již zobrazen výsledný model včetně úprav provedených při dimenzování, viz kapitola 5. Potřebná zajištění některých šroubových spojů nebyla v 3D modelu zobrazena. Čtyři šrouby spojující osu kola s nohou budou zajištěny pomocí drátkovací metody a zajištění ložisek kola na ose bude provedeno pomocí matice se závlačkou dodanými výrobcem kola. V *Tab. 3* lze nalézt kusovník sestavy.



Obr. 18 Zobrazení celé sestavy hlavního podvozku

Díl	Norma, materiál	Počet
Pružná noha	Kompozitní díl	1
Ráfek kola	RF-013	2
Pneumatika	PAG 02	2
Kolová osa	FUS-006.4	2
Brzdový kotouč	DSC-013	2
Brzdový třmen	EA-009	2
Závěs středový	EN AW-2024 T6	1
Závěs stranový	EN AW-2024 T6	4
Aerodynamický kryt - přední část	Kompozitní díl	2
Aerodynamický kryt - zadní část	Kompozitní díl	2
Spojovací plechy	EN AW-2024 T6	4
Šroub M6	ISO 4014 - M6 x 25	8
Šroub M6	ISO 4017 - M6 x 12	2
Šroub M3	ISO 7380 - M3 x 6	28
Matice M6	ISO 4032 - M6	8
Matice M3	ISO 4161 - M3	28
Matice M16	ISO 4035 - M16	2
Podložka	ISO 7093-2	18
Pryžová vložka		2

Tab. 3 Kusovník sestavy

2.6. Technologie

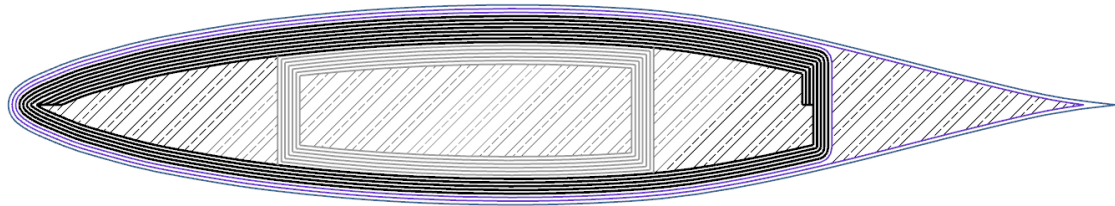
Tato podkapitola je věnována technologii výroby kompozitní nohy. Ta je důležitá i pro samotný návrh a dimenzování, protože podává informaci o vlastnostech materiálu. Především udává poměr obsahu vláken a pryskyřice, což zásadně ovlivňuje mechanické a pevnostní charakteristiky ve všech směrech.

Metoda výroby je volena s přihlédnutím k možnostem *Ústavu letadlové a kosmické techniky*. Pravděpodobně o výrobu v objemu jednotek kusů, sériovost technologie tedy nehraje roli. Důležité tedy bude především dosažení správného prosycení celého dílu, co nejmenšího obsahu pryskyřice ve výsledném vyrobeném laminátu a rovněž dobrá kvalita povrchu.

Po diskuzi všech možných variant výroby použitelných pro navržený koncept byly vybrány dvě finální varianty. Jedna využívající prepregové technologie s následným vytvrzováním ve vytvrzovací peci. Druhá infuzní metoda, kdy by se do zaformované nohy přiváděla pryskyřice pomocí současného přetlaku v místě infuze a podtlaku ve správně navržených otvorech v těsné formě. Každá metoda má své nevýhody. V případě infuze bude pravděpodobně třeba složitějšího návrhu, případně simulace proudění pryskyřice, aby došlo ke správnému prosycení celého zaformovaného dílu. V případě prepregu je třeba odhadnout místa, která by mohla být špatně prosycena, či kde by mohly vzniknout dutiny a umístit do nich dodatečnou

foliovou pryskyřici. Volenou metodou pro tento návrh je metoda využívající prepregy. [8]

Samotný postup bude následovný. Nejprve je třeba připravit, pozitivní formy z pěny ve tvaru výsledných dutin v podvozkové noze. Na tyto pěnové formy budou dále navíjeny či pokládány nařezané prepregy ze skelné tkaniny tvořící stojiny. Na ně pak budou kladeny prepregy jednosměrného uhlíku tvořící pásnice a posléze povrchové vrstvy skelného prepregu. Postup sestavení je schematicky znázorněn na *Obr. 19*.



Obr. 19 Schematicky naznačený způsob vrstvení a formování, šedě stojiny, černě pásnice, fialově potahové vrstvy

Připravená navrstvená noha je dále zavřena do negativní formy a vytvrzována ve vytvrzovací peci. Rovněž bude třeba navrhnut kritická místa z hlediska prosycení a vložit do nich pryskyřici ve formě folie. Důvodem je snaha předejít vzniku bublin či nedostatečného prosycení.

Obecně je snaha dosáhnout co největšího procenta tkaniny obsažené v kompozitu. Zdroj pro volenou metodu výroby uvádí poměr vláken v laminátu až $v_f = 0,65$. Tento odhad je velmi optimistický a po diskuzi týkající se dosahovaných hodnot na *Ústavu letadlové a kosmické techniky* byl po přihlédnutí ke složitějšímu tvaru volen konzervativnější poměr $v_f = 0,45$. [8]

3 Stanovení zatížení

V této kapitole bude stanoveno zatížení jednotlivých částí sestavy hlavního podvozku. Jedná se tedy o určení silových účinků, které jsou potřeba k dimenzování jednotlivých dílů. Výchozí informace pro jejich určení jsou základní rozměrové dispozice z kapitoly 2. Výpočty budou provedeny pro koncept A.

Rovněž je třeba znát hmotovou obálku, která udává možné kombinace polohy těžiště a hmotnosti letounu. Znalost polohy podvozku ve stavebním souřadnicovém systému letadla, ze které lze získat polohu podvozku vůči těžišti, je rovněž nezbytná. Tyto data byly čerpány z práce [1].

Pro dimenzování je velmi důležitým údajem součinitel bezpečnosti, udávající poměr mezi provozním a početním zatížením. Bude určen již v tuto chvíli, a to z toho důvodu, že se pro jednotlivé případy zatížení liší. Bylo by obtížné tyto případy bez přepočtu na početní zatížení mezi sebou srovnávat a určit ten nejvýznamnější případ.

Celkový součinitel f_u se spočte jako součet základního a doplňkového součinitele bezpečnosti. [3]

$$f_u = f \cdot f_D \quad (3.0-1)$$

Kde:

$f = 1.5$... základní součinitel bezpečnosti [3]

f_D ... doplňkový součinitel bezpečnosti se liší pro jednotlivé součásti

Aplikace	Doplňkový součinitel bezpečnosti
spoje (smykové uložení) s vůlí, zatížené rázovým namáháním nebo vibracemi	2,0
závěsy kormidel (mimo valivých a kloubových ložisek)	4,44
ložiska (klouby) v řízení táhly	2,2
ložiska (klouby) v lanovém řízení	1,33
odlitky	2,0
kování – platí pro <ul style="list-style-type: none"> - všechny prvky kování, - všechny spojovací prvky, - otlačení (u pevného uložení) 	1,15
bezpečnostní pásy a sedačky	1,33

Tab. 4 Doplňkové součinitele bezpečnosti pro jednotlivé případy [3]

Co se týče kompozitních konstrukcí předpis rovněž uvádí:

„Výklad použití doplňkových součinitelů pro kompozitové konstrukce:

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:

- a. součásti či dílu, na který bude vztahován,*
- b. přesnosti výpočtů a jejich spolehlivosti,*
- c. předložených zkouškách vzorků kompozitového materiálu a jejich výsledcích, a*
- d. 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.“ [3]

Pro kompozitní konstrukci samotné nohy byla po konzultaci autora práce a vedoucího práce volena různá hodnota pro základní případy zatížení f_{Dz} a pro doplňkové případy zatížení f_{Dd} . Důvodem těchto volených hodnot je způsob průběhu shazovací zkoušky podvozku.

$$f_{Dz} = 1,00$$

$$f_{Dd} = 1,25$$

Celkový součinitel pro výpočet pevnosti nohy.

$$f_{uz} = 1,5 \cdot 1,00 = 1,5$$

$$f_{ud} = 1,5 \cdot 1,25 = 1,875$$

3.1. Síly působící na kola hlavního podvozku

První fází výpočtu zatížení letounu je určení vnějších provozních zatížení působících na konstrukci, konkrétně na kola hlavního podvozku v místě styku s přistávací plochou. Postup je stanoven předpisem *UL2 1. část*.

Výpočet musí být proveden pro všechny důležité body hmotové obálky, viz *Tab. 5*. Hodnoty souřadnice ve směru osy x jsou brány ze stavebního souřadnicového systému, pro vzájemnou polohu těžiště a podvozku je třeba ještě znát souřadnice styku podvozkových kol (hlavních i ostruhového) s povrchem a další důležité úhly.

$$x_{LG} = 2\,096 \text{ mm} \dots \text{souřadnice dotyku kol a povrchu ve směru osy } x \text{ [1]}$$

$$x_{TD} = 5\,847 \text{ mm} \dots \text{souřadnice osy ostruhového kola ve směru } x \text{ [1]}$$

$$y_{CG} = 2\,000 \text{ mm} \dots \text{souřadnice těžiště ve směru } y \text{ (střední hodnota) [1]}$$

$$y_{LG} = 772 \text{ mm} \dots \text{souřadnice dotyku kol a povrchu ve směru osy } y \text{ [1]}$$

$$\varphi = 15^\circ \dots \text{úhel postoje letounu [1]}$$

Bod hmotové obálky	x_{CG} [mm]	m [kg]
1 (PC)	2540	252.3
2 (PC 80 kg)	2605	272.3
3 (300 kg)	2607	300
4 (ZC 80 kg)	2610	345
5 (ZC)	2691	300.3
6	2569	345
7	2585	345
8	2608	345
9	2683	345
10	2688	302.3
11	2608	270.3
12	2606	272.3
13	2542	250.3
14	2577	260.3
15	2579	262.3

Tab. 5 Hmotová obálka [1]

Následující výpočty budou provedeny pro všechny body hmotové obálky, dosazení bude vzorově provedeno pouze pro první případ přední centráže.

Nejprve je zkontrolována klesající rychlost w_s . [3]

$$w_s = 0,51 \cdot \sqrt[4]{m \cdot \frac{g}{S}}; w_s \geq 1,5 \text{ ms}^{-1} \quad (3.1-2)$$

Kde:

$m = 252,3 \text{ kg}$... hmotnost letounu, viz. hmotová obálka [1]

$g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$... tíhové zrychlení [3]

$S = 5,029 \text{ m}^2$... plocha křídla [1]

$$w_s = 0,51 \cdot \sqrt[4]{252,3 \cdot \frac{9,81}{5,029}}$$
$$w_s = 2,4 \text{ ms}^{-1}$$

$$2,4 \text{ ms}^{-1} \geq 1,5 \text{ ms}^{-1} \dots \text{platí}$$

Dále je třeba určit provozní násobek n_{pr} zatížení v těžišti letounu. [3]

$$n_{pr} = n_k + 0,67 \quad (3.1-3)$$

Kde n_k je provozní násobek na kolech podvozku. [3]

$$n_k = \frac{0,0132 \cdot \sqrt{m \cdot \frac{g}{S}} + \frac{y}{3}}{y_{ef}} \quad (3.1-4)$$



Kde y je celková délka tlumení. [3]

$$y = y_{PN} + y_{TL} \quad (3.1-5)$$

A efektivní délka tlumení y_{ef} . [3]

$$y_{ef} = \frac{y_{PN}}{2} + \frac{y_{TL}}{2} \quad (3.1-6)$$

Předpokládané stlačení pneumatiky y_{PN} . [12]

$$y_{PN} = 0,45 \cdot (D_{pn} - D_{ráf}) \quad (3.1-7)$$

$D_{pn} = 10,3'' = 262 \text{ mm}$... největší průměr pneumatiky

$D_{ráf} = 4'' = 102 \text{ mm}$... průměr ráfku kola

$$y_{PN} = 0,45 \cdot (262 - 102)$$

$$y_{PN} = 72 \text{ mm} = 0,072 \text{ m}$$

Předpokládané stlačení pružné nohy y_{TL} je nejprve pouze odhadnuto, protože reálné bude vycházet z dimenzí a bude třeba ho určit iteračně. Všechny dále znázorněné výpočty a výsledky jsou platné pro první iteraci.

$$y_{TL} = 190 \text{ mm} = 0,19 \text{ m}$$

$$y = 0,072 + 0,19$$

$$y = 0,262 \text{ m}$$

$$y_{ef} = \frac{0,072}{2} + \frac{0,19}{2}$$

$$y_{ef} = 0,131 \text{ m}$$

$$n_k = \frac{0,0132 \cdot \sqrt{252,3 \cdot \frac{9,81}{5,029}} + \frac{0,262}{3}}{0,131}$$

$$n_k = 2,9$$

$$n_{pr} = 2,9 + 0,67$$

$$n_{pr} = 3,57$$

Provozní násobek zatížení v těžišti letounu vyšel ve všech případech menší než 4, což je velmi žádoucí, protože se nemusí soustředně hmoty dimenzovat na větší násobek než 4, což by znamenalo další nárůst hmotnosti. Při dimenzování letounu bude snaha, aby byla tato skutečnost zachována. [3]

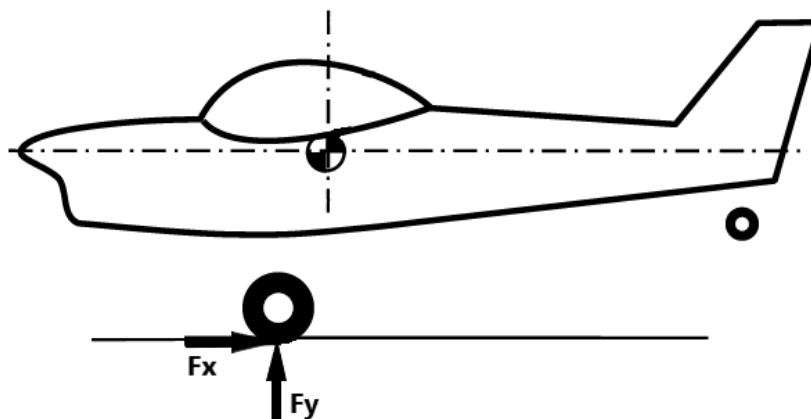
Bod hmotové obálky	ws [ms ⁻¹]	n _k [-]	n _{pr} [-]
1 (PC)	2.40	2.90	3.57
2 (PC 80 kg)	2.45	2.99	3.66
3 (300 kg)	2.51	3.10	3.77
4 (ZC 80 kg)	2.60	3.28	3.95
5 (ZC)	2.51	3.11	3.78
6	2.60	3.28	3.95
7	2.60	3.28	3.95
8	2.60	3.28	3.95
9	2.60	3.28	3.95
10	2.51	3.11	3.78
11	2.44	2.98	3.65
12	2.45	2.99	3.66
13	2.40	2.89	3.56
14	2.42	2.94	3.61
15	2.43	2.95	3.62

Tab. 6 Vypočtené násobky jednotlivých bodů hmotové obálky

Samotné způsoby zatížení, jsou celkem čtyři a jsou určeny pro každý bod hmotové obálky. Posléze jsou u každého případu voleny nejkritičtější silové účinky, na které bude podvozek dimenzován.

Jak bylo dříve uvedeno, bude rovnou určeno početní zatížení podvozkové nohy. Vynásobením provozního zatížení celkovým součinitelem bezpečnosti lze získat početní zatížení, proto všechny následující vzorce této podkapitoly pro výpočet silových účinků obsahují tuto konstantu.

Prvním případem je vodorovné přistání, tedy přistání, při kterém se povrchu dotknou nejprve hlavní podvozková kola. V tomto případě na kola působí svislé síly F_y a vodorovné síly F_x . Na každé kolo samostatně tedy působí polovina těchto sil. Síly působící na jedno kolo jsou označeny F_y – svislé a F_x – vodorovné. Způsob zatěžování lze vidět na Obr. 20. [3]



Obr. 20 Zobrazení působících sil pro případ vodorovného přistání [3]

Svislá síla F_y je určena dle předpisu. [3]

$$F_y = f_{uz} \cdot 0,5 \cdot (n_{pr} - 0,667) \cdot m \cdot g \quad (3.1-8)$$

$$F_y = 1,5 \cdot 0,5 \cdot (3,57 - 0,667) \cdot 252,3 \cdot 9,81$$

$$F_y = 5\,393\,N$$

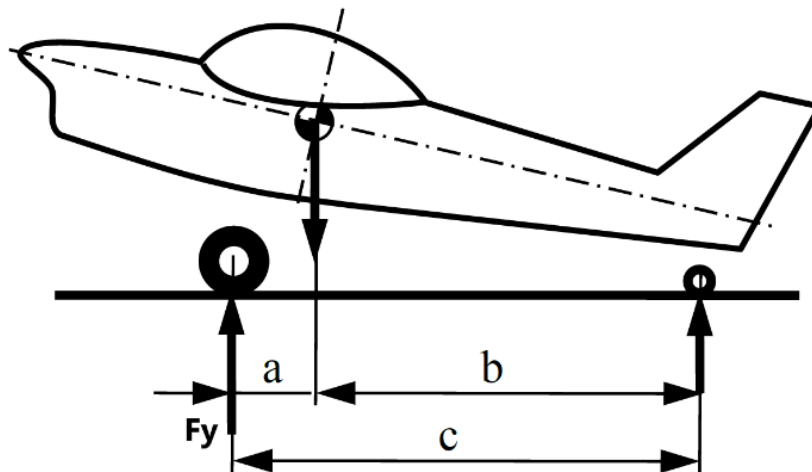
Vodorovná síla F_x je rovněž určena dle předpisu. [3]

$$F_x = f_{uz} \cdot 0,5 \cdot 0,25 \cdot n_{pr} \cdot m \cdot g \quad (3.1-9)$$

$$F_x = 1,5 \cdot 0,5 \cdot 0,25 \cdot 3,57 \cdot 252,3 \cdot 9,81$$

$$F_x = 1\,658\,N$$

Druhým případem přistání je s velkým úhlem náběhu, tedy přistání na tři body. V této variantě se vodorovná síla ve směru x nevyskytne z důvodu zapojení sil na ostruze do momentové rovnováhy letounu. Způsob působení svislé síly F_y a dále potřebné rozměry pro její výpočet jsou zobrazeny na Obr. 21. [3]



Obr. 21 Zobrazení působící síly pro případ přistání s velkým úhlem náběhu [3]

Svislá síla F_y je určena dle předpisu. [3]

$$F_y = f_{uz} \cdot 0,5 \cdot (n_{pr} - 0,667) \cdot m \cdot g \cdot \frac{b}{c} \quad (3.1-10)$$

Rozměry b a c se stanoví pomocí známé geometrie a hodnot uvedených na začátku podkapitoly.

$$c = \frac{x_{LG} - x_{TD}}{\cos \varphi} \quad (3.1-11)$$

$$c = \frac{2\,096 - 5\,847}{\cos 15^\circ}$$

$$c = 3\,883\,mm$$

$$b = c - \sqrt{(y_{CG} - y_{LG})^2 + (x_{CG} - x_{LG})^2} \cdot \cos \varphi \quad (3.1-12)$$

$$b = 3883 - \sqrt{(2000 - 772)^2 + (2540 - 2096)^2} \cdot \cos 15^\circ$$

$$b = 2622 \text{ mm}$$

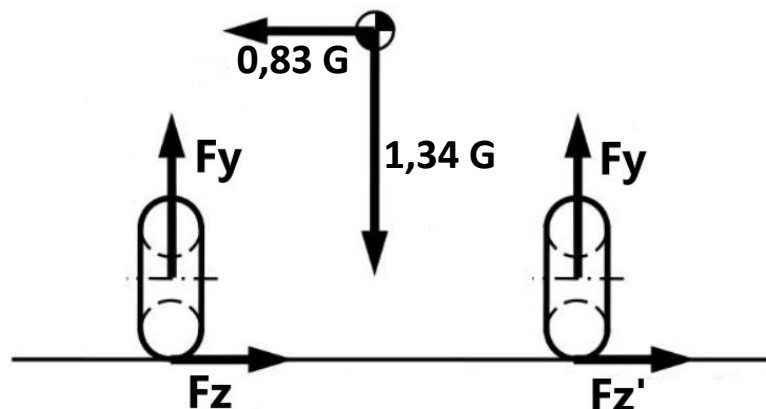
$$F_y = 1,5 \cdot 0,5 \cdot (3,57 - 0,667) \cdot 252,3 \cdot 9,81 \cdot \frac{2622}{3883}$$

$$F_y = 3641 \text{ N}$$

Případy přistání	Vodorovné			S velkým úhlem náběhu		
	Fy [N]	Fx [N]	Fz [N]	Fy [N]	Fx [N]	Fz [N]
1 (PC)	5393	1658	0	3641	0	0
2 (PC 80 kg)	5994	1833	0	4012	0	0
3 (300 kg)	6858	2083	0	4589	0	0
4 (ZC 80 kg)	8335	2507	0	5575	0	0
5 (ZC)	6868	2085	0	4537	0	0
6	8335	2507	0	5607	0	0
7	8335	2507	0	5595	0	0
8	8335	2507	0	5577	0	0
9	8335	2507	0	5513	0	0
10	6932	2104	0	4581	0	0
11	5933	1815	0	3970	0	0
12	5994	1833	0	4012	0	0
13	5334	1640	0	3600	0	0
14	5631	1727	0	3784	0	0
15	5691	1745	0	3823	0	0

Tab. 7 Vypočtené početní zatížení pro základní případy přistání, kritické body zvýrazněny

Třetím případem je případ bočního zatížení podvozku. Jedná se o doplňkový případ. V této variantě přibude síla ve třetím směru z, která je na každé kolo jiná. Působení sil je zobrazeno na Obr. 22. [3]



Obr. 22 Zobrazení působících sil pro případ bočního zatížení [3]

Svislá síla F_y je určena dle předpisu. [3]

$$F_y = f_{ud} \cdot 0,67 \cdot m \cdot g \quad (3.1-13)$$

$$F_y = 1,875 \cdot 0,67 \cdot 252,3 \cdot 9,81$$

$$F_y = 3\,109\,N$$

Vodorovná boční síla dovnitř F_z a vně F_z' je rovněž určena dle předpisu. [3]

$$F_z = f_{ud} \cdot 0,5 \cdot m \cdot g \quad (3.1-14)$$

$$F_z' = f_{ud} \cdot 0,33 \cdot m \cdot g \quad (3.1-15)$$

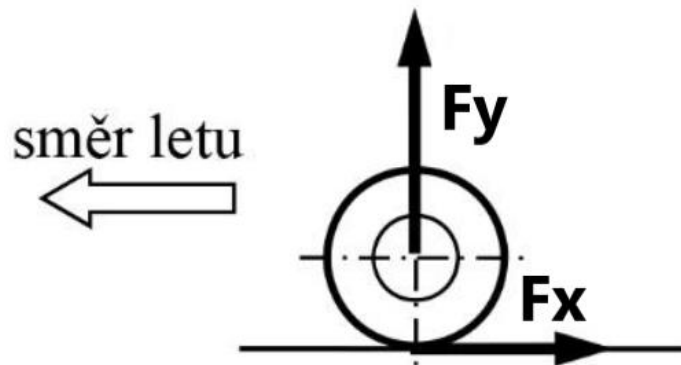
$$F_z = 1,875 \cdot 0,5 \cdot 252,3 \cdot 9,81$$

$$F_z = 2\,320\,N$$

$$F_z' = 1,875 \cdot 0,33 \cdot 252,3 \cdot 9,81$$

$$F_z' = 1\,531\,N$$

Čtvrtý případ, rovněž doplňkový, je zatížení kol při brždění, kdy bude ze všech případů největší síla ve směru x . Působení je znázorněno na Obr. 23. [3]



Obr. 23 Zobrazení působících sil pro případ zatížení při brždění [3]

Svislá síla F_y je určena dle předpisu. [3]

$$F_y = f_{ud} \cdot 0,67 \cdot m \cdot g \quad (3.1-16)$$

$$F_y = 1,875 \cdot 0,67 \cdot 252,3 \cdot 9,81$$

$$F_y = 3\,109\,N$$

Vodorovná síla F_x je rovněž určena dle předpisu. [3]

$$F_x = f_{ud} \cdot 0,54 \cdot m \cdot g \quad (3.1-17)$$

$$F_x = 1,875 \cdot 0,54 \cdot 252,3 \cdot 9,81$$

$$F_x = 2\,506\,N$$

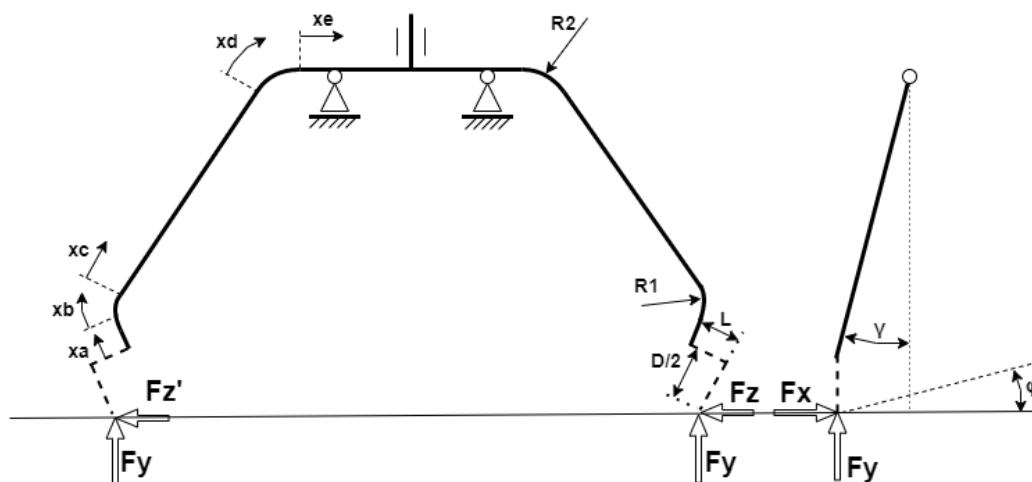
Případy přistání	BOČNÍ				BRŽDĚNÍ		
	Fy [N]	Fx [N]	Fz [N]	Fz' [N]	Fy [N]	Fx [N]	Fz [N]
1 (PC)	3109	0	2320	1531	3109	2506	0
2 (PC 80 kg)	3356	0	2504	1653	3356	2705	0
3 (300 kg)	3697	0	2759	1821	3697	2980	0
4 (ZC 80 kg)	4252	0	3173	2094	4252	3427	0
5 (ZC)	3701	0	2762	1823	3701	2983	0
6	4252	0	3173	2094	4252	3427	0
7	4252	0	3173	2094	4252	3427	0
8	4252	0	3173	2094	4252	3427	0
9	4252	0	3173	2094	4252	3427	0
10	3725	0	2780	1835	3725	3003	0
11	3331	0	2486	1641	3331	2685	0
12	3356	0	2504	1653	3356	2705	0
13	3085	0	2302	1519	3085	2486	0
14	3208	0	2394	1580	3208	2585	0
15	3233	0	2412	1592	3233	2605	0

Tab. 8 Vypočtené početní zatížení pro dva doplňkové případy přistání, kritické body zvýrazněny

3.2. Silové účinky v noze letounu

Spočítané silové účinky působící na kola je dále nutné převést na účinky působící na pružnou nohu letounu.

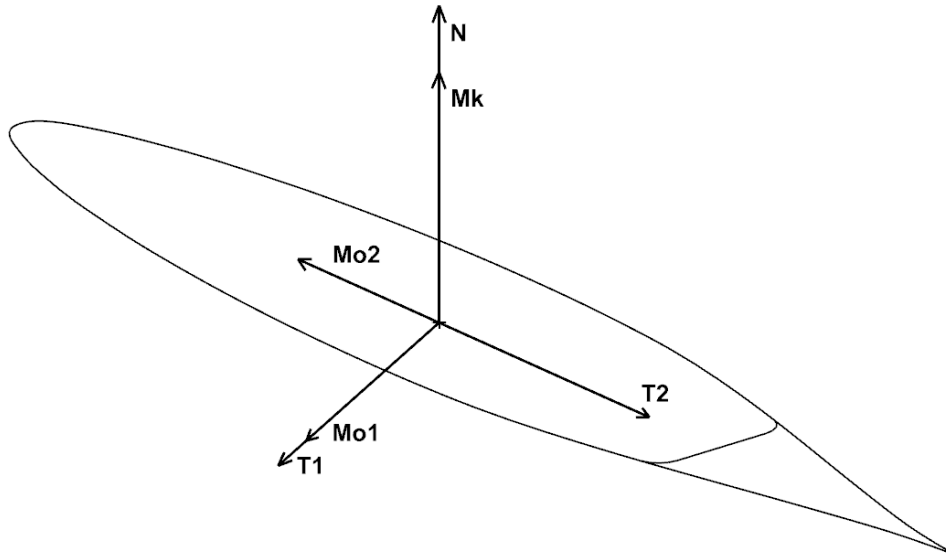
Pro zjednodušení nohu nahradíme křivým prutem v místě největší tloušťky, tedy ve 45 % hloubky průřezu letadlového profilu. Rovněž lze uvažovat pouze polovinu celé pružnice, protože se jedná o symetrický díl. Zjednodušené schéma pro statický výpočet je znázorněno na Obr. 24.



Obr. 24 Schéma pro statický výpočet se zobrazeným vnějšími silami

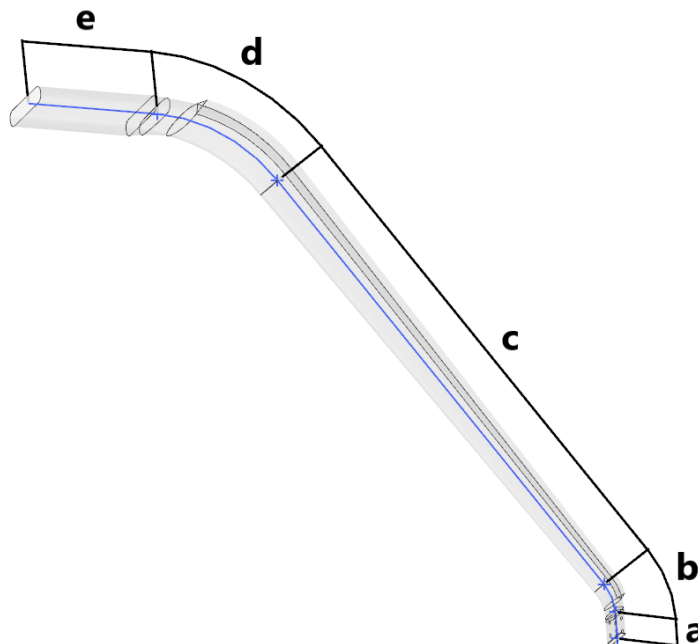
Dále je třeba vyjádřit silové účinky na kole jako vnitřní silové účinky v noze, které budou proměnné po celé délce nohy. Vzhledem k tomu, jakým způsobem se bude později noha dimenzovat, budou v každém místě určeny tři samostatné síly, normálová N ve směru prutu, a dvě tečné T_1 a T_2 , jedna ve směru odtokové

hrany a druhá ve směru kolmém na první. Ve směru normálové síly N rovněž působí kroutící moment M_k a ve směru tečných sil T_1 a T_2 příslušné ohybové momenty M_{o1} a M_{o2} . vnitřní silové účinky jsou zobrazeny na Obr. 25.



Obr. 25 Znáznornění a popis vnitřních silových účinků

Tyto síly musí být spočteny po celé délce prutu, v dostatečném počtu řezů. Budou určeny pro všechny kritické body hmotové obálky ve všech čtyřech případech zatížení, viz. kapitola 3.1. Pro další výpočet bude prut nahrazující nohu rozdělen na části a - e, viz Obr. 26.



Obr. 26 Rozdělení prutu pro další výpočet

Níže uvedené rovnice a výpočty budou použity k výpočtu všech případů s jistými obměnami. Je napočtena pouze jedna polovina pružnice, druhá je zatěžována symetricky stejně. Pouze v případě stranového zatížení bude třeba napočítat obě symetrické části podvozkové nohy z důvodu nesymetrického zatížení.

Nejprve je třeba převést síly působící v kole letounu do místa kde osa kola prochází středem nohy, viz *Obr. 24*.

$$\begin{aligned}N_0 &= F_x \cdot \sin(\gamma + \varphi) + F_y \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma + \varphi) + F_z \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma + \varphi) \\T_{10} &= -F_y \cdot \sin(\alpha) + F_z \cdot \cos(\alpha) \\T_{20} &= F_x \cdot \cos(\gamma + \varphi) - F_y \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma + \varphi) - F_z \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma + \varphi) \\M_{k0} &= F_x \cdot L \cdot \cos(\gamma + \varphi) + F_y \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\gamma + \varphi) - L \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma + \varphi) \right) \\&\quad - F_z \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\gamma + \varphi) + L \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma + \varphi) \right) \\M_{o10} &= F_x \cdot \frac{D}{2} \\M_{o20} &= F_x \cdot L \cdot \sin(\gamma + \varphi) + F_y \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma + \varphi) - L \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma + \varphi) \right) \\&\quad + F_z \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma + \varphi) + L \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma + \varphi) \right)\end{aligned}\tag{3.2-18}$$

Kde (viz *Obr. 24*):

F_x, F_y, F_z ... kritické síly na kola určené v kapitole 3.1

$D_{pn} = 10,3'' = 262 \text{ mm}$... největší průměr kola s pneumatikou

$L = 65 \text{ mm}$... konstrukční vzdálenost středu kola a prutu

$\alpha = 2^\circ$... úhel svírající část prutu s rovinou symetrie

$\gamma = 3^\circ$... úhel svírající osa s rovinou X

$\varphi = 0^\circ$... pro vodorovný případ, $\varphi = 15^\circ$... pro tři zbylé případy

Průběh silových účinků v části a se určí pomocí proměnné souřadnice x_a .

$$\begin{aligned}N_a &= N_0 \\T_{1a} &= T_{10} \\T_{2a} &= T_{20} \\M_{ka} &= M_{k0} \\M_{o1a} &= M_{o10} + \int T_{2a} dx_a \\M_{o2a} &= M_{o20} + \int T_{1a} dx_a\end{aligned}$$

(3.2-19)

Průběh silových účinků v části b se určí pomocí proměnné souřadnice x_b .

$$\begin{aligned}N_b &= N_a \cdot \cos\left(\frac{x_b}{R_1}\right) - T_{1a} \cdot \sin\left(\frac{x_b}{R_1}\right) \\T_{1b} &= T_{1a} \cdot \cos\left(\frac{x_b}{R_1}\right) + N_a \cdot \sin\left(\frac{x_b}{R_1}\right) \\T_{2b} &= T_{2a}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{kb} &= M_{ka} \cdot \cos\left(\frac{x_b}{R_1}\right) - M_{o1a} \cdot \sin\left(\frac{x_b}{R_1}\right) \\M_{o1b} &= M_{o1a} \cdot \cos\left(\frac{x_b}{R_1}\right) + M_{ka} \cdot \sin\left(\frac{x_b}{R_1}\right) + \int T_{2b} dx_b \\M_{o2b} &= M_{o2a} + \int T_{1b} dx_b\end{aligned}\tag{3.2-20}$$

Kde:

$$R_1 = 70 \text{ mm} \dots \text{r\u00e1dius prutu v m\u00edst\u011b } b$$

Pr\u00fab\u011bh silov\u00fdch \u00fasink\u00fd v \u010d\u00e1sti c se ur\u010d\u00ed pomoc\u00ed prom\u011bn\u011bn\u00e9 sou\u00f1adnice x_c .

$$\begin{aligned}N_c &= N_b(x_b = b) \\T_{1c} &= T_{1b}(x_b = b) \\T_{2c} &= T_{2b} \\M_{kc} &= M_{kb}(x_b = b) \\M_{o1c} &= M_{o1b}(x_b = b) + \int T_{2c} dx_c \\M_{o2c} &= M_{o2b}(x_b = b) + \int T_{1c} dx_c\end{aligned}\tag{3.2-21}$$

Pr\u00fab\u011bh silov\u00fdch \u00fasink\u00fd v \u010d\u00e1sti d se ur\u010d\u00ed pomoc\u00ed prom\u011bn\u011bn\u00e9 sou\u00f1adnice x_d .

$$\begin{aligned}N_d &= N_c \cdot \cos\left(\frac{x_d}{R_2}\right) - T_{1c} \cdot \sin\left(\frac{x_d}{R_2}\right) \\T_{1d} &= T_{1c} \cdot \cos\left(\frac{x_d}{R_2}\right) + N_c \cdot \sin\left(\frac{x_d}{R_2}\right) \\T_{2d} &= T_{2c} \\M_{kd} &= M_{kc} \cdot \cos\left(\frac{x_d}{R_2}\right) - M_{o1c} \cdot \sin\left(\frac{x_d}{R_2}\right) \\M_{o1d} &= M_{o1c} \cdot \cos\left(\frac{x_d}{R_2}\right) + M_{kc} \cdot \sin\left(\frac{x_d}{R_2}\right) + \int T_{2d} dx_d \\M_{o2d} &= M_{o2c} + \int T_{1d} dx_d\end{aligned}\tag{3.2-22}$$

Kde:

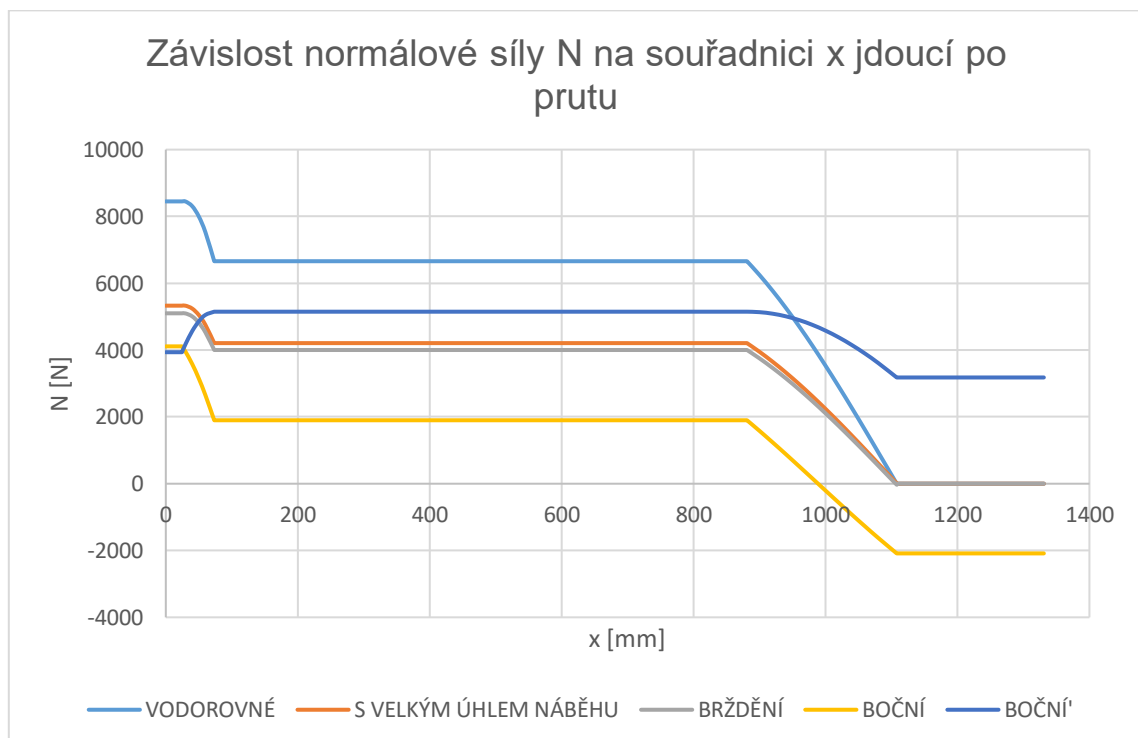
$$R_2 = 250 \text{ mm} \dots \text{r\u00e1dius prutu v m\u00edst\u011b } d$$

Pr\u00fab\u011bh silov\u00fdch \u00fasink\u00fd v \u010d\u00e1sti e se ur\u010d\u00ed pomoc\u00ed prom\u011bn\u011bn\u00e9 sou\u00f1adnice x_e . V m\u00edst\u011b $x_e = 41,1$, tedy v m\u00edst\u011b z\u00e1v\u011bsu vzd\u00e1len\u00e9ho 180 mm od roviny symetrie, p\u00fasob\u00ed reak\u010dn\u00ed s\u00edly proti sm\u011bru sil T_{o1e} a T_{o2e} a proti momentu M_{ke} . Tyto s\u00edly se z hlediska p\u00fasoben\u00ed na nohu vyru\u0161\u00ed.

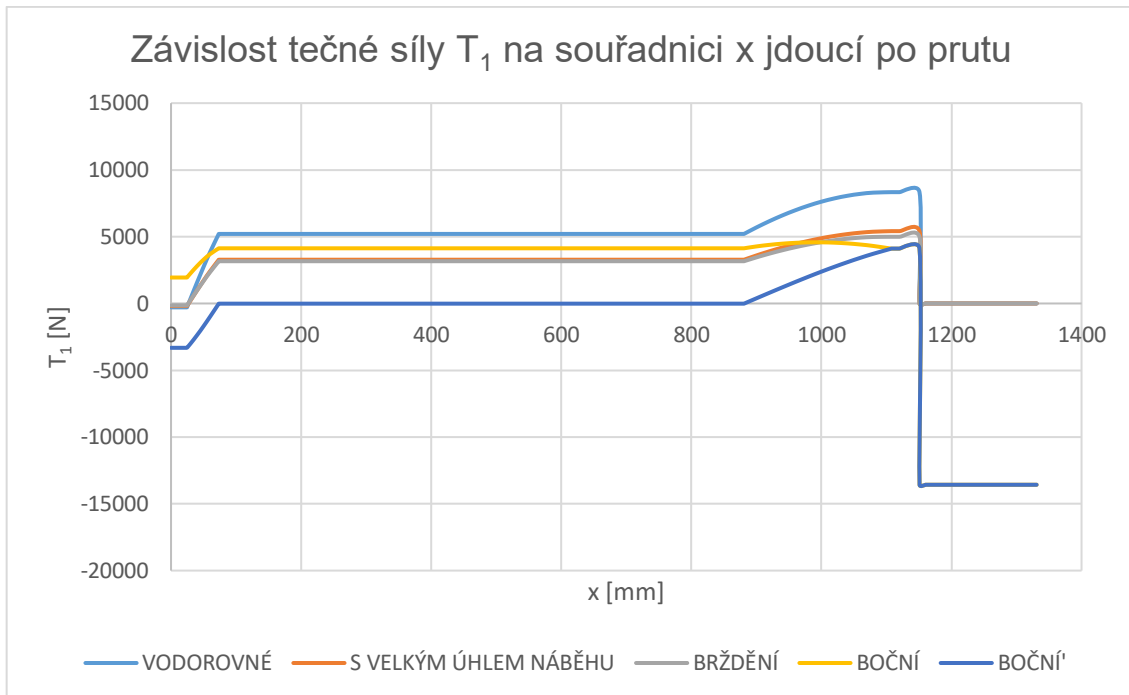
$$\begin{aligned}
 N_e &= N_d(x_d = d) = 0 \\
 T_{1e} &= T_{1d}(x_d = d) \cdot \cos(\gamma) - T_{2d} \cdot \sin(\gamma), x_d \in \langle 0; 43,1 \rangle \\
 T_{2e} &= T_{2d} \cdot \cos(\gamma) + T_{1d}(x_d = d) \cdot \sin(\gamma), x_d \in \langle 0; 43,1 \rangle \\
 T_{1e} &= 0, x_d \in \langle 43,1; 223,1 \rangle \\
 T_{2e} &= 0, x_d \in \langle 43,1; 223,1 \rangle \\
 M_{ke} &= M_{kd}(x_d = d), x_d \in \langle 0; 43,1 \rangle \\
 M_{ke} &= 0, x_d \in \langle 43,1; 223,1 \rangle \\
 M_{o1e} &= M_{o1d}(x_d = d) \cdot \cos(\gamma) + M_{o2d}(x_d = d) \cdot \sin(\gamma) + \int T_{2e} dx_e \\
 M_{o2e} &= M_{o2d}(x_d = d) \cdot \cos(\gamma) - M_{o1d}(x_d = d) \cdot \sin(\gamma) + \int T_{1e} dx_e
 \end{aligned}
 \tag{3.2-23}$$

Výsledky, tedy vypočtená zatížení ve všech čtyřech případech budou v této kapitole prezentovány ve formě grafů, z důvodu větší přehlednosti. Tabulka hodnot pak bude obsažena v *Příloze 2*.

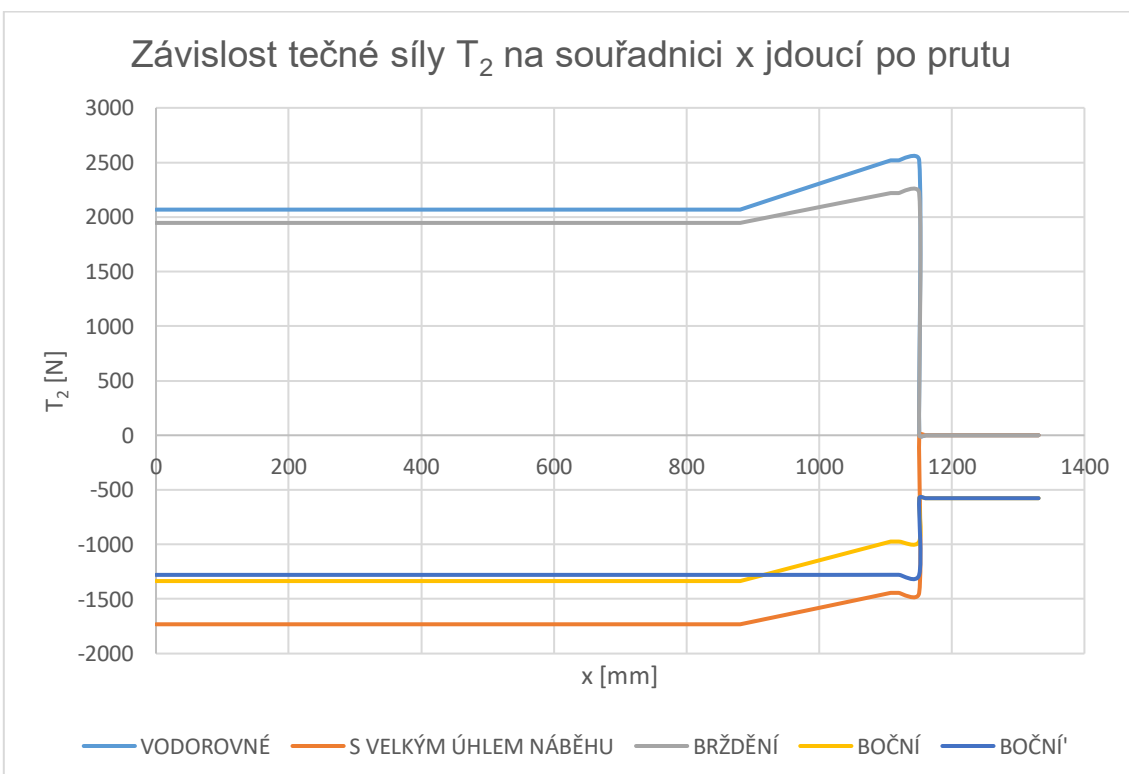
Normálová síla N bude největší pro vodorovné přistání na větší části prutu. V části prutu d , kde prut přechází do vodorovného směru, je největší normálová síla od bočního zatížení.



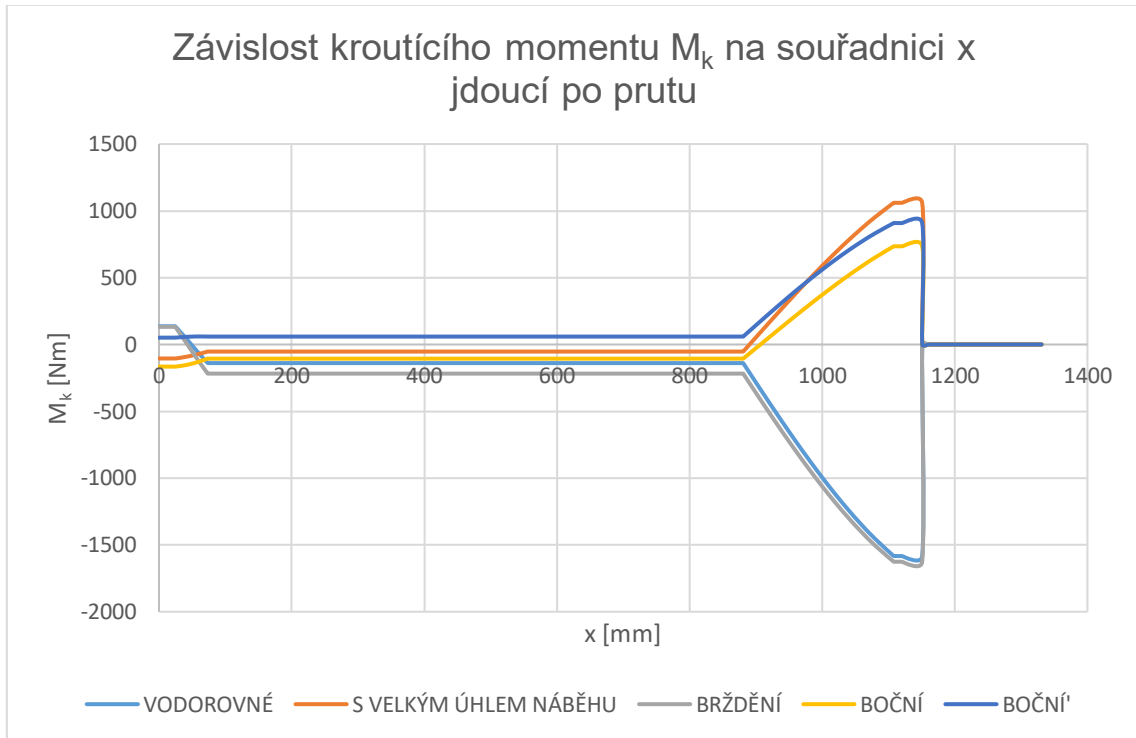
Tečná síla T_1 bude rovněž největší pro případ vodorovného přistání na velké části prutu. V místě mezi dvěma závěsy se pro symetrické případy tato síla bude rovnat nule. V případě bočního nesymetrického zatížení zde však působí v celku velká síla $T_1 = -13\,574\text{ N}$. Ta je způsobena rozdílem reakcí v závěsech v tomto případě zatížení.



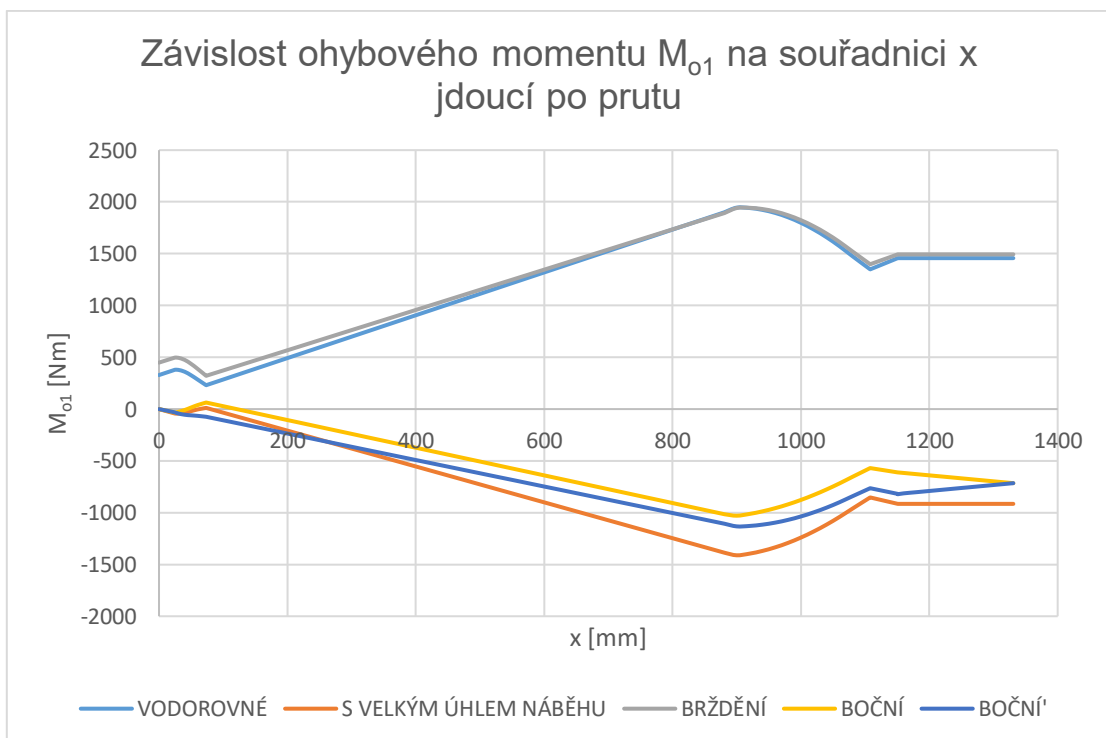
Tečná síla T_2 se chová podobně jako síla T_1 . Rovněž bude největší pro případ vodorovného přistání na větší části prutu a v místě mezi dvěma závěsy bude působit větší síla pro nesymetrické boční zatěžování $T_2 = -576\text{ N}$.



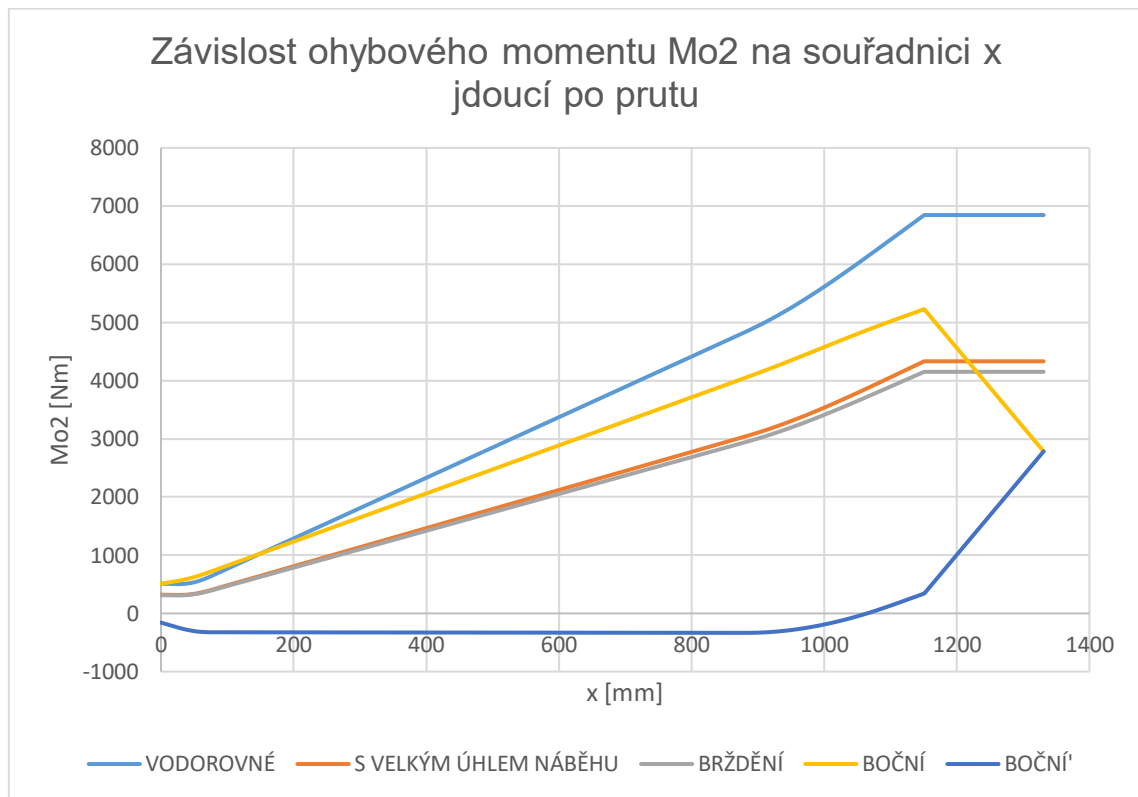
Krouticí moment M_k je v celku malý ve všech případech zatížení, významným se stává až v případě, kdy prut přechází do vodorovné části a největší bude v místě závěsů, záporný pro případ zatížení při brždění a kladný pro případ zatížení s velkým úhlem náběhu.



Ohybový moment M_{o1} je výrazně menší než ohybový moment v druhém směru M_{o2} . Největší kladný moment bude rovněž pro případ vodorovného přistání a brždění a největší záporný bude pro případ přistání s velkým úhlem náběhu.



Ohybový moment M_{o2} je dominantní. Největší bude pro případ vodorovného přistání. Je pro dimenzování nejdůležitější a již v této chvíli lze odhadovat, že případ vodorovného přistání bude nejkritičtější.



4 Dimenzování podvozku

Dimenzování, tedy návrh důležitých rozměrů některých částí, vychází z pevnostní kontroly. Zatížení potřebné pro určení pevnosti bylo napočteno v kapitole 3 a některé potřebné rozměry a materiálové složení bylo určeno v kapitole 2. Pevnostní návrh rovněž podléhá předpisovým požadavkům *UL2 1. část*. Z předpisu vyplývá, že spočtené zatížení je zatížení provozní, tedy největší očekávané zatížení v provozu. Početní zatížení je pak provozní zatížení vynásobené celkovým součinitelem bezpečnosti. Předpis rovněž říká, že v případě změny zatížení, která je způsobená velkými nezanedbatelnými deformacemi, je třeba tyto změny vzít v potaz. [3]

Základní pevnostní kontrola pro určení výchozích dimenzí bude provedena analytickou cestou s využitím teorie pružnosti. Bude provedena bez uvážení deformací podvozku, ačkoliv v tomto případě nejsou zanedbatelné.

Z výstupu analytického výpočtu bude vytvořen vstup pro výpočet pomocí metody konečných prvků.

O pevnosti předpis informuje:

- „1. Konstrukce musí být schopna přenést provozní zatížení bez trvalých deformací. Při všech zatíženích až do provozního zatížení nesmí vzniklé deformace omezit bezpečný provoz. To platí především pro soustavy řízení.*
- 2. Konstrukce musí být schopna přenášet početní zatížení nejméně 3 sekundy, aniž by došlo k poruše. Třísekundový limit ovšem neplatí, jestliže je pevnostní průkaz prováděn dynamickou zkouškou, při níž jsou prokazovány skutečné zatěžovací podmínky.“ [3]*

4.1. Dimenzování pružné nohy

V první řadě bude dimenzována pružná noha tvořená kompozitní konstrukcí, protože zpětně ovlivní velikost celkového tlumení podvozku. V kapitole 2 byly určeny tři možné koncepty konstrukce určující pevnostní návrh. Nejprve bude proveden analytický výpočet potřebný pro určení výchozích dimenzí. Ten bude rozdělen na dvě části. V první části budou dimenzovány pásnice, které budou ve zjednodušeném modelu přenášet veškerý ohyb a normálovou sílu. V druhé části budou vypočteny dimenze stojin, které jsou tvořené ze skelné tkaniny s orientací $\pm 45^\circ$. Ty budou namáhány především posouvající silou. V analytickém výpočtu není zohledněno namáhání krutem a tečnou silou v druhém směru. Lze tedy předpokládat, že pružnice vycházející z analytického návrhu, bude poddimenzovaná. Poté bude proveden výpočet pomocí metody MKP, který zohlední veškeré zatížení i zvětšení silových účinků po deformaci. Lze předpokládat, že tato forma výpočtu pevností a deformací, podá nejrealnější informaci, např. v porovnání s analytickým výpočtem.

4.1.1. Analytické dimenzování pásnic

Nejprve budou navrženy pásnice. Pro zjednodušení analytického výpočtu lze uvažovat že pásnice jsou namáhány pouze ohybem, který je rozdělen na dvě složky M_{o1} a M_{o2} a normálovou silou N .

Horní pásnice bude namáhána především tlakem. Spodní je namáhána tahem, tedy o něco méně než pásnice horní. Obě pásnice jsou z jednosměrné uhlíkové tkaniny, viz kapitola 2.

Pro další zjednodušení bude uvažováno, že matrice se na pevnosti nepodílí, proto pro určení meze pevnosti v tahu a tlaku uvažujeme pouze samostatná vlákna.

Mez pevnosti v tahu R_{mt} lze vypočítat zjednodušeně pomocí hodnoty udané výrobcem.

$$R_{mt_{45\%}} = \frac{v_f}{0,6} \cdot R_{mt_{60\%}} \quad (4.1-24)$$

$R_{mt_{60\%}} = 2484 \text{ MPa}$...mez pevnosti v tahu kompozitu s 60% tkaniny[8]
 $v_f = 0,45$...poměr vláken v kompozitu pro volenou technologii [8]

$$R_{mt_{45\%}} = \frac{0,45}{0,6} \cdot 2484$$
$$R_{mt_{45\%}} = 2032 \text{ MPa}$$

Mez pevnosti v tlaku R_{md} lze taktéž vypočítat pomocí hodnoty udané výrobcem.

$$R_{md_{45\%}} = \frac{v_f}{0,6} \cdot R_{md_{60\%}} \quad (4.1-25)$$

$R_{md_{60\%}} = 1236 \text{ MPa}$...mez pevnosti v tlaku kompozitu s60% tkaniny[8]

$$R_{md_{45\%}} = \frac{0,45}{0,6} \cdot 1236$$
$$R_{md_{45\%}} = 1011 \text{ MPa}$$

Modul pružnosti v tahu i v tlaku $E_{45\%}$. [8]

$$E_{45\%} = v_f \cdot E \quad (4.1-26)$$

$E = 230 \text{ GPa}$...modul pružnosti uhlíkové tkaniny [8]

$$E_{45\%} = 0,45 \cdot 230$$
$$E_{45\%} = 104 \text{ GPa}$$

Dalším důležitým parametrem bude tloušťka jedné vrstvy kompozitní pásnice.

$$t_1 = \frac{m}{\rho_c} \cdot \frac{1}{v_f} \quad (4.1-27)$$

Kde:

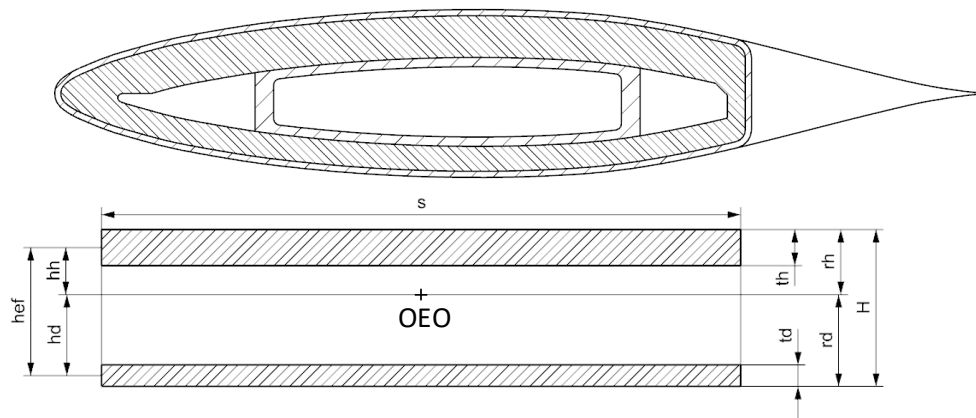
$$\frac{m}{s} = 0,2 \text{ kgm}^{-2} \dots \text{plošná hustota uhlíkové tkaniny [8]}$$

$$\rho_C = 1\,800 \text{ kgm}^{-3} \dots \text{hustota uhlíkové tkaniny [8]}$$

$$t_1 = \frac{0,2}{1800} \cdot \frac{1}{0,45}$$

$$t_1 = 0,25 \text{ mm}$$

Co se týče geometrie pásnice, reálný tvar bude vypadat přibližně, jako lze vidět na *Obr. 27 nahoře*. Nebude způsobena velká chyba ve výpočtu, pokud geometrii zjednodušíme, viz *Obr. 27 dole*. Tato úvaha značně zjednoduší určení průřezových charakteristik a efektivní výšky, avšak zanášá do výpočtu nepřesnost.



Obr. 27 Zobrazení reálného a zjednodušeného tvaru pásnic pro koncept B

Efektivní výška nosníku byla nejprve odhadnuta pro všechny řezy.

$$h_{ef\,odhad}(x) = 0,8 \cdot H(x)$$

Kde:

$$H(x) = 0,18 \cdot b(x) \dots \text{maximální výška nosníku závisí na hloubce}$$

Pro určení výchozích hodnot je spočtena minimální potřebná plocha průřezu tažené (dolní) pásnice S_{d_min} a minimální potřebná plocha tlačené (horní) S_{h_min} v několika řezech podvozkové nohy.

$$S_{d_min}(x) = \frac{M_{o1}(x)}{h_{ef\,odhad}(x) \cdot R_{mt_45\%}}$$

$$S_{h_min}(x) = \frac{M_{o1}(x)}{h_{ef\,odhad}(x) \cdot R_{md_45\%}} \quad (4.1-28)$$

Největší možná šířka pásnice je 75 % hloubky profilu (průřezu). Prostor v okolí náběžné hrany je však neefektivně využitý, proto bude ve výpočtu uvažována šířka obou pásnic jako 70% hloubky profilu.

$$s_d(x) = s_h(x) = 0,7 \cdot b(x)$$

Minimální výška pásnic je stanovena pomocí určeného minimálního průřezu.

$$\begin{aligned}t_{d_min}(x) &= \frac{S_{d_min}(x)}{s_d(x)} \\t_{h_min}(x) &= \frac{S_{h_min}(x)}{s_h(x)}\end{aligned}\quad (4.1-29)$$

Skutečná tloušťka obou pásnic bude větší než minimální tloušťka.

$$\begin{aligned}t_d(x) &> t_{d_min}(x) \\t_h(x) &> t_{h_min}(x)\end{aligned}$$

Skutečná tloušťka je daná počtem vrstev. Ty byly voleny tak, aby byla tloušťka větší než minimální tloušťka a posléze byly iteračně upraveny tak, aby jistoty dále vycházeli větší než jedna.

$$\begin{aligned}t_d(x) &= n_d(x) \cdot t_1 \\t_h(x) &= n_h(x) \cdot t_1\end{aligned}\quad (4.1-30)$$

Kde:

$n_d(x), n_h(x)$... počty vrstev jednosměrného uhlíku v pásnicích
 t_1 ... tloušťka jedné vrstvy

Skutečné plochy pásnic v jednotlivých řezech.

$$\begin{aligned}S_d(x) &= t_d(x) \cdot s_d(x) \\S_h(x) &= t_h(x) \cdot s_h(x)\end{aligned}\quad (4.1-31)$$

Skutečná efektivní výška h_{ef} .

$$h_{ef}(x) = H(x) \cdot \frac{1}{2} \cdot (t_d(x) + t_h(x))\quad (4.1-32)$$

Byly určeny vzdálenosti pásnic od osy nulových napětí.

$$\begin{aligned}h_d(x) &= h_{ef}(x) \cdot \frac{S_h(x)}{S_h(x) + S_d(x)} \\h_h(x) &= h_{ef}(x) \cdot \frac{S_d(x)}{S_h(x) + S_d(x)}\end{aligned}\quad (4.1-33)$$

Ze dříve určených rozměrů lze určit kvadratický moment obou pásnic J_{H2} potřebný pro určení napětí od ohybového momentu M_{o2} .

$$J_{H2}(x) = \int h_d(x)^2 dS_d(x) + \int h_h(x)^2 dS_h(x)\quad (4.1-34)$$

Rovněž lze určit kvadratický moment vůči druhé ose J_{H1} pro obě pásnice potřebný pro určení napětí od ohybového momentu M_{o1} .

$$J_{H1}(x) = \frac{1}{12} \cdot s(x)^3 \cdot (t_d(x) + t_h(x))\quad (4.1-35)$$

Dále byly určeny vzdálenosti krajního vlákna nosného průřezu od osy nulových napětí.

$$\begin{aligned}r_{2d}(x) &= h_d(x) + \frac{t_d(x)}{2} \\r_{2h}(x) &= h_h(x) + \frac{t_h(x)}{2} \\r_1(x) &= \frac{1}{2} \cdot s(x)\end{aligned}\tag{4.1-36}$$

Podélná napětí σ_d a σ_h .

$$\begin{aligned}\sigma_d(x) &= \sigma_{o2d}(x) + \sigma_{o1}(x) - \sigma_{tlak}(x) \\ \sigma_h(x) &= \sigma_{o2h}(x) + \sigma_{o1}(x) + \sigma_{tlak}(x)\end{aligned}\tag{4.1-37}$$

Napětí od ohybu M_{o2} pro dolní a horní pásnici.

$$\begin{aligned}\sigma_{o2d}(x) &= \frac{M_{o2}(x)}{J_{H2}(x)} \cdot r_{2d}(x) \\ \sigma_{o2h}(x) &= \frac{M_{o2}(x)}{J_{H2}(x)} \cdot r_{2h}(x)\end{aligned}\tag{4.1-38}$$

Napětí od ohybu M_{o1} pro obě pásnice.

$$\sigma_{o1}(x) = \frac{M_{o1}(x)}{J_{H1}(x)} \cdot r_1(x)\tag{4.1-39}$$

Napětí tlaku způsobené normálovou silou N .

$$\sigma_{tlak}(x) = \frac{N(x)}{S_d(x) + S_h(x)}\tag{4.1-40}$$

Následně byly určeny jistoty pevnostního výpočtu.

$$\begin{aligned}j_d(x) &= \frac{R_{mt_45\%}}{\sigma_d(x)} \\ j_h(x) &= \frac{R_{md_45\%}}{\sigma_h(x)}\end{aligned}\tag{4.1-41}$$

Mělo by platit.

$$\begin{aligned}j_d(x) &\geq 1 \\ j_h(x) &\geq 1\end{aligned}$$

Důležité hodnoty včetně rozměrů a počtu vrstev obou pásnic pro 23 určených řezů byly vypsány v *Tab. 9. a 10.* Tyto hodnoty budou rovněž sloužit jako vstupní hodnoty pro MKP výpočet.

x [mm]	n_d [-]	t_d [mm]	s_d [mm]	S_d [mm ²]	σ_d [MPa]	j_d [-]
0	9	2.2	49	108	973	2.09
25	9	2.2	49	108	1066	1.91
50	9	2.2	49	108	946	2.15
73	9	2.2	50	111	958	2.12
100	9	2.2	51	114	1035	1.96
200	16	4.0	56	221	1050	1.94
300	16	4.0	61	241	1128	1.80
400	16	4.0	66	260	1150	1.77
500	16	4.0	71	279	1144	1.78
600	16	4.0	76	299	1121	1.81
700	16	4.0	80	318	1094	1.86
800	16	4.0	85	337	1063	1.91
908	16	4.0	89	353	1036	1.96
960	16	4.0	93	366	1017	2.00
1020	16	4.0	95	376	1007	2.02
1080	16	4.0	98	385	995	2.04
1140	16	4.0	98	385	1057	1.92
1180	16	4.0	98	385	1115	1.82
1200	16	4.0	98	385	1115	1.82
1250	16	4.0	98	385	1115	1.82
1300	16	4.0	98	385	1115	1.82
1360	16	4.0	98	385	1115	1.82

Tab. 9 Podoba dolní pásnice po délce podvozkové nohy a jistota pevnostního výpočtu

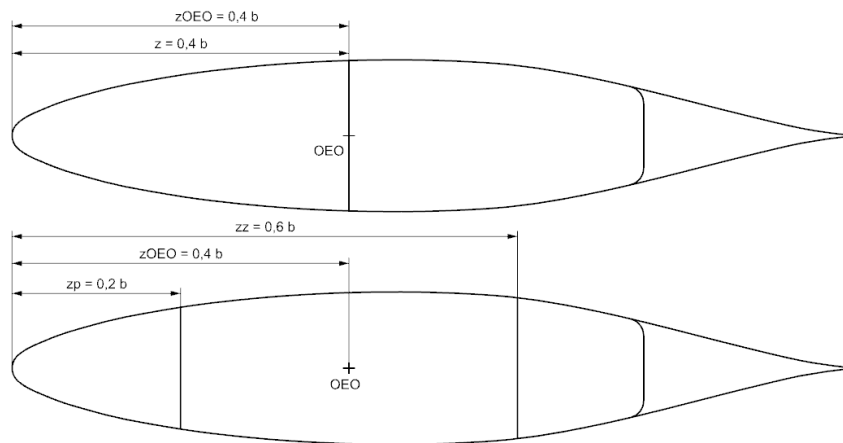
x [mm]	n_h [-]	t_h [mm]	s_h [mm]	S_h [mm ²]	σ_h [MPa]	j_h [-]
0	15	3.7	53	194	842	1.20
25	15	3.7	53	194	918	1.10
50	15	3.7	53	194	791	1.28
73	15	3.7	54	199	775	1.31
100	15	3.7	55	204	828	1.22
200	27	6.7	60	403	934	1.08
300	27	6.7	66	438	967	1.05
400	27	6.7	71	473	957	1.06
500	27	6.7	76	508	930	1.09
600	27	6.7	81	543	892	1.13
700	27	6.7	87	578	856	1.18
800	27	6.7	92	613	819	1.23
908	27	6.7	96	641	790	1.28
960	27	6.7	100	665	765	1.32
1020	27	6.7	102	683	747	1.35
1080	27	6.7	105	700	731	1.38
1140	27	6.7	105	700	770	1.31
1180	27	6.7	105	700	811	1.25
1200	27	6.7	105	700	811	1.25
1250	27	6.7	105	700	811	1.25
1300	27	6.7	105	700	811	1.25
1360	27	6.7	105	700	811	1.25

Tab. 10 Podoba horní pásnice po délce podvozkové nohy a jistota pevnostního výpočtu

4.1.2. Analytické dimenzování stojin

Je uvažováno, že veškeré napětí tvořené posouvající silou bude přeneseno prostřednictvím stojin. Reálně tato hypotéza není úplně přesná, protože část napětí půjde přes spojení pásnic v přední a zadní části průřezu, kde na sebe přímo doléhají. Výsledky analytického výpočtu slouží především jako vstupy pro výpočet pomocí metody konečných prvků, který udá finální podobu skladby jednotlivých komponent, z toho důvodu je toto zjednodušení možné a rovněž žádoucí.

Budou napočteny dvě varianty umístění stojin, jak bylo řečeno v kapitole 2. Tyto varianty lze vidět na Obr. 28, včetně jejich vzájemné polohy a polohy vůči ohybové elastické ose. Stojiny budou pak namáhány tečnou silou T_1 , která byla určena v kapitole 3. Ohybově elastická osa (OEO) se bude nacházet ve 40% hloubky profilu, jak bylo stanoveno v kapitole 4.1.1.



Obr. 28 Zobrazení polohy a OEO pro obě navržené varianty umístění stojin

Nejprve je určena tloušťka jedné vrstvy laminátu ze skelné tkaniny obdobně jako u tkaniny uhlíkové.

$$t_2 = \frac{m}{S} \cdot \frac{1}{\rho_s v_f} \quad (4.1-42)$$

Kde:

$$\frac{m}{S} = 0,163 \text{ kgm}^{-2} \dots \text{plošná hustota skelné tkaniny [8]}$$

$$\rho_s = 2\,600 \text{ kgm}^{-3} \dots \text{hustota uhlíkové tkaniny [8]}$$

$$t_2 = \frac{0,163}{2600} \cdot \frac{1}{0,45}$$
$$t_2 = 0,14 \text{ mm}$$

Síla T_1 je pro druhou variantu distribuována do přední a zadní stojiny. Pro první variantu je uváženo, že jediná stojina přenesou veškeré zatížení. Síla nabývá největších hodnot především při vodorovném zatížení.

$$\begin{aligned}T_{sp}(x) &= T_1(x) \cdot \frac{Z_{OEO} - Z_z}{Z_z - Z_p} \\T_{sz}(x) &= T_1(x) \cdot \frac{Z_{OEO} - Z_p}{Z_z - Z_p}\end{aligned}\quad (4.1-43)$$

Smykové toky v obou stojinách se dají určit pomocí následujících vzorců.

$$\begin{aligned}q_{sp}(x) &= \frac{T_p(x)}{h_{ef}(x)} \\q_{sz}(x) &= \frac{T_z(x)}{h_{ef}(x)}\end{aligned}\quad (4.1-44)$$

Kde:

$h_{ef}(x)$... *efektivní výška, viz. kapitola 4.1.1*

Tloušťka stojiny se spočte podle následujícího vzorce.

$$t(x) = n(x) \cdot t_2 \quad (4.1-45)$$

Kde:

$n(x)$... *počet vrstev laminátu, nejprve odhadnut jako 30 vrstev, poté pro jednotlivé stojiny iteračně upraven*

Ze smykových toků a tlouštěk stojin lze určit napětí ve smyku pro obě stojiny.

$$\begin{aligned}\tau_{sp}(x) &= \frac{q_{sp}(x)}{t_{sp}(x)} \\ \tau_{sz}(x) &= \frac{q_{sz}(x)}{t_{sz}(x)}\end{aligned}\quad (4.1-46)$$

Následně byly určeny jistoty pevnostního výpočtu.

$$\begin{aligned}j_{sp}(x) &= \frac{\tau_{krit.}}{\tau_{sp}(x)} \\ j_{sz}(x) &= \frac{\tau_{krit.}}{\tau_{sz}(x)}\end{aligned}\quad (4.1-47)$$

Kde:

$\tau_{krit.} = 90 \text{ MPa}$... *mez pevnosti ve smyku v rovině laminátu [8]*

Mělo by platit.

$$\begin{aligned}j_{sp}(x) &\geq 1 \\ j_{sz}(x) &\geq 1\end{aligned}$$

Důležité hodnoty včetně rozměrů a počtu vrstev obou pásnic pro 23 určených řezů pro oba koncepty byly vypsány v Tab. 11. a 12. Tyto hodnoty budou rovněž sloužit jako vstupní hodnoty pro MKP výpočet. Z důvodu masivní konstrukce stojin není třeba ověřovat stabilitu stojin.

x [mm]	q_s [Nmm ⁻¹]	n_s [-]	t_s [mm]	τ_s [MPa]	j_s [-]
0	472	40	5.57	85	1.06
25	472	40	5.57	85	1.06
50	321	40	5.57	58	1.56
73	588	50	6.97	84	1.07
100	565	50	6.97	81	1.11
200	634	55	7.66	83	1.09
300	544	55	7.66	71	1.27
400	477	50	6.97	68	1.31
500	425	50	6.97	61	1.48
600	383	50	6.97	55	1.64
700	348	50	6.97	50	1.80
800	319	50	6.97	46	1.96
908	299	50	6.97	43	2.10
960	370	50	6.97	53	1.69
1020	401	50	6.97	58	1.56
1080	413	50	6.97	59	1.52
1140	423	50	6.97	61	1.48
1180	689	60	8.36	82	1.09
1200	689	60	8.36	82	1.09
1250	689	60	8.36	82	1.09
1300	689	60	8.36	82	1.09
1360	689	60	8.36	82	1.09

Tab. 11 Návrh stojiny po délce podvozkové nohy a jistota pevnostního výpočtu, jedna stojina

x [mm]	q_{sp} [Nmm ⁻¹]	q_{sz} [Nmm ⁻¹]	n_{sp} [-]	n_{sz} [-]	t_{sp} [mm]	t_{sz} [mm]	τ_{sp} [MPa]	τ_{sz} [MPa]	j_{sp} [-]	j_{sz} [-]
0	236	236	20	20	2.79	2.79	85	85	1.06	1.06
25	236	236	20	20	2.79	2.79	85	85	1.06	1.06
50	160	160	20	20	2.79	2.79	58	58	1.56	1.56
73	294	294	25	25	3.48	3.48	84	84	1.07	1.07
100	283	283	25	25	3.48	3.48	81	81	1.11	1.11
200	317	317	30	30	4.18	4.18	76	76	1.19	1.19
300	272	272	30	30	4.18	4.18	65	65	1.38	1.38
400	239	239	25	25	3.48	3.48	68	68	1.31	1.31
500	212	212	25	25	3.48	3.48	61	61	1.48	1.48
600	191	191	25	25	3.48	3.48	55	55	1.64	1.64
700	174	174	25	25	3.48	3.48	50	50	1.80	1.80
800	160	160	25	25	3.48	3.48	46	46	1.96	1.96
908	150	150	25	25	3.48	3.48	43	43	2.10	2.10
960	185	185	25	25	3.48	3.48	53	53	1.69	1.69
1020	200	200	25	25	3.48	3.48	58	58	1.56	1.56
1080	207	207	25	25	3.48	3.48	59	59	1.52	1.52
1140	212	212	25	25	3.48	3.48	61	61	1.48	1.48
1180	345	345	30	30	4.18	4.18	82	82	1.09	1.09
1200	345	345	30	30	4.18	4.18	82	82	1.09	1.09
1250	345	345	30	30	4.18	4.18	82	82	1.09	1.09
1300	345	345	30	30	4.18	4.18	82	82	1.09	1.09
1360	345	345	30	30	4.18	4.18	82	82	1.09	1.09

Tab. 12 Návrh stojin po délce podvozkové nohy a jistota pevnostního výpočtu, dvě stojiny

4.1.3. Výpočet pomocí metody konečných prvků

Výpočet pomocí metody konečných prvků (MKP) je v tomto případě numerický výpočet průběhu deformací na fyzickém modelu. Principem je diskretizace modelu do konečného počtu prvků prostřednictvím sítě. V případě správného nastavení tato metoda věrohodně reflektuje reálné namáhání a snižuje tak potřebný počet vyrobených prototypů pro destruktivní kontroly, a tedy i snižuje náklady potřebné na vývoj. Poskytuje výborný způsob ověření dimenzí navržených v analytickém výpočtu a snadné úpravy navrženého modelu.

Jako výpočetní software byl použit *Nastran*, který je přímo zabudovaný v platformě využitě pro tvorbu 3D modelu *NX Siemens 12*. Velkou výhodou je zrychlení a zjednodušení celého procesu, kdy provázanost vyloučí problémy s kompatibilitou a zrychlí proces případných úprav navrženého modelu.

Vzhledem k tomu, že díl je navržen jako kompozitní konstrukce, je vhodné provádět celý výpočet ve 2D. To umožní přiřazovat jednotlivým plochám příslušný počet vrstev laminátu a jednotlivým elementům orientaci, která udává směr jeho skladby. V případě, že by měl být vytvořen 3D model laminátové konstrukce, by se musely modelovat všechny vrstvy a přiřazovat jim jejich vlastnosti, a to by bylo velmi problematické.

Výpočet bude proveden pro všechny tři koncepty. V případě konceptu A zároveň pro obě varianty umístění stojin. Jako výchozí data budou pro všechny tři koncepty použity výchozí dimenze, které byly určeny pouze pro variantu A. Samotné dimenze by sice byly pro všechny varianty mírně odlišné, nicméně se jednalo pouze o zjednodušený výpočet. Tento postup zároveň nejlépe umožní všechny tři varianty vzájemně srovnat i se zohledněním případného rozdílu hmotností, který je podstatný. Další komentovaný postup je prezentovaný na konceptu A.

V první fázi je potřeba provést idealizaci geometrie na vytvořeném modelu, která umožní kvalitní síťování v dalším kroku. Jedná se o případné spojení či rozdělení modelu na jednotlivé části lišící se skladbou kompozitu, potlačení nepotřebných zaoblení či děr, které nemají na výpočet výrazný vliv a pro použitý účel by pouze zkomplikovali tvorbu sítě. K tomuto účelu umožňuje použitý CAD software tvorbu idealizovaného modelu.

Návrh výpočtu nemá za úkol mapovat chování laminátu v místě šroubového spojení podvozkové nohy a kolové osy. Pro tento účel bude v dalších kapitolách práce proveden analytický výpočet zvlášť. Z toho důvodu nebude do výpočtu začleněn ani překližkový insert, což by celý výpočet a provázanost jednotlivých částí v celku komplikovalo. Ten bude nahrazen „virtuálními“ stojinami, které ho budou suplovat.

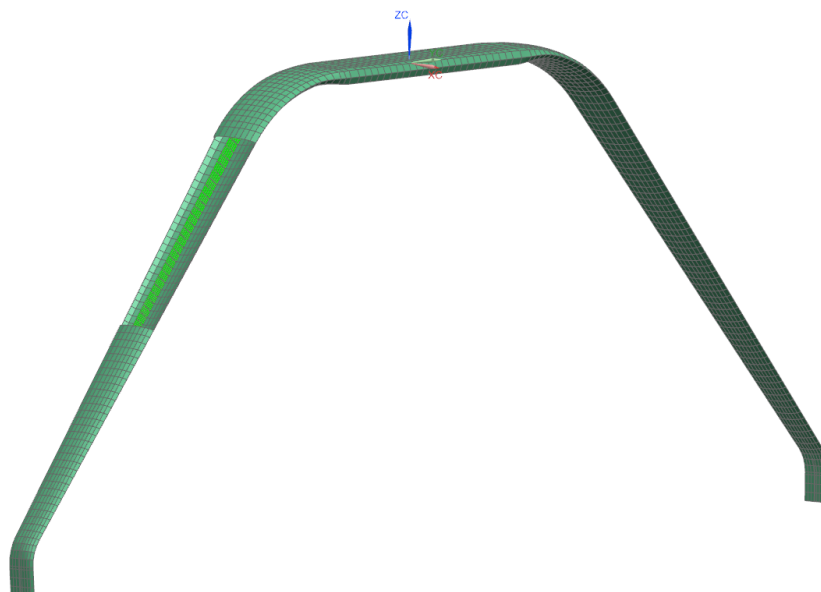
Samotný model pružné nohy je vytvořen z ploch, což je výhodné, protože to ulehčí geometrické úpravy. Plochy jsou umístěny na vnějším povrchu nohy a ve středu stojin, v závislosti na konceptu. V první řadě byly potlačeny zaoblení hran a díry pro šrouby, které v tomto výpočtu nejsou důležité. Rovněž byla

vypnuta plocha reprezentující oblast v okolí odtokové hrany. Dále byly sešity plochy reprezentující potah a stojinu pomocí funkce *Stitch Edge*, která zaručí provázanost mezi plochami, a tedy i mezi sítěmi, které budou později vytvořeny. Dále byla noha rozdělena pod délce trupu na úseky, které byly stanoveny v analytickém návrhu, a kterým byly dány počty vrstev jednotlivých laminátů. Noha s upravenou geometrií je znázorněna na *Obr. 29*.



Obr. 29 Idealizovaný model pro koncept A

Dalším krokem je tvorba 2D elementových sítí na všech použitých plochách modelu. Sítě jsou sdružovány takzvanými kolektory, kterým lze následně přidělit materiálové vlastnosti. Z důvodu vzniku co nejkvalitnější sítě byla použita funkce *2D Mapped*, která dále umožňuje nastavení počtu elementů na jednotlivých hranách. Pro některé tvarově složitější části, jako je např. závěrná příčná výztuha, byla použita funkce *2D Mesh*, která byla dále ručně upravena, tak aby kvalita sítě byla dostatečná. Rovněž bylo třeba nastavit správný směr orientace elementů, který stanovuje především hlavní směr mechanických vlastností. Rozsítované těleso s částečným řezem lze vidět na *Obr. 30*.



Obr. 30 Vytvořená 2D síť pro koncept A, v částečném řezu

Dále bylo třeba definovat použité materiály. Počet potřebných materiálů se zúžil na dva kompozity, jeden s uhlíkovou jednosměrnou tkaninou a druhý se sklenou tkaninou s plátňovou vazbou. Jemnější povrchová tkanina bude mít stejné vlastnosti, ale poloviční tloušťku vrstvy. Byly vytvořeny nové ortotropní materiály, kterým bylo třeba přidělit mechanické a pevnostní vlastnosti v jednotlivých směrech. Ty jsou dány vlastnostmi tkanin, použité pryskyřice a jejich vzájemným poměrem. Většina byla odečtena z materiálových zpráv firmy *Havel Composites*. Z důvodu, že výrobce neuvádí všechny potřebné informace, a to zejména pro skelný laminát, byly další hodnoty odečtené z veřejných materiálových testů pro obdobný kompozit, viz zdroje. Materiálové vlastnosti jsou uvedeny v *Tab. 13. a 14.*

Tkanina	Uhlík HS 200 g/cm ²		
Pryskyřice	L 285 MGS		
Poměr vláken v laminátu	0.45		
Hustota [kg/m ³]	1487		
Tloušťka jedné vrstvy [mm]	0.25		
Orientace	1	2	3
Pevnost v tahu [MPa]	2032	70	70
Pevnost v tlaku [MPa]	1011	120	120
Modul pružnosti [MPa]	105150	8400	8400
Pevnost ve smyku mezi vrstvami [MPa]	74	-	-
Poissonovo číslo	0.27	0.027	0.027
Modul pružnosti ve smyku [MPa]	4090	4090	4090

Tab. 13 Mechanické a pevnostní vlastnosti uhlíkového jednosměrného laminátu [8], [9], [11]

Tkanina	Sklo-E 163 g/cm ²		
Pryskyřice	L 285 MGS		
Poměr vláken v laminátu	0.45		
Hustota [kg/m ³]	1847		
Tloušťka jedné vrstvy [mm]	0.14		
Orientace	1	2	3
Pevnost v tahu [MPa]	492	492	70
Pevnost v tlaku [MPa]	375	375	120
Modul pružnosti [MPa]	18075	18075	8400
Pevnost ve smyku mezi vrstvami [MPa]	74	-	-
Poissonovo číslo	0.17	0.17	0.17
Modul pružnosti ve smyku [MPa]	7724	7724	3590

Tab. 14 Mechanické a pevnostní vlastnosti sklolaminátu s plátňovou vazbou [8], [9], [11]

Uvedené materiály tvoří vlastnosti jedné vrstvy laminátu. Dále je třeba přiřadit počet vrstev jednotlivým kolektorům. Bylo stanoveno několik úseků, které jsou ohraničeny počítanými řezy, viz analytické dimenzování. Některé byly sloučeny. Počet vrstev jednotlivých úseků je uveden v *Tab. 15* a *16*.

Řez	x [mm]	Dolní potah		Horní potah		Stojina
		n_p (sklo)	n_d (uhlík)	n_p (sklo)	n_h (uhlík)	n_s (sklo)
1 - 2	-25 - 25	3	9	3	15	40
2 - 3	25 - 50	3	9	3	15	40
3 - 4	50 - 73	3	9	3	15	50
4 - 5	73 - 100	3	9	3	15	50
5 - 6	100 - 200	3	16	3	27	55
6 - 7	200 - 300	3	16	3	27	55
7 - 8	300 - 400	3	16	3	27	55
8 - 9	400 - 500	3	16	3	27	50
9 - 10	500 - 600	3	16	3	27	50
10 - 11	600 - 700	3	16	3	27	50
11 - 12	700 - 800	3	16	3	27	50
12 - 13	800 - 908	3	16	3	27	50
13 - 15	908 - 960	3	16	3	27	50
14 - 15	960 - 1020	3	16	3	27	50
15 - 16	1020 - 1080	3	16	3	27	50
16 - 17	1080 - 1140	3	16	3	27	50
17 - 18	1140 - 1180	3	16	3	27	60
18 - 22	1180 - 1360	3	16	3	27	60

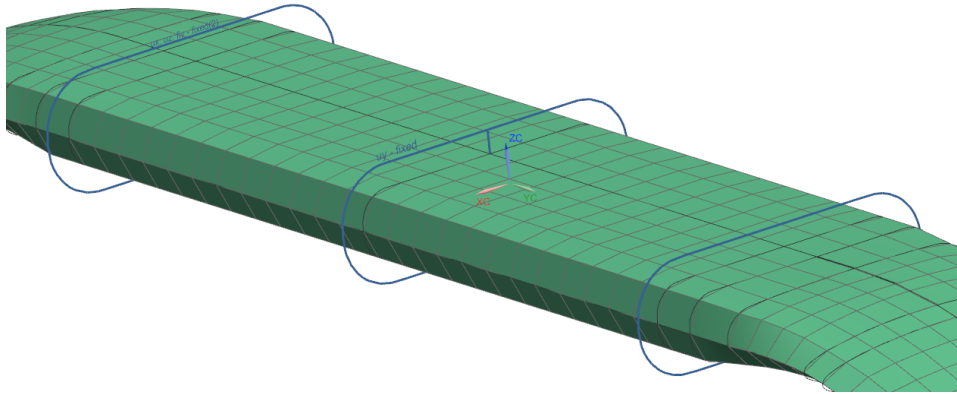
Tab. 15 Počty vrstev laminátu pro jednotlivé úseky, koncept A, jedna stojina

Řez	x [mm]	Dolní potah		Horní potah		Stojina	
		n_p (sklo)	n_d (uhlík)	n_p (sklo)	n_h (uhlík)	n_{sp} (sklo)	n_{sz} (sklo)
1 - 2	-25 - 25	3	9	3	15	20	20
2 - 3	25 - 50	3	9	3	15	20	20
3 - 4	50 - 73	3	9	3	15	25	25
4 - 5	73 - 100	3	9	3	15	25	25
5 - 6	100 - 200	3	16	3	27	30	30
6 - 7	200 - 300	3	16	3	27	30	30
7 - 8	300 - 400	3	16	3	27	30	30
8 - 9	400 - 500	3	16	3	27	25	25
9 - 10	500 - 600	3	16	3	27	25	25
10 - 11	600 - 700	3	16	3	27	25	25
11 - 12	700 - 800	3	16	3	27	25	25
12 - 13	800 - 908	3	16	3	27	25	25
13 - 14	908 - 960	3	16	3	27	25	25
14 - 15	960 - 1020	3	16	3	27	25	25
15 - 16	1020 - 1080	3	16	3	27	25	25
16 - 17	1080 - 1140	3	16	3	27	25	25
17 - 18	1140 - 1180	3	16	3	27	30	30
18 - 22	1180 - 1360	3	16	3	27	30	30

Tab. 16 Počty vrstev laminátu pro jednotlivé úseky, koncept A, dvě stojiny

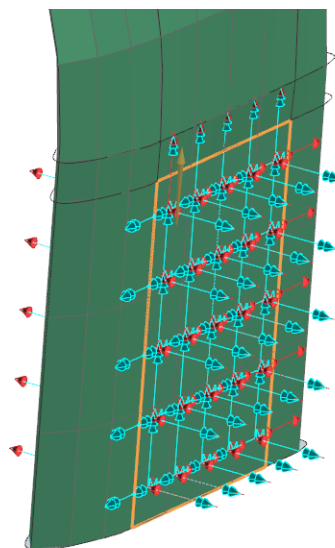
Při tvorbě podoby jednotlivých úseků je rovněž třeba nastavit kritérium porušení laminátu. Vzhledem k tomu, že nejsou dostupná data podávající informaci o největším možném prodloužení při porušení ani koeficient potřebný k řešení pomocí metody Tsai-Wu, je možné volit metodu podle Hoffmana nebo Hilla. Pro všechny další provedené výpočty bylo voleno Hoffmanovo kritérium, které je o něco málo optimističtější než Hillovo, především v tahové části napětí.

Dalším krokem je stanovení okrajových podmínek. Ty budou stanoveny v místě polohy závěsů. V tomto případě nelze z důvodu specifičnosti závěsů využít standartních případů vazbení, které software nabízí. Proto byly vazby manuálně definovány pomocí odebrání stupňů volnosti. První podmínka byla umístěna na hrany potahu v rovině symetrie bylo zamezeno posuvu ve směru osy y . Další vazba, umístěná opět na hranách potahu, ale ve vzdálenosti 180 mm na obě strany, zamezí posuvu v ose x a z a natočení okolo osy y . Znárodnění okrajových podmínek lze nalézt na *Obr. 31*.



Obr. 31 Zobrazení okrajových podmínek

V tuto chvíli se řešení začne větvit na čtyři varianty v závislosti na předpisovém zatížení. Jako působiště všech zatížení byla z důvodu absence osy a děr stanoven potah ve spodní části nohy, viz *Obr. 32*. To je možné z důvodu, že pomyslný střed kolové osy se nachází jen 0,3 mm od středu samotné plochy.



Obr. 32 Zobrazení umístění sil a silových momentů pro případ vodorovného zatížení

Samotné zatížení se skládá ze tří osamocených sil a tří silových momentů. Jejich velikost vychází z výpočtu zatížení nohy po délce v prvním řezu, tedy v místě kolové osy. Potřebné hodnoty pro jednotlivé případy zatížení jsou vypsány v *Tab. 17*.

Případ zatížení	N [N]	T1 [N]	T2 [N]	Mo1 [Nm]	Mo2 [Nm]	Mk [Nm]
VODOROVNÉ	8450	-291	2068	328	511	136
S VELKÝM ÚHLEM NÁBĚHU	5329	-196	-1732	0	322	-105
BRŽDĚNÍ	5100	-148	1946	449	313	132
BOČNÍ	4111	1944	-1336	0	509	-166
BOČNÍ'	3936	-3319	-1279	0	-158	51

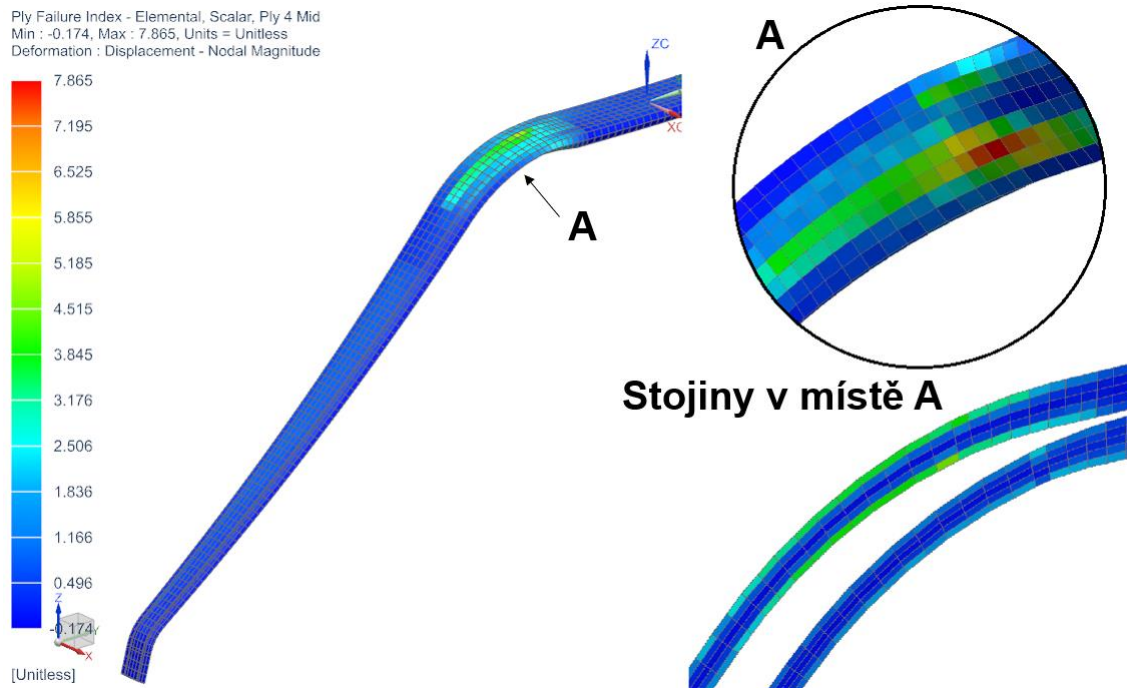
Tab. 17 Hodnoty sil a silových momentů pro všechny případy zatížení

Dalším bodem již byl samotný výpočet. Bylo využito lineárního řešiče *SOL 101 Linear Statics*. Výstupem výpočtu jsou čtyři řešení pro každý ze čtyř počítaných modelů. Řešení v grafické formě udává několik zásadních parametrů potřebných pro pevnostní kontrolu a další práci s navrženým dílem. Patří mezi ně především kritérium porušení (dle Hoffmanna), posuvy a natočení ve všech osách a informace o napětí v jednotlivých uzlech.

První podstatnou informací, kterou výsledky výpočtu dávají, je to, že nejkritičtější způsob zatížení je při vodorovném přistání. Všechny další komentáře a grafické výstupy se budou týkat tedy právě tohoto případu zatížení. Vyhovující výsledek bude takový, kde na nosné konstrukci bude ve všech vrstvách laminátu kritérium porušení menší než jedna. To znamená, že konstrukce bude pevnostně vyhovovat. Je ale potřeba dosáhnout i určité hodnoty posuvu ve směru svislé osy, která nám určuje dráhu efektivního tlumení a následně i maximální násobek při přistání, viz kapitola 3. Je žádoucí, aby tato hodnota vyšla přibližně okolo první odhadnuté hodnoty, tedy $y_{TL} = 190 \text{ mm}$. Výrazně menší hodnota by znamenala, že násobek bude větší než 4, což je nežádoucí. Výrazně větší hodnota násobek sice ještě sníží, ale v tomto případě by mohl hrozit dotyk vrtule se zemí.

První odečtenou hodnotou pro všechny varianty je maximální posuv ve svislém směru. Sice jde o hodnotu pro početní zatížení, ale pro vzájemné srovnání konceptů je dostačující. Dále bude odečítáno ono kritérium porušení kompozitu. Pro nejlepší porovnání výsledků bude uvedeno pro čtvrtou vrstvu, což je zároveň i první vrstva uhlíkové jednosměrné tkaniny, která bude zatížena nejvíce. Hodnoty pro všechny koncepty jsou vypsány v *Tab. 18*. Grafické zobrazení výsledků, konkrétně kritéria porušení ve čtvrté vrstvě, lze vidět pro variantu A se dvěma stojinami na *Obr. 33*. Pro určení dalšího postupu úpravy konstrukce jsou důležitá i další data, jako je napětí v jednotlivých uzlech, rozbor změny napětí pro jednotlivé vrstvy kompozitu a rovněž posuvy v dalších osách. Z důvodu přehlednosti tyto hodnoty v textu znázorněny nejsou. Obdobné zobrazení jako je na *Obr. 33* lze pro ostatní varianty nalézt v *Příloze 3*.

Koncept	A1	A2	B	C
Posuv ve směru svislé osy [mm]	423	443	473	276
Maximální kritérium porušení na 4. vrstvě pásnic	9.08	7.87	10.22	4.62

Tab. 18 Vybrané hodnoty pro všechny počítané varianty

Obr. 33 Zobrazení kritéria porušení pro 4. vrstvu konceptu A se dvěma stojinami, detail na spodní část v kritickém místě (vpravo nahoře) a detailní záběr stojin (vpravo dole)

V tuto chvíli je třeba zvolit konečnou variantu a tu upravit tak, aby byla vyhovující. Z výsledků lze rovnou vyřadit tu s označením C. Na první pohled by se mohlo zdát, že pevnostně vychází nejlépe, nicméně hodnota posuvu ve svislé ose je velmi nepříznivá a snaha o vyrovnání pevnosti a průhybu by byla problematická. Rovněž je patrné že použití více stojin dává lepší výsledky. Koncepty A a B mají kritérium porušení sice vysoké, ale pouze v určitých místech, které by se mohli dát lehce vyztužit.

Nejprve byly pokusy o úpravu konceptu s označením B, nicméně tato snaha se ukázala jako bezvýsledná. Hlavním problémem byl příliš ostrý přechod v kritickém místě.

Nakonec došlo k několika konstrukčním úpravám na variantě A, která byla rovněž volena i jako finální varianta. V první řadě byla zvětšena výška průřezu v místě závěsů z dosavadních 27 mm na 36 mm, která ovlivní stavební výšku konstrukce po celé délce nohy. Dále byla v rozmezí konstrukčních řezů 12 – 22 umístěna třetí stojina ve 40 % tělivity profilu. Rovněž byly vyhlazeny některé neplynulé přechody v kritických místech. Finální upravený návrh lze vidět na *Obr. 34*. Další změny proběhly v dimenzích, tedy v počtu použitých vrstev laminátu v jednotlivých úsecích. Nový návrh skladby udává *Tab. 19*.



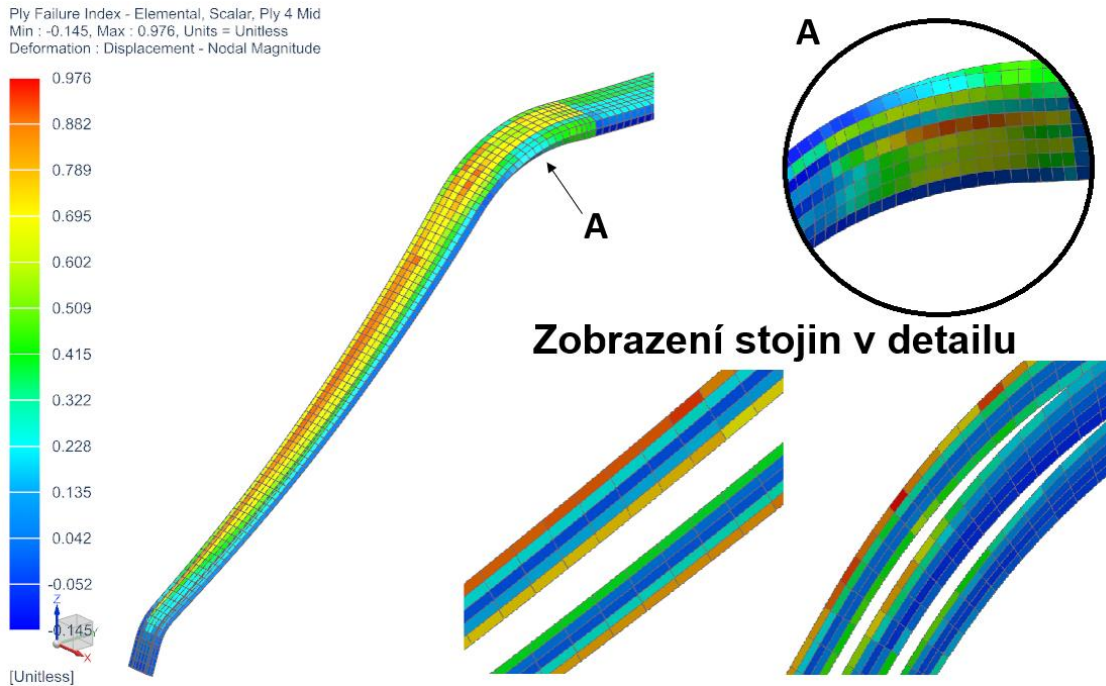
Obr. 34 Zobrazení konstrukčně upraveného 3D modelu upraveného pro další výpočet

Řez	x [mm]	Horní potah		Dolní potah		Stojina		
		n_p (sklo)	n_h (uhlík)	n_p (sklo)	n_d (uhlík)	n_{sp} (sklo)	n_{ss} (sklo)	n_{sz} (sklo)
1 - 2	-25 - 25	3	7	3	6	20	-	20
2 - 3	25 - 50	3	7	3	6	20	-	20
3 - 4	50 - 73	3	9	3	8	25	-	25
4 - 5	73 - 100	3	9	3	8	26	-	26
5 - 6	100 - 200	3	10	3	8	27	-	27
6 - 7	200 - 300	3	11	3	8	28	-	28
7 - 8	300 - 400	3	12	3	8	30	-	30
8 - 9	400 - 500	3	12	3	8	30	-	30
9 - 10	500 - 600	3	12	3	8	35	-	35
10 - 11	600 - 700	3	12	3	8	35	-	35
11 - 12	700 - 800	3	12	3	9	40	-	40
12 - 13	800 - 908	3	12	3	10	45	45	45
13 - 14	908 - 960	3	12	3	14	45	45	45
14 - 15	960 - 1020	3	19	3	17	45	45	45
15 - 16	1020 - 1080	3	27	3	22	40	40	40
16 - 17	1080 - 1140	3	35	3	30	40	40	40
17 - 18	1140 - 1180	3	35	3	30	40	40	40
18 - 22	1180 - 1360	3	20	3	10	40	40	40

Tab. 19 Počty vrstev laminátu pro jednotlivé úseky, upravený koncept A

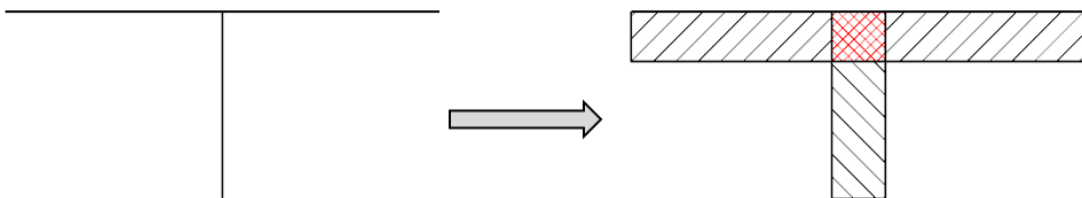
Dále byl proveden obdobný výpočet po těchto provedených změnách. Rovněž byl přidán další případ zatížení, provozní při vodorovném přistání. Je to obdobný případ jako ten při vodorovném přistání, pouze hodnoty silových účinků jsou vyděleny součinitelem bezpečnosti $f_{uz} = 1,5$. Tento případ slouží především

k odečtení maximálního posuvu ve svislém směru nohy. Ten vyšel 186 mm . Kritérium porušení vychází menší než jedna ve všech vrstvách laminátu kromě prvních tří, které tvoří sklená tkanina. Tyto tři vrstvy nemají nosnou funkci. Úvaha je taková, že stačí aby pevnostně vydržely při provozním zatížení, což je splněno. Grafické zobrazení výsledků, konkrétně kritéria porušení ve čtvrté vrstvě je na *Obr. 35*.



Obr. 35 Zobrazení kritéria porušení pro 4. vrstvu, detail na spodní část v kritickém místě (vpravo nahoře) a detailní záběr stojin (vpravo dole)

Z výsledků je patrné nerovnoměrné namáhání stojiny, kde vznikají špičky napětí v místech těsně u potahu. To je způsobené zjednodušením na plochy, kdy v místě styku pásnic a stojin dochází k nereálnému prolnutí materiálu a část stojiny se tak nachází v místě největšího ohybového napětí, viz *Obr. 36*. Důsledkem toho jsou stojiny předdimenzované.



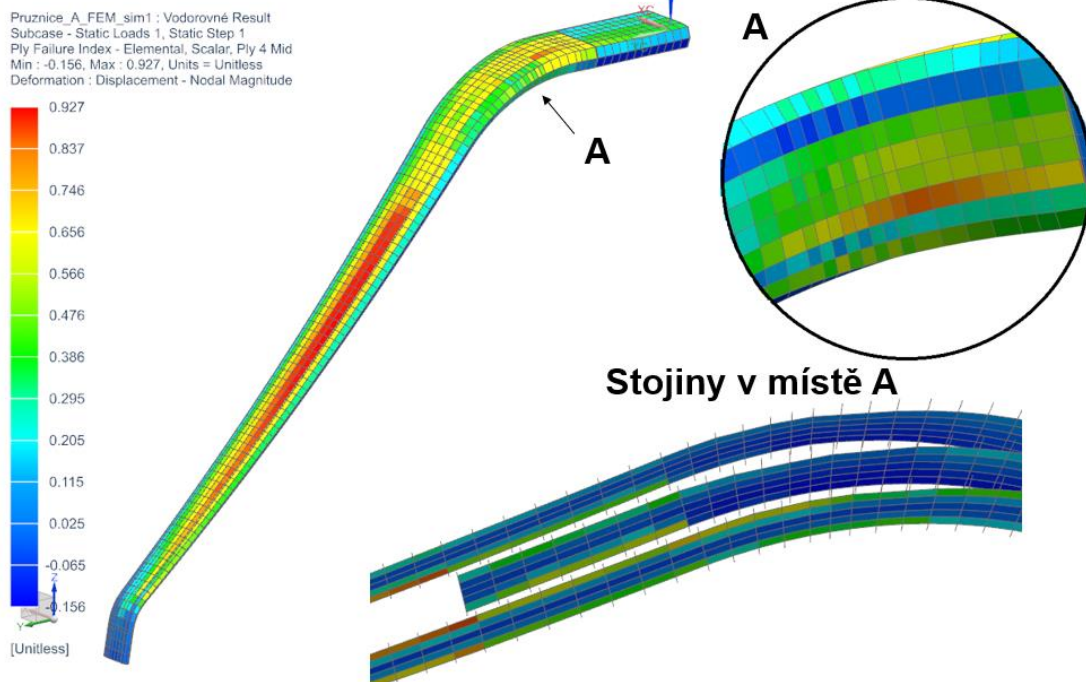
Obr. 36 Nereálný průnik materiálu způsobený zjednodušením

V této fázi návrhu, kdy dimenze pásnic přibližně odpovídají finálnímu návrhu. Proto lze stojiny odříznout o hodnotu odpovídající tloušťce pásnic v daném místě. Poté je třeba pásnice a stojiny spojit pomocí 1D elementu *RBE2* nahrazující přerušovanou provázanost sítí. To umožní částečné snížení počtu vrstev laminátu na stojinách a zároveň bude návrh více odpovídat realitě, finální počet vrstev je zobrazen v *Tab. 20*. Grafické zobrazení výsledků, konkrétně

kritéria porušení ve čtvrté vrstvě pro případ vodorovného přistání je na *Obr. 37*. Maximální finální posuv ve svislém směru je 188 mm , viz *Obr. 38*. Tento výsledek je velmi blízko prvotnímu odhadu a další iterace by zatížení téměř nezměnila. Pro úplnost byl rovněž proveden nelineární výpočet pomocí řešiče *SOL 106 Nonlinear Statics*. Ten postihuje změnu působiště zatížení způsobenou deformacemi. Jeho výsledky se od lineárního řešení liší jen minimálně.

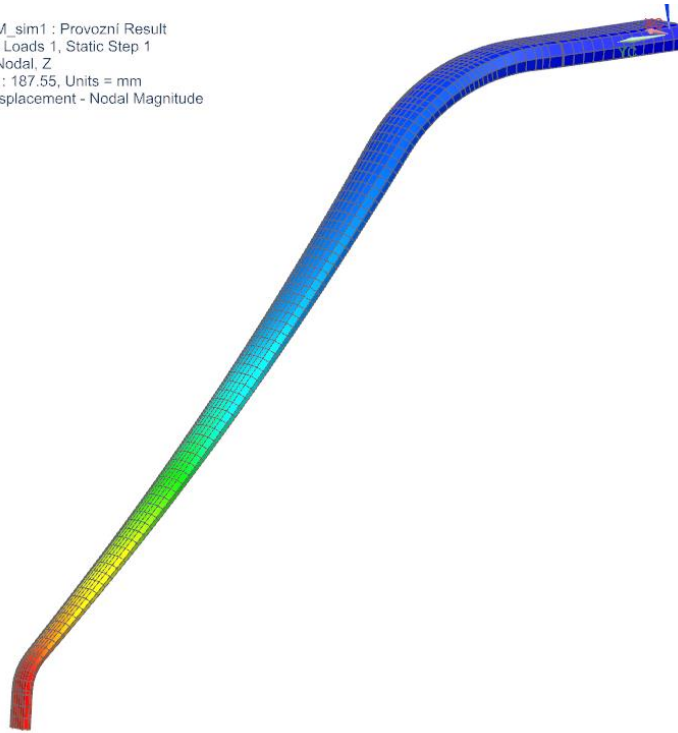
Řez	x [mm]	Horní potah		Dolní potah		Stojina		
		n_p (sklo)	n_h (uhlík)	n_p (sklo)	n_d (uhlík)	n_{sp} (sklo)	n_{ss} (sklo)	n_{sz} (sklo)
1 - 2	-25 - 25	3	7	3	6	12	-	12
2 - 3	25 - 50	3	7	3	6	12	-	12
3 - 4	50 - 73	3	9	3	10	12	-	12
4 - 5	73 - 100	3	9	3	10	12	-	12
5 - 6	100 - 200	3	10	3	8	12	-	12
6 - 7	200 - 300	3	11	3	8	12	-	12
7 - 8	300 - 400	3	12	3	8	12	-	12
8 - 9	400 - 500	3	12	3	8	15	-	15
9 - 10	500 - 600	3	12	3	8	20	-	20
10 - 11	600 - 700	3	12	3	8	25	-	25
11 - 12	700 - 800	3	12	3	8	30	-	30
12 - 13	800 - 908	3	15	3	8	35	35	35
13 - 14	908 - 960	3	22	3	14	40	40	40
14 - 15	960 - 1020	3	25	3	17	40	40	40
15 - 16	1020 - 1080	3	25	3	22	35	35	35
16 - 17	1080 - 1140	3	25	3	22	35	35	35
17 - 18	1140 - 1180	3	25	3	22	35	35	35
18 - 22	1180 - 1360	3	20	3	10	35	35	35

Tab. 20 Finální počty vrstev laminátu pro jednotlivé úseky



Obr. 37 Zobrazení kritéria porušení pro 4. vrstvu, detail na spodní část v kritickém místě (vpravo nahoře) a detailní záběr stojin (vpravo dole)

Pruznice_A_FEM_sim1 : Provozní Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Z
Min : -3.93, Max : 187.55, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obr. 38 Zobrazení posunutí ve svislém směru pro provozní zatížení

4.2. Dimenzování spoje podvozková noha – kolová osa

Pevnostní výpočet tohoto místa nebyl pro zjednodušení v MKP analýze zahrnut. Spojení bude kontrolováno v této podkapitole. Jedná se především o kontrolu vloženého insertu z překližky na otláčení.

Zatížení spoje vychází ze zatížení nohy. Tečná síla potřebná k určení únosnosti na otláčení bude největší v případě zatížení při vodorovném přistání. Sílu působící na šrouby lze spočítat jako prostý vektorový součet sil $T_{2a_{vodorovné}}$ a $N_{a_{vodorovné}}$ působících na nohu v místě osy.

$$T_{BOLT} = \sqrt{N_{a_{vodorovné}}^2 + T_{2a_{vodorovné}}^2} \quad (4.2-48)$$

$$T_{BOLT} = \sqrt{8\,450^2 + 2\,068^2}$$

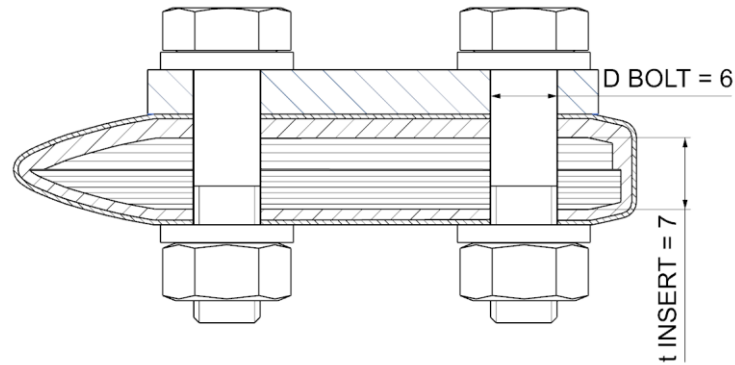
$$T_{BOLT} = 8\,699\,N$$

Dále je třeba určit plochu která je na otláčení kontrolována. Je uváženo že veškerou sílu přenáší jen překližka. Plocha je určena pomocí průměru šroubu a tloušťky překližkového insertu, viz Obr. 39.

$$S_{otl.} = 4 \cdot D_{BOLT} \cdot t_{INSERT} \quad (4.2-49)$$

$$S_{otl.} = 4 \cdot 6 \cdot 6$$

$$S_{otl.} = 144\,mm^2$$



Obr. 39 Schéma spojení s vyznačenými rozměry

Dále je určeno napětí $\sigma_{otl.}$

$$\begin{aligned}\sigma_{otl.} &= \frac{T_{BOLT}}{S_{otl.}} & (4.2-50) \\ \sigma_{otl.} &= \frac{8\,699}{144} \\ \sigma_{otl.} &= 60,4 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Pevnost v otláčení pro překližku, která je volená dle katalogu [13], vychází z pevnosti v tahu a je asi 120 % její hodnoty [14].

$$\sigma_{m_otl.} = 1,2 \cdot \sigma_{m_tah} \quad (4.2-51)$$

Kde:

$$\sigma_{m_tah} = 70\,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cong 70 \text{ MPa}, [13]$$

$$\sigma_{m_otl.} = 1,2 \cdot 70$$

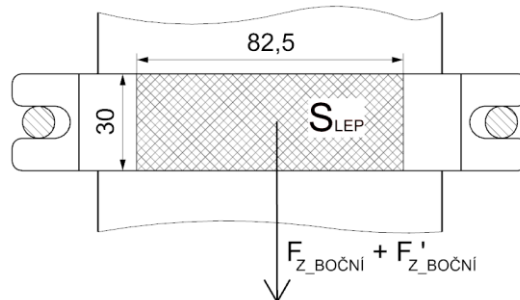
$$\sigma_{m_otl.} = 84 \text{ MPa}$$

Jistota pevnostního výpočtu je určena pomocí meze pevnosti při otláčení.

$$\begin{aligned}j_{otl.} &= \frac{\sigma_{otl.}}{\sigma_{m_otl.}} & (4.2-52) \\ j_{otl.} &= \frac{84}{60,4} \\ j_{otl.} &= 1,39\end{aligned}$$

4.3. Dimenzování závěsů do trupu letounu

Samotné spojení závěsů a konstrukce trupu nelze pevnostně kontrolovat bez znalosti této konstrukce a bude muset být dimenzováno a kontrolováno až dodatečně. V této fázi lze kontrolovat pouze lepený spoj nacházející se u středového závěsu. Výpočet vychází ze schématu na Obr. 40.



Obr. 40 Schéma pro kontrolu lepeného spoje

Napětí ve smyku pro lepený spoj σ_{LEP} .

$$\sigma_{LEP} = \frac{F_{z_BOČNÍ} + F'_{z_BOČNÍ}}{2 \cdot S_{LEP}} \quad (4.3-53)$$

Kde:

$$S_{LEP} = 82,5 \cdot 30 = 2\,475 \text{ mm}^2 \dots \text{plocha lepeného spoje}$$

$$\sigma_{LEP} = \frac{3\,173 + 2\,094}{2 \cdot 2\,475} = 1,06 \text{ MPa}$$

Dále je určena jistota pevnostního výpočtu.

$$j_{LEP} = \frac{\sigma_{LEP}}{\sigma_{m_LEP}} \quad (4.3-54)$$

Kde:

$$\sigma_{m_LEP} = 28,9 \text{ MPa} \dots \text{pevnost ve smyku pro lepidlo (kapitola 2)}$$

$$j_{LEP} = \frac{1,06}{28,9}$$
$$j_{LEP} = 27$$

5 Hmotový rozbor

Hmotový rozbor je důležitou součástí každé letadlové konstrukce. Podává informaci o hmotnostech a jejich rozložení ve stavebním souřadnicovém systému letounu. Rozložení hmot ovlivňuje nejen zatížení jednotlivých dílů letounu, ale i samotnou mechaniku letu. Proto je důležité ho při každém dalším zpřesnění návrhu aktualizovat.

K určení rozložení hmot bylo využito vytvořeného 3D modelu. To bylo nejprve určeno u kompozitních dílů, u kterých je tento postup o něco málo náročnější. Bylo postupováno tak, že byly odečteny povrchy jednotlivých ploch, kterým byla přidělena kompozitní skladba a souřadnice jejich těžišť. Souřadnice těžiště odpovídají souřadnicím samostatného dílu a při řešení zbytku sestavy je bude třeba převést na hodnoty odpovídající stavebnímu souřadnicovému systému letadla z [1]. Pomocí známé tloušťky v jednotlivých místech a známé hustoty byla určena hmotnost jednotlivých kousků, z nich byla dále určena celková hmotnost a celkové těžiště.

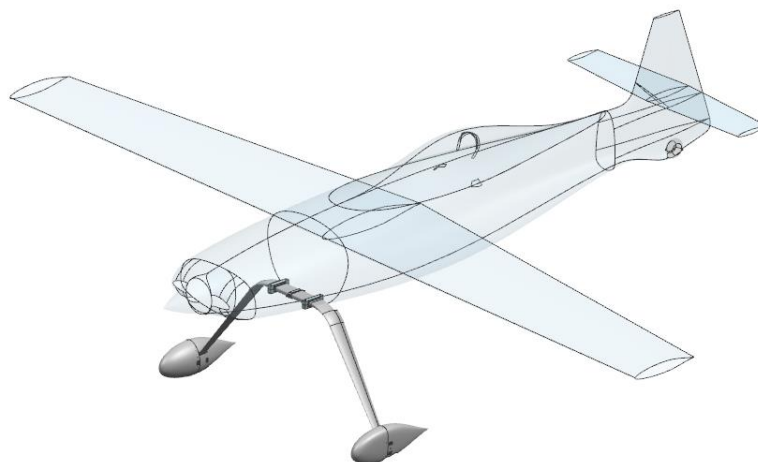
$$m_p = \sum m_i \quad (5-55)$$

$$x_{Tp} = \frac{\sum(m_i * x_i)}{m_p} \quad (5-56)$$

$$y_{Tp} = \frac{\sum(m_i * y_i)}{m_p} \quad (5-57)$$

$z_{Tp} = 0$... díl a i celá sestava je symetrická podle roviny xy

Obdobný postup byl použit i pro aerodynamické kryty. V Tab. 21 jsou uvedeny hmotnosti a souřadnice těžiště pro jednotlivé díly, či skupiny dílů. Souřadnicové osy odpovídají stavebnímu koncepčnímu modelu z [1], viz Obr. 41.



Obr. 41 Zobrazení stavebního souřadnicového systému

Díl	Počet	Hmotnost [kg]	x_{CG} [mm]	y_{CG} [mm]
Pružná noha	1	6.107	2173	1342
Ráfek kola	2	1.060	2110	904
Pneumatika	2	1.200	2110	904
Kolová osa	2	0.260	2110	903
Brzdový kotouč	2	0.393	2110	906
Brzdový třmen	2	0.300	2140	871
Závěs středový	1	0.096	2145	1742
Závěs stronový	4	0.670	2144	1740
Aerodynamický kryt - přední část	2	0.298	1945	931
Aerodynamický kryt - zadní část	2	0.317	2250	942
Spojovací plechy	4	0.061	2110	912
Přýžová vložka	2	0.059	2144	1742
Šroub M6	8	0.074	2110	906
Šroub M6	2	0.018	2110	911
Šroub M3	28	0.010	2110	902
Matice M6	8	0.021	2110	906
Matice M3	28	0.028	2110	912
Matice M16	2	0.042	2110	903
Podložka	18	0.018	2110	906

Tab. 21 Tabulka hmotností a souřadnic těžiště jednotlivých dílů

Těžiště a hmotnost celé sestavy byla určena obdobně, jako pro samotnou podvozkovou nohu, viz rovnice 5-55. Výsledné hodnoty jsou uvedeny níže a zobrazeny na Obr. 42.



Obr. 42 Zobrazení těžiště celé sestavy

$$m_c = 11,031 \text{ kg}$$

$$x_T = 2\,148 \text{ mm}$$

$$y_T = 1\,210 \text{ mm}$$

$$z_T = 0 \text{ mm}$$



Tyto vypočtené hodnoty se od odhadnutých prostřednictvím řešerše podobných letounů v [1] mírně liší. V případě polohy těžiště je to způsobeno tím, že bylo pouze odhadnuto na základě tvaru podvozku. Odlišnost v hmotnosti činí $1,4 \text{ kg}$. To může být způsobeno například absencí šroubů spojujících podvozek s konstrukcí nebo nezapočítáním ovládacího systému kolových brzd.

6 Závěr

Hlavním výstupem práce je detailní konstrukční návrh hlavního podvozku a jeho vyhovující pevnostní kontrola provedená pomocí MKP analýzy. Ta funguje na principu kontroly kritéria porušení kompozitu. Největší výzvou bylo dosažení správného průhybu nohy, který umožní dostatečné pružení a současně pevnostně vyhovuje. Zároveň bylo třeba hledět na hmotnost, kdy je žádoucí dosáhnout toho, aby byla co nejmenší. Z těchto důvodů a rovněž z důvodu nedostatečné přesnosti analytického výpočtu byla provedena MKP analýza pro několik volených konceptů podvozkové nohy.

Vstupem pro pevnostní výpočet bylo zatížení podvozku, které bylo určeno dle předpisu. Ten ho udává ve formě zatížení statickými silami v místě dotyku kol a přistávací plochy a je závislé na průhybu podvozku ve svislém směru. Pevnostní kontrola založená na takto určeném zatížení není však dostatečný průkaz pevnosti pro certifikaci a bude určitě třeba provést shazovací zkoušky dle předpisu na prototypu podvozku.

Přesto by samotný finální návrh výpočtu měl věrohodně reflektovat realitu. Hlavním zdrojem nepřesnosti bude neznalost přesných materiálových vlastností, které by bylo možné získat jen prostřednictvím testů připravených vzorků. Dalším zdrojem nepřesnosti je neznalost přesného zatížení, které je v této chvíli závislé pouze na koncepčním návrhu a bude potřeba ho dále upřesňovat v závislosti na návrhu dalších součástí letounu.

Ačkoliv byla snaha co nejvíce respektovat aerodynamický návrh z práce Bc. Kláry Osičkové, tak byla malá změna tvaru nutná. Bez toho by nebylo možné dosáhnout správné kombinace průhybu ve svislém směru a vyhovující pevnosti. Co se týká aerodynamického návrhu by rovněž bylo žádoucí doplnit návrh o díly tvořící přechodovou plochu mezi aerodynamickým krytem a nohou a mezi trupem a podvozkem.

Na konec byl proveden hmotový rozbor, který udává informaci o hmotnosti jednotlivých částí i celé sestavy a souřadnic jejich těžišť. V porovnání s rešerší z koncepčního návrhu Ing. Jakuba Valenty vychází hmotnost podvozku o 1,4 kg nižší. Nicméně do výsledné hmotnosti nejsou započteny šrouby spojující závěsy s trupem, u nichž není známá přesná dimenze, ani ovládací prvky brzd.



7 Použité zdroje

- [1] VALENTA, Jakub. *Koncepční návrh rychlostního letounu*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [2] OSIČKOVÁ, Klára. *Návrh přistávacího zařízení rychlostního letounu*. Praha, 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [3] *UL2 - část I.: Požadavky letové způsobilosti SLZ, Ultralehké letouny řízené aerodynamicky*. Ke Kablu 289, Praha 10: LAA ČR, 2019, ročník 2019.
- [4] SLAVÍK, Svatomír. *Stavba letadel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1671-4.
- [5] MIKULA, Jan. *Konstrukce a projektování letadel II*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03338-4.
- [6] GUDMUNDSSON, Snorri. *General aviation aircraft design: applied methods and procedures*. Oxford: 2014. ISBN 978-0-12-397308-5
- [7] BERINGER. *Wheel - Brakes - Landing Gear For Aircraft Catalogue*. 2019.
- [8] Havel Composites CZ s.r.o. Havel Composites. Přeaslavice: Havel, 2018
Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/>
- [9] FUNKE, Herbert. *Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges*. Paderborn, 2001. Disertační práce. Universität-Gesamthochschule Paderborn.
- [10] ŠPUNDA, Jaromír. *Pevnost leteckých konstrukcí: Nosná soustava – křídla letounu*. 2. dopl. vyd. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1955, 146 s.
- [11] Carlsson, L. & Adams, D. & Pipes, Byron. *Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials, 2013*. Polymer Reviews. 53. 10.1080/15583724.2013.776588.
- [12] Raymer, Daniel P. *Aircraft Design: A Conceptual Approach*. Washington, D.C: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1989. Print. ISBN 9781624105739
- [13] Germanischer Lloyd. *Rules for Surveying and Testing of Plywood for Aircraft*, 1953.
- [14] A. M. McLEOD, *Bolt-bearing strength of wood and modified wood, Bearing strength of commercial aircraft plywood under aircraft bolts*, Madison: Wood Engineering Research Forest Products Laboratory, 1956.

Použité značení

$MTOW$	[kg]	Maximální vzletová hmotnost
v_f	[-]	Poměr vyztužených vláken v kompozitu
f_u	[-]	Celkový součinitel bezpečnosti
f	[-]	Základní součinitel bezpečnosti
f_D	[-]	Doplňkový součinitel bezpečnosti
x_{LG}	[mm]	Souřadnice dotyku kol a povrchu ve směru osy x
x_{TD}	[mm]	Souřadnice osy ostruhového kola ve směru x
y_{CG}	[mm]	Souřadnice těžiště ve směru y (střední hodnota)
y_{LG}	[mm]	Souřadnice dotyku kol a povrchu ve směru osy y
φ	[°]	Úhel postoje letounu
ws	[ms ⁻¹]	Klesací rychlost letounu
m	[kg]	Hmotnost letounu
g	[ms ⁻²]	Tíhové zrychlení dle předpisu
S	[m ²]	Plocha křídla
n_{pr}	[-]	Provozní násobek v těžišti letounu
n_k	[-]	Provozní násobek na kolech letounu
y	[mm]	Celková délka tlumení
y_{ef}	[mm]	Efektivní délka tlumení
y_{PN}	[mm]	Předpokládané stlačení pneumatiky
y_{TL}	[mm]	Předpokládané stlačení podvozkové nohy
D_{pn}	[mm]	Největší průměr pneumatiky
D_{raf}	[mm]	Průměr ráfku kola
F_y	[N]	Síla ve směru osy y působící na kolo
F_x	[N]	Síla ve směru osy x působící na kolo
F_z	[N]	Síla ve směru osy z působící na kolo
T_1, T_2	[N]	Tečné síly v noze
N	[N]	Normálová síla v noze
M_{o1}, M_{o2}	[Nm]	Ohybové momenty v noze
M_k	[Nm]	Kroutící moment v noze
L	[mm]	Konstrukční vzdálenost středu kola a prutu
α	[°]	Úhel svírající část prutu s rovinou symetrie
γ	[°]	Úhel svírající osa s rovinou X
R_{mt}	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R_{md}	[MPa]	Mez pevnosti v tlaku
E	[GPa]	Modul pružnosti v tahu i tlaku
t_1	[mm]	Tloušťka jedné vrstvy uhlíkové tkaniny
$\frac{m}{S}$	[kgm ⁻²]	Plošná hustota tkaniny

ρ_c	$[kgm^{-3}]$	<i>Hustota uhlíkové tkaniny</i>
h_{ef}	$[mm]$	<i>Efektivní výška nosníku</i>
H	$[mm]$	<i>Maximální výška nosníku</i>
S_d, S_h	$[mm^2]$	<i>Plocha průřezu dolní, horní pásnice</i>
t_d, t_h	$[mm]$	<i>Tloušťka dolní, horní pásnice</i>
s_d, s_h	$[mm]$	<i>Šířka dolní, horní pásnice</i>
n_d, n_h	$[-]$	<i>Počet vrstev laminátu dolní, horní pásnice</i>
J_{H2}, J_{H1}	$[mm^4]$	<i>Kvadratické momenty vůči osám</i>
r_{2d}, r_{2h}, r_1	$[mm]$	<i>Vzdálenosti krajního vlákna nosného průřezu</i>
σ_d, σ_h	$[MPa]$	<i>Podélná napětí v pásnicích</i>
j_d, j_h	$[-]$	<i>Pevnostní jistoty dolní, horní pásnice</i>
t_2	$[mm]$	<i>Tloušťka jedné vrstvy sklené tkaniny</i>
ρ_s	$[kgm^{-3}]$	<i>Hustota skelné tkaniny</i>
T_{sp}, T_{sz}	$[N]$	<i>Posouvající síla v přední, zadní stojně</i>
n_p, n_z	$[-]$	<i>Počet vrstev laminátu přední, zadní stojny</i>
q_{sp}, q_{sz}	$[Nm^{-1}]$	<i>Smykové toky v přední, zadní stojně</i>
τ_{sp}, τ_{sz}	$[MPa]$	<i>Smyková napětí v přední, zadní stojně</i>
$\tau_{krit.}$	$[MPa]$	<i>Mez pevnosti ve smyku v rovině laminátu</i>
j_{sp}, j_{sz}	$[-]$	<i>Pevnostní jistoty přední, zadní stojny</i>
T_{BOLT}	$[N]$	<i>Tečná síla ve šroubovém spoji noha – kolo</i>
$S_{otl.}$	$[mm^2]$	<i>Plocha otláčení</i>
$\sigma_{otl.}$	$[MPa]$	<i>Početní napětí při otláčení</i>
$\sigma_{m_otl.}$	$[MPa]$	<i>Mez pevnosti při otláčení</i>
$j_{otl.}$	$[-]$	<i>Pevnostní jistoty při otláčení</i>
σ_{LEP}	$[MPa]$	<i>Početní napětí lepeného spoje</i>
S_{LEP}	$[mm^2]$	<i>Plocha lepeného spoje</i>
σ_{m_LEP}	$[MPa]$	<i>Mez pevnosti použitého lepidla</i>
j_{LEP}	$[-]$	<i>Jistota pevnostního výpočtu lepeného spoje</i>
m_p	$[kg]$	<i>Hmotnost podvozkové nohy</i>
x_{Tp}	$[mm]$	<i>Souřadnice těžiště podvozkové nohy</i>
y_{Tp}	$[mm]$	<i>Souřadnice těžiště podvozkové nohy</i>
z_{Tp}	$[mm]$	<i>Souřadnice těžiště podvozkové nohy</i>
m_c	$[kg]$	<i>Celková hmotnost sestavy podvozku</i>
x_T	$[mm]$	<i>Souřadnice těžiště sestavy podvozku</i>
y_T	$[mm]$	<i>Souřadnice těžiště sestavy podvozku</i>
z_T	$[mm]$	<i>Souřadnice těžiště sestavy podvozku</i>

Seznam obrázků

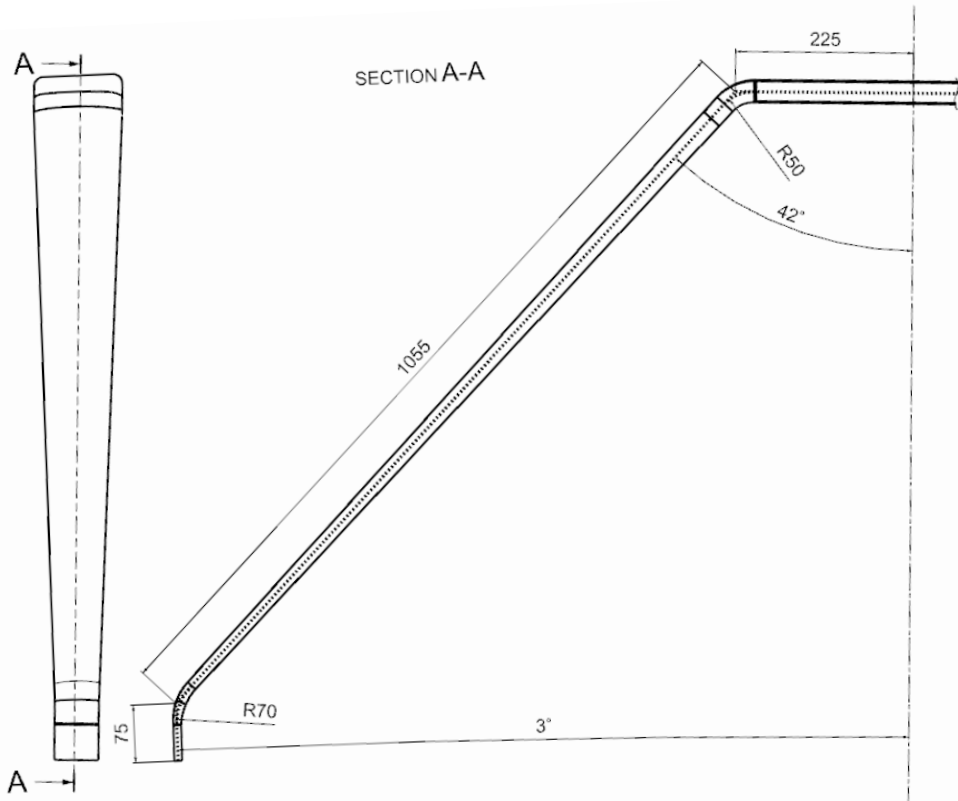
Obr. 1 Koncepční 3D model Ing. Valenty [1]	2
Obr. 2 Základní koncepty podvozku [4]	3
Obr. 3 Schéma děleného (a) a neděleného (b) pružinového podvozku [5]	4
Obr. 4 Geometrie ostruhového podvozku [1]	4
Obr. 5 Model pružinové nohy zpracovaný v systému Siemens NX, koncept A	5
Obr. 6 Model pružinové nohy zpracovaný v systému Siemens NX, koncept B	5
Obr. 7 Model pružinové nohy zpracovaný v systému Siemens NX, koncept C	6
Obr. 8 Schéma základních rozměrů	6
Obr. 9 Vybrané průřezy podvozkové nohy zobrazující vnější tvar	7
Obr. 10 Schéma průřezu nohy zobrazující návrh vnitřku nohy ve dvou variantách ..	8
Obr. 11 Schéma spojení nohy s kolovou osou a skladby nohy v tomto místě	8
Obr. 12 Návrh dílu tvořícího závěs přenášející síly ve směru osy x a y	10
Obr. 13 Návrh dílu tvořícího závěs přenášející sílu ve směru osy z	10
Obr. 14 Schéma kolové osy FUS-006.4 [7]	11
Obr. 15 Schéma sestavy kola, brzdy, osy a přidružených dílů [7]	11
Obr. 16 Sestava aerodynamického krytu	12
Obr. 17 Způsob spojení dvou rozebíratelných částí krytu	12
Obr. 18 Zobrazení celé sestavy hlavního podvozku	13
Obr. 19 Schematicky naznačený způsob vrstvení a formování, šedě stojiny, černě pásnice, fialově potahové vrstvy	15
Obr. 20 Zobrazení působících sil pro případ vodorovného přistání [3]	20
Obr. 21 Zobrazení působících síly pro případ přistání s velkým úhlem náběhu [3] ..	21
Obr. 22 Zobrazení působících sil pro případ bočního zatížení [3]	22
Obr. 23 Zobrazení působících sil pro případ zatížení při brždění [3]	23
Obr. 24 Schéma pro statický výpočet se zobrazeným vnějšími silami	24
Obr. 25 Znázornění a popis vnitřních silových účinků	25
Obr. 26 Rozdělení prutu pro další výpočet	25
Obr. 27 Zobrazení reálného a zjednodušeného tvaru pásnic pro koncept B	34
Obr. 28 Zobrazení polohy a OEO pro obě navržené varianty umístění stojin	38
Obr. 29 Idealizovaný model pro koncept A	42
Obr. 30 Vytvořená 2D síť pro koncept A, v částečném řezu	42
Obr. 31 Zobrazení okrajových podmínek	45
Obr. 32 Zobrazení umístění sil a silových momentů pro případ vodorovného zatížení	45
Obr. 33 Zobrazení kritéria porušení pro 4. vrstvu konceptu A se dvěma stojinami, detail na spodní část v kritickém místě (vpravo nahoře) a detailní záběr stojin (vpravo dole)	47
Obr. 34 Zobrazení konstrukčně upraveného 3D modelu upraveného pro další výpočet	48
Obr. 35 Zobrazení kritéria porušení pro 4. vrstvu, detail na spodní část v kritickém místě (vpravo nahoře) a detailní záběr stojin (vpravo dole)	49
Obr. 36 Nereálný průnik materiálu způsobený zjednodušením	49
Obr. 37 Zobrazení kritéria porušení pro 4. vrstvu, detail na spodní část v kritickém místě (vpravo nahoře) a detailní záběr stojin (vpravo dole)	50
Obr. 38 Zobrazení posunutí ve svislém směru pro provozní zatížení	51
Obr. 39 Schéma spojení s vyznačenými rozměry	52
Obr. 40 Schéma pro kontrolu lepeného spoje	53
Obr. 41 Zobrazení stavebního souřadnicového systému	54
Obr. 42 Zobrazení těžiště celé sestavy	55

Seznam tabulek

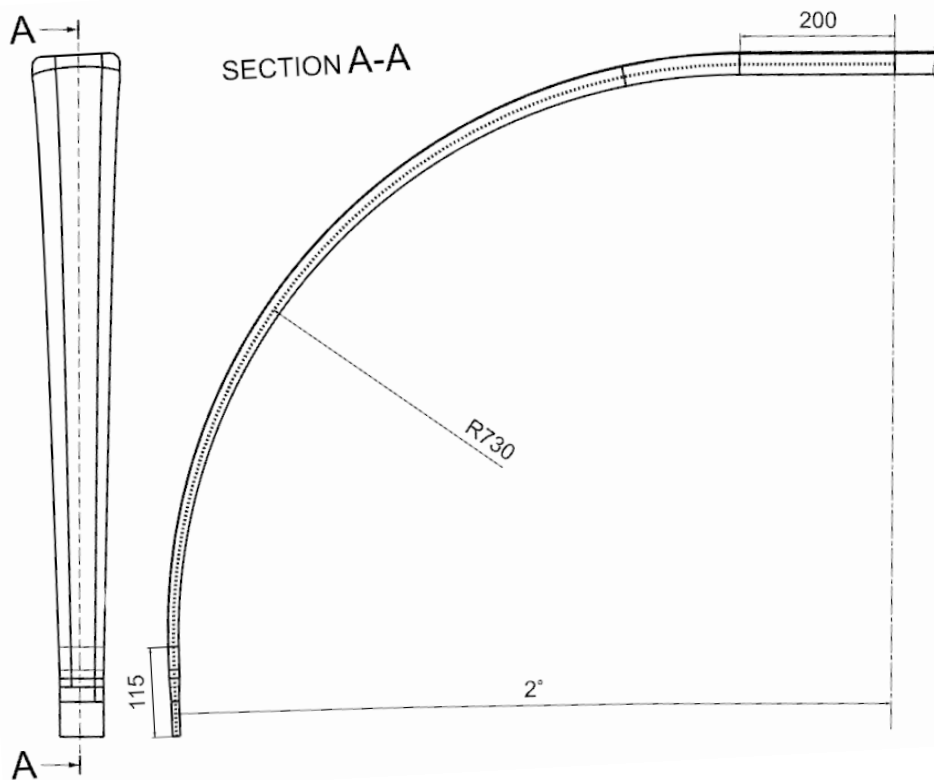
Tab. 1 Základní vlastnosti volených tkanin [8], [9]	9
Tab. 2 Základní vlastnosti volených matric a lepidel [8].....	9
Tab. 3 Kusovník sestavy	14
Tab. 4 Doplnkové součinitele bezpečnosti pro jednotlivé případy [3].....	16
Tab. 5 Hmotová obálka [1]	18
Tab. 6 Vypočtené násobky jednotlivých bodů hmotové obálky	20
Tab. 7 Vypočtené početní zatížení pro základní případy přistání, kritické body zvýrazněny	22
Tab. 8 Vypočtené početní zatížení pro dva doplnkové případy přistání, kritické body zvýrazněny.....	24
Tab. 9 Podoba dolní pásnice po délce podvozkové nohy a jistota pevnostního výpočtu	37
Tab. 10 Podoba horní pásnice po délce podvozkové nohy a jistota pevnostního výpočtu	37
Tab. 11 Návrh stojiny po délce podvozkové nohy a jistota pevnostního výpočtu, jedna stojina.....	40
Tab. 12 Návrh stojin po délce podvozkové nohy a jistota pevnostního výpočtu, dvě stojiny	40
Tab. 13 Mechanické a pevnostní vlastnosti uhlíkového jednosměrného laminátu [8], [9], [11].....	43
Tab. 14 Mechanické a pevnostní vlastnosti sklolaminátu s plátňovou vazbou [8], [9], [11].....	43
Tab. 15 Počty vrstev laminátu pro jednotlivé úseky, koncept A, jedna stojina	44
Tab. 16 Počty vrstev laminátu pro jednotlivé úseky, koncept A, dvě stojiny.....	44
Tab. 17 Hodnoty sil a silových momentů pro všechny případy zatížení.....	46
Tab. 18 Vybrané hodnoty pro všechny počítané varianty.....	47
Tab. 19 Počty vrstev laminátu pro jednotlivé úseky, upravený koncept A.....	48
Tab. 20 Finální počty vrstev laminátu pro jednotlivé úseky.....	50
Tab. 21 Tabulka hmotností a souřadnic těžiště jednotlivých dílů	55

Příloha 1

Koncept B - rozměry



Koncept C - rozměry



Příloha 2

Tabulka rozložení zatížení v podvozkové noze

x [mm]	VODOROVNÉ						S VELKÝM ÚHLEM NÁBĚHU					
	N [N]	T ₁ [N]	T ₂ [N]	M _{o1} [Nm]	M _{o2} [Nm]	M _k [Nm]	N [N]	T ₁ [N]	T ₂ [N]	M _{o1} [Nm]	M _{o2} [Nm]	M _k [Nm]
0	8450	-291	2068	328	511	136	5329	-196	-1732	0	322	-105
20	8450	-291	2068	370	505	136	5329	-196	-1732	-35	318	-105
25	8450	-291	2068	381	504	136	5329	-196	-1732	-44	317	-105
25	8450	-291	2068	381	504	136	5329	-196	-1732	-44	317	-105
30	8450	287	2068	380	504	110	5330	169	-1732	-45	317	-101
40	8323	1487	2068	364	513	54	5252	926	-1732	-38	322	-93
50	8026	2657	2068	330	533	-4	5066	1664	-1732	-22	335	-83
60	7566	3773	2068	290	566	-62	4778	2369	-1732	-6	356	-71
73	6750	5092	2068	236	623	-133	4265	3202	-1732	10	391	-54
73	6750	5092	2068	236	623	-133	4265	3202	-1732	10	391	-54
100	6750	5092	2068	293	761	-133	4265	3202	-1732	-37	478	-54
150	6750	5092	2068	396	1015	-133	4265	3202	-1732	-124	638	-54
200	6750	5092	2068	499	1270	-133	4265	3202	-1732	-210	798	-54
250	6750	5092	2068	603	1525	-133	4265	3202	-1732	-297	959	-54
300	6750	5092	2068	706	1779	-133	4265	3202	-1732	-384	1119	-54
350	6750	5092	2068	810	2034	-133	4265	3202	-1732	-470	1279	-54
400	6750	5092	2068	913	2288	-133	4265	3202	-1732	-557	1439	-54
450	6750	5092	2068	1016	2543	-133	4265	3202	-1732	-643	1599	-54
500	6750	5092	2068	1120	2797	-133	4265	3202	-1732	-730	1759	-54
550	6750	5092	2068	1223	3052	-133	4265	3202	-1732	-817	1919	-54
600	6750	5092	2068	1326	3307	-133	4265	3202	-1732	-903	2079	-54
650	6750	5092	2068	1430	3561	-133	4265	3202	-1732	-990	2239	-54
700	6750	5092	2068	1533	3816	-133	4265	3202	-1732	-1076	2399	-54
750	6750	5092	2068	1637	4070	-133	4265	3202	-1732	-1163	2559	-54
800	6750	5092	2068	1740	4325	-133	4265	3202	-1732	-1249	2720	-54
908	6750	5092	2068	1964	4877	-133	4265	3202	-1732	-1437	3067	-54
908	6750	5092	2068	1964	4877	-133	4265	3202	-1732	-1437	3067	-54
910	6718	5133	2071	1968	4885	-146	4244	3229	-1730	-1440	3072	-45
920	6507	5393	2090	1989	4938	-224	4112	3400	-1718	-1450	3105	13
940	6055	5886	2128	2007	5050	-380	3827	3726	-1693	-1453	3176	128
960	5564	6342	2167	1993	5173	-533	3518	4027	-1669	-1429	3254	242
980	5037	6756	2205	1966	5304	-683	3187	4303	-1645	-1397	3337	354
1000	4478	7127	2243	1926	5442	-828	2835	4552	-1621	-1355	3426	464
1020	3891	7452	2281	1875	5588	-968	2465	4771	-1596	-1305	3519	572
1040	3279	7728	2319	1811	5740	-1102	2079	4960	-1572	-1247	3616	675
1060	2645	7955	2357	1737	5897	-1229	1680	5118	-1548	-1182	3717	775
1080	1995	8129	2396	1652	6058	-1348	1270	5243	-1523	-1108	3820	869
1140	0	8335	2509	1435	6549	-1649	10	5416	-1450	-911	4138	1115
1140	0	8335	2509	1435	6549	-1649	0	5416	-1450	-911	4138	1115
1150	0	8335	2509	1461	6635	-1649	0	5416	-1450	-926	4194	1115
1180	0	8335	2509	1536	6884	-1649	0	5416	-1450	-969	4356	1115
1180	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0
1200	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0
1220	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0
1240	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0
1260	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0
1280	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0
1300	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0
1320	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0
1340	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0
1360	0	0	0	1536	6885	0	0	0	0	-969	4357	0

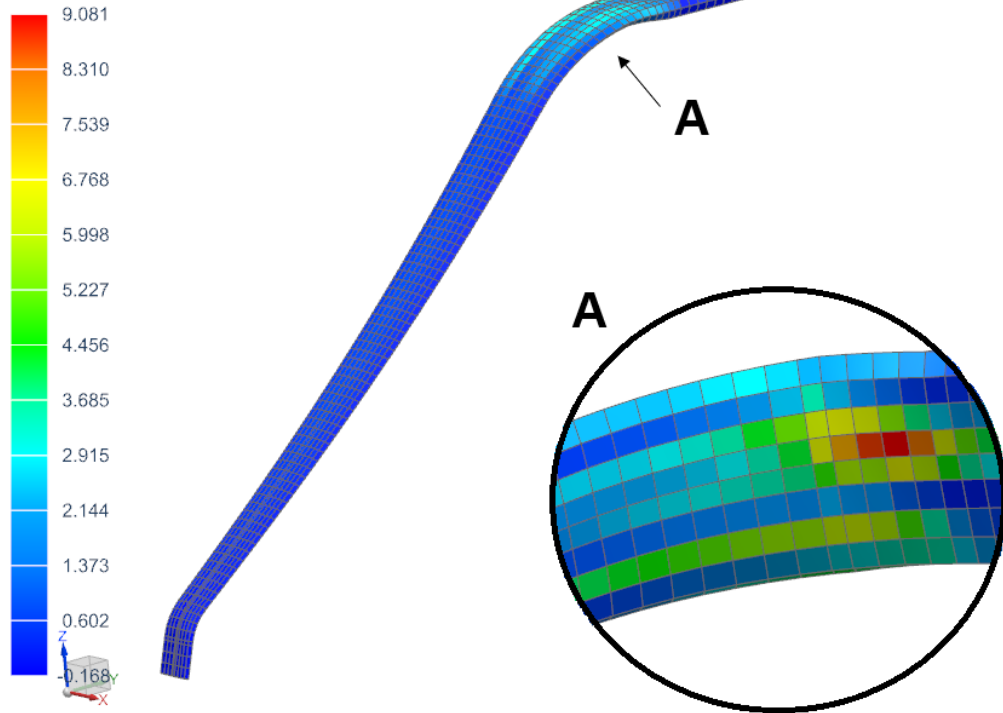
x [mm]	BRZDĚNÍ						BOČNÍ					
	N [N]	T ₁ [N]	T ₂ [N]	M _{o1} [Nm]	M _{o2} [Nm]	M _k [Nm]	N [N]	T ₁ [N]	T ₂ [N]	M _{o1} [Nm]	M _{o2} [Nm]	M _k [Nm]
0	5100	-148	1946	449	313	132	4111	1944	-1336	0	509	-166
20	5100	-148	1946	488	310	132	4111	1944	-1336	-27	548	-166
25	5100	-148	1946	498	309	132	4111	1944	-1336	-34	558	-166
25	5100	-148	1946	498	309	132	4111	1944	-1336	-34	558	-166
30	5098	201	1946	497	309	98	3968	2221	-1336	-29	568	-163
40	5018	924	1946	479	315	25	3612	2763	-1336	-12	593	-155
50	4835	1629	1946	441	328	-48	3181	3249	-1336	12	623	-144
60	4554	2301	1946	394	347	-121	2686	3669	-1336	36	658	-129
73	4057	3094	1946	329	382	-210	1971	4098	-1336	61	708	-107
73	4057	3094	1946	329	382	-210	1971	4098	-1336	61	708	-107
100	4057	3094	1946	381	466	-210	1971	4098	-1336	25	819	-107
150	4057	3094	1946	479	621	-210	1971	4098	-1336	-42	1024	-107
200	4057	3094	1946	576	776	-210	1971	4098	-1336	-109	1229	-107
250	4057	3094	1946	673	930	-210	1971	4098	-1336	-176	1434	-107
300	4057	3094	1946	771	1085	-210	1971	4098	-1336	-243	1639	-107
350	4057	3094	1946	868	1240	-210	1971	4098	-1336	-309	1844	-107
400	4057	3094	1946	965	1394	-210	1971	4098	-1336	-376	2049	-107
450	4057	3094	1946	1063	1549	-210	1971	4098	-1336	-443	2254	-107
500	4057	3094	1946	1160	1704	-210	1971	4098	-1336	-510	2458	-107
550	4057	3094	1946	1257	1859	-210	1971	4098	-1336	-576	2663	-107
600	4057	3094	1946	1354	2013	-210	1971	4098	-1336	-643	2868	-107
650	4057	3094	1946	1452	2168	-210	1971	4098	-1336	-710	3073	-107
700	4057	3094	1946	1549	2323	-210	1971	4098	-1336	-777	3278	-107
750	4057	3094	1946	1646	2477	-210	1971	4098	-1336	-844	3483	-107
800	4057	3094	1946	1744	2632	-210	1971	4098	-1336	-910	3688	-107
908	4057	3094	1946	1955	2968	-210	1971	4098	-1336	-1055	4132	-107
908	4057	3094	1946	1955	2968	-210	1971	4098	-1336	-1055	4132	-107
910	4037	3119	1948	1959	2972	-223	1945	4111	-1333	-1057	4139	-101
920	3909	3274	1959	1982	3004	-301	1779	4188	-1318	-1062	4180	-58
940	3635	3567	1983	2005	3073	-455	1439	4323	-1287	-1059	4265	26
960	3337	3837	2006	1996	3147	-606	1090	4430	-1256	-1036	4353	111
980	3018	4082	2029	1975	3226	-754	733	4509	-1225	-1007	4442	195
1000	2680	4301	2052	1941	3310	-897	372	4559	-1194	-971	4533	278
1020	2324	4492	2076	1895	3398	-1033	9	4580	-1163	-929	4624	359
1040	1954	4653	2099	1838	3489	-1164	-354	4571	-1132	-881	4716	437
1060	1571	4785	2122	1768	3584	-1287	-716	4534	-1101	-828	4807	513
1080	1178	4885	2145	1688	3680	-1401	-1072	4468	-1069	-770	4897	586
1140	-30	4993	2213	1474	3975	-1688	-2087	4105	-977	-610	5153	778
1140	0	4993	2213	1474	3975	-1688	-2087	4105	-977	-610	5153	778
1150	0	4993	2213	1497	4027	-1688	-2087	4105	-977	-620	5195	778
1180	0	4993	2213	1563	4176	-1688	-2087	4105	-977	-650	5318	778
1180	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-650	5317	0
1200	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-662	5036	0
1220	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-673	4755	0
1240	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-685	4473	0
1260	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-697	4192	0
1280	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-709	3910	0
1300	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-721	3629	0
1320	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-733	3347	0
1340	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-745	3066	0
1360	0	0	0	1564	4176	0	-2087	-14073	-595	-757	2784	0

x [mm]	BOČNÍ'					
	N [N]	T1 [N]	T2 [N]	Mo1 [Nm]	Mo2 [Nm]	Mk [Nm]
0	3936	-3319	-1279	0	-158	51
20	3936	-3319	-1279	-26	-224	51
25	3936	-3319	-1279	-32	-241	51
25	3936	-3319	-1279	-32	-241	51
30	4154	-3043	-1279	-42	-257	53
40	4544	-2420	-1279	-55	-284	57
50	4843	-1749	-1279	-61	-305	59
60	5042	-1041	-1279	-66	-319	60
73	5148	-103	-1279	-74	-326	60
73	5148	-103	-1279	-74	-326	60
100	5148	-103	-1279	-108	-329	60
150	5148	-103	-1279	-172	-334	60
200	5148	-103	-1279	-236	-339	60
250	5148	-103	-1279	-300	-344	60
300	5148	-103	-1279	-364	-349	60
350	5148	-103	-1279	-428	-355	60
400	5148	-103	-1279	-492	-360	60
450	5148	-103	-1279	-556	-365	60
500	5148	-103	-1279	-620	-370	60
550	5148	-103	-1279	-684	-375	60
600	5148	-103	-1279	-748	-380	60
650	5148	-103	-1279	-812	-385	60
700	5148	-103	-1279	-876	-391	60
750	5148	-103	-1279	-940	-396	60
800	5148	-103	-1279	-1004	-401	60
908	5148	-103	-1279	-1142	-412	60
908	5148	-103	-1279	-1142	-412	60
910	5148	-70	-1279	-1145	-412	67
920	5147	139	-1279	-1157	-412	113
940	5120	556	-1280	-1166	-405	204
960	5060	969	-1281	-1156	-390	293
980	4967	1376	-1281	-1138	-366	380
1000	4843	1774	-1282	-1114	-335	465
1020	4688	2161	-1283	-1082	-295	547
1040	4503	2534	-1283	-1044	-248	626
1060	4289	2891	-1284	-999	-194	700
1080	4047	3230	-1285	-947	-133	770
1140	3180	4111	-1286	-812	86	948
1140	3180	4111	-1286	-812	86	948
1150	3180	4111	-1286	-825	129	948
1180	3180	4111	-1286	-864	252	948
1180	3180	-14073	-595	-871	251	0
1200	3180	-14073	-595	-852	532	0
1220	3180	-14073	-595	-840	813	0
1240	3180	-14073	-595	-828	1095	0
1260	3180	-14073	-595	-816	1376	0
1280	3180	-14073	-595	-804	1658	0
1300	3180	-14073	-595	-793	1939	0
1320	3180	-14073	-595	-781	2221	0
1340	3180	-14073	-595	-769	2502	0
1360	3180	-14073	-595	-757	2784	0

Příloha 3

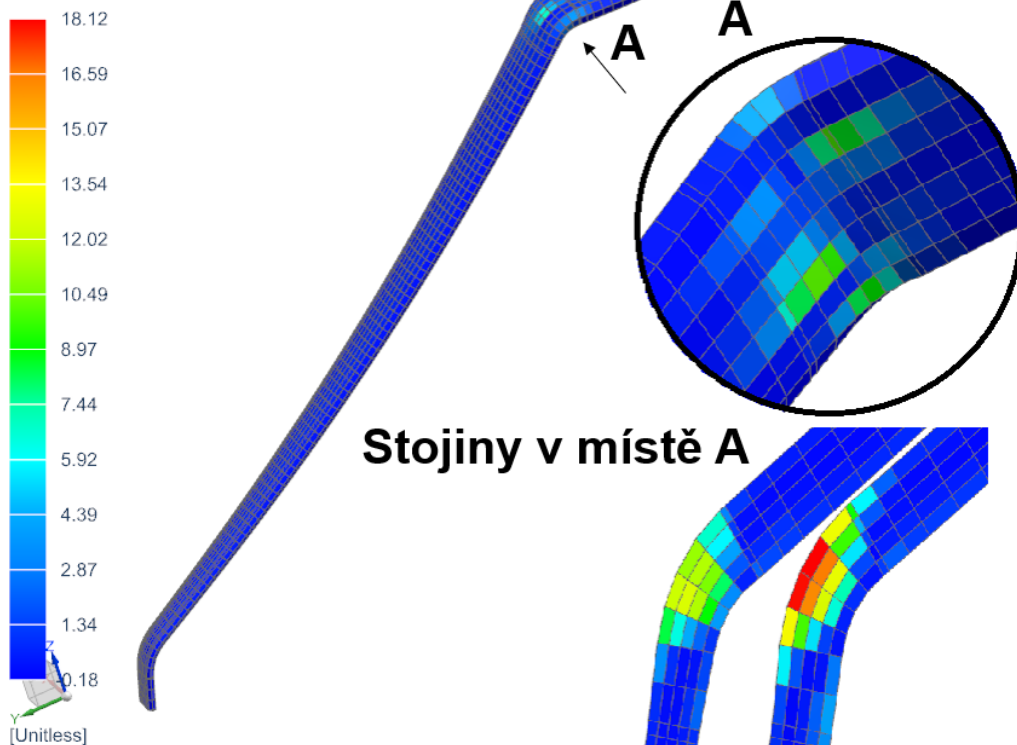
Varianta A s jednou stojinou, 4. vrstva – kritérium porušení

Pruznice_A_FEM_sim1 : Vodorovné Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Ply Failure Index - Elemental, Scalar, Ply 4 Mid
Min : -0.169, Max : 9.081, Units = Unitless
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



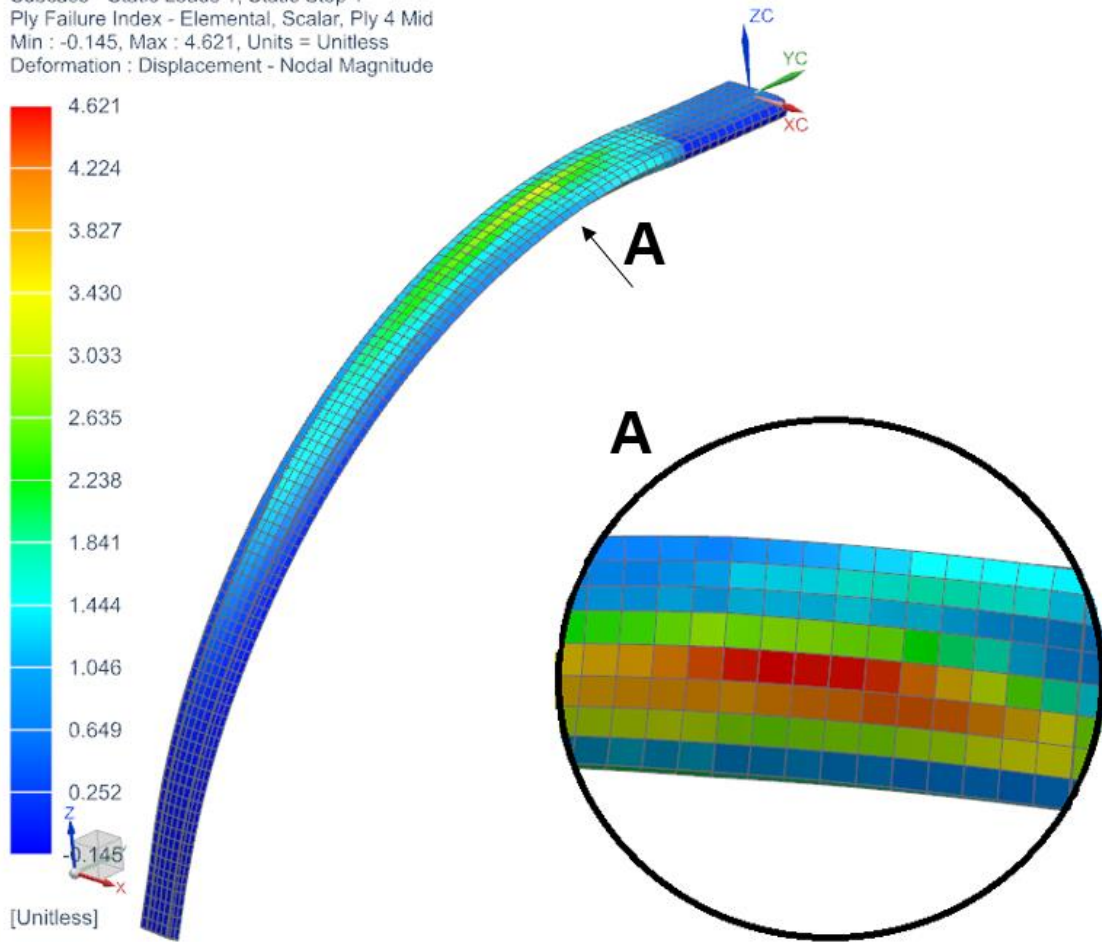
Varianta B s dvěma stojinami, 4. vrstva – kritérium porušení

Pruznice_A_FEM_sim1 : Vodorovné Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Ply Failure Index - Elemental, Scalar, Ply 4 Mid
Min : -0.18, Max : 18.22, Units = Unitless
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



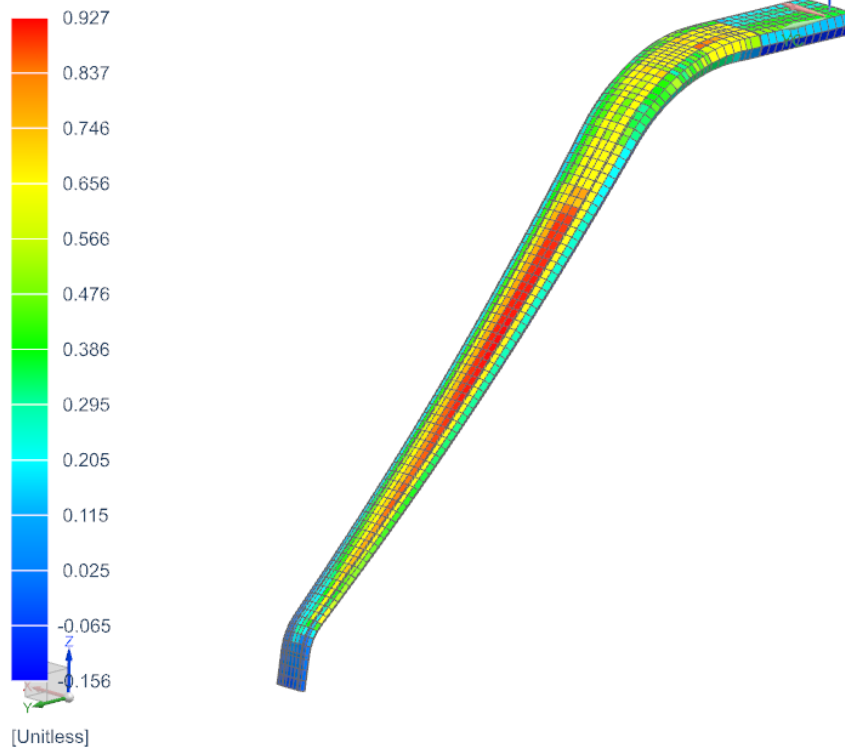
Varianta C s dvěma stojinami, 4. vrstva – kritérium porušení

Prznice_A_FEM_sim1 : Vodrovné Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Ply Failure Index - Elemental, Scalar, Ply 4 Mid
Min : -0.145, Max : 4.621, Units = Unitless
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



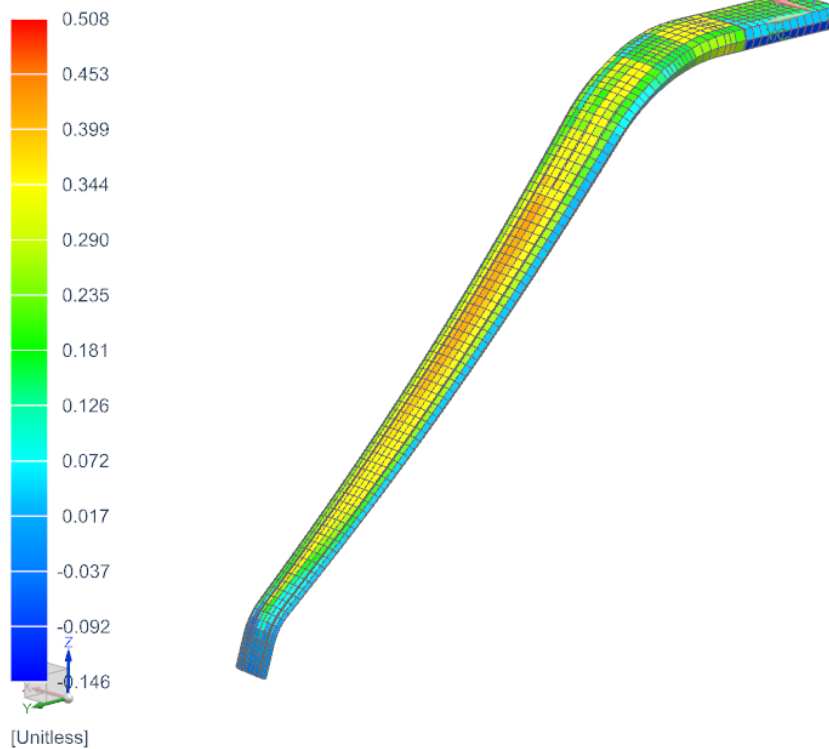
Finální varianta – zatížení při vodorovném přistání, 4. vrstva – kritérium porušení

Pruznice_A_FEM_sim1 : Vodorovné Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Ply Failure Index - Elemental, Scalar, Ply 4 Mid
Min : -0.156, Max : 0.927, Units = Unitless
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



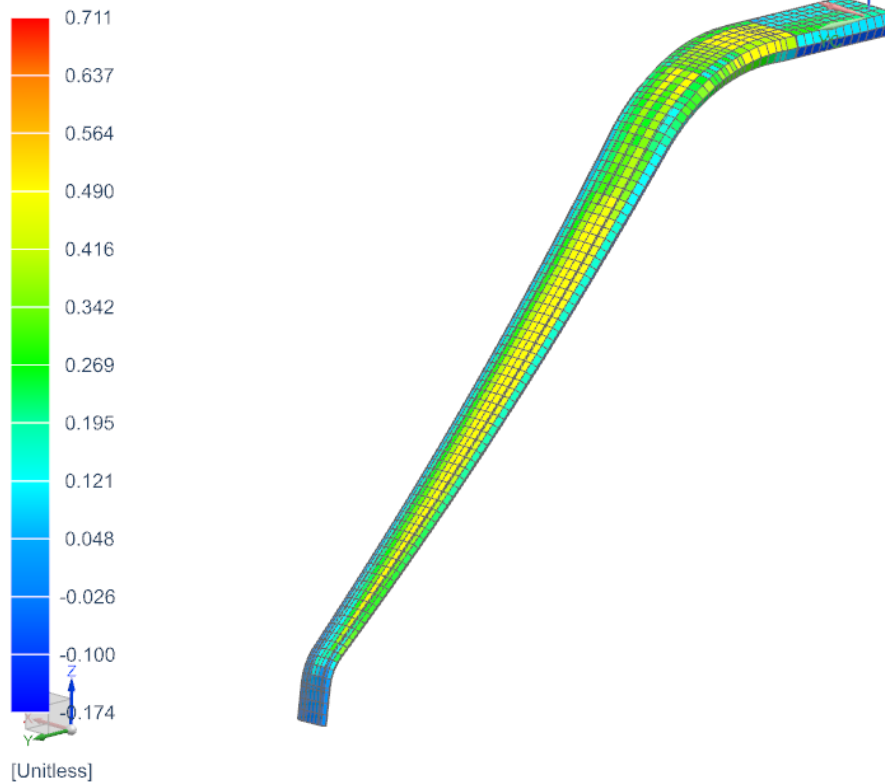
Finální varianta – zatížení s velkým úhlem náběhu, 4. vrstva – kritérium porušení

Pruznice_A_FEM_sim1 : S velkým úhlem náběhu Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Ply Failure Index - Elemental, Scalar, Ply 4 Mid
Min : -0.146, Max : 0.508, Units = Unitless
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



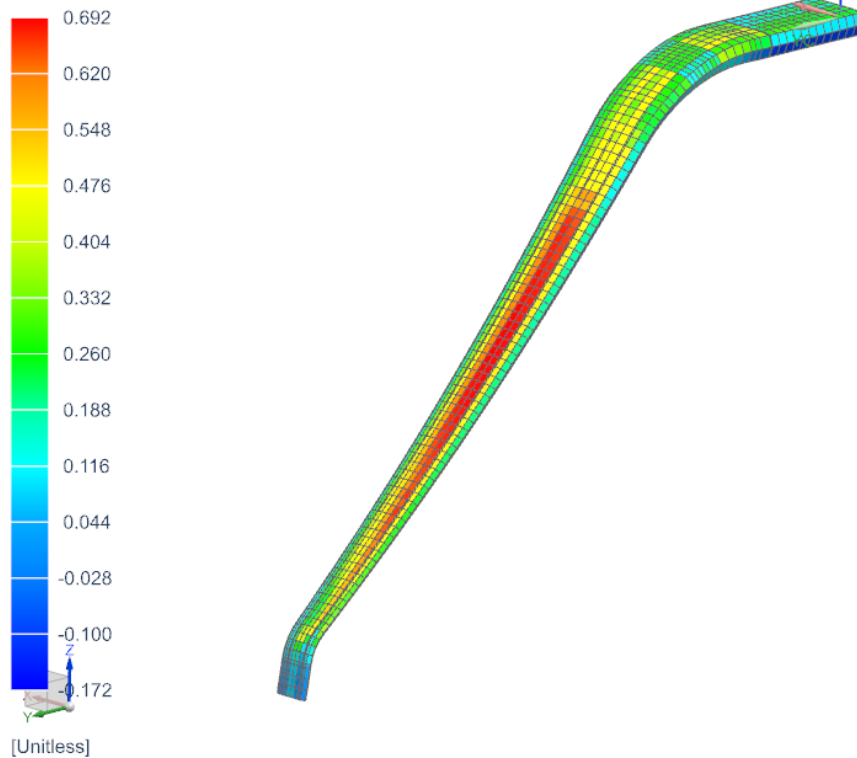
Finální varianta – zatížení při brždění, 4. vrstva – kritérium porušení

Pruznice_A_FEM_sim1 : Brždění Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Ply Failure Index - Elemental, Scalar, Ply 4 Mid
Min : -0.174, Max : 0.711, Units = Unitless
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



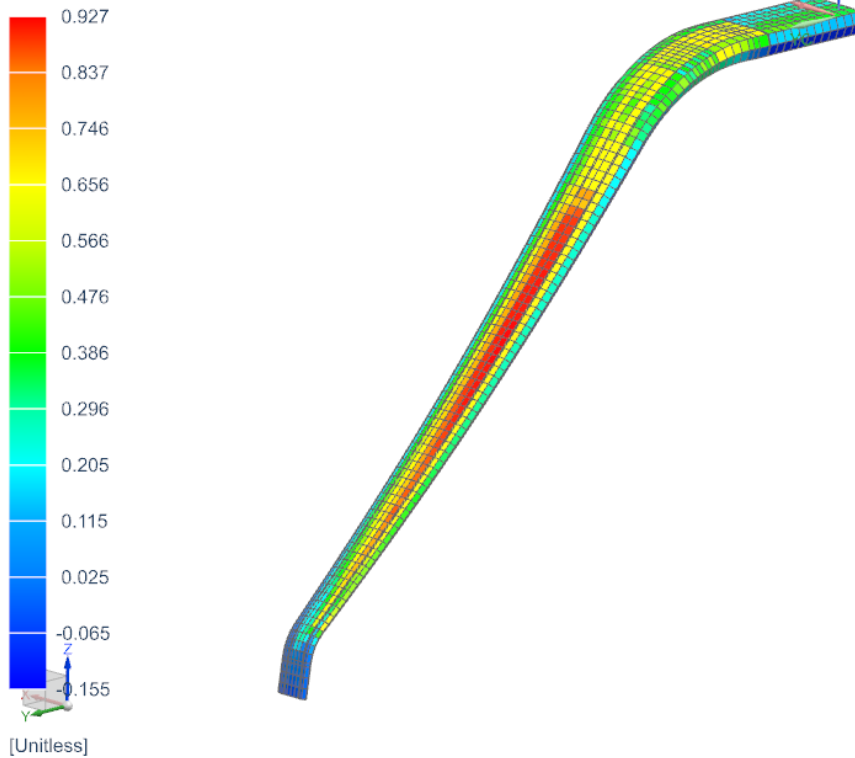
Finální varianta – zatížení boční, 4. vrstva – kritérium porušení

Pruznice_A_FEM_sim1 : Boční Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Ply Failure Index - Elemental, Scalar, Ply 4 Mid
Min : -0.172, Max : 0.692, Units = Unitless
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Finální varianta – zatížení vodorovné - nelineární, 4. vrstva – kritérium porušení

Pruznice_A_FEM_sim1 : Nelineární vodorovné Result
Subcase - NL Static Loads 1, Static Step 1
Ply Failure Index - Elemental, Scalar, Ply 4 Mid
Min : -0.155, Max : 0.927, Units = Unitless
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Finální varianta – zatížení vodorovné - provozní, 1. vrstva – kritérium porušení

Pruznice_A_FEM_sim1 : Provozní Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Ply Failure Index - Elemental, Scalar, Ply 1 Mid
Min : -0.058, Max : 0.918, Units = Unitless
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

