



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH PRŮKAZNÝCH STATICKÝCH PEVNOSTNÍCH ZKOUŠEK LETOUNU V KATEGORII UL

DESIGN OF CERTIFICATION STATIC STRENGTH TESTS OF THE AIRCRAFT UL CATEGORY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vadym Serediuk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Vadym Serediuk
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Návrh průkazných statických pevnostních zkoušek letounu v kategorii UL

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Příprava podkladů pro certifikační zkoušky základních konstrukčních celků malého letounu.

Cíle diplomové práce:

- rozbor požadavků předpisu na konstrukci letounu
- příprava definice případů zatížení pro zkoušku
- plán zkoušek
- návrh jednotlivých zkoušek i se základním návrhem potřebných přípravků

Seznam doporučené literatury:

ČALKOVSKÝ, A., PÁVEK, J.: Konstrukce a pevnost letadel I., Brno, 1986.

PÍŠTĚK, A., GRÉGR, O., KAHÁNEK, V., BÖHM, R.: Pevnost a životnost letadel, Brno, 1987.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem průkazných statických pevnostních zkoušek pro nově vyvíjený letoun společnosti TL-Ultralight. Na začátku práce je obecně pojednáno o teorii zkoušení letadel s důrazem na statické pevnostní zkoušky. Dále je proveden rozbor požadavků českého předpisu UL 2 a německého LTF-UL, jež představují certifikační bázi pro tento letoun. Jsou detailně rozebrány požadavky na konstrukci letounu (resp. jeho jednotlivých částí) a požadavky na pevnostní zkoušky. Na bázi předpisu a poskytnutých výpočtových protokolů jsou vypočteny a připraveny jednotlivé zkušební případy a plány zkoušek křídla, ocasních ploch, motorového lože a podvozku. Vzápětí práce je proveden výpočet vahadlového systému a základní návrh přípravků.

Summary

The diploma thesis involves the design of certification static strength tests for the newly developed aircraft of the TL-Ultralight company. At the beginning of the work, the theory of aircraft testing is generally discussed with emphasis on static strength tests. Furthermore, an analysis of the requirements of the Czech regulation UL 2 and the German LTF-UL, which represent the certification basis for this aircraft, is performed. The requirements of regulations on the construction of the aircraft (or its individual parts) and the requirements for strength tests are discussed in detail. Based on the regulation and the provided calculation protocols, individual test cases and test plans of the wing, tail surfaces, engine bed, and chassis are calculated and prepared. In the end, the calculation of the rocker system and the basic design of jigs are performed.

Klíčová slova

Návrh zkoušek, statická pevnostní zkouška, certifikační zkouška, zkoušení letadel, předpis UL 2, ultralight, zkouška křídla, zkouška ocasních ploch, zkouška podvozku, zkouška motorového lože, vahadlový systém, zkušební přípravky.

Keywords

Test design, static strength test, certification test, aircraft testing, UL 2 regulation, ultralight, wing test, tail surface test, landing gear test, engine bed test, rocker system, test jigs.

SEREDIUK, V. *Návrh průkazných statických pevnostních zkoušek letounu v kategorii UL*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021. 87 s. Vedoucí doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím pouze vlastních znalostí a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

Bc. Vadym Serediuk

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce doc. Ivo Jebáčku za jeho cenné rady, podporu a trpělivost při vypracování diplomové práce.

Bc. Vadym Serediuk

Obsah

1	Úvod	3
2	Teorie zkoušení letadel	4
2.1	Historie a podstata zkoušení letadel	4
2.2	Typy zkoušek	4
2.3	Metody zatěžování a zkušební vybavení	5
2.3.1	Vahadlový systém	5
2.3.2	Spojité zatěžování pomocí závaží	6
2.3.3	Zkouška tlakovou tekutinou	6
2.3.4	Zatěžování osamělými silami: přípravky, lana a kladky	7
2.3.5	Další vybavení zkušebny	8
3	Zkoušené letadlo	9
3.1	Celková dispozice letounu	9
3.2	Popis jednotlivých částí	9
3.2.1	Křídlo	9
3.2.2	Trup	10
3.2.3	Podvozek	10
3.2.4	Soustava řízení	10
3.2.5	Pohonná jednotka	10
4	Rozbor požadavků předpisu na zkoušení konstrukce letounu	11
4.1	Předpisy UL 2 a LTF-UL	11
4.2	Obecné definice a požadavky	11
4.2.1	Pevnostní požadavky a součinitel bezpečnosti	11
4.2.2	Rychlosti, násobky a letové obálky	12
4.3	Požadavky na konstrukci křídla	14
4.4	Požadavky na konstrukci trupu a ocasních ploch	15
4.5	Požadavky na konstrukci podvozku	17
4.6	Požadavky na konstrukci soustavy řízení	18
5	Návrh zkoušek a definice případů zatížení	19
5.1	Křídlo	19
5.1.1	Zkouška křídla	19
5.1.2	Předběžný návrh zkušebních případů zatížení křídla	23
5.1.3	Zkouška křídélka a vyvažovací plošky	29
5.1.4	Zkouška vztlakové klapky	33
5.1.5	Zkouška palivové nádrže	36
5.2	Ocasní plochy	36
5.2.1	Zkouška VOP	36
5.2.2	Zkouška směrového kormidla	42
5.3	Zkouška motorového lože	45
5.4	Zkouška podvozku	49
5.5	Plán zkoušek	52

OBSAH

6	Konstrukce přípravků	57
6.1	Vahadlový systém	57
6.2	Přípravek motorového lože	60
6.3	Přípravky podvozku	63
6.3.1	Přídový podvozek	64
6.3.2	Hlavní podvozek	66
7	Závěr	68
8	Seznam použitých zkratk a symbolů	71
9	Přílohy	74
9.1	Příloha A – průběhy zatížení	74
9.2	Příloha B – nakládací plány	78
9.3	Příloha C – případy zatížení motorového lože	82
9.4	Příloha D – případy zatížení podvozku	84
9.5	Příloha E (elektronická)	87

1. Úvod

Bezpečnost byla, je, a vždycky bude prioritou číslo jedna v civilním letectví. Bezpečnost letadla je ovlivňována po celou dobu jeho existence - základní návrh, konstrukční a materiálové řešení, zařazení do provozu a provoz v určitých podmínkách, předepsaná údržba a opravy, a tak dál. Před zařazením do provozu nový typ letadla musí dostat od zodpovědné instance tzv. Typový průkaz letové způsobilosti (mluvíme-li o České republice), který je potvrzením, že daný typ letadla splňuje určité požadavky a je bezpečný pro letový provoz. Požadavky na letovou způsobilost jsou vydávány příslušným statním úřadem, resp. mezinárodní organizací formou leteckých předpisů pro danou kategorii.

Jednou ze základních složek bezpečnosti letadla jako celku je jeho schopnost bezpečně přenášet zatížení, která mohou vzniknout za normálního provozu (tedy zatížení, pro která je tento typ letounu navržen). Kromě toho, konstrukce letounu musí „do jisté míry“ chránit osoby na palubě před možnými důsledky nouzových situací. Ověření splnění tohoto a jiných požadavků se mimo jiné provádí pomocí široké škály certifikačních zkoušek letadla.

Daná diplomová práce se zabývá rozбором požadavků leteckého předpisu na konstrukci letounu v kategorii UL a následným návrhem průkazných statických zkoušek. V rámci práce budou vypočteny zkušební případy, budou připraveny plány zkoušek a navrženy potřebné přípravky.

2. Teorie zkoušení letadel

2.1. Historie a podstata zkoušení letadel

Historie zkoušení letadel má začátek v době předcházející prvním řízeným letadlům. Již na konci 19. století americký vynálezce a pionýr letectví Samuel Langley aktivně používal písek pro statické testy svých modelů letadel. V roce 1903 bratři Wrightové provedli první statickou zatěžovací zkoušku letadla vlastní výroby Flyer, které se později stalo prvním motorovým letadlem schopným řízeného letu. Při zkoušce letadlo bylo pověšeno za konce křídel, přičemž na ně byl naložen písek o pětkrát až šestkrát vyšší hmotnosti, než je hmotnost pilota. V roce 1904 byla provedena první zkouška, při níž byl Flyer převrácen na záda a písek se nakládal na křídla s ohledem na tehdejší znalosti aerodynamiky a rozložení tlaku po profilu.

Ačkoli hlavní motivací pevnostních zkoušek v té době byl strach pilotů o vlastní život, již tehdy byly významným nástrojem pro odhalení nosností konstrukce, kritických míst a jiných problémů, tedy i výrazně přispívaly ke zvýšení bezpečnosti letadla. Je možné říci, že s prvními lety měly začátek i zkoušky za letu, které měly charakter spíše experimentálních letů pro posouzení základních letových vlastností.

S aktivním rozvojem letecké techniky v poválečném období v první polovině 20. století souvisel i vývoj zkušebních metod. Začaly se používat pytle s pískem o stanovené hmotnosti, ve třicátých letech se poprvé použil prototyp vahadlového systému pro zatížení křídla. Zároveň se rozšiřovaly poznatky o násobcích, o provozním zatížení, celkové únosnosti konstrukce a součiniteli bezpečnosti. Jednotliví výrobce si stanovovali a vyvíjeli zkušební metodiky a kritéria.

Po 2. světové válce již existovaly obsáhle poznatky o statických pevnostních zkouškách, v praxi se objevovaly další metody – pevnostní tenzometrické zkoušky za letu, pádové zkoušky, začátky dynamických a únavových testů. Zkoušení letadel sloužilo primárně pro ověřování návrhových hodnot zatížení a únavové životnosti, pro odhalování kritických a problematických míst, při vývoji nových výrobních technologií, materiálů, a tak dál. [2]

S dalším rozvojem civilního letectví a letecké legislativy se zkoušení letadel začalo používat jako nástroj pro prokázání splnění požadavků certifikační báze. O leteckých předpisech bude pojednáno podrobněji v následujících kapitolách.

2.2. Typy zkoušek

Letecké zkoušky můžeme dle účelu rozdělit následovně. [10], [3]

- Výzkumné zkoušky – zkoušení nových technologických postupů a metod, nových typů konstrukce, vlastností nově použitých materiálů, lepidel apod.
- Vývojové zkoušky – zkoušení jednotlivých elementů, spojů, částí konstrukce, které slouží pro ověření pevnostních charakteristik (např. s výpočty) díla ve fázi vývoje.
- Prototypové zkoušky – zkoušky prototypů částí letounu, příp. celku mají zvláštní charakter vzhledem k omezené dispozici zkoušeného díla (např. je pouze jeden prototyp), časovým a finančním možností.
- Certifikační zkoušky – zkoušky pro prokázání splnění požadavků předpisu.

- Sériové zkoušky – zkoušení částí letounu vybraného z konkrétní výrobní série, jedná se o způsob kontroly kvality výroby.

Dále můžeme provést rozdělení podle charakteru zkoušky.

- Statické pevnostní zkoušky – zatížení je aplikováno pomalu až do provozního, resp. početního zatížení nebo do lomu.
- Zkoušky tuhosti – v rámci zkoušky se měří poměrná deformace při předepsaném zatížení (zejména se týká soustav řízení letounu).
- Dynamické únavové zkoušky – zatížení se aplikuje cyklicky, resp. podle stanoveného zatěžujícího programu pro ověření únavových vlastností díla.
- Rázové zkoušky, pádové zkoušky – slouží pro simulaci rázových zatížení, např. nouzové přistání nebo vypouštění padáku.
- Letové zkoušky – ověření letových výkonů a vlastností letounu, proudění obtékajícího vzduchu, odhalení problémů v řízení a stabilitě, tenzometrická měření napětí v konstrukci apod.
- A jiné...

Při prokázání splnění požadavků předpisu se využívá různých druhů zkoušek, předmětem této práce jsou statické pevnostní zkoušky podsestav a částí draku letounu.

2.3. Metody zatěžování a zkušební vybavení

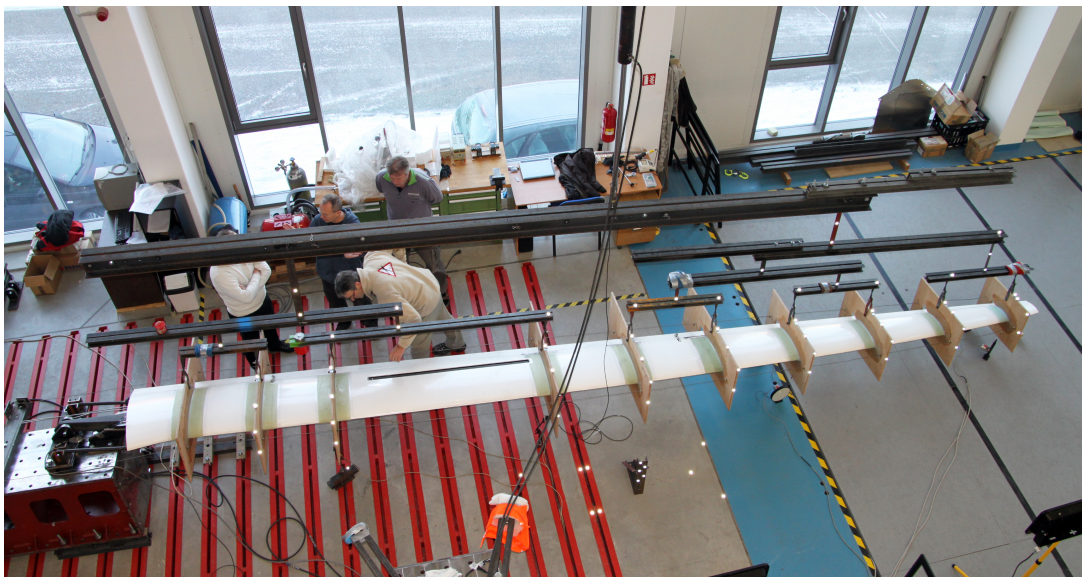
2.3.1. Vahadlový systém

Jednou ze základních metod je zatěžování konstrukce v určitých řezech pomocí vahadlového systému. Tento způsob se především aplikuje pro nosné plochy – křídlo, vodorovné a svislé ocasní plochy. Základním principem je rozdělení jedné zatěžující síly na dvě prostřednictvím nosníku – vahadla, a to v potřebném poměru jejich velikosti. Uspořádáním vahadel do několika úrovní lze docílit rozložení jedné zatěžující síly na několik jednoznačně určených sil v daných polohách. Na obrázku 2.1 je záběr ze zkoušky křídla experimentálního kluzáku na Leteckém ústavu VUT v Brně, kde zaváděná síla je v potřebných poměrech rozložena do 10 kleštín v zatěžujících řezech. Křídlo je při tom pevně uchyceno v přípravku – náhradě centroplánu.

Charakterizovat zkoušení s použitím vahadlového systému můžeme následovně.

- Efektivní, manuálně nenáročný a jednoduše dimenzovatelný způsob zkoušení.
- Nezakrytá zatěžovaná konstrukce – snadná vizuální kontrola během zkoušky.
- Jsou přípustné velké deformace zatěžované konstrukce.
- Složitější příprava zkoušky – výpočet a sestavení systému, výroba kleštín, vyvážení systému.

2.3. METODY ZATĚŽOVÁNÍ A ZKUŠEBNÍ VYBAVENÍ



Obrázek 2.1: Zkouška křídla pomocí vahadlového systému, LÚ VUT v Brně [5].

Poznámka. Je více způsobů přenosu sil na zkoušené dílo. Použití kleštin je obecně nejběžnější metoda, nicméně pro menší zatížení mohou být použity i nalepovací tkaninové úchyty, uchycení pomocí šroubů, nebo jiná mechanická spojení. [3]

Běžnými zatěžovadly pro zkoušky vahadlovým systémem jsou hydraulické válce (rovněž můžeme vidět na obrázku nahoře). Jejich zřejmou výhodou je schopnost přesně a plynule vyvodit obrovskou sílu při dostatečně velkém zdvihu pístu.

2.3.2. Spojité zatěžování pomocí závaží

Zatěžování konstrukce pomocí nakládání závaží je nejstarším způsobem zkoušení. Nyní se tímto způsobem primárně nahrazují malá zatížení, která působí například na křídla malých letounů a UAV, vodorovné a svislé ocasní plochy, kormidla řízení, vztlakové klapky, sloty a tak dále. Na obrázku 2.2 je zkouška VOP pomocí zatěžovacích pytlů.

Shrnout výhody a nevýhody můžeme následovně:

- Levné a jednoduché provedení zkoušky – časté využití v amatérském letectví.
- Rozložení hmoty po rozpětí – spojitě zatížení konstrukce.
- Zkouška téměř nevyžaduje speciální přípravky a vybavení, závaží se nakládá manuálně podle nakládacího plánu.
- Při velkém množství závaží se hůře provádí vizuální kontrola (zejména v případě poruchy).
- Při větších deformacích (ohyb dolů, krut) hrozí sklouznutí závaží, zvětšuje se chyba v důsledku konstantního směru tíhové síly.

2.3.3. Zkouška tlakovou tekutinou

Do statických pevnostních zkoušek můžeme rovněž zařadit statické zkoušky tlakem, například: [10]



Obrázek 2.2: Zkouška VOP pomocí zatěžovacích pytlů, LÚ VUT v Brně [7].

- Zkoušky palivových a olejových nádrží na těsnost (olej, voda).
- Zkouška přetlakové kabiny dopravního letounu.
- Zkoušky kapalinového potrubí a vzduchovodů.

2.3.4. Zatěžování osamělými silami: přípravky, lana a kladky

V mnoha případech je potřeba nahradit zatížení určité části konstrukce přesně stanovenou silou ve stanoveném směru. Pro zavedení síly do draku letounu se využívá speciálních přípravků – náhrad skutečných podsestav či dílu.

Hlavními účely přípravku tedy je

- Zajištění možnosti zavedení náhradní zkušební síly (složek zatížení), která odpovídá reálnému zatížení do zkoušeného dílu, případně zajišťovat jeho polohu během zkoušky.
- Přípravek musí být konstrukčně jednoduchý a rychle vyrobitelný z dostupných materiálů.
- Přípravek musí být optimálně navržený, a to takovým způsobem, aby se mohl použít pro co nejvíce případů zatížení konkrétního dílu.

Mezi takové přípravky patří například náhrady křídla, motoru, sedáček, vodorovných ocasních ploch, přípravky pro zkoušení podvozkových noh, přípravky pro uchycení konstrukce během zkoušky. Rovněž za přípravky považujeme kleštiny křídla nebo plátěné nalepovací úchyty. Na obrázku 2.2 je vidět, že při zkoušce je VOP instalovaná na zkušebním přípravku – náhradě části trupu pro uchycení ocasních ploch.

2.3. METODY ZATĚŽOVÁNÍ A ZKUŠEBNÍ VYBAVENÍ

Mezi další základní prostředky k provedení zkoušky patří lana a kladky, které umožňují efektivně přenášet a měnit směr tahových sil. Na obrázku 2.3 je ukázka zavedení zatížení do draku letounu pomocí přípravků, soustav lan, kladek a košíků se závažím. Jedná se o zkoušku v tzv. plovoucím stavu, tedy když letoun během zatěžování není pevně zajištěn a je průběžně vyvažován pro zachování silové rovnováhy.



Obrázek 2.3: Zkouška centroplánu letounu VUT 100, LÚ VUT v Brně [10].

2.3.5. Další vybavení zkušebny

Mezi další vybavení patří zejména:

- Zkušební rošty, sloupy, rámy, jeřáby, upínací kostky a jiná těžká zařízení pro polohování zatěžovadel a dalších prvků ve zkušebně.
- Hydraulický systém: hydraulické válce, čerpadla, hadice, tlakoměry, ovládací zařízení.
- Zahřívací komora, ohříváče, tepelné snímače (v případě zkoušky při zvýšené teplotě).
- Měřicí a záznamová zařízení: váhy, tenzometry, záznamová ústředna, optické snímače, kamery apod.

3. Zkoušené letadlo

Z důvodu ochrany důvěrných informací týkajících se letounu, budou v této kapitole uvedeny pouze jeho základní technické parametry a popis částí konstrukce. Jedná se o nově vyvíjený letoun společnosti TL-Ultralight, s nímž má Letecký ústav FSI VUT v Brně již dlouholetou spolupráci na vývoji a provedení pevnostních zkoušek. Daný letoun je reprezentantem kategorie ultralehkých letadel určených primárně pro rekreační létání a výcvik nových pilotů.

3.1. Celková dispozice letounu

Letoun je dvoumístný dolnoplošník klasické koncepce se zatahovacím podvozkem přídového typu. Sedadla posádky jsou uspořádána vedle sebe. V konstrukci letounu jsou primárně použity kompozitní materiály. Na obrázku 3.1 je třípohledový náčrt letounu.

Tabulka 3.1: Základní technické parametry letounu

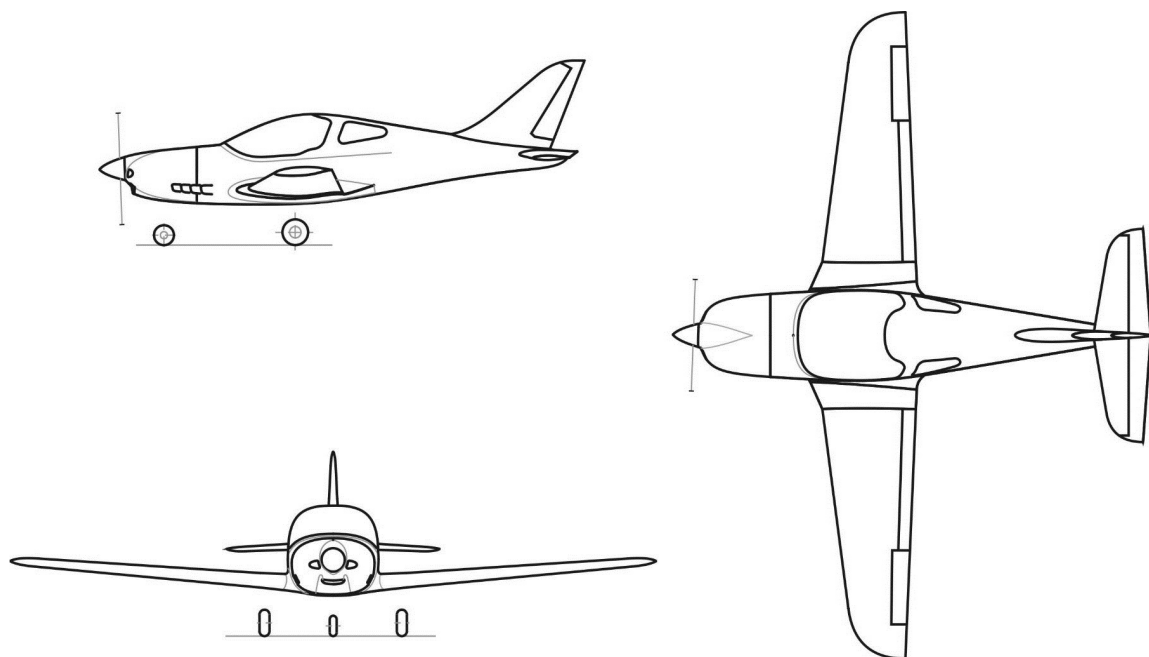
Hmotnosti	
Maximální vzletová hmotnost	600 kg
Hmotnost prázdného letounu	325-381 kg
Max./min. hmotnost posádky	200/60 kg
Max. hmotnost zavazadel	25 kg
Rozsah polohy těžiště	25%-35% b_{SAT}
Základní rozměry	
Rozpětí	9.000 m
Délka	6.630 m
Výška	2.575 m
Návrhové rychlosti	
Maximální nepřekročitelná rychlost V_{NE}	335 km/h
Maximální horizontální rychlost V_H	260 km/h
Pádová rychlost v přistávací konfiguraci V_{SO}	83 km/h

3.2. Popis jednotlivých částí

3.2.1. Křídlo

Křídlo je celokompozitové samonosné, vytvořené jako nosníková sendvičová skořepina s kořenovým žebrem. Uchycení do trupu je provedeno pomocí polokrakorců hlavního nosníku křídla a jednoduchého závěsu na pomocném nosníku. Potah křídel je tvořen kombinovaným sendvičem z uhlíku, skla a pěny. Hlavní nosník má uhlíkové pásnice a skleněnou sendvičovou stojinu. Křídlo je vybaveno křídélky a dvoušterbinovou vztlakovou klapkou. V křídle mezi nosníky je umístěna palivová nádrž (45 l).

3.2. POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ



Obrázek 3.1: Třípohledový nákres letounu.

3.2.2. Trup

Trup je vytvořen jako čistá laminátová sendvičová skořepina s přepážkami. V trupu je umístěn dvoumístný pilotní prostor se sedadly vedle sebe. V pilotním prostoru je umístěno zdvojené řízení (sidestick). Za sedadly je zavazadlový prostor a prostor pro padák a raketu záchranného systému. V prostoru pod pilotními sedadly je umístěna spádová palivová nádrž (15 l).

3.2.3. Podvozek

Je plně zatahovací přídového uspořádání. Odpružení je provedeno pomocí polyuretánových pryžových tlumičů. Obě hlavní kola jsou brzděná. Přídový podvozek je říditelný pedály nožního řízení. Na hlavní podvozek je použito kol 355 x 135, na přídový podvozek je použito kolo 280 x 100. Hlavní podvozkové nohy se zasunují do šachet v centroplánu, přídový podvozek je unášen motorovým ložem a zasunuje se do šachty v přední části trupu.

3.2.4. Soustava řízení

Řízení je kombinací lanového a táhlového systému. Řízení křidélek a výškového kormidla je táhlové, řízení směrového kormidla je lanové. Podélné vyvážení zajišťuje servomotorem ovládaná aerodynamická ploška umístěná na výškových kormidlech. Příčné vyvážení je servomotorem ovládaná aerodynamická ploška umístěná na pravém křídélku. Ovládání vztlakových klapek je elektrické, pomocí servomotoru s převodovkou umístěnou v trupu.

3.2.5. Pohonná jednotka

Letadlo je navrhováno pro použití s několika pohonnými jednotkami. Základními typy budou motory Rotax 912, 912S a 912 iS v kombinaci s různými typy vrtulí.

4. Rozbor požadavků předpisu na zkoušení konstrukce letounu

4.1. Předpisy UL 2 a LTF-UL

UL 2 jsou předpisy vydávané Leteckou amatérskou asociací ČR, které obsahují požadavky letové způsobilosti letounu. První část UL 2 je věnovaná konkrétně ultralehkým letounům řízeným aerodynamicky. Předpisy jsou volně stažitelné ze stránek LAA ČR [12]. Protože je předpokládán prodej letounu i do zahraničí, certifikace bude prováděna i s ohledem na německé normy LTF-UL [8], určené pro stejnou kategorii letounů.

4.2. Obecné definice a požadavky

Podle § 1 předpisů UL 2 se požadavky vztahují na UL letouny, jejichž

1. vzletová hmotnost není větší než 600 kg, a
2. minimální rychlost v přistávací konfiguraci V_{SO} není vyšší než 83 km/h.

Kromě toho, UL letadlům je povolen pouze neakrobatický provoz, který zahrnuje letové režimy s odchylkou maximálně $\pm 30^\circ$ od horizontu kolem příčné osy a ostré zatáčky s náklonem do 60° .

Hlava B je věnovaná letovým výkonům a vlastnostem letounu, proto je zde vynechána.

4.2.1. Pevnostní požadavky a součinitel bezpečnosti

Hlava C pojednává o pevnosti a zatíženích konstrukce letounu a obsahuje větší část požadavků na konstrukci letounu. V první kapitole (§ 301 až 307) jsou definovány typy zatížení, součinitel bezpečnosti a jsou stanoveny podmínky pro průkaz pevnosti letounu. Následuje stručné shrnutí důležitých pojmů.

1. *Provozní zatížení* je nejvyšší zatížení, které může nastat během normálního provozu letounu (dle stanovených letových obálek). Deformace v důsledku takového zatížení nesmí omezit bezpečný provoz, nesmí vzniknout trvalé deformace konstrukce.
2. *Početní zatížení* je provozní zatížení vynásobené předepsaným součinitelem bezpečnosti, který se značí f_U . Konstrukce musí snést početní zatížení nejméně 3 sekundy, aniž by došlo k poruše (může dojít k trvalým deformacím).

$$[\text{Početní zatížení}] = f_U \cdot [\text{Provozní zatížení}]. \quad (4.1)$$

3. *Součinitel bezpečnosti* f_U je roven 1.5, pokud není požadováno jinak. Ve řadě případů se zavádí doplňkový (nebo zvyšující) součinitel f_d , viz § 303.

$$f_U = 1.5 \cdot f_d.$$

Například, pro kompozitní konstrukce bývá f_d v rozmezí 1 až 1.5, tedy celkový součinitel může být až $f_U = 2.25$.

4. Všechny kritické případy zatížení musí být prokázány *pevnostní zkouškou*.

4.2. OBECNÉ DEFINICE A POŽADAVKY

4.2.2. Rychlosti, násobky a letové obálky

V kapitolách II až III jsou zavedeny a popsány typy letových zatížení a související pojmy.

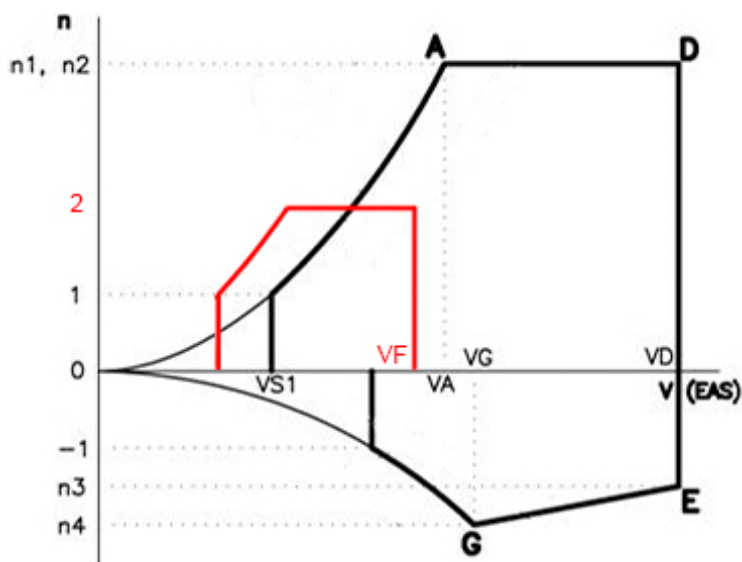
Splnění požadavků předpisu musí být prokázáno pro všechny kombinace rychlosti letu a násobku zatížení, nacházející se na hraniční křivce (a tedy i uvnitř) obálek zatížení (§ 333). Obálka letounu je V-n (rychlost – násobek) diagram, který znázorňuje všechny režimy letu, na které je daný letoun navržen. Konkrétně se jedná o manévrovou obálku – zatížení letounu vlivem manévrů, a poryvovou obálku – zatížení vyvolané teoretickým vertikálním poryvem o stanovené rychlosti při výchozím letu s násobkem 1. Uvažujeme-li případy s vysunutou vztlakovou klapkou, pak se jedná o tzv. klapkovou obálku.

Poznámka. Násobkem n rozumíme poměr složky vzdušných sil, která působí kolmo na dráhu letu letounu k tíži letounu [12] (§ 321). Zjednodušeně můžeme tedy napsat, že

$$n \doteq \frac{L}{G}, \quad (4.2)$$

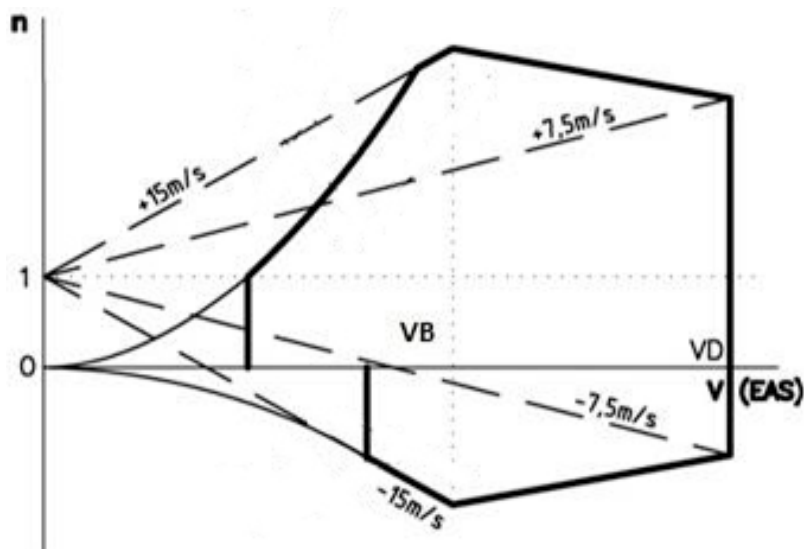
kde L je celkový vztlak a G je tíhová síla letounu.

Na obrázku 4.1 můžeme vidět obecnou manévrovou obálku, doplněnou o klapkové případy, na obrázku 4.2 je znázorněna obecná poryvová obálka.



Obrázek 4.1: Obecná manévrová (černá) a klapková (červená) obálka letounu [12].

4. ROZBOR POŽADAVKŮ PŘEDPISU NA ZKOUŠENÍ KONSTRUKCE LETOUNU



Obrázek 4.2: Obecná poryvová obálka letounu [12].

Označení rychlostí je následující, podmínky pro určení návrhových rychlostí letu stanovuje § 335.

- V_A – návrhová manévrovací rychlost;
- V_B – návrhová rychlost pro maximální velikost poryvu;
- V_D – maximální návrhová rychlost;
- V_F – návrhová rychlost letu s vysunutými klapkami;
- V_G – návrhová manévrovací rychlost při letu se záporným násobkem (nebo tzv. „při letu na zádech“);
- V_{S1} – vypočtená pádová rychlost při zasunutých vztlakových klapkách při maximální vzletové hmotnosti;
- V_{SF} – výpočtová pádová rychlost s plně vysunutými vztlakovými klapkami při maximální vzletové hmotnosti.

Paragrafy 337, 341 a 345 určují provozní násobky pro manévrovou, poryvovou a klapkovou obálku.

Poznámka. V případě manévrů jsou násobky následující:

- $n_{A,D} = 4$;
- $n_E = -1.5$;
- $n_F = 2$;
- $n_G = -2$;

V následujících sekcích bude proveden rozbor požadavků předpisů UL 2 a LTF-UL týkajících se hlavních částí konstrukce letounu. Rozbor je proveden s důrazem na požadavky vyžadující prokázání statickými pevnostními zkouškami.

4.3. POŽADAVKY NA KONSTRUKCI KŘÍDLA

4.3. Požadavky na konstrukci křídla

Tabulka 4.1: Rozbor požadavků předpisů pro křídlo

#	Název požadavku	Detail, popis zatížení	Požadavek UL2 a LTF-UL
1	Pevnost křídla	<p>Pevnost musí být prokázána po obálce letového zatížení pro všechny kombinace hmotnosti a centraže pro následující případy:</p> <p>a) Zatížení křídla aerodynamickými a setrvačnými silami v kritických místech obrátové obálky.</p> <p>b) Zatížení křídla od poryvu v kritických místech poryvové obálky.</p> <p>c) Zatížení křídla s plně vysunutou klapkou v případě poryvu nebo manévru pro kritický bod klapkové obálky (maximální násobek při rychlosti V_F).</p> <p>d) Zatížení křídla od výchylky křídélka pro definované případy: – maximální výchylka křídélek při rychlosti V_A a násobku $n = 2.66$, – $1/3$ maximální výchylky křídélek při rychlosti V_D a násobku $n = 2.66$.</p>	<p>§ 305, 307, § 331</p> <p>§ 333 (1, 2) § 335, 337</p> <p>§ 333 (1, 3) § 335, 341</p> <p>§ 335, 345</p> <p>§ 335, 455</p>
2	Pevnost křídélka	Kritické zatížení konstrukce křídélka aerodynamickými silami pro definované případy.	§ 455 Příloha III – 2. Zatížení křídélek
3	Pevnost vyvažovací plošky křídélka	Kritické zatížení vyvažovací plošky aerodynamickými silami.	§ 455 Příloha III – 5. Zatížení vyvažovací plošky
4	Pevnost vztlakové klapky	Zatížení konstrukce klapky pro nejhorší z případů, které mohou nastat za normálního provozu.	§ 345 Příloha III – 3. Zatížení vztlakové klapky
5	Pevnost palivové nádrže při přetlaku	Palivová nádrž musí snést tlak 0.01 MPa (1 1/2 PSI) bez poškození nebo prosakování.	§ 965

4.4. Požadavky na konstrukci trupu a ocasních ploch

Tabulka 4.2: Rozbor požadavků předpisů pro trup a ocasní plochy

#	Název požadavku	Detail, popis zatížení	Požadavek UL2 a LTF-UL
1	Pevnost trupu	Musí být prokázána odolnost trupu vůči účinkům aerodynamických a setrvačných sil, které mohou nastat za normálních provozních podmínek pro všechny kombinace hmotnosti, centráže, množství paliva v nádržích. V zatěžovacích případech vystupují následující složky zatížení: a) Zatížení centroplánu, b) Setrvačné síly centrální palivové nádrže, c) Zatížení motorového lože, d) Setrvačné účinky pilota, případně copilota a závaží, e) Zatížení VOP a SOP (včetně případů nesymetrického a kombinovaného zatížení)	§ 305, 307 § 331 § 427, 447
2	Bezpečnost posádky při nouzovém přistání	Osoby na palubě musí být chráněny před účinky sil v důsledku nouzového přistání při následujících definovaných násobcích: nahoru, dolů: 4,5 g, dopředu: 9 g, do strany: 3 g	§ 561
3	Odolnost palivových nádrží a upevnění osamělých hmot	Upevnění všech osamělých hmot (závaží, zátěže apod) rovněž jak i palivové nádrže musí snést maximální násobek, který může nastat za provozu ve vzduchu i na zemi, včetně nouzového přistání podle UL 2 § 561	§ 597
4	Pevnost motorového lože	Motorové lože musí snést namáhání v následujících případech zatížení: a) Zatížení na hraničních křivkách obrátové a poryvvové obálky letounu pro nejnepříznivější kombinaci hmotnosti a centráže letounu. b) Zatížení krouticím momentem od vrtule (vzletový výkon) a současně 75 % provozního zatížení z případu A obrátové obálky. c) Zatížení krouticím momentem od vrtule (max trvalý výkon) a současně 100 % provozního zatížení z případu A obrátové obálky. d) Zatížení od 1/3 provozního násobku z bodu obálky A v bočním směru.	§ 361, 363 § 333 § 361 § 361 § 363

4.4. POŽADAVKY NA KONSTRUKCI TRUPU A OCASNÍCH PLOCH

		e) V případě upevnění podsestavy předního podvozku k motorovému loži musí rovněž lože splňovat pevnostní požadavky pro přistávací a dodatečné zatížení přídového podvozku.	§ 479, 499
5	Pevnost VOP: stabilizátoru a VK	Zatížení konstrukce pevné části VOP a výškového kormidla pro následující typy aerodynamického zatížení: a) Vyvažovací zatížení VOP v kritických bodech obrátové obálky, a při vysunutých klapkách v kritických bodech klapkové obálky. b) Obrátová zatížení VOP při rychlosti V_A a maximální výchylce nahoru/dolů, rychlosti V_D a 1/3 maximální výchylky nahoru/dolů. c) Poryvová zatížení VOP v kritických bodech poryvové obálky.	§ 305, 333 § 421, 427 § 423, 427 Příloha III – 1. Zatížení VOP (SOP) § 425 Příloha III – 1. Zatížení VOP (SOP)
6	Pevnost vyvažovací plošky výškového kormidla	Vyvažovací ploška musí snést stanovené zatížení.	§ 421 Příloha III – 5. Zatížení vyvažovací plošky
7	Pevnost SOP: kýlu a SK	Zatížení konstrukce pevné části SOP a směrového kormidla pro následující typy aerodynamického zatížení: a) Obrátová zatížení SOP při rychlosti V_A a maximální výchylce kormidla, rychlosti V_D a 1/3 maximální výchylky kormidla. b) Poryvová zatížení SOP v kritických bodech poryvové obálky, resp. podle definovaného vztahu	§ 305, 333 § 441 Příloha III – 1. Zatížení VOP (SOP) § 443 Příloha III – 1. Zatížení VOP (SOP)
8	Pevnost palivové nádrže při přetlaku	Centrální palivová nádrž musí snést tlak 0,01 MPa (1 1/2 PSI) bez poškození nebo prosakování.	§ 965

4.5. Požadavky na konstrukci podvozku

Tabulka 4.3: Rozbor požadavků předpisů pro podvozek

#	Název požadavku	Detail, popis zatížení	Požadavek UL2 a LTF-UL
1	Pevnost podvozku pro definované případy přistání	Hlavní a přídový podvozek musí splňovat pevnostní požadavky pro definovaná přistávací zatížení. Musí se uvažovat maximální návrhová hmotnost letounu.	§ 471, 473, 479 Příloha IV – Základní případy přistání
2	Pevnost hlavního podvozku při bočním zatížení kol	Vertikální a boční (směrem od/k trupu) síla působící na kola hlavního podvozku pro maximální hmotnost.	§ 485 Příloha IV – Boční zatížení kol hlavního podvozku
3	Pevnost hlavního podvozku při zatížení od brždění	Vertikální a horizontální (směrem dozadu) síla působící na kola podvozku pro maximální hmotnost.	§ 493 Příloha IV – Za- tížení kol při brž- dění
4	Pevnost v případech dodatečného zatížení kola přídového podvozku	Definované dodatečné případy zatížení kola přídového podvozku pro maximální hmotnost.	§ 499 Příloha IV – Do- datečné zatížení přídového kola

4.6. Požadavky na konstrukci soustavy řízení

Tabulka 4.4: Rozbor požadavků předpisů pro soustavu řízení

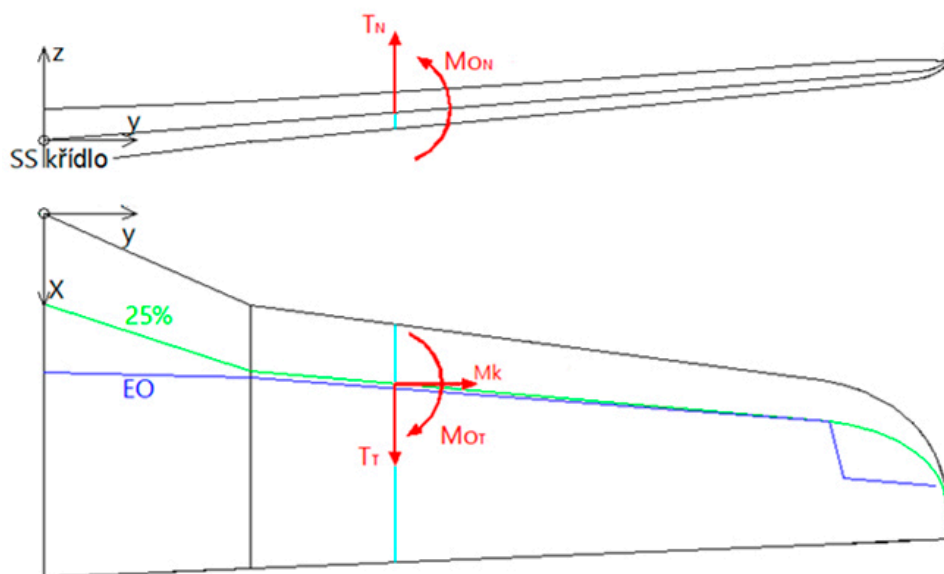
#	Název požadavku	Detail, popis zatížení	Požadavek UL2 a LTF-UL
1	Pevnost všech prvků a uchycení trasy hlavní soustavy řízení	Trasy řízení a uchycení prvků hlavních soustavy řízení musí vydržet 125 % provozního zatížení řídicí plochy při stanovených předpisech zatíženích křidélek (UL 2 § 455), výškového (UL 2 § 423) a směrového (UL 2 § 441) kormidla.	§ 395
2	Odpovídající síly od pilota pro ovládní hlavních řídicích ploch	Primární soustava řízení musí splňovat definované zatížení silami od pilota pro všechny normální režimy letu: Výškové řízení: 350 N, příčné řízení: 200 N, směrové řízení: 900 N	§ 397
3	Pevnost řídicí soustavy s dvojím řízením při ovládní oběma piloty.	Při současném ovládní oběma piloty soustava řízení musí vydržet působení pilotů stejným i opačným směrem. Uvažují se 75 % sil pilota dle UL 2 § 397.	§ 399
4	Dostatečná tuhost soustav řízení hlavních řídicích ploch	Poměrná deformace obvodu řízení nesmí překročit 25 %. Při zablokované odpovídající řídicí ploše se do soustavy řízení zavádí následující síly od pilota: výškové řízení: 120 N, příčné řízení: 80 N, směrové řízení: 150 N	§ 411
5	Funkčnost hlavní soustavy řízení	Deformace vzniklé za provozního zatížení nesmí omezit funkčnost hlavní soustavy řízení. Mezi to patří: a) Deformace vzniklé při provozním zatížení řídicí plochy nesmí způsobit kolizi s ostatními částmi konstrukce. b) Deformace vzniklé při provozním zatížení pevné části konstrukce (křídla, stabilizátoru a kylu) nesmí způsobit kolizi řídicích ploch nebo jinak omezit jejich pohyb v celém rozsahu.	§ 305, 683 § 655 (1a) § 655 (1b)

5. Návrh zkoušek a definice případů zatížení

5.1. Křídlo

Návrh zkušebních případů je proveden na základě poskytnutých výpočtových zpráv zatížení křídla, křídélka a vztlakové klapky.

Při výpočtech byl použit lokální souřadnicový systém křídla, který se nachází v rovině symetrie letounu a prochází ním náběžná hrana centroplánu. Náčrt křídla 5.3 znázorňuje polohu SS křídla a kladné směry složek zatížení – posouvající síla normální T_n a tečná T_t , ohybový moment normální M_{on} a tečný M_{ot} , kruticí moment M_k .



Obrázek 5.1: Náčrt SS křídla a kladných směrů zatížení (převzato z návrhové dokumentace a upraveno).

Pro výpočet menších podsestav křídla (křídélko, vyvažovací ploška, klapka) je uvažován lokální SS dané podsestavy, případně (pro zjednodušení výpočtů) je zaveden nový souřadnicový systém.

Součinitel bezpečnosti pro křídlo je $f_U = 2.25$.

5.1.1. Zkouška křídla

Při výpočtu zatížení byly uvažovány všechny kombinace hmotnosti a centráže letounu (konfigurace A až G) při stanovených letových podmínkách (21 případů) - bod 1a až 1d tabulky 4.1. Rozhodující případy zatížení křídla (stanovené ve výpočtové zprávě) jsou následující: **1C, 1D, 1E, 3C, 3D, 3E, 4A, 5C, 8C, 8D, 8E, 9D, 9E, 12E, 15C a 15D**. V následujících tabulkách 5.1 a 5.2 jsou uvedeny konfigurace a režimy letu pouze pro rozhodující případy, jelikož právě ony určují maximální hladinu silových účinků a tak tvoří obálku zatížení.

5.1. KŘÍDLO

Tabulka 5.1: Rozhodující hmotnostní konfigurace

Konfigurace		A	C	D	E
Hmotnost	[kg]	383	600	600	559
Centráž	[% csat]	21.6	31.74	36.12	34.76
Pilot	[kg]	60	100	100	100
Pasažér	[kg]	0	100	100	100
Zavazadla	[kg]	0	0	25	25
Palivo - křídla	[kg]	0	2x32.5	2x20.5	0
Palivo - trup	[kg]	0	11	11	11

Tabulka 5.2: Rozhodující režimy letu

Letové režimy	Rychlost EAS [km/h]	Násobek [1]	Detail
1	157 - 197	4	Let vždy na maximálním souč. vztlaku
3	312	4	Rychlost V_D , maximální kladný násobek
4	312	0	Rychlost V_D , nulový vztlak
5	312	-2	Rychlost V_D , maximální záporný násobek
8	234	1	Rychlost V_B , násobek od max. kladného poryvu 15 m/s
9	234	1	Rychlost V_B , násobek od max. záporného poryvu -15 m/s
12	151	1	Rychlost V_F , vychylené klapky 32, násobek od poryvu 7.5 m/s
15	312	2.67	Rychlost V_D , počátek klonění, 1/3 maximální vychylky křídélka dolů

Poznámka. Je zde vidět, že hmotnostní konfigurace C a D představují situace, kdy letadlo je na hranici své maximální vzletové hmotnosti, což zcela logicky vede k největšímu namáhání nosné konstrukce. V konfiguraci E je hmotnost trochu menší, nicméně je po letounu rozložena velice nepříznivě – odlehčená křídla, hmotnost paliva a posádky je koncentrována v trupu. Konfigurace A odpovídá naopak nejmenší možné hmotnosti.

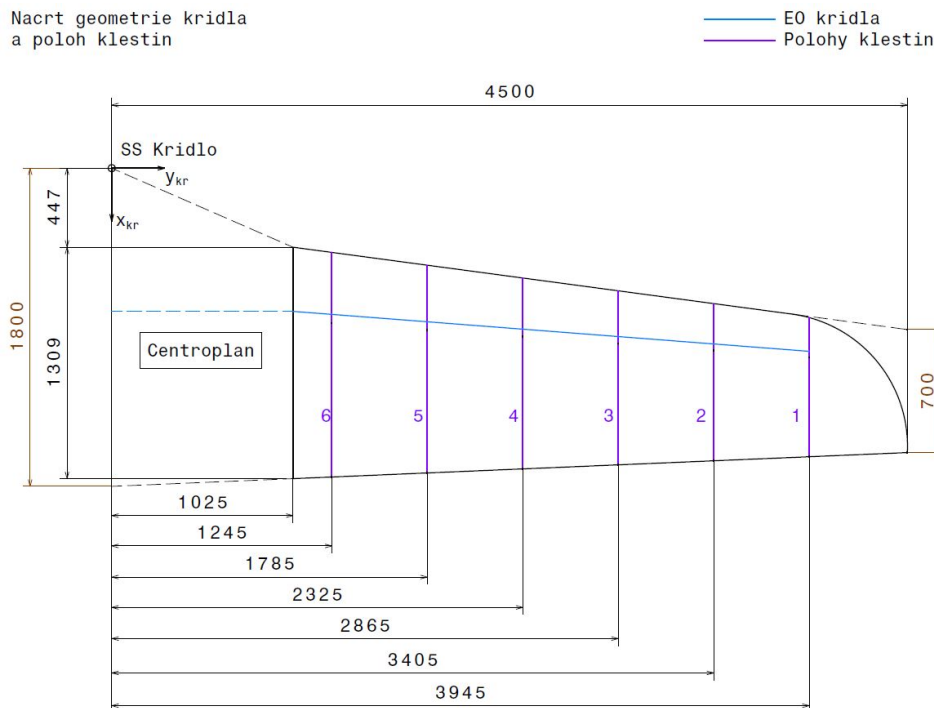
Poznámka. Režimy letu 1, 3 a 8 odpovídají letovým podmínkám s výrazným kladným normálním ohybovým momentem. Případy 5 a 9 naopak vedou k největším záporným hodnotám ohybového momentu. Případy 4, 12, 15 a 3 rovněž vykazují významný krouticí moment. Tečné složky zatížení se nejvíc projevují u případů 1, 8 a 9, kdy je rychlost letu nižší (a tedy i větší úhel náběhu).

Zkušební zatížení bude zaváděno pomocí kleštín připevněných ke křídlu v určitých řezech a systému vahadel. Jelikož je sada ze šesti kleštín pro dané křídlo již k dispozici, polohy řezů, v nichž bude zaváděno zatížení jsou dané.

Postup výpočtu případu zatížení

V následující části bude stručně uveden postup výpočtu zkoušky. Polohy kleštín jsou následující.

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ



Obrázek 5.2: Návrh základní geometrie a poloh kleštin na křídle.

Označíme sílu zaváděnou pomocí kleštiny v i -tém řezu F_i . $T(y), T_i$ – posouvající síla, $Mo(y), Mo_i$ – ohybový moment a $Mk_{EO}(y), Mk_{EO,i}$ – krouticí moment k elastické ose v daném místě $y = y_{kr}$ po rozpětí křídla, resp. v i -tém řezu. Polohy kleštin po rozpětí budeme značit y_1 až y_6 , poloha závěsů (kořenového žebra) $y_{zaves} = y_7 = 1025$ mm a poloha konce křídla $y_{konec} = y_0 = 4500$ mm. Působíště zaváděné síly po těživě v daném řezu označíme $x_{kr,F,i} = x_{F,i}$, polohu elastické osy $x_{kr,EO}(y) = x_{EO}(y)$. Vnitřní účinky v křídle potom spočítáme následovně:

$$y \in (y_1, y_0] : \quad T(y) = Mo(y) = Mk_{EO}(y) = 0 \quad (5.1)$$

$$y \in (y_2, y_1) : \quad \begin{aligned} T(y) &= F_1 \doteq T_1; \\ Mo(y) &= (Mo_1) + T_1 \cdot (y_1 - y); \\ Mk_{EO}(y) &= F_1 \cdot (x_{EO}(y) - x_{F,1}); \end{aligned}$$

$$y \in (y_3, y_2) : \quad \begin{aligned} T(y) &= F_1 + F_2 \doteq T_2; \\ Mo(y) &= T_1 \cdot (y_1 - y_2) + T_2 \cdot (y_2 - y) = Mo_2 + T_2 \cdot (y_2 - y); \\ Mk_{EO}(y) &= F_1 \cdot (x_{EO}(y) - x_{F,1}) + F_2 \cdot (x_{EO}(y) - x_{F,2}); \end{aligned}$$

⋮

5.1. KRÍDLO

$$y \in [y_{zaves}, y_6) :$$

$$T(y) = \sum_{i=1}^6 F_i \doteq T_6;$$

$$M_o(y) = \sum_{i=1}^6 (T_{i-1} \cdot (y_{i-1} - y_i)) + T_6 \cdot (y_6 - y) = M_{o6} + T_6 \cdot (y_6 - y);$$

$$Mk_{EO}(y) = \sum_{i=1}^6 F_i \cdot (x_{EO}(y) - x_{F,i}).$$

Protože je výpočet proveden pouze v místech zavedení zatížení (průběhy zatížení jsou po částech lineární), můžeme předchozí rovnice přepsat do nového tvaru, a to pouze pro souřadnice odpovídající polohám kleštín:

$$y = y_{konec} = y_0 :$$

$$T_0 = M_{o0} = Mk_{EO,0} = 0; \tag{5.2}$$

⋮

$$y = y_j :$$

$$T_j^+ = \sum_{i=1}^{j-1} F_i;$$

$$T_j^- = T_{j+1}^+ \doteq T_j = \sum_{i=1}^j F_i;$$

$$M_{o_j} = M_{o_{j-1}} + T_{j-1}(y_{j-1} - y_j) = \sum_{i=1}^j T_{i-1}(y_{i-1} - y_i) = \sum_{i=1}^{j-1} F_i(y_i - y_j);$$

$$Mk_{EO,j}^+ = \sum_{i=1}^{j-1} F_i(x_{EO,j} - x_{F,i}).$$

$$Mk_{EO,j}^- = \sum_{i=1}^j F_i(x_{EO,j} - x_{F,i}).$$

⋮

$$y = y_{zaves} = y_7 :$$

$$T_{zaves} = T_7^+ = T_6 = \sum_{i=1}^6 F_i;$$

$$M_{o_{zaves}} = M_{o7} = \sum_{i=1}^7 T_{i-1}(y_{i-1} - y_i) = \sum_{i=1}^6 F_i(y_i - y_{zaves});$$

$$Mk_{zaves} = Mk_{EO,7}^+ = \sum_{i=1}^6 F_i(x_{EO,7} - x_{F,i}),$$

kde horní index „+” označuje hodnotu v blízkosti kleštiny v kladném směru osy y (směrem ke konci křídla), index „-” naopak, v blízkém okolí v záporném směru osy, tedy směrem ke kořenu.

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Abychom zohlednili hmotnosti kleštín a samotného křídla, je potřeba zavést doplňující zatížení. Pro zjednodušení označíme společně hmotnost i -té kleštiny a hmotnost příslušné části křídla $m_{kr,i}$, poloha společného těžiště po těživě je $x_{mkr,i}$. Potom jednotlivé složky zatížení můžeme v každém řezu modifikovat o:

$$\begin{aligned} F_i^{hm} &= -m_{kr,i}g; \\ Mk_{EO,i}^{hm} &= -m_{kr,i}g(x_{EO,i} - x_{mkr,i}), \end{aligned} \tag{5.3}$$

kde „-“ je v rovnicích proto, že hmotnost křídla vyvolává reakce v opačném směru než je zatěžováno křídlo.

Poznámka. Pro zahrnutí hmotnosti do výpočtu zatížení je možné spočítat průběhy zatížení dle rovnic (5.1) a (5.2), kde uvažujeme pouze tíhovou sílu, tedy $F_i \doteq F_i^{hm}$, $x_{F,i} \doteq x_{mkr,i}$. Obdržené průběhy se následně sečtou s navrženým zatížením, čímž se obdrží skutečné reakce v křídle.

Doteď se ve výpočtu uvažovala pouze jedna celková posouvající síla T a celkový ohybový moment Mo . Pro rozdělení na normální a tečnou složku je potřeba křídlo naklopit. Úhel klopení křídla během zkoušky budeme značit písmenem α , tedy stejným způsobem, kterým se značí úhel náběhu. Dle souřadnicového systému, kladné α značí klopení dozadu, tedy „odtoková hrana dolů“.

Zavedením úhlu alfa můžeme modifikovat síly F_i a rozdělit následujícím způsobem:

$$\begin{aligned} Fn_i &= F_i \cos \alpha; \\ Ft_i &= -F_i \sin \alpha, \end{aligned} \tag{5.4}$$

kde „-“ je v poslední rovnici proto, že tečné složky posouvající síly a ohybového momentu působí dopředu, tedy v záporném směru osy x .

Aplikováním těchto záměn do rovnic (5.2) se vypočtou příslušné složky zatížení v každém řezu:

$$\begin{aligned} Fn &\rightarrow Tn, Mon, Mk_{EO}; \\ Ft &\rightarrow Tt, Mot. \end{aligned} \tag{5.5}$$

Poznámka. Pro výpočet krouticího momentu se použije pouze normální složka zatížení, protože tečné síly mají podstatně menší vliv na kroucení křídla.

Poznámka. Postupy (5.4) a (5.5) jsou rovněž aplikovatelné pro výpočet normální a tečné složky zatížení křídla vlivem pouze vlastní hmotnosti a hmotnosti kleštín.

5.1.2. Předběžný návrh zkušebních případů zatížení křídla

Na bázi výpočtu zatížení křídla byl připraven výpočet pěti případů pro zkoušení křídla.

5.1. KRÍDLO

Tabulka 5.3: Předvýběr zkušebních případů

Číslo případu	Charakteristika	Případy letového zatížení
1	Maximální kladný ohyb	8C, 8D, 8E
2	Maximální záporný ohyb	5C, 9D, 9E
3	Maximální krut – manévrové, poryvové a křídélkové případy	3C, 3D, 3E, 12E, 15C, 15D
4	Maximální krut – poryv při vysunutí klapce a křídélkové případy	12E, 15C, 15D
5	Maximální ohyb a maximální krut	3C, 3D, 8D, 8E, 12E, 15D

Návrh zatížení pro případ 1 – maximální kladný ohyb

Největšímu normálnímu ohybovému momentu odpovídají případy 8C, 8D a 8E. Ostatní složky zatížení jsou navrženy pro hodnoty, odpovídající těmto případům, avšak nemusí být maximální v rámci celkové obálky zatížení.

Základní návrh zatěžujících sil pro provozní zatížení bez uvažování hmotnosti budeme dle předchozích úvah značit písmenem F , síly odpovídající provoznímu zatížení s uvažováním hmot označíme $F^{100\%}$, početnímu zatížení – $F^{225\%}$. y^F je poloha kleštiny po rozpětí měřena od kořenového žebra (závěsů) křídla, x^F označuje vzdálenost působíště zatěžující síly od odtokové hrany ve směru osy x .

Tabulka 5.4: Návrh zkoušky – případ č. 1, maximální kladný ohyb

Zkušební případ č. 1			$\alpha = 4,5^\circ$						
Geometrie	Číslo řezu		6	5	4	3	2	1	Součet
	y^F od kořenu	[mm]	220	760	1300	1840	2380	2920	
	x^F od OH	[mm]	871	809	747	686	624	562	
Zatížení	$F = F_{max}$	[N]	1750	1230	1350	1350	820	1250	7750
	$F^{100\%}$	[N]	2014	1415	1553	1553	944	1438	8917
	$F^{225\%}$	[N]	4201	2953	3241	3241	1969	3001	18606

Zatížení v kořenu (početní)

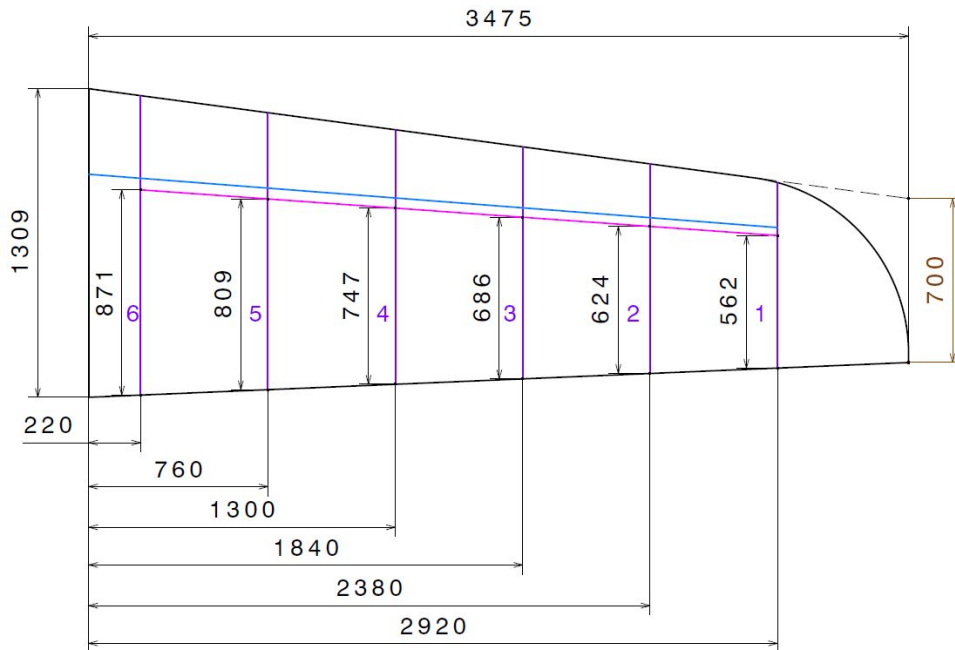
$$T_n = 17384 \text{ N}, T_t = -1368 \text{ N}, M_{on} = 25003 \text{ Nm}, M_{ot} = -1968 \text{ Nm},$$

$$M_{kEO} = -2491 \text{ Nm}$$

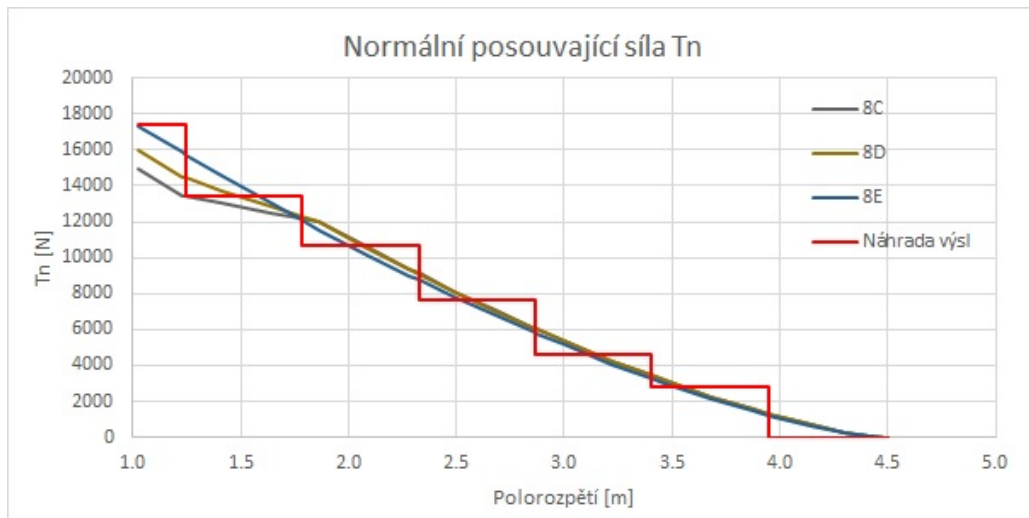
5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Návrh poloh působení zatížení
Maximální kladný ohyb křídla

— EO křídla
— Polohy kleslin
— Osa zatížení

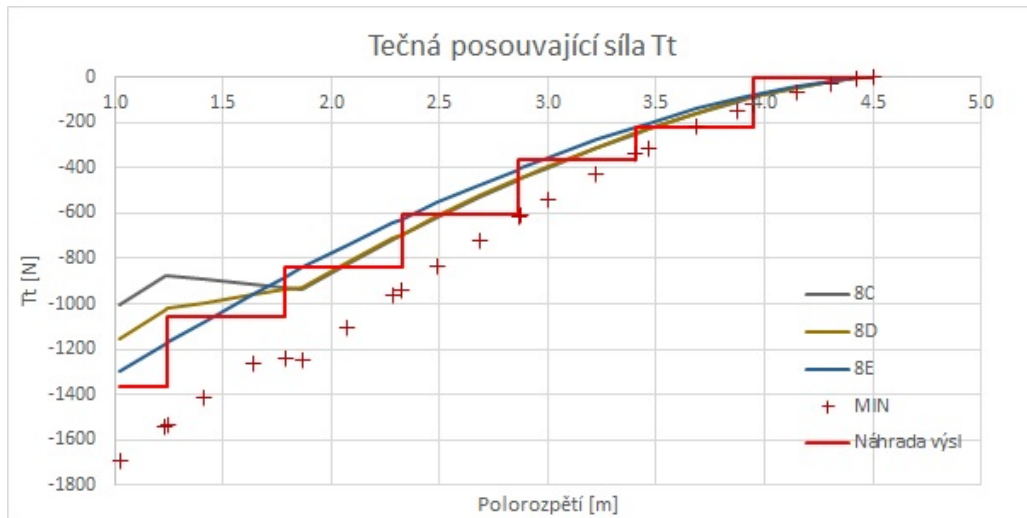


Obrázek 5.3: Příklad 1 - návrh poloh působení zatížení.

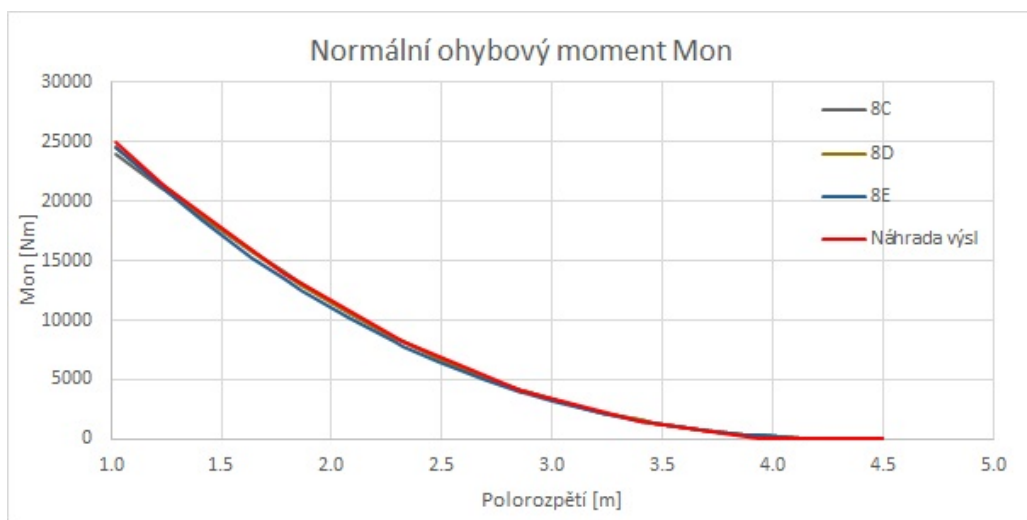


Obrázek 5.4: Zkouška křídla, případ 1 – normální posouvající síla (početní).

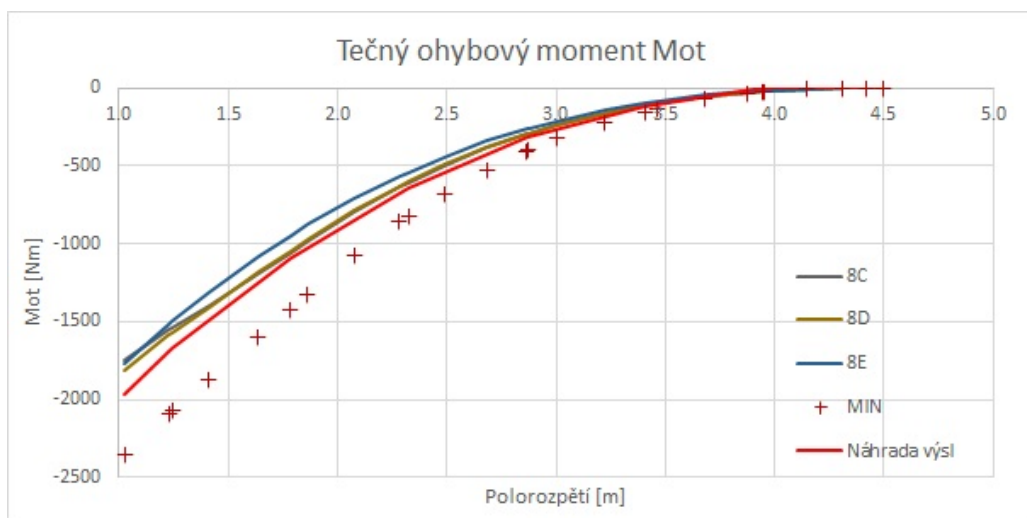
5.1. KŘÍDLO



Obrázek 5.5: Zkouška křídla, případ 1 – tečná posouvající síla (početní).

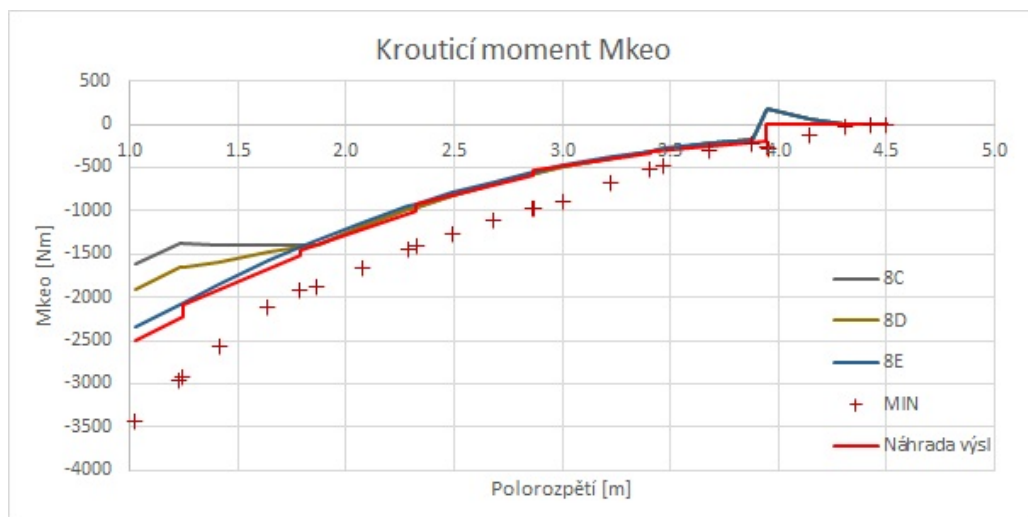


Obrázek 5.6: Zkouška křídla, případ 1 – normální ohybový moment (početní).



Obrázek 5.7: Zkouška křídla, případ 1 – tečný ohybový moment (početní).

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ



Obrázek 5.8: Zkouška křídla, případ 1 – kroučící moment k elastické ose (početní).

Průběhy normálního ohybového momentu a kroučícího momentu k elastické ose pro případy 2 až 5 jsou v příloze 9.1.

Případ 2 – maximální záporný ohyb

Tabulka 5.5: Návrh zkoušky – případ č. 2

Zkušební případ č. 2		$\alpha = -8^\circ (-188^\circ), F/F_{max} = 0.62$						
Geometrie	Číslo řezu	6	5	4	3	2	1	Součet
	y^F od kořenu [mm]	220	760	1300	1840	2380	2920	
	x^F od OH [mm]	1173	1080	987	894	801	708	
Zatížení	F [N]	1138	800	878	878	533	813	5038
	$F^{100\%}$ [N]	1401	985	1081	1081	657	1001	6205
	$F^{225\%}$ [N]	2705	1901	2087	2087	1267	1932	11979

Zatížení v kořenu (početní)

$$T_n = -10706 \text{ N}, T_t = -1505 \text{ N}, M_{on} = -15387 \text{ Nm}, M_{ot} = -2162 \text{ Nm},$$

$$M_{kEO} = -1270 \text{ Nm}$$

Případ 3 – maximální krut

Tabulka 5.6: Návrh zkoušky – případ č. 3

Zkušební případ č. 3		$\alpha = -1.75^\circ, F/F_{max} = 0.92$						
Geometrie	Číslo řezu	6	5	4	3	2	1	Součet
	y^F od kořenu [mm]	220	760	1300	1840	2380	2920	
	x^F od OH [mm]	802	740	678	616	554	493	
Zatížení	F [N]	1610	1132	1242	1242	754	1150	7130
	$F^{100\%}$ [N]	1874	1317	1445	1445	878	1338	8297
	$F^{225\%}$ [N]	3886	2731	2998	2998	1821	2776	17210

Zatížení v kořenu (početní)

$$T_n = 16035 \text{ N}, T_t = 490 \text{ N}, M_{on} = 23061 \text{ Nm}, M_{ot} = 705 \text{ Nm}, M_{kEO} = -3488 \text{ Nm}$$

5.1. KRÍDLO

Případ 4 – maximální krut (křídélkové případy a poryv při vysunutí klapce)

Tabulka 5.7: Návrh zkoušky – případ č. 4

Zkušební případ č. 4			$\alpha = -2.5^\circ, F/F_{max} = 0.62$						
Geometrie	Číslo řezu		6	5	4	3	2	1	Součet
	y^F od kořenu [mm]		220	760	1300	1840	2380	2920	
	x^F od OH [mm]		665	622	578	534	491	448	
Zatížení	F [N]		1085	763	837	837	508	775	4805
	$F^{100\%}$ [N]		1349	948	1040	1040	632	963	5972
	$F^{225\%}$ [N]		2705	1901	2087	2087	1267	1932	11979

Zatížení v kořenu (početní)

$$T_n = 10801 \text{ N}, T_t = 472 \text{ N}, M_{on} = 15523 \text{ Nm}, M_{ot} = 678 \text{ Nm}, M_{k_{EO}} = -3459 \text{ Nm}$$

Případ 5 – maximální ohyb a maximální krut

Tabulka 5.8: Návrh zkoušky – případ č. 5

Zkušební případ č. 5			$\alpha = 4.5^\circ, F/F_{max} = 1$						
Geometrie	Číslo řezu		6	5	4	3	2	1	Součet
	y^F od kořenu [mm]		220	760	1300	1840	2380	2920	
	x^F od OH [mm]		818	758	697	636	575	515	
Zatížení	F [N]		1750	1230	1350	1350	820	1250	7750
	$F^{100\%}$ [N]		2014	1415	1553	1553	944	1438	8917
	$F^{225\%}$ [N]		4201	2953	3241	3241	1969	3001	18606

Zatížení v kořenu (početní)

$$T_n = 17384 \text{ N}, T_t = -1368 \text{ N}, M_{on} = 25003 \text{ Nm}, M_{ot} = -1968 \text{ Nm}, M_{k_{EO}} = -3437 \text{ Nm}$$

Diskuze

Případ č. 1 (maximální kladný ohyb) představuje zatížení letounu od kladného poryvu 15 m/s při rychlosti V_B . Případ č. 3 (maximální krut) pokrývá zatížení při režimu letu s maximálním násobkem $n = 4$ při rychlosti V_D , zatížení v kritickém místě klapkové obálky při kladném poryvu 7.5 m/s a kritický případ výchylky křídélka. Je možné říci, že tyto 2 případy představují obálku zatížení pro kladné násobky pro manévrovou a poryvovou obálku včetně klapkových a křídélkových případů. Případ maximálního ohybu pokrývá část obálek nacházející se v oblasti nižších rychlostí (až do V_B), kde krouticí moment je relativně malý. Zkouška maximálním krutem (a zároveň 92 % maximálního ohybu) je relevantní pro zatížení při vyšší rychlosti letu, rovněž jak i pro kritickou část klapkové obálky.

Případ č. 2 (maximální záporný ohyb) pokrývá všechny případy letového zatížení, které se nachází ve spodní části manévrové a poryvové obálky. Společně s případy č. 1 a 3 tedy tvoří úplnou obálku zatížení, čímž jsou prokázány body 1a až 1d tabulky 4.1.

Vzhledem k tomu, že zkouška maximálního krutu předpokládá 92 % ohybového momentu z případu č. 1, stojí za uvažování spojení dvou zkoušek do jedné. Případ č. 5 byl navržen jako sjednocení případů č. 1 a č. 3, tedy maximální krut a maximální ohyb zá-

roven. Je potřeba zmínit, že tento zkušební případ předpokládá provozní zatížení křídla, které nemůže nastat za žádného vypočteného režimu letu, leží tedy na bezpečné straně.

Případ č. 4 (maximální krut pro křídélkové případy a poryv při vysunutí klapce) při tom slouží jako doplňující případ z důvodu nutnosti zatížení křídla kladnou tečnou posouvající silou a ohybovým momentem při současném krutu a ohybu (případy č. 1, 2 a 5 mají tečné složky záporné). Tím pádem, pevnost křídla a splnění požadavků předpisu může být alternativně prokázána zkoušením případů č. 2, 4 a 5.

5.1.3. Zkouška křídélka a vyvažovací plošky

V této sekci bude popsán postup při návrhu zkoušky křídélka a vyvažovací plošky, nebo trimu. Návrh je proveden na bázi technické zprávy výpočtu zatížení křídélka. Zkoušky se provádí na křídle, které je instalováno na přípravku – náhradě centropłanu. Pro výpočet zkoušky je vždy použit lokální souřadnicový systém, kde počátek leží v rovině kořenového žebra křídélka (resp. trimu), osa x leží rovněž v této rovině kladným směrem dozadu, osou y prochází osa otáčení křídélka (resp. trimu). V následující tabulce jsou základní rozměry křídélka a trimu.

Tabulka 5.9: Geometrické parametry křídélka a vyvažovací plošky

Parametr	Hodnota
Křídélko	
Rozpětí	937 mm
Kořenová/koncová hloubka	282 / 234 mm
Vzdálenost osy otáčení od NH – kořenová/koncová	43 / 36 mm
Poloha závěsů – vnitřní/vnější	180 / 800 mm
Poloha ovládacího táhla	130 mm
Vyvažovací ploška	
Rozpětí	275 mm
Kořenová/koncová hloubka	91.3 / 77 mm
Vzdálenost osy otáčení od NH – kořenová/koncová	12.2 / 9.5 mm
Poloha závěsů – vnitřní/vnější	8.1 / 275 mm
Poloha ovládacího táhla	14.1 mm

Je několik způsobů provedení zkoušky, zatížení do křídélka je možné zavést například pomocí zavěšovacího závaží a různých druhů uchycení (nalepované tkaniny, uchycení pomocí šroubů, atd). V této práci je použit běžný a relativně jednoduchý způsob – zavedení sil pomocí zatěžovacích pytlů. V tabulce je uveden seznam pytlů, které se používají pro zkoušky na Leteckém ústavu VUT, jejich tíha a přibližný rozměr.

Tabulka 5.10: Používané zatěžující pytle

Síla (označení)	Přibližný rozměr
50 N	300 × 220 mm
20 N	150 × 220 mm
10 N	150 × 100 mm
5 N	150 × 50 mm

5.1. KRÍDLO

Poznámka. Velikost pytlů je pouze orientační a slouží pro návrh zkoušky, ve skutečnosti se pytel dá složit (srolovat) tak, že se jeho půdorys zmenší až dvojnásobně.

Postup výpočtu zkoušky zatěžujícími pytli

Při pevnostní zkoušce pomocí nakládacího závaží předpokládáme spojitě liniové zatížení podél osy zatížení. Závaží jsou nakládána po rozpětí v určitých řezech.

Napodobení výpočtu zatížení křídla: rovnice (5.1) a (5.2) označíme celkovou sílu v i -tém řezu F_i . $T(y)$ – posouvající síla, $Mo(y)$ – ohybový moment a $Mk_{OO}(y)$ – kroticí moment k ose otáčení v daném místě y po rozpětí křídélka. Polohy řezů po rozpětí budeme značit y_i . Polohu osy zatížení po rozpětí značíme $x_F(y)$, polohu osy otáčení $x_{OO}(y)$. Označíme šířku závaží w .

Reakce vyvolané i -tým závažím potom můžeme zapsat následovně:

$$\begin{aligned}T_i &= \int_{y_i-w/2}^{y_i+w/2} \frac{F_i}{w} dy, \\Mo_{OO,i} &= \int_{y_i-w/2}^{y_i+w/2} y \cdot \frac{F_i}{w} dy, \\Mk_i &= \int_{y_i-w/2}^{y_i+w/2} (x_{OO}(y) - x_F(y)) \cdot \frac{F_i}{w} dy,\end{aligned}\tag{5.6}$$

kde F_i/w představuje velikost liniového zatížení od i -tého závaží. Navržením poloh zatěžujících řezů tak, aby konce závaží splývaly se dosáhne spojitěho zatížení v celém rozpětí.

Protože ale je v praxi mnohem jednodušší počítat se součty než s integrály, můžeme každý interval rozdělit na konečný počet úseku (například 10), na nichž se pak spočítají silové účinky:

$$\begin{aligned}T_i &= \sum_{j=1}^{10} \frac{F_i}{10}, \\Mo_{OO,i} &= \sum_{j=1}^{10} y_j \cdot \frac{F_i}{10}, \quad y_j = y_i + \frac{j-5}{10}w \\Mk_i &= \sum_{j=1}^{10} (x_{OO}(y_j) - x_F(y_j)) \cdot \frac{F_j}{10}.\end{aligned}\tag{5.7}$$

Další postup ve výpočtu je principově shodný s již popsáním postupem pro výpočet zkoušky křídla, tedy jedná se o postupný výpočet účinků od jednotlivých sil (v malých úsecích), zaváděných podél osy zatížení.

Návrh zkoušky křídélka

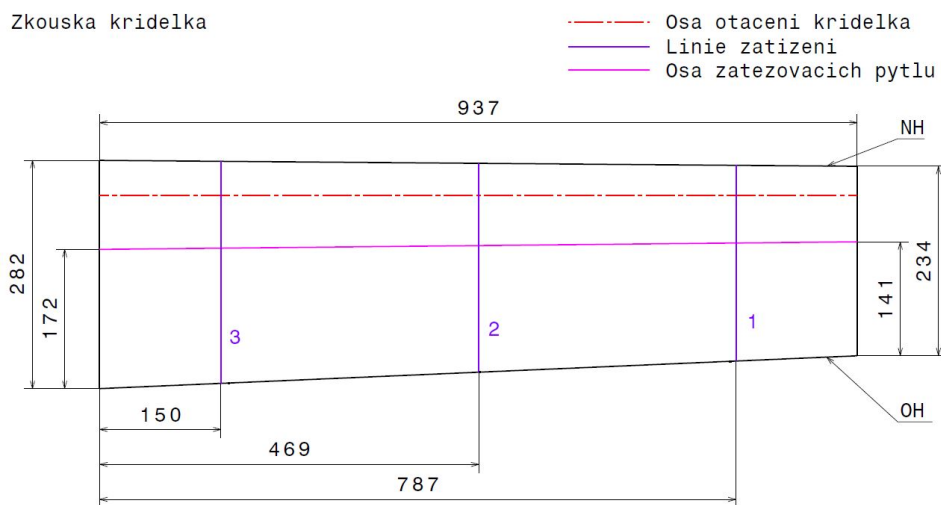
Zkouška byla připravena pro 100% (provozní), 150%, 190% a 225% (početní) zatížení křídélka dle hodnot z technické zprávy. Pro závěsový moment byl aplikován doplňující součinitel 1.25, což umožňuje prokázat požadavek na pevnost uchycení táhla řízení do kompozitové konstrukce křídélka (bod 1 tabulky 4.4). Zatěžující pytle jsou vyskládány na

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Tabulka 5.11: Návrh zkoušky křídélka

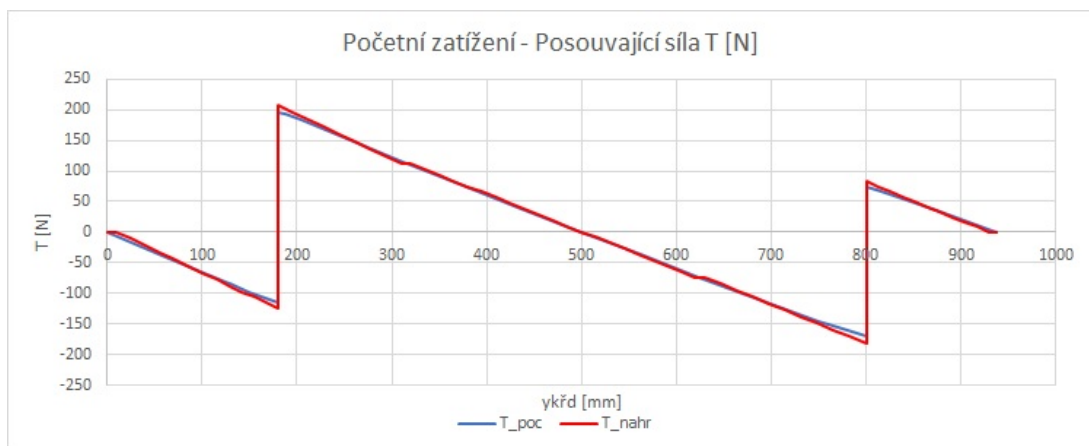
Číslo řezu	3	2	1	
Poloha [mm]	150	469	787	
Vzd. od OH [mm]	167	157	146	
Zatížení [N]				Celkem
100 % – provozní	90	90	80	265
150 %	140	130	120	395
190 %	170	165	150	505
225 % – početní	200	195	175	595

křídélko podél osy zatížení ve třech místech. V následující tabulce jsou uvedeny výsledné parametry zkoušky.



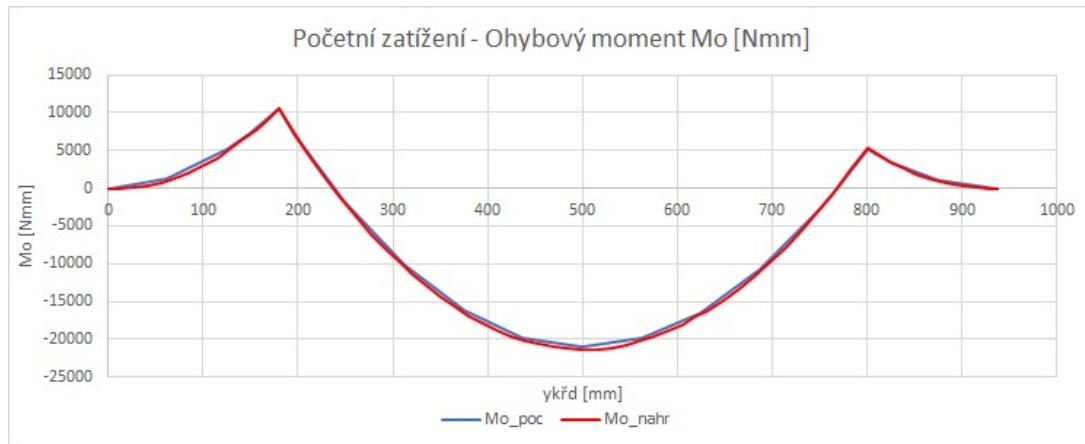
Obrázek 5.9: Zkouška křídélka – náčrt poloh působišť zatížení.

Průběhy posouvající síly T , ohybového momentu M_o a krouticího momentu k ose otáčení Mk_{OO} pro početní zatížení jsou zobrazeny v následujících grafech.

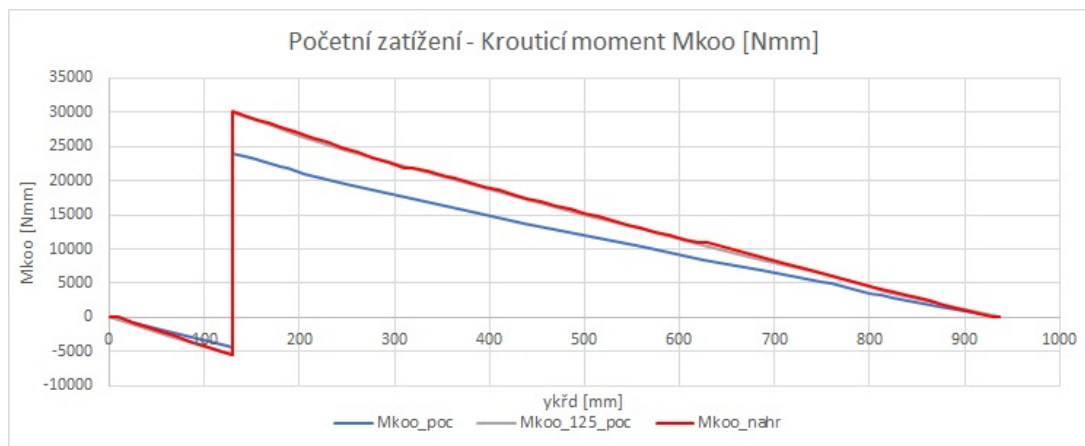


Obrázek 5.10: Zkouška křídélka – průběh posouvající síly.

5.1. KŘÍDLO



Obrázek 5.11: Zkouška křídélka – průběh ohybového momentu.



Obrázek 5.12: Zkouška křídélka – průběh krouticího momentu.

Počtní závěsový moment se zvyšujícím součinitelem je 35650 Nmm.

Je patrné, že spojitě rozložení tíhové síly pytlů umožňuje relativně přesně nahradit průběhy vypočtených silových účinků v křídélku (až na silový profil po těživě).

Návrh zkoušky vyvažovací plošky

Zkouška vyvažovací plošky je analogická se zkouškou křídélka. Krouticí moment k ose otáčení je nahrazován bez uvážení přídatných součinitelů bezpečnosti (vyvažovací ploška je ovládaná pomocí elektrického servomotoru a není částí hlavní soustavy řízení). Vykonáním zkoušky je prokázán bod 3 tabulky 4.1.

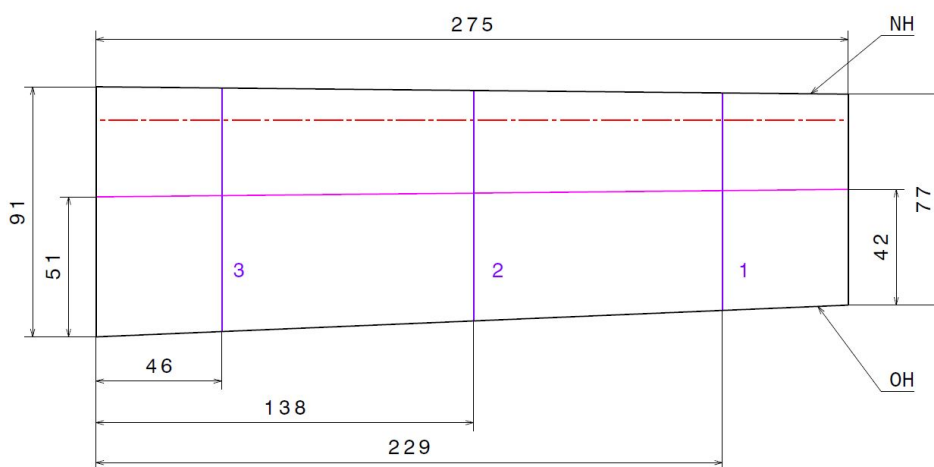
5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Tabulka 5.12: Návrh zkoušky vyvažovací plošky křídélka

Číslo řezu	3	2	1	
Poloha [mm]	46	138	229	
Vzd. od OH [mm]	50	47	44	
Zatížení [N]				Celkem
100 % – provozní	20	20	20	60
150 %	30	30	30	90
190 %	35	35	35	105
225 % – početní	40	40	40	120

Zkouška vyvažovací
plošky křídélka

----- Osa otáčení plošky
——— Linie zatížení
——— Osa zatezovacích pítlu



Obrázek 5.13: Zkouška vyvažovací plošky křídélka – náčrt poloh působití zatížení.

Celková posouvací síla je tedy 120 N, maximální ohybový moment je 4125 Nmm, závěsový moment je 3200 Nmm. Průběhy vnitřních účinků odpovídají teoretickým.

V příloze 9.2 jsou nakládací plány pro zkoušky křídélka a vyvažovací plošky.

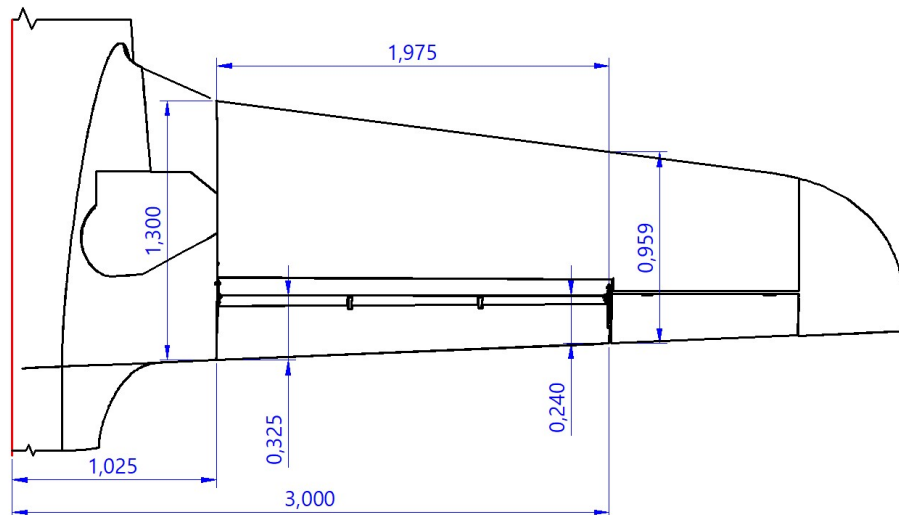
5.1.4. Zkouška vztlakové klapky

Fowlerova vztlaková klapka daného letounu je dvoušterbinová, dvousegmentová. Maximální výchylka klapky je 32 stupňů, což odpovídá zkoušenému případu. Návrh zkoušky je proveden podle výsledků výpočtové zprávy zatížení klapky [17], pevnostní zkouška prokazuje bod 4 tabulky 4.1. V následující tabulce můžeme vidět základní geometrické parametry klapky.

Tabulka 5.13: Geometrické parametry klapky

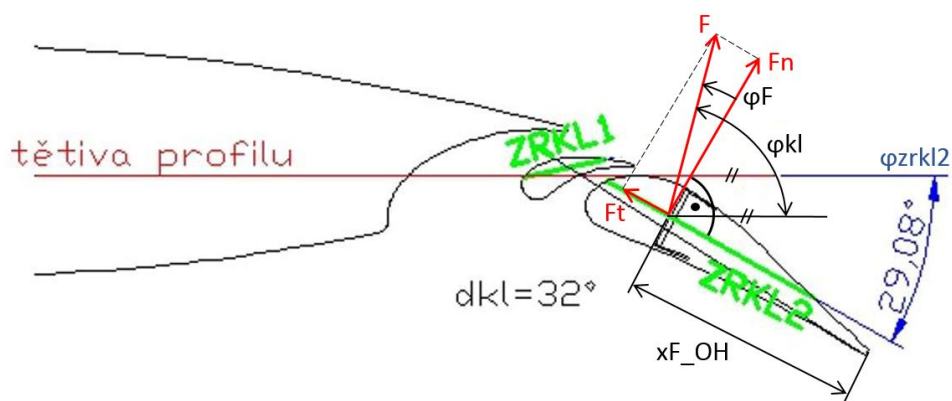
Parametr	Hodnota
Rozpětí	1975 mm
Kořenová/koncová hloubka	325 / 240 mm
Poloha vodítek – vnitřní/vnější	0 / 1975 mm

5.1. KRÍDLO



Obrázek 5.14: Poloha vztlakové klapky (převzato z návrhové dokumentace).

Na obrázku 5.15 je schematické znázornění polohy a směru zatěžující síly v obecném řezu.



Obrázek 5.15: Poloha a směr zatěžující síly vztlakové klapky (převzato z návrhové dokumentace a upraveno).

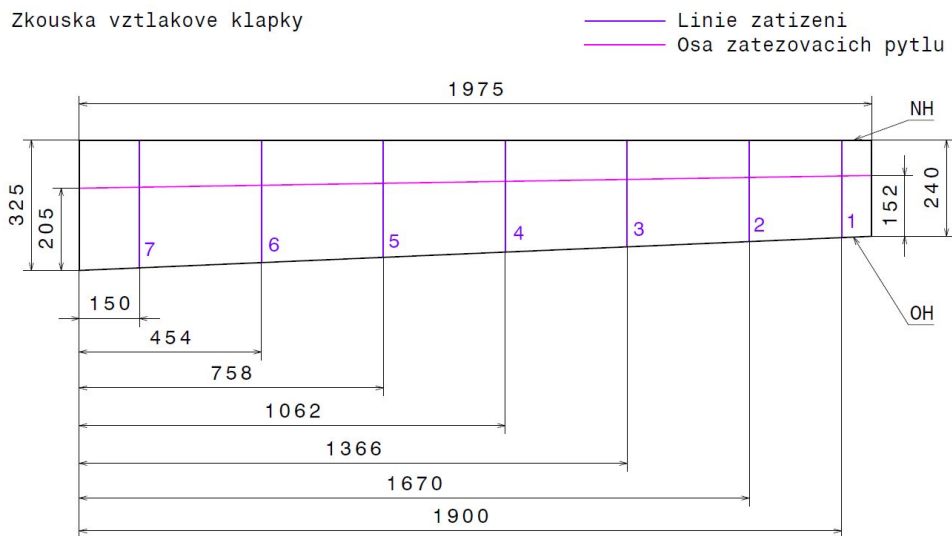
Na rozdíl od křídélka, zde nemůžeme zanedbat tečnou složku síly. Celková síla v daném řezu je označena F , její jednotlivé složky F_n , F_t . φ_F je úhel mezi celkovou silou a normální složkou, φ_{zrkl2} je úhel mezi základní rovinou druhého segmentu klapky a tětívou profilu (pro výchylku klapky 32° je $\varphi_{zrkl2} = 29^\circ$), φ_{kl} je potom úhel mezi celkovou silou a rovinou křídla. x_{OH}^F je vzdálenost působíště zatížení od odtokové hrany klapky, která byla spočtena jako $x_{OH}^F = 0.158 \cdot c$, kde c je hloubka profilu [17].

Zkouška je prováděna pomocí zatěžovacích pytlů. Nahrazované složky zatížení jsou T_n , T_t , M_{on} , M_{ot} . Krouticí moment zde není uvažován, jelikož není podstatný vzhledem k zatížení a způsobu uchycení klapky. Zatížení se zavádí v sedmi řezech, z nichž řez č. 1 je určen pro pytle o menší velikosti (20 N a menší). Návrh zkoušky je následující:

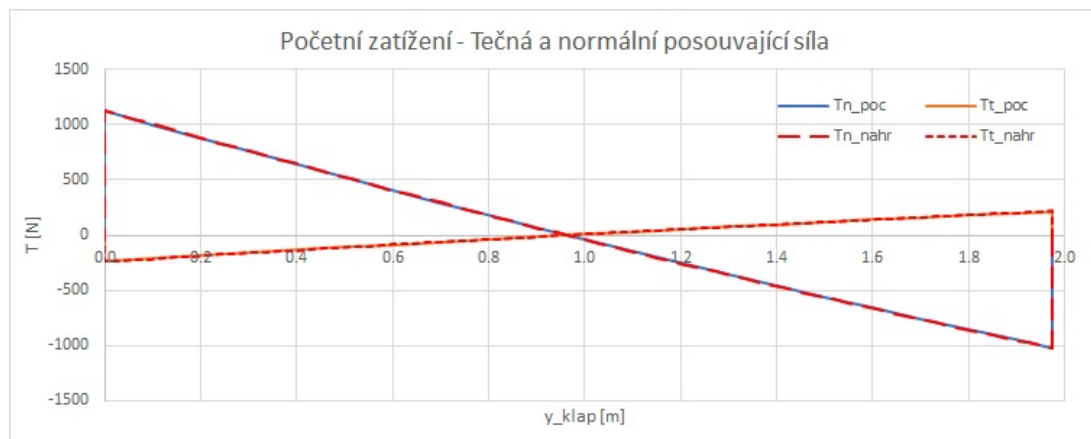
5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Tabulka 5.14: Návrh zkoušky klapky

Číslo řezu	7	6	5	4	3	2	1	
Poloha [mm]	150	454	758	1062	1366	1670	1900	
Vzdál. od OH [mm]	201	193	185	176	168	160	154	
Zatížení [N]								Celkem
100 % – provozní	170	160	160	150	140	140	70	975
150 %	250	240	240	220	220	200	100	1465
190 %	320	310	300	280	270	260	120	1855
225 % – početní	380	365	350	335	320	305	145	2200

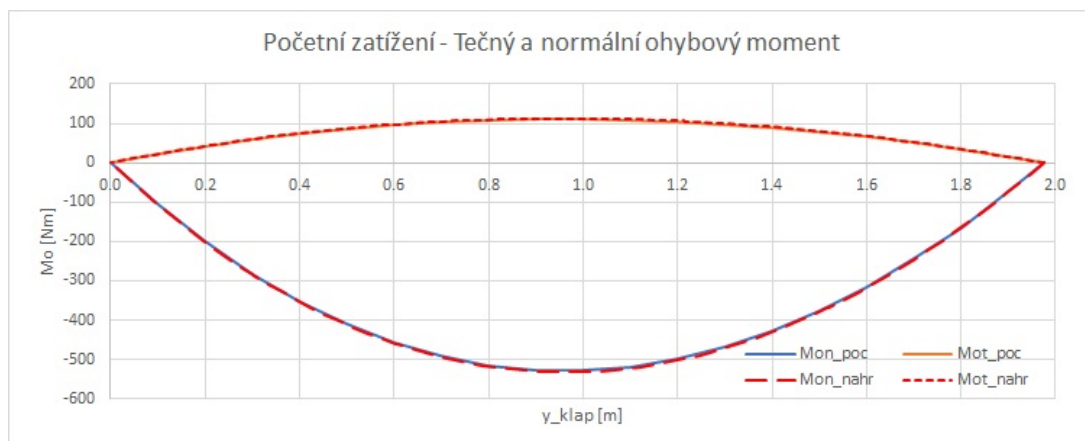


Obrázek 5.16: Zkouška klapky – náčrt poloh působišť zatížení.



Obrázek 5.17: Zkouška klapky – průběh posouvající síly.

5.2. OCASNÍ PLOCHY



Obrázek 5.18: Zkouška klapky – průběh ohybového momentu.

Maximální (absolutní) normální ohybový moment je $Mon = 543$ Nm, tečný ohybový moment $Mot = 113$ Nm. $\varphi_F = 12^\circ$, tedy můžeme vypočítat úhel naklonění křídla na zkušebním přípravku:

$$\alpha_{kl} = \varphi_{kl} = 90^\circ - \varphi_{zrkl} + \varphi_F = 180^\circ - 29^\circ + 12^\circ = 163^\circ \quad (5.8)$$

Nakládací plán lze nalézt v příloze 9.2.

5.1.5. Zkouška palivové nádrže

Prokázání těsnosti a schopnosti bezpečně přenášet tlakové zatížení je jedním z požadavků předpisu. Křídlová palivová nádrž o objemu 45 litrů je umístěná v dutině za hlavním nosníkem. Zkouška tlakem je prováděna následujícím způsobem:

1. Zatížení křídla na hodnotu provozního zatížení z případu 1, 5.4.
2. Napouštění nádrže zkušební kapalinou do předepsaného tlaku v nádrži.
3. Vizuelní kontrola křídla, zda není patrné prosakování nebo vytékání kapaliny z nádrže.
4. Odlehčení křídla, vyprázdnění nádrže.

5.2. Ocasní plochy

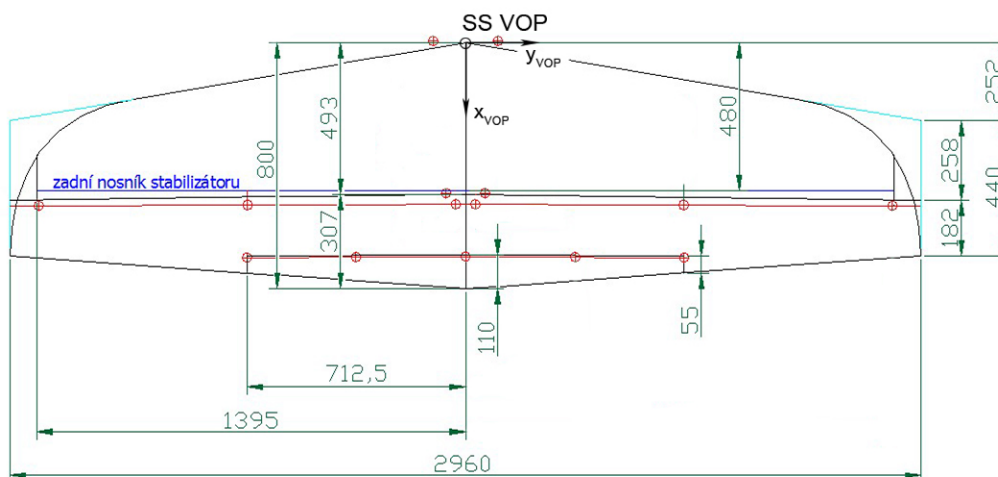
5.2.1. Zkouška VOP

Zkouška vodorovných ocasních ploch byla navržena na základě technické zprávy výpočtu zatížení OP [15]. Níže jsou uvedeny základní parametry pevné části VOP a výškového kormidla. Pro výpočet byl použit lokální souřadnicový systém VOP, který má počátek v teoretickém náběžném bodě kořenového řezu VOP (je posunutý o 6184 mm směrem dozadu oproti globálnímu SS).

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Tabulka 5.15: Základní geometrické parametry VOP

Parametr	Hodnota
Rozpětí VOP	2960 mm
Kořenová hloubka stabilizátoru	493 mm
Koncová hloubka stabilizátoru (teor.)	258 mm
Kořenová hloubka VK	307 mm
Koncová hloubka VK (teor.)	182 mm
Poloha rohového odlehčení VK	1395 mm



Obrázek 5.19: Náčrt VOP (převzato z návrhové dokumentace a upraveno).

Výpočet zatížení VOP je podle předpisu proveden pro manévrovací, poryvová a vyvažovací zatížení. V tabulce níže je uveden souhrn výpočtu vnitřních účinků pro každý případ (jsou uvedeny teoretické hodnoty v kořenovém řezu od spojitého zatížení na polovinu VOP). Krouticí moment na stabilizátoru je počítán k zadnímu nosníku a je označován Mk_{zn} , závěsový moment výškového kormidla značíme Mk_{oo} .

Tabulka 5.16: Typy zatížení VOP

Parametr		Manévr	Poryv	Vyvážení
Pouze stabilizátor				
Posouvající síla T	[N]	-884	-1175	-1349
Ohybový moment Mo	[Nm]	-544	-731	-846
Krouticí moment Mk_{zn}	[Nm]	-97	-267	-373
Výškové kormidlo				
Posouvající síla T	[N]	-636	-117	295
Ohybový moment Mo	[Nm]	-447	-112	213
Závěsový moment Mk_{oo}	[Nm]	34	4	-15
Stabilizátor + VK				
Posouvající síla T	[N]	-1520	-1292	-1055
Ohybový moment Mo	[Nm]	-992	-843	-633
Krouticí moment Mk_{zn}	[Nm]	-67	-261	-387

5.2. OCASNÍ PLOCHY

Případ manévru je pro zatížení výškového kormidla kritický. Rovněž při manévru je největší celkový ohybový moment (a posouvající síla) v kořenu stabilizátoru.

Poryvové zatížení je charakteristické podstatně bližší polohou výslednice k NH, kdy kormidlo nemá tak podstatný vliv na celkové zatížení. Je tady i významný krouticí moment při zachování vysokého ohybového momentu a posouvající síly.

Průběh vyvažovacího zatížení po hloubce VOP nebyl počítán podle předpisu UL-2, nýbrž bylo využito univerzálního schématu podle předpisu CS-23. Tím pádem, takto vypočtené zatížení může, ale nemusí sloužit k průkazu požadavků UL-2, jež nedefinují rozložení vyvažovacího zatížení po hloubce profilu. Jak je patrné, vlivem zatížení stabilizátoru a VK v opačných směrech při vyvažování dochází k významnému krouticímu momentu při zachování zhruba 2/3 od maximální posouvající síly a ohybového momentu. Poloha silové výslednice na stabilizátoru je při tom velmi blízko k náběžné hraně.

Manévrovací a poryvové zatížení

Po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že se zkouška bude provádět pomocí zatěžovacích pytlů, a to naložením na stabilizátor i na VK zároveň.

Jedna polovina VOP je rozdělena na 7 zatěžovacích řezů, z nichž první řez je pouze pro výškové kormidlo (zatížení rohového odlehčení pomocí pytlů o menší velikosti), ve řezech 2 až 7 se zatížení aplikuje jak na VK, tak i na stabilizátor.

Vzhledem k tomu, že zatížení a závěsový moment VK od manévrů je kritický, má smysl v tomto případě prokázat pevnost uchycení táhla řízení. Bude tedy na závěsový moment Mk_{oo} aplikován doplňující součinitel bezpečnosti 1.25.

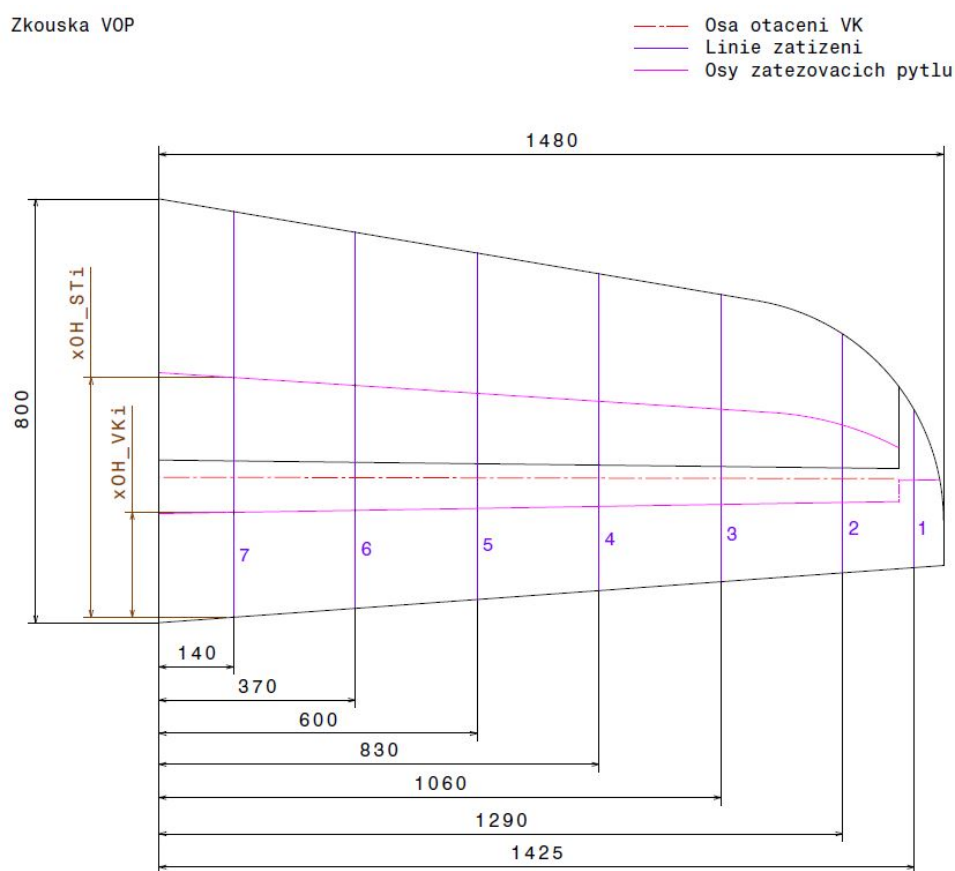
Tabulka 5.17: Návrh zkoušky VOP – manévr

Zkouška VOP – manévr							
Číslo řezu	7	6	5	4	3	2	1
Poloha [mm]	140	370	600	830	1060	1290	1425
Vzdál. od OH [mm]							
– Stabilizátor	453	421	389	357	326	279	n/a
– VK	183	170	157	144	131	118	150
Zatížení [N]							Celkem
100 % – Stab.	180	170	160	140	120	100	870
100 % – VK	115	110	100	100	85	75	45
225 % – Stab.	400	380	360	320	270	210	1940
225 % – VK.	260	250	230	210	190	170	100
							1410

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Tabulka 5.18: Návrh zkoušky VOP – poryv

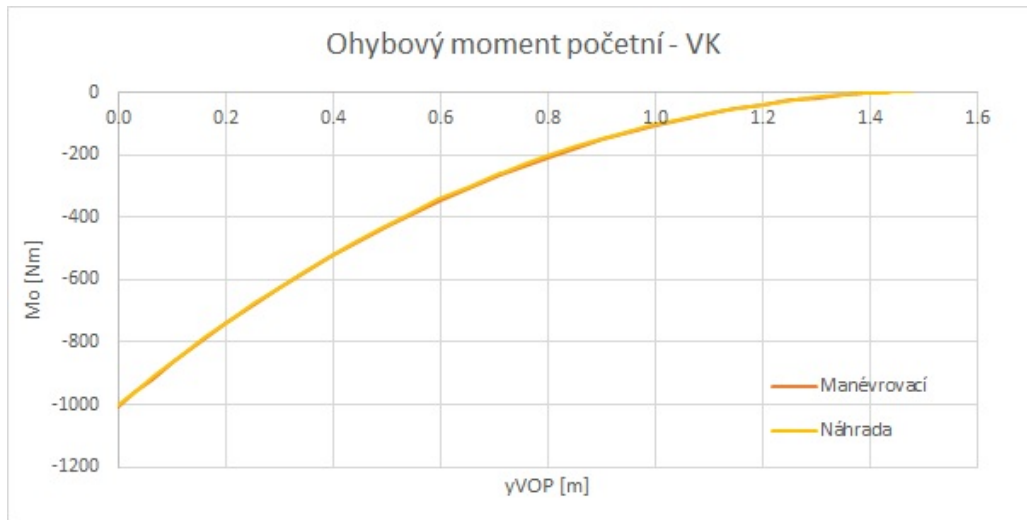
Zkouška VOP – poryv							
Číslo řezu	7	6	5	4	3	2	1
Poloha [mm]	140	370	600	830	1060	1290	1425
Vzdál. od OH [mm]							
– Stabilizátor	596	552	509	466	423	344	n/a
– VK	198	185	172	159	146	133	165
Zatížení [N]							
100 % – Stab.	250	220	210	190	180	110	Celkem 1160
100 % – VK	15	15	15	15	15	15	40 130
225 % – Stab.	550	500	470	430	400	250	2600
225 % – VK.	30	30	30	30	30	30	90 270



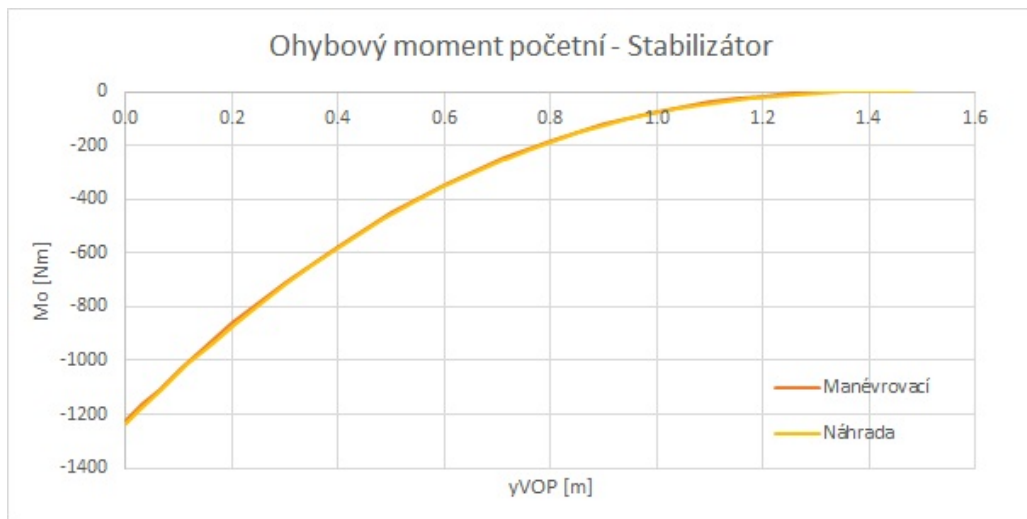
Obrázek 5.20: Zkouška VOP – náčrt poloh působišť zatížení.

Na následujících obrázcích jsou průběhy ohybových a krouticích momentů pro případ manévru. Grafy pro poryvové zatížení jsou podobné, proto zde nejsou uvedeny.

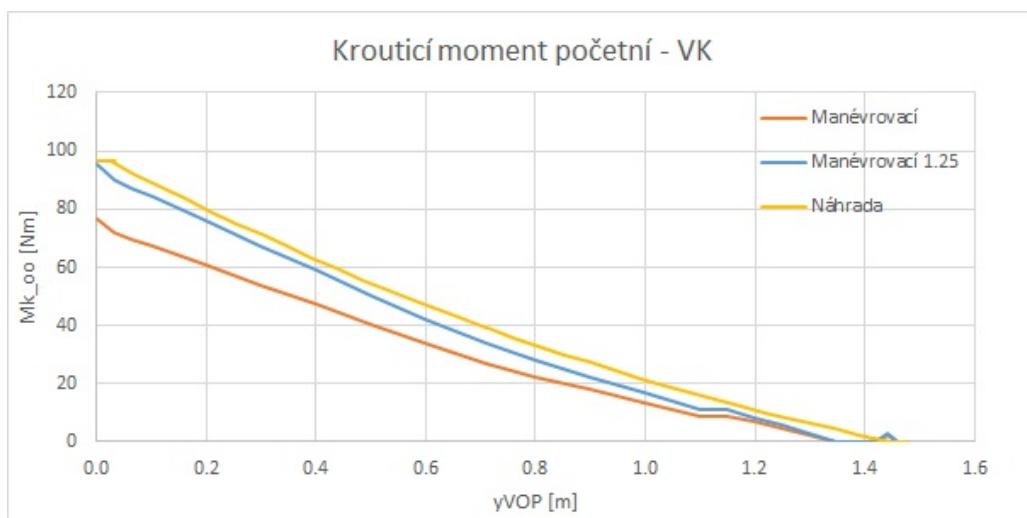
5.2. OCASNÍ PLOCHY



Obrázek 5.21: Zkouška VOP, případ manévru – ohybový moment VK (početní).

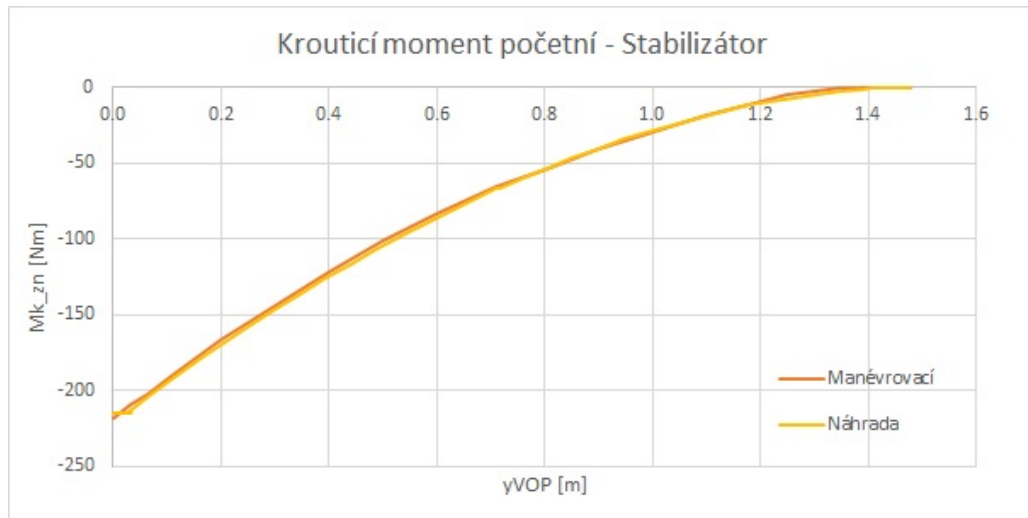


Obrázek 5.22: Zkouška VOP, případ manévru – ohybový moment stabilizátor (početní).



Obrázek 5.23: Zkouška VOP, případ manévru – závěsový moment VK (početní).

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ



Obrázek 5.24: Zkouška VOP, případ manévru – závěsový moment stabilizátor (početní).

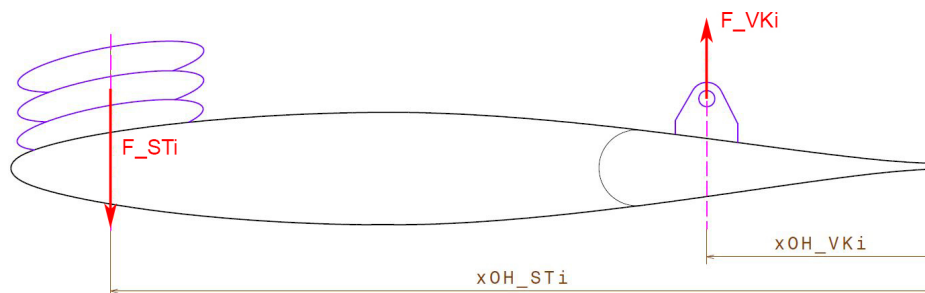
Poznámka. Při zkoušce je posouvající síla přenášena z výškového kormidla na stabilizátor v místech spojení, tedy dochází ke skokovým změnám posouvací síly v místech závěsů. Vzhledem k tomu, že jsou na každé straně VOP 3 závěsy, úloha nalezení reakčních sil v závěsech je staticky neurčitá. Nicméně, v tomhle případě není podstatné vědět přesné závěsové reakce.

Nakládací plán pro zkoušku VOP, případ manévru je uveden v příloze 9.2, plány pro ostatní případy jsou obsaženy ve výpočtovém souboru.

Vyvažovací zatížení

Ačkoli průběh vyvažovacího zatížení VOP není definován předpisy UL-2 a LTF-UL, otázka provedení této zkoušky zůstává otevřená. Pro úplnost bylo rozhodnuto tuto zkoušku připravit a spočítat.

Zvláštnost vyvažovacího zatížení je v tom, že celkové síly působí na stabilizátor a na kormidlo v opačných směrech. Běžným postupem při takové situaci je použití vahadlového systému pro stabilizátor a zatěžovacích pytlů pro kormidlo. V této práci je navržen odlišný způsob zavedení zatížení: síly na stabilizátor – nakládací závaží, výškové kormidlo se zatěžuje směrem nahoru pomocí systému kladek a lana, na nehož se zavěsí závaží.



Obrázek 5.25: Navrhovaný způsob zkoušení VOP – vyvažovací zatížení.

Takovéto provedení má jak výhody, tak i nevýhody, které jsou shrnuty níže.

5.2. OCASNÍ PLOCHY

Výhody:

- Stejně uchycení VOP pro všechny zkoušky – není zapotřebí měnit polohu VOP na přípravku.
- Relativně jednoduchá realizace zatížení kormidla – síly do VK jsou zaváděny pomocí nalepených plátěných závěsů, resp. jinou podobnou metodou, není zapotřebí vyrábět sadu kleštin.
- Malé síly na VK mohou být vyvozeny pomocí závěsných hmot, zatížení se přenáší do VK pomocí lana a systému nehybných kladek, není zapotřebí využívat hydraulických válců ani měřicích systémů – jednoduchá příprava zkoušky.

Nevýhody:

- Poloha osy zatížení stabilizátoru je výrazně vepředu – možný nedostatek místa pro naložení závaží.
- Zvýšené riziko sklouznutí závaží.

Parametry zkoušky jsou následující.

Tabulka 5.19: Návrh zkoušky VOP – vyvážení

Zkouška VOP – vyvážení								
Číslo řezu	7	6	5	4	3	2	1	
Poloha [mm]	140	370	600	830	1060	1290	1425	
Vzdál. od OH [mm]								
– Stabilizátor	656	609	562	515	468	377	n/a	
– VK	198	185	172	159	146	133	165	
Zatížení [N]								Celkem
100 % – Stab.	300	250	240	220	190	150		1350
100 % – VK	-60	-55	-50	-40	-35	-35	-35	-300
225 % – Stab.	640	570	540	490	430	330		3000
225 % – VK.	-125	-115	-105	-90	-80	-75	-75	-665

5.2.2. Zkouška směrového kormidla

Vzhledem k tomu, že se pevná část svislých ocasních ploch bude zkoušet společně s trupem, byla vypočtena pouze zkouška směrového kormidla (SK). Kritickým případem zatížení SK je stejně jako u VK případ manévru.

Pro výpočet byl použit lokální souřadnicový systém SOP, jehož počátek leží na náběžné hraně vztahného kořenu kýlu, kladný směr osy z je nahoru. Vzhledem k tomu, že svislé ocasní plochy mají významný kladný úhel šípu, musí být uvažován při výpočtu ohybového a krouticího momentu SK. Momenty vzhledem k šípu jsou označovány Mo_{sip} a $Mk_{oo,sip}$ a jejich přepočet je provedený pomocí souřadnicové transformace následovně:

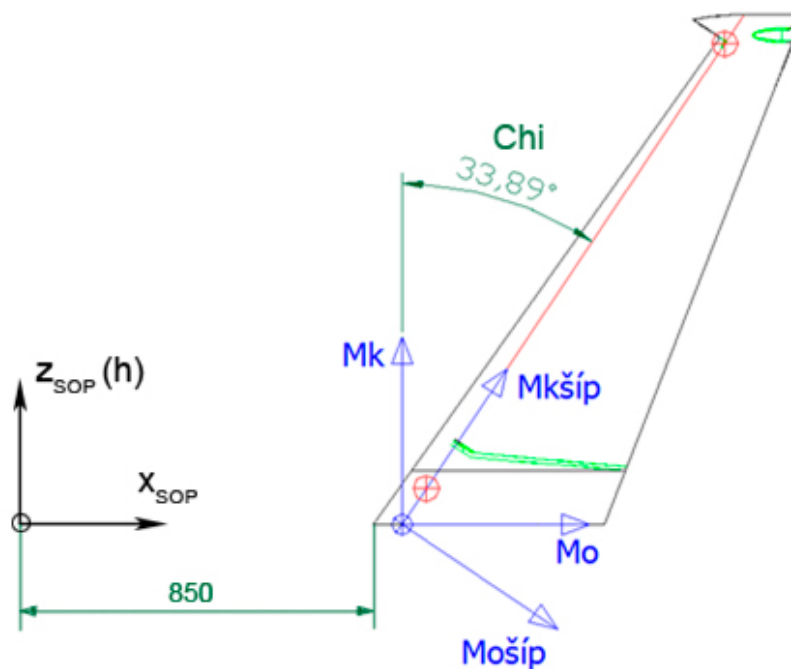
$$\begin{aligned}
 Mo_{sip}(z) &= Mo(z) \cos(\chi_{oo}) - Mk_{oo}(z) \sin(\chi_{oo}), \\
 Mk_{oo,sip}(z) &= Mo(z) \sin(\chi_{oo}) + Mk_{oo}(z) \cos(\chi_{oo}),
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Tabulka 5.20: Základní geometrické parametry SK

Parametr	Hodnota
Celková (vztažná) výška SOP (SK)	1250 mm
Skutečná výška SK	1118 mm
Kořenová hloubka SK (teor.)	565 mm
Koncová hloubka SK (teor.)	166 mm
Kořenová poloha osy otáčení SK	70 mm
Koncová poloha osy otáčení SK	21.29 mm
Úhel šípů (osa otáčení)	33.89°

kde χ_{oo} značí úhel šípů vztahovaný k ose otáčení kormidla. Na obrázku 5.26 je vyznačen souřadnicový systém, úhel šípů a momentové složky zatížení.



Obrázek 5.26: Náčrt směrového kormidla (převzato z návrhové dokumentace a upraveno).

U zkoušky SK platí stejná úvaha, jak u VK i křídélka, kde závěsový moment nahra-
zujeme se zvyšujícím součinitelem 1.25. Zatížení je zaváděno do pěti řezů.

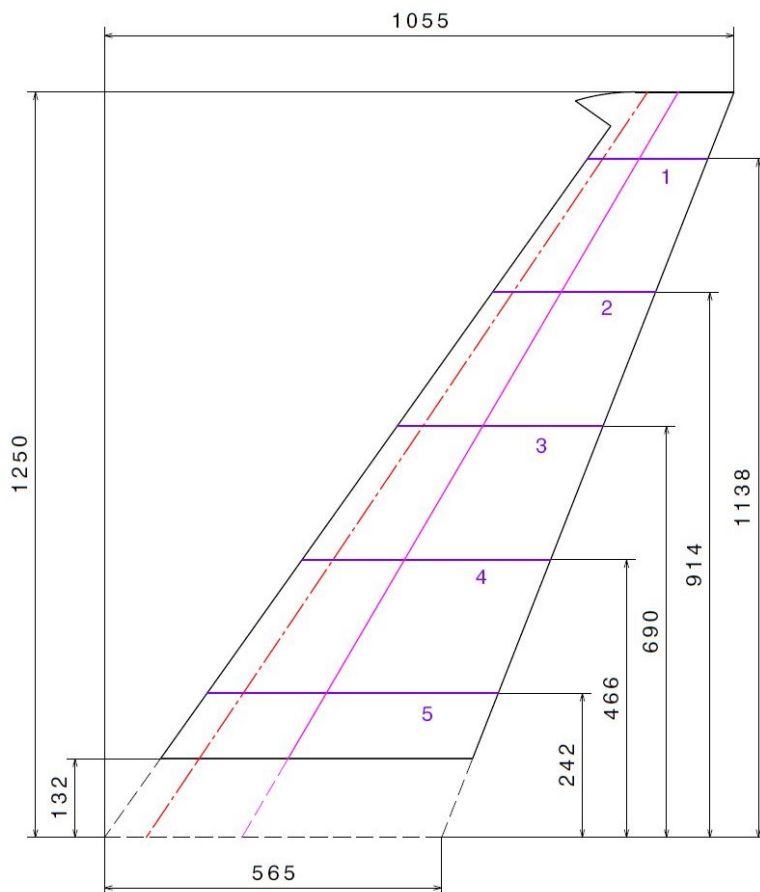
5.2. OCASNÍ PLOCHY

Tabulka 5.21: Návrh zkoušky směrového kormidla

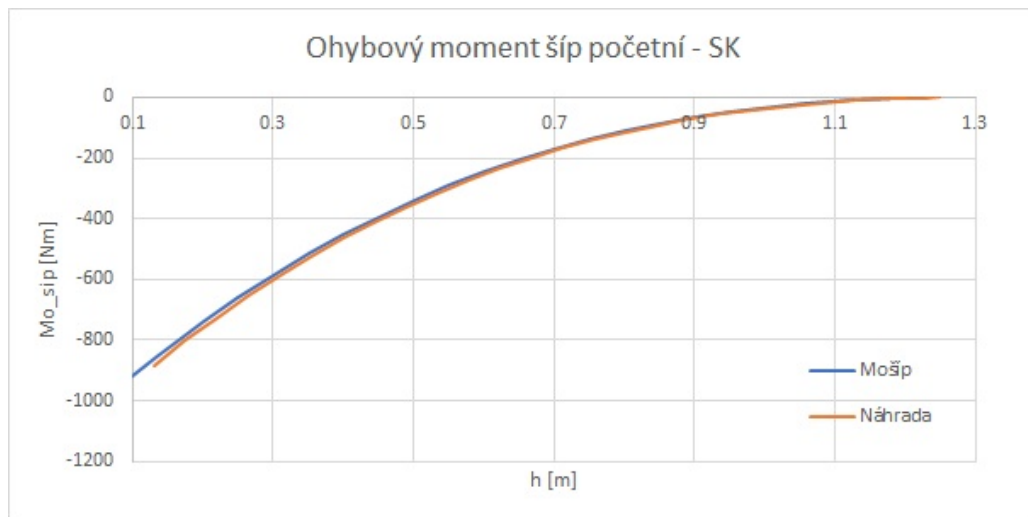
Zkouška SK – manévr						
Číslo řezu	5	4	3	2	1	
Poloha (z_{SOP}) [mm]	242	466	690	914	1138	
Vzdál. od OH [mm]	285	242	200	158	116	
Zatížení [N]						Celkem
100 % – provozní	180	160	130	100	80	650
150 %	270	235	190	145	120	960
190 %	340	300	240	185	155	1220
225 % – početní	400	350	280	215	180	1425

Zkouška smeroveho
kormidla - manevr

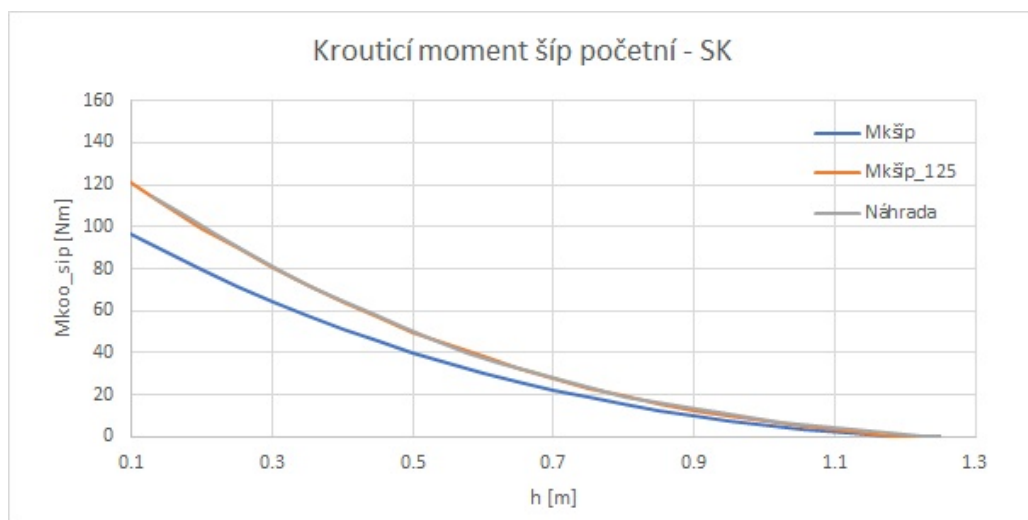
--- Osa otaceni SK
— Linie zatizeni
— Osa zatezovacich pytlu



Obrázek 5.27: Zkouška SK - náčrt poloh působišť zatížení.



Obrázek 5.28: Zkouška SK – ohybový moment $M_{o_{sip}}$ (početní).



Obrázek 5.29: Zkouška SK – závěsový moment $Mk_{oo,sip}$ (početní).

5.3. Zkouška motorového lože

Tato sekce je věnována návrhu zkušebních případů motorového lože. Rozhodující zatížení bylo stanoveno v technické zprávě výpočtu zatížení motorového lože [14].

5.3. ZKOUŠKA MOTOROVÉHO LOŽE

Tabulka 5.22: Přehled zatížení motorového lože [14]

Č.	Název případu	Od pohonné jednotky, v místě těžiště PJ				Od hmoty příďového podvozku, v místě těžiště PP	Od příďového podvozku, v místě osy kola (boční síla v místě dotyku kola se zemí)		
		F _x	F _y	F _z	M _x	F _z	R _{PPX}	R _{PPY}	R _{PPZ}
		[N]	[N]	[N]	[Nm]	[N]	[N]	[N]	[N]
1	Kroučící moment motoru při vzletovém výkonu	-2100	0	-3120	588	-206	0	0	0
2	Kroučící moment při max. trvalém výkonu	-2100	0	-4159	582	-275	0	0	0
3	Boční zatížení motorového lože	0	1560	0	0	0	0	0	0
4		0	-1560	0	0	0	0	0	0
5	Kladný poryv	-1062	0	-5823	582	-385	0	0	0
6	Záporný poryv	-1062	0	3743	582	247	0	0	0
7	Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi	0	0	-4491	0	0	1296	0	4385
8	Dodatečné podmínky pro příďová kola	0	0	0	0	0	1237	0	1546
9		0	0	0	0	0	0	1237	1546
10		0	0	0	0	0	0	-1237	1546
11		0	0	0	0	0	-619	0	1546

Poznámka. Letoun je konstrukčně navržen tak, že příďový podvozek je uchycen k motorovému loži. Takovéto uspořádání pro tento typ letounů má výhodu zejména v tom, že při přistání zatížení příďového podvozku je z větší části vykompenzováno setrvační silou motoru. Jak je vidět, tabulka 5.22 zahrnuje případy zatížení motorového lože od reakcí podvozku při přistání. Protože se předpokládá zkoušení lože a podvozku instalovaných na trup letounu, v této části budou rozebírány pouze případy lože neobsahující reakci příďového podvozku od přistání.

Z uvedených případů zatížení vyplývá návrh zkušebních případů:

Tabulka 5.23: Zkušební případy motorového lože

Zkušební případ	Případ zatížení	Popis	Bod v tab. 4.2
ML-1	1+2	Maximální tah, manévr	4 b) c)
ML-2	3+4	Boční zatížení	4 d)
ML-3	5	Kladný poryv	4 a)
ML-4	6	Záporný poryv	4 a)
–	7 až 11	Podvozkové případy	4 e)

Konstrukce motorového lože je příhradová, hlavním polotovarem jsou duralové trubky. Z toho důvodu je pro návrh zkoušky lože použit součinitel bezpečnosti $f_U = 1.5$. Uchycení lože do kompozitního trupu ale vyžaduje použití zvýšeného součinitele bezpečnosti.

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Při zkoušce lože je trup letadla pevně uchycen do přípravků, zatížení je aplikováno na přípravek motorového lože – náhradu pohonné jednotky. Níže následuje popis míst zavádění zatížení a uchycení trupu.

- Přípravek motorového lože – svislé setrvační zatížení pohonné jednotky (FZ_{PJ}), dopředná síla (FX_{PJ}), boční síla (FY_{PJ}) a krouticí moment. Svislé a boční zatížení je aplikováno do těžiště pohonné jednotky, dopředná síla působí v ose otáčení vrtule (bez uvážení vyosení motoru).
- Osa otáčení sestavy předního podvozku – ačkoli těžiště zasunutého podvozku je mimo tuto osu směrem dozadu, setrvační zatížení od podvozku může být zavedeno do uchycení podvozku na motorovém loži. Setrvační zatížení od podvozku může být nahrazeno zavěšovací závažím.
- Kleštiny centrolánu – trup letounu je pevně uchycen pomocí kleštín z obou stran trupu. Zde je předpokládána pevná vazba, která je schopná přenášet silové složky ve všech třech hlavních směrech, a částečně klopivý a zatáčivý moment trupu. Pro sestavení staticky určité úlohy pro výpočet reakcí se předpokládá pouze silové zatížení kleštín centrolánu ($FX_{KR,L/R}$, $FY_{KR,L/R}$ a $FZ_{KR,L/R}$), nikoli momentové.
- Náhrada VOP – přípravek pro uchycení trupu. Zde je předpokládáno zavedení náhradního vyvažovacího zatížení ve svislém (FZ_{VOP}) a bočním (FY_{VOP}) směru. Vzhledem k předpokladu nulových momentů na kleštinách centrolánu, toto zatížení představuje maximální vyvažovací zatížení během zkoušky, které může být menší vlivem pevného uložení kleštín centrolánu.

Pro každý zkušební případ byla sestavena a vyřešena staticky určitá úloha silové rovnováhy, tedy soustava rovnic

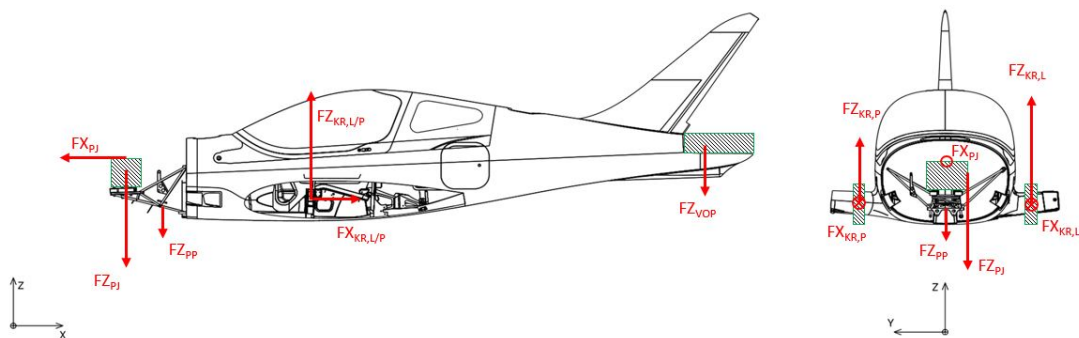
$$\begin{aligned} \sum FX_i &= 0, & \sum MX_i &= 0, \\ \sum FY_i &= 0, & \sum MY_i &= 0, \\ \sum FZ_i &= 0, & \sum MZ_i &= 0. \end{aligned} \tag{5.10}$$

Poznámka. Momenty jsou počítané k počátku souřadnicového systému 3D modelu letounu, k nemuž jsou rovněž vztaženy souřadnice působíště jednotlivých sil.

5.3. ZKOUŠKA MOTOROVÉHO LOŽE

Tabulka 5.24: Zkouška motorového lože, početní zatížení – případ 1

Případ 1		150%						
Krouticí moment při vzletovém/max. trvalém výkonu		Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty	
Náhrada síly		x	y	z	Fx	Fz	Mx k 0	My k 0
		[m]	[m]	[m]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]
Náhrada motoru	FX _{PJ}	1.008	0	1.511	-3150			-4760
	FZ _{PJ}	1.008	-0.141	1.401		-6239	882	6288
Náhrada PP	FZ _{PP}	1.39	0.000	0.78		-412.5		573
Centroplán L	FX _{KR,L}	2.957	-1.025	1.19	1575			1874
	FZ _{KR,L}	2.957	-1.025	1.19		5725	-5868	-16929
Centroplán P	FX _{KR,P}	2.957	-1.025	1.19	1575			1874
	FZ _{KR,P}	2.957	1.025	1.19		4865	4986	-14384
Náhrada VOP	FZ _{VOP}	6.465	0	-		-3939		25463

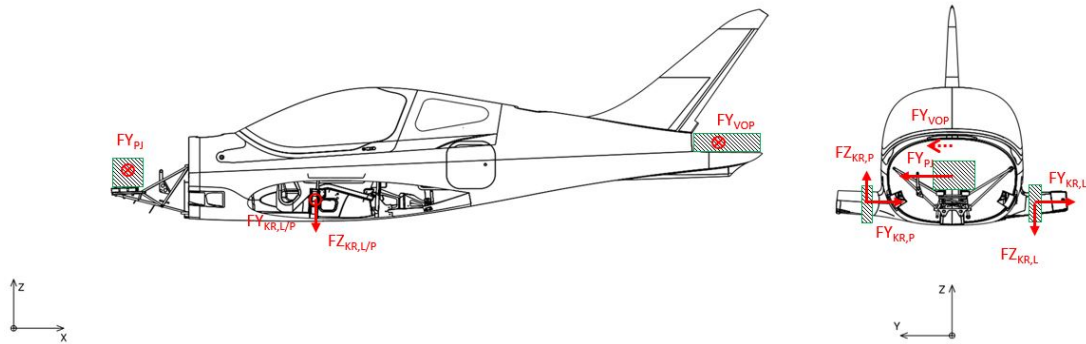


Obrázek 5.30: Zkouška motorového lože, náčrt – případ 1.

Tabulka 5.25: Zkouška motorového lože, početní zatížení – případ 2

Případ 2		150%						
Boční zatížení motorového lože		Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty	
Náhrada síly		x	y	z	Fy	Fz	Mx k 0	Mz k 0
		[m]	[m]	[m]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]
Náhrada motoru	FY _{PJ}	1.008	0.000	1.401	2340		-3278	2359
Náhrada VOP	FY _{VOP}	6.465	0	1.75	1300		-2275	8405
Centroplán L	FY _{KR,L}	2.957	-0.775	1.19	-1820		2166	-5382
	FZ _{KR,L}	2.957	-0.775	0		-788	611	
Centroplán P	FY _{KR,P}	2.957	0.775	1.19	-1820		2166	-5382
	FZ _{KR,P}	2.957	0.775	0		788	611	

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ



Obrázek 5.31: Zkouška motorového lože, náčrt – případ 2.

Případy 3 a 4 lze najít v příloze 9.3.

Poznámka. Po diskusi s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že setrvační zatížení od PP může být sloučeno se zatížením od pohonné jednotky. V takovém případě je provedena úprava síly FZ_{PJ} a její y souřadnice pro případy 1, 3 a 4 na následující hodnoty:

Případ 1, $FZ_{PJ} = -4434$ N, $y = -0.133$ m;

Případ 3, $FZ_{PJ} = -6208$ N, $y = -0.094$ m;

Případ 4, $FZ_{PJ} = 3990$ N, $y = 0.146$ m.

Poznámka. Průkaz pevnosti uchycení ML do kompozitního draku letounu vyžaduje zvýšený součinitel bezpečnosti. Při zatížení motorového lože například na 225 % provozního zatížení může dojít k významnému poškození a deformaci samotného lože. Takové případy proto musí být provedeny jako poslední. Pro vyzkoušení uchycení lože byl předběžně zvolen případ číslo 3 – kladný poryv (případně i 4 – záporný poryv), při němž dochází k největšímu zatížení ve svislém směru.

5.4. Zkouška podvozku

Koncepce zkoušek hlavního a příďového podvozku je podobná zkouškám motorového lože. Rozhodující zatížení bylo stanoveno v technické zprávě zatížení podvozku [16], tabulky 5.26 a 5.27.

Tabulka 5.26: Přehled zatížení příďového podvozku [16]

Případ		Příďový podvozek		
		vodorovné	boční	svislé
		R_{PPX}	R_{PPY}	R_{PPZ}
		[N]	[N]	[N]
Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi (osa kola)		1296	-	4385
Dodatečné podmínky pro příďové podvozky	nahoru a dozadu (osa kola)	1237	-	1546
	nahoru a dopředu (osa kola)	-619	-	1546
	nahoru a do boku (pneumatika)	-	1237	1546

5.4. ZKOUŠKA PODVOZKU

Tabulka 5.27: Přehled zatížení hlavního podvozku [16]

Případ	Hlavní podvozek		
	vodorovné	boční	svislé
	R_{HPX}	R_{HPY}	R_{HPZ}
	[N]	[N]	[N]
Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi (osa kola)	2626	-	8884
Vodorovné přistání s příd'ovým kolem nad zemí (osa kola)	3178	-	10750
Přistání s velkým úhlem podélného sklonu (osa kola)	-2963	-	10334
Podmínky bočního zatížení (pneumatika)	-	2943 (dovnitř)	3944
		1942 (ven)	
Podmínky brzdění při pojíždění (pneumatika)	3178	-	3944

Z toho vyplývají zkušební případy pro podvozek.

Tabulka 5.28: Zkušební případy podvozku

Zkušební případ	Popis	Bod v tab. 4.3
PP-1	Přistání se skl. reakcemi vč. reakce ML	1
PP-2	Dodatečné podm.: nahoru a dozadu	4
PP-3	Dodatečné podm.: nahoru a dopředu	4
PP-4	Dodatečné podm.: nahoru a do boku	4
HP-5	Přistání s PP nad zemí	1
HP-6	Přistání s velkým úhlem náběhu	1
HP-7	Dodatečné podm.: nahoru a dovnitř	2
HP-8	Dodatečné podm.: nahoru a ven	2
HP-9	Dodatečné podm.: brzdění	3

Při zkoušení je trup uchycen pevně. Kromě přípravků a sil uvedených v předchozí sekci zavádíme síly do os a pneumatik podvozkových kol, a to následovně:

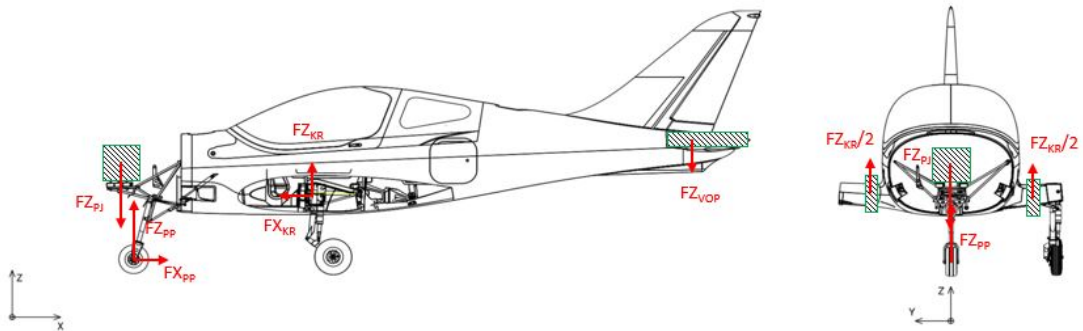
- Přípravek příd'ového podvozku – dopředná ($F_{X_{PP}}$) a svislá ($F_{Z_{PP}}$) síla do osy kola, boční síla do pneumatiky ($F_{Y_{PP}}$).
- Přípravek hlavního podvozku – dopředná ($F_{X_{HP}}$) síla do osy kola, resp. síla od brzdění do pneumatiky, svislá síla ($F_{Z_{HP}}$) do osy kola a boční síla do pneumatiky ($F_{Y_{HP}}$).

V následujících tabulkách můžeme vidět silové působení pro případy 1 a 5, ostatní případy lze nalézt v příloze 9.4.

5. NÁVRH ZKOUŠEK A DEFINICE PŘÍPADŮ ZATÍŽENÍ

Tabulka 5.29: Zkouška příďového podvozku, početní zatížení – případ 1

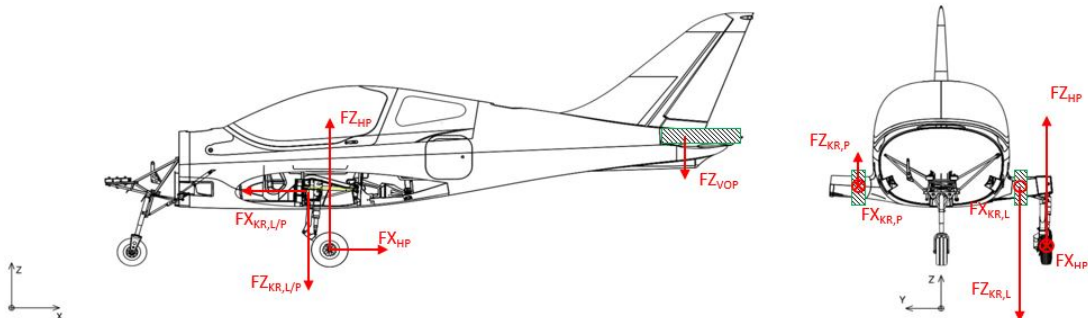
Případ 1		150%						
Příďový podvozek - Vodorovné přistání se skloněnými reakcemi (osa kola)								
Náhrada síly	Působíště v 3D modelu				Síly		Momenty	
	x	y	z	F _x	F _z	M _x k 0	M _y k 0	
	[m]	[m]	[m]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	
Náhrada motoru	FZ _{PJ}	1.008	0	1.401		-6737	0	6790
Síly v ose kola	FX _{PP}	1.158	0	0.599	1944			1164
	FZ _{PP}	1.158	0	0.599		6578	0	-7617
Centroplán (L+P)	FX _{PN}	2.957		1.19	-1944			-2313
	FZ _{PN}	2.957				856	0	-2531
Náhrada VOP	FZ _{ZN}	6.465	0			-697.1	0	4507



Obrázek 5.32: Zkouška příďového podvozku, náčrt – případ 1.

Tabulka 5.30: Zkouška hlavního podvozku, početní zatížení – případ 5

Případ 5		150%							
Hlavní podvozek - Vodorovné přistání s příďovým kolem nad zemí + se skloněnými reakcemi									
Náhrada síly	Působíště v 3D modelu				Síly		Momenty		
	x	y	z	F _x	F _z	M _x k 0	M _y k 0	M _z k 0	
	[m]	[m]	[m]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	
Síly v ose kola	FX _{HP}	3.091	-0.965	0.709	4767			3380	4600
	FZ _{HP}	3.091	-0.965	0.709		16125	-15561	-49842	
Náhrada VOP	FZ _{VOP}	6.465	0	1.75		-1507	0	9743	
Centroplán L	FX _{KR,L}	2.9	-0.775	1.19	-5351			-6368	-4147
	FZ _{KR,L}	2.9	-0.775	1.19		-17348	13445	50309	
Centroplán P	FX _{KR,P}	2.9	0.775	1.19	584			695	-453
	FZ _{KR,P}	2.9	0.775	1.19		2730	2116	-7917	



Obrázek 5.33: Zkouška hlavního podvozku, náčrt – případ 5.

5.5. PLÁN ZKOUŠEK

Pro zkoušení uchycení hlavních podvozkových noh do kompozitní konstrukce křídla platí podobná úvaha, jak při zkoušce motorového lože. Pevnost uchycení podvozku může být prokázána zkouškou zvoleného případu (nebo několika) se zvýšeným součinitelem bezpečnosti. Předběžně je zvolen případ číslo 5 z důvodu největší hodnoty celkové reakční síly od přistání.

Poznámka. Jak je vidět, při zatížení hlavního podvozku dochází k významným silovým reakcím v kleštině křídla na straně zkoušené podvozkové nohy. Jako další zatěžující sílu je možné přidat setrvačné účinky od hmotnosti pilota a pasažéra v místě sedaček, případně i vlastní hmotnost letounu. Náhrada setrvačného zatížení umožní odlehčit kleštinu na zatěžované straně.

5.5. Plán zkoušek

Tabulka 5.31: Plán zkoušení křídla, křidélka a klapky

Plán zkoušení křídla, křidélka a klapky
Zkoušky pomocí nakládacího závaží Potřebné vybavení: přípravek uchycení křídla. Postup zkoušky pomocí závaží: <ol style="list-style-type: none">1. Příprava závaží dle nakládacího plánu, vyznačení poloh zatížení.2. Naložení závaží do provozního zatížení.3. Vizuelní kontrola konstrukce, závěsů, uchycení táhla řízení (případně s odlehčením konstrukce).4. Postupné naložení závaží do početního zatížení.5. Výdrž 3 sekundy při početním zatížení.6. Postupné odlehčení, vizuelní kontrola.
1. – Zkouška křidélka Provedení zkoušky: křídlo v otočené poloze ($\alpha = 180^\circ$), křidélko v nevychýlené poloze nebo podle geometrie tak, aby bylo možné provedení zkoušky nakládacím závažím, táhlo řízení křidélka zablokované.
2. – Zkouška vyvažovací plošky křidélka Provedení zkoušky: Stejně jak u zkoušky křidélka.
3. – Zkouška vztlakové klapky Provedení zkoušky: křídlo v poloze $\alpha = 163^\circ$ (5.8), klapka v plně vysunuté poloze.

Zkoušky křídla pomocí vahadlového systému

Potřebné vybavení: přípravek uchycení křídla, kleštiny křídla, vahadlový systém, hydraulický systém, olejové čerpadlo a vybavení pro tlakovou zkoušku.

Postup zkoušky:

1. Příprava kleštín křídla, připojení vahadlového systému podle stanovených poloh působišť zatížení, příprava hydraulických strojů a měřicí techniky.
2. Zatížení křídla na provozní hodnotu, výdrž.
3. (Zkouška vysunutí klapky do maximálně vysunuté polohy, zkouška pohybu křídélka.)
4. (Tlaková zkouška nádrže – napouštění nádrže stanoveným tlakem, kontrola těsnosti, vyprázdnění.)
5. Odlehčení křídla a vizuální kontrola (trvalé deformace, jiná poškození).
6. Postupné zatížení na početní hodnotu.
7. Výdrž 3 sekundy při početním zatížení.
8. Postupné odlehčení křídla, vizuální kontrola.

4. – Zkouška křídla, případ 2 (záporný ohyb)

Provedení zkoušky: křídlo v poloze $\alpha = 172^\circ$, klapka v plně zasunuté poloze, křídélko zablokováno. Zkouška se provádí s vynecháním bodů 3 a 4 (tedy beze zkoušky ovládní mechanizace křídla a tlakové zkoušky nádrže).

5. – Zkouška křídla, případ 3 (maximální krut)

Provedení zkoušky: křídlo v poloze $\alpha = -1.75^\circ$, klapka v plně zasunuté poloze, křídélko v neutrální poloze, ovládané.

6. – Zkouška křídla, případ 1 (kladný ohyb)

Provedení zkoušky: křídlo v poloze $\alpha = 4.5^\circ$, klapka v plně zasunuté poloze, křídélko zablokováno. Zkouška se provádí s vynecháním bodů 3 až 5 (tedy zatížení rovnou na početní hodnotu).

5.5. PLÁN ZKOUŠEK

Tabulka 5.32: Plán zkoušení ocasních ploch

Plán zkoušení ocasních ploch
Zkoušky vodorovných ocasních ploch
Provedení zkoušek: VOP je instalovaná na přípravku v normální poloze, táhlo řízení VK je blokováno.
Potřebné vybavení: přípravek náhrady ocasní části trupu, nalepovací závěsy, soustava lan a kladek.
Postup zkoušky pomocí závaží:
<ol style="list-style-type: none">1. Příprava závaží dle nakládacího plánu, vyznačení poloh zatížení.2. Naložení závaží do provozního zatížení na stabilizátor.3. Naložení (resp. zavěšení) závaží do provozního zatížení na VK.4. Vizuelní kontrola konstrukce, závěsů, uchycení táhla řízení (případně s odlehčením konstrukce).5. Postupné zatížení (zároveň stabilizátor i VK) na početní hodnoty dle nakládacího plánu.6. Výdrž 3 sekundy při početním zatížení.7. Postupné odlehčení, vizuelní kontrola.
Pořadí zkušebních případů:
<ol style="list-style-type: none">1. – Zkouška vodorovných ocasních ploch, případ vyvažovacího zatížení.2. – Zkouška vodorovných ocasních ploch, případ poryvu.3. – Zkouška vodorovných ocasních ploch, případ manévru.
4. – Zkouška směrového kormidla
Provedení zkoušky: Směrové kormidlo je instalované na přípravku, táhlo řízení je blokováno.
Potřebné vybavení: přípravek uchycení SK
Postup: Dle obecného postupu pro nakládací zkoušku.

Tabulka 5.33: Plán zkoušení příďového podvozku a motorového lože

Plán zkoušení příďového podvozku a motorového lože
Provedení zkoušek: Trup letounu je uchycený pomocí kleštin centroplánu a náhrady VOP, příďový podvozek vysunutý.
Potřebné vybavení: Přípravek PP, přípravek ML, přípravek VOP, kleštiny centroplánu, soustava lan a kladek, hydraulické válce a ovládací prvky.

Zkoušky přídového podvozku

Postup zkoušky podvozku:

1. Příprava uspořádání zkoušky, příprava hydraulických strojů a měřicí techniky.
2. Zatížení svislou a následně vodorovní/boční silou na provozní hodnotu.
3. Odlehčení, vizuální kontrola.
4. Zatížení svislou a následně vodorovní/boční silou na početní hodnotu.
5. Výdrž 3 sekundy při početním zatížení.
6. Odlehčení konstrukce, vizuální kontrola.

Pořadí zkušebních případů:

1. – Přídový podvozek, případ 4
2. – Přídový podvozek, případ 3
3. – Přídový podvozek, případ 2
4. – Přídový podvozek, případ 1

Zkoušky motorového lože

Postup zkoušky ML:

1. Příprava uspořádání zkoušky, příprava hydraulických strojů a měřicí techniky.
2. (Zatížení ML dopřednou silou na provozní hodnotu.)
3. Zatížení ML svislou/boční silou na provozní hodnotu.
4. Odlehčení, vizuální kontrola.
5. (Zatížení dopřednou silou na početní hodnotu.)
6. Zatížení vodorovní/boční silou na početní hodnotu.
7. Výdrž 3 sekundy při početním zatížení.
8. Odlehčení konstrukce, vizuální kontrola.

Pořadí zkušebních případů:

5. – Motorové lože, případ 2
6. – Motorové lože, případ 1
7. – Motorové lože, případ 4
8. – Motorové lože, případ 3
- (9.) – Případy se zvýšeným součinitelem bezpečnosti

5.5. PLÁN ZKOUŠEK

Tabulka 5.34: Plán zkoušení hlavního podvozku

Plán zkoušení hlavního podvozku
<p>Provedení zkoušek: Trup letounu je uchycený pomocí kleštin centroplánu a náhrady VOP, hlavní podvozek vysunutý.</p> <p>Potřebné vybavení: Přípravek HP, přípravek VOP, kleštiny centroplánu, soustava lan a kladek, hydraulické válce a ovládací prvky.</p> <p>Postup zkoušky HP je shodný se zkouškou PP.</p> <p>Pořadí zkušebních případů:</p> <ol style="list-style-type: none">1. – Hlavní podvozek, případ 72. – Hlavní podvozek, případ 83. – Hlavní podvozek, případ 94. – Hlavní podvozek, případ 65. – Hlavní podvozek, případ 5(6.) – Případy se zvýšeným součinitelem bezpečnosti

6. Konstrukce přípravků

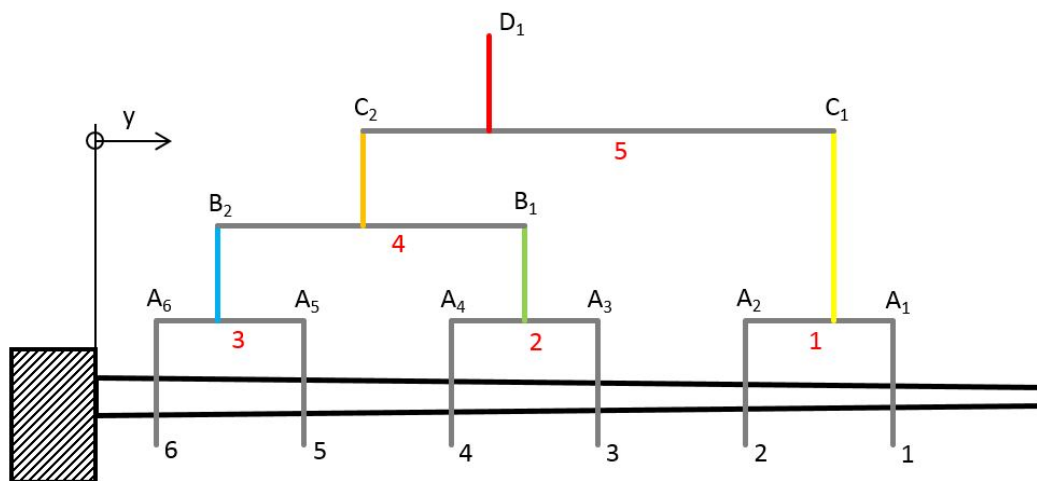
6.1. Vahadlový systém

V této sekci bude proveden geometrický a pevnostní návrh vahadlového systému. V tabulce níže jsou vypsány polohy kleštín křídla od kořenu a maximální hodnoty zatížení (poměr mezi jednotlivými silami je pro všechny případy zatížení stejný).

Tabulka 6.1: Vstupní hodnoty pro návrh vahadlového systému

Číslo řezu	6	5	4	3	2	1
Poloha [mm]	220	760	1300	1840	2380	2920
Zatížení [N]	4201	2953	3241	3241	1969	3001

Na obrázku 6.1 je schematické zobrazení vahadlového systému.

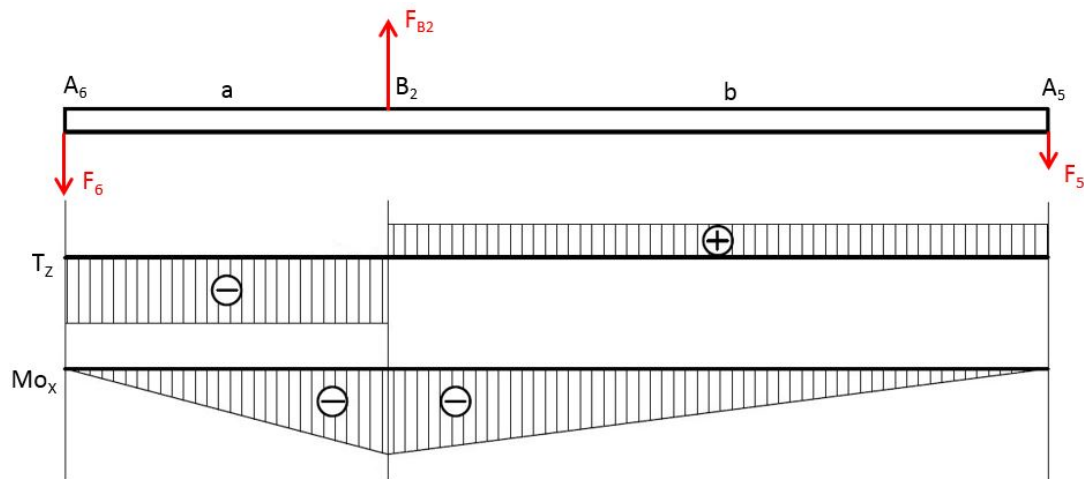


Obrázek 6.1: Schéma vahadlového systému.

Výpočet jednoho článku

Výpočet všech vahadel je analogický, zde bude stručně uveden výpočet článku číslo 3. Základní výpočtový model je uveden na obrázku 6.2 (bez uvažování vlastních hmotností). V místě A_5 působí síla F_5 , podobně F_6 a F_{B_2} . Označíme vzdálenost $A_6B_2 = a$, $B_2A_5 = b$.

6.1. VAHADLOVÝ SYSTÉM



Obrázek 6.2: Výpočtový model vahadla.

Celková síla: $F_{B2} = F_5 + F_6 = 2953 + 4201 = 7154$ [N].

Rožteč: $A_5A_6 = a + b = y(A_5) - y(A_6) = 760 - 220 = 540$ [mm].

Pro výpočet ramen a i b se použije rovnice momentové rovnováhy například v bodě A_6 :

$$\begin{aligned} F_{B2} \cdot a &= F_5 \cdot (a + b), \\ a &= F_5 \cdot (a + b) / F_{B2} = 2953 \cdot 540 / 7154 = 223 \text{ [mm]}, \\ b &= 540 - 223 = 317 \text{ [mm]}. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Souřadnice celkové síly: $y(F_{B2}) = y(F_6) + a = 220 + 223 = 443$ [mm].

Maximální ohybový moment: $M_{Ox,max} = F_6 \cdot a = 4201 \cdot 0.223 = 936.4$ [Nm].

Výsledná geometrie

V tabulce 6.3 jsou shrnuté výsledné hodnoty pro vahadla 1 až 5 bez uvážení vlastních hmot a vyvážení.

Tabulka 6.2: Geometrické parametry a zatížení vahadlového systému

Číslo vahadla		1	2	3	4	5
Teoretická délka	[mm]	540	540	540	1127	1727
Min. délka profilu	[mm]	560	560	560	1150	1750
Rameno ke kořenu	[mm]	326	270	223	536	461
Rameno ke konci	[mm]	214	270	317	591	1266
Celková síla	[N]	4970	6482	7154	13636	18606
Maximální moment	[Nm]	642	875	936	3833	6292

Konstrukční návrh

Pro konstrukci vahadla jsou běžně používány dva ocelové U profily, které jsou připojeny k sobě symetricky vůči ose zatížení. Spojení vahadel mezi sebou je provedeno pomocí ocelových pasů, které jsou přišroubované mezi profily. Takovéto uspořádání umožňuje

volné otáčení táhel, tedy přizpůsobení geometrii k deformaci křídla během zkoušky. Navíc, osa zatížení leží v těsné blízkosti neutrální roviny U profilů.

Polotovar je tedy válcovaný za tepla U profi (DIN 1026-1), materiál je nelegovaná konstrukční ocel S235JR (1.0038) dle EN 10025-2 [4]. Mez kluzu oceli je $Re = 235$ MPa, mez pevnosti Rm se pohybuje v rozmezí 360 až 510 MPa.

Potřebný průřez profilu se určí pomocí vztahu:

$$\sigma_o = \frac{M_{o_{max}}}{W_o} \leq \sigma_{o,dov}, \quad (6.2)$$

kde σ_o je maximální napětí v ohybu, W_o je kvadratický moment průřezu. Za dovolené napětí považujeme mez kluzu, tedy

$$\sigma_{o,dov} \doteq Re = 235 \text{ MPa}. \quad (6.3)$$

Nosník potom zvolíme na základě minimálního potřebného kvadratického momentu v ohybu:

$$2 \cdot W_{o_{profil}} > W_{o_{min}} \cdot k_e = \frac{M_{o_{max}}}{Re} \cdot k_e, \quad (6.4)$$

kde $k_e \doteq 2$ je návrhová bezpečnost vůči mezi kluzu. U vahadel číslo 1, 2 a 3 (první vrstva) předpokládáme použití stejných profilů. V následující tabulce můžeme vidět kroky výpočtu a návrhu profilů pro tři vrstvy vahadel.

Tabulka 6.3: Geometrické parametry a zatížení vahadlového systému

Číslo vahadla		(1, 2, 3)	(4)	(5)
Celková síla F	[N]	7154	13636	18606
Maximální moment $M_{o_{max}}$	[Nm]	936	3833	6292
Min. kv. moment $W_{o_{min}}$	[mm ³]	3900	15970	26217
Volba W_o profilu $2W_{o_{profil}}$	[mm ³]	14100	53000	82400
Označení profilu		U40	U80	U100
Délková hmotnost	[kg/m]	4.87	8.64	10.6
Hmotnost vahadla	[kg]	2.73	9.94	18.56
Tíha vahadla	[N]	27	98	182
Tíha vahadla vč. spodních F_{hm}	[N]	27	152	361
Poměr $(F + F_{hm})/F$		1.004	1.01	1.02

Je tedy vidět, že samotná hmotnost vahadla představuje v nejhorším případě pouze 2 % od maximálního zatížení během zkoušky. Nicméně, tato hodnota vyplývá pouze z vlastních hmotností profilů, tedy nezahrnuje hmotnosti spojovacích pásů a vyvažovací hmoty.

Pro zahrnutí všech účinků přídavných a vlastních hmot vahadlového systému je zaveden zvyšující součinitel $f_{hm} = 1.2$ pro maximální napětí vahadla od ohybu. Je tedy bezpečný předpoklad, že maximální napětí s uvažováním hmot nepřesáhne 120 % napětí od zkušebního zatížení. Výsledná kontrola pevnosti vahadel se provede následovně.

$$\sigma_{o,hm} = \sigma_o \cdot f_{hm},$$

$$k_e = \frac{Re}{\sigma_{o,hm}} = \frac{Re}{\sigma_o \cdot f_{hm}} = \frac{Re \cdot 2W_{o_{profil}}}{M_{o_{max}} \cdot f_{hm}}, \quad (6.5)$$

6.2. PŘÍPRAVEK MOTOROVÉHO LOŽE

kde $\sigma_{o,hm}$ je zvýšené napětí, k_e je bezpečnost vůči mezi kluzu.

$$\begin{aligned}k_{e,123} &= (235 \cdot 14100)/(936000 \cdot 1.2) = 2.95, \\k_{e,4} &= (235 \cdot 53000)/(3833000 \cdot 1.2) = 2.71, \\k_{e,5} &= (235 \cdot 82400)/(6292000 \cdot 1.2) = 2.56.\end{aligned}\tag{6.6}$$

Polotovarem pro spojovací pasy je plochá ocelová tyč válcovaná za tepla, EN 10058 [4]. Volba velikosti tyče se provádí na základě průřezové plochy a napětí v tahu. Kritickými místy jsou otvory a šroubová spojení s vahadly. Předběžně jsou navrženy následující polotovary (ověření bezpečnosti pro kritická místa nebylo provedeno).

1. Kleštiny – první vrstva: tyč 40x4 mm

$$k_e = \frac{Re \cdot A}{F_{max}} = \frac{235 \cdot (40 \cdot 3)}{4201} = 6.71$$

2. První – druhá vrstva: tyč 50x4 mm

$$k_e = \frac{235 \cdot (50 \cdot 4)}{7154} = 6.57$$

3. Druhá – třetí vrstva: tyč 60x6 mm

$$k_e = \frac{235 \cdot (60 \cdot 6)}{13636} = 6.20$$

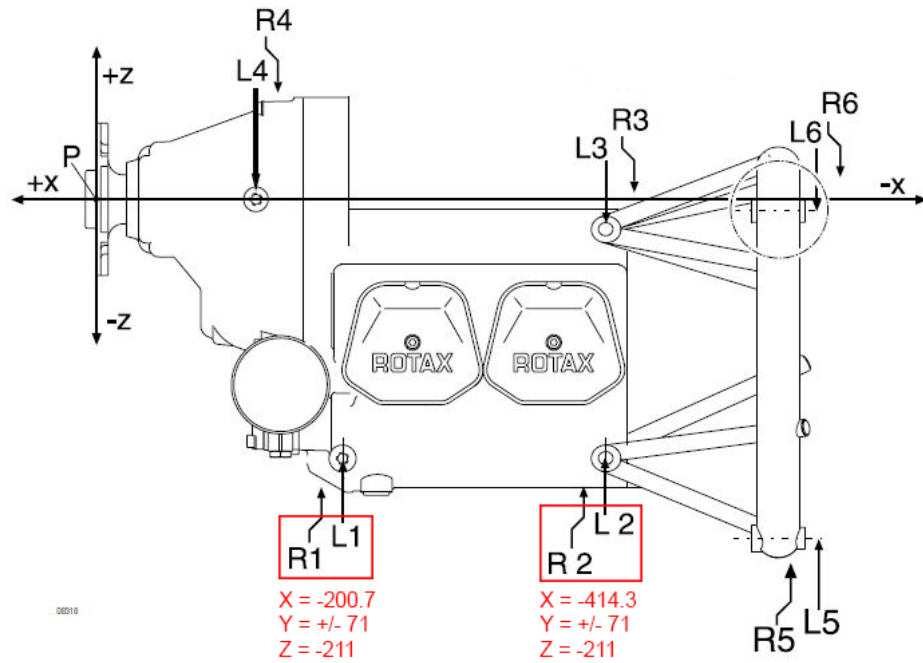
4. Třetí vrstva – hydraulický válec: tyč 60x8 mm

$$k_e = \frac{235 \cdot (60 \cdot 8)}{18606} = 6.06$$

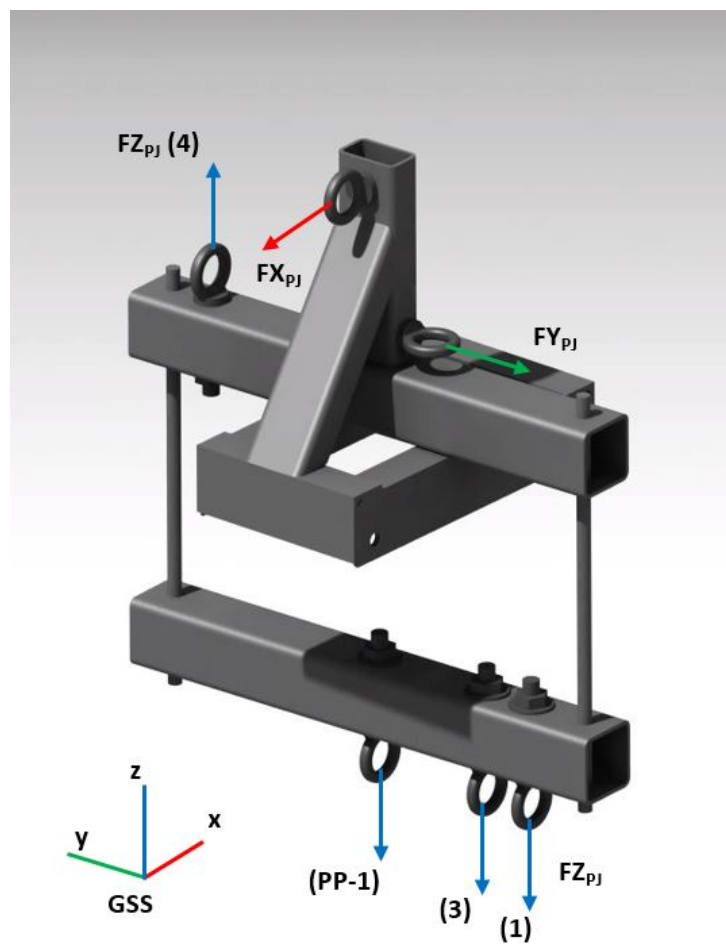
6.2. Přípravek motorového lože

Do daného letounu jsou instalovány různé modifikace motoru Rotax 912, které mají stejné uchycovací body. Na obrázku 6.3 je výstřížek z technické dokumentace Rotax [9], pro uchycení k motorovému loži jsou použité 4 body: L1, R1, L2 a R2. Přesná poloha motoru v globálním souřadnicovém systému pak byla určena pomocí poskytnuté výkresové dokumentace letounu.

Na obrázcích 6.4 a 6.5 je vizualizace a náčrt s vyznačením dílců výsledného návrhu přípravku. Použité polotovary jsou shrnuty v tabulce 6.4, všechny použité profily jsou v katalogu Ferona, materiálem je již zmiňovaná ocel S235JR. Vzhledem k tomu, že přípravek může podlehnout dalším úpravám, výrobní výkresová dokumentace nebyla zpracována.

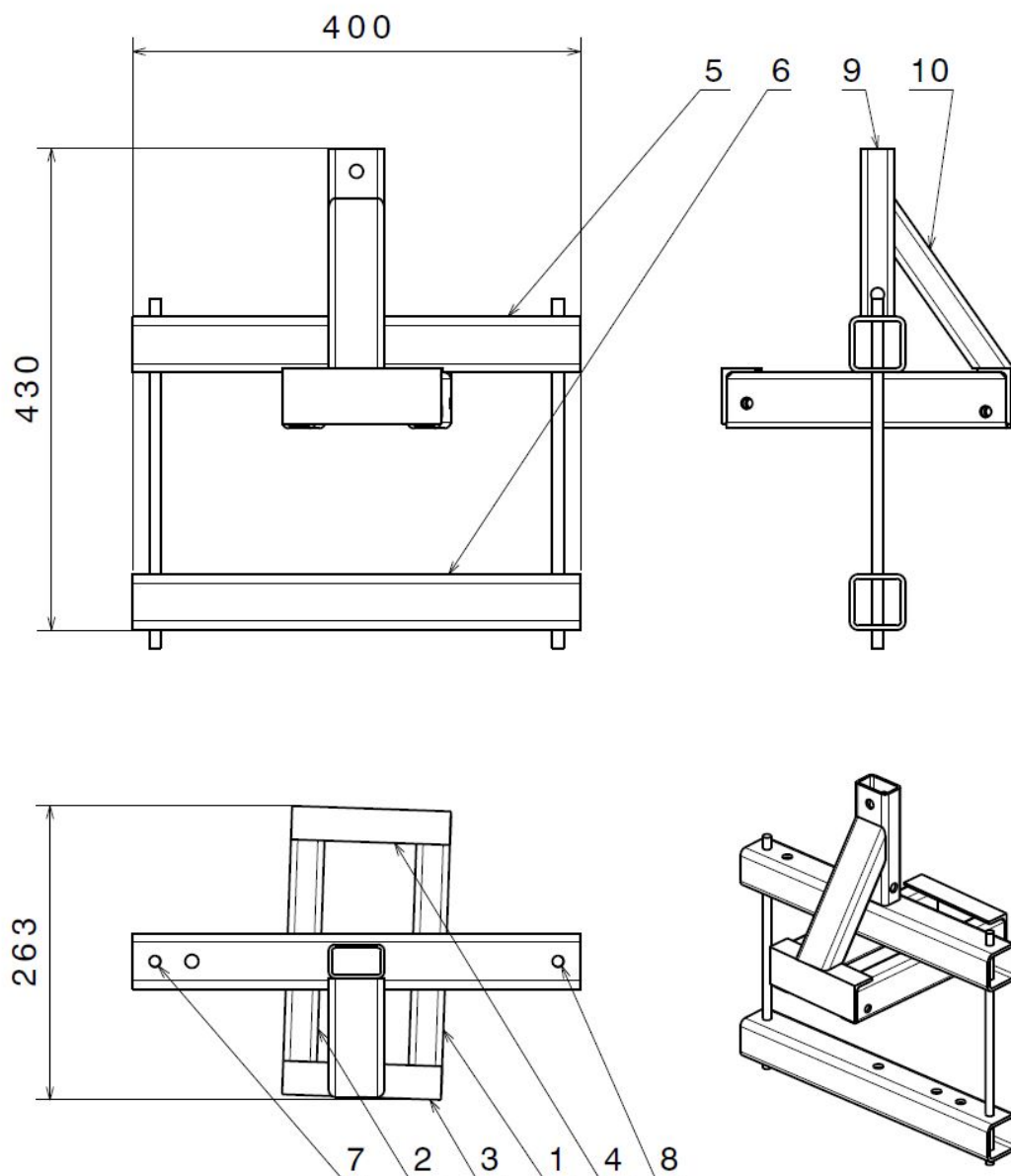


Obrázek 6.3: Body uchycení motoru k loži [9].



Obrázek 6.4: Vizualizace přípravku ML.

6.2. PŘÍPRAVEK MOTOROVÉHO LOŽE



Obrázek 6.5: Náčrt přípravku ML.

Tabulka 6.4: Polotovary přípravku ML

Dílec	Polotovar [4]
1, 2	Obdélníkový uzavřený profil 50x30x3, délka 250
3, 4	L profil 50x30x4, délka 142
5, 6	Čtvercový uzavřený profil 50x4, délka 400
7, 8	Závitová tyč M12x200 (matice nejsou zobrazeny)
9	Obdélníkový uzavřený profil 50x30x3, délka 150
10	Obdélníkový uzavřený profil 50x30x3, délka 185

Pro zavěšení mohou být použité například šrouby s okem – v modelu jsou znázorněny pevnostní oka se závitom M12 s nosností 900 kg (8830 N) [11].

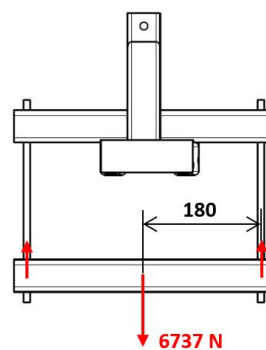
Následuje pevnostní kontrola kritických míst.

Dílec č. 6, případ PP-1Jekl 50x4, $Re = 235 \text{ MPa}$, $W_o = 9490 \text{ mm}^3$

$$M_o = 180 \cdot 6737/2 = 606330 \text{ Nmm},$$

$$k_e = \frac{Re}{\sigma_o} = \frac{Re}{M_o/W_o} \quad (6.7)$$

$$k_e = \frac{235 \cdot 9490}{606330} = 3.68$$



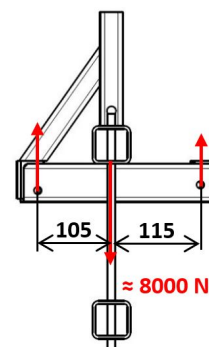
Obrázek 6.6: Zatížení dílce.

Dílec č. 1, případ ML-3Jekl 50x30x3, $Re = 235 \text{ MPa}$, $W_o = 5130 \text{ mm}^3$

$$M_o < 115 \cdot 8000/2 = 460000 \text{ Nmm},$$

$$k_e = \frac{Re}{M_o/W_o} = \frac{Re}{M_o/W_o} \quad (6.8)$$

$$k_e = \frac{235 \cdot 5130}{460000} = 2.62$$



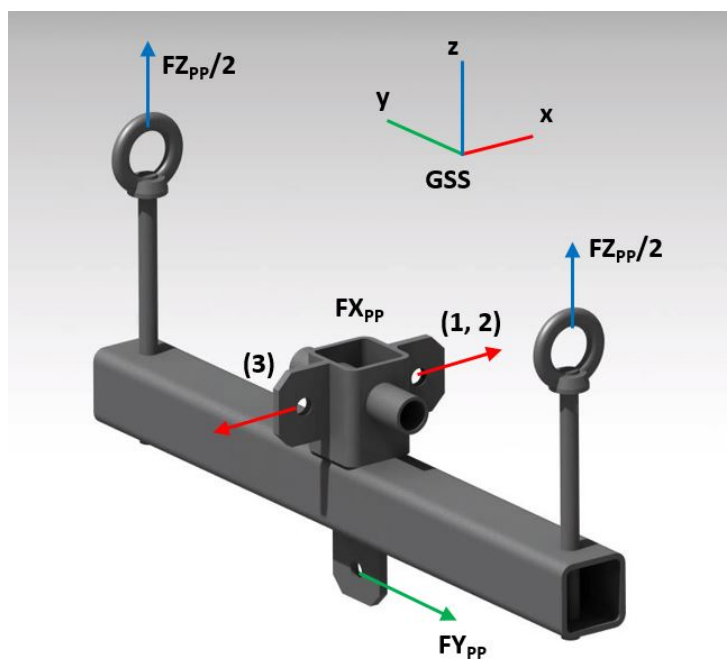
Obrázek 6.7: Zatížení dílce.

6.3. Přípravky podvozku

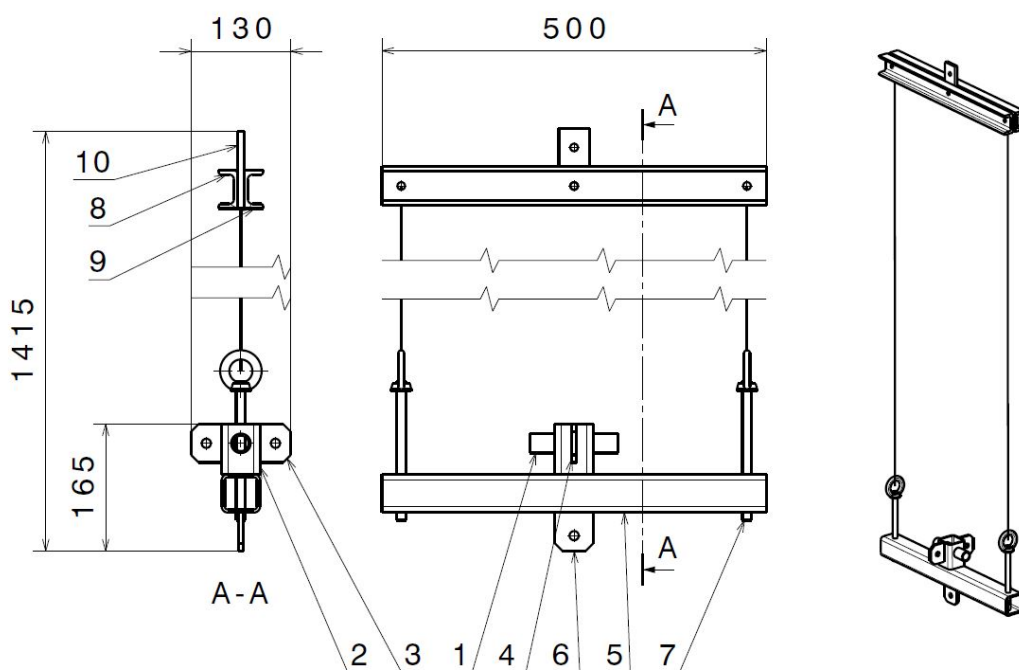
Přípravky pro zkoušky přídového a hlavního podvozku se skládají ze dvou částí: svařenec pro upevnění do vidlice podvozkové nohy a vahadlo pro zavedení svislé síly obchvatem. Kola podvozku jsou držena pomocí hřídelí o průměru 20 mm, vnitřní šířka (rozteč) všech vidlic je při tom 115 mm.

6.3. PŘÍPRAVKY PODVOZKU

6.3.1. Příďový podvozek



Obrázek 6.8: Vizualizace přípravku PP.



Obrázek 6.9: Náčrt přípravku PP.

Tabulka 6.5: Polotovary přípravku PP

Dílec	Polotovary [4]
1	Trubka přesná kruhová 25x2.5, délka 115
2	Čtvercový uzavřený profil 50x4, délka 65
3, 4	Tyč plochá 50x6, délka 40
5	Čtvercový uzavřený profil 50x4, délka 500
6	Tyč plochá 50x6, délka 50
7	2× Závítová tyč M12x150, pevnostní šroubovací oko M12.
8, 9	U profil 50x25, délka 500
10	Plochá tyč 50x6, délka 100

Pro spojení svařence s vahadlem se předpokládá použití 6 až 8 mm nerezového lana, například [6]. Pro spodní nosník a vahadlo je spočtená bezpečnost pro případ ohybu.

Dílec č. 8,9, případ PP-1

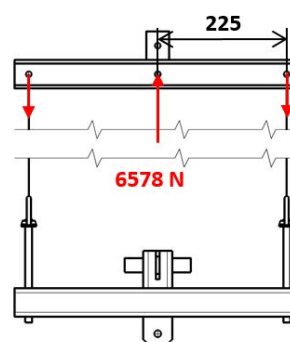
U profil 50x25, $Re = 235 \text{ MPa}$, $W_o = 6730 \text{ mm}^3$

$$M_o = 225 \cdot 6578/2 = 740025 \text{ Nmm},$$

$$k_e = \frac{Re}{\sigma_o} = \frac{Re}{M_o/W_o}$$

$$k_e = \frac{235 \cdot (2 \cdot 6730)}{740025} = 4.27$$

(6.9)



Obrázek 6.10: Zatížení dílce.

Dílec č. 5, případ PP-1

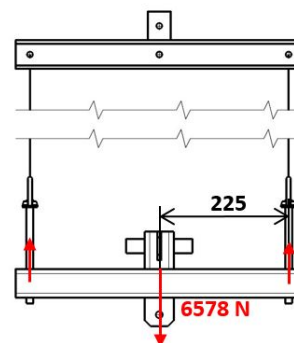
Jekl 50x4, $Re = 235 \text{ MPa}$, $W_o = 9490 \text{ mm}^3$

$$M_o = 225 \cdot 6578/2 = 740025 \text{ Nmm},$$

$$k_e = \frac{Re}{\sigma_o} = \frac{Re}{M_o/W_o}$$

$$k_e = \frac{235 \cdot 9490}{740025} = 3.01$$

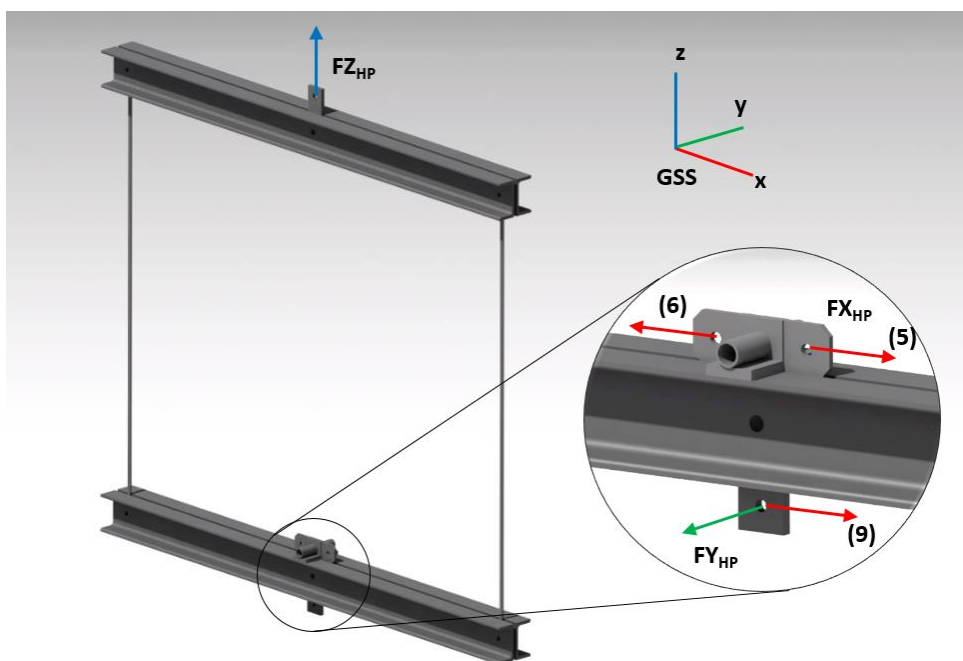
(6.10)



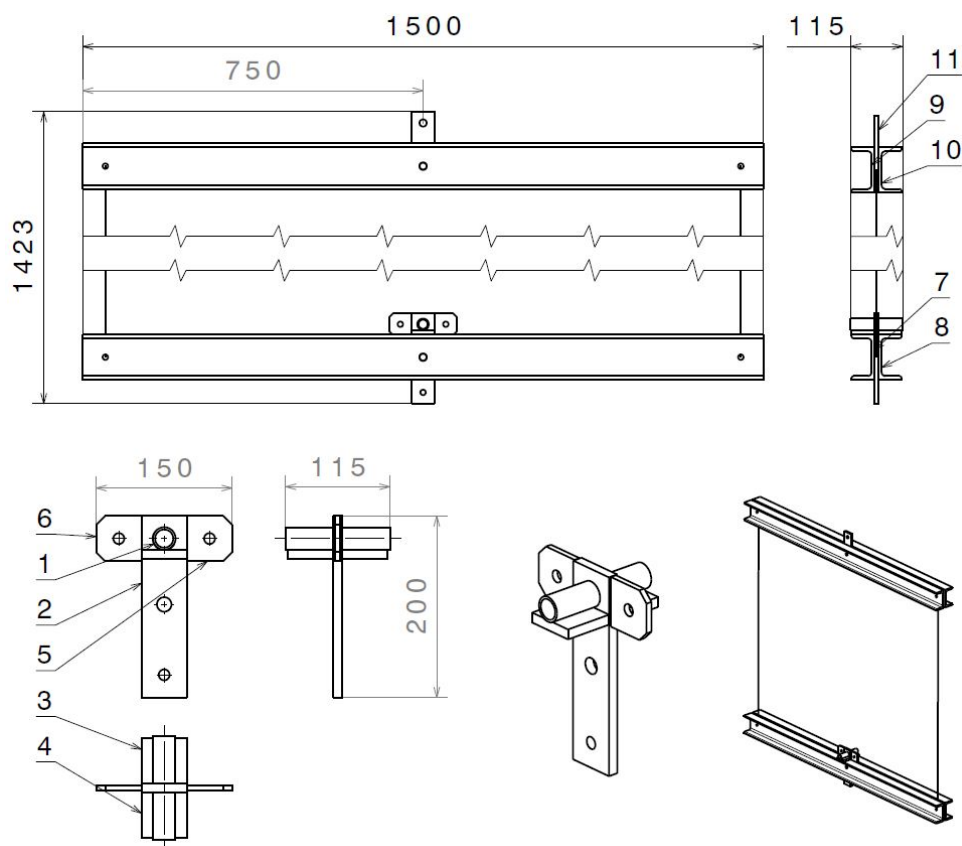
Obrázek 6.11: Zatížení dílce.

6.3. PŘÍPRAVKY PODVOZKU

6.3.2. Hlavní podvozek



Obrázek 6.12: Vizualizace přípravku HP.



Obrázek 6.13: Náčrt přípravku HP.

Tabulka 6.6: Polotovary přípravku HP

Dílec	Polotovar [4]
1	Trubka přesná kruhová 25x2.5, délka 115
2	Tyč plochá 50x10, délka 200
3, 4	Tyč plochá 50x10, délka 50
5, 6	Tyč plochá 50x6, délka 50
6	Tyč plochá 50x6, délka 50
7 – 10	4× profil U100, délka 1500
11	Tyč plochá 50x10, délka 170

Poznámka. Pro správné provedení případu 9 (brzdění) je potřeba omezit volné otačení přípravku kolem osy kola. Toto je možné udělat pomocí náhrady brzdového systému pevným spojením přípravku s vidlicí podvozku, avšak kvůli nedostatečně detailní výkresové dokumentace podvozku nebyl tento problém vyřešen.

Spojení svařence s vahadlem je pomocí 10 až 12 mm nerezového lana. Níže jsou kontroly bezpečnosti pro U profily a pro část ploché tyče vystavenou ohybu boční silou.

Dílec č. 7 až 10, případ HP-5

Profil U100, $Re = 235$ MPa,

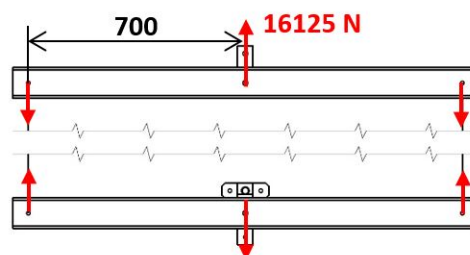
$W_o = 41200$ mm³

$$M_o = 700 \cdot 16125/2 = 5643750 \text{ Nmm},$$

$$k_e = \frac{Re}{\sigma_o} = \frac{Re}{M_o/W_o}$$

$$k_e = \frac{235 \cdot (2 \cdot 41200)}{5643750} = 3.43$$

(6.11)



Obrázek 6.14: Zatížení dílce.

Dílec č. 2, případ HP-7

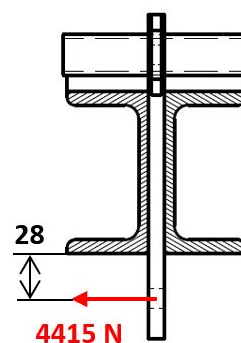
Tyč 50x10, $Re = 235$ MPa, $W_o = wt^2/6$

$$M_o = 28 \cdot 4415 = 123620 \text{ Nmm},$$

$$k_e = \frac{Re}{\sigma_o} = \frac{Re}{M_o/W_o}$$

$$k_e = \frac{235 \cdot (50 \cdot 10^2)/6}{123620} = 1.58$$

(6.12)



Obrázek 6.15: Zatížení dílce.

3D modely přípravků lze najít v elektronické příloze k práci .

7. Závěr

V rámci diplomové práce byly navrhovány certifikační zkoušky pro letoun v kategorii UL. Po stručném úvodu, popisu zkoušeného letounu a metodik pevnostních zkoušek byl proveden rozbor požadavků dvou podobných předpisů (českého UL 2 a německého LTF-UL), které se týkají pevnosti jednotlivých částí konstrukce letounu. Rozbor byl rozdělen do čtyř skupin: křídlo, trup a ocasní plochy, podvozek, soustava řízení.

Ve výpočtové části práce byly připraveny zkušební případy pro křídlo, křídélko, vyvažovací plošku a vztlakovou klapku. Byly stanoveny parametry zkoušek a připraveny nakládací plány pro zkoušky závažím. Podobným způsobem byly připraveny případy vodorovných ocasních ploch a zatížení směrového kormidla. Dalším krokem byl návrh případů zatížení, stanovení sil a reakcí pro zkoušení motorového lože a podvozku letounu. V této části bylo rovněž popsáno provedení zkoušky, způsob uchycení trupu a zavádění sil do konstrukce letounu. Pro vypočtené případy byly vytvořeny plány provedení zkoušek, pořadí a postup zatěžování.

Závěrečná část práce je věnovaná základnímu návrhu zkušebních přípravků. Konkrétně se jedná o geometrický a pevnostní výpočet vahadlového systému pro zkoušku křídla, návrh náhrady pohonné jednotky a přípravků podvozku. V konstrukci přípravků byly použity běžné a dostupné polotovary, jako jsou ocelové profily a tyče ke svařování. Pro nosné prvky přípravků, v nichž se vyvozuje významný ohybový moment během zkoušky bylo provedeno ověření bezpečnosti vůči mezi kluzu – skoro všechny elementy mají bezpečnost na úrovni 2 a více.

Výsledky diplomové práce slouží jako podklad k provedení pevnostních zkoušek na Leveckém ústavu VUT v Brně, práce rovněž může být použitelná pro další studenty LÚ z hlediska analýzy leteckých předpisů, seznámení se s problematikou a návrhem pevnostních zkoušek.

Literatura

- [1] Bartoněk, J.: Zatížení křídélka letounu TL-5000, zpráva LU42-2019-OST.L, 20. 11. 2019
- [2] BOGGS, Bernard C. *The History of static test and Air Force structures testing*. Whight-Patterson Air Force base, Ohio, 1979. AFFDL-TR-79-3071. Dostupné také z: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a077029.pdf>
- [3] DREXLER, Jan. *Pevnost a zkoušky leteckých konstrukcí: zkoušení leteckých konstrukcí*. Brno: Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1965.
- [4] Hutní materiály Feroná. *Feroná* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>
- [5] *Interesting wing load test*. Letecký Ústav VUT v Brně [online]. Brno [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://lu.fme.vutbr.cz/en/interesting-wing-load-test/>
- [6] Nerezová lana 7X19DR, DIN 3060. *Obchodprodilnu* [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://www.obchodprodilnu.cz/lanko-nerezove-din-3060-a4-konstrukce-7x19dr-8534.html>
- [7] PLAČEK, J., *Návrh jednomístného ultralehkého letounu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Mališ.
- [8] Předpis LTF-UL, LuftTüchtigkeitsForderungen für aerodynamisch gesteuerte Ultra-Leichtflugzeuge. Německo. 2019.
- [9] Rotax engines technical documentation. *ROTAX* [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.flyrotax.com/services/technical-documentation.html>
- [10] RYDLO, T. *Druhy a metody zkoušení letadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.
- [11] Šroub s okem k zavěšení M12. *Kahsa* [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.kahsa.cz/sroub-s-okem-k-zaveseni-matka-m12-pevnostni-zn-nosnost-900kg/>
- [12] UL 2 – Část I. Požadavky letové způsobilosti SLZ. Ultralehké letouny řízené aerodynamicky. 1. Praha: Letecká amatérská asociace ČR, 2019.
- [13] Vaněk, F.: Zatížení křídla letounu TL-5000, zpráva LU40-2019-OST.L, revize 1, 18. 11. 2020
- [14] Vaněk, F.: Zatížení motorového lože letounu TL-5000, zpráva LU13-2019-OST.L, 22. 4. 2020
- [15] Vaněk, F.: Zatížení ocasních ploch letounu TL-5000, zpráva LU29-2019-OST.L, 24. 10. 2019

LITERATURA

- [16] Vaněk, F.: Zatížení podvozku letounu TL-5000, zpráva LU11-2019-OST.L, 19. 4. 2020
- [17] Vaněk, F.: Zatížení vztlakové klapky letounu TL-5000, zpráva LU14-2019-OST.L, 23. 4. 2020
- [18] Zahálka, M.: Typový návrh TL-5000, zpráva TURBO-02-00-00-AS-R01, 25. 9. 2019

8. Seznam použitých zkratek a symbolů

Symboly:

A, B, C, D	Obecný bod – označení poloh vahadlového systému
f_U	Součinitel bezpečnosti pro početní zatížení
f_d	Doplňkový (zvyšující) součinitel bezpečnosti
f_{hm}	Zvyšující součinitel pro účinky hmot vahadel a vyvažení
F	Obecná zatěžující síla
$F^{100\%}$	Zatěžující síla pro provozní zatížení křídla
$F^{225\%}$	Zatěžující síla pro početní zatížení křídla
F_X, F_Y, F_Z	Zatěžující síla ve směru osy x, y, z v určitém SS.
G	Tíhová síla
g	Zrychlení volného pádu
i, j	Obecné indexy
k_e	Bezpečnost vůči mezi kluzu
L	Celkový vztlak
M	Obecný moment
M_k	Krouticí (resp. závěsový) moment
M_o	Celkový ohybový moment
M_{on}	Normální ohybový moment
M_{ot}	Tečný ohybový moment
m	Hmotnost
n	Násobek zatížení
R	Obecná reakční síla
R_e	Mez kluzu
R_m	Mez pevnosti
T	Celková posouvající síla
T_n	Normální posouvající síla

Tt	Tečná posouvající síla
V_A	Návrhová manévrovací rychlost
V_B	Návrhová rychlost pro maximální velikost poryvu
V_D	Návrhová maximální rychlost letu
V_F	Návrhová rychlost letu s vysunutými klapkami
V_G	Návrhová manévrovací rychlost při letu se záporným násobkem
V_H	Návrhová maximální rychlost horizontálního letu
V_{NE}	Návrhová maximální nepřekročitelná rychlost
V_{S0}	Návrhová pádová rychlost v přistávací konfiguraci
V_{S1}	Vypočtená pádová rychlost při zasunutých vztlakových klapkách při maximální vzletové hmotnosti
V_{SF}	Výpočtová pádová rychlost s plně vysunutými vztlakovými klapkami při maximální vzletové hmotnosti
w	Šířka závaží, resp. šířka konstrukčního dílce
W_o	Průřezový modul v ohybu
x, y, z	Obecné souřadnice, resp. vzdalenosti
α	Úhel naklopení křídla
σ_o	Maximální napětí od ohybu
$\sigma_{o,dov}$	Dovolené maximální napětí od ohybu
φ_F	Úhel mezi celkovou a normální posouvající silou
φ_{kl}	Úhel mezi celkovou posouvající silou (klapky) a rovinou křídla
χ_{oo}	Úhel šípů pro osu otáčení kormidla

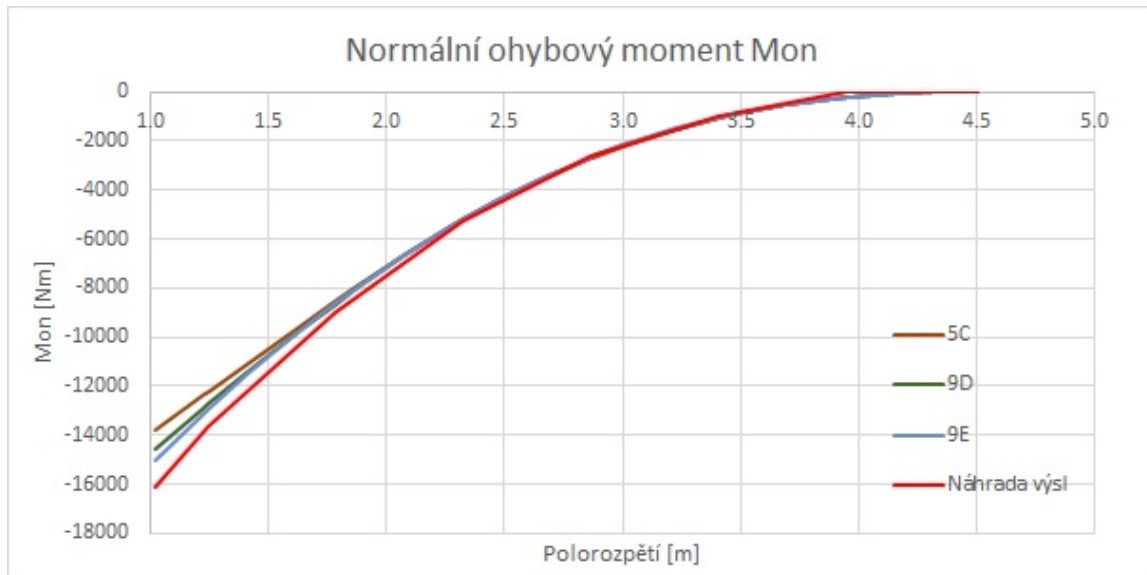
8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky, indexová označení:

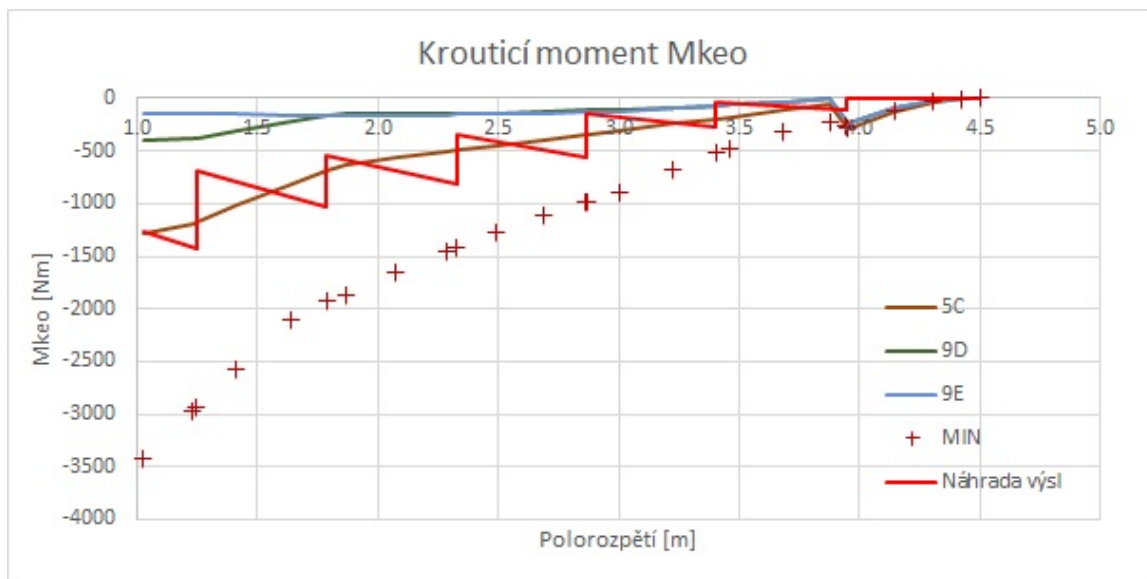
EO	Elastická osa
GSS	Globální SS (použitý v CAD modelu letounu)
HP	Hlavní podvozek
LAA	Letecká amatérská asociace ČR
ML	Motorové lože
NH	Náběžná hrana
OH	Odtoková hrana
OO	Osa otáčení kormidla
OP	Ocasní plochy
PJ	Pohonná jednotka
PP	Příďový podvozek
SK	Směrové kormidlo
SOP	Svislé ocasní plochy
SS	Souřadnicový systém
UL	Ultralehký letoun
VK	Výškové kormidlo
VOP	Vodorovné ocasní plochy
ZN	Zadní nosník

9. Přílohy

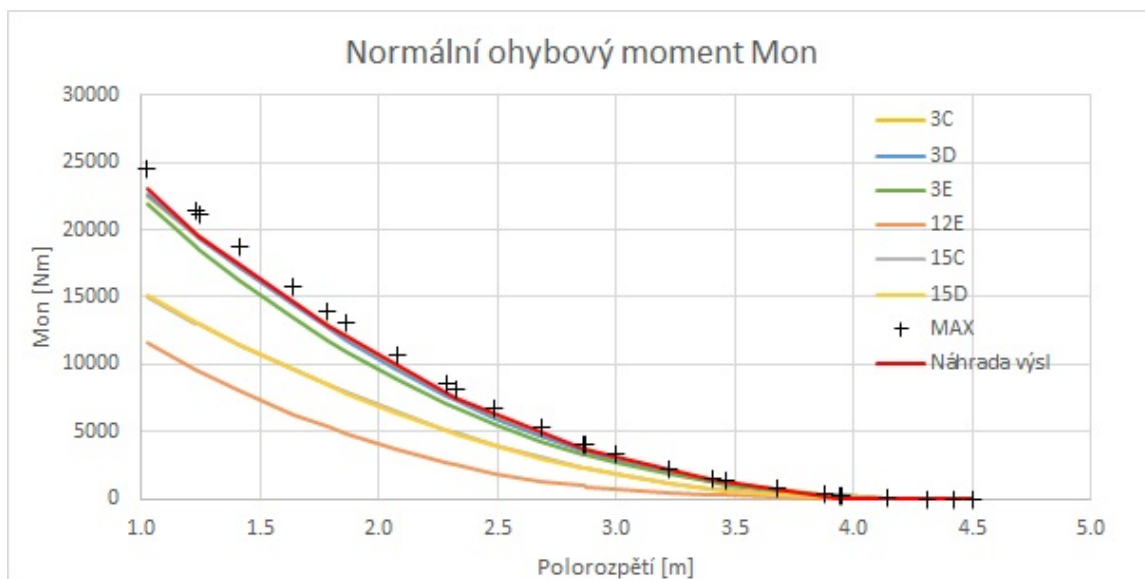
9.1. Příloha A – průběhy zatížení



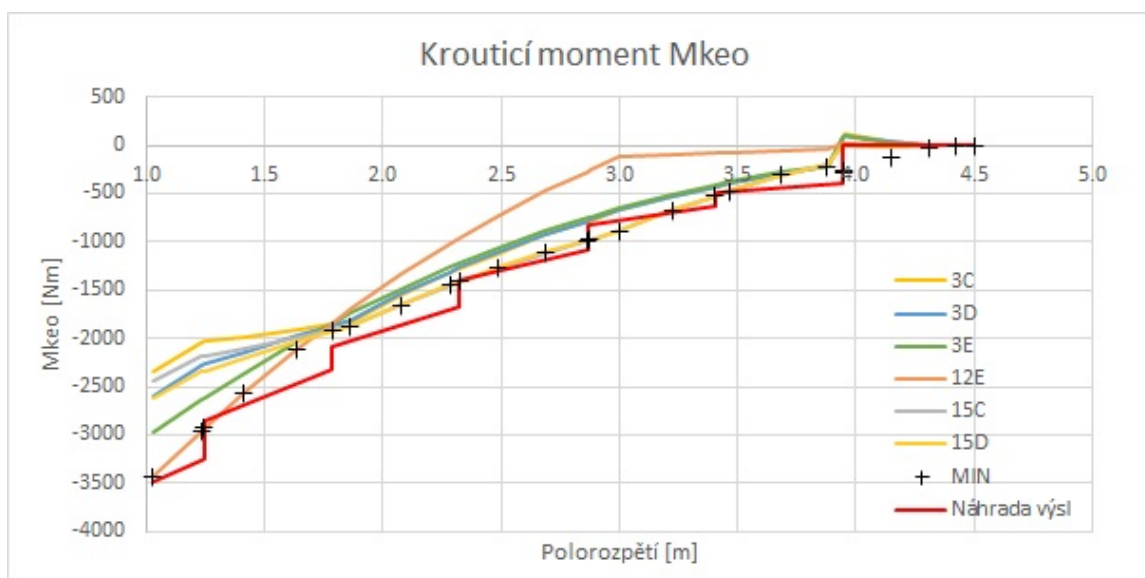
Obrázek 9.1: Zkouška křídla, případ 2 – normální ohybový moment (početní).



Obrázek 9.2: Zkouška křídla, případ 2 – kroticí moment k elastické ose (početní).

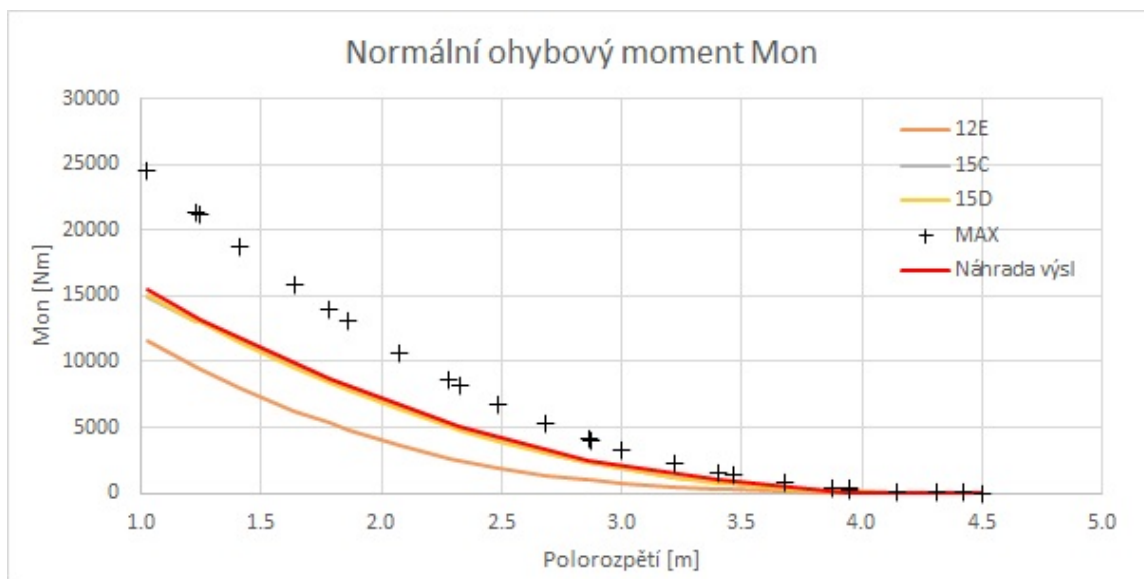


Obrázek 9.3: Zkouška křídla, případ 3 – normální ohybový moment (početní).

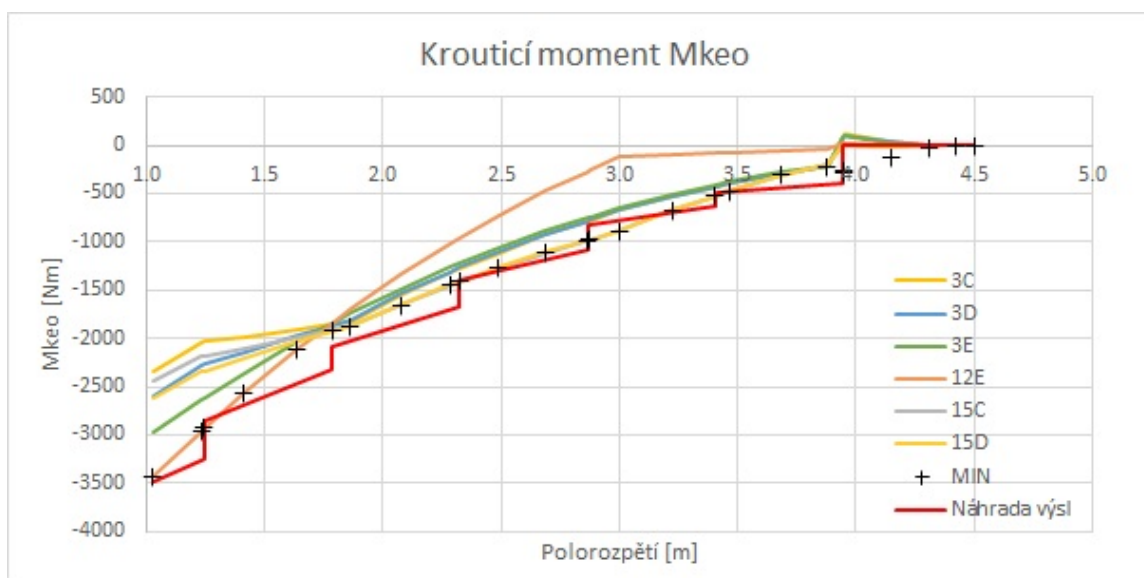


Obrázek 9.4: Zkouška křídla, případ 3 – krouticí moment k elastické ose (početní).

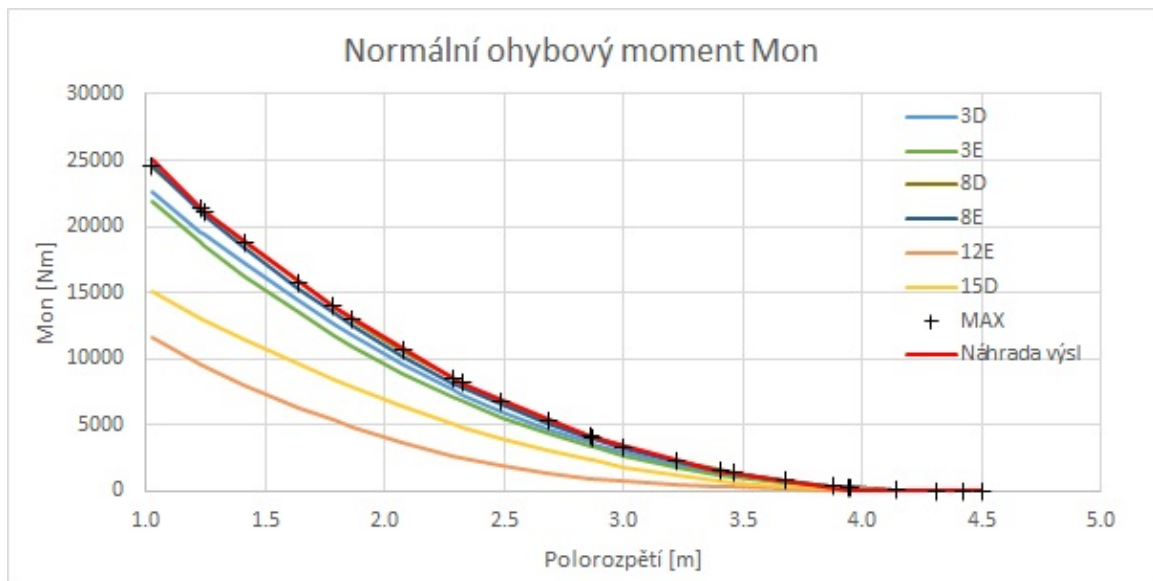
9.1. PŘÍLOHA A – PRŮBĚHY ZATÍŽENÍ



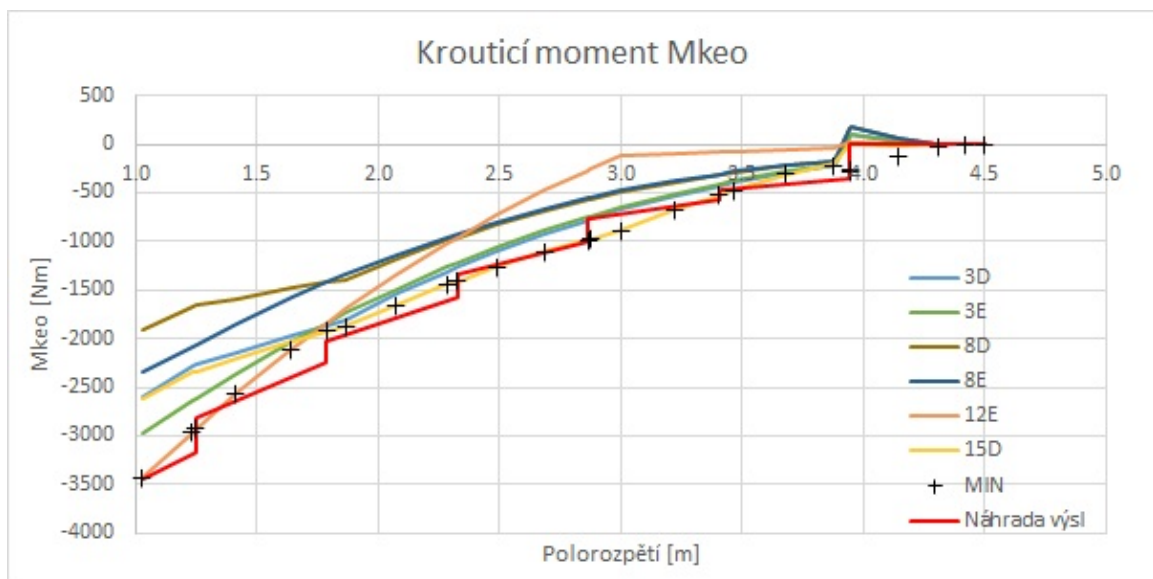
Obrázek 9.5: Zkouška křídla, případ 4 – normální ohybový moment (početní).



Obrázek 9.6: Zkouška křídla, případ 4 – krouticí moment k elastické ose (početní).



Obrázek 9.7: Zkouška křídla, případ 5 – normální ohybový moment (početní).



Obrázek 9.8: Zkouška křídla, případ 5 – kroučící moment k elastické ose (početní).

9.2. Příloha B – nakládací plány

Tabulka 9.1: Nakládací plán – zkouška křídélka

Zkouška křídélka					
Číslo řezu	3	2	1	Kontrola	
Poloha řezu [mm]	150	469	787	[N]	[1]
Vzdál. od OH	167	157	146		
Zatížení [N]					
100%	90	90	80	260	1.03
150%	140	130	120	390	1.54
190%	170	165	150	485	1.91
225%	200	195	175	570	2.25
Nakládací plán				Součet	
100%	50N + 20N + 20N	50N + 20N + 20N	50N + 20N + 10N	3x 50N, 5x 20N 1x 10N, 0x 5N	
150%	50N	20N + 20N	20N + 20N	1x 50N, 4x 20N 0x 10N, 0x 5N	
190%	20N + 10N	20N + 10N + 5N	20N + 10N	0x 50N, 3x 20N 3x 10N, 1x 5N	
225%	20N + 10N	20N + 10N	20N + 5N	0x 50N, 3x 20N 2x 10N, 1x 5N	
Součet	2x 50N 4x 20N 2x 10N 1x 5N	1x 50N 6x 20N 2x 10N 1x 5N	1x 50N 5x 20N 2x 10N 1x 5N	4x 50N 15x 20N 6x 10N 2x 5N	

Tabulka 9.2: Nakládací plán – zkouška vyvažovací plošky křídélka

Zkouška vyvažovací plošky křídélka					
Číslo řezu	3	2	1	Kontrola	
Poloha řezu [mm]	46	138	229	[N]	[1]
Vzdál. od OH	50	47	44		
Zatížení [N]					
100%	20	20	20	60	1.13
170%	30	30	30	90	1.69
200%	35	35	35	105	1.97
225%	40	40	40	120	2.25
Nakládací plán				Součet	
100%	10N + 10N	10N + 10N	10N + 10N	6x 10N	
170%	10N	10N	10N	3x 10N	
200%	5N	5N	5N	3x 5N	
225%	5N	5N	5N	3x 5N	
Součet	3x 10N 2x 5N	3x 10N 2x 5N	3x 10N 2x 5N	9x 10N 6x 5N	

Tabulka 9.3: Nakládací plán – zkouška klapky

Zkouška klapky									
Číslo řezu	7	6	5	4	3	2	1	Kontrola [N] [1]	
Poloha řezu [mm]	150	454	758	1062	1366	1670	1900		
Vzdál. od OH	201	193	185	176	168	160	154		
Zatížení [N]									
100%	170	160	160	150	140	140	70	990	1.01
150%	250	240	240	220	220	200	100	1470	1.50
190%	320	310	300	280	270	260	120	1860	1.90
225%	380	365	350	335	320	305	145	2200	2.25
Nakládací plán	Součet								
100%	50N + 50N + 50N + 20N	50N + 50N + 50N + 10N	50N + 50N + 50N + 10N	50N + 50N + 50N	50N + 50N + 20N + 20N	50N + 50N + 20N + 20N	20N + 20N + 20N + 10N	15x 50N, 8x 20N 3x 10N, 0x 5N	
150%	50N + 20N + 10N	50N + 20N + 10N	50N + 20N + 10N	50N + 20N	50N + 20N + 10N	50N + 10N	20N + 10N	6x 50N, 6x 20N 6x 10N, 0x 5N	
190%	50N + 20N	50N + 20N	50N + 10N	50N + 10N	50N	50N + 10N	20N	6x 50N, 3x 20N, 3x 10N, 0x 5N	
225%	50N + 10N	50N + 5N	50N	50N + 5N	50N	20N + 20N + 5N	20N + 5N	5x 50N, 3x 20N, 1x 10N, 4x 5N	
Součet	6x 50N 3x 20N 2x 10N	6x 50N 2x 20N 2x 10N 1x 5N	6x 50N 1x 20N 3x 10N	6x 50N 1x 20N 1x 10N 1x 5N	5x 50N 3x 20N 1x 10N	4x 50N 4x 20N 2x 10N 1x 5N	6x 20N 2x 10N 1x 5N	33x 50N 20x 20N 13x 10N 4x 5N	

9.2. PŘÍLOHA B – NAKLÁDACÍ PLÁNY

Tabulka 9.4: Nakládací plán – zkouška VOP, manévr

Zkouška VOP - manévr									
Číslo řezu	7	6	5	4	3	2	1	Kontrola [N] [1]	
Poloha řezu [mm]	140	370	600	830	1060	1290	1425		
Vzdál. od OH, Stabilizátor xOHi [mm] VK	453	421	389	357	326	279	n/a	150	
Zatížení [N]									
100%	180	170	160	140	120	100		870	1.01
150%	260	250	240	210	180	140		630	1.01
190%	340	320	300	270	230	180		1280	1.48
225%	400	380	360	320	270	210		940	1.50
260	260	250	230	210	190	170		1640	1.90
1190	1190	1190	1190	1190	1190	1190		1190	1.90
1940	1940	1940	1940	1940	1940	1940		1940	2.25
1410	1410	1410	1410	1410	1410	1410		1410	2.25
Nakládací plán									
100%	50N + 50N + 50N + 20N + 10N + 5N	50N + 50N + 50N + 20N + 10N + 5N	50N + 50N + 50N + 10N + 5N	50N + 50N + 20N + 20N	50N + 50N + 20N + 10N + 5N	50N + 50N	50N + 50N	50N + 50N	15x 50N, 3x 20N 2x 10N, 0x 5N
150%	50N + 20N + 10N + 5N	50N + 20N + 10N + 5N	50N + 20N + 10N + 5N	50N + 20N	50N + 10N	20N + 20N	20N + 20N	20N + 20N + 5N	10x 50N, 4x 20N 3x 10N, 4x 5N
190%	50N + 20N + 10N + 5N	50N + 20N + 10N + 5N	50N + 10N	50N + 10N	50N + 10N	20N + 20N	20N + 20N	20N	5x 50N, 6x 20N 4x 10N, 0x 5N
225%	50N + 10N	50N + 10N	50N + 10N	50N	50N	20N + 20N	20N + 5N	20N	3x 50N, 7x 20N 1x 10N, 2x 5N
Součet	29x 50N, 18x 20N, 13x 10N, 0x 5N	29x 50N, 18x 20N, 13x 10N, 0x 5N	29x 50N, 18x 20N, 13x 10N, 0x 5N	29x 50N, 18x 20N, 13x 10N, 0x 5N	29x 50N, 18x 20N, 13x 10N, 0x 5N	29x 50N, 18x 20N, 13x 10N, 0x 5N	29x 50N, 18x 20N, 13x 10N, 0x 5N	42x 50N, 48x 20N, 23x 10N, 12x 5N	

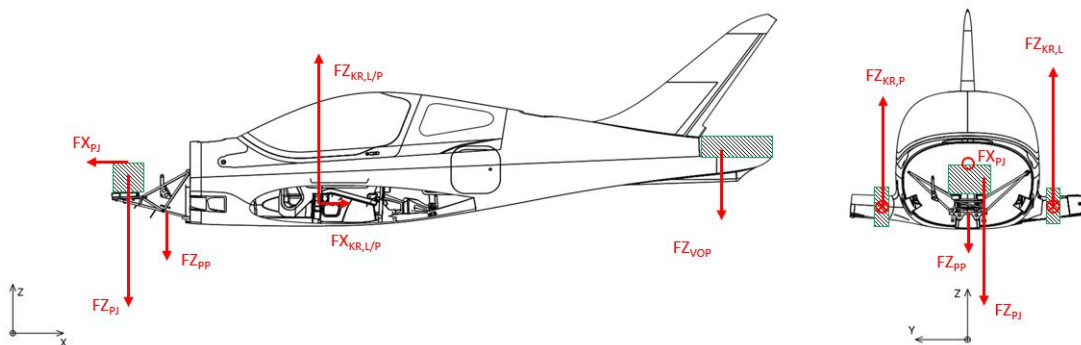
Tabulka 9.5: Nakládací plán – zkouška SK, manévr

Zkouška SK - manévr						
Číslo řezu	5	4	3	2	1	Kontrola [N] [1]
Poloha řezu [mm]	242	466	690	914	1138	
Vzdál. od OH	285	242	200	158	116	
Zatížení [N]						
100%	180	160	130	100	80	650 1.03
150%	270	235	190	145	120	960 1.52
190%	340	300	240	185	155	1220 1.93
225%	400	350	280	215	180	1425 2.25
Nakládací plán						Součet
100%	50N + 50N + 50N + 20N + 10N	50N + 50N + 50N + 10N	50N + 50N + 20N + 10N	20N + 20N + 20N + 20N + 20N	20N + 20N + 20N + 20N	8x 50N, 11x 20N 3x 10N, 0x 5N
150%	50N + 20N + 20N	50N + 20N + 5N	50N + 10N	20N + 20N + 5N	20N + 20N	3x 50N, 7x 20N 1x 10N, 2x 5N
190%	50N + 20N	50N + 10N + 5N	50N	20N + 20N	20N + 10N + 5N	3x 50N, 4x 20N, 2x 10N, 2x 5N
225%	50N + 10N	50N	20N + 20N	20N + 10N	20N + 5N	2x 50N, 4x 20N, 2x 10N, 1x 5N
Součet	6x 50N 4x 20N 2x 10N	6x 50N 1x 20N 2x 10N 2x 5N	4x 50N 3x 20N 2x 10N	10x 20N 1x 10N 1x 5N	8x 20N 1x 10N 2x 5N	16x 50N 26x 20N 8x 10N 5x 5N

9.3. Příloha C – případy zatížení motorového lože

Tabulka 9.6: Zkouška motorového lože, početní zatížení – případ 3

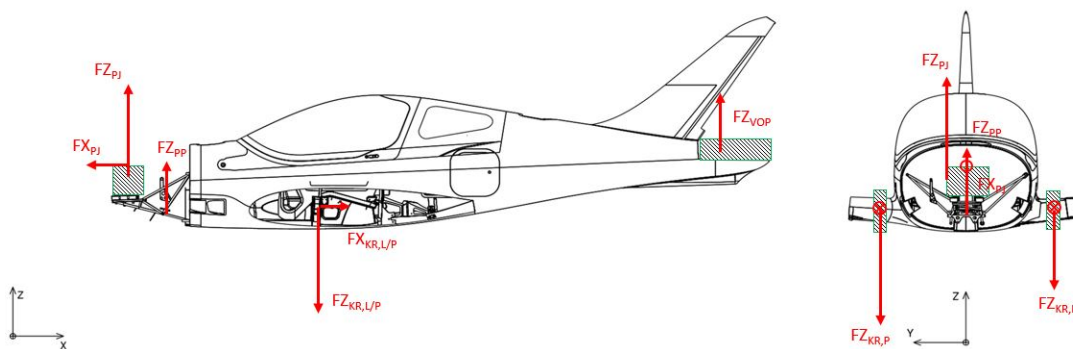
Případ 3		150%						
Kladný poryv		Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty	
Náhrada síly		x	y	z	F _x	F _z	M _x k 0	M _y k 0
		[m]	[m]	[m]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]
Náhrada motoru	F _{X_{PJ}}		0	0	1.511	-1593		-2407
	F _{Z_{PJ}}	1.008	-0.100	1.401		-8735	873	8804
Náhrada PP	F _{Z_{PP}}	1.39	0.000	0.78		-577.5		803
Centroplán L	F _{X_{KR,L}}	-	-0.775	1.19	796.5			948
	F _{Z_{KR,L}}	2.957	-0.775	0		7847	-6082	-23205
Centroplán P	F _{X_{KR,P}}	-	0.775	1.19	796.5			948
	F _{Z_{KR,P}}	2.957	0.775	0		6721	5209	-19874
Náhrada VOP	F _{Z_{VOP}}	6.465	0	-		-5257		33983



Obrázek 9.9: Zkouška motorového lože, náčrt – případ 3.

Tabulka 9.7: Zkouška motorového lože, početní zatížení – případ 4

Případ 4		150%						
Záporný poryv		Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty	
Náhrada síly		x	y	z	Fx	Fz	Mx k 0	My k 0
		[m]	[m]	[m]	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]
Náhrada motoru	$F_{X_{PJ}}$	0	0	1.511	-1593			-2407
	$F_{Z_{PJ}}$	1.008	0.155	1.401		5614.5	873	-5659
Náhrada PP	$F_{Z_{PP}}$	1.39	0.000	0.78		370.5		-515
Centroplán L	$F_{X_{KR,L}}$	-	-0.775	1.19	796.5			948
	$F_{Z_{KR,L}}$	2.957	-0.775	0		-3999	3099	11824
Centroplán P	$F_{X_{KR,P}}$	-	0.775	1.19	796.5			948
	$F_{Z_{KR,P}}$	2.957	0.775	0		-5125	-3972	15155
Náhrada VOP	$F_{Z_{VOP}}$	6.465	0	-		3139		-20294



Obrázek 9.10: Zkouška motorového lože, náčrt – případ 4.

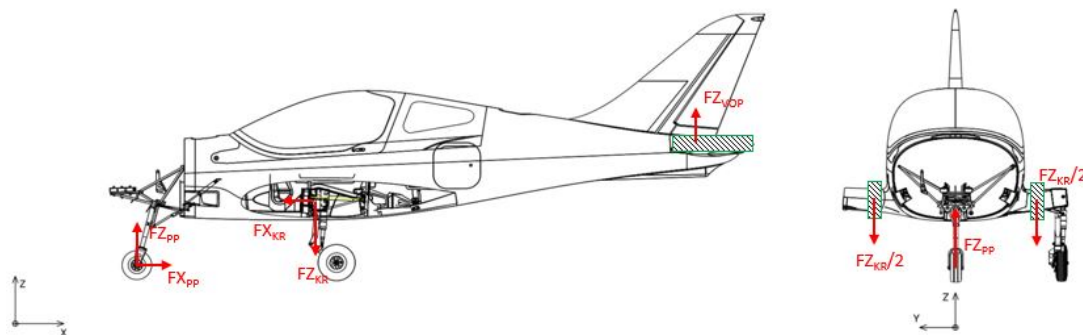
9.4. Příloha D – případy zatížení podvozku

Tabulka 9.8: Zkouška příďového podvozku, početní zatížení – případ 2

Případ 2		150%						
Příďový podvozek - Dodatečné podmínky - nahoru a dozadu								
Náhrada síly		Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty	
		x [m]	y [m]	z [m]	Fx [N]	Fz [N]	Mx k 0 [Nm]	My k 0 [Nm]
Síly v ose kola	FX _{PP}	1.158	0	0.599	1856			1111
	FZ _{PP}	1.158	0	0.599		2319	0	-2685
Centrolán (L+P)	FX _{PN}	2.957		1.19	-1856			-2208
	FZ _{PN}	2.957				-3196	0	9450
Náhrada VOP	FZ _{ZN}	6.465	0			877	0	-5668

Tabulka 9.9: Zkouška příďového podvozku, početní zatížení – případ 3

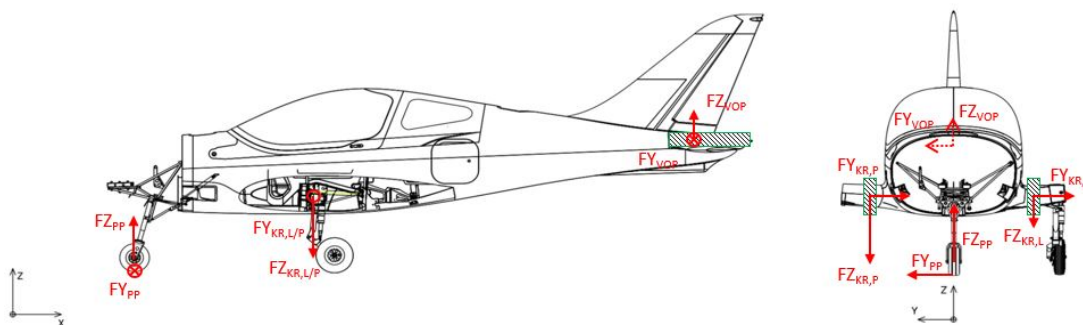
Případ 3		150%						
Příďový podvozek - Dodatečné podmínky - nahoru a dopředu								
Náhrada síly		Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty	
		x [m]	y [m]	z [m]	Fx [N]	Fz [N]	Mx k 0 [Nm]	My k 0 [Nm]
Síly v ose kola	FX _{PP}	1.158	0	0.599	-929			-556
	FZ _{PP}	1.158	0	0.599		2319	0	-2685
Centrolán (L+P)	FX _{PN}	2.9		1.19	929			1105
	FZ _{PN}	2.9				-3606	0	10458
Náhrada VOP	FZ _{ZN}	6.465	0			1287	0	-8321



Obrázek 9.11: Zkouška příďového podvozku, náčrt – případy 2, 3.

Tabulka 9.10: Zkouška předového podvozku, početní zatížení – případ 4

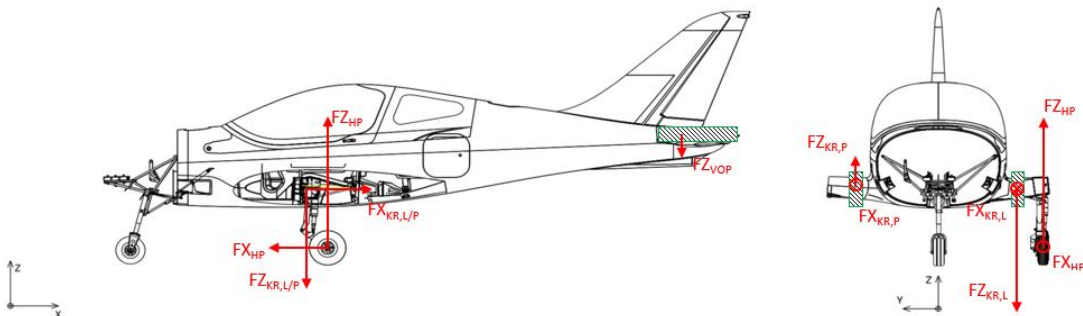
Případ 4		150%			Předový podvozek - Dodatečné podmínky, PP nahoru a do boku				
Náhrada síly	Působíště v 3D modelu	Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty		
		x [m]	y [m]	z [m]	F _y [N]	F _z [N]	M _{x k 0} [Nm]	M _{y k 0} [Nm]	M _{z k 0} [Nm]
Síla na pneumatiku	F _{Y_{PP}}	1.158	0	0.599	1856		-1111		2149
Síla v ose kola	F _{Z_{PP}}	1.158	0	0.479		2319	0	-2685	
Náhrada VOP	F _{Y_{VOP}}	6.465	0	1.75	907		-1587		5862
	F _{Z_{VOP}}	6.465	0	1.75		1133	0	-7326	
Centroplán L	F _{Y_{KR,L}}	2.9	-0.775	1.19	-1381		1643		-4005
	F _{Z_{KR,L}}	2.9	-0.775	1.19		-1346	1043	3904	
Centroplán P	F _{Y_{KR,P}}	2.9	0.775	1.19	-1381		1643		-4005
	F _{Z_{KR,P}}	2.9	0.775	1.19		-2106	-1632	6107	



Obrázek 9.12: Zkouška předového podvozku, náčrt – případ 4.

Tabulka 9.11: Zkouška hlavního podvozku, početní zatížení – případ 6

Případ 6		150%			Hlavní podvozek - Přistání s velkým úhlem podélného sklonu				
Náhrada síly	Působíště v 3D modelu	Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty		
		x [m]	y [m]	z [m]	F _x [N]	F _z [N]	M _{x k 0} [Nm]	M _{y k 0} [Nm]	M _{z k 0} [Nm]
Síly v ose kola	F _{X_{HP}}	3.091	-0.965	0.709	-4445			-3151	-4289
	F _{Z_{HP}}	3.091	-0.965	0.709		15501	-14958	-47914	
Náhrada VOP	F _{Z_{VOP}}	6.465	0	1.75		-231	0	1492	
Centroplán L	F _{X_{KR,L}}	2.9	-0.775	1.19	4989			5937	3867
	F _{Z_{KR,L}}	2.9	-0.775	1.19		-17286	13396	50129	
Centroplán P	F _{X_{KR,P}}	2.9	0.775	1.19	-545			-648	422
	F _{Z_{KR,P}}	2.9	0.775	1.19		2016	1562	-5845	



Obrázek 9.13: Zkouška hlavního podvozku, náčrt – případ 6.

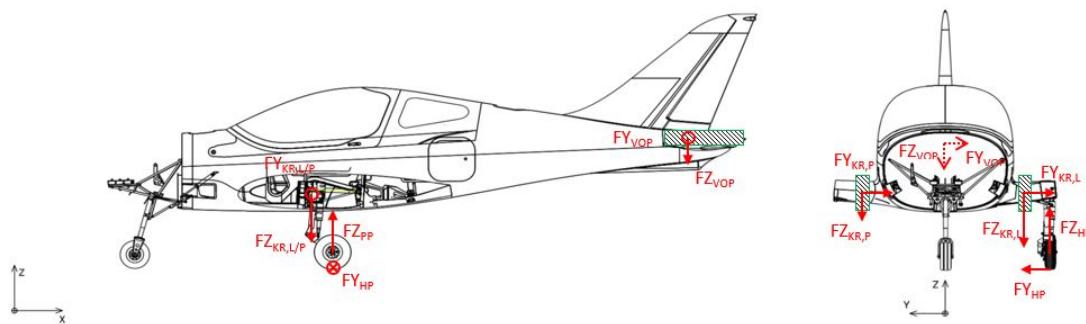
9.4. PŘÍLOHA D – PŘÍPADY ZATÍŽENÍ PODVOZKU

Tabulka 9.12: Zkouška hlavního podvozku, početní zatížení – případ 7

Případ 7		150%							
Hlavní podvozek - Dodatečné podmínky, HP nahoru a dovnitř									
Náhrada síly		Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty		
		x [m]	y [m]	z [m]	Fy [N]	Fz [N]	Mx k 0 [Nm]	My k 0 [Nm]	Mz k 0 [Nm]
Síla na pneumatiku	FY _{HP}	3.091	-0.965	0.559	4415		-2468		13645
Síla v ose kola	FZ _{HP}	3.091	-0.965	0.709		5916	-5709	-18286	
Náhrada VOP	FY _{VOP}	6.465	0	1.75	-237		414		-1529
	FZ _{VOP}	6.465	0	1.75		-317	0	2049	
Centroplán L	FY _{KR,L}	2.9	-0.775	1.19	-2089		2486		-6058
	FZ _{KR,L}	2.9	-0.775			-4600	3565	13340	
Centroplán P	FY _{KR,P}	2.9	0.775	1.19	-2089		2486		-6058
	FZ _{KR,P}	2.9	0.775			-999	-774	2897	

Tabulka 9.13: Zkouška hlavního podvozku, početní zatížení – případ 8

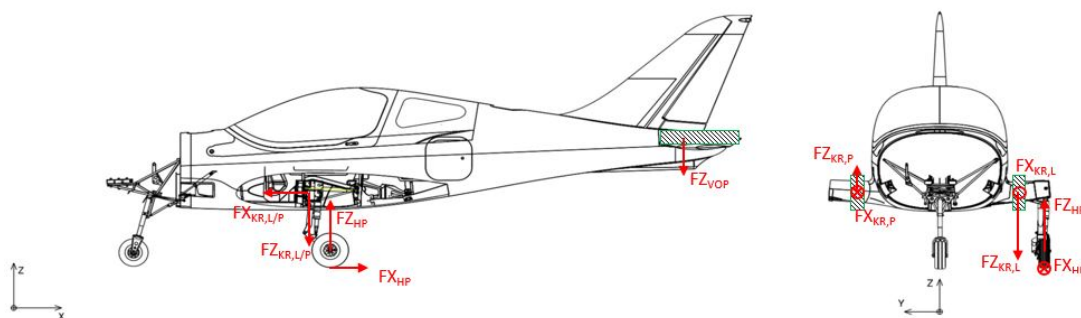
Případ 8		150%							
Hlavní podvozek - Dodatečné podmínky, HP nahoru a ven									
Náhrada síly		Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty		
		x [m]	y [m]	z [m]	Fy [N]	Fz [N]	Mx k 0 [Nm]	My k 0 [Nm]	Mz k 0 [Nm]
Síla na pneumatiku	FY _{HP}	3.091	-0.965	0.559	-2913		1628		-9004
Síla v ose kola	FZ _{HP}	3.091	-0.965	0.709		5916	-5709	-18286	
Náhrada VOP	FY _{VOP}	6.465	0	1.75	156		-273		1009
	FZ _{VOP}	6.465	0	1.75		-317	0	2049	
Centroplán L	FY _{KR,L}	2.9	-0.775	1.19	1378		-1640		3998
	FZ _{KR,L}	2.9	-0.775			-7725	5987	22402	
Centroplán P	FY _{KR,P}	2.9	0.775	1.19	1378		-1640		3998
	FZ _{KR,P}	2.9	0.775			2126	1648	-6165	



Obrázek 9.14: Zkouška hlavního podvozku, náčrt – případy 7, 8.

Tabulka 9.14: Zkouška hlavního podvozku, početní zatížení – případ 9

Případ 9		150%							
Hlavní podvozek - Dodatečné podmínky, brždění									
Náhrada síly	Působíště v 3D modelu			Síly		Momenty			
	x [m]	y [m]	z [m]	F _x [N]	F _z [N]	M _x k 0 [Nm]	M _y k 0 [Nm]	M _z k 0 [Nm]	
Síla na pneumatiku	F _{X_{HP}}	3.091	-0.965	0.559	4767		2665	4600	
Síla v ose kola	F _{Z_{HP}}	3.091	-0.965	0.709	5916	-5709	-18286		
Náhrada VOP	F _{Z_{VOP}}	6.465	0	1.75	-1161	0	7504		
Centroplán L	F _{X_{KR,L}}	2.9	-0.775	1.19	-5351		-6368	-4147	
	F _{Z_{KR,L}}	2.9	-0.775	1.19	-6061	4697	17576		
Centroplán P	F _{X_{KR,P}}	2.9	0.775	1.19	584		695	-453	
	F _{Z_{KR,P}}	2.9	0.775	1.19	1306	1012	-3786		



Obrázek 9.15: Zkouška hlavního podvozku, náčrt – případ 9.

9.5. Příloha E (elektronická)

Ke hlavnímu souboru práce jsou přiloženy CAD modely navržených přípravků. Modely jsou ve formátu „STP“, je tedy možné je prohlédnout ve většině 3D CAD programů. Modely byly vytvořeny ve studentské verzi Dassault Systemes CATIA V5.