



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH ZMĚNY KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ HLAVNÍCH ZÁVĚSŮ KŘÍDLA LETOUNU Z 242

DESIGN OF NEW CONCEPTION OF THE STRUCTURAL DESIGN OF THE MAIN WING HINGES OF
THE Z 242

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTERS'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Aleš Hála

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Antonín Píšťek, CSc.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Aleš Hála
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	prof. Ing. Antonín Pištěk, CSc.
Akademický rok:	2019/20

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 změny konstrukčního řešení hlavních závěsů křídla letounu Z 242

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavní závěsy spojení křídla s trupem letounů řady Zlín včetně Z 242 L jsou navrženy tak, že dolní závěs má orientaci čepů ve směru letu a horní závěsy jsou se svislými čepy. Toto řešení má výhodu v přenosu zatížení v tečném směru, ale je nevýhodné pro přenos posouvajících síly. Složitě je také konstrukční uspořádání a technologie výroby. Cílem DP je zvolit koncepci konstrukčního řešení pro horní i dolní závěsy s orientací čepů ve vodorovném směru. V souvislosti s touto hlavní změnou provést návrh nové technologie výroby křídla včetně integrální palivové nádrže.

Cíle diplomové práce:

Provést analýzu stávajícího řešení z hlediska konstrukce, zatížení a technologie výroby.
Navrhnout nové řešení sjednocující konstrukční řešení pro dolní i horní část nosníku křídla i trupu.
Provést pevnostní výpočet nového řešení pro rozhodující případy zatížení.
Změnit technologii výroby hlavního nosníku křídla na frézování.
Nahradit stávající palivovou nádrž nádrží integrální.
Při řešení respektovat základní technické a provozní charakteristiky letounu Z 242 L.

Seznam doporučené literatury:

NIU, M. C. Y: Airframe Structural design, Conmilit LTD, 1991.
Firemní podklady a technická data k letounu Z 242 z firmy ZA.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá modernizací křídla letounu Z 242 L. Hlavní důraz je kladen na rekonstrukci hlavních závěsů. Společně s touto změnou jsou navrženy nové nosníky křídla a také integrální nádrž. Únosnost konstrukce je ověřena pomocí analytických i numerických metod MKP. Důležitým krokem je změna výrobní technologie s rozsáhlým podílem frézovaných dílů. Cílem práce je poukázat na inovační možnosti a ověřit jejich proveditelnost pro případ budoucí realizace.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with modernization of the Z 242 L aircraft wing. The main emphasis is given to the connection of the wing and fuselage. The new concept of both main and rear wing spar is designed together with integral fuel tank. The strength of the structure is evaluated analytically and numerically by use of Finite element analysis. Wide range of milling operations is implemented into manufacturing process as well. This thesis shows how to innovate current aircraft with respect to feasibility of the design in case of future project realization.

KLÍČOVÁ SLOVA

Z 242 L, křídlo, závěs křídla, nosník, integrální nádrž, frézování, modernizace

KEYWORDS

Z 242 L, wing, wing attachment fitting, wing spar, integral fuel tank, milling, modernization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÁLA, Aleš. *Návrh změny konstrukčního řešení hlavních závěsů křídla letounu Z 242*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125315>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Antonín Píšťek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Návrh změny konstrukčního řešení hlavních závěsů křídla letounu Z 242* vypracoval samostatně pod odborným vedením prof. Ing. Antonína Píšťka, CSc. s využitím vlastních znalostí a literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. června 2020

.....

Bc. Aleš Hála

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, prof. Ing. Antonínu Píšíčkovi, CSc. za čas, který se mnou strávil při konzultacích, cenné rady a za veškeré věnované podklady potřebné k napsání této diplomové práce.

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	ANALÝZA SOUČASNÉHO ŘEŠENÍ LETOUNU Z 242 L	16
2.1	Základní charakteristika.....	16
2.2	Historie vývoje.....	18
2.3	Rozbor vybraných částí draku	19
2.3.1	Trup	19
2.3.2	Křídlo.....	20
3	REKONSTRUKCE KŘÍDLA	22
3.1	Důvody rekonstrukce křídla.....	22
3.2	Uvažované konstrukční a technologické změny	22
3.3	Požadavky na nové řešení.....	23
4	OBÁLKY ZATÍŽENÍ	24
4.1	Vstupní údaje pro výpočet obálek	24
4.2	Obálky zatížení se zasunutými vztlakovými klapkami.....	25
4.3	Obálky zatížení s vysunutými vztlakovými klapkami	28
5	ZATÍŽENÍ KŘÍDLA	30
5.1	Rozhodující případy zatížení	30
6	NÁVRH A PEVNOSTNÍ KONTROLA ZÁVĚSŮ KŘÍDLO-TRUP	32
6.1	Konstrukční provedení závěsů.....	32
6.2	Výpočet reakcí v závěsech.....	34
6.3	Pevnostní kontrola ok závěsů	37
6.4	Pevnostní kontrola čepu.....	41
7	NÁVRH A PEVNOSTNÍ KONTROLA NOSNÍKŮ KŘÍDLA	44
7.1	Konstrukční provedení nosníků	44
7.1.1	Hlavní nosník.....	45
7.1.2	Zadní nosník	47
7.2	Pevnostní kontrola nosníků.....	48
7.2.1	Postup výpočtu	49
7.2.2	Výsledky pevnostní kontroly.....	54
7.3	Kontrola propojení přední a zadní části nosníku	55
8	MKP ANALÝZA SPOJE KŘÍDLO-TRUP	57
8.1	Stručný popis principu MKP	57
8.2	Příprava výpočtového modelu	58
8.3	Vyhodnocení výsledků	60

9	NÁVRH INTEGRÁLNÍ PALIVOVÉ NÁDRŽE	63
9.1	Popis palivové soustavy letounu	63
9.2	Konstrukční provedení nádrže.....	63
9.3	Utěsnění integrální nádrže.....	67
9.4	Ochrana palivové soustavy proti účinku blesku	68
10	PŘEHLED NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ.....	69
10.1	Provedené konstrukční změny.....	69
10.2	Odhad hmotnosti	70
10.3	Technologické zpracování.....	71
11	ZÁVĚR.....	72
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	78
	SEZNAM TABULEK	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83
	PŘÍLOHY	84

1 ÚVOD

Zadání této diplomové práce vychází z požadavku modernizace letounu Z 242 L, resp. celé řady letounů ZLIN. Cílem je především poukázat na inovační možnosti a navrhnout vhodné řešení, které by mělo smysl prakticky realizovat. Ideální vyústění modernizace by poté znamenalo zvýšení zájmu a poptávky o daný letoun.

Je zřejmé, že jakákoliv změna stávajícího řešení znamená pro výrobce vysoké náklady, jak z důvodu vývojových prací, zavedení nových technologií, prototypových zkoušek a nakonec i certifikace. Možnosti ani rozsah práce neumožňují věnovat se všem aspektům modernizace, zejména těm ekonomickým a organizačním. Práce je proto pojata jako studie proveditelnosti s ideou nového konstrukčního a technologického řešení.

Diplomová práce může být využita jako první krok k praktické realizaci a ukazuje na možnosti dalších inovačních změn dnes již zastaralých, avšak osvědčených letounů značky ZLIN.

2 ANALÝZA SOUČASNÉHO ŘEŠENÍ LETOUNU Z 242 L

Tato úvodní část zahrnuje základní popis letounu Z 242 L. Poté je stručně nastíněna historie vývoje a vzniku daného letounu. V poslední části je provedena analýza vybraných částí draku.

2.1 Základní charakteristika

Letoun Z 242 L je dvoumístný, jednomotorový, dolnokřídový jednoplošník celokovové konstrukce. Využívá se především k základnímu a pokračovacímu výcviku pilotů včetně létání akrobacie. Zastavěná avionika umožňuje i přístrojové lety dle pravidel IFR.

Pohonnou soustavu letounu tvoří atmosférický, vzduchem chlazený čtyřválcový motor Lycoming. Motor je typu boxer s nepřímým vstřikováním paliva a není vybaven reduktorem. Kompozitová vrtule značky MT je třílistá a hydraulicky stavitelná.

Zajímavostí je zabudovaný systém pro sledování čerpání únavového života AMU (*Acceleration Monitoring Unit*). Je to registrační akcelerometr, který měří a zaznamenává násobky zatížení během letu. Tímto způsobem je možné mít přehled o konkrétním způsobu provozu letounu a posuzovat tak míru jeho opotřebení mající vliv na životnost konstrukce. [1]



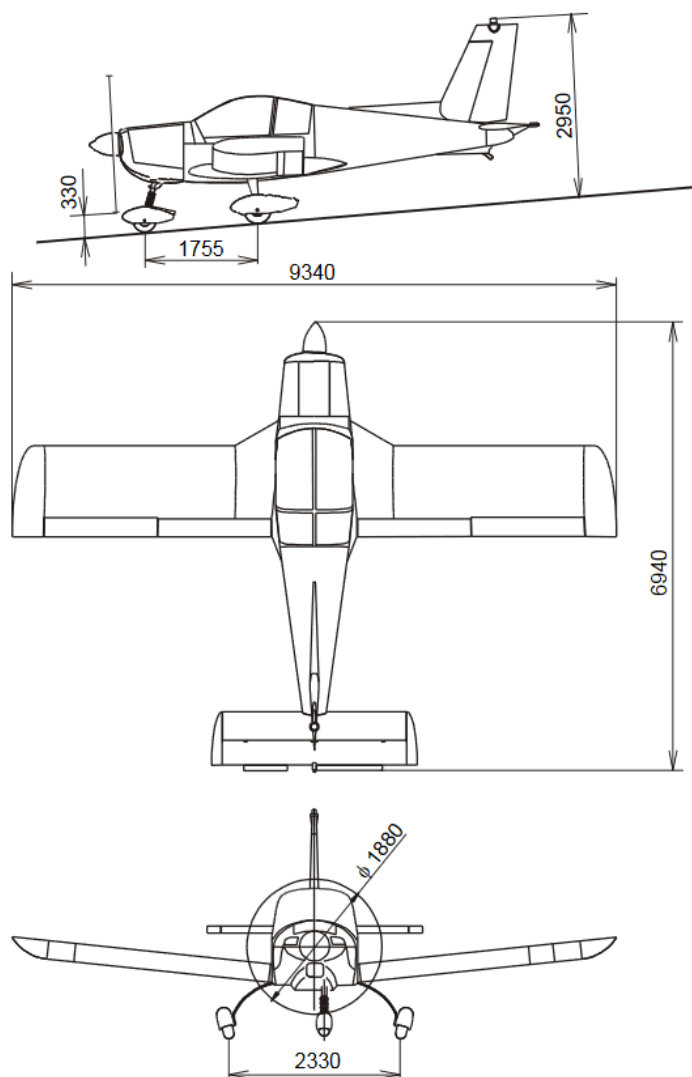
Obr. 2.1 Z 242 L s imatrikulací YR-ZEA [2]

Letoun se vyrábí ve třech kategoriích, tj. akrobatická, cvičná a normální (A, U, N). Má typový certifikát EASA (platný pro země EU) i FAA (USA). Společně s letounem Z 143 LSi tvoří současnou produkci otrokovické společnosti ZLIN Aircraft a.s.

V následujících tabulkách (Tab.2.1, Tab.2.2, Tab.2.3, Tab.2.4) jsou uvedeny základní parametry letounu. Základní rozměry jsou patrné i z třípohledového výkresu na Obr. 2.2.

Tab.2.1 Rozměry letounu Z 242 L [1]

Rozpětí křídel	b	9,34	[m]
Plocha křídel	S	13,86	[m ²]
Výška letounu	v	2,95	[m]
Délka letounu	l	6,94	[m]

**Obr. 2.2** Třípohledový výkres letounu Z 242 L [3]**Tab.2.2** Hmotnosti jednotlivých tříd letounu Z 242 L [1]

HMOTNOSTI		A	U	N	
Maximální vzletová hmotnost	m_{TOW}	970	1020	1090	[kg]
Hmotnost prázdného letounu	m_{EW}	730	730	730	[kg]

Tab.2.3 Letové výkony jednotlivých tříd letounu Z 242 L [4]

LETOVÉ VÝKONY		A	U	N	
Stoupačí rychlost (0m MSA)	u	5,5	5	4,25	[m/s]
Dolet (2350 ot./min, 6560 ft)	R	495	495	1056	[km]
Praktický dostup (při m_{TOW})	D	5150	5000	4800	[m]

Tab.2.4 Pohonná soustava letounu Z 242 L [1]

Motor TEXTRON Lycoming AEIO 360-A1B6			Vrtule MTV-9-B-C/C-188-18a		
Maximální trvalý výkon	P	149 [kW]	Průměr	r_v	1880 [mm]
Maximální trvalé otáčky	n	2700 [ot/min]	Počet listů	n_v	3 [-]

2.2 Historie vývoje

Letoun Z 242 L je poslední dvousedadlovou verzí tzv. řady 40. Ta měla ve své době zajistit výrobu letounů s velmi blízkou konstrukční návazností jednotlivých typů. Vznik řady se datuje do šedesátých let minulého století, kdy byl postaven první prototyp Z 42.

Konstrukce tohoto letounu, resp. celé řady, byla typická smíšenou konstrukcí trupu. Střední část byla řešena jako svařovaná příhradová konstrukce, ke které se připevnila zadní poloskořepinová část. Je potřeba zmínit, že svařované trupy měly ve firmě tradici již od řady 26 Trenér, což mělo určitý vliv na prosazení dané technologie i pro řadu 40.



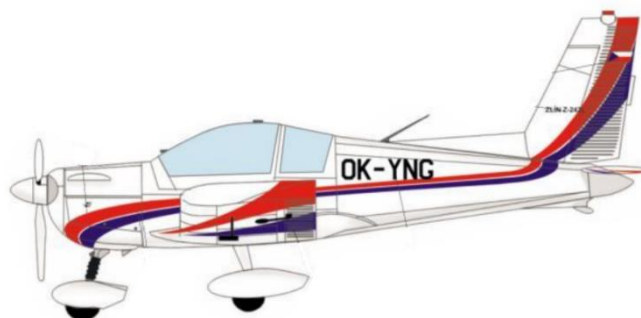
Obr. 2.3 Z 42 [5]

V polovině sedmdesátých let byla provedena modifikace Z 42 na verzi Z 142. Ta dostala výkonnější motor Avia M 337 AK. Další změnou byla modifikace překrytu kabiny nebo např. přidání hřbetního kýlu viz Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Z 142 [6]

První prototyp Z 242 L byl zalétnut na počátku devadesátých let. Na rozdíl od předchozích typů nemá křídlo negativní úhel šípů. Došlo ke zvětšení kořenové hloubky a bylo navrženo nové zakončení křídel. Nezbytná byla i modernizace avioniky. Použití pohonné jednotky Lycoming nebo zavedení systému AMU mělo zaručit větší konkurenceschopnost a exportní možnosti letounu. [7]



Obr. 2.5 Z 242 L [8]

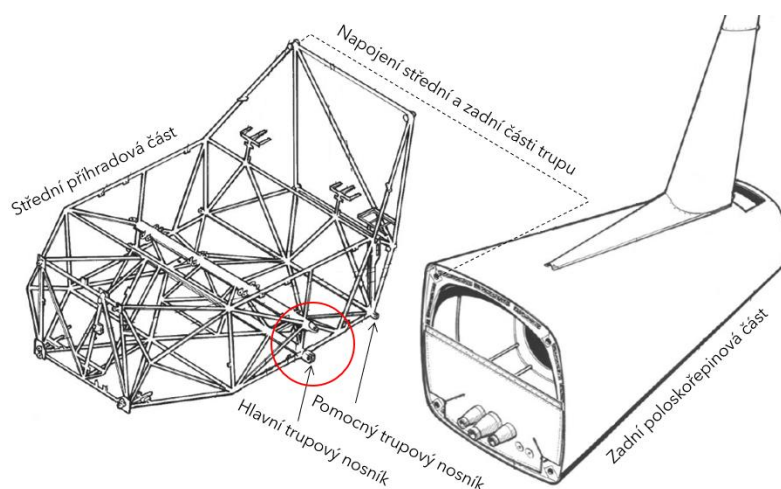
2.3 Rozbor vybraných částí draku

Vzhledem k zaměření práce je pozornost věnována křídlu a jeho spojení s trupem z hlediska konstrukčního a technologického provedení.

2.3.1 Trup

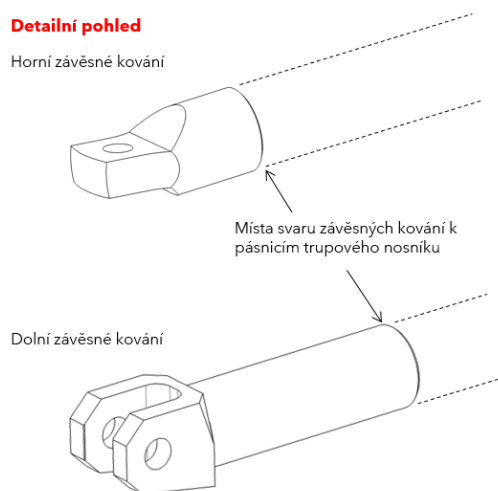
Jak již bylo zmíněno, typickým znakem řady 40 je smíšená konstrukce trupu. Střední příhradová část je svařována z ocelových trubek. K ní je poté pomocí čtyř šroubů připevněna zadní poloskořepinová část viz Obr. 2.6.

Hlavní i pomocný trubkový nosník tvoří jeden kus svařované střední části trupu. Z hlediska bezpečnosti je hlavní nosník naplněn dusíkem, jehož tlak je indikován v kabině pomocí manometru. Toto opatření slouží k predikci případných trhlin a jiných defektů.



Obr. 2.6 Části trupu letounu Z 242 L [9]

Ocelová závěsná kování, znázorněna na Obr. 2.7, jsou vyrobena zvlášť a následně přivařena k pásnicím nosníku. Horní závěsné oko na hlavním nosníku má spojovací čep orientovaný svisle a je odchýleno o 6° vůči horizontální rovině kvůli vzepětí křídla. Dolní závěs je vidlicového typu s horizontální orientací čepů. Stejnou konfiguraci a orientaci čepu má i závěs na zadním nosníku trupu.

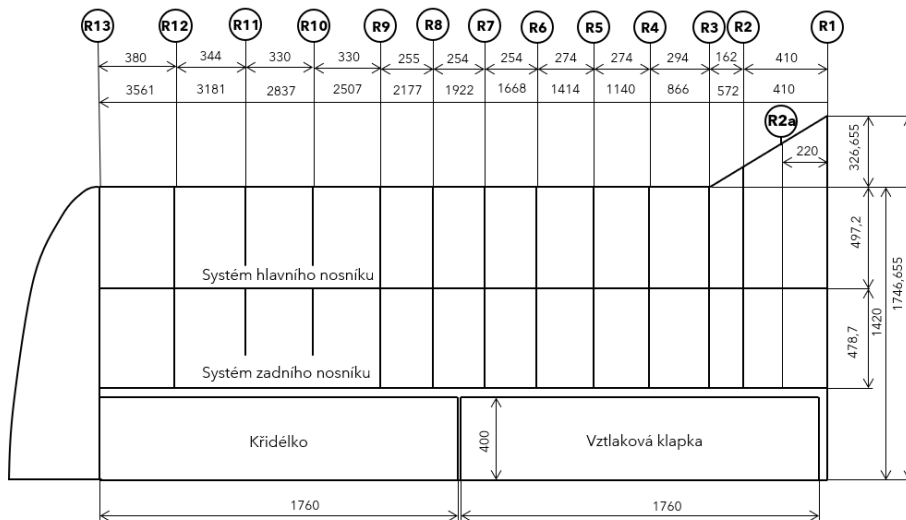


Obr. 2.7 Závěsné kování na hlavním nosníku trupu

2.3.2 Křídlo

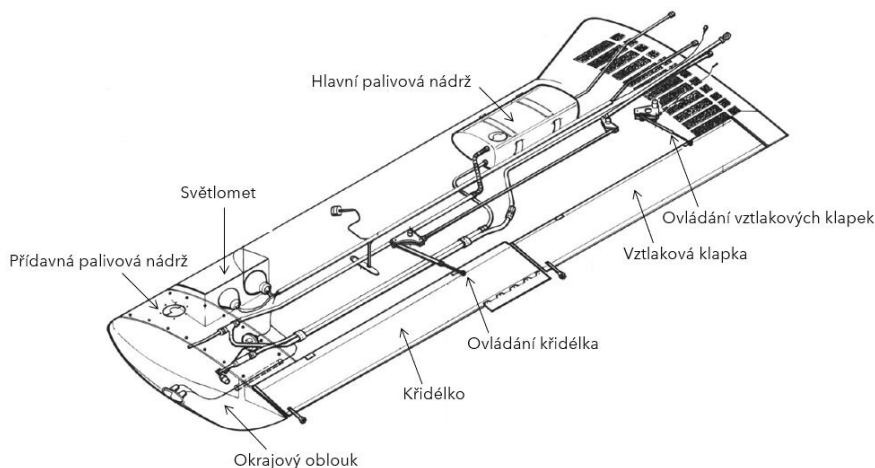
Křídlo letounu je samonosné s dělením u trupu. Má obdélníkový půdorys s kladným úhlem vzepětí a nulovým úhlem šípů. Křídlo není geometricky ani aerodynamicky krouceno. Je použit profil NACA 63-416.5.

V oblasti žebér R1-R3 je profil modifikován prodloužením nosové části viz Obr. 2.8. Tím došlo ke zvětšení kořenové hloubky křídla s tím, že výška hlavního nosníku zůstala po celém rozpětí stejná.



Obr. 2.8 Schéma křídla

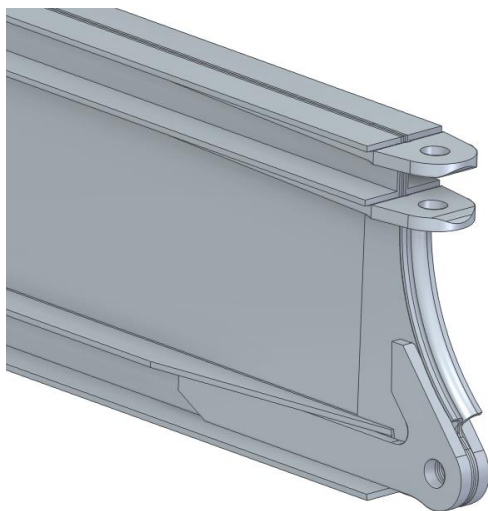
Křídlo je vybaveno šterbinovou vztlakovou klapkou a křídélkem. Táhla řízení jsou vedena mezi nosníky. Uvnitř je zabudována hlavní palivová nádrž a v případě kategorie *Normal* i přídavná koncová nádrž. Konec křídla je opatřen laminátovým okrajovým obloukem. Celkové uspořádání křídla je patrné z Obr. 2.9.



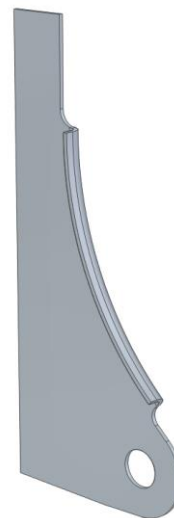
Obr. 2.9 Vnitřní uspořádání křídla [9]

Křídlo je navrženo jako nosníková konstrukce s hlavním a zadním pomocným nosníkem. Horní a dolní pásnice hlavního nosníku je tvořeny symetricky umístěnými U-profilů, které se nýtují ke stojině. Průřez pásnic je po rozpětí z hlediska snižujícího se zatížení proměnný, čehož se dosahuje postupným ořezáním.

Ocelové závěsy hlavního nosníku se upevňují pomocí šroubů k U-profilům pásnic. Jejich orientace je zřejmá z Obr. 2.10. Dolní závěsy jsou navíc šroubovány i k symetricky umístěným výztuhám viz Obr. 2.11. Tímto opatřením je částečně eliminováno nepřípustné ohýbání dolního závěsu.

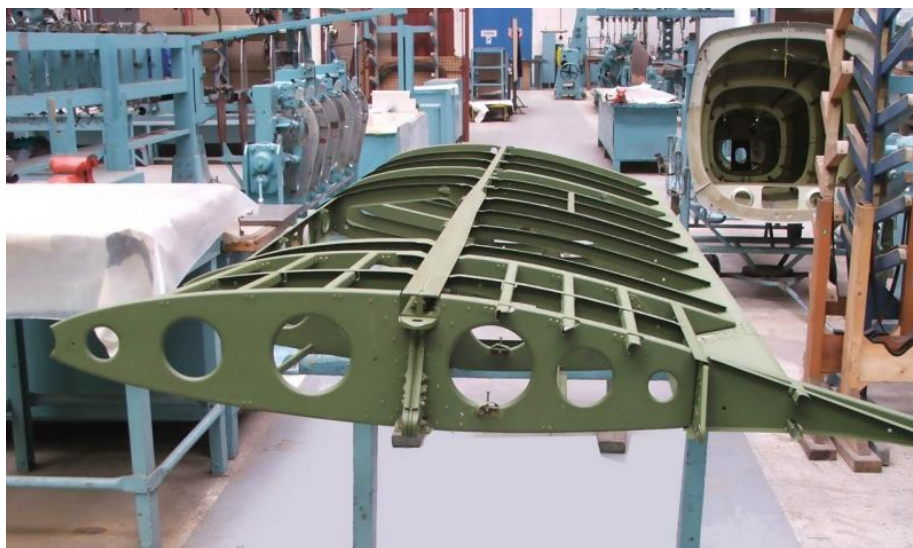


Obr. 2.10 Závěsy hlavního nosníku



Obr. 2.11 Výztužné ucho dolního závěsu

Na Obr. 2.12 je vidět sestavování křídla. Z obrázku je patrné např. ořezání horní pásnice hlavního nosníku. Také je vidět, že stojina zadního nosníku nemá po celém rozpětí stejnou výšku. Od třetího žebra je tvořena pouze ohnutým plechem, který zároveň tvoří zavětrání pro vztlakovou klapku a křídélko.



Obr. 2.12 Kostra křídla [10]

3 REKONSTRUKCE KŘÍDLA

Požadavek na rekonstrukci je opodstatněn snahou výrobce vyrábět nadále konkurenceschopný letoun, o který bude i v budoucnu zájem. Z předchozí kapitoly je ale zřejmé, že současná konstrukce je z pohledu technologie zastaralá a má řadu problematických míst. Tím hlavním je oblast závěsů, která představuje kritický uzel rozhodující zpravidla o životnosti letounu. Z toho důvodu bylo rozhodnuto o změně současného provedení hlavních závěsů včetně dalších změn souvisejících se zavedením nové moderní technologie výroby.

3.1 Důvody rekonstrukce křídla

- **Problematické závěsy**

Hlavní závěsy spojení křídla s trupem letounů ZLIN včetně Z 242 L jsou navrženy tak, že dolní závěs má orientaci čepů ve směru letu a horní závěsy jsou se svislými čepy, jak bylo znázorněno na Obr. 2.10. Toto řešení má výhodu v přenosu zatížení v tečném směru, ale je nevýhodné pro přenos posouvajících síly. Dolní závěs byl proto dříve modifikován a vyztužen viz Obr. 2.11. Je zřejmé, že takovéto řešení není ideální z hlediska přenosu zatížení. Složitě je i celkové konstrukční uspořádání včetně technologie výroby.

- **Životnost letounu**

U letounu Z 242 L se jedná především o to, jak posuzovat únavovou životnost s ohledem na jeho univerzálnost. Mimo akrobacii je totiž využíván i k dalším účelům (základní výcvik, turistické létání atd.), kdy zatížení není tak vysoké. Je proto potřeba od sebe oddělit akrobatický a normální provoz, resp. letové hodiny při daném typu provozu. V současné době je problém řešen systémem AMU. Životnost letounu se tak hodnotí podle aktuálního stavu, který závisí na konkrétním způsobu provozu každého letounu. Přejít na bezpečnou životnost nezávisle na posuzování aktuálního stavu (odebrání AMU) by však u současné konstrukce nebyl z hlediska ekonomického využití a spolehlivosti provozu možný.

- **Zastaralá technologie výroby**

Letoun je nadále vyráběn dle zavedených postupů. Neefektivní se zdá být např. využívání materiálu při ořezávání pásnic nebo nutnost montážních přípravků. Dnešní doba však nabízí širší možnosti, co se týče technologie výroby. Není problém vyrobit optimalizované díly na CNC obráběcích strojích, a to s vysokou přesností i produktivitou.

3.2 Uvažované konstrukční a technologické změny

Na základě diskuse s vedoucím byly navrženy možné inovace stávající konstrukce. Prioritou je změna koncepce hlavních závěsů křídlo-trupu s tím, že oba čepy budou orientovány vodorovně. Jako vhodná technologie se nabízí frézování. To umožní vyrobit závěsy křídla jako jeden kus společně s nosníkem a dále využít utěsněný prostor pro integrální palivovou nádrž.

Co se týče trupu, hlavní i pomocný trubkový nosník zůstane stejný, protože se nepředpokládá změna střední příhradové konstrukce. Je však potřeba navrhnout nová závěsná kování, tak aby vyhověly změněné orientaci čepů.

Spojení křídla a trupu je nutné navrhnout s ohledem na rozdílný materiál obou částí. Závěsy na trupu jsou ocelové, zatímco hlavní nosník křídla bude frézován z duralu. Výhodné proto bude řešit hlavní závěsy křídla jako vidlici, jelikož tím zůstane prostor na dimenzování spoje.

3.3 Požadavky na nové řešení

POŽADAVKY VÝROBCE LETOUNU

Během návrhu je nutné ve velké míře respektovat stávající konstrukční provedení letounu, zatížení, použité materiály a technologii firmy ZLIN Aircraft a.s. Vnější tvar křídla musí zůstat zachován, tzn. nedojde ke změně aerodynamických vlastností letounu. Bude tedy provedena pouze změna vnitřní konstrukce křídla.

LEGISLATIVNÍ POŽADAVKY

Prováděcí pravidla pro certifikaci letové způsobilosti letadel a letadlových částí jsou stanovena Nařízením Komise (EU) č. 748/2012 [11]. Změny typových osvědčení jsou uvedeny pod hlavou D a klasifikovány dle odst. 21.A.91:

„Změny v typovém návrhu jsou klasifikovány jako nevýznamné a významné. Nevýznamná změna je taková změna, která nemá podstatný účinek na hmotnost, polohu těžiště, pevnost konstrukce, spolehlivost, provozní charakteristiky, hluk, únik paliva, výfukové emise nebo jiné charakteristiky ovlivňující letovou způsobilost výrobku. Všechny ostatní jsou významné.“ [11]

Z tohoto znění vyplývá, že změna vnitřní konstrukce křídla je významná. Žadatel je proto v souladu s odst. 21.A.97 daného nařízení povinen:

- 1. Předložit agentuře dokladující údaje spolu se všemi nezbytnými popisnými údaji k zapracování do typového návrhu.*
- 2. Prokázat, že změněný výrobek vyhovuje použitelným požadavkům certifikačních specifikací a požadavkům na ochranu životního prostředí.*
- 3. Žadatel poskytne agentuře certifikační program, v němž budou podrobně uvedeny prostředky, kterými bylo vyhovění prokázáno. Žadatel v dokladech o vyhovění požadavkům podle certifikačního programu zaznamená odůvodnění vyhovění. Žadatel je povinen prohlásit, že prokázal vyhovění použitelným požadavkům certifikační předpisové základny a požadavkům na ochranu životního prostředí podle certifikačního programu.*
- 4. Žadatel je povinen vykonat všechny kontroly a zkoušky nezbytné k vyhovění použitelným požadavkům certifikační předpisové základny a požadavkům na ochranu životního prostředí.*

Pro vyhovění požadavkům agentury EASA bude proto nutné zpracovat všechnu potřebnou certifikační dokumentaci, vyrobit prototypy a provést pevnostní, únavové a případně letové zkoušky. [12]

4 OBÁLKY ZATÍŽENÍ

V souladu s certifikačním předpisem FAR 23 [13] jsou stanoveny návrhové rychlosti v daných režimech letu a tomu odpovídající násobky zatížení včetně násobků zatížení od vzdušných poryvů. Tyto hodnoty ohraničují oblast tzv. obálkou, ve které smí být letoun provozován.

4.1 Vstupní údaje pro výpočet obálek

Předpis stanovuje maximální kladné a záporné provozní násobky pro jednotlivé třídy letounu.

Tab.4.1 Provozní násobky

NÁSOBKY		A	U	N
Kladný	n_{\max}	6	5	3,8
Záporný	n_{\min}	-3,5	-3	-1,5

Jsou uvažovány dvě hmotnostní konfigurace, a sice maximální m_{\max} , která odpovídá maximální vzletové hmotnosti m_{tow} a dále minimální letové hmotnosti m_{\min} .

Tab.4.2 Hmotnostní konfigurace [4]

HMOTNOSTI		A	U	N
Maximální hmotnost	m_{\max}	970	1020	1090 [kg]
Minimální hmotnost	m_{\min}	784,8	784,8	784,8 [kg]

Dále je nutné zohlednit letovou konfiguraci. Obálky jsou proto počítány pro letoun se zasunutými i vysunutými vztlakovými klapkami.

Tab.4.3 Vstupní aerodynamické podklady [4]

Sklon vztlakové čáry křídla ($\delta_{kl}=0^\circ$)	a	4	[rad ⁻¹]
Maximální součinitel vzlaku letounu ($\delta_{kl}=0^\circ$)	$C_{L\max}$	1,28	[-]
Maximální součinitel vzlaku letounu ($\delta_{kl}=37^\circ$)	$C_{L\max-kl}$	1,43	[-]
Minimální součinitel vzlaku letounu	$C_{L\min}$	-0,96	[-]
Plocha křídla	S	13,752	[m ²]
Střední geometrická tětíva křídla	c_{SGT}	1,515	[m]
Maximální rychlost vodorovného letu	v_h	250	[km/h]

Obálky jsou obvykle stanovovány pro výšku 0 m MSA, tak i pro výšku praktického dostupu.

Tab.4.4 Praktické dostupy letounu [4]

MAXIMÁLNÍ HMOTNOST		A	U	N
Výška letu	H_{\max}	5150	5000	4800 [m]
Hustota vzduchu	ρ	0,724	0,736	0,752 [kg/m ³]
MINIMÁLNÍ HMOTNOST		A	U	N
Výška letu	H_{\max}	5150	5150	5150 [m]
Hustota vzduchu	ρ	0,724	0,724	0,724 [kg/m ³]

V následující kapitole 4.2 a 4.3 je uveden postup výpočtu obálek pro případ letové a přistávací konfigurace letounu Z 242 L v akrobatické kategorii a výšku 0 m MSA. V případě detailní návrhu by bylo nezbytné porovnat obálky pro všechny třídy letounu.

4.2 Obálky zatížení se zasunutými vztlakovými klapkami

OBRATOVÁ OBÁLKA ($\Delta_{KL}=0^\circ$)

- Provozní násobky (FAR 23.337)

Kladný provozní násobek pro akrobatickou třídu je určen dle podmínky (4.1).

$$n_{\max} \geq 6 \quad (4.1)$$

Zvoleno $n_{\max} = 6$

Záporný provozní násobek je určen dle podmínky (4.2).

$$n_{\min} \geq |-0,5 \cdot n_{\max}| \quad (4.2)$$

Zvoleno $n_{\min} = -3,5$

- Návrhová cestovní rychlost v_C (FAR 23.335)

$$\frac{m_{\max}}{S} = \frac{2138,5}{148,0} = 14,4 \text{ lb/ft}^2 \quad (4.3)$$

$$\text{poměr } \frac{m_{\max}}{S} \leq 20$$

$$\Rightarrow \text{koeficient } K_1 = 36 \text{ (akrobatická třída)}$$

Návrhová cestovní rychlost se určí na základě podmínek (4.4) nebo (4.5).

$$v_C \geq K_1 \cdot \sqrt{\frac{m_{\max}}{S}} = 36 \cdot \sqrt{14,4} = 136,8 \text{ kt} \quad (4.4)$$

$$\Rightarrow 253,4 \text{ km/h}$$

$$v_C = 0,9 \cdot v_H = 0,9 \cdot 250 = 225 \text{ km/h} \quad (4.5)$$

Zvoleno $v_C = 250 \text{ km/h}$

- Návrhová rychlost střemhlavého letu v_D (FAR 23.335)

$$v_{C\min} = 225 \text{ km/h} \quad (4.6)$$

$$\text{koeficient } K_2 = 1,55 \text{ (akrobatická třída)}$$

Návrhová rychlost střemhlavého letu se určí na základě podmínky (4.7).

$$v_D \geq K_2 \cdot v_{C\min} = 1,55 \cdot 225 = 348,8 \text{ km/h} \quad (4.7)$$

Zvoleno $v_D = 350 \text{ km/h}$

- Návrhová obratová rychlost v_A (FAR 23.335)

Pro stanovení návrhové obratové rychlosti je potřeba nejprve určit pádovou rychlost. Ta je spočtena z rovnováhy sil v horizontálním letu (4.8).

$$L = G \quad (4.8)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_S^2 \cdot c_{Lmax} \cdot S = n \cdot m_{max} \cdot g$$

$$v_S = \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot m_{max} \cdot g}{\rho_0 \cdot S \cdot c_{Lmax}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 970 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 13,752 \cdot 1,28}}$$

$$v_S = 106,9 \text{ km/h}$$

Návrhová obratová rychlost se určí na základě podmínky (4.9).

$$v_A \geq v_S \cdot \sqrt{n_{max}} = 106,9 \cdot \sqrt{6} = 261,9 \text{ km/h} \quad (4.9)$$

Zvoleno $v_A = 262 \text{ km/h}$

- Návrhová obratová rychlost v_G

Je to rychlost při minimálním součiniteli vztlaku a při maximálním záporném násobku. Nejprve je nutné spočítat pádovou rychlost při letu na zádech (4.10).

$$v_{SG} = \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot m_{max} \cdot g}{\rho_0 \cdot S \cdot c_{Lmin}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot |-1| \cdot 970 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 13,752 \cdot |-0,96|}} \quad (4.10)$$

$$v_S = 123,5 \text{ km/h}$$

Návrhová obratová rychlost se určí na základě (4.11).

$$v_G \geq v_{SG} \cdot \sqrt{|n_{min}|} = 123,5 \cdot \sqrt{|-3,5|} = 230,9 \text{ km/h} \quad (4.11)$$

Zvoleno $v_G = 231 \text{ km/h}$

PORYVOVÁ OBÁLKA ($\Delta_{KL}=0^\circ$)

Nejprve se vypočte hmotnostní poměr letounu dle (4.12).

$$\mu_g = \frac{2 \cdot \left(\frac{m_{max}}{S}\right)}{\rho \cdot c_{SGT} \cdot a} = \frac{2 \cdot \left(\frac{970}{13,752}\right)}{1,225 \cdot 1,5146 \cdot 4} = 19,0 \quad (4.12)$$

Zmírňující součinitel poryvů se vypočítá podle (4.13).

$$k_g = \frac{0,88 \cdot \mu_g}{5,3 + \mu_g} = \frac{0,88 \cdot 19,0}{5,3 + 19,0} = 0,688 \quad (4.13)$$

Rychlosti poryvů U při rychlostech v_C a v_D jsou dány předpisem FAR 23:

$$U_C = 50 \text{ ft/s} = 15,25 \text{ m/s}$$

$$U_D = 25 \text{ ft/s} = 7,63 \text{ m/s}$$

- Poryvové násobky (FAR 23.341)

Násobky od poryvů jsou počítány následovně

$$n = 1 \pm \frac{k_g \cdot \rho_0 \cdot U \cdot v \text{ [m/s]} \cdot a}{2 \cdot \left(\frac{m_{\max} \cdot g}{S} \right)} \quad (4.14)$$

Poryvové násobky při rychlosti v_C

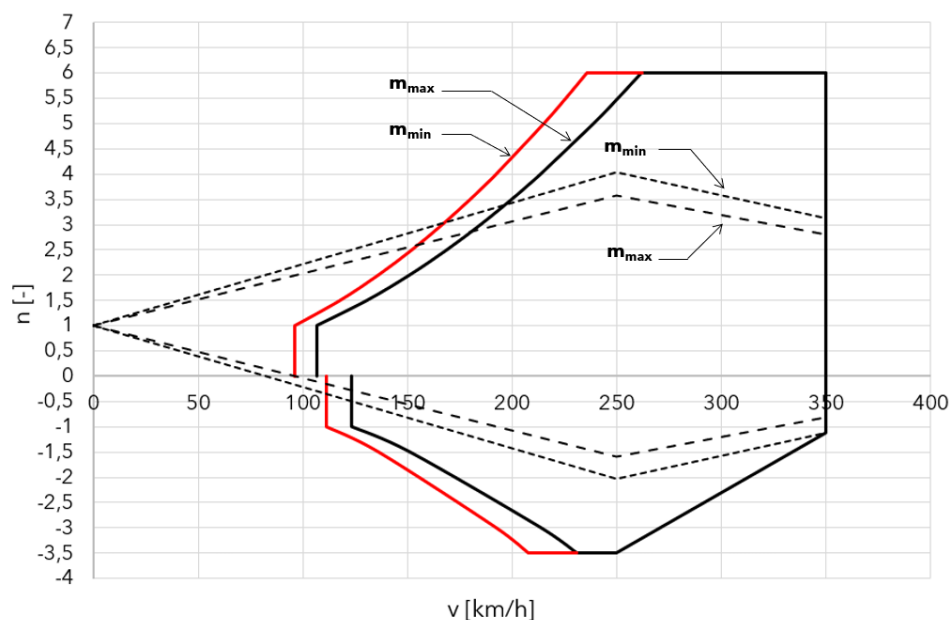
$$n_{v_{C+}} = 1 + \frac{0,688 \cdot 1,225 \cdot 15,25 \cdot 69,4 \cdot 4}{2 \cdot \left(\frac{970 \cdot 9,81}{13,752} \right)} = 3,58$$

$$n_{v_{C-}} = 1 - \frac{0,688 \cdot 1,225 \cdot 15,25 \cdot 69,4 \cdot 4}{2 \cdot \left(\frac{970 \cdot 9,81}{13,752} \right)} = -1,58$$

Poryvové násobky při rychlosti v_D

$$n_{v_{D+}} = 1 + \frac{0,688 \cdot 1,225 \cdot 7,63 \cdot 97,2 \cdot 4}{2 \cdot \left(\frac{970 \cdot 9,81}{13,752} \right)} = 2,80$$

$$n_{v_{D-}} = 1 - \frac{0,688 \cdot 1,225 \cdot 7,63 \cdot 97,2 \cdot 4}{2 \cdot \left(\frac{970 \cdot 9,81}{13,752} \right)} = -0,81$$



Obr. 4.1 Obratová a poryvová obálka (akrobatická třída, $H=0$ m MSA)

4.3 Obálky zatížení s vysunutými vztlakovými klapkami

OBRATOVÁ OBÁLKA ($\Delta_{kl}=37^\circ$)

- Provozní násobky (FAR 23.345)

Kladný provozní násobek pro všechny třídy letounu je dle (4.15)

$$n_{\max_{kl}} = 2 \quad (4.15)$$

- Návrhová rychlost s vysunutými vztlakovými klapkami v_F (FAR 23.335)

Pro stanovení této rychlosti je potřeba nejprve určit pádové rychlosti. Pádová rychlost se zasunutými vztlakovými klapkami byla spočtena dříve dle (4.8) a je rovna

$$v_S = 106,9 \text{ km/h}$$

Pádová rychlost s vysunutými vztlakovými klapkami je spočtena dle (4.17).

$$v_{SF} = \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot m_{\max} \cdot g}{\rho_0 \cdot S \cdot c_{L\max-kl}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 970 \cdot 9,80665}{1,225 \cdot 13,752 \cdot 1,43}} \quad (4.16)$$

$$v_{SF} = 101,2 \text{ km/h}$$

Návrhová rychlost s vysunutými vztlakovými klapkami se určí dle podmínky (4.17).

$$v_F \geq \max\{1,4 \cdot v_S; 1,8 \cdot v_{SF}\} \quad (4.17)$$

$$v_F \geq \max\{149,7; 182,1\}$$

Zvoleno

$$v_F = 185 \text{ km/h}$$

PORYVOVÁ OBÁLKA ($\Delta_{kl}=37^\circ$)

Rychlosti poryvů U při rychlosti v_F je dána předpisem.

$$U_F = 25 \text{ ft/s} = 7,63 \text{ m/s}$$

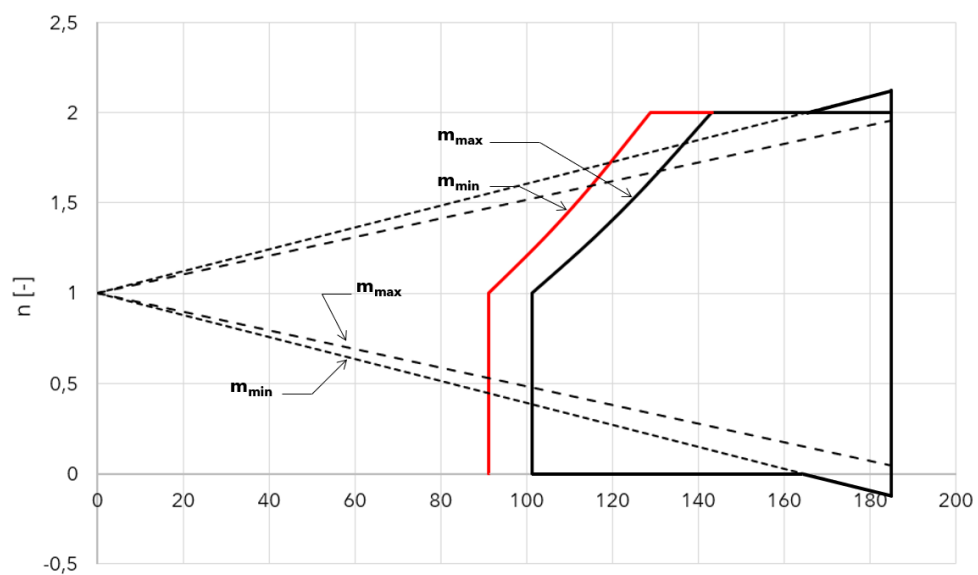
- Poryvové násobky (FAR 23.341)

Násobky od poryvů jsou počítány stejně jako v případě konfigurace bez vztlakových klapek dle rovnice (4.14).

Poryvové násobky při rychlosti v_F

$$n_{v_{F+}} = 1 + \frac{0,688 \cdot 1,225 \cdot 7,63 \cdot 52,8 \cdot 4}{2 \cdot \left(\frac{970 \cdot 9,81}{13,752}\right)} = 1,98$$

$$n_{v_{F-}} = 1 - \frac{0,688 \cdot 1,225 \cdot 7,63 \cdot 52,8 \cdot 4}{2 \cdot \left(\frac{970 \cdot 9,81}{13,752}\right)} = 0,02$$



Obr. 4.2 Obratová a poryvová obálka (akrobatická třída, $H=0$ m MSA, klapky vysunuty)

5 ZATÍŽENÍ KŘÍDLA

V této kapitole jsou uvedeny rozhodující složky zatížení křídla, sloužící jako vstupní parametr pro dimenzování konstrukce. Po dohodě s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že není důvod v této fázi návrhu zatížení počítat znovu. Rozhodující případy zatížení tak budou převzaty z firemní dokumentace [4].

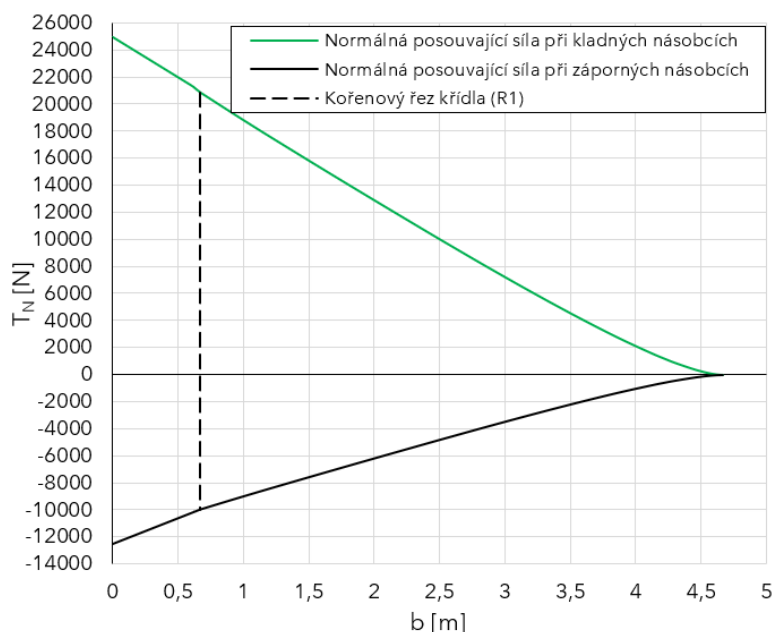
Odůvodněním je i to, že při rekonstrukci nedojde k narušení vnějšího tvaru. Aerodynamické zatížení tak zůstane stejné jako u stávajícího křídla. V případě setrvačného zatížení lze určité změny očekávat, jelikož bude jiné rozložení hmot na křídle (změna polohy palivové nádrže atd.) a tím se posune i centráž. V další fázi vývoje tak bude potřeba provést výpočet případů zatížení pro nové konstrukční řešení znovu.

5.1 Rozhodující případy zatížení

Na základě dodané dokumentace [4] byly vybrány rozhodující případy zatížení křídla. Pro dimenzování podélného systému křídla (pásnice a stojiny nosníků) je rozhodující normálová posouvající síla a normálový ohybový moment, příp. krouticí moment (výpočet smykových toků).

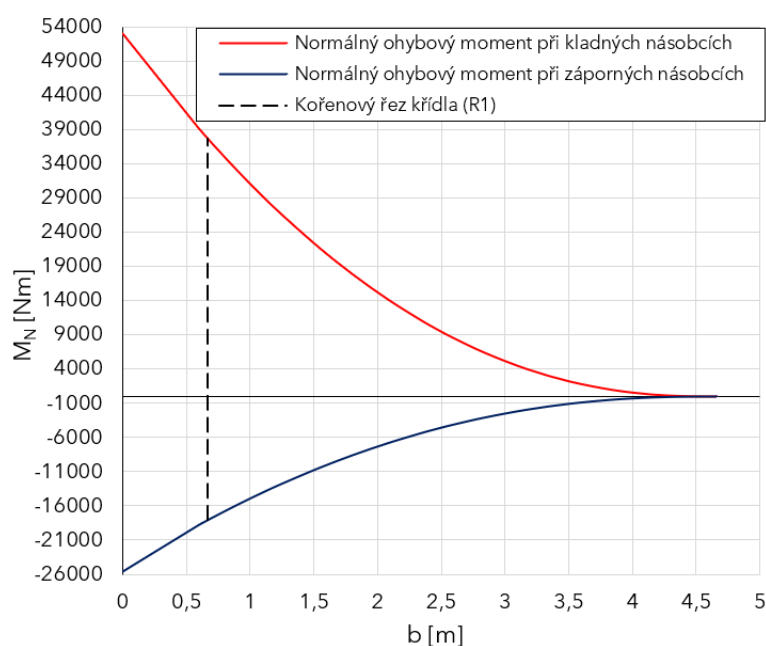
- Normálová posouvající síla a ohybový moment při kladných násobcích jsou maximální při symetrickém manévru a rychlosti v_D (350 km/h, 955 kg, násobek 6).
- Normálová posouvající síla a ohybový moment při záporných násobcích jsou maximální při symetrickém manévru a rychlosti v_C (250 km/h, 955 kg, násobek -3,5).
- Krouticí moment je maximální při křídélkovém manévru a rychlosti v_D (350 km/h, 1090 kg, násobek 2,53).

NORMÁLOVÁ POSOUVAJÍCÍ SÍLA



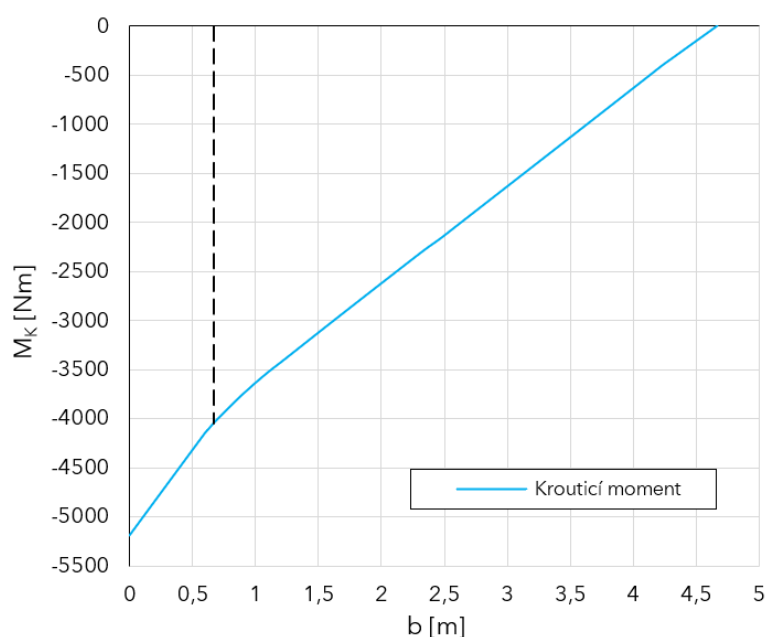
Řez	b	T_{N+}	T_{N-}
[-]	[m]	[N]	[N]
R1	0,67	20868	-9995
R2a	0,89	19499	-9344
R2	1,08	18336	-8791
R3	1,24	17364	-8328
R4	1,53	15620	-7498
R5	1,81	14012	-6731
R6	2,08	12421	-5970
R7	2,34	10957	-5270
R8	2,59	9508	-4576
R9	2,85	8073	-3886
R10	3,18	6264	-3017
R11	3,51	4523	-2178
R12	3,85	2814	-1353
R13	4,23	1154	-553

Obr. 5.1 Normálová posouvající síla-provozní zatížení

NORMÁLOVÝ OHYBOVÝ MOMENT

Řez [-]	b [m]	M_{n+} [Nm]	M_{n-} [Nm]
R1	0,67	37622	-18069
R2a	0,89	33182	-15941
R2	1,08	29588	-14219
R3	1,24	26696	-12832
R4	1,53	21846	-10505
R5	1,81	17787	-8556
R6	2,08	14166	-6816
R7	2,34	11197	-5388
R8	2,59	8598	-4137
R9	2,85	6357	-3059
R10	3,18	3991	-1920
R11	3,51	2211	-1063
R12	3,85	949	-455
R13	4,23	202	-96

Obr. 5.2 Normálový ohybový moment-provozní zatížení

KROUTICÍ MOMENT

Řez [-]	b [m]	M_K [Nm]
R1	0,67	-4043
R2a	0,89	-3762
R2	1,08	-3548
R3	1,24	-3385
R4	1,53	-3087
R5	1,81	-2812
R6	2,08	-2538
R7	2,34	-2286
R8	2,59	-2043
R9	2,85	-1788
R10	3,18	-1458
R11	3,51	-1129
R12	3,85	-785
R13	4,23	-403

Obr. 5.3 Krouticí moment-provozní zatížení

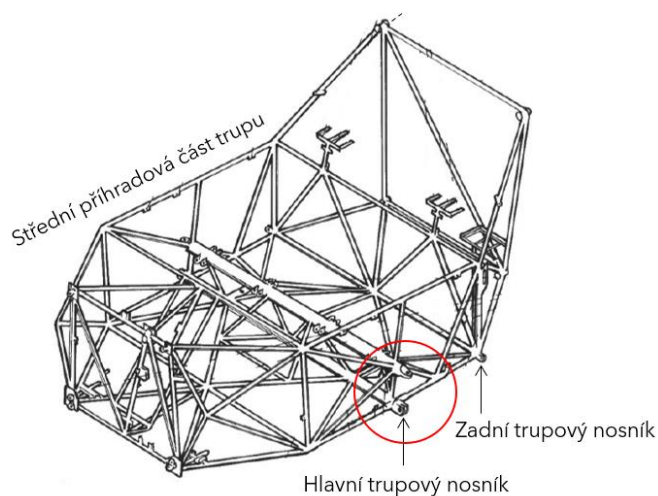
6 NÁVRH A PEVNOSTNÍ KONTROLA ZÁVĚSŮ KŘÍDLO-TRUP

Návrh se týká hlavních závěsů na křídle a trupu letounu. Konfigurace zadních závěsů zůstane zachována. Celkově se jedná o výraznou změnu koncepce oproti stávajícímu řešení. Je proto nutné znovu vypočítat reakční síly a podle toho nadimenzovat jednotlivé spoje. Současně je proveden i pevnostní výpočet hlavního čepu.

6.1 Konstrukční provedení závěsů

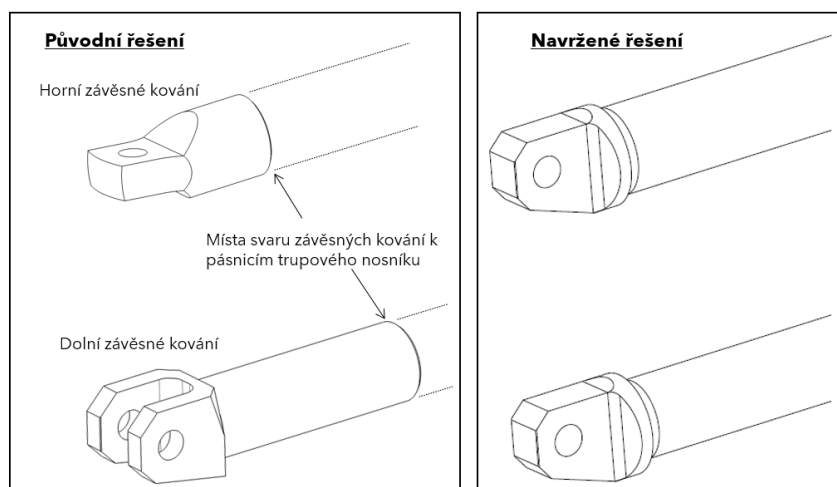
ZÁVĚSY NA TRUPU

Dle zadání je stanoveno, že nesmí dojít k narušení příhradové konstrukce trupu Obr. 6.1. Aby bylo možné vyhovět požadavku na vodorovnou orientaci čepů, je potřeba otočit horní oko o 90°. To lze provést bez velkých zásahů do původní konstrukce, protože závěsná kování jsou vyrobena zvlášť a následně přivařena k pásnicím nosníku viz Obr. 6.2.



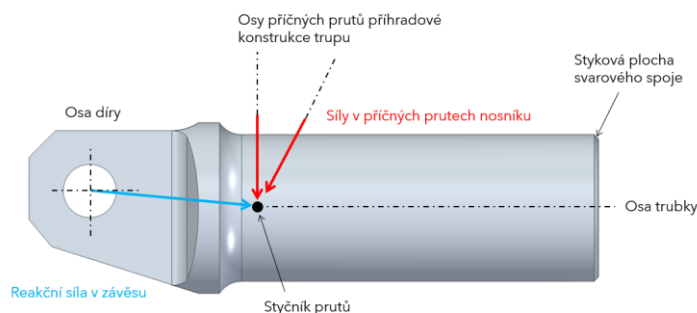
Obr. 6.1 Příhradový trup letounu [9]

Spojení křídla a trupu je nutné navrhnout také s ohledem na rozdílný materiál obou částí. Závěsy na trupu jsou vyrobeny z oceli, zatímco závěsy křídla budou duralové. Výhodné je tak řešit závěsy na trupu jako oka a závěsy na křídle jako vidlice. Zachová se tak potřebný prostor na dimenzování mohutnějšího duralového závěsu křídla.



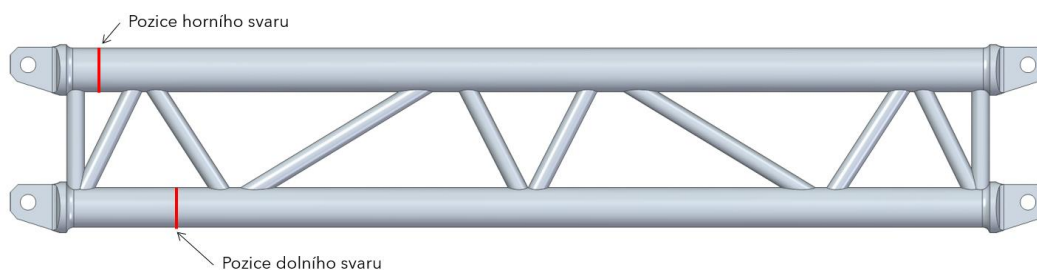
Obr. 6.2 Změna koncepce závěsů na hlavním nosníku trupu

Osa díry závěsu je vůči ose trubky posunutá ve svislém směru viz Obr. 6.3. Tím je zajištěno, že výsledná reakční síla v oku bude působit do styčnicku a nevytvářet nežádoucí ohyb závěsu.



Obr. 6.3 Schéma závěsného kování na trupu

Oba horní i dolní závěsy jsou navrženy shodně. Pouze zadní trubková část má jinou délku, tak aby svar vycházel mimo styčnick příčných prutů na nosníku viz Obr. 6.4.

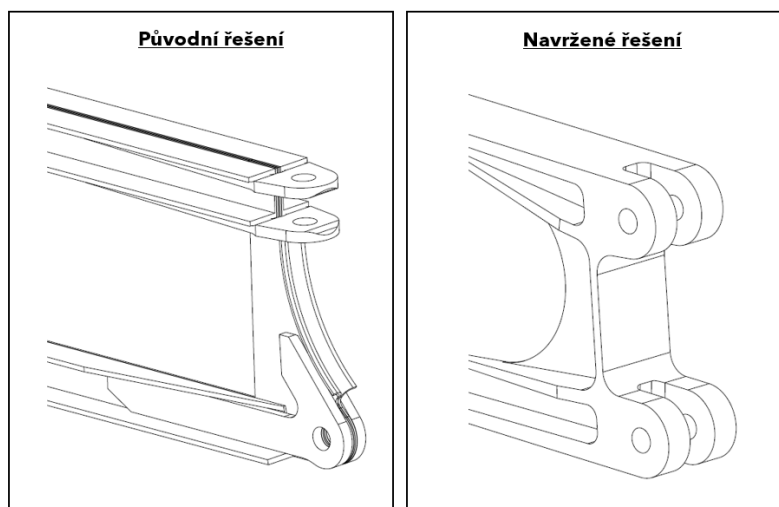


Obr. 6.4 Hlavní nosník trupu včetně přivařených závěsů

ZÁVĚSY NA KŘÍDLE

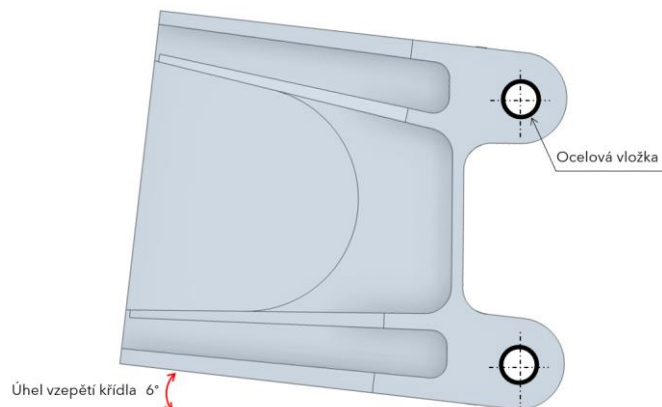
Závěsy křídla jsou nově vyfrézovány z jednoho polotovaru jako součást nosníku viz Obr. 6.5. V porovnání s původními ocelovými závěsy vyjdou mohutnější. Tím, že je však závěs koncipován jako vidlice, není omezen prostor pro dimenzování.

Velkou výhodou je, že odpadne nutnost spojování závěsných kování s nosníkem. Původní závěsy byly k pásnicím šroubovány. Kromě toho, že díra pro spoj zeslabuje nosný průřez, působí také jako koncentrátor napětí, což v takto kritickém místě není ideální.



Obr. 6.5 Změna závěsů na hlavním nosníku křídla

Nevýhodou duralových závěsů je větší otláčování. Proto bude potřeba do otvorů nalisovat ocelové vložky viz Obr. 6.6. Ty bude možné v případě nutnosti vyměnit, popř. přestružit otvory v závěsech.



Obr. 6.6 Schéma hlavních závěsů křídla

6.2 Výpočet reakcí v závěsech

Změna orientace závěsů vyžaduje provést nový výpočet reakčních sil.

VSTUPNÍ ÚDAJE

▪ Zatížení

Dle dodaných firemních podkladů [4] je pro dimenzování hlavních závěsů rozhodující případ s maximální posouvající silou T_N , resp. ohybovým momentem M_N při kladných násobcích zatížení. Pro zatížení zadního závěsu je rozhodující případ s maximálním tečným ohybovým momentem M_T .

Tab. 6.1 Rozhodující zatížení v místech závěsů [4]

	T_N	T_T	M_N	M_T	M_K
	[N]	[N]	[Nm]	[Nm]	[Nm]
Hlavní závěsy	21242	-1582	38622	-2899	-3224
Zadní závěs	14589	-2410	26569	-4391	-938

▪ Geometrické uspořádání závěsů

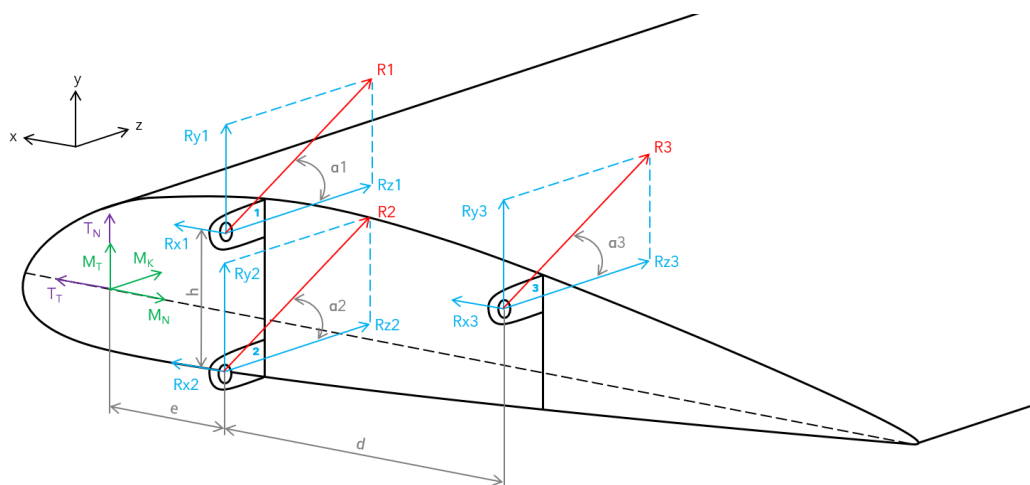
Schéma znázorňující nové uspořádání závěsů je patrné z Obr. 6.7. Charakteristické vzdálenosti jsou uvedeny v Tab. 6.2.

Tab. 6.2 Vzdálenosti potřebné pro výpočet reakcí

vzdálenost nosníků	d	478,7	[mm]
vzdálenost působiště sil	e	119,5	[mm]
rozteč ok závěsů	h	184,3	[mm]

POSTUP VÝPOČTU REAKCÍ

Zatížení závěsů v jednotlivých osách (x , y , z) je dáno příspěvky každého dílčího vnějšího zatížení (T_N , T_T , M_N , M_T a M_K), které na daný závěs působí.



Obr. 6.7 Schéma nového uspořádání závěsů křídla

Pro stanovení výslednic v jednotlivých závěsech je nutné zavést následující předpoklady:

- Zatížení ve směru osy x

Nevýhodou daného uspořádání závěsů je, že pro zachycení tečné síly T_T musí být v hlavních závěsech vymezena vůle mezi vidlicí a okem. Toho se však docílí vyložkováním při montáži. Proto je možné předpokládat, že se tečná síla rozdělí rovnoměrně na oba hlavní závěsy.

$$R_{x1} = -\frac{T_T}{2} \quad (6.1)$$

$$R_{x2} = -\frac{T_T}{2} \quad (6.2)$$

$$R_{x3} = 0 \quad (6.3)$$

- Zatížení ve směru osy y

Normálová posouvající síla T_N se rozdělí mezi závěsy hlavního a zadního nosníku v poměrech vzdáleností e a d . Navíc je potřeba započítat i příspěvek od krouticího momentu M_K .

$$R_{y1} = -\frac{T_N}{2} \cdot \frac{e+d}{d} - \frac{M_K}{2 \cdot d} \quad (6.4)$$

$$R_{y2} = -\frac{T_N}{2} \cdot \frac{e+d}{d} - \frac{M_K}{2 \cdot d} \quad (6.5)$$

$$R_{y3} = T_N \cdot \frac{e}{d} + \frac{M_K}{d} \quad (6.6)$$

- Zatížení ve směru osy z

Zatížení v tomto směru je nejvýznamnější díky ohybového momentu M_N . Ten je přenášen silovou dvojicí na hlavním nosníku. Navíc je připočítán i příspěvek od tečného momentu M_T .

$$R_{z1} = \frac{M_T}{2 \cdot d} + \frac{M_N}{h} \quad (6.7)$$

$$R_{z2} = \frac{M_T}{2 \cdot d} - \frac{M_N}{h} \quad (6.8)$$

$$R_{z3} = -\frac{M_T}{d} \quad (6.9)$$

- Stanovení výsledných reakcí

Výsledné reakční síly R v jednotlivých závěsech se určí vektorovým součtem. Je stanoven i sklon jejich působení α .

$$R_1 = \sqrt{R_{x1}^2 + R_{y1}^2 + R_{z1}^2} \quad \alpha_1 = \arctg\left(\frac{R_{y1}}{R_{z1}}\right) \quad (6.10)$$

$$R_2 = \sqrt{R_{x2}^2 + R_{y2}^2 + R_{z2}^2} \quad \alpha_2 = \arctg\left(\frac{R_{y2}}{R_{z2}}\right) \quad (6.11)$$

$$R_3 = \sqrt{R_{x3}^2 + R_{y3}^2 + R_{z3}^2} \quad \alpha_3 = \arctg\left(\frac{R_{y3}}{R_{z3}}\right) \quad (6.12)$$

VÝSLEDNÉ HODNOTY

Hodnoty reakčních sil v Tab.6.3 odpovídají provoznímu zatížení.

Tab.6.3 Maximální reakce v závěsech křídla (provozní zatížení)

Závěs	Případ zatížení	R_x	R_y	R_z	R	α
		[N]	[N]	[N]	[N]	[°]
1	$T_N/M_N \max$	791	-9905	206530	206769	2,7
2	$T_N/M_N \max$	791	-9905	-212586	212818	2,7
3	$M_T \max$	0	2922	20342	20551	8

Počtetní reakční síla se stanoví vynásobením součinitelem bezpečnosti 1,5. V případě návrhu závěsů je navíc předepsáno pracovat se zvyšujícím součinitelem bezpečnosti, který je roven 1,15 [13].

$$R_{zvýšené\ početní} = 1,5 \cdot 1,15 \cdot R_{provozní} \quad (6.13)$$

Tab.6.4 Výsledné reakce v závěsech křídla

Závěs	$R_{provozní}$	$R_{početní}$	$R_{zvýšené\ početní}$	α
	[N]	[N]	[N]	[°]
1	206769	310153	356677	2,7
2	212818	319227	367111	2,7
3	20551	30827	35451	8

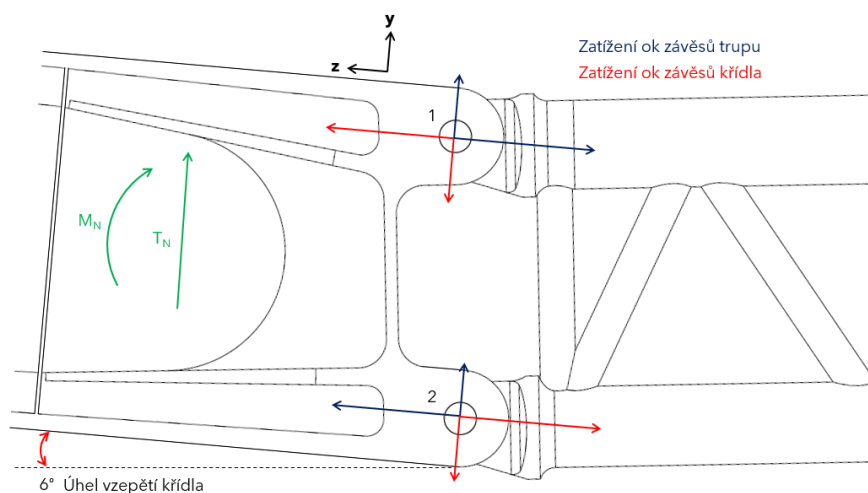
6.3 Pevnostní kontrola ok závěsů

K výpočtu je využit program Ministatik. Kontrola závěsných ok se provádí s ohledem na pevnost i deformaci při uvážení těchto způsobů porušení:

- Utržení oka (namáhání tahem)
- Vysmeknutí čepu (namáhání tahem)
- Otláčení oka (namáhání tlakem)

Do výpočtu jsou zahrnuty opravné součinitele vyjadřující vlivy, jako je např. maximální dovolená deformace, nepřesnost výroby nebo druh zatížení.

Celá metodika včetně diagramů jednotlivých součinitelů je zpracována v podkladech [14]



Obr. 6.8 Schéma zatížení ok hlavních závěsů

VSTUPNÍ ÚDAJE

- Materiál

Na výrobu závěsů bude využit materiál dle Tab. 6.5.

Tab. 6.5 Materiálové charakteristiky závěsů

	Závěsy křídla	Závěsy trupu	
Materiál	2124 T851	L-CM3.7	
Mez kluzu	380	686	[MPa]
Mez pevnosti	440	883	[MPa]

- Zatížení

Oka závěsů jsou zatěžována výslednicemi R dle Tab.6.4. Do programu Ministatik je ale potřeba zadávat početní zatížení viz Tab. 6.6. Přepočet na zvýšené početní zatížení se provede automaticky. Z důvodu vzepětí křídla (6°) je nutné také přepočítat úhel působení sil α do trupu.

Tab. 6.6 Vstupní zatížení do programu Ministatik

Závěs	$R_{\text{početní}}$	$\alpha_{\text{křídlo}}$	α_{trup}	
1	310153	2,7	8,7	[N]
2	319227	2,7	8,7	[N]
3	30827	8	14	[N]

VÝSLEDNÉ HODNOTY

Tab. 6.7 Horní závěs křídla

HLAVNÍ ZÁVĚS KŘÍDLA: HORNÍ VIDLICE				
Mez pevnosti	440	[MPa]		
Mez kluzu	380	[MPa]		
Tlaková síla (početní)	310153	[N]		
Úhel působení síly	2,7	[°]		
Uložení čepu	H8	[-]		
Vliv nepřesnosti výroby	1	[-]		
Vliv druhu zatížení	1	[-]		
A	30	[mm]		
B	60	[mm]		
C	18	[mm]		
D	24	[mm]		
S	48	[mm]		
KONTROLA OKA S OHLEDEM NA:			PEVNOST	DERFORMACI
Otlačení oka				
Napětí	σ_{otl}	[MPa]	269	269
Mez pevnosti	$\sigma_{dov.otl}$	[MPa]	1329	710
Součinitel rezervy	η	[1]	4,94	2,64

Tab. 6.8 Dolní závěs křídla

HLAVNÍ ZÁVĚS KŘÍDLA: DOLNÍ VIDLICE				
Mez pevnosti	440	[MPa]		
Mez kluzu	380	[MPa]		
Tahová síla (početní)	319227	[N]		
Úhel působení síly	2,7	[°]		
Uložení čepu	H8	[-]		
Vliv nepřesnosti výroby	1	[-]		
Vliv druhu zatížení	1	[-]		
A	30	[mm]		
B	60	[mm]		
C	18	[mm]		
D	24	[mm]		
S	48	[mm]		
KONTROLA OKA S OHLEDEM NA:			PEVNOST	DERFORMACI
Utržení oka				
Napětí	σ_{utr}	[MPa]	222	185
Mez pevnosti	Rm	[MPa]	440	363
Součinitel rezervy	η	[1]	1,98	1,97
Roztržení oka a vysmeknutí čepu				
Napětí	σ_{otl}	[MPa]	277	277
Dovolené napětí v otačení	$\sigma_{dov.otl}$	[MPa]	495	476
Součinitel rezervy	η	[1]	1,79	1,72

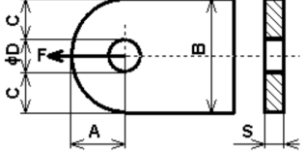
Tab. 6.9 Horní závěs trupu

HLAVNÍ ZÁVĚS TRUPU: HORNÍ OKO				
Mez pevnosti	883	[MPa]		
Mez kluzu	686	[MPa]		
Tlaková síla (početní)	310153	[N]		
Úhel působení síly	0	[°]		
Uložení čepu	H8	[-]		
Vliv nepřesnosti výroby	1	[-]		
Vliv druhu zatížení	1	[-]		
A	23	[mm]		
B	45	[mm]		
C	12,6	[mm]		
D	20	[mm]		
S	27	[mm]		
KONTROLA OKA S OHLEDEM NA:			PEVNOST	DERFORMACI
Otlačení oka				
Napětí	σ_{otl}	[MPa]	574	574
Mez pevnosti	$\sigma_{dov.otl}$	[MPa]	2667	1305
Součinitel rezervy	η	[1]	4,64	2,27

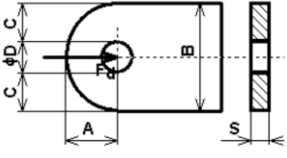
Tab. 6.10 Dolní závěs trupu

HLAVNÍ ZÁVĚS TRUPU: DOLNÍ OKO				
Mez pevnosti	883	[MPa]		
Mez kluzu	686	[MPa]		
Tahová síla (početní)	319227	[N]		
Úhel působení síly	8,7	[°]		
Uložení čepu	H8	[-]		
Vliv nepřesnosti výroby	1	[-]		
Vliv druhu zatížení	1	[-]		
A	23	[mm]		
B	45	[mm]		
C	12,6	[mm]		
D	20	[mm]		
S	27	[mm]		
KONTROLA OKA S OHLEDEM NA:			PEVNOST	DERFORMACI
Utržení oka				
Napětí	σ_{utr}	[MPa]	563	469
Mez pevnosti	Rm	[MPa]	883	662
Součinitel rezervy	η	[1]	1,57	1,41
Roztržení oka a vysmeknutí čepu				
Napětí	σ_{otl}	[MPa]	591	591
Dovolené napětí v otlačení	$\sigma_{dov.otl}$	[MPa]	861	797
Součinitel rezervy	η	[1]	1,46	1,35

Tab. 6.11 Zadní závěs křídla-namáhání tahem

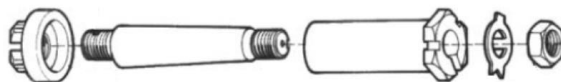
ZADNÍ ZÁVĚS KŘÍDLA: OKO				
Mez pevnosti	440	[MPa]		
Mez kluzu	380	[MPa]		
Tahová síla (početní)	30827	[N]		
Úhel působení síly	0	[°]		
Uložení čepu	H8	[-]		
Vliv nepřesnosti výroby	1	[-]		
Vliv druhu zatížení	1	[-]		
A	20	[mm]		
B	42	[mm]		
C	15	[mm]		
D	12	[mm]		
S	7,5	[mm]		
KONTROLA OKA S OHLEDEM NA:			PEVNOST	DERFORMACI
Utržení oka				
Napětí	σ_{utr}	[MPa]	164	137
Mez pevnosti	Rm	[MPa]	440	384
Součinitel rezervy	η	[1]	2,68	2,81
Roztržení oka a vysmeknutí čepu				
Napětí	σ_{otl}	[MPa]	343	343
Dovolené napětí v otlacení	$\sigma_{dov.otl}$	[MPa]	714	611
Součinitel rezervy	η	[1]	2,09	1,78

Tab. 6.12 Zadní závěs křídla-namáhání tlakem

ZADNÍ ZÁVĚS KŘÍDLA: OKO				
Mez pevnosti	440	[MPa]		
Mez kluzu	380	[MPa]		
Tlaková síla (početní)	30827	[N]		
Úhel působení síly	0	[°]		
Uložení čepu	H8	[-]		
Vliv nepřesnosti výroby	1	[-]		
Vliv druhu zatížení	1	[-]		
A	20	[mm]		
B	42	[mm]		
C	15	[mm]		
D	12	[mm]		
S	7,5	[mm]		
KONTROLA OKA S OHLEDEM NA:			PEVNOST	DERFORMACI
Otlačení oka				
Napětí	σ_{otl}	[MPa]	343	343
Mez pevnosti	$\sigma_{dov.otl}$	[MPa]	1329	710
Součinitel rezervy	η	[1]	3,88	2,07

6.4 Pevnostní kontrola čepu

Současné spojovací čepy hlavních závěsů jsou navrženy jako kuželové viz Obr. 6.9. Toto řešení je vhodné k usnadnění montáže a jednoduchému vymezení vůlí dotažením matice. Je však náročné na přesnost výroby, tak aby čep rovnoměrně dosedal na všech vnitřních plochách pouzdra. Je zde riziko, že čep dosedne jen na ploše o menším průměru, a tím vznikne nežádoucí vůle.



Obr. 6.9 Současné provedení čepů hlavních závěsů [9]

Byla proto zvážena i možnost využití klasických válcových čepů, které jsou jednodušší na výrobu. Výrobou všech spojovaných prvků (závěsy, čepy) na CNC obráběcích strojích by se zajistila přesnost bez nutnosti použití vymešovacích prvků, jako je tomu u stávajícího řešení.

VSTUPNÍ ÚDAJE

▪ Materiál

Na výrobu čepů bude využit stávající materiál dle Tab. 6.13.

Tab. 6.13 Materiálové charakteristiky čepu [4]

	Hlavní čepy	Zadní čep	
Materiál	L-ROLN	L-CM3.7	
Mez kluzu	1325	686	[MPa]
Mez pevnosti	1471	883	[MPa]

▪ Zatížení

Čep je zatěžován silou R , což je nejvyšší výsledná reakce v závěsech dle Tab.6.4 . Jako pro návrh ok, je i zde počítáno se zvýšeným početním zatížením [13].

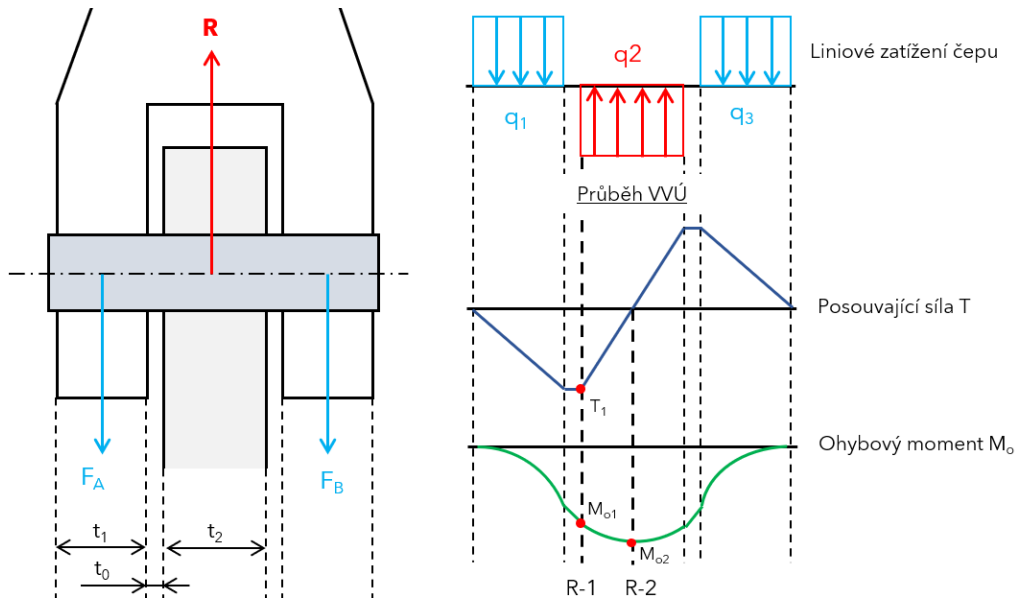
Tab. 6.14 Zatížení čepu

Závěs	Rzvýšené početní	
Hlavní	356677	[N]

V Tab.6.15 jsou uvedeny údaje potřebné pro dimenzování čepu. Rozměry a geometrie jsou patrné z Obr. 6.10.

Tab.6.15 Vstupní údaje pro výpočet hlavního čepu

Zatěžující síla	R	367111	[N]
Šířka mezery	t_0	0,1	[mm]
Tloušťka vidlice	t_1	24	[mm]
Tloušťka oka	t_2	27	[mm]
Průměr čepu	d	20	[mm]
Modul průřezu v ohybu	W_0	1571	[mm ³]
Plocha průřezu čepu	S	314	[mm ²]
Mez pevnosti čepu	R_m	1471	[MPa]
Součinitel plasticity [14]	k	1,675	[1]



Obr. 6.10 Schéma výpočtu čepu

POSTUP VÝPOČTU ČEPU

Na základě podmínek silové rovnováhy se dopočítají reakce čepu ve styčných plochách.

$$F_A = F_B = \frac{R_1}{2} [N] \quad (6.14)$$

Reálnějšího průběhu zatížení se dosáhne nahrazením osamělých sil pomocí spojitého liniového zatížení q .

$$q_1 = \frac{F_A}{t_1} [Nmm^{-1}] \quad (6.15)$$

$$q_2 = \frac{R_1}{t_2} [Nmm^{-1}]$$

Následně je možné vypočítat průběhy výsledných vnitřních účinků VVÚ a stanovit nebezpečné průřezy čepu. Dle Obr. 6.10 jsou zvoleny dva průřezy (R-1, R-2), a to s maximem posouvající síly a s maximem ohybového momentu.

- Posouvající síla

$$T_1 = q_1 \cdot t_1 [N] \quad (6.16)$$

- Ohybový moment

$$M_{o1} = q_1 \cdot t_1 \cdot \left(\frac{t_1}{2} + t_0\right) [Nmm] \quad (6.17)$$

$$M_{o2} = q_1 \cdot t_1 \cdot \left(\frac{t_1}{2} + t_0 + \frac{t_2}{2}\right) - q_2 \cdot \frac{t_2}{2} \cdot \left(\frac{t_2}{4}\right) [Nmm]$$

Úlohu je nutné počítat jako kombinované namáhání, jelikož normálová i smyková napjatost je u takto krátkých prutů významná. Redukované napětí je vypočteno podle podmínky plasticity HMM.

- Průměrné nominální smykové napětí od posouvající síly

$$\tau = \frac{T}{S} \text{ [MPa]} \quad (6.18)$$

- Normálové napětí od ohybového momentu

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o \cdot k} \text{ [MPa]} \quad (6.19)$$

- Redukované napětí podle podmínky plasticity HMM

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3 \cdot \tau^2} \text{ [MPa]} \quad (6.20)$$

Dále je ještě provedena kontrola čepu na otláčení:

- Měrný tlak

$$p_1 = \frac{F_A}{d \cdot t_1} \text{ [MPa]} \quad (6.21)$$

$$p_2 = \frac{R_1}{d \cdot t_2} \text{ [MPa]}$$

- Součinitele rezervy vzhledem k pevnosti η_p

$$\eta_p = \frac{R_m}{\sigma_{red}} \text{ [1]} \quad (6.22)$$

- Součinitele rezervy vzhledem k otláčení čepu η_o

$$\eta_o = \frac{R_m}{p} \text{ [1]} \quad (6.23)$$

VÝSLEDNÉ HODNOTY

Výsledky pevnostní kontroly včetně vyčíslení součinitelů rezerv udává Tab. 6.16.

Tab. 6.16 Výsledné hodnoty pevnostní kontroly čepu hlavního závěsu

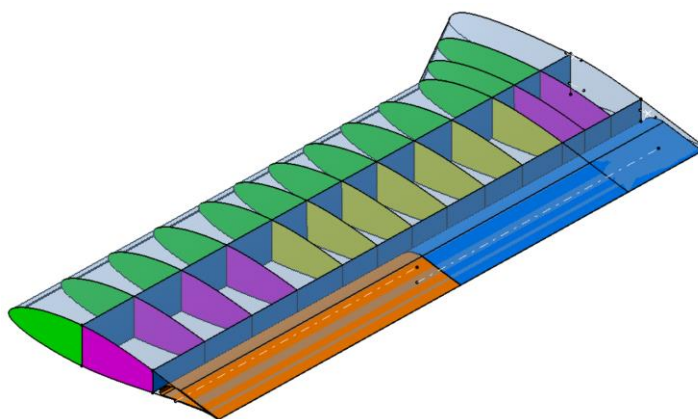
Pevnostní kontrola čepu				
<i>Řezy</i>		<i>R-1</i>	<i>R-2</i>	
Liniové zatížení	q	7648	13597	[Nmm ⁻¹]
Posouvající síla	T	183555		[N]
Ohybový moment	M _o	2221020	3460019	[Nmm]
Smykové napětí	τ	584		[MPa]
Normálové napětí	σ	844	1315	[MPa]
Redukované napětí	σ _{red}	1318	1315	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,12	1,12	[1]
Kontrola čepu na otláčení				
Měrný tlak	p	382	680	[MPa]
Součinitel rezervy	η	3,85	2,16	[1]

7 NÁVRH A PEVNOSTNÍ KONTROLA NOSNÍKŮ KŘÍDLA

V této kapitole je proveden návrh hlavního a zadního nosníku křídla včetně pevnostní kontroly ve vybraných řezech. Tato kapitola přímo navazuje na tu předchozí, kde byly navrženy závěsy, resp. kořenová část nosníků.

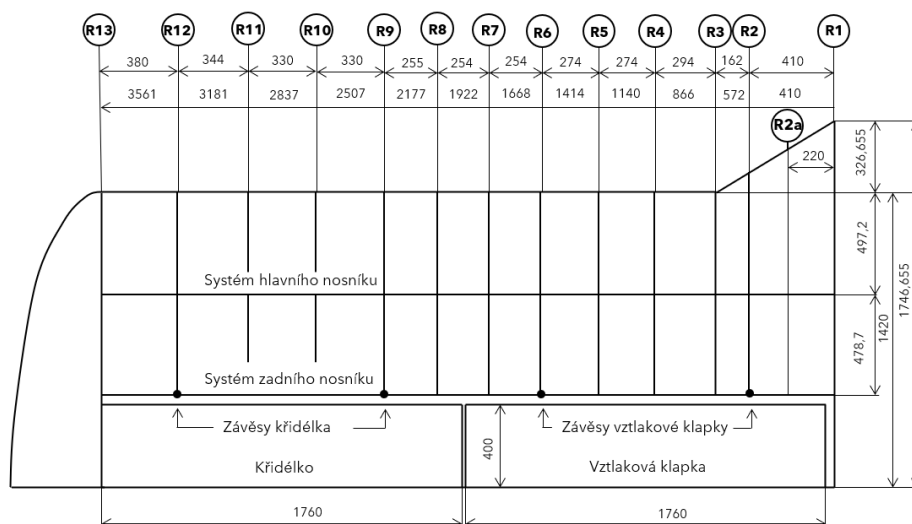
7.1 Konstrukční provedení nosníků

Podmínkou je uzpůsobit návrh tak, aby byl dodržen vnější tvar křídla včetně zachování pozic jednotlivých částí. Proto byl vytvořen referenční model, který popisuje vzájemné geometrické vztahy mezi teoretickým obrysem křídla, rovinami nosníků, rovinami žebek, závěsných bodů křídélka, vztlačových klapek atd.



Obr. 7.1 Referenční model křídla

Na základě referenčního modelu byl vytvořen referenční výkres Obr. 7.2, ze kterého jsou patrné základní rozměry křídla. Polohy žebek (R1-R13) zůstanou zachovány a budou využity i jako referenční řezy pro pevnostní kontrolu nosníků v kapitole 7.2.



Obr. 7.2 Referenční výkres křídla

Snahou je navrhnout oba nosníky tak, aby bylo efektivně využito materiálu se zachováním minimální hmotnosti. Navržená konstrukce nesmí být náchylná na koncentrace napětí, tedy efektivní z hlediska životnosti. Důležité je i možnost daný tvar vyrobit. Tím, že bude využito CNC frézování, není problém optimálních tvarů docílit.

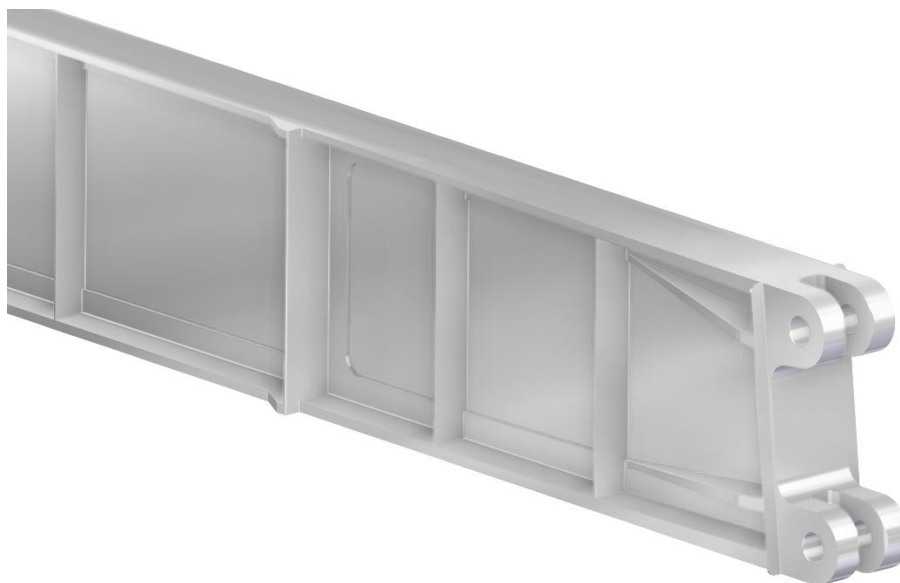
7.1.1 Hlavní nosník

Hlavník nosník je mezi žebry R1-R9 frézován včetně závěsů viz Obr. 7.3.



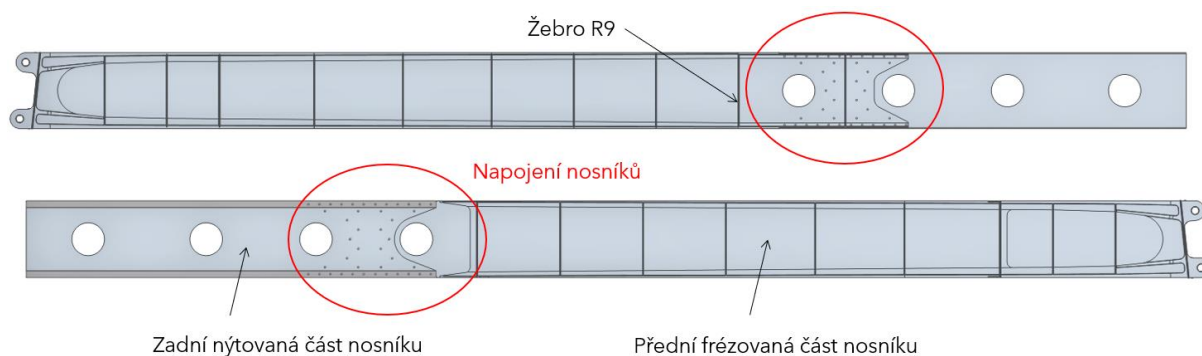
Obr. 7.3 Frézovaná část hlavního nosníku křídla

Po celé délce nosníku jsou vyfrézovány výztuhy, které kromě stabilizace stojiny slouží také k upevnění žebek křídla. Pro upevnění krajního žebra integrální nádrže je tato oblast navíc zesílena viz Obr. 7.4.



Obr. 7.4 Kořenová část hlavního nosníku křídla

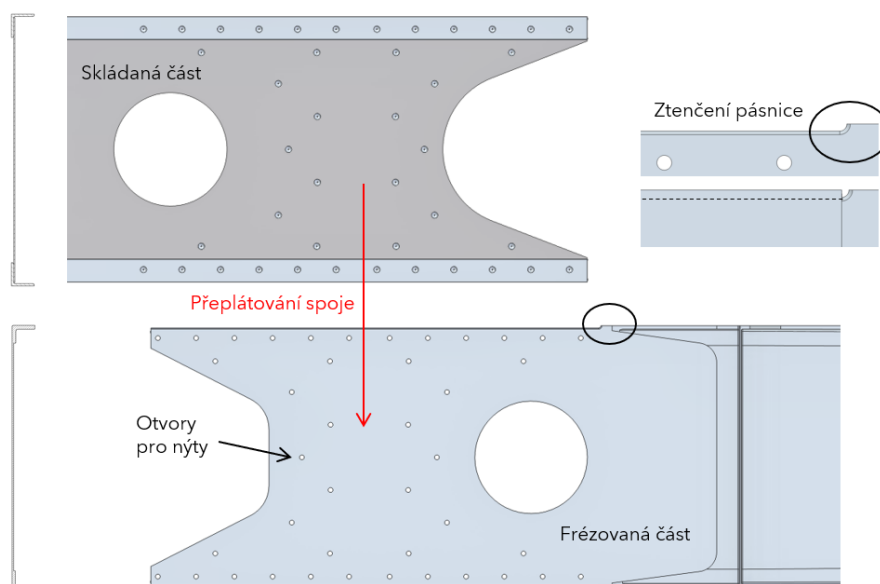
Frézovat nosník v celé délce by bylo neekonomické a navíc zbytečné, jelikož na konci křídla už není tak vysoké zatížení a integrální nádrž končí právě žebrem R9. Proto je k frézované části nosníku připojena koncová nýtovaná část viz Obr. 7.5.



Obr. 7.5 Sestava hlavního nosníku

Aby byl zachován teoretický obrys křídla, jsou pásnice frézované části nosníku ztenčeny o tloušťku profilu pásnice skládaného nosníku viz Obr. 7.6. Tím oba nosníky líčují s teoretickým obrysem. Při dokončovacích operacích je nutné přechod ztenčení frézovat s velkým poloměrem a poté začistit a tím snížit vliv koncentrace napětí.

Obě části jsou nakonec spojeny plnými nýty.

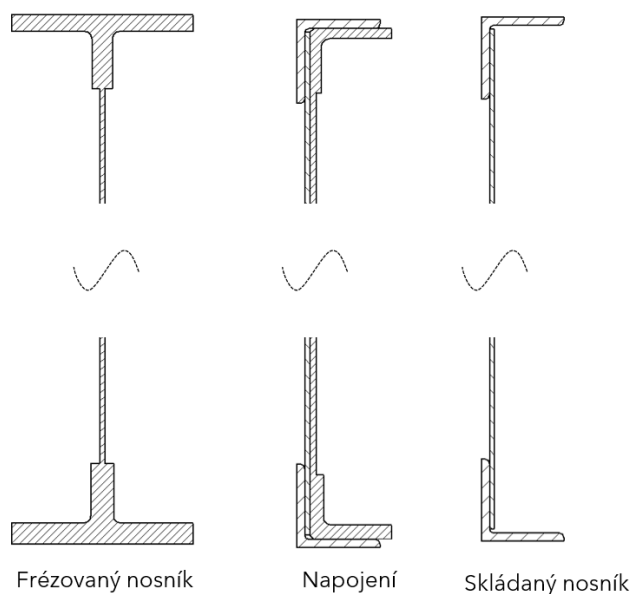


Obr. 7.6 Detail napojení hlavního nosníku

Z důvodu snižujícího se zatížení od kořene směrem ke konci křídla jsou pásnice plynule zeslabovány, jak je patrné z Obr. 7.7. T-profil pásnic v oblasti žebér R1-R9 přechází těsně za žebrem R9 do tvaru L-profil, tak aby bylo možné napojení zadní části nosníku viz Obr. 7.8. Stojinu zadní části nosníku pak tvoří plech, ke kterému jsou přinýtovány L-profily pásnic o konstantním průřezu po zbývající části nosníku. Stojina je navržena jako stabilní a v zadní části je mezi žebry odlehčena otvory.



Obr. 7.7 Plynulé zeslabení pásnice

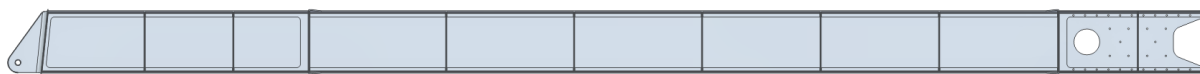


Obr. 7.8 Průřezy hlavního nosníku

Jednotlivé řezy nosníkem včetně rozměrů jsou zobrazeny na výkresu hlavního nosníku jako součást externí přílohy diplomové práce.

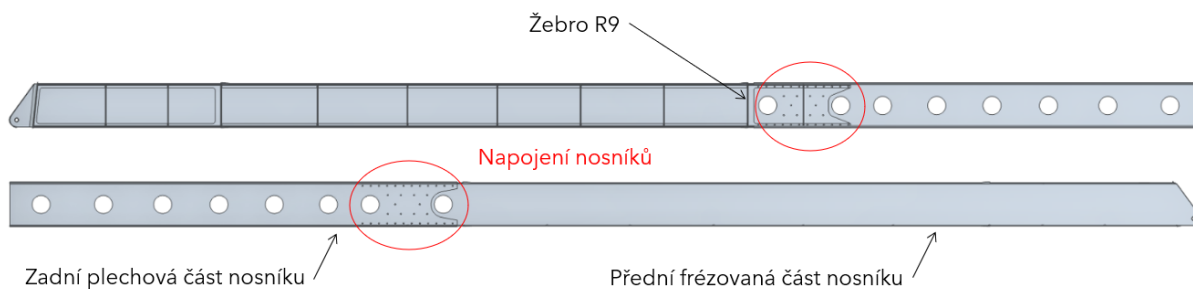
7.1.2 Zadní nosník

Zadní nosník je navržen ve stejném stylu jako nosník hlavní, tzn. v oblasti závěsu a integrální nádrže (R1-R9) je frézován.



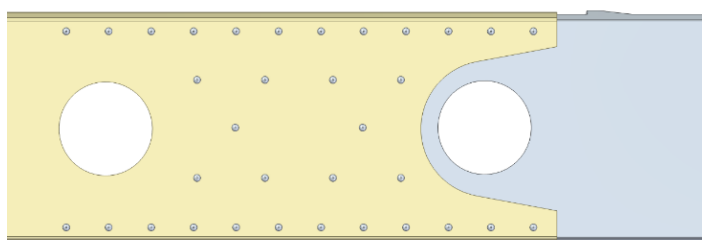
Obr. 7.9 Zadní nosník křídla

Za žebrem R9 (konec integrální nádrže) je k frézované části nosníku připojena koncová část tvořená ohýbaným plechem viz Obr. 7.10.



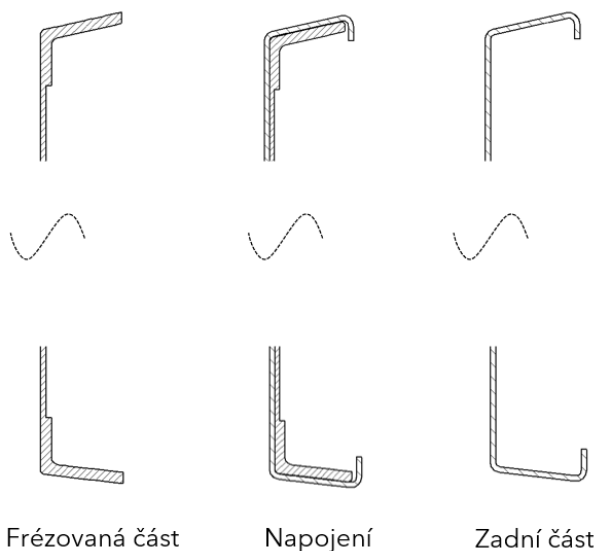
Obr. 7.10 Sestava zadního nosníku

Obě části jsou spojeny plnými nýty. Detail napojení je znázorněn na Obr. 7.11.



Obr. 7.11 Detail napojení zadního nosníku

Pásnice frézované i plechové části mají po celém rozpětí konstantní průřez. Stojina je navržena jako stabilní a v zadní části je mezi žebry odlehčena otvory.



Obr. 7.12 Průřezy zadního nosníku

7.2 Pevnostní kontrola nosníků

Pevnostní kontrola nosníků je provedena ve vybraných řezech křídla (R1-R13) viz Obr. 7.2. K matematickému zpracování výpočtů je využit software MS Excel. Výsledná bezpečnost a efektivnost konstrukce je kvantitativně vyjádřena pomocí součinitelů rezerv v kapitole 7.2.2.

VSTUPNÍ ÚDAJE

▪ Materiál

Na výrobu nosníků je využit materiál dle normy 2124. Jedná se o tepelně zpracovaný dural s charakteristikami dle Tab. 7.1.

Tab. 7.1 Materiálové charakteristiky-dural 2124 [4]

Materiál	2124 T851		
Smluvní mez kluzu	$R_{p0,2}$	380	[MPa]
Mez pevnosti	R_m	440	[MPa]

▪ Zatížení

Pro dimenzování podélného systému křídla jsou rozhodující případy s maximální normálovou posouvající silou, resp. ohybovým momentem při kladných násobcích dle kapitoly 5.1. Dané provozní zatížení je nutné přepočítat na početní zatížení vynásobením součinitelem bezpečnosti 1,5.

$$T_{poč} = 1,5 \cdot T_{prov} [N] \quad (7.1)$$

$$M_{o,poč} = 1,5 \cdot M_{o,prov} [Nmm]$$

Pro výpočet dimenzí dolní pásnice ve frézované oblasti hlavního nosníku (R1-R9) je navíc uvažován i případ zatížení odpovídající horizontálnímu letu cestovní rychlostí v_c a násobku zatížení $n = 1$, a to bez přepočtu na početní zatížení viz Tab. 7.3.

Tab. 7.2 Rozhodující početní zatížení

Řez	Souřadnice	$T_{poč}$	$M_{o,poč}$
[-]	[m]	[N]	[Nmm]
R1	0,67	31301	56433348
R2a	0,89	29248	49772671
R2	1,08	27505	44381466
R3	1,24	26045	40043494
R4	1,53	23430	32769411
R5	1,81	21018	26680953
R6	2,08	18632	21248559
R7	2,34	16435	16795849
R8	2,59	14261	12897706
R9	2,85	12109	9535006
R10	3,18	9397	5986960
R11	3,51	6784	3317099
R12	3,85	4220	1423926
R13	4,23	1731	303025

Tab. 7.3 Zatížení při $n=1$

Řez	Souřadnice	$M_o (n=1)$
[-]	[m]	[Nmm]
R1	0,67	6447012
R2a	0,89	5685850
R2	1,08	5069717
R3	1,24	4574049
R4	1,53	3743011
R5	1,81	3047286
R6	2,08	2426740
R7	2,34	1918036
R8	2,59	1472898
R9	2,85	1088957

7.2.1 Postup výpočtu

Posouvající síla T a ohybový moment M_o jsou rozděleny na oba nosníky v poměru jejich ohybových tuhostí $k_{1,2}$ ¹. Je proto potřeba stanovit kvadratické momenty průřezů nosníků $J_{1,2}$, což je provedeno pomocí softwaru CATIA.

- Poměry ohybových tuhostí nosníků

$$k_1 = \frac{E_1 \cdot J_1}{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2} [1] \quad (7.2)$$

$$k_2 = \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2} [1]$$

- Posouvající síla

$$T_1 = T_{poč} \cdot k_1 [N] \quad (7.3)$$

$$T_2 = T_{poč} \cdot k_2 [N]$$

- Ohybový moment

$$M_{o1} = M_{o_{poč}} \cdot k_1 [Nmm] \quad (7.4)$$

$$M_{o2} = M_{o_{poč}} \cdot k_2 [Nmm]$$

VÝPOČET PÁSNIC

Pásnice nosníku přenáší zatížení výhradně od ohybového momentu. Normálová napětí od ohybu je možné v pásnicích s malou výškou považovat za konstantní a pro výpočet využít zjednodušeného vztahu. [15]

- Normálové napětí v pásnicích nosníků

$$\sigma_1 = \frac{M_{o1}}{h_{e1} \cdot A_{p1}} [MPa] \quad (7.5)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_{o2}}{h_{e2} \cdot A_{p2}} [MPa]$$

Kde h_e je efektivní výška nosníku a A_p průřezová plocha pásnic.

Pásnice nosníku je nutné kontrolovat vzhledem k několika mezním stavům. Konkrétně je zohledněna stabilita, statická pevnost a částečně i únava materiálu.

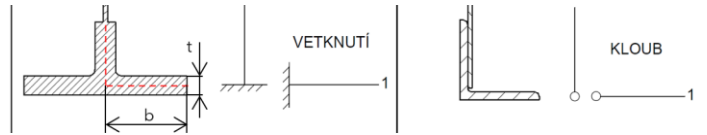
- Stabilita

U pásnic namáhaných tlakem je rozhodující lokální ztráta stability. Kritické napětí σ_{kr} je možné určit z diagramu 2.6 dle [14]. Křivky v diagramu jsou však naměřeny pro materiál s nižší mezí pevnosti. V případě detailního návrhu by bylo vhodné provést např. experimentální ověření.

¹ Pro přehlednost je indexem 1 označován hlavní nosník, indexem 2 nosník zadní.

Postup výpočtu je následující:

Průřez profilu pásnice se rozdělí na dvě kolmé desky. Díky tomu, že je profil frézovaný, je zvoleno vzájemné uložení desek jako tzv. vetknutí. Pro zadní skládanou část nosníku (resp. ohýbanou v případě pomocného nosníku) je zvoleno konzervativně kloubové uložení.



Obr. 7.13 Rozložení průřezu pásnice na desky

Štíhlost průřezu desky se určí jako podíl šířky b a tloušťky t . Pro vypočítanou štíhlost a daný materiál profilu se v pořadí (1-2-3) dle diagramu 2.6 stanoví lokální kritické napětí σ_{kr} .

Součinitel rezervy:

Součinitel rezervy je dán podílem kritického napětí v daném místě pásnice a normálovým napětím dle rov. (7.5).

$$\eta = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{1,2}} [1] \quad (7.6)$$

- Pevnost

Pro kontrolu tahem namáhaných pásnic je jako dovolené napětí brána mez pevnosti R_m , snížená o 10 %. Tím je zohledněn negativní vliv otvorů pro nýty (zeslabení nosného průřezu).

Součinitel rezervy:

Součinitel rezervy je dán podílem snížené meze pevnosti a normálovým napětím dle rov. (7.5).

$$\eta = \frac{0,9 \cdot R_m}{\sigma_{1,2}} [1] \quad (7.7)$$

- Únava

Dolní pásnice patří mezi kritická místa z hlediska únavové životnosti. Na základě konzultace bylo proto rozhodnuto, že jako kritérium bude brán požadavek na nepřekročení σ_{1g} (napětí v kritickém místě za letu při $n=1$). Předpokladem je, že se napětí v kritickém místě (dolní pásnici) při běžném provozu blíží mezi únavy materiálu. Po dohodě s vedoucím práce byla tato hodnota pro daný letoun orientačně stanovena na 27 MPa.

Součinitel rezervy:

Součinitel rezervy je dán podílem σ_{1g} a normálovým napětím dle rov. (7.5) pro případ horizontálního letu při $n=1$ (Tab. 7.3). Výpočet je omezen pouze na oblast frézované části hlavního nosníku.

$$\eta = \frac{\sigma_{1g}}{\sigma_1} [1] \quad (7.8)$$

V případě detailního návrhu by však musela být provedena podrobnější analýza týkající se problematiky únavy.

VÝPOČET STOJINY

Klasickým předpokladem je, že vnější posouvající síla se přenáší pouze stojinou nosníku. Zavádí se zde pojem smykový tok q . Ten je možné u nosníku s tenkou stojinou a masivními pásnicemi považovat za konstantní [15]. Po zavedení zjednodušujících předpokladů a dosazení do Žuravského vztahu je vztah pro výpočet smykového toku q od posouvající síly T , kde h je výška stojiny, následující:

- Smykové toky ve stojinách od posouvající síly

$$q_{s1} = \frac{T_1}{h_1} [Nmm^{-1}] \quad (7.9)$$

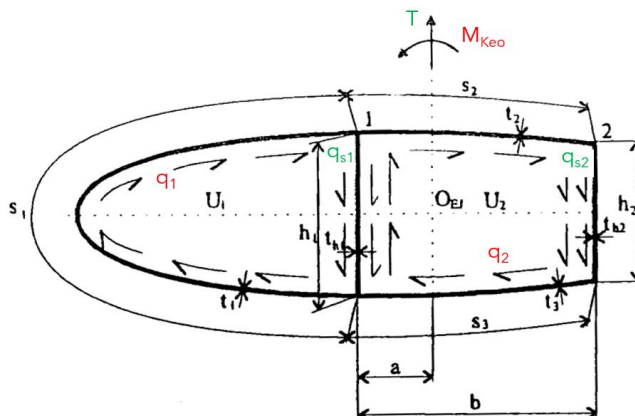
$$q_{s2} = \frac{T_2}{h_2} [Nmm^{-1}]$$

- Smykové toky od krouticího momentu v dutinách křídla

Pro výpočet se využije Bredtův vztah:

$$M_K = 2 \cdot U_1 \cdot q_1 + 2 \cdot U_2 \cdot q_2 [Nmm] \quad (7.10)$$

- $U_{1,2}$ je vnitřní plocha dutin
- $q_{1,2}$ je neznámý smykový tok v dutinách
- M_K (M_{Keo}) je krouticí moment přepočtený k ohybově elastické ose



Obr. 7.14 Smykové toky v dvoudutinové konstrukci [14]

Křídlo je dvounosníkové, což je staticky neurčitá konstrukce a pro výpočet smykových toků je potřeba použít deformační podmínku: „Zkrut první dutiny je stejný jako zkrut druhé dutiny“ [14]:

$$\vartheta_1 = \vartheta_2 \quad (7.11)$$

Rozepsání deformační podmínky:

$$\frac{1}{U_1} \cdot \left[\frac{q_1 \cdot s_1}{t_1} + \frac{(q_{s1} + q_1 - q_2) \cdot h_1}{t_{h1}} \right] = \frac{1}{U_2} \cdot \left[\frac{(q_2 - q_{s1} - q_1) \cdot h_1}{t_{h1}} + \frac{q_2 \cdot s_2}{t_2} + \frac{(q_2 + q_{s2}) \cdot h_2}{t_{h2}} + \frac{q_2 \cdot s_3}{t_3} \right] \quad (7.12)$$

Vyřešením soustavy dvou rovnic (Bredtův vztah, deformační podmínka) se získají neznáme smykové toky q_1 a q_2 , které se na stojinách sečtou se smykovými toky od posouvající síly.

- Výsledné smykové toky ve stojinách nosníků

Výsledný smykový tok ve stojině hlavního nosníku:

$$q_{v1} = q_1 + q_{s1} - q_2 \text{ [Nmm}^{-1}\text{]} \quad (7.13)$$

Výsledný smykový tok ve stojině zadního nosníku:

$$q_{v2} = q_2 + q_{s2} \text{ [Nmm}^{-1}\text{]} \quad (7.14)$$

Smykové napětí ve stojinách:

Smykové napětí se určí jako podíl výsledného smykového toku q_v a tloušťky stojiny t_s .

$$\tau_{1,2} = \frac{q_{v1,2}}{t_{s1,2}} \text{ [MPa]} \quad (7.15)$$

Stojina nosníku je následně kontrolována vzhledem ke stabilitě a smykové pevnosti.

- Stabilita

Oba nosníky jsou navrženy se stabilní stojinou. To znamená, že při početním zatížení je smykové napětí ve stojině menší nebo rovno kritickému napětí, při kterém dojde ke ztrátě stability. Posouvající síla je tak přenášena čistým smykem bez vlivu diagonálního tahového pole [16].

$$\tau_{poč} \leq \tau_{kr} \text{ [MPa]} \quad (7.16)$$

Kritické napětí:

Kritické napětí τ_{kr} je určeno z diagramu 3.2 [14]. Na základě poměru efektivní výšky nosníku a rozteče žebor se zvolí součinitel uložení desky. Díky tomu, že je nosník frézovaný je stojina stabilizována ze všech stran pásnicemi a příčnými výztuhami. Proto je zvolena vazba vetknutí desky okolo všech hran. Pro zadní část nosníku je zvoleno konzervativně vetknutí ze dvou stran.

$$\tau_{kr} = k_\tau \cdot E \cdot \left(\frac{t_s}{b}\right)^2 \text{ [MPa]} \quad (7.17)$$

Součinitel rezervy:

Součinitel rezervy je dán podílem kritického napětí a smykovým napětím dle rovnice (7.15).

$$\eta = \frac{\tau_{kr}}{\tau_{1,2}} \text{ [1]} \quad (7.18)$$

- Únosnost ve smyku

Z diagramu 3.7 [14] se na základě poměru efektivní výšky stojiny a její tloušťky určí únosnost hladké desky při smykovém zatížení q_p .

Součinitel rezervy:

$$\eta = \frac{q_p}{q_{v1,2}} [1] \quad (7.19)$$

V případě velkého součinitele rezervy nebo potřeby otvoru ve stojině (vedení táhel řízení) jsou navrženy odlehčovací otvory o průměru D . Únosnost desky s otvory se poté určí:

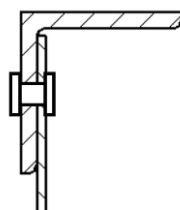
$$q = q_p \cdot \left(1 - \frac{D}{h_e}\right) [Nmm^{-1}] \quad (7.20)$$

Součinitel rezervy:

$$\eta = \frac{q}{q_{v1,2}} [1] \quad (7.21)$$

KONTROLA NÝTOVÁNÍ STOJINY S PÁSNICEMI

Nýtovaná je pouze zadní část hlavního nosníku. Jedná se o jednostřížný spoj.



Obr. 7.15 Nýtování stojiny s pásnicí

Síla na jeden nýt se spočítá jako součin výsledného smykového toku na stojině nosníku q_{v1} a nýtové rozteče r_n .

$$F_n = q_{v1} \cdot r_n [N] \quad (7.22)$$

Součinitel rezervy:

Součinitel rezervy je spočítán jako podíl únosnosti nýtu ve stříhu F_{nd} (tab. 4.1 [14]) a síly F_n .

$$\eta = \frac{F_{nd}}{F_n} [1] \quad (7.23)$$

7.2.2 Výsledky pevnostní kontroly

Ve všech řezech obou nosníků vyšel součinitel rezervy větší než 1. Výpisy výsledků z pevnostní kontroly (viz Tab. 7.4) jsou ve všech ostatních řezech součástí Příloha č. 1.

Tab. 7.4 Výpis z pevnostní kontroly (řez R2a)

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R2a				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	23558	1916	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	48797	976	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	5574	111	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	220,9	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	2,0	0,8	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	21990000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	253,3	157,5	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,14	1,27	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	230,3	157,5	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,72	2,51	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	26,3		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,03		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	53,3	19,3	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	76,7	30,9	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,44	1,60	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	106,6	15,5	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	138,0	75,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,29	4,85	[-]

7.3 Kontrola propojení přední a zadní části nosníku

Výpočet únosnosti nýtového spoje přední a zadní části nosníků je proveden pomocí programu Ministatik.

VSTUPNÍ ÚDAJE

- Použité nýty

Spojení je realizováno pomocí plných duralových nýtů (materiál 2117).

Tab. 7.5 Použité nýty [17]

	Hlavní nosník	Zadní nosník	
Označení nýtu (norma)	MS20470-AD4-12 MS20470-AD4-8	MS20470-AD3-7 MS20470-AD3-8	[-]
Mez pevnosti ve smyku	195	195	[MPa]
Průměr nýtu	4	3	[mm]

- Zatížení spoje

Spoj je zatížen ohybovým momentem a posouvající silou, působící ve středu smyku. Tento předpoklad je dán symetrií navrženého spoje a použitím stejných materiálových charakteristik nýtů. Pro takový spoj platí, že poloha středu smyku leží v těžišti průřezových ploch nýtů.

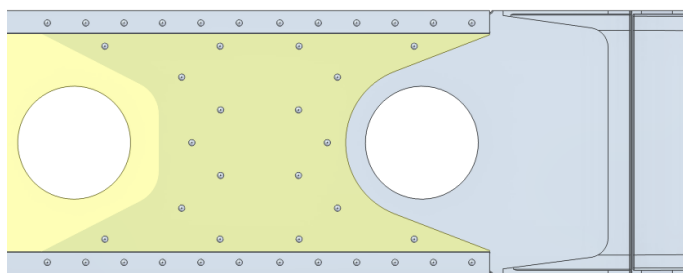
Zatížení odpovídá řezu R10, který leží přímo v ose symetrie spoje.

Tab. 7.6 Zatížení spoje

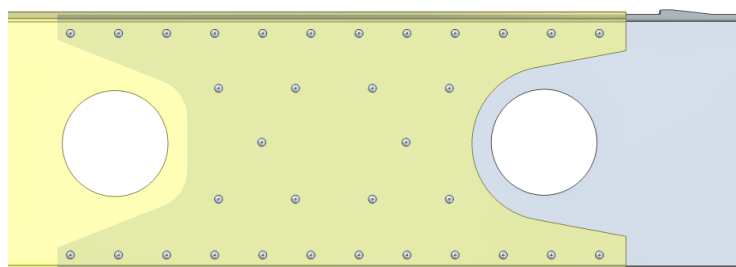
		Hlavní nosník	Zadní nosník	
Posouvající síla	T	8696	701	[N]
Ohybový moment	Mo	5540547	446413	[Nmm]

- Geometrie spoje

Uspořádání spoje na hlavním a zadním nosníku je vidět z Obr. 7.16 a Obr. 7.17.



Obr. 7.16 Spoj na hlavním nosníku

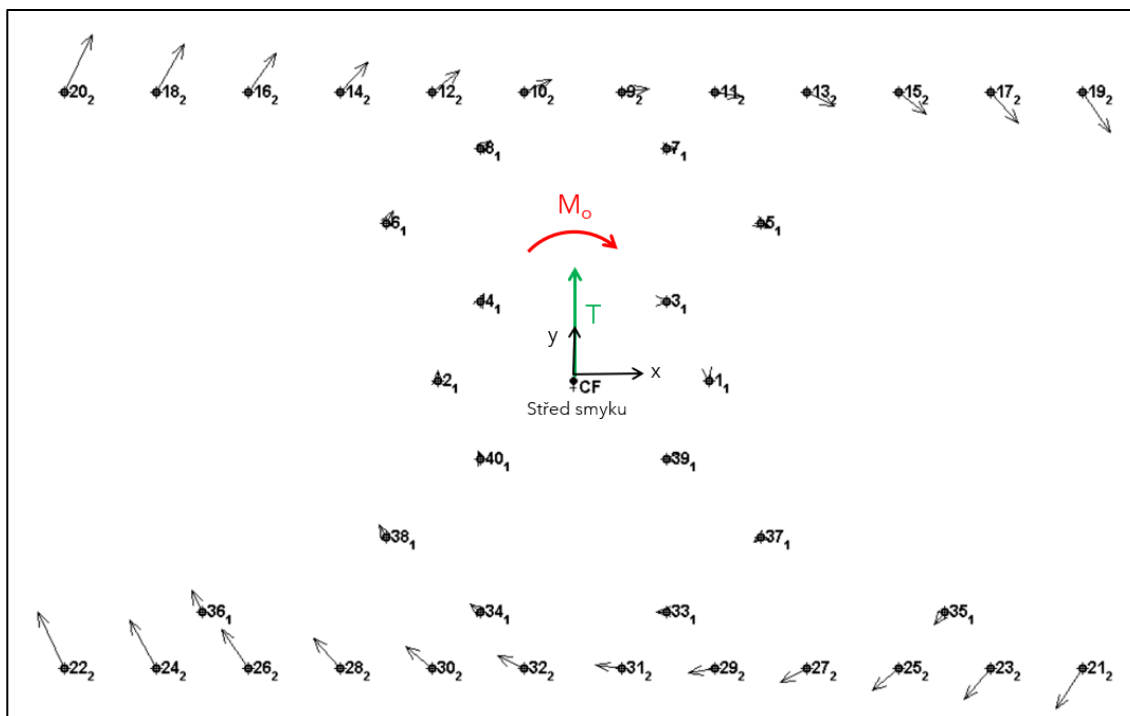


Obr. 7.17 Spoj na zadním nosníku

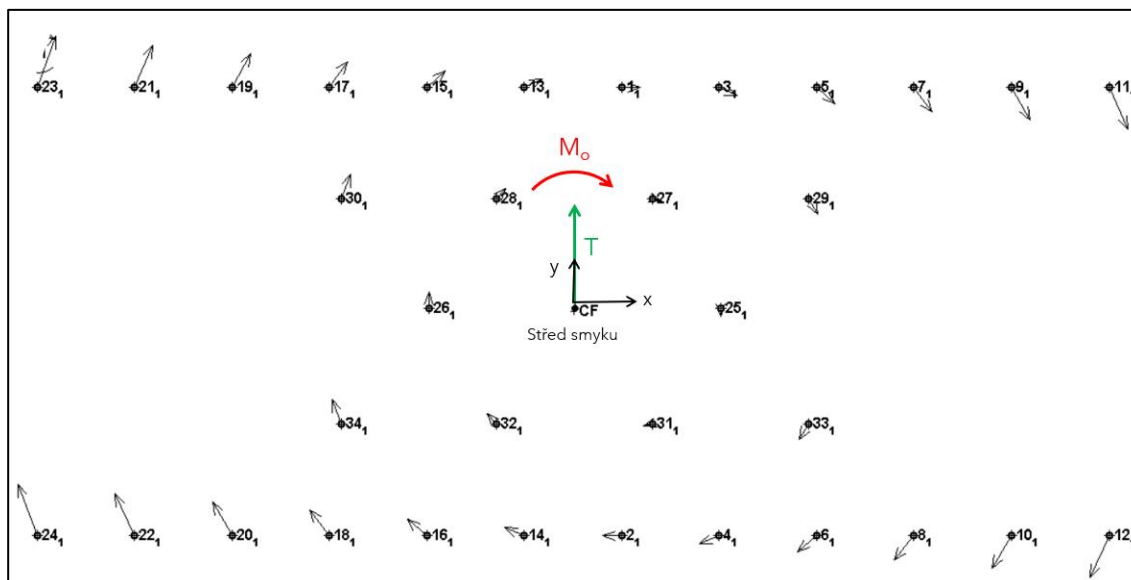
VÝSLEDNÉ HODNOTY

Výsledky pevnostní kontroly jsou z důvodu rozsáhlosti hodnot součástí Příloha č. 2 a Příloha č. 3. Pro každý nýt je vyčíslen součinitel rezervy vzhledem k únosnosti ve smyku.

Kromě vyčíslení součinitelů rezerv umožňuje program vykreslení vektoru výsledné síly na každém nýtovém spoji viz Obr. 7.18 a Obr. 7.19. Souřadný systém (x,y) , od kterého je definována poloha jednotlivých nýtů, je umístěn do středu smyku.



Obr. 7.18 Rozložení sil na spoji hlavního nosníku



Obr. 7.19 Rozložení sil na spoji zadního nosníku

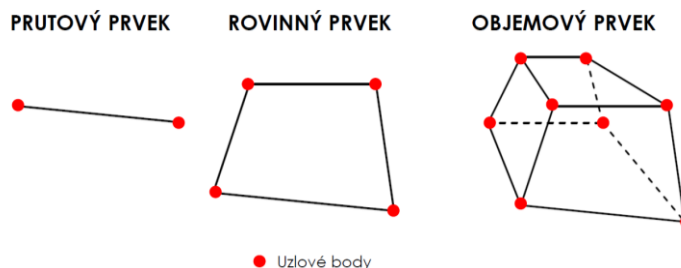
8 MKP ANALÝZA SPOJE KŘÍDLO-TRUP

V této kapitole je provedena MKP analýza spojení závěsů křídla a trupu. Tím, že se jedná o kritickou část nosného systému, je nutné detailně ověřit únosnost při maximálním zatížení. V předchozích kapitolách byly provedeny analytické výpočty, které jsou v počáteční fázi návrhu stěžejní. Vlivem geometrické komplexnosti však není možné pomocí analytických metod dostatečně ověřit rozložení napjatosti a deformace nově navrhovaného řešení. Z toho důvodu je proveden MKP výpočet pro doplnění a vzájemnou verifikaci výsledků.

8.1 Stručný popis principu MKP

Metoda konečných prvků (MKP) patří v současné době k nejpoužívanějším prostředkům napětově deformační analýzy. Výhodou oproti analytickému řešení je možnost řešit libovolně geometricky složitá tělesa. Výsledky jsou vždy však jen přibližné a závislé mj. na vhodném zvolení diskretizace. Na výsledky je proto nutné nahlížet kriticky a verifikovat je až na základě porovnání s analytickým řešením nebo s hodnotami získanými experimentálním měřením.

Principem metody konečných prvků je nahrazení spojitého objemu tělesa konečným počtem elementů (prvků) s uzlovými body viz Obr. 8.1. Tento proces se nazývá diskretizace kontinua a z matematického pohledu představuje přechod z řešení diferenciální rovnice na soustavu několika algebraických rovnic.



Obr. 8.1 Typy konečných prvků [18]

Výsledkem řešení strukturální analýzy jsou následující veličiny:

- Deformační posuvy: $u, v, w \dots [m]$
- Přetvoření: $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz} \dots [1]$
- Napětí: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz} \dots [Pa]$

V obecném případě představují 15 neznámých, které je nutné vyřešit pomocí základních rovnic pružnosti a pevnosti (rovnice rovnováhy, geometrické rovnice, konstitutivní vztahy). Řešení daných rovnic však neprobíhá přímo. Jedním ze způsobů řešení je využití energetického přístupu- tzv. Lagrangeova variačního principu. Ten zjednodušeně říká, že těleso se deformuje nejméně energeticky náročnou cestou, což je jedinečný stav odpovídající vždy daným vazbám a zatížení. Takový stav nastane právě tehdy, když deformované těleso bude mít minimální potenciální energii Π , jenž je definována rovnicí (8.1).

$$\Pi = W - P \quad (8.1)$$

- $W \dots$ energie napjatosti (energie akumulovaná v tělesu při deformaci)
- $P \dots$ je potenciál vnějšího zatížení.

Minimum potenciální energie π (je funkcí posuvů jednotlivých bodů) se určí matematickou analýzou (derivace a položení rovno 0) podle rov. (8.2).

$$\frac{\partial \Pi}{\partial u} = 0 \quad (8.2)$$

Derivace dle rov. (8.2) je provedena v každém uzlovém bodě sítě, čím se získají jednotlivé složky posuvů u_i, v_i, w_i . Posuvy uvnitř elementu jsou poté získány interpolací uzlových hodnot pomocí zvolených aproximačních funkcí (lineární, kvadratické). Z deformačních posuvů je následně možné určit pomocí geometrických rovnic složky tenzoru přetvoření a z nich poté pomocí konstitutivních vztahů (Hookův zákon) složky tenzoru napětí. [19]

8.2 Příprava výpočtového modelu

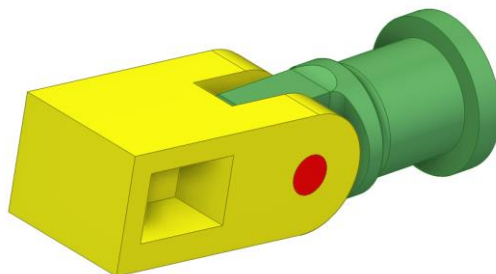
Celý proces numerického řešení zahrnuje několik operací a nastavení. Prvním krokem je příprava výpočtového modelu a vstupních dat, tzv. *preprocessing*.

VÝPOČETNÍ SOFTWARE

Je využívám software MSC Patran a MSC Nastran. Licence jsou dostupné na Leteckém ústavu VUT v Brně, kde bylo možno tyto programy využívat.

VSTUPNÍ GEOMETRIE

Jako první je vytvořena zjednodušená geometrii tělesa, která je podkladem pro vytvoření sítě konečných prvků. Tato geometrie je z CAD systému naimportována ve vhodném formátu do programu MSC Patran.






Obr. 8.2 Zjednodušená geometrie spoje

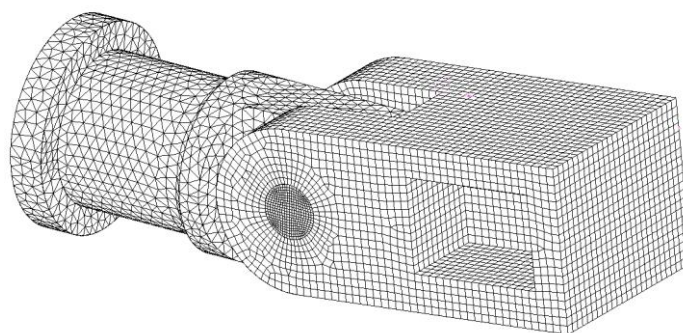
VOLBA TYPU PRVKU A VYTVOŘENÍ SÍTĚ

Volba vhodného prvku závisí na konkrétním typu úlohy. V daném případě byla vytvořena síť pomocí objemových prvků viz Obr. 8.3. Tam, kde to bylo možné, byly využity prvky ve tvaru krychle (HEX), které pro pokrytí stejné oblasti potřebují méně prvků než čtyřstěny (TET). Co se týče volby aproximace, u prvků typu TET je zvolena kvadratická. Naopak u prvků typu HEX je zvolena lineární varianta, která dává dostatečně přesné výsledky. Je však nutné vytvořit síť s vyšší hustotou prvků [20].

Dále je potřeba přiřadit všem prvkům materiálové parametry. V případě izotropního elastického materiálu to jsou modul pružnosti v tahu E a Poissonova konstanta μ . Při řešení nelineárních úloh s velkými deformacemi a napětími je nutné nadefinovat i materiál nelineární. V daném případě však není potřeba, protože se výsledky pohybují ještě na pomezí elastické oblasti, a tak lze předpokládat lineární chování v souladu s Hookovým zákonem.

Tab. 8.1 Použité prvky a přiřazené vlastnosti

Typ prvku		Aproximace	Počet prvků	Materiálové vlastnosti	
Vidlice	Hex 8		lineární	16938	Dural ($E=72\ 000\ \text{MPa}$; $\mu=0,33$)
Oko	Tet 10		kvadratická	22875	Ocel ($E=210\ 000\ \text{MPa}$; $\mu=0,3$)
Čep	Hex 8		lineární	28800	Ocel ($E=210\ 000\ \text{MPa}$; $\mu=0,3$)



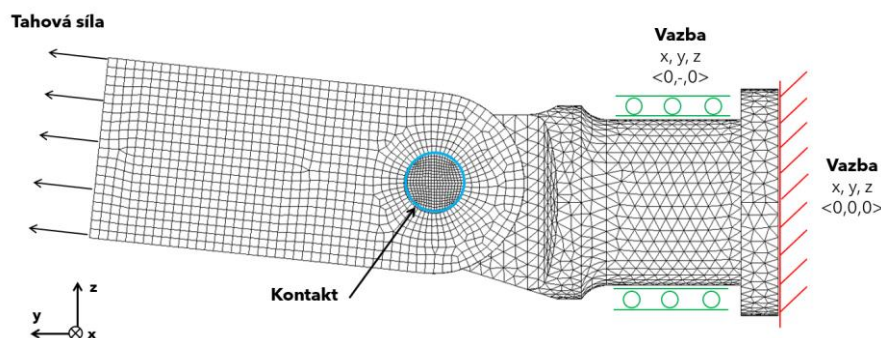
Obr. 8.3 Síť konečných prvků-sestava spoje

OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky se týkají zatížení a uložení tělesa. Jsou zvoleny tak, aby co nejvíce odpovídaly reálnému stavu.

V případě numerického řešení je důležité, aby bylo těleso uloženo vždy nepohyblivě. Z toho důvodu je na zadní ploše trupového závěsu zvolena vazba vetknutí, která odebírá všechny stupně volnosti. Další vazba je aplikována na plochu po obvodu trubky závěsu. Zamezuje pohyb v osách x a z , kde jsou přivařeny příčné pruty příhradové konstrukce trupu. Zatížení je definováno jako tahová síla vztažená na plochu vidlice a působí kolmo na ni.

Nakonec jsou nastaveny kontaktní vazby při dotyku daných těles s rozdílnou sítí. Konkrétně vazba *GLUE* mezi okem a čepem, která zajistí pevné spojení (slepení) obou dílů. Mezi vidlicí a čepem je pak nastavena vazba *TOUCH*, což je klasický kontakt při dotyku dvou těles. Navíc je zde uvažováno tření, která je definováno typem (tzv. *Shear Coulomb*) a koeficientem tření (zvoleno 0,1). Všechna tělesa včetně čepu jsou nastavena jako tzv. *Deformable* (nejsou absolutně tuhé, mohou se deformovat).



Obr. 8.4 Okrajové podmínky

TYP ANALÝZY

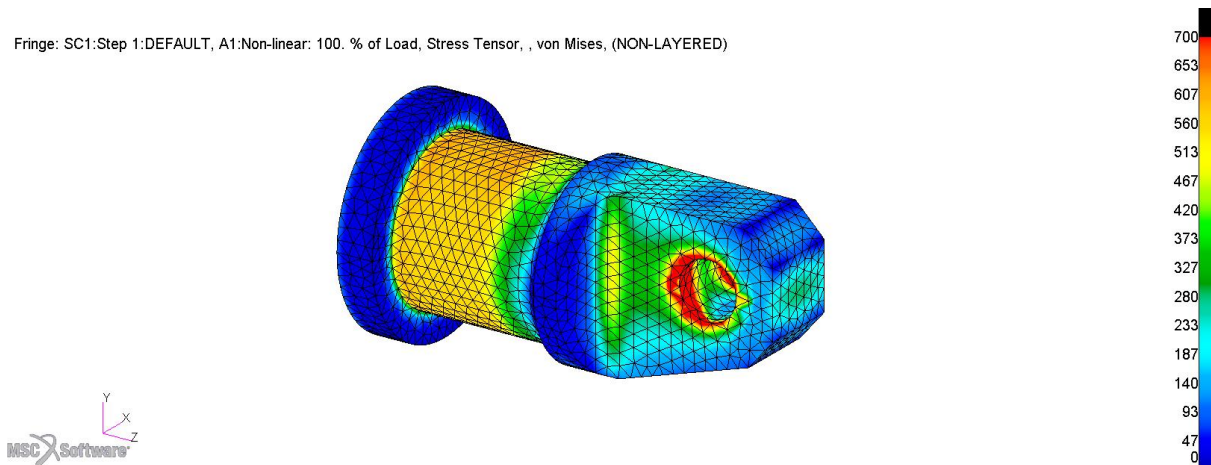
Jelikož se jedná o kontaktní analýzu, byl vybrán nelineární řešič označený v softwaru MSC Nastran jako SOL 400 (Implicit nonlinear).

Nelineární úlohy se v MKP řeší tak, že se celkové zatížení přidává na těleso v několika krocích od nuly až do maximální nastavené hodnoty. Tím se docílí toho, že se zatížení aplikuje již na deformované těleso, které se zdeformovalo v předchozím kroku. Může se tak sledovat přesná odezva na postupně rostoucí zatížení. Každý přírůstek zatížení však vyžaduje několik iterací, díky čemu se výrazně prodlouží doba výpočtu. [19]

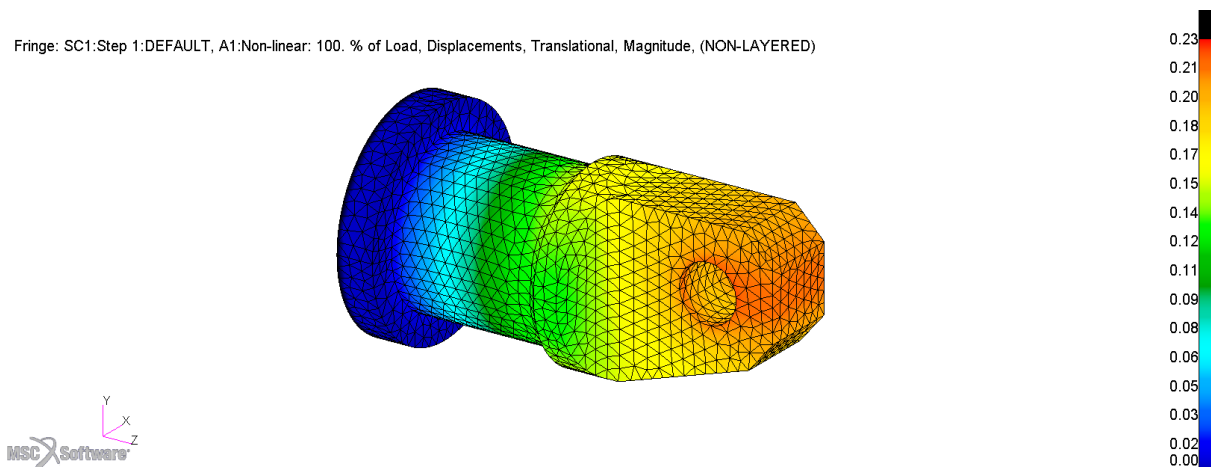
8.3 Vyhodnocení výsledků

ZÁVĚS NA TRUPU

Na Obr. 8.5 a Obr. 8.6 je vykresleno rozložení napětí a deformace v oku trupového závěsu při maximálním zatížení. Závěs je namáhán tahovou silou od čepu. Nejvyšší hodnoty napětí jsou patrné v trubkové části nosníku a dosahují přibližně 600-650 MPa (mez kluzu). Minimální mez pevnosti daného materiálu je však 883 MPa viz Tab. 6.5, a proto jsou dimenze závěsu dostatečné. Navíc není problém zvětšit tloušťku trubkové části, která je nyní 3,4 mm. Napětí v ostatních částech závěsu je bezpečně pod mezí pevnosti. V místě otvoru jsou patrné špičky napětí způsobené kontaktní vazbou *GLUE*, což je potřeba zohlednit.



Obr. 8.5 Napětí (HMH) v závěsu trupu

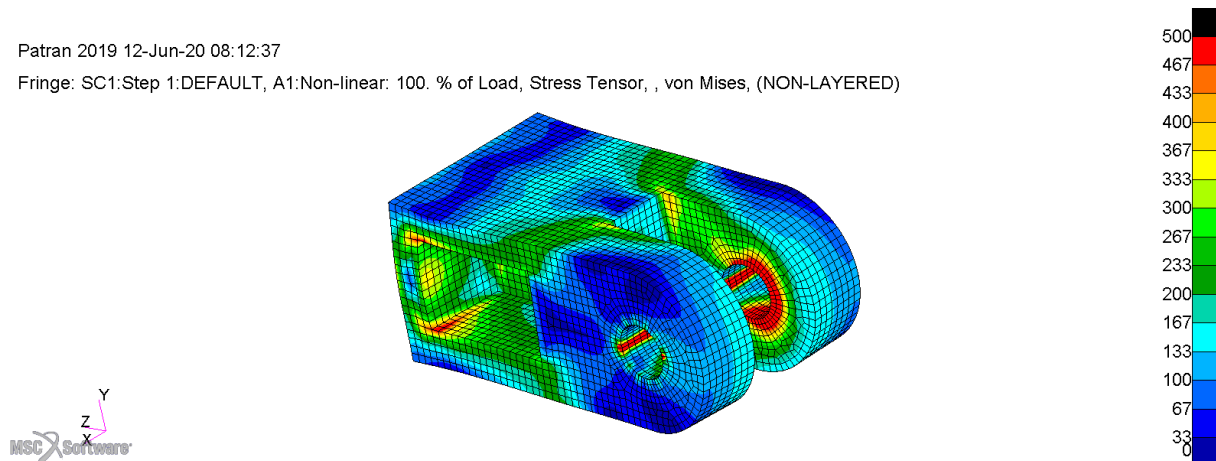


Obr. 8.6 Celková deformace závěsu trupu

ZÁVĚS NA KŘÍDLĚ

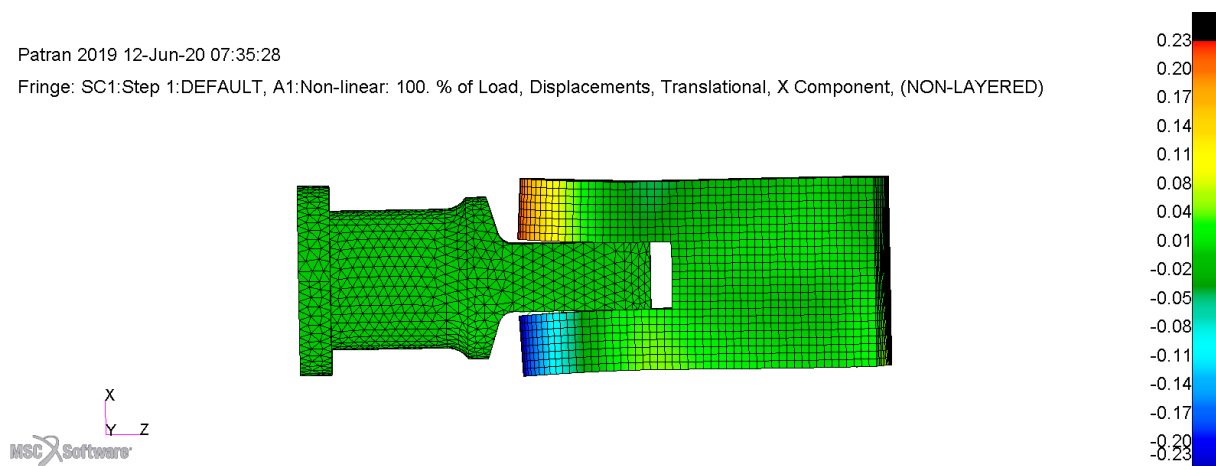
Na Obr. 8.7 je vykresleno rozložení napětí ve vidlici závěsu křídla při maximálním zatížení. Závěs je namáhán tahovou silou od čepu. Nejvyšší hodnoty napětí jsou patrné na vnitřních stranách vidlice, přibližně 300-350 MPa. Na vnějších stranách vidlice je napětí nižší. Je to způsobeno tím, že se obě oka ohýbají směrem od sebe vlivem ohybu spojovacího čepu viz Obr. 8.8. I přes to je maximální napětí pod mezí pevnosti, která je pro daný dural 440 MPa.

V oblasti otvoru jsou rovněž patrné nerovnoměrné špičky napětí způsobené kontaktem. Lze však očekávat velké kontaktní tlaky na předních vnitřních hranách otvorů. V reálném případě proto budou do duralových ok nalisovány ocelové vložky, které zmírní vliv otláčení.



Obr. 8.7 Napětí (HMH) v závěsu křídla

Z Obr. 8.8 je vidět rozevírání se vidlice způsobené ohybem spojovacího čepu s maximální deformací kolem 0,2 mm.



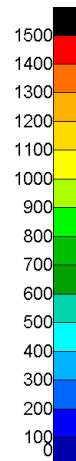
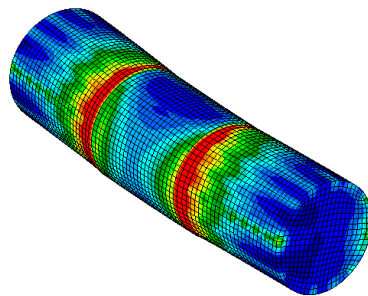
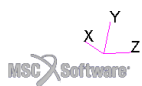
Obr. 8.8 Deformace vidlice závěsu křídla v ose x (zvětšené měřítko)

SPOJOVACÍ ČEP

Na Obr. 8.9 je vykresleno rozložení napětí čepu při maximálním zatížení. Průběh je však zkrácen ve střední části v oblasti styku s trupovým závěsem (vazba *GLUE*). Kritické místo lze očekávat na rozhraní mezi okem trupu a vidlicí křídla (kombinace posouvající síly a ohybového momentu). Materiál je však tepelně zpracován na R_m 1471-1667 MPa viz Tab.6.15, což by měla být dostatečná pevnost.

Patran 2019 12-Jun-20 07:58:18

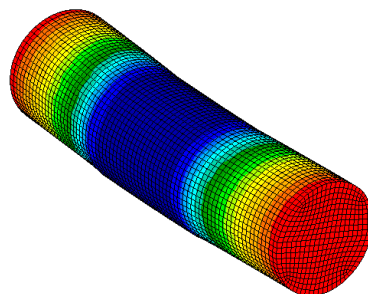
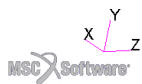
Fringe: SC1:Step 1:DEFAULT, A1:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)

**Obr. 8.9** Napětí v čepu (HMH)

Na Obr. 8.10 je vykreslena celková deformace čepu ve směru zatížení. Největší deformace na koncích činí až 0,5 mm při maximálním zatížení.

Patran 2019 12-Jun-20 07:56:19

Fringe: SC1:Step 1:DEFAULT, A1:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

**Obr. 8.10** Celková deformace čepu

Na závěr je třeba uvést, že i přes veškeré výpočty by bylo nutné provést experimentální ověření spoje (statická i únavová zkouška).

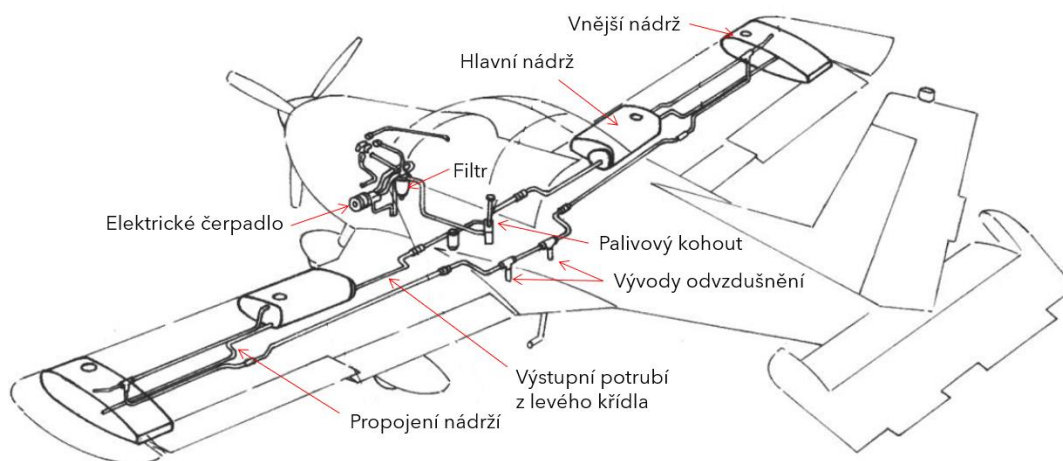
9 NÁVRH INTEGRÁLNÍ PALIVOVÉ NÁDRŽE

Rekonstrukce křídla zahrnuje i návrh integrální palivové nádrže. Tomu byl již uzpůsoben návrh nosníků křídla, které jsou v oblasti nádrže frézovány. Odstraněním současných palivových nádrží by mohlo navíc dojít ke snížení hmotnosti a ke zjednodušení konstrukčního uspořádání.

9.1 Popis palivové soustavy letounu

Současné křídlo je vybaveno hlavní a pomocnou vnější nádrží. Obě nádrže jsou vzájemně propojeny potrubím s jednosměrným ventilem. Palivo je z nádrží obou křídel nasáváno motorovým čerpadlem a přes palivový filtr vedeno do vstřikovacího čerpadla motoru.

V okruhu mezi filtrem a motorovým čerpadlem je ještě pomocné elektrické čerpadlo, které může být libovolně zapínáno. Slouží k zaplavení palivové soustavy při spouštění motoru, nebo jako záloha při poruše motorového čerpadla. K přepínání odběru paliva slouží palivový kohout umístěný v kabině letounu. Palivové nádrže na obou křídlech mají na spodní straně v nejnižším místě odkalovací ventil pro odkalení a vypouštění paliva. Na horní straně nádrže je vedeno odvodušňovací potrubí. Vývody odvodušňování jsou na spodní straně trupu. [21]



Obr. 9.1 Současné uspořádání palivových nádrží [9]

Nové řešení integrální nádrže umožní zachovat současnou palivovou instalaci, zejména ve vnější části.

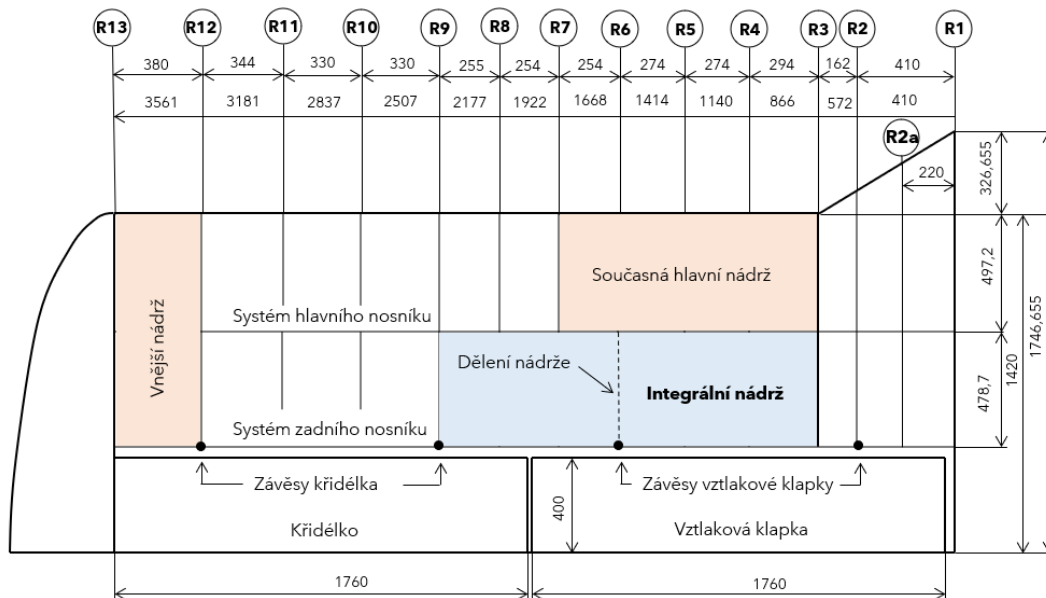
9.2 Konstrukční provedení nádrže

Integrální nádrž je koncipována pro oba vyráběné letouny Z 242 L a Z 143 LSi. Vhodným umístěním nádrže se dosáhlo dostatečné kapacity, a to i s rezervou pro případné konstrukční a jiné úpravy viz Tab. 9.1.

Tab. 9.1 Kapacita nádrží [4]

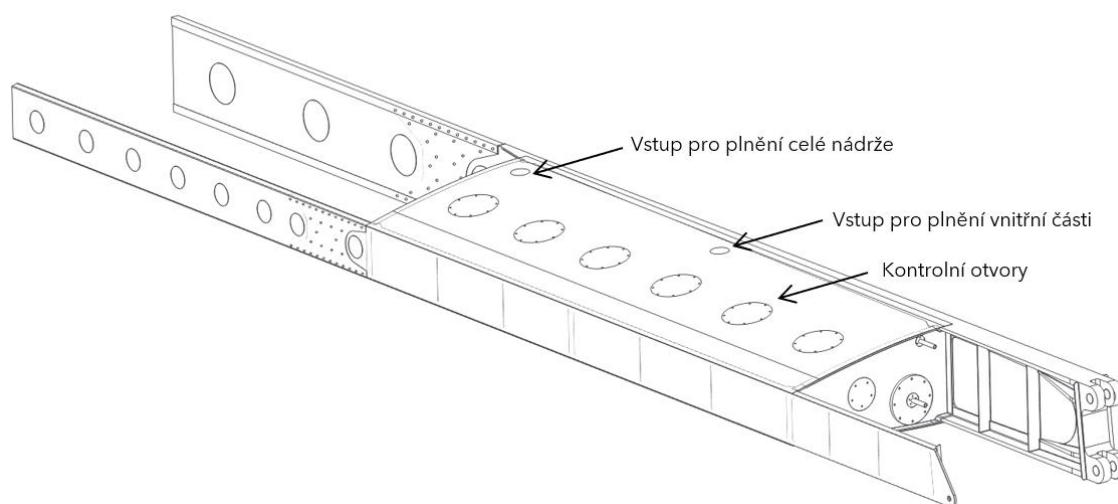
	Současná nádrž	Integrální nádrž
Objem	[l]	[l]
Hlavní nádrže	2 x 60	2 x 120
Vnější nádrže	2 x 55	
Celkové množství	230	240

Integrální nádrž je umístěna mezi žebry R3-R9, s tím že na žebro R6 je dělená viz Obr. 9.2. Jedním z důvodů tohoto opatření je akrobatický provoz letounu Z-242 L, kdy je povoleno omezené množství paliva. V takovém případě může být palivo plněno jen do vnitřní části integrální nádrže odděleným otvorem. Přepouštění paliva v případě plnění celé nádrže je zajištěno jednosměrným klapkovým ventilem umístěným v žebro R6.



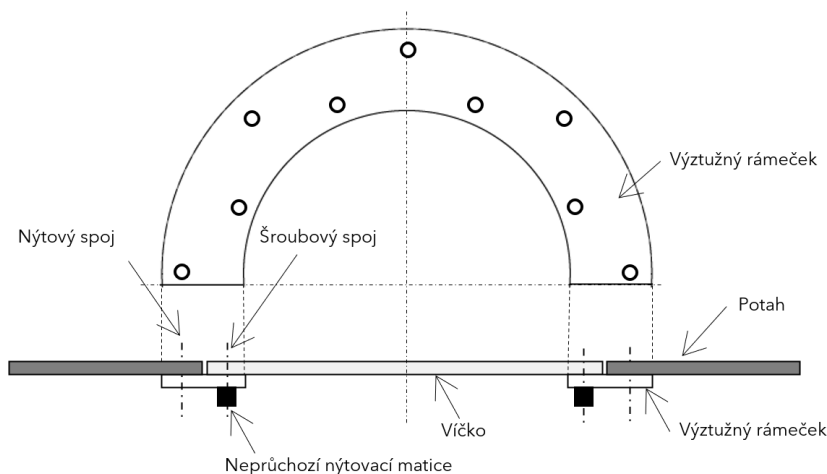
Obr. 9.2 Umístění integrální nádrže

Kontrolní otvory nádrže jsou umístěny na horním potahu mezi každým žebrem viz Obr. 9.3. Umístění na spodní straně by nemuselo být vhodné zejména z hlediska možnosti únavového porušení (narušení spodního potahu, koncentrace napětí). Tím, že jsou víka zapuštěna v potahu nedojde ani k výraznému zhoršení proudění přes horní stranu křídla.



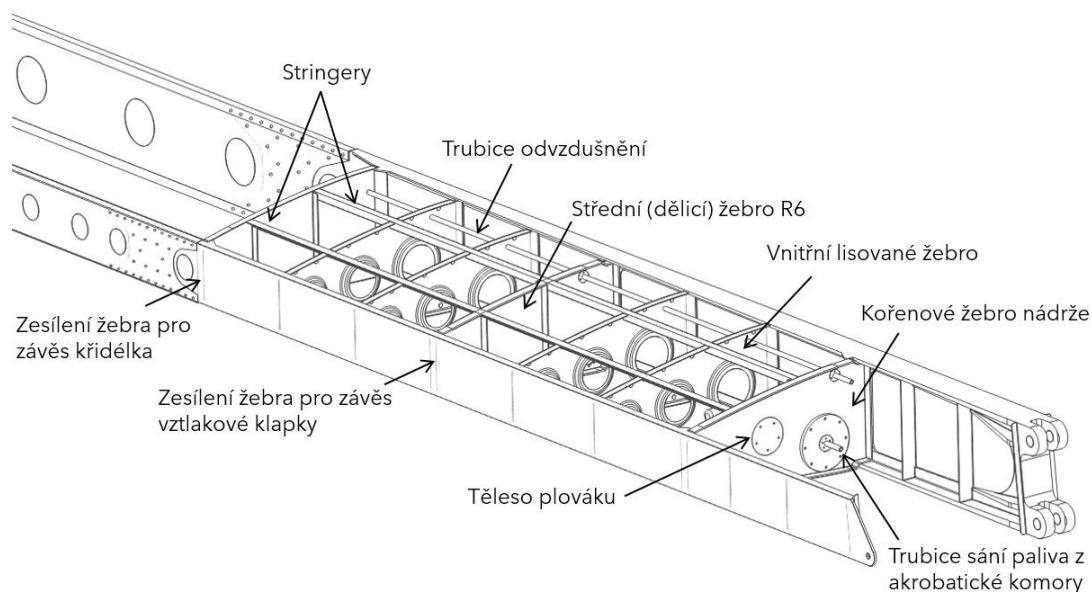
Obr. 9.3 Integrální palivová nádrž

Kontrolní otvory jsou zespodu vyztuženy rámečkem, který je přes hermetikum nýtován k potahu trhacími nýty. Víčko kontrolního otvoru je pak přes gumové těsnění připevněno šrouby se zapuštěnou hlavou a neprůchozí nýtovací maticí viz Obr. 9.4.



Obr. 9.4 Řešení kontrolního otvoru

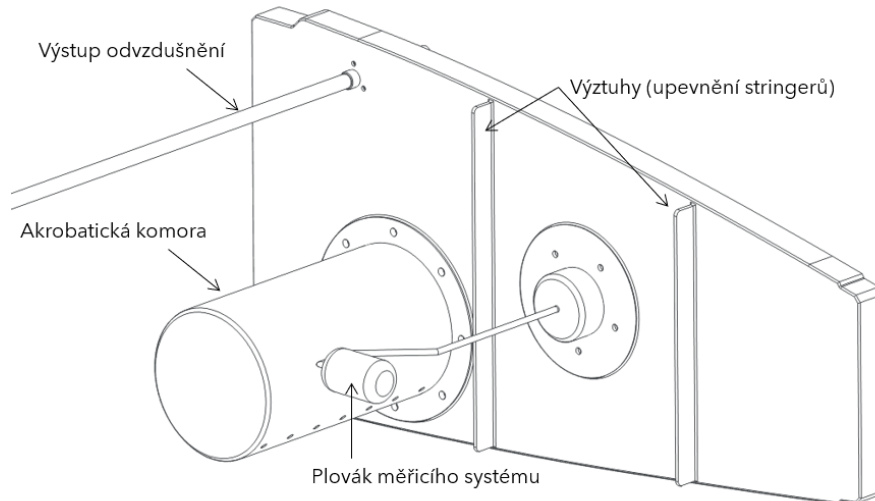
Z důvodu možného nežádoucího zvlnění horního potahu nádrže vlivem tlakového zatížení je provedeno vyztužení dvěma stringery. Tím se zvýší kritické napětí potahu, který bude rozdělen do více polí. Únosnost stringerů by v případě detailního návrhu byla nutná ověřit, např. MKP analýzou.



Obr. 9.5 Vnitřní konstrukce nádrže

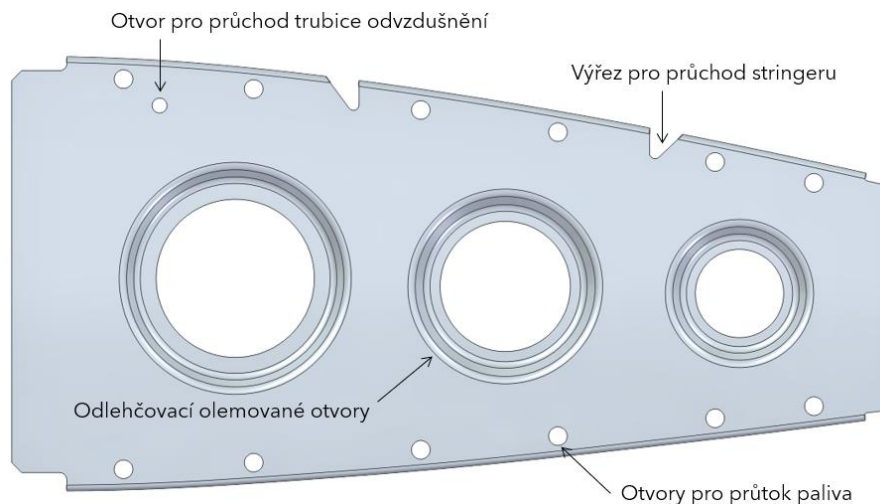
Okrajová žebra a střední dělicí žebro nádrže jsou frézovaná. Důvodem je vyšší zatížení a požadavek na přesnost a zajištění těsnosti. Kořenové žebro je přidavně namáháno tlakovými silami od stringerů a také je k němu upevněna akrobatická komora. K zesílenému střednímu a koncovému žebro bude zase možné s výhodou upevnit závěsy vztlkových klapek a křidélek, jak je naznačeno na Obr. 9.5.

K zajištění stálé dodávky paliva i při záporných násobcích slouží tzv. akrobatická komora [21]. Toto řešení je využito i u stávajících nádrží. Palivo vtéká do komory otvory na spodní straně. Uvnitř je umístěna pružná hadice opatřena na konci sacím hrdlem se závažím. Hadice se poté pohybuje společně s palivem ve směru výslednice zrychlení, které na letoun působí. Kapacita komor je dva litry paliva na každém křídle.



Obr. 9.6 Sestava frézovaného kořenového žebra

Vnitřní žebra nádrže jsou lisovaná, jelikož na ně nejsou kladeny zvýšené nároky na těsnost a únosnost. Podél horního a dolního lemu žebra jsou vyvrtány otvory pro průchod paliva. Dále jsou na horní straně vytvořeny dva výřezy pro průchod stringerů. Stringery budou ke každému vnitřnímu žebro navíc připevněny nenosnými spojkami z ohnutého plechu, aby se omezily případné vibrace. Při výrobě je nutné snížit riziko koncentrací napětí začištěním ostrých hran a olemováním otvorů.

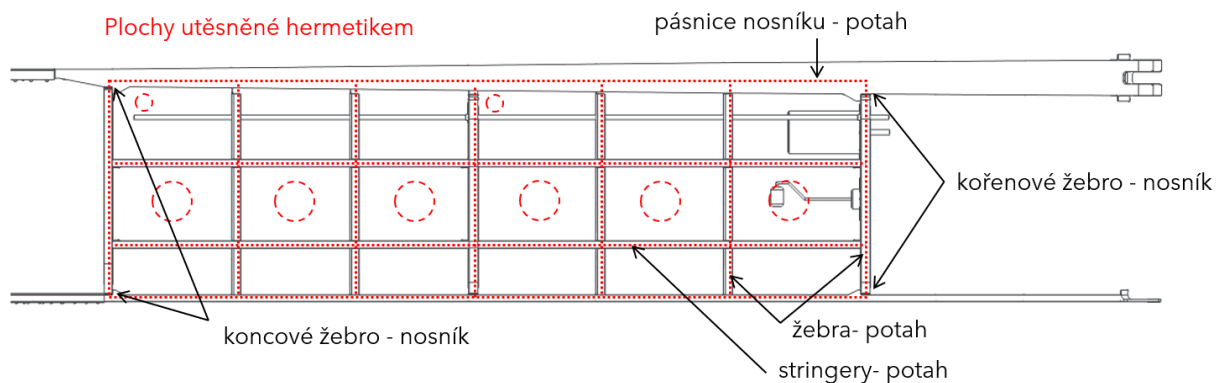


Obr. 9.7 Vnitřní lisované žebro

9.3 Utěsnění integrální nádrže

Všechny spoje, kterými by mohlo unikat palivo, je nutné utěsnit. Konstrukce je však od začátku zamýšlena tak, aby spojů uvnitř integrální nádrže bylo co nejméně. Místa, která bude nutné utěsnit jsou patrné z Obr. 9.8.

Utěsnění je provedeno pomocí naneseného hermetika. Po vytvrzení a konečném snýtování je potřeba ověřit těsnost nádrže tlakovou zkouškou.

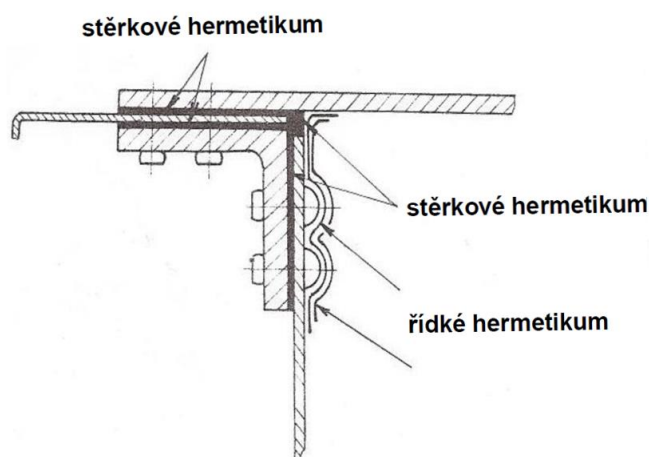


Obr. 9.8 Utěsnění integrální nádrže

▪ Postup hermetizace

Jednotlivé díly musí být navzájem svrtané, odjehlené a očištěné (odmaštěné a suché). Hustý hermetik se ihned po namíchání nanese na vybrané plochy např. pomocí ruční pistole nebo stěrky. Díly s naneseným hermetikem se vzájemně ustaví a upevní stehovacími šrouby. Hermetikum se však musí nechat částečně ztvrdnout. Ověření se provede tak, že při dotyku prstem nelepí.

Poté se může provést úplné snýtování. Přebytky hermetika se následně odstraní a upraví přechody (kouty atd.) nanesením nového hermetika. Nakonec je nanášeno tzv. řídké hermetikum, a to ve dvou vrstvách. První vrstva je nanášena ve větší ploše, druhá na ploše menší a je navíc rozlišena jinou barvou. [17]



Obr. 9.9 Příklad těsnění nosníku s potahem [17]

9.4 Ochrana palivové soustavy proti účinku blesku

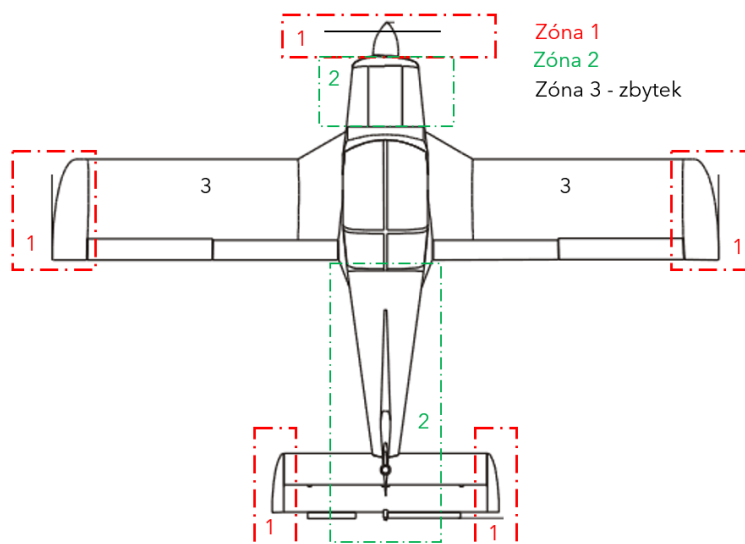
Odolnost letounu Z 242 L proti účinkům blesku je dána jeho celokovovou konstrukcí. Laminátové díly (např. koncové oblouky) netvoří nosnou konstrukci, a proto z tohoto hlediska nejsou kritické. Zvýšená pozornost je však věnována palivové soustavě. [4]

POŽADAVEK PŘEDPISU

Dle předpisu FAR [13] (23.2430) musí být palivová soustava navržena a uspořádána tak, aby bylo zabráněno zapálení palivových par v soustavě vlivem těchto jevů:

- Přímý úder blesku do oblasti s velkou pravděpodobností zásahu
- Výboje, sjíždějící po povrchu částí, kde je vznik rozvětvených výbojů nejpravděpodobnější
- Korona nebo sršení na vývodech odvodu paliva

Předpisem jsou na letounu určeny tzv. zóny úderu blesku s různou pravděpodobností zásahu. Integrovaná nádrže a velká část palivové instalace se nachází v zóně 3, která má nejnižší pravděpodobnost dotyku s kanálem blesku.



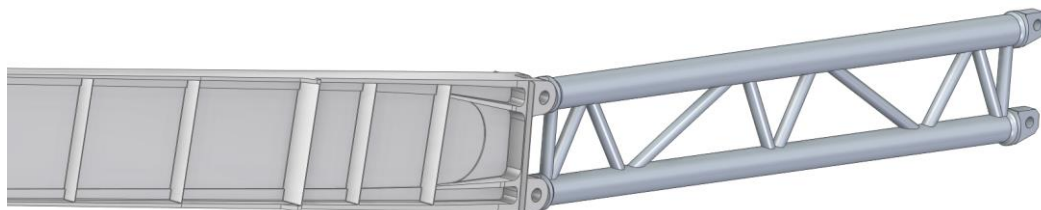
Obr. 9.10 Zóny úderu blesku [4]

Základní ochranu palivové soustavy proti nebezpečným účinkům blesku poskytuje duralový potah letounu. Další ochrana je zajištěna vodivým propojením jednotlivých částí se základní konstrukcí letounu. Malé množství spojů v integrované konstrukci je v tomto ohledu výhodné, protože se tím snižuje možnost velkých přechodových odporů a jiskření mezi sousedními kovovými díly. Vyústění odvodu paliva a odkalovacích ventilů jsou vyrobena z dielektrického materiálu a vystupují z potahu minimálně, proto je riziko jiskření nízké. Víčka plnicích a kontrolních otvorů jsou zarovnána s povrchem potahu křídla. Stěžejním krokem ke snížení rizika účinkem blesku je však odstranění palivových nádrží z konců křídla (zóna 1).

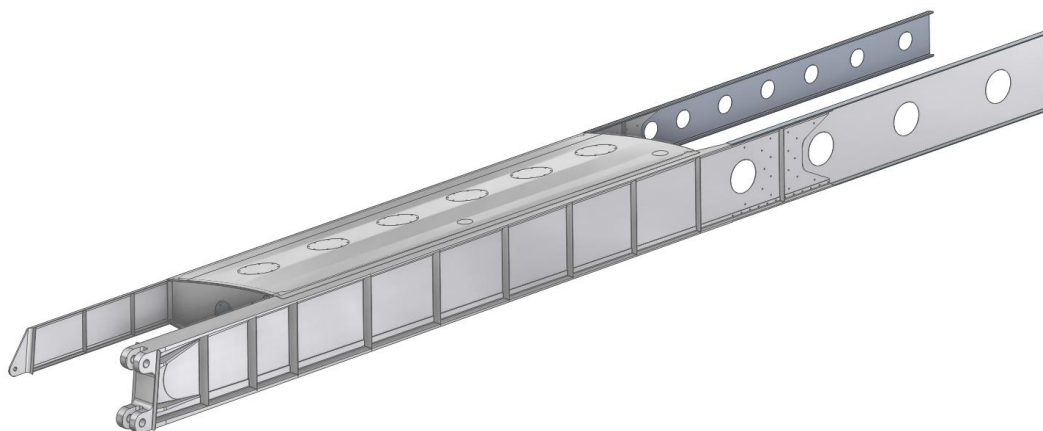
10 PŘEHLED NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ

10.1 Provedené konstrukční změny

Během rekonstrukce byly navrženy nové závěsy na trupu, kompletně nové řešení podélného systému křídla a integrální nádrž viz Obr. 10.1 a Obr. 10.2.



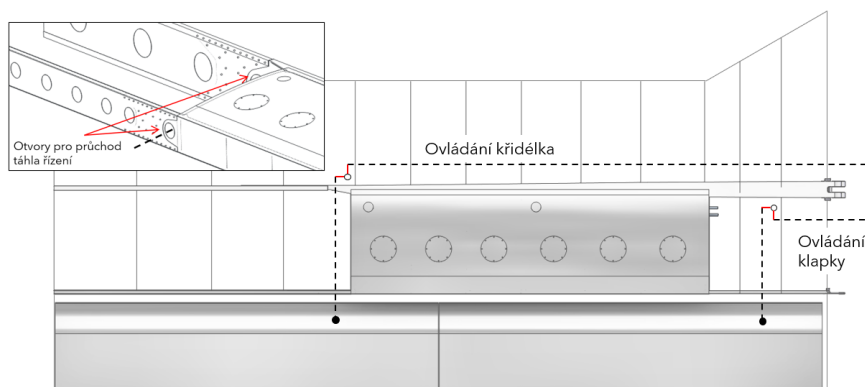
Obr. 10.1 Propojení hlavních závěsů křídla a trupu



Obr. 10.2 Sestava nosníků a integrální nádrže

Rozsah práce neumožnil zaměřit se na všechny detaily. Dalším krokem by proto bylo detailnější zapracování křidélek a vztlakových klapek do současného návrhu. Konstrukce je k tomu již částečně uzpůsobena (vyztužení žebér v oblasti závěsů, vytvoření otvorů v nosnících pro průchod táhel řízení).

Z důvodu posunutí palivové nádrže mezi nosníky bude nově nutné vést táhla příčného řízení v náběžné části křídla viz Obr. 10.3. To znamená i změnu v kinematice řízení. Bylo by proto vhodné zamyslet se i nad celkovou rekonstrukcí této oblasti křídla. Zajímavé by bylo provést studii, která by zvažovala využití kompozitových křidélek a klapek (nižší hmotnost, jednodušší výroba a sériovost atd.).



Obr. 10.3 Změna vedení příčného řízení

10.2 Odhad hmotnosti

Hlavním měřítkem k posouzení efektivnosti návrhu je jeho výsledná hmotnost. V této kapitole je proto proveden odhad hmotnosti nově navrženého řešení křídla. Výpočet je proveden přímo v programu CATIA, kde je možné jednotlivým dílům přiřadit materiálové charakteristiky. Hmotnosti křídla a jeho jednotlivých částí po rekonstrukci a před rekonstrukcí jsou uvedeny v Tab. 10.1 a Tab. 10.2.

Prozatím se předpokládá, že vztlakové klapky, křídélka a koncový laminátový oblouk křídla zůstanou zachovány. Odpadnou však díly spojené s hlavní přídatnou palivovou nádrží.

Tab. 10.1 Hmotnost křídla po rekonstrukci

Položka	Hmotnost [kg]
Hlavní nosník	14,7
Zadní nosník	2,2
Náběžná žebra	2,0
Lisovaná střední žebra	6,0
Frézovaná žebra	2,8
Stringery	0,4
Potah křídla	18,0
Příslušenství nádrže	1,5
Vztlaková klapka	4,0
Křídélko	4,4
Táhlo křídélka	0,7
Koncový oblouk	3,8
Rezerva (spojovací materiál atd.)	5,0
Výsledná hmotnost křídla	65,4

Tab. 10.2 Hmotnost současného křídla [4]

Položka	Hmotnost [kg]
Kostra křídla	55,5
Vztlaková klapka	4,0
Křídélko	4,4
Táhlo křídélka	0,7
Přídatná nádrž	6,7
Kryt hlavní nádrže	3,3
Koncový oblouk	3,8
Výsledná hmotnost křídla	78,3

Porovnáním výsledných hmotností lze konstatovat, že došlo k úspoře viz Tab. 10.3. Jedná se však o relativně hrubý odhad odpovídající dané fázi návrhu.

Za hlavní faktory nižší hmotnosti lze považovat efektivně navržené nosníky a nahrazení palivových nádrží integrální nádrží. Nabízí se však i další možnosti, kterými by bylo možné hmotnost křídla dále snížit. Např. nahrazením kovových vztlakových klapek a křidélek kompozitovými, nebo optimalizací některých částí (žebra, závěsy klapek a křidélek, koncový winglet atd.).

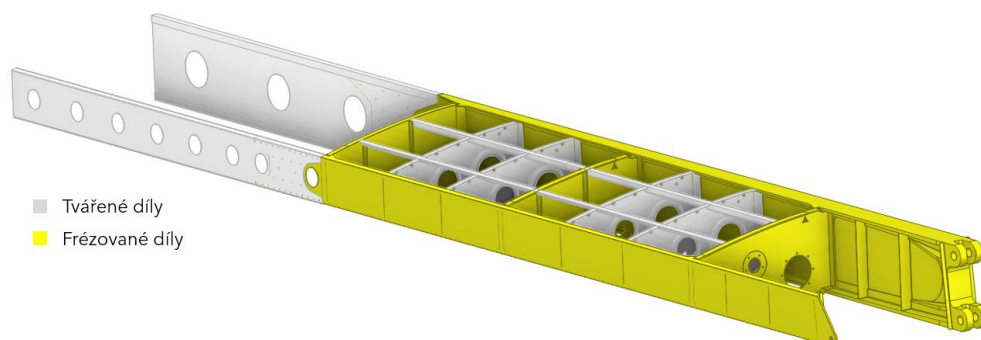
Tab. 10.3 Porovnání hmotností křídel

Hmotnost	[kg]
Současné křídlo	78,3
Křídlo po rekonstrukci	65,4
Ušetřená hmotnost na jednom křídle	12,9

V případě realizace projektu by bylo nutné provést podrobný hmotový rozbor, kterému by předcházela detailní konstrukční návrh všech částí křídla. Kromě hmotového rozboru je nutné provést i centrážní rozbor. Rekonstrukce křídla, zejména posun integrální nádrže bude mít vliv na změnu polohy těžiště letounu. Tato analýza je proto velmi důležitá a rozhodne o nutnosti dalších případných úprav, které už se však nemusí týkat jenom křídla.

10.3 Technologické zpracování

Realizace navrhované koncepce křídla by pro výrobce znamenala modernizovat oblast technologie výroby. Výroba optimalizovaných dílů (nosníky, žebra, závěsy atd.) vyžaduje využití CNC obráběcích strojů společně se zavedením CAD/CAM technologií. Vedle toho je však možné i nadále spoléhat na konvenční technologie např. v oblasti plošného tváření nebo svařování trupových dílů.



Obr. 10.4 Technologie výroby dílů křídla

Frézovat se budou přední části obou nosníků a zesílená žebra integrální nádrže viz Obr. 10.4. Složitá geometrie dílů (proměnná tloušťka a výška pásnic, stojin, přesné dodržení teoretického obrysu křídla atd.) vyžadují využití pětiosého obrábění. Délka nosníku (2800 mm) klade navíc vysoké požadavky na velikost pracovního prostoru stroje. Z toho důvodu může být vhodným strojem portálová frézka.



Obr. 10.5 Portálová frézka FZ 30 [22]

Ostatní díly je možné vyrobit metodami plošného tváření z plechového polotovaru. Tomu předchází dělení materiálu. K tomuto účelu lze využít např. obrysové frézování, pomocí kterého lze připravit přesné tvary pro následné tváření (rozvinuté tvary žebor) nebo stojiny nosníků včetně odlehčovacích otvorů. Ohýbáním na ohraňovacím lisu lze vyrobit zadní část pomocného nosníku a stringery. Na výrobu žebor se využije technologie tváření nepevným nástrojem.

Jako hlavní metoda spojování je využito nýtování. Spojování je provedeno plnými nýty (spojení přední a zadní částí nosníku, nýtování zadních pásnic hlavního nosníku) nebo trnovými nýty v případě přístupu z jedné strany konstrukce (potahové plechy, výztuhy atd.).

11 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce vzešla z požadavku modernizace letounu Z 242 L. Daný letoun je pokračovatelem tzv. řady 40, jejíž počátek sahá do šedesátých let minulého století. I přes to má letoun stále co nabídnout, zejména jako ideální výcvikový stroj umožňující komplexní výcvik od základů pilotáže až po létání akrobacie. Z hlediska konstrukčního a technologického je na dnešní dobu již zastaralý. Záměrem práce proto bylo poukázat na inovační možnosti stávajícího řešení a navrhnout vhodné úpravy, které by mělo smysl prakticky realizovat.

Jako první krok diplomové práce byla provedena podrobná analýza draku letounu, zejména s ohledem na konstrukční a technologické zpracování. To z velké části pomohlo k identifikaci problematických míst a k rozhodnutí se, které části jsou vhodné k rekonstrukci. Prioritou však bylo dodržet výrobcem dané požadavky včetně předpisové báze.

Tím hlavním požadavkem bylo přepracování hlavních závěsů tak, aby mohly být oba spojovací čepy orientovány vodorovně. V případě trupu nebylo příliš problematické požadavku vyhovět. Byla navržena nová závěsná kování, která je možné přivařit k nosníku trupu podle zavedeného postupu a bez velkých zásahů do příhradové konstrukce.

Co se týče křídla, byl proveden kompletně nový návrh nosníků s tím, že závěsy jsou jeho pevnou součástí. Toho bylo dosaženo díky frézování předních částí nosníků z jednoho polotovaru materiálu. Nosníky tak bylo možné navrhnout efektivně z hlediska hmotnosti, přenosu zatížení a také snahy o dosažení vysoké životnosti. Tomu přispěje z velké míry i to, že závěsy nemusí být spojovány s nosníkem a nedojde tak výskytu nebezpečných koncentrací napětí v kritickém místě křídla. Jediným nedostatkem se zdá být velký odpad materiálů při obrábění, což je však převáženo výše zmíněnými výhodami.

Dalším plusem frézovaných nosníků je využití utěsněných prostorů pro integrální palivovou nádrž. Navržená nádrž má dostatečnou kapacitu i pro druhý letoun Z 143 LSi, u kterého se předpokládá využití stejného křídla. Odstraněním současných nádrží včetně těch vnějších došlo také ke zjednodušení konstrukčního uspořádání a předpokládané úspoře hmotnosti. Úspora byla přibližně odhadnuta na 25 kg v případě obou křídel. Tím by se snížila prázdná hmotnost, což by vedlo ke zlepšení provozních a ekonomických vlastností letounu.

V dalším fázi návrhu by bylo vhodné provést zpracování křídélek a vztakových klapek včetně detailního konstrukčního návrhu ostatních částí křídla. Poté by mohl být proveden detailnější hmotový rozbor doplněný o rozbor centráží. Tyto analýzy budou hrát důležitou roli v otázce praktické realizace projektu.

Ta nejdůležitější otázka se však týká ekonomického přínosu případné modernizace. Je zřejmé, že jakákoliv změna stávajícího řešení znamená pro výrobce vysoké náklady, jak z důvodu vývojových prací, zavedení nových technologií, prototypových zkoušek a nakonec i certifikace. Možnosti ani rozsah práce neumožňují tyto problémy více analyzovat. Taková studie by musela být provedena přímo v podmínkách realizace projektu, tj. firmou ZLIN Aircraft a.s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *PŘÍLOHA K TYPOVÉMU OSVĚDČENÍ č. 92-03* [online]. Praha: Úřad pro civilní letectví České republiky, 2005 [cit. 2019-09-25]. Dostupné z: <https://ucl.devlab.cz/wp-content/uploads/2019/07/TCDS-92-03-4-1.pdf>
- [2] ZLIN Z242 L. In: *Vlimages* [online]. [cit. 2019-09-25]. Dostupné z: <https://www.vlimages.com/product/romanian-airclub-zlin-242l-yr-zea/>
- [3] *SERVICE LETTER No. L 120* [online]. Otrokovice: ZLIN AIRCRAFT, 2019 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: https://www.zlinaircraft.eu/download/servisni-listy/Service%20Letter%20L120_eng.pdf
- [4] Interní dokumenty společnosti ZLIN AIRCRAFT a.s. Otrokovice.
- [5] Z-42. In: *Rajce* [online]. [cit. 2019-10-26]. Dostupné z: https://veka1.rajce.idnes.cz/letadla_znacky_Zlin/#z42-aerohobby.jpg
- [6] Z-142. In: *Rajce* [online]. [cit. 2019-10-26]. Dostupné z: https://veka1.rajce.idnes.cz/letadla_znacky_Zlin/#letadlazlin.jpg
- [7] VOLEJNÍK, Jiří. *Zlínské letectví*. Zlín: Tiskárna Lelka, Dolní Bojanovice, 2009. ISBN 978-80-87130-10-0.
- [8] Z-242 L. In: *Kovozávody Prostějov* [online]. j: j, j [cit. 2019-10-26]. Dostupné z: <https://www.kovozavody.cz/produkt/zlin-z-242l-in-civil-service/>
- [9] *Katalog náhradních dílu Z 242 L* [online]. Otrokovice: ZLIN AIRCRAFT, 2019 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.zlinaircraft.eu/Servis-a-podpora/dokumenty-ke-stazeni/>
- [10] Kostra křídla Z 242 L. In: *E15* [online]. 2014, 2014 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://img.cncenter.cz/img/11/full/2816894_.jpg
- [11] *Nářízení Komise (EU) č. 748/2012*. In: . EU, 2012. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?qid=1396859085798&uri=CELEX:32012R0748>
- [12] ZAMAZAL, Jakub. *Návrh rekonstrukce střední části trupu letounu Z 143 náhradou za poloskořepinu*. Brno, 2017. Diplomová práce. VUT.
- [13] *FAR Part 23, Airworthiness Standards: Normal, Utility, Acrobatic, and Commuter Category Airplanes*. 1. Washington: FAA, 2019. Dostupné také z: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=685dc1ae97ae3f5e5569e47880fab01e&mc=true&node=pt14.1.23>
- [14] ČTVERÁK, J, J MERTL a Antonín PÍŠTĚK. *Soubor podkladů pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí*. Brno: LÚ FSI VUT Brno, 1997, 22 l. : tabulky, grafy.
- [15] *Základy pevnosti leteckých tenkostěnných konstrukcí* [online]. VUT Brno: Letecký ústav [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/stress.php>

- [16] HORÁK, Marek. *Pevnostní analýza nosníku s tenkou stojinou - vliv otvorů a tahového pole*. Brno, 2014. Dizertační práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. ANTONÍN PÍŠTĚK, CSc.
- [17] KLEMENT, Josef. *Technologie výroby letadel I: Nýtování leteckých konstrukcí*. Brno. Přednáška. VUT.
- [18] HÁLA, Aleš. *Analýza stability kovových výztužných profilů při tlakovém zatížení pomocí metody konečných prvků*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT.
- [19] BURŠA, Jiří. *Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud_opory/MKP4.pdf
- [20] *Metoda konečných prvků I* [online]. Ostrava: VŠB, 2013 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_010/Metoda%20kone%C4%8Dn%C3%BDch%20prvk%C5%AF%201/02%20Text%20pro%20e-learning/METODA%20KONE%C4%8CN%C3%9DCH%20PRVK%C5%AE%20I%2004.pdf
- [21] *Letová příručka letounu Z 242 L* [online]. Otrokovice: ZLIN Aircraft, 2013 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.zlinaircraft.eu/download/bulletin/LP_Rev3.pdf
- [22] Portálová frézka Zimmermann. In: *Zimmermann milling solutions* [online]. [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: https://www.fzimmermann.com/fileadmin/_processed_/2/0/csm_FZ30_Teaser_a256e1c1af.jpg

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Veličina/symbol	Jednotka	Popis
AMU	[-]	Acceleration Monitoring Unit
A_p	[mm ²]	Průřezová plocha pásnic
CAD	[-]	Computer aided design
CAM	[-]	Computer aided manufacturing
CNC	[-]	Computer Numerical Control
d	[mm]	Průměr čepu
D	[mm]	Průměr odlehčovacího otvoru
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
EASA	[-]	European Aviation Safety Agency
$F_{A,B}$	[N]	Reakce čepu ve styčných plochách
FAA	[-]	Federal Aviation Administration
FAR 23	[-]	Certifikační předpis
F_n	[N]	Síla na jeden nýt
F_{nd}	[N]	Únosnost nýtu ve střihu
g	[ms ⁻²]	Gravitační zrychlení
h_e	[mm]	Efektivní výška nosníku
HEX	[-]	Objemový prvek (šestistěn)
HMH	[-]	Huber-von Mises-Hencky
IFR	[-]	Instrument flight rules
$J_{1,2}$	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu nosníků
k	[1]	Součinitel plasticity
$k_{1,2}$	[1]	Poměry ohybových tuhostí nosníků
M_K	[Nm]	Krouticí moment
M_{Keo}	[Nm]	Krouticí moment k elastické ose
MKP	[-]	Metoda konečných prvků
m_{max}	[kg]	Maximální hmotnost letounu
m_{min}	[kg]	Minimální hmotnost letounu
M_N	[Nm]	Normálový ohybový moment

MSA	[-]	Mezinárodní standardní atmosféra
M_T	[Nm]	Tečný ohybový moment
m_{tow}	[kg]	Maximální vzletová hmotnost
n	[1]	Násobek zatížení
p	[MPa]	Měrný tlak
$q_{1,2}$	[Nmm ⁻¹]	Neznámý smykový tok v dutinách křídla
q_p	[Nmm ⁻¹]	Únosnost hladké desky při smykovém zatížení
$q_{s1,2}$	[Nmm ⁻¹]	Smykový tok ve stojinách od posouvající síly
$q_{v1,2}$	[Nmm ⁻¹]	Výsledný smykový tok ve stojinách nosníků
R_m	[MPa]	Mez pevnosti materiálu
r_n	[mm]	Nýtová rozteč
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu materiálu
$R_{x,y,z}$	[N]	Reakce v závěsech v jednotlivých osách
S	[mm ²]	Plocha průřezu čepu
t_0	[mm]	Šířka mezery mezi okem a vidlicí závěsu
t_1	[mm]	Tloušťka vidlice
t_2	[mm]	Tloušťka oka
TET	[-]	Objemový prvek (čtyřstěn)
T_N	[N]	Normálová posouvající síla
T_T	[N]	Tečná posouvající síla
$U_{1,2}$	[mm ²]	Plocha vnitřních dutin křídla
U_C	[ms ⁻¹]	Rychlost poryvu při v_C
U_D	[ms ⁻¹]	Rychlost poryvu při v_D
u_i, v_i, w_i	[mm]	Složky deformačních posuvů
v_A	[ms ⁻¹]	Návrhová obratová rychlost
v_C	[ms ⁻¹]	Návrhová cestovní rychlost
v_D	[ms ⁻¹]	Návrhová rychlost střemhlavého letu
v_F	[ms ⁻¹]	Návrhová rychlost s vysunutými vztl. klapkami
v_G	[ms ⁻¹]	Návrhová obratová rychlost na zádech
v_S	[ms ⁻¹]	Pádová rychlost

v_{SF}	$[ms^{-1}]$	Pádová rychlost s vysunutými vztl. klapkami
VVÚ	[-]	Výsledné vnitřní účinky
W0	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu
α	$[^\circ]$	Sklon působení výsledné síly v závěsu
η	[1]	Součinitel rezervy
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
$\sigma_{1,2}$	[MPa]	Normálové napětí v pásnicích nosníků
σ_{kr}	[MPa]	Kritické napětí pásnice v tlaku
σ_{1g}	[MPa]	Napětí v kritickém místě za letu při $n=1$
τ	[MPa]	Smykové napětí
τ_{kr}	[MPa]	Smykové kritické napětí
μ	[1]	Poissonova konstanta
Π	[J]	Celková potenciální energie
W	[J]	Energie napjatosti
P	[J]	Potenciál zatížení
μ_g	[1]	Hmotnostní poměr letounu
k_g	[1]	Zmírňující součinitel poryvů
ρ_0	$[kgm^{-3}]$	Hustota vzduchu v 0 m MSA

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Z 242 L s imatrikulací YR-ZEA [2]	16
Obr. 2.2 Třípohledový výkres letounu Z 242 L [3].....	17
Obr. 2.3 Z 42 [5]	18
Obr. 2.4 Z 142 [6]	18
Obr. 2.5 Z 242 L [8]	18
Obr. 2.6 Části trupu letounu Z 242 L [9]	19
Obr. 2.7 Závěsné kování na hlavním nosníku trupu.....	19
Obr. 2.8 Schéma křídla	20
Obr. 2.9 Vnitřní uspořádání křídla [9].....	20
Obr. 2.10 Závěsy hlavního nosníku.....	21
Obr. 2.11 Výztužné ucho dolního závěsu	21
Obr. 2.12 Kostra křídla [10]	21
Obr. 4.1 Obratová a poryvová obálka (akrobatická třída, $H=0$ m MSA)	27
Obr. 4.2 Obratová a poryvová obálka (akrobatická třída, $H=0$ m MSA, klapky vysunuty) 29	
Obr. 5.1 Normálová posouvající síla-provozní zatížení.....	30
Obr. 5.2 Normálový ohybový moment-provozní zatížení	31
Obr. 5.3 Krouticí moment-provozní zatížení.....	31
Obr. 6.1 Příhradový trup letounu [9].....	32
Obr. 6.2 Změna koncepce závěsů na hlavním nosníku trupu	32
Obr. 6.3 Schéma závěsného kování na trupu	33
Obr. 6.4 Hlavní nosník trupu včetně přivařených závěsů	33
Obr. 6.5 Změna závěsů na hlavním nosníku křídla	33
Obr. 6.6 Schéma hlavních závěsů křídla	34
Obr. 6.7 Schéma nového uspořádání závěsů křídla	35
Obr. 6.8 Schéma zatížení ok hlavních závěsů	37
Obr. 6.9 Současné provedení čepů hlavních závěsů [9].....	41
Obr. 6.10 Schéma výpočtu čepu	42
Obr. 7.1 Referenční model křídla.....	44
Obr. 7.2 Referenční výkres křídla	44
Obr. 7.3 Frézovaná část hlavního nosníku křídla	45
Obr. 7.4 Kořenová část hlavního nosníku křídla	45
Obr. 7.5 Sestava hlavního nosníku.....	45

Obr. 7.6 <i>Detail napojení hlavního nosníku</i>	46
Obr. 7.7 <i>Plynulé zeslabení pásnice</i>	46
Obr. 7.8 <i>Průřezy hlavního nosníku</i>	46
Obr. 7.9 <i>Zadní nosník křídla</i>	47
Obr. 7.10 <i>Sestava zadního nosníku</i>	47
Obr. 7.11 <i>Detail napojení zadního nosníku</i>	47
Obr. 7.12 <i>Průřezy zadního nosníku</i>	47
Obr. 7.13 <i>Rozložení průřezu pásnice na desky</i>	50
Obr. 7.14 <i>Smykové toky v dvoudutinové konstrukci [14]</i>	51
Obr. 7.15 <i>Nýtování stojiny s pásnicí</i>	53
Obr. 7.16 <i>Spoj na hlavním nosníku</i>	55
Obr. 7.17 <i>Spoj na zadním nosníku</i>	55
Obr. 7.18 <i>Rozložení sil na spoji hlavního nosníku</i>	56
Obr. 7.19 <i>Rozložení sil na spoji zadního nosníku</i>	56
Obr. 8.1 <i>Typy konečných prvků [18]</i>	57
Obr. 8.2 <i>Zjednodušená geometrie spoje</i>	58
Obr. 8.3 <i>Síť konečných prvků-sestava spoje</i>	59
Obr. 8.4 <i>Okrajové podmínky</i>	59
Obr. 8.5 <i>Napětí (HMH) v závěsu trupu</i>	60
Obr. 8.6 <i>Celková deformace závěsu trupu</i>	60
Obr. 8.7 <i>Napětí (HMH) v závěsu křídla</i>	61
Obr. 8.8 <i>Deformace vidlice závěsu křídla v ose x (zvětšené měřítko)</i>	61
Obr. 8.9 <i>Napětí v čepu (HMH)</i>	62
Obr. 8.10 <i>Celková deformace čepu</i>	62
Obr. 9.1 <i>Současné uspořádání palivových nádrží [9]</i>	63
Obr. 9.2 <i>Umístění integrální nádrže</i>	64
Obr. 9.3 <i>Integrální palivová nádrž</i>	64
Obr. 9.4 <i>Řešení kontrolního otvoru</i>	65
Obr. 9.5 <i>Vnitřní konstrukce nádrže</i>	65
Obr. 9.6 <i>Sestava frézovaného kořenového žebra</i>	66
Obr. 9.7 <i>Vnitřní lisované žebro</i>	66
Obr. 9.8 <i>Utěsnění integrální nádrže</i>	67
Obr. 9.9 <i>Příklad těsnění nosníku s potahem [17]</i>	67

Obr. 9.10 <i>Zóny úderu blesku</i> [4]	68
Obr. 10.1 <i>Propojení hlavních závěsů křídla a trupu</i>	69
Obr. 10.2 <i>Sestava nosníků a integrální nádrže</i>	69
Obr. 10.3 <i>Změna vedení příčného řízení</i>	69
Obr. 10.4 <i>Technologie výroby dílů křídla</i>	71
Obr. 10.5 <i>Portálová frézka FZ 30</i> [22]	71

SEZNAM TABULEK

Tab.2.1 <i>Rozměry letounu Z 242 L</i> [1].....	16
Tab.2.2 <i>Hmotnosti jednotlivých tříd letounu Z 242 L</i> [1].....	17
Tab.2.3 <i>Letové výkony jednotlivých tříd letounu Z 242 L</i> [4]	17
Tab.2.4 <i>Pohonná soustava letounu Z 242 L</i> [1]	17
Tab.4.1 <i>Provozní násobky</i>	24
Tab.4.2 <i>Hmotnostní konfigurace</i> [4]	24
Tab.4.3 <i>Vstupní aerodynamické podklady</i> [4].....	24
Tab.4.4 <i>Praktické dostupy letounu</i> [4]	24
Tab. 6.1 <i>Rozhodující zatížení v místech závěsů</i> [4]	34
Tab. 6.2 <i>Vzdálenosti potřebné pro výpočet reakcí</i>	34
Tab.6.3 <i>Maximální reakce v závěsech křídla (provozní zatížení)</i>	36
Tab.6.4 <i>Výsledné reakce v závěsech křídla</i>	36
Tab. 6.5 <i>Materiálové charakteristiky závěsů</i>	37
Tab. 6.6 <i>Vstupní zatížení do programu Ministatik</i>	37
Tab. 6.7 <i>Horní závěs křídla</i>	38
Tab. 6.8 <i>Dolní závěs křídla</i>	38
Tab. 6.9 <i>Horní závěs trupu</i>	39
Tab. 6.10 <i>Dolní závěs trupu</i>	39
Tab. 6.11 <i>Zadní závěs křídla-namáhání tahem</i>	40
Tab. 6.12 <i>Zadní závěs křídla-namáhání tlakem</i>	40
Tab. 6.13 <i>Materiálové charakteristiky čepu</i> [4].....	41
Tab. 6.14 <i>Zatížení čepu</i>	41
Tab.6.15 <i>Vstupní údaje pro výpočet hlavního čepu</i>	41
Tab. 6.16 <i>Výsledné hodnoty pevnostní kontroly čepu hlavního závěsu</i>	43
Tab. 7.1 <i>Materiálové charakteristiky-dural 2124</i> [4]	48
Tab. 7.2 <i>Rozhodující početní zatížení</i>	48
Tab. 7.3 <i>Zatížení při $n=1$</i>	48
Tab. 7.4 <i>Výpis z pevnostní kontroly (řez R2a)</i>	54
Tab. 7.5 <i>Použité nýty</i> [17]	55
Tab. 7.6 <i>Zatížení spoje</i>	55
Tab. 8.1 <i>Použité prvky a přiřazené vlastnosti</i>	59
Tab. 9.1 <i>Kapacita nádrží</i> [4]	63

Tab. 10.1 <i>Hmotnost křídla po rekonstrukci</i>	70
Tab. 10.2 <i>Hmotnost současného křídla</i> [4].....	70
Tab. 10.3 <i>Porovnání hmotností křídel</i>	70

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Výpis z pevnostní kontroly křídla pro všechny řezy	84
Příloha č. 2: Kontrola propojení hlavního nosníku	97
Příloha č. 3: Kontrola propojení zadního nosníku	99

PŘÍLOHY**PŘÍLOHA Č. 1: VÝPIS Z PEVNOSTNÍ KONTROLY KŘÍDLA PRO VŠECHNY ŘEZY**

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R2a				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	23479	1942	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	48797	976	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	5574	111	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	220,9	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	2,0	1,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	21990000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	253,3	157,5	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,14	1,27	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	230,3	157,5	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,72	2,51	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	26,3		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,03		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	53,1	15,7	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	76,7	46,9	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,44	2,99	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	106,3	15,7	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	138,0	68,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,30	4,34	[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R2				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	21538	1888	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	43395	986	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	4957	113	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	218,7	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	2,0	1,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	19350000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	279,7	159,2	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,04	1,26	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	236,8	159,2	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	$\sigma_{dov}(0,9Rm)$	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,67	2,49	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	27,0		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,00		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	49,2	15,2	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	78,3	48,3	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,59	3,17	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	98,5	15,2	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	138,0	68,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,40	4,46	[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R3				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	19771	1925	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	39086	957	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	4465	109	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	219,4	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,8	1,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	17960000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	274,9	154,5	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,05	1,29	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	232,0	154,5	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,71	2,56	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	26,5		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,02		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	50,1	15,5	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	63,0	51,6	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,26	3,32	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	90,1	15,5	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	116,0	68,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,29	4,38	[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R4				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	17889	1817	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	31867	902	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	3640	103	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	221,3	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,8	1,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	15530000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	265,7	145,7	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,09	1,37	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	221,9	145,7	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,78	2,72	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	25,3		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,07		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	44,9	14,7	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	52,4	42,2	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,17	2,88	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	80,8	14,7	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	116,0	68,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,43	4,64	[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R5				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	16084	1738	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	25808	872	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	2948	100	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	222,7	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,8	1,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	13010000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	264,0	140,8	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,10	1,42	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	219,1	140,8	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,81	2,81	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	25,0		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,08		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	40,1	14,0	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	53,2	43,1	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,32	3,08	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	72,2	14,0	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	116,0	68,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,61	4,85	[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R6				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	13954	1751	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	20410	838	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	2331	96	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	224,0	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,6	1,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	10710000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	263,3	135,3	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,10	1,48	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	215,9	135,3	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,83	2,93	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	24,7		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,09		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	38,9	14,1	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	41,5	43,1	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,07	3,05	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	62,3	14,1	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	92,0	68,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,48	4,81	[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R7				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	12318	1680	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	15995	801	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	1827	91	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	225,6	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,6	1,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	8781000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	263,6	129,3	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,10	1,55	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	212,9	129,3	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,86	3,06	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	24,3		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,11		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	34,1	13,6	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	43,5	44,1	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,27	3,25	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	54,6	13,6	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	92,0	68,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,68	5,01	[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R8				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	10370	1692	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	12141	757	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	1386	86	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	227,0	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,4	1,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	7055000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	264,8	122,2	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,10	1,64	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	210,6	122,2	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,88	3,24	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	24,0		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,12		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	32,6	13,7	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	32,9	44,1	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,01	3,23	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	45,7	13,7	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	72,0	68,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,58	4,98	[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R9				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	8751	1616	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	8833	702	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	1009	80	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	228,3	123,9	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,4	1,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	5534000	439808	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	267,8	113,3	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	290,0	200,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,08	1,76	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	209,1	113,3	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,89	3,49	[-]
KONTROLA DOLNÍ PÁSNICE HLAVNÍHO NOSNÍKU S OHLEDEM NA ÚNAVU				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	23,9		[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{1g}	27,0		[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,13		[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	27,4	13,0	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	32,5	44,1	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,19	3,38	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	38,3	13,0	[Nmm ⁻¹]
Únosnost hladké stojiny	q_p	72,0	68,0	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,88	5,21	[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R10				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	6547	1292	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	5541	446	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	633	51	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	220,0	124,0	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,4	1,0	[mm]
Průměr odlehčovacího otvoru	D	100,0	55,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	4390000	353711	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	215,3	100,0	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	250,0	150,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,16	1,50	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	215,3	100,0	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,84	3,96	[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	21,3	10,4	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	30,6	42,1	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,44	4,05	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	29,8	10,4	[Nmm ⁻¹]
Únosnost stojiny s otvorem	q_p	39,3	37,8	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	1,32	3,63	[-]
KONTROLA NÝTOVÁNÍ STOJINY				
Průměr nýtu	d_n	4,0		[mm]
Nýtová rozteč	r_n	34,0		[mm]
Síla na jeden nýt	F_n	1011,8		[N]
Únosnost nýtu	$F_{n\dot{u}}$	3236,0		[N]
Součinitel rezervy	η	3,20		[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R11				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	4436	1304	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	2905	412	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	332	47	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	223,0	124,0	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,2	1,0	[mm]
Průměr odlehčovacího otvoru	D	100,0	55,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	2493000	353711	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	171,4	92,3	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	200,0	150,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,17	1,62	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	171,4	92,3	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	2,31	4,29	[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	16,6	10,5	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	20,8	42,1	[MPa]
Součinitel rezervy	η	1,26	4,01	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	19,9	10,5	[Nmm ⁻¹]
Únosnost stojiny s otvorem	q_p	39,7	37,8	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	2,00	3,60	[-]
KONTROLA NÝTOVÁNÍ STOJINY				
Průměr nýtu	d_n	4,0		[mm]
Nýtová rozteč	r_n	34,0		[mm]
Síla na jeden nýt	F_n	676,4		[N]
Únosnost nýtu	$F_{n\dot{u}}$	3236,0		[N]
Součinitel rezervy	η	4,78		[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R12				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	2770	847	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	1247	177	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	143	20	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	223,0	124,0	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,2	1,0	[mm]
Průměr odlehčovacího otvoru	D	100,0	55,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	2493000	353711	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_n	73,6	39,6	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	200,0	150,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	2,72	3,78	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	73,6	39,6	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	5,38	9,99	[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	10,4	6,8	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	20,8	42,1	[MPa]
Součinitel rezervy	η	2,01	6,17	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	12,4	6,8	[Nmm ⁻¹]
Únosnost stojiny s otvorem	q_p	39,7	37,8	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	3,20	5,54	[-]
KONTROLA NÝTOVÁNÍ STOJINY				
Průměr nýtu	d_n	4,0		[mm]
Nýtová rozteč	r_n	34,0		[mm]
Síla na jeden nýt	F_n	422,4		[N]
Únosnost nýtu	$F_{n\dot{u}}$	3236,0		[N]
Součinitel rezervy	η	7,66		[-]

PEVNOSTNÍ KONTROLA KŘÍDLA: R13				
VSTUPNÍ ÚDAJE		HLAVNÍ NOSNÍK	ZADNÍ NOSNÍK	
Posouvající síla	T	798	1650	[N]
Ohybový moment (n=6)	M_o (n=6)	158	145	[Nm]
Ohybový moment (n=1)	M_o (n=1)	18	17	[Nm]
Efektivní výška stojiny	h_e	225,0	223,0	[mm]
Tloušťka stojiny	t_s	1,2	1,0	[mm]
Průměr odlehčovacího otvoru	D	100,0	55,0	[mm]
Kvadratický moment průřezu	J	2718000	2493000	[mm ⁴]
KONTROLA STABILITY HORNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_h	8,6	8,6	[MPa]
Kritické napětí pásnice	σ_{kr}	200,0	150,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	23,20	17,54	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI DOLNÍ PÁSNICE				
Normálové napětí v pásnici	σ_d	8,6	8,6	[MPa]
Dovolené napětí pásnice	σ_{dov} (0,9Rm)	396,0	396,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	45,94	46,29	[-]
KONTROLA STABILITY STOJINY				
Smykové napětí ve stojině	τ_s	3,0	7,4	[MPa]
Kritické napětí ve stojině	τ_{kr}	20,5	13,0	[MPa]
Součinitel rezervy	η	6,93	1,76	[-]
KONTROLA ÚNOSNOSTI STOJINY				
Smykový tok ve stojině	q_s	3,5	7,4	[Nmm ⁻¹]
Únosnost stojiny s otvorem	q_p	40,0	51,2	[Nmm ⁻¹]
Součinitel rezervy	η	11,27	6,92	[-]
KONTROLA NÝTOVÁNÍ STOJINY				
Průměr nýtu	d_n	4,0		[mm]
Nýtová rozteč	r_n	34,0		[mm]
Síla na jeden nýt	F_n	120,6		[N]
Únosnost nýtu	$F_{n\dot{u}}$	3236,0		[N]
Součinitel rezervy	η	26,82		[-]

PŘÍLOHA Č. 2: KONTROLA PROPOJENÍ HLAVNÍHO NOSNÍKU

Nýt	Ø nýt	x	y	R _m (nýt)	E _(nýt)	PSR	t ₁	R _m (1)	E ₍₁₎	t ₂	R _m (2)	E ₍₂₎
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[MPa]
1	4	50	0	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
2	4	-50	0	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
3	4	34,5	29	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
4	4	-34,5	29	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
5	4	69	58	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
6	4	-69	58	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
7	4	34,5	85,4	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
8	4	-34,5	85,4	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
9	4	18	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
10	4	-18	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
11	4	52	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
12	4	-52	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
13	4	86	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
14	4	-86	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
15	4	120	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
16	4	-120	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
17	4	154	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
18	4	-154	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
19	4	188	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
20	4	-188	106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
21	4	188	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
22	4	-188	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
23	4	154	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
24	4	-154	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
25	4	120	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
26	4	-120	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
27	4	86	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
28	4	-86	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
29	4	52	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
30	4	-52	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
31	4	18	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
32	4	-18	-106	195	72000	2	2,7	440	72000	3,2	440	72000
33	4	34,5	-85,4	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
34	4	-34,5	-85,4	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
35	4	137	-85,4	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
36	4	-137	-85,4	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
37	4	69	-58	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
38	4	-69	-58	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
39	4	34,5	-29	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000
40	4	-34,5	-29	195	72000	1	1,4	440	72000	1,2	440	72000

Nýt	F_x	F_y	F_{vys}	η_{smyk} (nýt)
[-]	[N]	[N]	[N]	[-]
1	11,02	-70,61	71,47	21,6
2	11,02	342,36	342,54	4,51
3	130,78	-6,6	130,95	11,79
4	130,78	278,35	307,54	5,02
5	250,55	-149,08	291,54	5,3
6	250,55	420,83	489,76	3,15
7	363,7	-6,6	363,76	4,24
8	363,7	278,35	457,99	3,37
9	897,54	123,08	905,94	3,41
10	897,54	420,42	991,13	3,12
11	897,54	-157,74	911,3	3,39
12	897,54	701,24	1139	2,71
13	897,54	-438,56	998,96	3,09
14	897,54	982,06	1330,42	2,32
15	897,54	-719,38	1150,26	2,68
16	897,54	1262,88	1549,34	1,99
17	897,54	-1000,2	1343,87	2,3
18	897,54	1543,7	1785,67	1,73
19	897,54	-1281,03	1564,16	1,97
20	897,54	1824,53	2033,34	1,52
21	-853,46	-1281,03	1539,29	2,01
22	-853,46	1824,53	2014,27	1,53
23	-853,46	-1000,2	1314,84	2,35
24	-853,46	1543,7	1763,92	1,75
25	-853,46	-719,38	1116,2	2,77
26	-853,46	1262,88	1524,23	2,03
27	-853,46	-438,56	959,55	3,22
28	-853,46	982,06	1301,09	2,37
29	-853,46	-157,74	867,91	3,56
30	-853,46	701,24	1104,6	2,8
31	-853,46	123,08	862,29	3,58
32	-853,46	420,42	951,39	3,25
33	-341,66	-6,6	341,72	4,52
34	-341,66	278,35	440,69	3,5
35	-341,66	-429,9	549,13	2,81
36	-341,66	701,65	780,41	1,98
37	-228,5	-149,08	272,83	5,66
38	-228,5	420,83	478,86	3,22
39	-108,74	-6,6	108,94	14,17
40	-108,74	278,35	298,84	5,17

PŘÍLOHA Č. 3: KONTROLA PROPOJENÍ ZADNÍHO NOSNÍKU

Nýt	\varnothing nýt	x	y	R_m (nýt)	E (nýt)	PSR	t_1	R_m (1)	E (1)	t_2	R_m (2)	E (2)
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[MPa]
1	3	12	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
2	3	12	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
3	3	37	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
4	3	37	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
5	3	62	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
6	3	62	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
7	3	87	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
8	3	87	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
9	3	112	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
10	3	112	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
11	3	137	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
12	3	137	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
13	3	-13	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
14	3	-13	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
15	3	-38	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
16	3	-38	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
17	3	-63	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
18	3	-63	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
19	3	-88	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
20	3	-88	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
21	3	-113	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
22	3	-113	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
23	3	-138	56,5	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
24	3	-138	-58	195	72000	1	2	440	72000	1	440	72000
25	3	37,5	0	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000
26	3	-37,5	0	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000
27	3	20	28	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000
28	3	-20	28	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000
29	3	60	28	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000
30	3	-60	28	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000
31	3	20	-29,5	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000
32	3	-20	-29,5	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000
33	3	60	-29,5	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000
34	3	-60	-29,5	195	72000	1	1	440	72000	1	440	72000

Nýt	F_x	F_y	F_{vys}	η_{smyk} (nýt)
[-]	[N]	[N]	[N]	[-]
1	90,24	1,13	90,25	9,62
2	-90,38	1,13	90,39	9,61
3	90,24	-38,3	98,03	8,86
4	-90,38	-38,3	98,16	8,85
5	90,24	-77,74	119,11	7,29
6	-90,38	-77,74	119,21	7,28
7	90,24	-117,18	147,9	5,87
8	-90,38	-117,18	147,98	5,87
9	90,24	-156,61	180,75	4,8
10	-90,38	-156,61	180,82	4,8
11	90,24	-196,05	215,82	4,02
12	-90,38	-196,05	215,88	4,02
13	90,24	40,57	98,94	8,78
14	-90,38	40,57	99,07	8,77
15	90,24	80	120,6	7,2
16	-90,38	80	120,7	7,19
17	90,24	119,44	149,7	5,8
18	-90,38	119,44	149,78	5,8
19	90,24	158,88	182,72	4,75
20	-90,38	158,88	182,78	4,75
21	90,24	198,31	217,88	3,99
22	-90,38	198,31	217,94	3,98
23	90,24	237,75	254,3	3,41
24	-90,38	237,75	254,35	3,41
25	1,11	-39,09	39,11	22,2
26	1,11	79,22	79,22	10,96
27	45,28	-11,49	46,72	18,59
28	45,28	51,61	68,66	12,65
29	45,28	-74,59	87,26	9,95
30	45,28	114,71	123,32	7,04
31	-45,42	-11,49	46,85	18,53
32	-45,42	51,61	68,75	12,63
33	-45,42	-74,59	87,33	9,94
34	-45,42	114,71	123,37	7,04