



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁHRADA KOVOVÝCH OCASNÍCH PLOCH LETOUNU VUT 100 KOMPOZITNÍMI

TAIL UNITS DESIGN OF VUT 100 AIRCRAFT MADE OUT OF COMPOSITE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MARTIN BERKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MICHAL MALIŠ, PH.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Berka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Stavba letadel (2301T039)**

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:

Náhrada kovových ocasních ploch letounu VUT 100 kompozitními

v anglickém jazyce:

Tail units design of VUT 100 aircraft made out of composite

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Letoun VUT 100 je stavěn podle požadavků předpisu CS-23. Podle uspořádání ocasních ploch zvolte, která kormidla budou navržena z kompozitních materiálů. Vypracujte rozbor požadavků předpisu na kompozitní konstrukce a rozbor použitelných výrobních technologií. Vypočtete zatížení vodorovné ocasní plochy, navrhnete základní rozměry stabilizátoru, vnitřní konstrukci a vypracujte systémový model s ohledem na upnutí k okolní konstrukci. Proveďte výpočet únosnosti a pevnostní kontrolu konstrukce.

Cíle diplomové práce:

1. Rozbor požadavků předpisu
2. Výpočet zatížení vodorovné ocasní plochy
3. Systémový model vodorovné ocasní plochy
4. Návrh vnitřní konstrukce ocasních ploch
5. Výpočet únosnosti a pevnostní kontrolu konstrukce

Seznam odborné literatury:

- [1] CS-23, Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Category Aeroplanes, EASA, 2003, 140 stran
- [2] Niu,C.Y.M., Composite Airframe Structure, Hong Kong Conmilit Press Ltd., Brno, 2005, 664 stran,
- [3] Middleton, D.H., Composite MAterial in Aircraft Structure, Longman Singapore Publisher Ltd.,1990, 379 stran

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Mališ, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 23.11.2013

L.S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.

Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

Děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem kompozitní vodorovné ocasní plochy letounu VUT 100. Je proveden výpočet zatížení a výběr rozhodujících případů zatížení. Je navržena vnitřní konstrukce stabilizátoru a pravého výškového kormidla. Jsou vybrány konstrukční materiály a proveden návrh skladby kompozitních materiálů. Jsou vytvořeny MKP modely stabilizátoru a pravého výškového kormidla v systému MSC Patran a následně provedena pevnostní kontrola těchto modelů pro vybrané případy zatížení za pomoci softwaru MSC Nastran a COMPOST.

Klíčová slova

VUT 100, kompozitní materiál, metoda konečných prvků, VOP, stabilizátor, výškové kormidlo

Abstract

This Master's thesis describes the design of composite horizontal tail of VUT 100 aircraft. Load calculation and selection of the critical load cases is performed. Internal structure of stabilizer and right elevator is designed. Construction materials are chosen and the structure of the composite materials is proposed. FEM models of stabilizer and the right elevator are created in MSC Patran system and consequently the strength test of the models for the selected load cases is executed using MSC Nastran software and COMPOST.

Keywords

VUT 100, composite materials, finite elements method, HTS, stabilizer, elevator

Bibliografická citace

Berka, M. *Náhrada kovových ocasních ploch letounu VUT 100 kompozitními*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 144 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Mališ, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma: „Náhrada kovových ocasních ploch letounu VUT 100 kompozitními“ jsem zpracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce.

V Brně dne 30. 5. 2014

.....
Martin Berka

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat firmě Evektor spol., s.r.o., hlavně panu Ing. Jiřímu Loutockému, za poskytnutí potřebných údajů k vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Františkovi Vaňkovi, Ph.D. za pomoc a odborné rady při výpočtu zatížení vodorovné ocasní plochy a hlavně vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Mališovi, Ph.D. za odborné vedení, mnoho cenných rad a čas strávený při konzultacích.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům za velkou podporu během celého mého vysokoškolského studia a psaní této diplomové práce.

Obsah

1. Úvod	14
2. Letoun VUT 100 Cobra	15
2.1. Základní technické parametry	15
2.2. Muška letounu VUT 100 Cobra	17
2.3. Použitý souřadnicový systém	18
2.4. Celkový náhled	19
3. Rozbor požadavků předpisu	20
4. Kompozitní materiál	21
4.1. Vláknové kompozitní materiály s polymerní matricí	22
4.2. Matrice pro letecké kompozitní materiály	24
4.3. Prepregy	26
4.4. Sendviče	26
4.5. Volba kompozitních materiálů pro návrh konstrukce VOP	26
5. Technologie výroby kompozitních materiálů	27
5.1. Technologie mokré laminace (wet lay-up)	27
5.2. Technologie navíjení vláken	28
5.3. Pultruze	28
5.4. Technologie RTM	29
5.5. Prepregová technologie a vytvrzování v autoklávu	29
5.6. Strojní kladení prepregů	30
5.7. Volba technologie výroby konstrukčních částí VOP	30
6. Výpočet zatížení vodorovné ocasní plochy (VOP)	31
6.1. Vstupní hodnoty do výpočtů	31
6.2. Výpočet obálky zatížení dle předpisu CS-23.333	32
6.2.1. Výpočet obratové obálky	32
6.2.2. Výpočet poryvové obálky	33
6.2.3. Výpočet klapkové obálky	34
6.2.4. Výsledné hodnoty výpočtu obálky zatížení	35
6.2.5. Obálka zatížení	36
6.3. Vyvažovací zatížení VOP	37
6.4. Zatížení VOP od manévru	39
6.5. Zatížení VOP od poryvu	43

6.6.	Nesymetrické zatížení VOP	46
6.7.	Výsledné hodnoty zatížení VOP	46
7.	Průběhy zatížení VOP	47
7.1.	Geometrie VOP	48
7.2.	Vztahy pro výpočet průběhů zatížení	48
7.3.	Vyvažovací zatížení VOP	49
7.4.	Zatížení VOP od manévru	50
7.5.	Zatížení VOP od poryvu	51
7.6.	Souhrn zatížení VOP	52
7.6.1.	Maximální provozní zatížení výškového kormidla	52
7.6.2.	Maximální provozní zatížení stabilizátoru	53
7.7.	Průběhy zatížení VOP	54
7.7.1.	Průběhy zatížení výškového kormidla	54
7.7.2.	Průběhy zatížení stabilizátoru	55
8.	Součinitel bezpečnosti	57
9.	Návrh konstrukce VOP	58
9.1.	Návrh konstrukce stabilizátoru	59
9.2.	Návrh konstrukce VK	61
9.2.1.	Hmotové vyvážení	63
10.	Návrh vrstvení VOP	66
10.1.	Použité materiály	66
10.2.	Návrh vrstvení stabilizátoru VOP	68
10.3.	Návrh vrstvení pravého výškového kormidla VOP	75
11.	Hmotnostní rozbor VOP	81
11.1.	Hmotnost stabilizátoru	81
11.2.	Hmotnost VK-P	82
11.3.	Hmotnost VK-L	82
11.4.	Celková hmotnost VOP	83
12.	Pevnostní kontrola	84
12.1.	MKP model stabilizátoru	84
12.2.	MKP model VK-P	86
12.3.	Souhrn případů zatížení pro pevnostní kontrolu stabilizátoru	88
12.3.1.	Případ č. 1 - Vyvažovací zatížení	88
12.3.2.	Případ č. 2 – Zatížení od manévru	88

12.3.3. Případ č. 3 – Zatížení od poryvu	89
12.4. Souhrn případů zatížení pro pevnostní kontrolu VK-P	89
12.4.1. Případ č. 1 – Zatížení od manévru	89
12.4.2. Případ č. 2 – Zatížení od hmotového vyvážení – 24 g kolmo k rovině řídicí plochy	89
13. Vyhodnocení výsledků	90
13.1. Způsob vyhodnocení programem COMPOST	90
14. Vyhodnocení MKP analýz	94
14.1. Vyhodnocení MKP analýz stabilizátoru	94
14.1.1. Případ č. 1 - Vyvažovací zatížení – kroutící moment	94
14.1.2. Případ č. 2 - Zatížení od manévru – ohybový moment	97
14.1.3. Případ č. 3 - Zatížení od poryvu – ohybový moment	97
14.2. Vyhodnocení MKP analýz VK-P	100
14.2.1. Případ č. 1 - Zatížení od manévru – nejkritičtější zatížení	100
14.2.2. Případ č. 2 – Zatížení od hmotového vyvážení VK-P - 24 g kolmo k rovině řídicí plochy	101
14.3. Celkové zhodnocení	102
15. Závěr	103
16. Seznam použitých zdrojů	104
17. Seznam použitých symbolů a zkratek	105
18. Seznam obrázků	107
19. Seznam tabulek	111
Seznam příloh	113
Přílohy	114

1. Úvod

Podle zadání diplomové práce bylo rozhodnuto, že obsahem této práce bude konstrukční návrh vodorovné ocasní plochy (dále VOP) letounu VUT 100 z kompozitních materiálů. Parametry a požadavky na VOP jsou stanoveny firmou Evector, spol. s.r.o. Firma Evector požaduje, aby zůstal zachován vnější tvar VOP, z důvodu zachování aerodynamických vlastností. Druhou podmínkou je zachování polohy závěsů z důvodu uchycení VOP k trupu letounu. Ze strany zadavatele nejsou dále vzneseny žádné konkrétní požadavky na použitý materiál nebo technologii výroby.

Před samotným návrhem vodorovné ocasní plochy bude třeba vypočítat zatížení této plochy, a to dle předpisu CS 23. Jedná se zejména o vyvažovací, manévrovací a poryvové zatížení. Následovat bude detailní návrh vnitřní konstrukce stabilizátoru a pravého výškového kormidla VOP pomocí systémových ploch v programu CATIA. Konstrukce bude navržena z uhlíkových kompozitů s polymerní, epoxidovou matricí. Z většiny bude materiál sendvičového typu s pěnovým jádrem. Dalším krokem je vytvoření MKP modelu stabilizátoru a pravého výškového kormidla v programu MSC Patran. Těmto modelům bude navrženo vrstvení jednotlivých částí z vybraných kompozitních materiálů a zavedeno náhradní modelové zatížení po rozpětí VOP pro jednotlivé případy zatížení VOP. Tyto modely budou podrobeny pevnostní kontrole v programu MSC Patran/Nastran. Pro podrobnější pevnostní kontrolu bude použit program COMPOST, který je vhodný zejména pro pevnostní kontrolu sendvičových konstrukcí. Následně na základě zhodnocení MKP analýzy budou navrženy případné úpravy konstrukce. Závěrem bude porovnána hmotnost navržené VOP z kompozitních materiálů se stávající hmotností kovové VOP. Největší pozornost je věnována volbě kompozitních materiálů, technologii výroby, vrstvení jednotlivých konstrukčních částí a následné pevnostní analýze v programech MSC Patran/Nastran a COMPOST.

2. Letoun VUT 100 Cobra

Letoun VUT 100 Cobra je čtyřmístný jednomotorový letoun vyvinutý ve společnosti Evektor pro sportovní létání a za účelem pilotního výcviku. Letoun je koncipován jako dolnoplošník, podvozek je v uspořádání s předovým kolem. Konstrukce letounu je celokovová. Letoun VUT 100 byl zkonstruován ve dvou verzích lišících se pohonnou jednotkou. Pro účely této diplomové práce bude uvažována verze letounu se zástavbou motorem Lycoming IO-360-A1B6.



Obr. 2.1 Letoun VUT 100 Cobra

2.1. Základní technické parametry:

Vnější rozměry:

Délka	8,8 m
Rozpětí křídla	10,2 m

Pohonná jednotka:

Motor	Lycoming IO-360-A1B6
Výkon	200 hp
Vrtule	Hartzell HC-F3YR-1RF
Průměr	188 cm

Hmotnosti:

Max. vzletová hmotnost	1330 kg
Užitečné zatížení	500 kg
Palivo (využitelné množství)	340 litres
Násobky	+3.8 g -1,52 g (kategorie Normal)

Výkony:

Max. rychlost vodorovného letu	155 kts (287 km/h)
Max. rychlost stoupání	1,000 fpm (5 m/s)
Pádová rychlost	53 kts (93 km/h)
Dolet	1,080 nm (2,000 km)
Vytrvalost	8 hodin

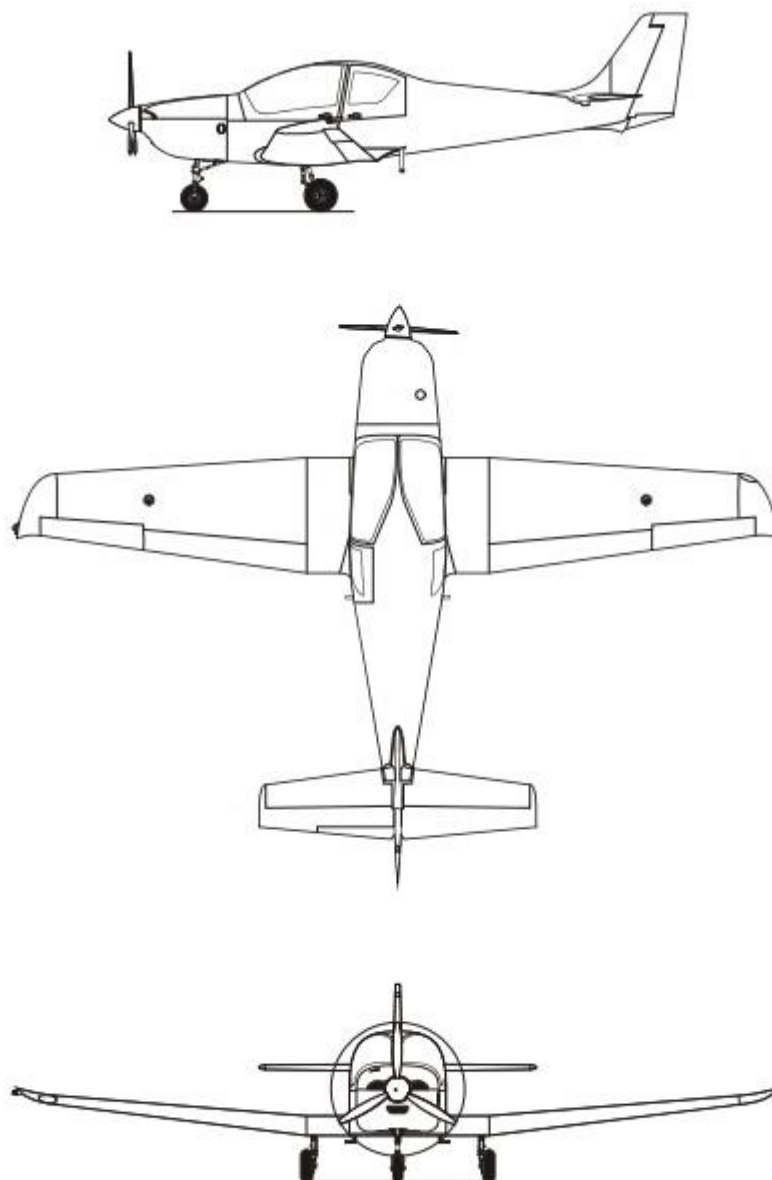
Křídlo:

Plocha	13,109 m ²
Rozpětí	10,2 m
Štíhlost	7,936
Profil	LS – 417 kořenový LS – 413 koncový

Vodorovné ocasní plochy:

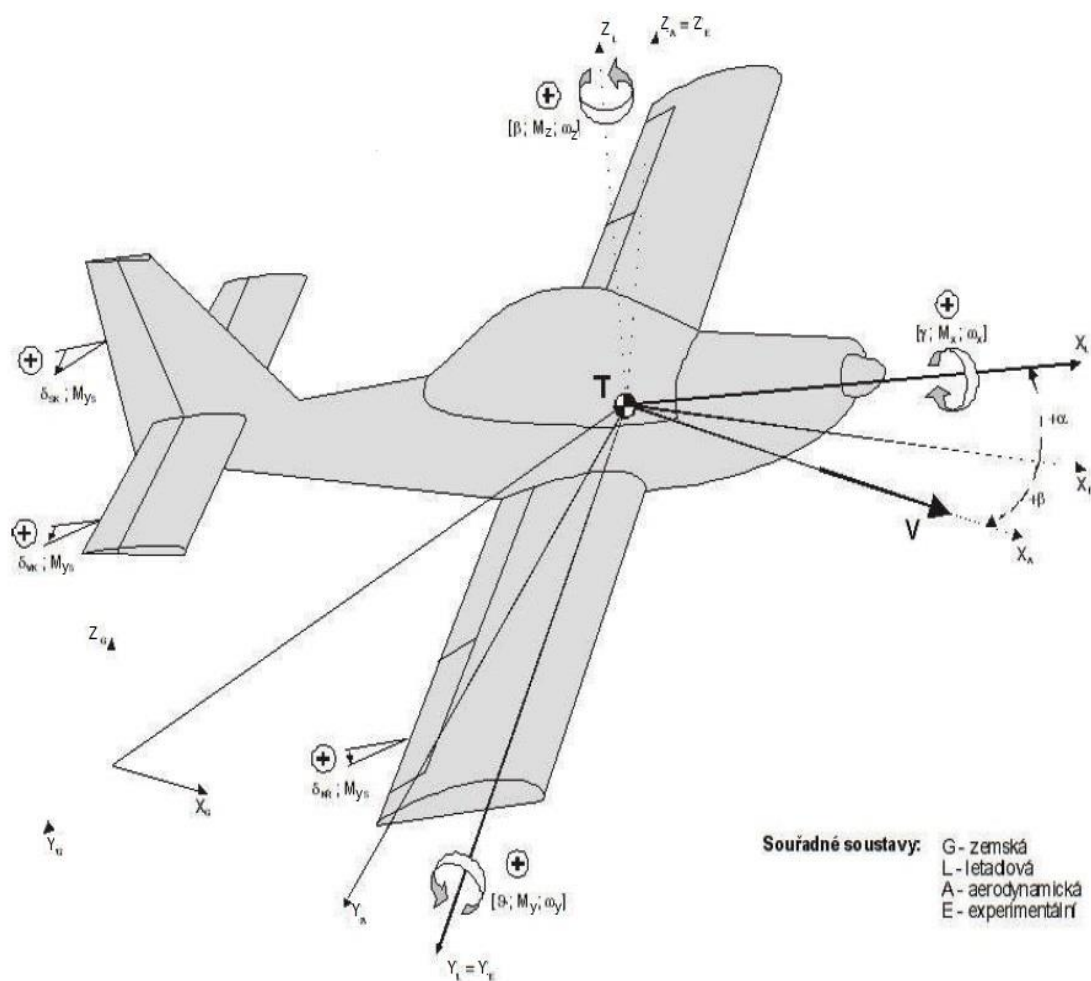
Plocha	2,7039 m ²
Rozpětí	3,8 m

2.2. Muška letounu VUT 100 Cobra



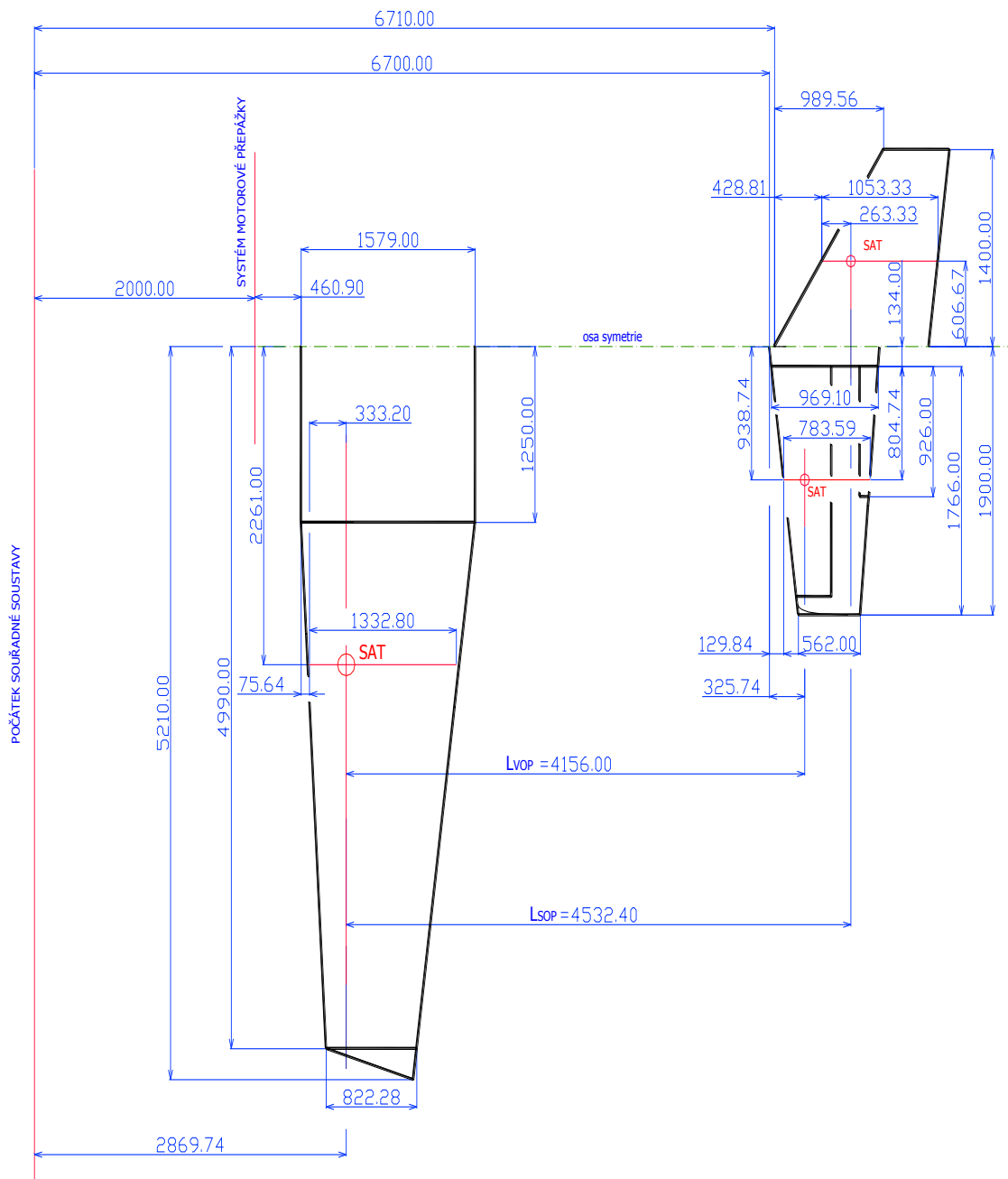
Obr. 2.2 Muška letounu VUT 100 Cobra [3]

2.3. Použitý souřadnicový systém



Obr. 2.3 Použitý souřadnicový systém [3]

2.4. Celkový náhled



Obr. 2.4 Celkový náhled [3]

3. Rozbor požadavků předpisu [1] [2]

Je uveden stručný přehled dotčených paragrafů použitých v této práci.

CS 23.301 Zatížení (a) (b)

CS 23.303 Součinitel bezpečnosti

Základní součinitel bezpečnosti $f_b = 1,5$ je pro kompozitní materiály vynásoben zvyšujícím součinitelem f_K dle CS 23.619.

CS 23.331 Symetrické letové podmínky (a) (b)

CS 23.333 Letová obálka (a) Všeobecně
(b) Obratová obálka
(c) Poryvová obálka
(d) Letová obálka

CS 23.335 Návrhové rychlosti letu (a) Návrhová cestovní rychlost V_C
(b) Návrhová rychlost strmého letu V_D
(c) Návrhová obratová rychlost V_A

CS 23.337 Provozní násobky zatížení při obratech

CS 23.341 Násobky zatížení při poryvech

CS 23.421 Vyvažovací zatížení

CS 23.423 Zatížení při obratech

Pro časovou náročnost je výpočet obratového zatížení proveden zjednodušenou formou dle vztahů uvedených v předpise CS-VLA 423.

CS 23.425 Zatížení při poryvu

CS 23.427 Nesymetrická zatížení

CS 23.659 Hmotové vyvážení

Dodatek A - Zjednodušená kritéria návrhových zatížení pro konvekční jednomotorové letouny o maximální hmotnosti 2 722 kg (6 000 lb) nebo méně

Tabulka 2- Průměrná provozní zatížení řídicích ploch

4. Kompozitní materiál

Kompozitní materiál je složen ze dvou i více chemicky a fyzikálně odlišných složek. U kompozitu rozeznáváme výztuž, což je pevnější a tužší složka, a matici, která je ve většině případů poddajnější a plní funkci pojiva.

Aby bylo možno hovořit o kompozitu, výsledný materiál musí splňovat následující podmínky: [5]

- podíl výztuže musí být větší než 5 %
- kompozit má rozdílné vlastnosti jednotlivých fází (výztuž je značně pevnější v tahu a tužší než matrice)
- kompozit musí být připraven smícháním složek

Na základě řady kritérií je tedy možné kompozity dělit podle:

- Příčného průměru výztuže
 - o makrokompozity – příčný průměr je od 10^0 do 10^2 mm
 - o mikrokompozity – příčný průměr je od 10^0 do 10^2 μ m
 - o nanokompozity – mají rozměry výztuže v nm
- Charakteru výztuže
 - o vláknové kompozity
 - o částicové kompozity

Podle druhu matrice mohou být kompozitní materiály rozděleny do třech skupin: [5]

Kompozity s polymerní maticí – Polymer Matrix Composites (PMC's)

Tyto materiály používají polymerní pryskyřice jako matici a širokou škálu vláken jakými jsou např.: vlákna skleněná, uhlíková a aramidová jako vyztužující prvek

Kompozity s kovovou maticí – Metal Matrix Composites (MMC's)

Tyto materiály využívají jako matici některý kov; např. hliník a jako výztuž vlákna uhlíková nebo částice SiC, Al₂O₃, apod.

Kompozity s keramickou maticí – Ceramic Matrix Composites (CMC's)

Jsou používány v prostředí velmi vysokých teplot. Keramika zde vystupuje jako matrice a výztuž je tvořena krátkými vlákny nebo monokrystaly (whiskery) ze SiC (karbidu křemíku) nebo BN (nitridu boru).

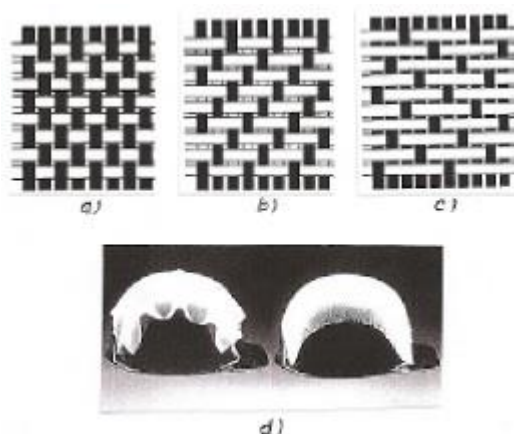
Výsledné vlastnosti kompozitu jsou dány:

- druhem, formou (vlákno-částice) a objemovým podílem výztuže
- druhem matrice

V této práci bude pozornost věnována vláknovým kompozitům s polymerní maticí, které mají v leteckém průmyslu dominantní význam a uplatnění. Pokud nebude uvedeno jinak, pod pojmem kompozit, respektive kompozitní materiál, bude uvažován právě vláknový kompozit.

4.1. Vlákenné kompozitní materiály s polymerní matricí

Zatížení v těchto materiálech přenášejí hlavně vlákna a ovlivňují tak především mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Jejich účinek je největší v případě dlouhých (spojitých) vláken a menší v případě krátkých (nespojitéch) vláken. Dlouhá vlákna jsou uspořádána jednosměrně (vzájemně rovnoběžně) nebo jsou ve dvojsměrném uspořádání ve formě tkaniny (vzájemně pod úhlem 90°). Tkaniny mohou mít různou vazbu nití – plátěnou, keprovou nebo saténovou (obr. 4.1). Plátěná vazba má nejhustější síť křížení vláken a tkanina je tuhá, obtížněji se tvaruje. Ostatní vazby jsou volnější a lépe tvarovatelné podle formy, bez vzniků záhybů. Pro některé aplikace je výhodné použít třírozměrných textilních polotovarů, které dávají kompozitnímu materiálu odolnost proti delaminaci, schopnost snášet poškození (damage tolerance) a vyšší pevnost a tuhost napříč tloušťky stěny konstrukčního dílce. [5]



Obr. 4.1 Vazba tkanin a) plátěná, b) keprová, c) saténová, d) splývavost – vlevo plátěná, vpravo keprová [5]

Matrice váže vlákna dohromady, umožňuje přenos zatížení mezi jednotlivými vlákny, chrání je před vlivem prostředí a určuje další vlastnosti kompozitu, jako jsou např. teplotní a chemická odolnost, odolnost proti stárnutí, elektrické vlastnosti, smrštění při vytvrzování apod. Při tahovém namáhání kompozitu se nesmí porušit dříve než vlákno. [5]

V kompozitních materiálech s polymerní matricí určených pro letecké konstrukce se nejčastěji používají vlákna skleněná, uhlíková a aramidová, v menší míře vlákna borová. Průměr skleněných, uhlíkových a aramidových individuálních vláken je většinou v rozmezí 5 až 20 μm . Pro další zpracování se spojují ve svazky o velkém počtu vláken: [5]

- pramenec – svazek vzájemně nekroucených vláken, používaných jako stovební jednotka
- příze – spojitý svazek zkroucených vláken nebo pramenů, Používá se většinou pro výrobu tkanin a pletenin.
- roving – soubor paralelních pramenců s malým nebo žádným zkroucením.

4.1.1. Skleněná vlákna

Pro výrobu kompozitních materiálů se používá sklo typu E, S a D. Skla se liší svým chemickým složením, sklo E je levné a má horší mechanické vlastnosti oproti sklu S. Sklo S je 3x až 4x dražší.

Typ	Chemické složení, %						R _m MPa	E GPa	A %	ρ g/cm ³
	CaO	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃				
E ϕ 5-20 μm	17	4,5	0,6	54	8	15	3400	76	4,6	2,54
S ϕ 8-14 μm	0,01	10	0,3	64	0,01	25	4500	89	5,5	2,48

Tab. 4.1 Přibližné složení a vlastnosti skleněných vláken [5]

Na leteckých konstrukcích je uplatnění skleněných vláken limitováno. Důvodem tohoto omezení je, že skleněná vlákna mají relativně nízkou specifickou tuhost. U letounu, kde konstrukčním omezením není nízká tuhost (kluzák, malé sportovní letouny, atd.) jsou skleněná vlákna rozšířena jak na primárních tak sekundárních částech konstrukce. Skleněná vlákna se běžně používají pro části, které nepřenášejí extrémně vysoké zatížení nebo nejsou vystaveny velkému napětí. U velkých letadel lze uplatnění nalézt převážně v interiéru trupu (úložné prostory, vnitřní panely). [4] [5] [12]

4.1.2. Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna v kombinaci s vhodnou matricí patří mezi nejpevnější a nejtužší kompozitní materiály. Uhlíková vlákna mají široký rozsah vlastností v závislosti na typu vlákna. Jsou běžně dostupná v následujících formách:

- HT (HS) vlákno – s vysokou tažností a nižší pevností i modulem pružnosti
- IM vlákno – se středním modulem, vysokou pevností a dobrou tažností
- HM vlákno – s vysokým modulem a nižší tažností
- UHM vlákno – s velmi vysokým modulem a velmi nízkou tažností

Materiál	R _m MPa	E GPa	A %	ρ g/cm ³
HT (HTA)	3400	235	1,40	1,78
IM 400	4100	290	1,30	1,81
IM 600	5400	290	1,70	1,80
HM 35	2350	358	0,60	1,79
M60J	3920	586	0,70	1,94

Tab. 4.2 Základní vlastnosti některých uhlíkových vláken [5]

Mezi přednosti uhlíkových vláken patří velmi dobré mechanické vlastnosti, nízká hustota ve srovnání se skleněnými vlákny. Oproti tomu jsou uhlíková vlákna křehká, mají nízkou interlaminární pevnost a jsou drahá. Uhlíková vlákna se používají hlavně na primárních leteckých konstrukcích. [5] [12] [13]

4.1.3. Aramidová vlákna

Jedná se o aromaticky polyamid. Nejznámější je kevlar, což je ochranná známka pro para-aramid syntetického vlákna, který vyvinula společnost DuPont. Vláknem kombinuje vysokou houževnatost, pevnost, tuhost a nízkou hustotou ($1,44 \text{ g/cm}^3$). Specifickou vlastností je schopnost plasticky se deformovat při působení sil kolmo na osu vlákna. Další pozitivní vlastností kevlaru je schopnost tlumení vibrací. Hlavní nevýhodou je nízká pevnost v tlaku a degradace vlivem slunečního záření. Běžně se aramid používá pro prvky kapotáže a voštinové panely. Uplatnění kompozitů s aramidovou výztuží lze nalézt na krytech radarů a jiných aplikacích, které vyžadují vhodné dielektrické vlastnosti. [5] [12] [13]

4.1.4. Borová vlákna

Borová vlákna mají v porovnání s ostatními vlákny větší průměr (125-140 μm). Bor patří mezi velmi tvrdé prvky, proto se kompozity s borovými vlákny obtížně vrtají a kladou. Tkaniny z borových vláken se nevyrábí, ale dodávají se v podobě prepregů. Z důvodu vysoké ceny jsou kompozity s borovými vlákny nahrazovány uhlíkovými kompozity. Používají se hlavně pro vysokoteplotní aplikace nebo součásti, které jsou extrémně namáhané tlakem. [5] [12]

4.2. Matrice pro letecké kompozitní materiály

Matrice je spojitá složka, která v kompozitním materiálu plní více funkcí. Účelem matrice je v podstatě vázat výztuž dohromady, přenášet zatížení mezi jednotlivými vlákny a zabraňovat vlastnímu poškrábání vláken vlivem abraze. Matrice rovněž chrání vlákna před vzdušnou vlhkostí a oxidací, která má za následek jejich zkřehnutí a předčasné selhání. Vlastnosti matrice významně ovlivňují mechanické vlastnosti kompozitu jako je:

- mezilaminární smyková pevnost
- teplotní použitelnost kompozitu
- podélná pevnost v tlaku
- příčná pevnost v tahu

Pro kompozity s kontinuálními vlákny jsou nejpoužívanější matrice polymerní, a to reaktoplastické nebo termoplastické. [5] [12] [13]

4.2.1. Matrice na bázi reaktoplastů (dříve termoset)

Je to zesíťovaný polymer, který vytváří prostorovou síť. Zesíťování nastává vlivem tepla, tlaku nebo působením katalyzátorů. Zesíťování je v tomto případě nevratný děj. Opětovným dodáváním tepelné energie není možno hmotu roztavit. Husté příčné zesíťování se nazývá vytvrzování. [5] [12] [13]

Mezi nejpoužívanější matrice na bázi reaktoplastů patří:

4.2.1.1. Epoxidové pryskyřice

V leteckém průmyslu jsou pro své nesporné přednosti nejčastější. Používají se i na primární nosné konstrukce – žebra, nosníky, potahové panely, přepážky atd. Výsledné vlastnosti jsou funkcí chemické struktury pryskyřice, použitého tvrdidla a případných modifikačních složek. Užité i technologické vlastnosti pryskyřice lze měnit v širokém spektru přidáním dalších složek např. reaktivního ředidla. Epoxidové pryskyřice mají obecně dobrou houževnatost, kohezní pevnost, odolnost proti únavě a tečení, výbornou adhezi k vláknům, malé smrštění při vytvrzení, teplotní stálost přibližně okolo 200 °C atd. Nevýhodou je, že jsou navlhavé (přítomnost vody zhoršuje teplotní odolnost pryskyřice). Vytvrzovací reakce je polymerizace. Při vytvrzování se neuvolňují žádné vedlejší produkty. Výsledný kompozitní díl je tedy bez dutin. Epoxidy jsou použitelné prakticky pro všechny zpracovatelské technologie. Epoxidové matrice by neměli být vystavovány škodlivým vlivům jakými jsou: vlhkost, ultrafialové záření, hydraulické kapaliny, paliva a čisticí prostředky. [4] [5] [12]

4.2.1.2. Fenolické pryskyřice

Jsou nejstarší, mají nižší mechanické vlastnosti, ale udržují si je do vysokých teplot. Jejich předností je to, že při hoření neprodukuje toxický kouř a jsou samozhášivé. Vytvrzují polykondenzací za vzniku vody jako vedlejšího produktu, což může způsobit vznik bublin a mikrotrhlin. Jsou použitelné za sucha až do 280 °C. Používají se na interiéry letadel a na sendvičové panely. [4] [5] [12]

4.2.1.3. Bismaleimidové pryskyřice

Byly vyvinuty speciálně pro letecký průmysl. Jsou určeny pro pracovní teploty mezi 180 °C za vlhka a 260 °C za sucha (krátkodobě až 300 °C) a tvoří tak přechod mezi aplikací epoxidových a polyamidových pryskyřic. Vytvrzují se podobně jako epoxidy, při vytvrzování nevzniká žádný vedlejší produkt. Používají se na vysokoteplotní části letadel, včetně obrabečů tahu proudových motorů. [4] [5] [12]

4.2.2. Matrice na bázi termoplastů

Je to opak reaktoplastu. V případě termoplastu jsou řetězce molekul drženy u sebe pouze mezimolekulárními interakcemi (van der Waalovy síly, vodíkové můstky). V případě dodání tepelné energie tyto vazby slábnou a polymer se stává tekutým. Oproti reaktoplastovým pryskyřicím mají některé výhody, jako je větší houževnatost, větší prodloužení při lomu a vyšší „damage tolerance“ tj. schopnost snášet poškození. Mezi nejpoužívanější termoplastové matrice patří: polyeterimid (PEI), polyetersulfon (PES), polyamide-imide (PAI), polyetheretherketon (PEEK) a polyfenylensulfid (PPS). [4] [5] [12]

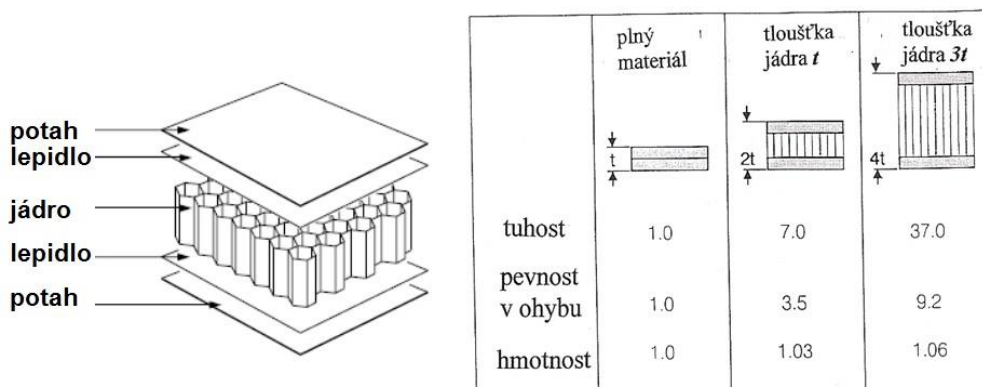
4.3. Prepregy

Prepregy se používají pro získání nejdokonalejších kompozitů. Těchto vlastností je dosaženo díky vysokému podílu vláknové výztuže. Prepreg je předimpregnovaná vláknová výztuž. Matrice u prepregů může být reaktoplastická nebo termoplastická. Při výrobě reaktoplastického prepregu se na tkaniny nebo roving impregnuje pryskyřice. Matrice se v prepregu nachází v částečně vytvrzeném stavu (B stav). V tomto stavu již existuje zesítnění molekul, síť má ovšem velmi malou hustotu. Z tohoto důvodu pryskyřice obsažená v prepregu má dostatečnou lepidivost a tvarovatelnost. K vytvrzení prepregového kompozitu dochází působením zvýšené teploty a tlaku. Nevýhodou je omezená doba skladovatelnosti (např. u epoxidového prepregu je to v řádu týdnů). Dobu skladovatelnosti je možno zvýšit uchováváním v mrazících boxech. [5]

4.4. Sendviče

Sendvičový materiál je materiál uspořádaný ve vrstvách. Většinou se skládá ze dvou pevných tenkých potahů a z lehkého jádra (obr. 4.2). Jednotlivé prvky jsou vzájemně spojeny lepením. Potahy mohou být kovové nebo z vláknového kompozitu; jádro je tvořeno kovovou případně kompozitní voštinou nebo pěnovou hmotou.

Základní přednosti sendvičových materiálů ve srovnání s materiálem monolitním je nízká hmotnost a vysoká pevnost a tuhost při ohybovém namáhání. Při pevnostních výpočtech se většinou předpokládá, že napětí od ohybového momentu a od tahových sil přenáší potahy, a že smykovou sílu přenáší jádro. Vliv tloušťky jádra na vlastnosti sendviče je zřejmý z obr. 4.2. [5]



Obr. 4.2 Schéma sendvičového materiálu a jeho vlastností [5]

4.5. Volba kompozitních materiálů pro návrh konstrukce VOP

Všechny části konstrukce VOP budou tvořeny z vláknových kompozitních materiálů s polymerní matricí. Z důvodu vysokých mechanických vlastností a nízké hustotě jako výztuž byly zvoleny uhlíkové vlákna ve formě keprové tkaniny. Pro své nesporné přednosti a vynikající vlastnosti byla zvolena epoxidová matrice. Na konstrukci, kde je vysoké ohybové namáhání, a pro zvýšení tuhosti při ohybu (potah, nosníky) bude použit sendvičový materiál s pěnovým jádrem. Z důvodu dostupných materiálových vlastností byla zvolena pěna Airex C70.75.

5. Technologie výroby kompozitních materiálů

Kompozitní materiály umožňují řadu kombinací vláken a matric. Výsledné vlastnosti však nejsou jen funkcí individuálních vlastností vláken a matrice, ale jsou také ovlivněny konstrukcí příslušné části a použitou technologií.

Běžné matrice: epoxidové, fenolické, polyamidové, BMI

Běžná vlákna: skleněná, uhlíková, aramidová, hybridní

Kompozity můžeme vyrábět buď z jednotlivých složek (matrice a výztužných vláken) nebo z prepregů (z předinpregnovaných vláken a tkanin)

Základní dělení všech technologií je možné provést podle formy, a to na otevřené (jednodílné) a uzavřené (dvojdílné) formy. [4] [5]

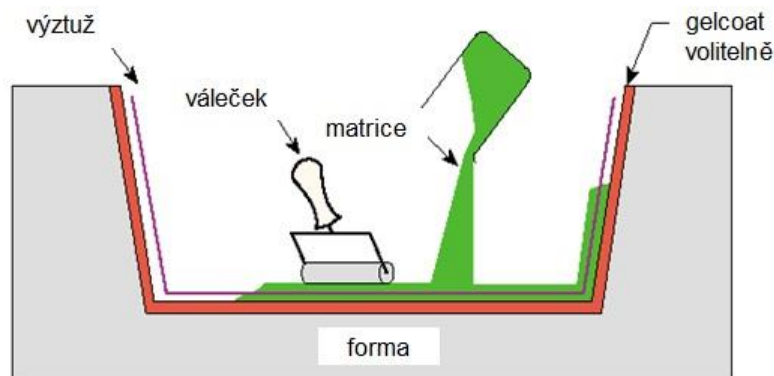
5.1. Technologie mokré laminace (wet lay-up)

Vláknitá výztuž je ručně kladena do formy, kde je následně za pomoci válečků nebo štětců ručně prosmycována pryskyřicí. Forma může být negativní (vytváří hladký a přesný vnější povrch) nebo pozitivní, která naopak vytváří hladký a přesný vnitřní povrch. Následné vytvrzení dílce probíhá za normálních atmosférických podmínek.

Předností této technologie je široký výběr materiálů a dodavatelů, jednoduchý postup a především nízké náklady. Avšak výsledné vlastnosti materiálu jsou silně závislé na zkušenostech pracovníka.

Tuto technologii můžeme zdokonalit za pomoci vákuové technologie. Navrstvený a prosmycený laminát je uzavřen pod utěsněnou plastickou fólií. Odsátím vzduchu se pod fólií vytvoří podtlak a na povrchu působí tlak atmosférický (max. 0,1 MPa).

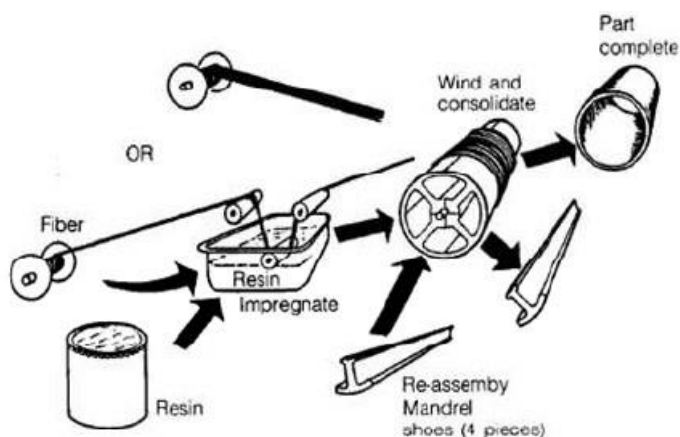
Výhodou této technologie oproti předešlé je dosažení vyššího objemového podílu vláken – lepší mechanické vlastnosti a lepší smáčení vláken pryskyřicí v důsledku působícího tlaku. Nevýhodami jsou vyšší náklady a nutnost vyšší kvalifikace a zkušeností. [4] [5]



Obr. 5.1 Schéma mokré laminace [5]

5.2. Technologie navíjení vláken

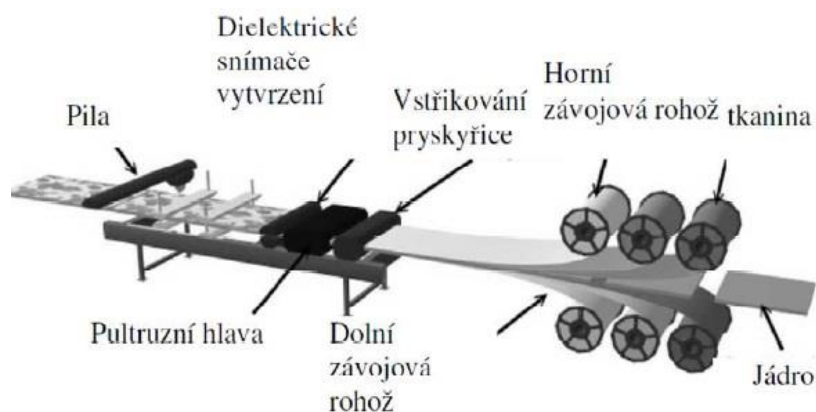
Základním principem této technologie je odvíjení vlákna z cívky, které prochází lázní pryskyřice a navíjí se na trn. Orientace vláken je řízena podélnou rychlostí pohybu hlavy a rychlostí rotace trnu. Touto technologií se vyrábějí hlavně duté výrobky (trubky, nádrže atd.). Je to velmi rychlá a ekonomická metoda s možností řízení obsahu pryskyřice. Nevýhodou je vysoká cena trnů pro velké výrobky, drsnost vnějšího povrchu a nižší mechanické vlastnosti v důsledku nízké viskozity pryskyřice. Základní schéma navíjení je znázorněno na následujícím obrázku. [4] [5]



Obr. 5.2 Schéma navíjení vláken [4]

5.3. Pultruze

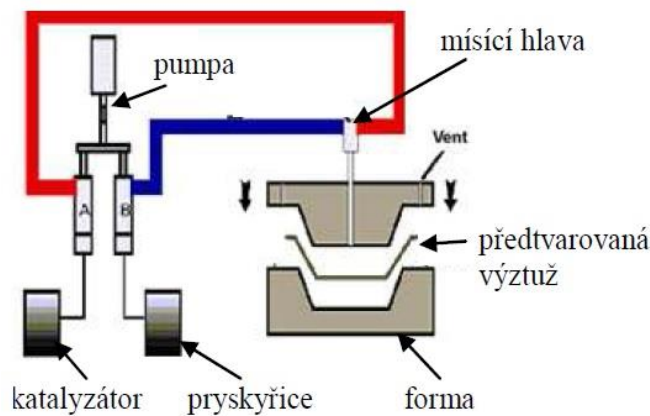
Při výrobě dílů pomocí pultruze je výztuž vedena přes lázeň pryskyřice do vyhřívané tvarovací a vytvrzovací hlavy. Zde je dokončen impregnační proces a proběhne vytvrzení. Tento proces je kontinuální. Vzniká nekonečný profil, který je následně automaticky krácen na potřebné rozměry. Tvar průřezu odpovídá tvaru dutiny tvarovací hlavy. Předností této technologie je nízká cena výztuže, přesné dodržení obsahu pryskyřice, rychlý a ekonomický postup impregnace a vytvrzování a velmi dobré mechanické vlastnosti v podélném směru. Nedostatkem je omezenost na výrobky konstantního průřezu a vysoké náklady na vyhřívané formy. Typickými výrobky pultruzí jsou nosníky a profily. Pultruzí se vstřikováním lze vyrábět i sendvičové panely, jak je znázorněno na následujícím obrázku. [4] [5]



Obr. 5.3 Schéma výroby sendvičového panelu pultruzí [4]

5.4. Technologie RTM (resin transfer molding)

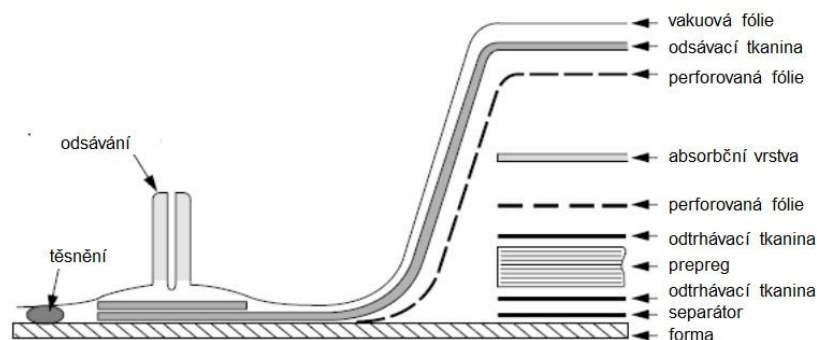
Jde o technologii s uzavřenou formou. Výztuž ve formě tkaniny nebo rohože je vložena do dvojdílné ocelové nebo hliníkové formy, do které se následně za pomoci nízkotlakých čerpadel injektuje směs ohřáté pryskyřice a ohřátého tvrdidla. Pro zvýšení rychlosti tečení u pryskyřice s malou viskozitou je tok vyvolán současně vstříkáváním a pod tlakem. Tato technologie je označena jako VARTM (Vacuum Assisted RTM). Vytvrzení může proběhnout bez ohřevu nebo při zvýšené teplotě. Výhodou RTM je vysoký objemový podíl vláken, nízký obsah dutin, snížení pracnosti, přesný a hladký povrch dílu. [4] [5]



Obr. 5.4 Schéma RTM [4]

5.5. Prepregová technologie a vytvrzování v autoklávu

Metoda vhodná pro kusovou výrobu mechanicky namáhaných kompozitních dílů. Před vlastním kladením prepregů je forma opatřena separační vrstvou, která zabraňuje přilnutí matrice na povrch formy a umožňuje vyjmutí dílu z formy. Následuje vrstvení prepregů a technologický tkanin v tomto pořadí: odtrhávací vrstva (chrání povrch kompozitu před znečištěním a dává povrchu dílu vhodný tvar pro následující lepení a nástřik), absorbní vrstva (absorbuje přebytečnou pryskyřici), perforovaná fólie (reguluje tok pryskyřice, umožňuje průchod plynů a těkavých látek do sací vrstvy) a odsávací tkanina (umožňuje odsávání vzduchu a dosažení vakua v celém objemu skladby). Vrstvy se uzavrou plastickou vakuovou fólií (umožňuje odsávání a vytvoření rovnoměrného tlaku na celý povrch) a vytvrzují se za zvýšeného tlaku a teploty (obvykle 120 nebo 180 °C) při současném odsávání. [4] [5]



Obr. 5.5 Schéma vrstvení prepregové technologie [5]

Zdrojem tlaku a ohřevu je obvykle autokláv – tlaková pec, která se používá pro výrobu výrobků nejvyšší kvality s vysokým objemem vláken a nízkým obsahem dutin. Nevýhodami jsou vysoké náklady na autokláv, drahé formy z materiálů vhodných pro zvýšené teploty a tlaky a omezený sortiment prepregů. Touto technologií se vyrábějí hlavně křídla, ocasní plochy, části trupu, křídélka, klapky atd. [4] [5]



Obr. 5.6 Schéma vytvrzování v autoklávu [4]

5.6. Strojní kladení prepregů

Pro zvýšení produktivity práce a kvality výrobku se často používá strojní kladení prepregů. Celý proces je řízen pomocí počítače. Počítač generuje trajektorii, po které se následně pohybuje hlava kladečního stroje. Na konci položené stopy kladeční hlava prepreg odřízne. V porovnání s ručním kladením je proces značně zrychlený, vylučuje se selhání člověka a dosahuje se nejvyšší jakosti. [4] [5]

5.7. Volba technologie výroby konstrukčních částí VOP

Z důvodu náročnosti a nákladů na výrobu formy a možného výskytu dutin v matrici technologie RTM není vhodná pro výrobu konstrukčních částí VOP. Technologie pultruze se používá převážně pro výrobu různých profilů a také není vhodnou technologií pro výrobu částí VOP. Pro kusovou výrobu všech konstrukčních částí VOP připadají v úvahu technologie mokré laminace s vakuovým vytvrzováním působícího atmosférického tlaku nebo vytvrzováním v autoklávu. Díky autoklávu se docílí nejlepších materiálových vlastností a nejvyššího objemového podílu vláken. Protože autoklávy mají vysoké pořizovací náklady, v této diplomové práci bude uvažováno s použitím technologie mokré laminace do negativních forem s následným vakuovým vytvrzováním působícího atmosférického tlaku (asi 24 hodin při pokojové teplotě). Skladba technologických vrstev bude stejná jako na obr. 5.5 s tím rozdílem, že místo spodní odtrhací tkaniny bude použita vnější vrstva ze skleněné keprové tkaniny. Tato vrstva dodá výsledný hladký vnější povrch vyrobených částí pro následnou aplikaci nátěru. Technologie mokré laminace má také nevýhody, a to: náročnost na výrobu negativních forem a závislost výsledných vlastností materiálu na zkušenostech pracovníka. Výhodami této technologie jsou nízké náklady na výrobu, dosažení dobrých mechanických vlastností a vysokého objemového podílu vláken. Z praktických zkušeností se touto zvolenou metodou technologie výroby dá docílit objemového podílu vláken až 50 %. Avšak z důvodu dostupných materiálových vlastností pro pevnostní kontrolu a určení hmotnosti bude dále uvažováno s objemovým podílem vláken 35%.

6. Výpočet zatížení vodorovné ocasní plochy

Výpočet zatížení VOP bude proveden dle požadavků předpisu CS-23 pro kategorii NORMAL. V první části této kapitoly je vypočtena a zobrazena obálka zatížení. Dále následuje výpočet vyvažovacího, obrátového, poryvového a nesymetrického zatížení. Při výpočtech byl použit program Microsoft Excel.

6.1. Vstupní hodnoty do výpočtů

konstanty			
hustota vzduchu v 0 m MSA	ρ	1,225	kg/m ³
gravitační zrychlení	g	9,81	m/s ²
poryv pro Vc	U_{deVc}	15,24	m/s
poryv pro Vd	U_{deVd}	7,62	m/s

Tab. 6.1 Konstanty k výpočtu zatížení VOP

Vstupní hodnoty				
max. hmotnost letounu	m	1330	kg	
délka trupu	L_{tr}	6,7	m	
plocha křídla	S	13,109	m ²	
max. součinitel vztlaku ($\delta_{KL}=0^\circ$)	C_{Lmax}	1,625	-	
max. součinitel vztlaku ($\delta_{KL}=40^\circ$)	C_{Lmax}	2,235	-	
min. součinitel vztlaku křídla	C_{Lmin}	0,911	-	
střední aerodynamická těživa	C_{SAT}	1,3328	m	
Střední geometrická těživa	C_{GT}	1,2581	m	
hmotnost VOP	m_{vop}	16,5	kg	
plocha VOP	S_{vop}	2,7039	m ²	
rameno VOP	L_{vop}	4,156	m	
rozpětí VOP	l_{vop}	3,8	m	
sklon vztlakové čáry VOP	a_{vop}	3,878	1/rad	
sklon vztlakové čáry křídla	a_{kf}	5,015	1/rad	
srázový součinitel	$(1-d\epsilon/d\alpha)$	0,5797	-	
výchylka VK nahoru	δ_{VKmax}	30	°	
výchylka VK dolů	δ_{VKmin}	20	°	
kořenová hloubka profilu VOP	cr	1	m	
koncová hloubka profilu VOP	ct	0,562	m	
		výchylka klapky		
		0°	20°	40°
aerodynamický střed konfigurace KT k SAT	$xASb,VOP$	0,1898	0,1911	0,1923
součinitel klopivého momentu KT (bez VOP)	$CmKT$	-0,1237	-0,2641	-0,3767

Tab. 6.2 Základní vstupní hodnoty pro výpočet zatížení VOP [2]

Body z centrážního diagramu použité k výpočtu zatížení		
bod	x_T [-]	m [kg]
1	0,11	925
2	0,2	925
3	0,215	1330
4	0,31	1330

Tab. 6.3 Body z centrážního diagramu použité k výpočtu zatížení VOP

Centrážní diagram je uveden v příloze č. 1.

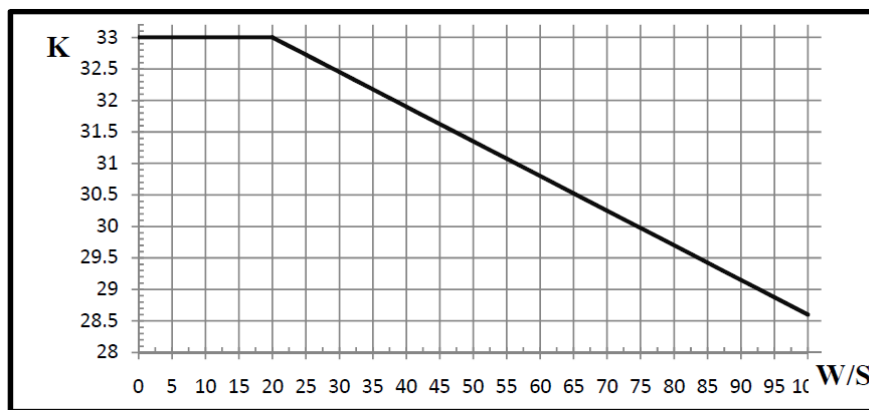
6.2. Výpočet obálky zatížení dle předpisu CS-23. 333 [1]

6.2.1. Výpočet obrátové obálky

$$W = \frac{m}{0,4536} = \frac{1330}{0,4536} = 2932,148 \text{ lb} \qquad S = \frac{S_{kr}}{0,3048} = \frac{13,109}{0,3048^2} = 141,104 \text{ sqft}$$

Návrhová cestovní rychlost:

$$K = \frac{W}{S} = \frac{2932,148}{141,104} = 20,78 > 20 \rightarrow K = 32,9$$



$$V_{C_{\min}} \geq K \cdot \sqrt{\frac{W}{S}} = 32,9 \cdot \sqrt{\frac{2932,148}{141,104}} = 149,975 \text{ kt} = 277,754 \text{ km.h}^{-1}$$

Volím: $V_C = 280 \text{ km.h}^{-1}$

Návrhová rychlost střemhlavého letu:

$$V_D \geq 1,25 \cdot V_C = 1,25 \cdot 280 = 350 \text{ km.h}^{-1}$$

$$V_D \geq 1,4 \cdot V_{C_{\min}} = 1,4 \cdot 277,754 = 388,856 \text{ km.h}^{-1}$$

Volím: $V_D = 390 \text{ km.h}^{-1}$

Pádová rychlost:

$$V_{S1} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot C_{L_{\max}} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1330 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 1,625 \cdot 13,109}} = 31,62 \text{ m.s}^{-1} = \mathbf{113,82 \text{ km.h}^{-1}}$$

Pádová rychlost při letu na zádech:

$$V_{S2} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot C_{L_{\min}} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1330 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 0,911 \cdot 13,109}} = 42,23 \text{ m.s}^{-1} = \mathbf{152 \text{ km.h}^{-1}}$$

Kladný provozní násobek obrátů:

$$n_1 = 2,1 + \frac{24000}{W + 10000} = 2,1 + \frac{24000}{2932,148 + 10000} = 3,956$$

- Pro kategorii normál postačuje $n_1 = \mathbf{3,8}$

Záporný provozní násobek:

- Pro kategorii normál postačuje $n_2 = \mathbf{-1,5}$

Návrhová obrátová rychlost:

$$V_A = V_{S1} \cdot \sqrt{n_1} = 113,82 \cdot \sqrt{3,8} = \mathbf{221,88 \text{ km.h}^{-1}}$$

Obrátová rychlost letu na zádech:

$$V_G = V_{S2} \cdot \sqrt{n_2} = 152 \cdot \sqrt{1,5} = \mathbf{186,16 \text{ km.h}^{-1}}$$

6.2.2. Výpočet poryvové obálky:

Zmírňující poryvový součinitel:

$$\mu_g = \frac{2 \cdot \left(\frac{m \cdot g}{S} \right)}{\rho \cdot C_{GT} \cdot a \cdot g} = \frac{2 \cdot \left(\frac{1330 \cdot 9,81}{13,109} \right)}{1,225 \cdot 1,33 \cdot 5,015 \cdot 9,81} = 24,782$$

$$K_g = \frac{0,88 \cdot \mu_g}{5,3 + \mu_g} = \frac{0,88 \cdot 24,782}{5,3 + 24,782} = \mathbf{0,725}$$

Násobky zatížení při poryvech:

$$V_C = 280 \text{ km.h}^{-1} = 77,78 \text{ m.s}^{-1}$$

$$U_{de_{vc}} = 15,24 \text{ m.s}^{-1}$$

$$V_D = 390 \text{ km.h}^{-1} = 108,33 \text{ m.s}^{-1}$$

$$U_{de_{vd}} = 7,62 \text{ m.s}^{-1}$$

$$n_{Vc+} = 1 + \frac{K_g \cdot \rho_0 \cdot U_{de} \cdot v_c \cdot a}{2 \cdot \left(\frac{m \cdot g}{S} \right)} = 1 + \frac{0,725 \cdot 1,225 \cdot 15,24 \cdot 77,78 \cdot 5,015}{2 \cdot \left(\frac{1330 \cdot 9,81}{13,109} \right)} = \mathbf{3,652}$$

$$n_{Vc-} = 1 - \frac{K_g \cdot \rho_0 \cdot U_{de} \cdot v_c \cdot a}{2 \cdot \left(\frac{m \cdot g}{S} \right)} = 1 - \frac{0,725 \cdot 1,225 \cdot 15,24 \cdot 77,78 \cdot 5,015}{2 \cdot \left(\frac{1330 \cdot 9,81}{13,109} \right)} = \mathbf{-1,652}$$

$$n_{VD+} = 1 + \frac{K_g \cdot \rho_0 \cdot U_{de} \cdot v_D \cdot a}{2 \cdot \left(\frac{m \cdot g}{S} \right)} = 1 + \frac{0,725 \cdot 1,225 \cdot 7,62 \cdot 108,33 \cdot 5,015}{2 \cdot \left(\frac{1330 \cdot 9,81}{13,109} \right)} = \mathbf{2,842}$$

$$n_{VD-} = 1 - \frac{K_g \cdot \rho_0 \cdot U_{de} \cdot v_D \cdot a}{2 \cdot \left(\frac{m \cdot g}{S} \right)} = 1 - \frac{0,725 \cdot 1,225 \cdot 7,62 \cdot 108,33 \cdot 5,015}{2 \cdot \left(\frac{1330 \cdot 9,81}{13,109} \right)} = \mathbf{-0,326}$$

6.2.3. Výpočet klapkové obálky

Při použití klapek se předpokládá zatížení: symetrický manévr, kladný násobek $n_f = 2$ kladný a záporný poryv kolmý na směr letu rychlostí $U_{de} = 7,62 \text{ m.s}^{-1}$

Maximální pádová rychlost s vysunutými klapkami:

$$V_{SF} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot C_{L_{max}} \cdot S}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1330 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 2,235 \cdot 13,109}} = 26,96 \text{ m.s}^{-1} = \mathbf{97 \text{ km.h}^{-1}}$$

Maximální rychlost s vysunutými klapkami:

$$V_F > 1,4 \cdot V_S = 1,4 \cdot 113,82 = 159,35 \text{ km.h}^{-1}$$

$$V_F > 1,8 \cdot V_{SF} = 1,8 \cdot 97 = 174,6 \text{ km.h}^{-1}$$

$$\text{Volím: } V_F = \mathbf{175 \text{ km.h}^{-1}}$$

Návrhová obratová rychlost letu s vysunutými klapkami:

$$V_{AF} = V_{SF} \cdot \sqrt{n} = 97 \cdot \sqrt{2} = \mathbf{137,18 \text{ km.h}^{-1}}$$

6.2.4. Výsledné hodnoty výpočtu obálky zatížení

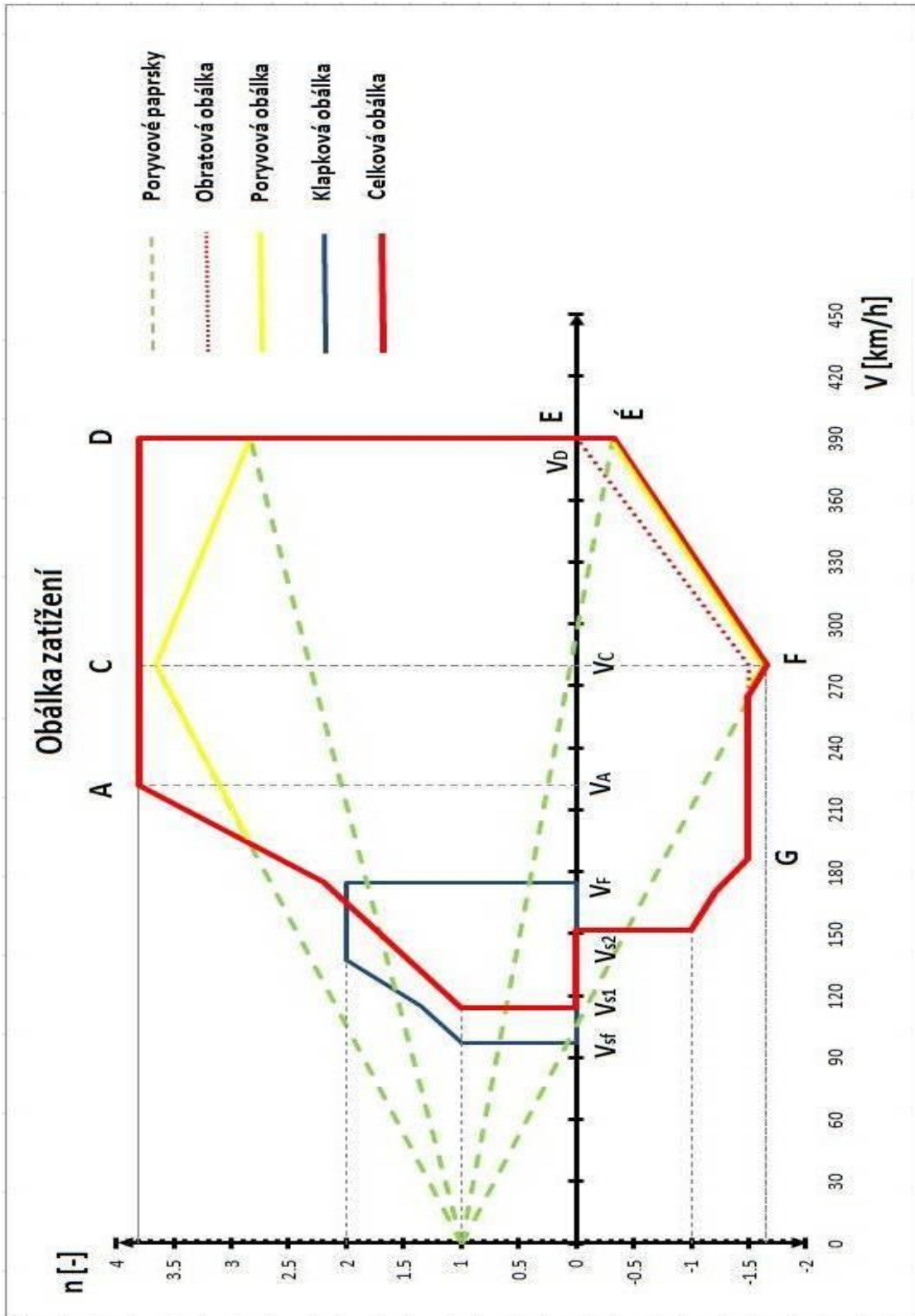
Obratová obálka	Rychlost [km.h ⁻¹]	Násobek
Cestovní rychlost V_C	280 km.h ⁻¹	3,8/-1,5
Rychlost střemhlavého letu V_D	390 km.h ⁻¹	
Pádová rychlost V_{S1}	113,82 km.h ⁻¹	
Pádová rychlost na zádech V_{S2}	152 km.h ⁻¹	
Obratová rychlost V_A	221,88 km.h ⁻¹	
Obratová rychlost na zádech V_G	186,16 km.h ⁻¹	

Poryvová obálka	Násobek +	Násobek -
Cestovní rychlost V_C	3,652	-1,652
Rychlost střemhlavého letu V_D	2,842	-0,326

Klapková obálka	Rychlost [km.h ⁻¹]	Násobek
Mín. pádová rychlost V_{SF}	97 km.h ⁻¹	2
Obratová rychlost V_{AF}	137,18 km.h ⁻¹	
Rychlost V_F	175 km.h ⁻¹	

Tab. 6.4 Výsledné hodnoty obálky zatížení

6.2.5. Obálka zatížení



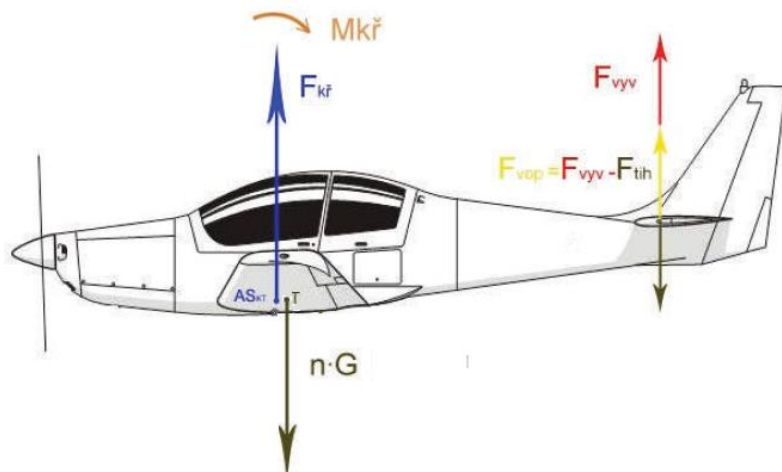
Obr. 6.1 Obálka zatížení

6.3. Vyvažovací zatížení VOP

Dle předpisu CS-23.421:

Vyvažující zatížení na vodorovných ocasních plochách je zatížení nutné pro udržení rovnováhy letounu ve všech letových případech s nulovým klopivým zrychlením.

Vodorovné vyvažovací ocasní plochy musí být navrženy na vyvažující zatížení pro každý bod provozní obálky obrátů a pro podmínky s klapkami stanovené v CS 23.345. [1]



Obr. 6.2 Schéma vyvažovacího zatížení VOP

6.3.1. Vyvažovací síla

$$F_{VOP,vyv} = \frac{M_y}{L_{VOP}} \quad [\text{N}]$$

Vyjádřením M_y a dosazením do vzorce získáme vztah:

$$F_{VOP,vyv} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S_{kř} \cdot C_{SAT} \cdot C_m + n \cdot m \cdot g \cdot C_{SAT} \cdot (\overline{x_T} - \overline{x_{ASb,VOP}})}{L_{VOP}} \quad [\text{N}]$$

Kde:	ρ	-	hustota vzduchu na hladině moře [kg/m ³]
	v	-	rychlost letu [m/s]
	$S_{kř}$	-	plocha křídla [m ²]
	C_{SAT}	-	střední aerodynamická tětiva křídla [m]
	C_m	-	součinitel klopivého momentu [-]
	n	-	lokální násobek zatížení [-]
	m	-	hmotnost letounu [kg]
	g	-	gravitační zrychlení [m/s ²]
	$\overline{x_T}$	-	poloha těžiště vztažena k délce střední aerodynamické tětivě [-]
	$\overline{x_{ASb,VOP}}$	-	poloha aerodynamického středu kombinace křídlo-trup vztažena k délce střední aerodynamické tětivě [-]
	L_{VOP}	-	rameno VOP od AS křídla k AS VOP [m]

6.3.2. Tíhová síla od vlastní hmotnosti VOP

$$F_{VOP,se\tau} = n \cdot m_{VOP} \cdot g \quad [\text{N}]$$

Kde: m_{VOP} - vlastní hmotnost VOP [kg]

6.3.3. Celková vyvažovací síla na VOP

Tato síla je interakcí obou předchozích sil. Tíhová síla od vlastní hmotnosti VOP se přičítá nebo odečítá k vyvažovací síle a to podle smyslu působení násobku.

$$F_{VOP} = F_{VOP,vyv} - F_{VOP,se\tau} \quad [\text{N}]$$

Výsledné vyvažovací síly pro jednotlivé body obálky jsou uvedeny v následující tabulce

Vyvažovací zatížení VOP							
bod obálky	v [km/h]	n [-]	x_T [-]	m [kg]	F_{vop,vyv} [N]	F_{vop,se\tau} [N]	F_{vop} [N]
S1	113.82	1	0.11	925	-551	162	-712
			0.2	925	-289		-451
			0.215	1330	-213		-375
			0.31	1330	185		23
A	221.88	3.8	0.11	925	-2092	615	-2707
			0.2	925	-1097		-1712
			0.215	1330	-809		-1424
			0.31	1330	701		86
C	280	3.8	0.11	925	-2809	615	-3424
			0.2	925	-1814		-2429
			0.215	1330	-1526		-2141
			0.31	1330	-16		-631
D	390	3.8	0.11	925	-4621	615	-5236
			0.2	925	-3625		-4240
			0.215	1330	-3337		-3953
			0.31	1330	-1827		-2442
E	390	0	0.11	925	-3738	0	-3738
			0.2	925	-3738		-3738
			0.215	1330	-3738		-3738
			0.31	1330	-3738		-3738
F	280	-1.652	0.11	925	-1543	-267	-1276
			0.2	925	-1976		-1708
			0.215	1330	-2101		-1834
			0.31	1330	-2758		-2490
G	186.16	-1.5	0.11	925	-503	-243	-261
			0.2	925	-896		-653
			0.215	1330	-1010		-767
			0.31	1330	-1606		-1363

Tab. 6.5 Výsledné hodnoty vyvažovacího zatížení VOP – část 1/2

Vyvažovací zatížení VOP							
bod obálky	v [km/h]	n [-]	x_T [-]	m [kg]	F_{vop,vyv} [N]	F_{vop,setr} [N]	F_{vop} [N]
S2	152	-1	0.11	925	-336	-162	-174
			0.2	925	-598		-436
			0.215	1330	-673		-511
			0.31	1330	-1071		-909
SF	97	1	0.11	925	-463	162	-625
			0.2	925	-202		-363
			0.215	1330	-126		-288
			0.31	1330	272		110
AF	137.18	2	0.11	925	-927	324	-1251
			0.2	925	-403		-727
			0.215	1330	-252		-575
			0.31	1330	543		220
FF	175	2	0.11	925	-1217	324	-1541
			0.2	925	-693		-1017
			0.215	1330	-542		-866
			0.31	1330	253		-71

Tab. 6.6 Výsledné hodnoty vyvažovacího zatížení VOP – část 2/2

6.4. Zatížení VOP od manévru

Dle předpisu CS-23.423:

Každá vodorovná plocha a její nosná konstrukce musí být navrženy na zatížení při obratech vzniklá při následujících podmínkách:

Rychlé přitažení výškového řízení při rychlosti V_A do maximální polohy a rychlý přesun dopředu buď až na doraz řízení, nebo dle úsilí pilota podle toho, co je kritické.

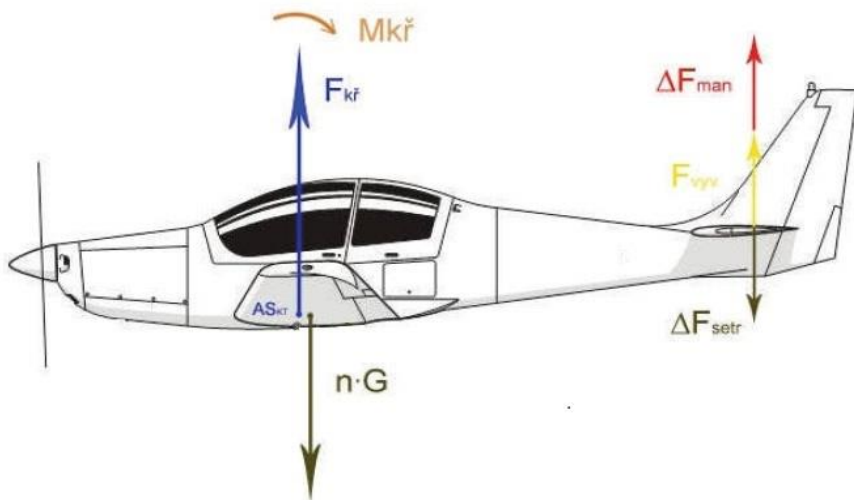
Rychlé přitažení až na doraz řízení při rychlosti nad V_A následované rychlým přesunem dopředu způsobující následující kombinace normálových a úhlových zrychlení: [1]

Případ	Normálové zrychlení (n)	Úhlové zrychlení (radián/s²)
Klopení nahoru	1,0	$+\frac{39}{V}n_m(n_m - 1,5)$
Klopení dolů	n_m	$-\frac{39}{V}n_m(n_m - 1,5)$

kde:

- (1) n_m = kladný provozní násobek zatížení při obratech použitý při návrhu letounu; a
- (2) V = počáteční rychlost v uzlech.

Tab. 6.7 Kombinace normálových a úhlových zrychlení [1]



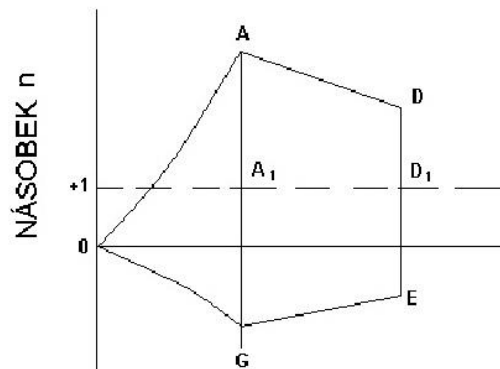
Obr- 6.3 Schéma zatížení VOP od manévru

Pro časovou náročnost je výpočet obrátového zatížení proveden zjednodušenou formou dle vztahů uvedených v předpise CS-VLA 423: [2]

6.4.1. Výpočet obrátového zatížení pro první podmínku (rychlost V_A):

Pro rychlou výchylku výškového kormidla, aby se normální zrychlení změnilo z počáteční hodnoty na konečnou hodnotu, jsou uvažovány tyto případy:

Rychlost	Počáteční podmínky	Konečné podmínky	Změna násobku
V_A	A_1	A	$n_1 - 1$
	A	A_1	$1 - n_1$
	A_1	G	$n_4 - 1$
	G	A_1	$1 - n_4$



Obr. 6.4 Podmínky obrátového zatížení [2]

6.4.1.1. Při manévru dojde ke změně násobku o hodnotu Δn , což má za následek přírůstek zatížení:

$$\Delta F_{man} = \Delta n \cdot m \cdot g \cdot \left[\frac{x_{CG}}{L_{vopT}} - \frac{S_{vop}}{S_{kř}} \cdot \frac{a_{vop}}{a_{kř}} \cdot \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \right) - \frac{\rho_0}{2} \cdot \left(\frac{a_{vop} \cdot S_{vop} \cdot L_{vopT}}{m} \right) \right] \text{ [N]}$$

Kde: x_{CG} - podélná vzdálenost těžiště letounu za aerodynamickým středem letounu bez vodorovné ocasní plochy [m]

L_{vopT} - vzdálenost mezi těžištěm křídla a těžištěm VOP [m]

S_{vop} - plocha VOP [m²]

a_{vop} - sklon vztlakové čáry VOP [1/rad]

$a_{kř}$ - sklon vztlakové čáry křídla [1/rad]

$\left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \right)$ srázový součinitel [-]

6.4.1.2. úhlové zrychlení:

$$\varepsilon = \frac{L_{vopT}}{J_y} \cdot \Delta F_{man} \quad \text{[rad/s}^2\text{]}$$

Kde: J_y - moment setrvačnosti okolo příčné osy letounu (osa y) [kg · m²]

6.4.1.3. Setrvačná síla způsobená rotačním zrychlením:

$$\Delta F_{setr} = \varepsilon \cdot m_{VOP} \cdot L_{vopT} \quad \text{[N]}$$

6.4.1.4. Celkové manévrovací zatížení:

$$F_{cman} = \Delta F_{man} + \Delta F_{setr} + F_{vyv} \quad \text{[N]}$$

Kde: F_{vyv} - vyvažovací zatížení VOP před manévrem [N]

Výsledné hodnoty obrátového zatížení VOP při rychlosti V_A jsou uvedeny v tab. 6.7.

6.4.2. Výpočet obrátového zatížení pro druhou podmínku (rychlost V_D):

Při tomto řízeném obrátu nejdříve určíme úhlové zrychlení z podmínky z obr. 6.4, kde za n_m dosadíme násobek 3.8.

Následně vypočítáme přírůstek zatížení ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{L_{vopT}}{J_y} \cdot \Delta F_{man} \Rightarrow \Delta F_{man} = \frac{\varepsilon \cdot J_y}{L_{vopT}}$$

Poté postupujeme stejně jako v předchozích krocích 6.4.1.3. a 6.4.1.4.

Výsledné hodnoty zatížení VOP od manévru při rychlosti V_D jsou uvedeny v tab. 6.7.

Zatížení VOP od manévru												
	Δn [-]	výchylka VK δv_k [°]	xT [-]	m [kg]	LvopT [m]	Xcg [m]	ε_y [rad/s ²]	n [-]	Fvyv [N]	Fset [N]	ΔF_{man} [N]	Fman [N]
VA	2.8	nahoru (30°)	0.11	925	4.3426	-0.1064	7.2138	1	-1442	422	-3738	-4758
			0.2	925	4.2226	0.0136	5.6534	1	-1180	286	-3012	-3907
			0.215	1330	4.2026	0.0336	7.1488	1	-1105	381	-3827	-4550
			0.31	1330	4.0760	0.1602	4.8207	1	-707	195	-2661	-3173
	-2.8	dolů (20°)	0.11	925	4.3426	-0.1064	-7.2138	3.8	-2092	-517	3738	1128
			0.2	925	4.2226	0.0136	-5.6534	3.8	-1097	-394	3012	1521
			0.215	1330	4.2026	0.0336	-7.1488	3.8	-809	-496	3827	2522
			0.31	1330	4.0760	0.1602	-4.8207	3.8	701	-324	2661	3038
	-2.5	dolů (20°)	0.11	925	4.3426	-0.1064	-6.4409	1	-1442	-683	3337	1212
			0.2	925	4.2226	0.0136	-5.0477	1	-1180	-562	2690	948
			0.215	1330	4.2026	0.0336	-6.3828	1	-1105	-647	3417	1666
			0.31	1330	4.0760	0.1602	-4.3042	1	-707	-481	2376	1188
	2.5	nahoru (30°)	0.11	925	4.3426	-0.1064	6.4409	-1.5	-862	462	-3337	-3737
			0.2	925	4.2226	0.0136	5.0477	-1.5	-1254	352	-2690	-3592
			0.215	1330	4.2026	0.0336	6.3828	-1.5	-1368	443	-3417	-4343
			0.31	1330	4.0760	0.1602	4.3042	-1.5	-1964	289	-2376	-4051
VD	2.8	nahoru (30°)	0.11	925	4.342592	-0.1064	1.6186	1	-3970	-31	-839	-4840
			0.2	925	4.22264	0.0136	1.6186	1	-3708	-34	-862	-4605
			0.215	1330	4.202648	0.0336	1.6186	1	-3633	-39	-867	-4538
			0.31	1330	4.076032	0.1602	1.6186	1	-3235	-42	-894	-4171
	-2.8	dolů (20°)	0.11	925	4.342592	-0.1064	-1.6186	3.8	-4621	-116	839	-3898
			0.2	925	4.22264	0.0136	-1.6186	3.8	-3625	-113	862	-2876
			0.215	1330	4.202648	0.0336	-1.6186	3.8	-3337	-112	867	-2583
			0.31	1330	4.076032	0.1602	-1.6186	3.8	-1827	-109	894	-1042

Tab. 6.8 Výsledné hodnoty zatížení VOP od manévru

6.5. Zatížení VOP od poryvu

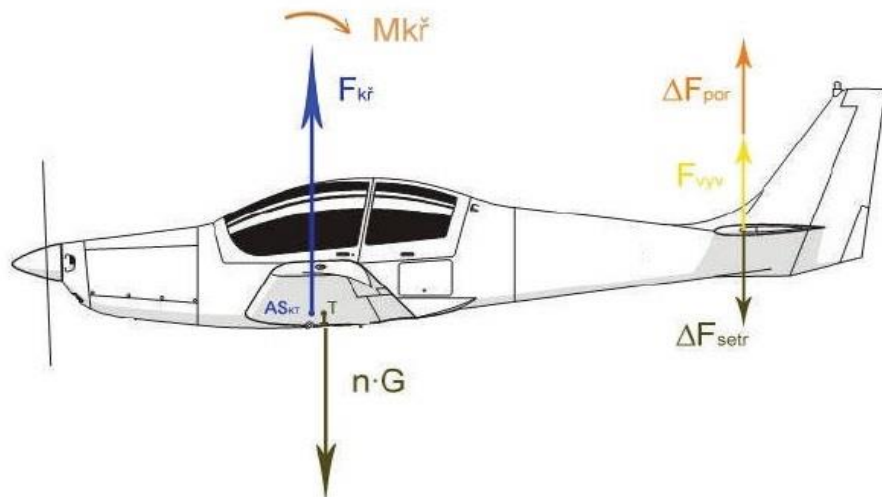
Dle předpisu CS-23.425:

Všechny vodorovné plochy, jiné než hlavní křídlo musí být navrženy na zatížení vyvolaná:

poryvovými rychlostmi uvedenými v CS 23.333 (c) se zasunutými vztlakovými klapkami

kladnými a zápornými poryvy o jmenovité rychlosti 7,62 m/s (25 ft/s) při rychlosti V_F , která odpovídá letovým případům uvedeným v CS 23.345 (a)(2).

Pro stanovení celkového zatížení vodorovných ocasních ploch pro podmínky stanovené výše musí být nejdříve určena počáteční vyvažující zatížení pro nezrychlený ustálený let příslušnými návrhovými rychlostmi V_F , V_C a V_D . Celkové zatížení se získá součtem počátečního vyvažujícího zatížení a přírůstku zatížení od poryvů. [1]



Obr. 6.5 Schéma zatížení VOP od poryvu

6.5.1. Přírůstek zatížení od poryvu dle CS 23.425 se určí tímto vztahem:

$$\Delta L_{vop} = \frac{\rho_0 \cdot K_g \cdot U_{de} \cdot v \cdot a_{vop} \cdot S_{vop}}{2} \cdot \left(1 - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \right) \quad [\text{N}]$$

Kde: K_g - zmírňující součinitel poryvu pro danou hmotnost letounu (vypočteno v kapitole 6.2.2.) [N]

U_{de} - odvozená rychlost poryvu [m/s]

6.5.2. úhlové zrychlení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_{vop} \cdot L_{vopT}}{J_y} \quad [\text{rad/s}^2]$$

6.5.3. Setrvačné zrychlení:

$$a_{s,vop} = \frac{\Delta L_{vop}}{m} \quad [\text{m/s}^2]$$

6.5.4. Setrvačná síla od poryvu:

$$F_{por,setr} = m_{vop} \cdot (a_{s,vop} + \varepsilon \cdot L_{vopT}) \quad [\text{N}]$$

6.5.5. Celková zatížení od poryvu:

$$F_{por} = F_{vyv} + \Delta L_{vop} + F_{por,setr} \quad [\text{N}]$$

Výsledné hodnoty zatížení VOP od poryvu jsou uvedeny v následujících tabulkách:

Zatížení VOP od poryvu						
Vyvažovací zatížení n=1						
	v [km/h]	m [kg]	xT [-]	Fvop [N]	Fvop,setr [N]	Fvop,vyv [N]
VC	280	925	0.11	-2159	162	-2321
		925	0.2	-1897		-2059
		1330	0.215	-1821		-1983
		1330	0.31	-1424		-1586
VD	390	925	0.11	-3970	162	-4132
		925	0.2	-3708		-3870
		1330	0.215	-3633		-3795
		1330	0.31	-3235		-3397
VF	175	925	0.11	-2524	162	-2686
		925	0.2	-2262		-2424
		1330	0.215	-2187		-2349
		1330	0.31	-1789		-1951

Tab. 6.9 Zatížení VOP od poryvu, vyvažovací zatížení pro n = 1

Zatížení VOP od poryvu											
	v [km/h]	xT [-]	m [kg]	LvopT [m]	U [m/s]	ΔLVOP [N]	εy [rad/s²]	as.vop [m/s²]	Fpor,set [N]	Fvyv [N]	Fpor [N]
VC	280	0.11	925	4.3426	15.24	2970	-5.7323	-3.2109	-464	-2321	185
		0.2	925	4.2226		2970	-5.5740	-3.2109	-441	-2059	470
		0.215	1330	4.2026		3200	-5.9762	-2.4057	-454	-1983	762
		0.31	1330	4.0760		3200	-5.7962	-2.4057	-430	-1586	1184
		0.11	925	4.3426	-15.24	-2970	5.7323	3.2109	464	-2321	-4827
		0.2	925	4.2226		-2970	5.5740	3.2109	441	-2059	-4588
		0.215	1330	4.2026		-3200	5.9762	2.4057	454	-1983	-4729
		0.31	1330	4.0760		-3200	5.7962	2.4057	430	-1586	-4356
VD	390	0.11	925	4.3426	7.62	2068	-3.9921	-2.2361	-323	-4132	-2387
		0.2	925	4.2226		2068	-3.8819	-2.2361	-307	-3870	-2109
		0.215	1330	4.2026		2228	-4.1620	-1.6754	-316	-3795	-1883
		0.31	1330	4.0760		2228	-4.0366	-1.6754	-299	-3397	-1468
		0.11	925	4.3426	-7.62	-2068	3.9921	2.2361	323	-4132	-5878
		0.2	925	4.2226		-2068	3.8819	2.2361	307	-3870	-5631
		0.215	1330	4.2026		-2228	4.1620	1.6754	316	-3795	-5707
		0.31	1330	4.0760		-2228	4.0366	1.6754	299	-3397	-5326
VF	175	0.11	925	4.3426	7.62	928	-1.7913	-1.0034	-145	-2686	-1903
		0.2	925	4.2226		928	-1.7419	-1.0034	-138	-2424	-1634
		0.215	1330	4.2026		1000	-1.8676	-0.7518	-142	-2349	-1491
		0.31	1330	4.0760		1000	-1.8113	-0.7518	-134	-1951	-1085
		0.11	925	4.3426	-7.62	-928	1.7913	1.0034	145	-2686	-3469
		0.2	925	4.2226		-928	1.7419	1.0034	138	-2424	-3214
		0.215	1330	4.2026		-1000	1.8676	0.7518	142	-2349	-3206
		0.31	1330	4.0760		-1000	1.8113	0.7518	134	-1951	-2817

Tab. 6.10 Výsledné hodnoty zatížení VOP od poryvu

6.6. Nesymetrické zatížení VOP

Dle předpisu CS-23.427: [1]

Vodorovné plochy, jiné než hlavní křídlo, a jejich nosná konstrukce musí být navrženy pro nesymetrická zatížení vznikající v důsledku zatáčení osy letounu a účinku vrtulového proudu v kombinaci se zatíženími stanovenými pro letové podmínky uvedené v CS 23.421 až 23.425.

Nejsou-li k dispozici vhodnější údaje u letounů, které jsou konvenční vzhledem k umístění motorů, křídel, vodorovných ploch jiných než hlavní křídlo a tvaru trupu:

Může se předpokládat, že na jedné straně roviny symetrie působí 100 % maximálního zatížení vyplývajícího z podmínek symetrického letu; a

Na opačné straně působí $(100 - 10(n - 1))\%$ tohoto zatížení, kde n je stanovený kladný násobek zatížení při obratech. Tato hodnota však nesmí být větší než 80%.

Výchozím bodem výpočtu nesymetrického zatížení je určení maximálního zatížení, které působí na VOP:

$$F_{\max, VOP} = 5878 \text{ N}$$

Podle předchozího vyplývá, že toto zatížení působí na jednu stranu. Přičemž zatížení opačné strany je určené:

$$n_{sym} = (100 - 10(3,8 - 1)) = 62 \%$$

Výsledná nesymetrická síla působící na opačnou stranu je rovna:

$$F_{\max, VOP} = F_{\max, VOP} \cdot 0,62 = \mathbf{3644,36 \text{ N}}$$

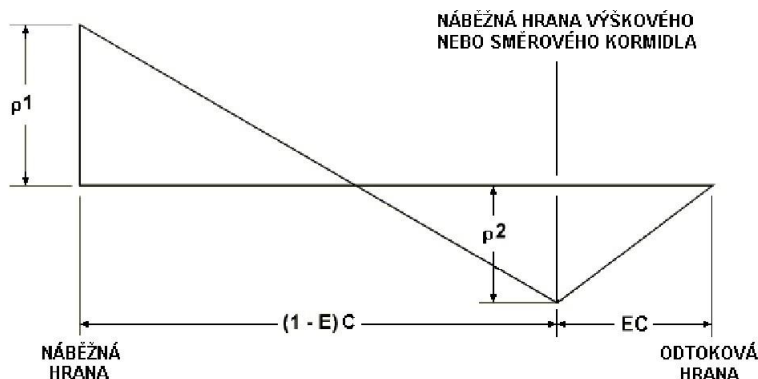
6.7. Výsledné hodnoty zatížení VOP

Typ zatížení	Letová konfigurace	Hodnota provozního zatížení
Vyvažovací	$V_D = 390 \text{ km/h}$, $n = 3,8$, $m = 925 \text{ kg}$, přední centráž	-5236 N
Od manévru	$V_D = 390 \text{ km/h}$, $\Delta n = 2,8$, $m = 925 \text{ kg}$, $\delta_{VK} = 30^\circ$, přední centráž	-4840 N
Od poryvu	$V_D = 390 \text{ km/h}$, $n = 3,8$, $m = 925 \text{ kg}$, $U = -7,62 \text{ m/s}$, přední centráž	-5878 N

Tab. 6.11 Výsledné provozní hodnoty zatížení VOP

7. Průběhy zatížení VOP

Rozdělení zatížení po hloubce VOP bylo provedeno dle předpisu CS-23 1-Dodatek A-7 obr. A7: [1] Při výpočtu byl použit program Microsoft Excel.



$$\rho_1 = 2\bar{w} \left(\frac{2 - E - 3d'}{1 - E} \right)$$

$$\rho_2 = 2\bar{w}(3d' + E - 1)$$

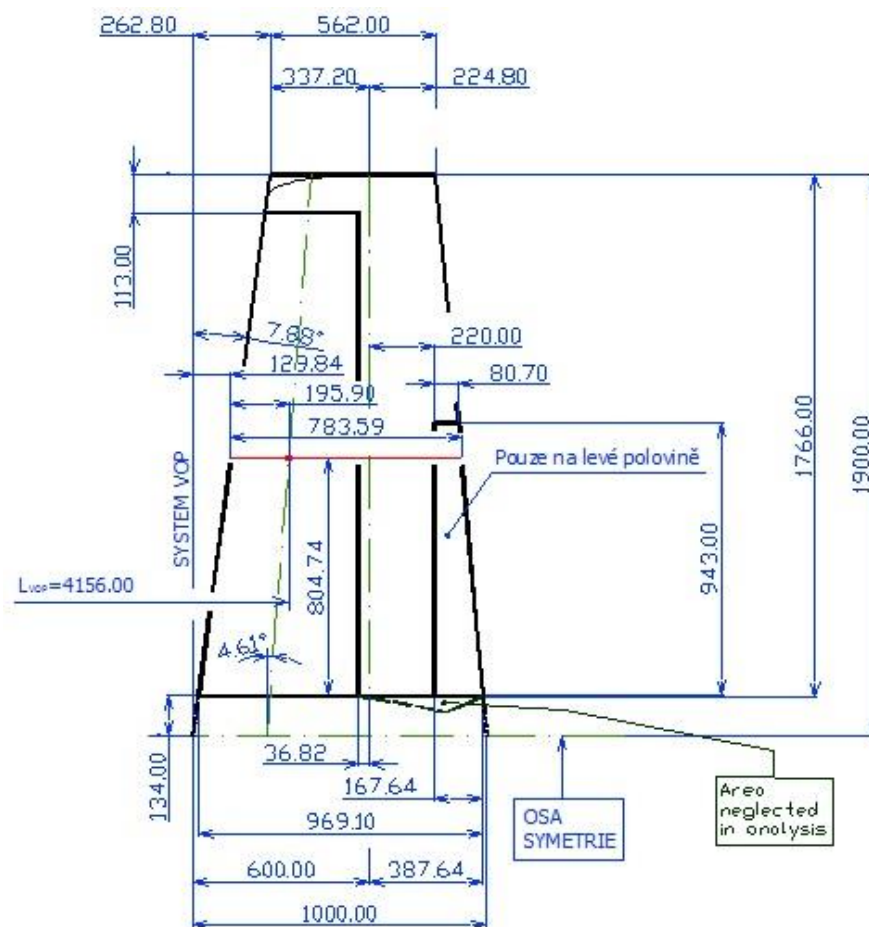
Kde:

- \bar{w} = průměrné zatížení plochy (specifikované na obrázku A5)
- E = poměr délky tětiny výškového kormidla (nebo směrového kormidla) k celkové délce tětiny stabilizátoru a výškového kormidla (nebo kýlové plochy a směrového kormidla).
- d' = poměr vzdálenosti působíště tlaku působícího na jednotku délky rozpětí vodorovného stabilizátoru a výškového kormidla (nebo svislého stabilizátoru a směrového kormidla) měřený od náběžné hrany vodorovného (svislého) stabilizátoru k délce tětiny v místě působíště tlaku. Znaménko je kladné, je-li působíště tlaku za náběžnou hranou.
- c = délka tětiny v místě působíště tlaku.

Poznámka: Hodnoty \bar{w} , ρ_1 a ρ_2 jsou kladné, působí-li stejným směrem.

Obr. 7.1 OBRÁZEK A7 Dodatku A předpisu CS-23, Rozložení zatížení stabilizátoru a výškového kormidla nebo kýlové plochy a směrového kormidla [1]

7.1. Geometrie VOP



Obr. 7.2 Geometrie VOP [3]

Hlavní nosník stabilizátoru je rovnoběžný s osou otáčení VK a nachází se ve vzdálenosti 58 mm od odtokové hrany stabilizátoru.

7.2. Vztahy pro výpočet průběhů zatížení

Posouvající síla:
$$T = \int_0^y q dy$$

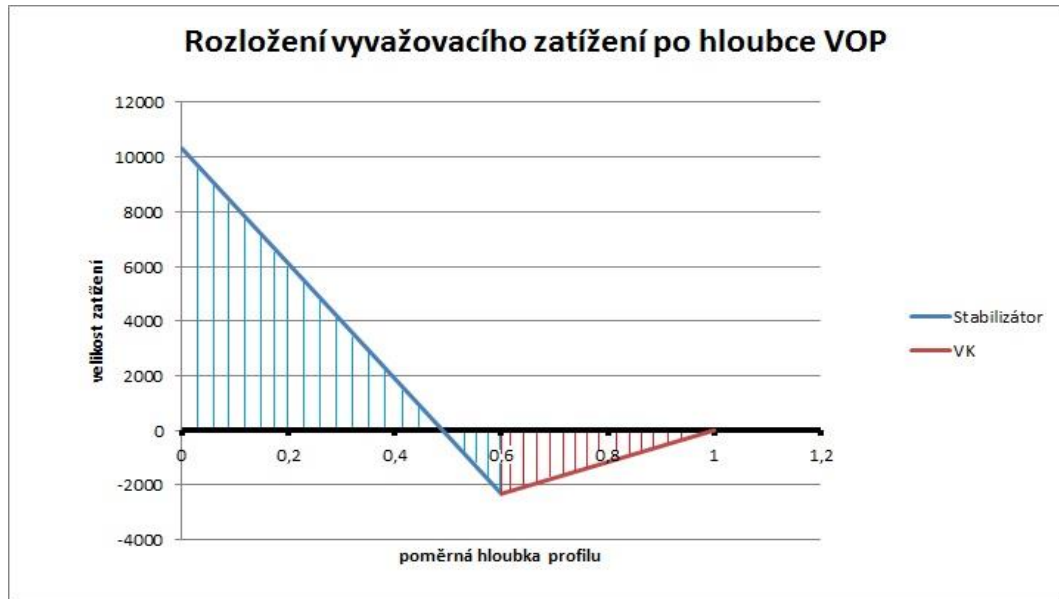
Ohybový moment:
$$M_o = \int_0^y T dy$$

Kroutící moment:
$$M_K = \int_0^y q \cdot x \cdot dy$$

x ... vzdálenost výslednice od vztažného bodu, ke kterému je kroutící moment počítán.

Pro výpočet byla použita numerická integrace v tabulkovém procesoru MS Excel.

7.3. Vyvažovací zatížení VOP



Obr. 7.3 Poměrné rozložení vyvažovacího zatížení VOP po hloubce

7.3.1. Rozdělení zatížení na stabilizátor a výškové kormidlo:

Poměrné zatížení: Stabilizátor: $F_{STAB} = 1,232 \cdot F_{VOP}$
 VK: $F_{VK} = -0,232 \cdot F_{VOP}$

Poloha výslednic byla nalezena pomocí momentové rovnováhy podle obr. 7.3.

Stabilizátor: $0,3 \cdot C_{STAB}$
 VK: $1/3 \cdot C_{VK}$

7.3.2. Hodnoty pro rozhodující vyvažovací zatížení VOP:

$F_{VOP} = -5236 \text{ N}$

Průměrné zatížení: $q = \frac{F_{VOP}}{S_{VOP}} = \frac{-5236}{2,7039} = -1936,35 \text{ Pa}$

Spojitě zatížení VOP: $q = c(y) \cdot q$

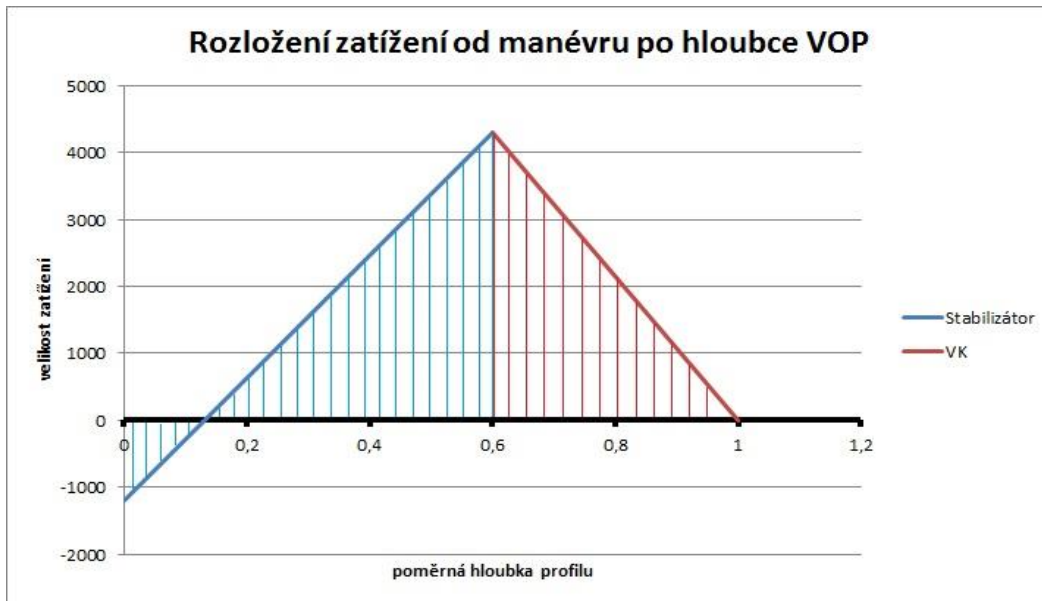
Spojitě zatížení stabilizátoru: $q_{STAB} = q \cdot 1,232$

Spojitě zatížení VK: $q_{VK} = q \cdot (-0,232)$

- Kroutící moment stabilizátoru je vztažen k poloze zadního nosníku
- Kroutící moment výškového kormidla je vztažen k ose otáčení výškového kormidla

Tabulky vypočtených hodnot průběhů vyvažovacího zatížení VOP jsou obsaženy v příloze č. 2.

7.4. Zatížení VOP od manévru



Obr. 7.4 Poměrné rozložení zatížení VOP od manévru po hloubce

7.4.1. Rozdělení zatížení na stabilizátor a výškové kormidlo:

Poměrné zatížení:	Stabilizátor:	$F_{STAB} = 0,528 \cdot F_{VOP}$
	VK:	$F_{VK} = 0,472 \cdot F_{VOP}$

Poloha výslednic byla nalezena pomocí momentové rovnováhy podle obr. 7.4.

Stabilizátor:	$0,494 \cdot C_{STAB}$
VK:	$1/3 \cdot C_{VK}$

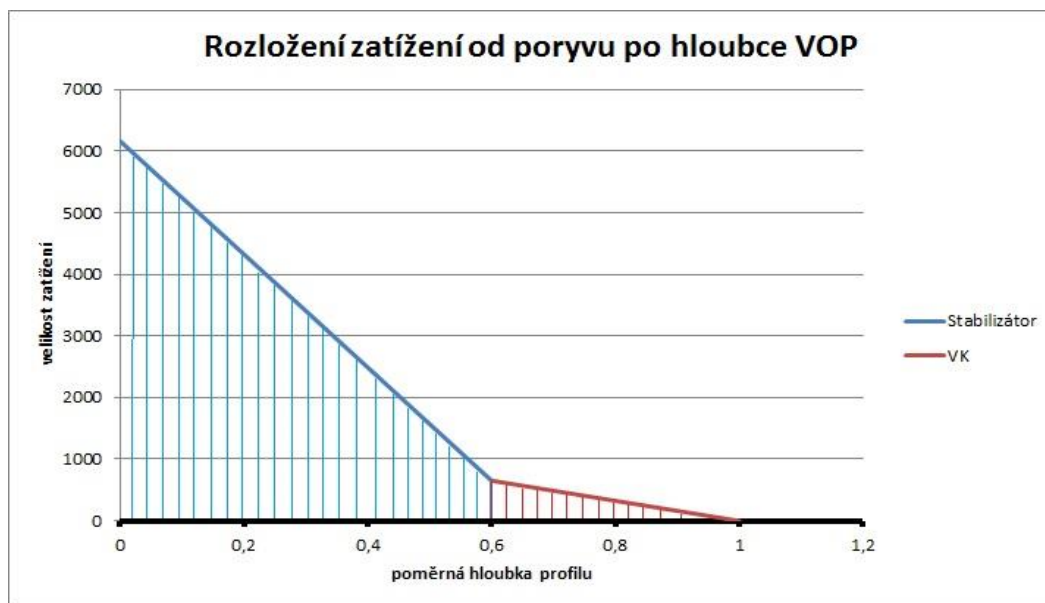
7.4.2. Hodnoty pro rozhodující vyvažovací zatížení VOP:

$$F_{VOP} = -4840 \text{ N}$$

Průměrné zatížení:	$q = \frac{F_{VOP}}{S_{VOP}} = \frac{-4840}{2,7039} = -1790,03 \text{ Pa}$
--------------------	--

Tabulky vypočtených hodnot průběhů manévrovacího zatížení VOP jsou obsaženy v příloze č. 3.

7.5. Zatížení VOP od poryvu



Obr. 7.5 Poměrné rozložení zatížení VOP od poryvu po hloubce

7.5.1. Rozdělení zatížení na stabilizátor a výškové kormidlo:

Poměrné zatížení:	Stabilizátor:	$F_{STAB} = 0,887 \cdot F_{VOP}$
	VK:	$F_{VK} = 0,113 \cdot F_{VOP}$

Poloha výslednic byla nalezena pomocí momentové rovnováhy dle obrázku 7.5.

Stabilizátor:	$0,36 \cdot C_{STAB}$
VK:	$1/3 \cdot C_{VK}$

7.5.2. Hodnoty pro rozhodující vyvažovací zatížení VOP:

$$F_{VOP} = -5878 \text{ N}$$

Průměrné zatížení:	$q = \frac{F_{VOP}}{S_{VOP}} = \frac{-5878}{2,7039} = -2173,8 \text{ Pa}$
--------------------	---

Tabulky vypočtených hodnot průběhů poryvového zatížení VOP jsou obsaženy v příloze č. 4.

7.6. Souhrn zatížení VOP

7.6.1. Maximální provozní zatížení výškového kormidla

Žlutá barva značí rozsah rohového odlehčení VK a modrá barva označuje polohu závěsů.

y [m]	Vyvažovací zatížení			Zatížení od manévru			Zatížení od poryvu			Maximální zatížení		
	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]
1.9000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.8774	25	0	-4	-23	0	3	-28	0	4	-28	0	4
1.8548	50	1	-8	-46	-1	7	-56	-1	8	-56	-1	8
1.8322	75	3	-11	-69	-2	11	-84	-3	13	-84	-3	13
1.8096	100	5	-15	-93	-4	14	-112	-5	17	-112	-5	17
1.7870	126	7	-17	-116	-7	16	-141	-8	19	-141	-8	19
1.7870	-297	7	-17	503	-7	16	150	-8	19	503	-8	19
1.7398	-283	-7	-16	480	17	15	143	-1	19	480	17	19
1.6925	-269	-20	-16	456	39	14	136	6	18	456	39	18
1.6453	-254	-32	-15	431	60	12	129	12	18	431	60	18
1.5981	-240	-44	-14	406	79	11	122	18	18	406	79	18
1.5509	-225	-55	-14	381	98	10	114	23	17	381	98	17
1.5036	-210	-65	-13	355	115	9	107	29	17	355	115	17
1.4564	-194	-74	-12	328	132	7	99	33	17	328	132	17
1.4092	-179	-83	-11	302	146	6	91	38	16	302	146	16
1.3619	-163	-91	-10	275	160	5	83	42	16	275	160	16
1.3147	-147	-99	-10	247	172	3	75	46	15	247	172	15
1.2675	-130	-105	-9	219	183	1	67	49	15	219	183	15
1.2203	-113	-111	-8	190	193	0	59	52	14	190	193	14
1.1730	-97	-116	-7	162	201	-2	51	55	14	162	201	14
1.1258	-79	-120	-6	132	208	-4	42	57	13	132	208	13
1.0786	-62	-123	-4	102	214	-6	33	59	13	102	214	13
1.0313	-44	-126	-3	72	218	-8	25	60	12	72	218	12
0.9841	-26	-127	-2	42	221	-10	16	61	12	42	221	12
0.9369	-8	-128	-1	11	222	-12	7	62	11	11	222	-12
0.8897	10	-128	0	-21	222	-14	-2	62	10	-21	222	-14
0.8424	29	-127	2	-53	220	-16	-12	61	10	-53	220	-16
0.7952	48	-125	3	-85	217	-18	-21	61	9	-85	217	-18
0.7480	67	-123	4	-118	212	-21	-31	59	8	-118	212	-21
0.7007	87	-119	6	-151	205	-23	-40	58	8	-151	205	-23
0.6535	106	-115	7	-185	197	-26	-50	56	7	-185	197	-26
0.6063	126	-109	9	-219	188	-29	-60	53	6	-219	188	-29
0.5591	147	-103	11	-254	177	-31	-70	50	5	-254	177	-31
0.5118	167	-95	12	-289	164	-34	-80	46	5	-289	164	-34
0.4646	188	-87	14	-324	150	-37	-91	42	4	-324	150	-37
0.4174	209	-78	16	-360	133	-40	-101	38	3	-360	133	-40
0.3701	230	-67	17	-396	116	-43	-112	33	2	-396	116	-43
0.3229	251	-56	19	-433	96	-46	-122	27	1	-433	96	-46
0.2757	273	-43	21	-470	75	-50	-133	21	0	-470	75	-50
0.2285	295	-30	23	-508	52	-53	-144	15	-1	-508	52	-53
0.1812	317	-16	25	-546	27	-56	-155	8	-2	-546	27	-56
0.1340	340	0	27	-584	0	-60	-166	0	-3	-584	0	-60
0.1340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.0670	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.0335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 7.1 Maximální provozní zatížení výškového kormidla

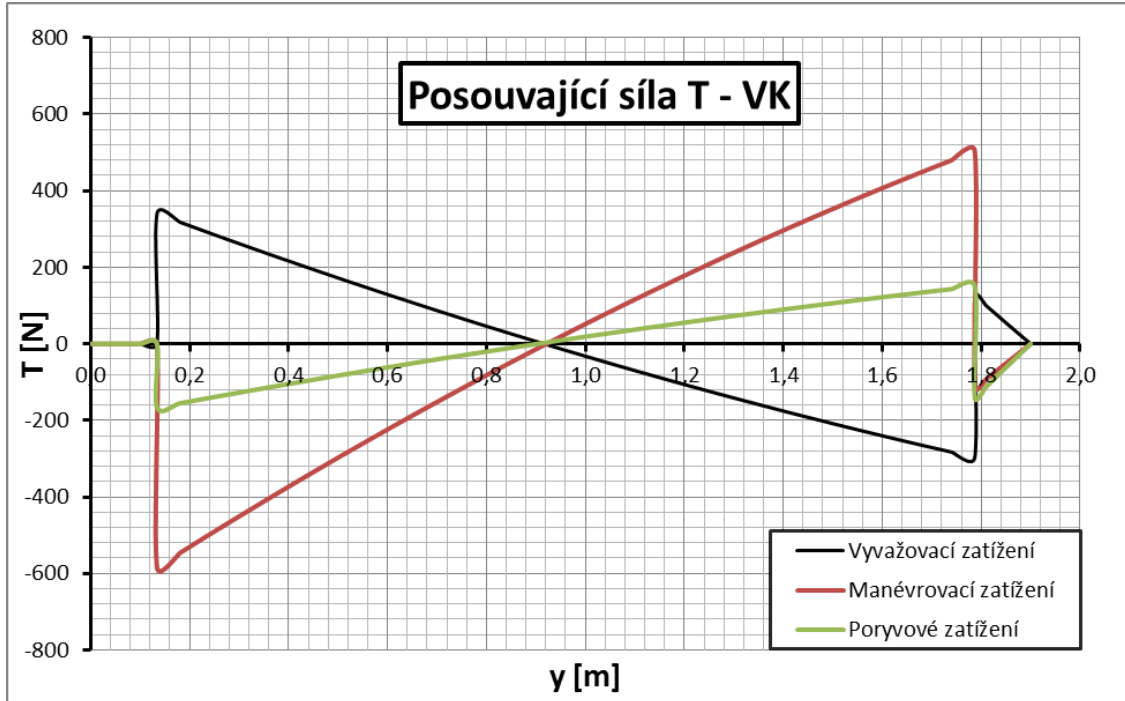
7.6.2. Maximální provozní zatížení stabilizátoru

y [m]	Vyvažovací zatížení			Zatížení od manévru			Zatížení od poryvu			Maximální zatížení		
	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]
1,9000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,8774	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,8548	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,8322	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,8096	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,7870	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,7870	422	0	-37	-620	0	54	-291	0	25	-620	0	54
1,7398	349	18	-51	-646	-30	51	-345	-15	16	-646	-30	51
1,6925	274	33	-66	-673	-61	47	-400	-33	7	-673	-61	47
1,6453	198	44	-81	-701	-93	44	-456	-53	-3	-701	-93	-81
1,5981	120	52	-97	-729	-127	40	-513	-76	-14	-729	-127	-97
1,5509	41	55	-113	-757	-162	36	-571	-101	-25	-757	-162	-113
1,5036	-40	55	-131	-786	-199	32	-630	-130	-36	-786	-199	-131
1,4564	-121	52	-149	-815	-237	28	-690	-161	-48	-815	-237	-149
1,4092	-204	44	-167	-845	-276	24	-751	-195	-60	-845	-276	-167
1,3619	-289	32	-186	-876	-316	19	-813	-232	-72	-876	-316	-186
1,3147	-375	17	-206	-906	-358	15	-876	-272	-85	-906	-358	-206
1,2675	-462	-3	-227	-938	-402	10	-940	-315	-99	-940	-402	-227
1,2203	-550	-27	-248	-970	-447	5	-1005	-361	-113	-1005	-447	-248
1,1730	-640	-55	-271	-1002	-494	0	-1071	-410	-128	-1071	-494	-271
1,1258	-731	-88	-293	-1035	-542	-6	-1138	-462	-143	-1138	-542	-293
1,0786	-824	-124	-317	-1068	-591	-11	-1206	-517	-158	-1206	-591	-317
1,0313	-918	-165	-342	-1102	-643	-17	-1275	-576	-174	-1275	-643	-342
0,9841	-1013	-211	-367	-1136	-695	-23	-1345	-638	-191	-1345	-695	-367
0,9369	-1109	-261	-393	-1171	-750	-29	-1416	-703	-208	-1416	-750	-393
0,8897	-1207	-316	-420	-1206	-806	-36	-1488	-771	-225	-1488	-806	-420
0,8424	-1307	-375	-447	-1242	-864	-42	-1561	-843	-244	-1561	-864	-447
0,7952	-1407	-439	-476	-1278	-923	-49	-1634	-919	-262	-1634	-923	-476
0,7480	-1509	-508	-505	-1315	-985	-56	-1709	-998	-282	-1709	-998	-505
0,7007	-1613	-582	-535	-1352	-1048	-63	-1785	-1080	-301	-1785	-1080	-535
0,6535	-1717	-660	-566	-1390	-1112	-71	-1862	-1166	-322	-1862	-1166	-566
0,6063	-1823	-744	-598	-1428	-1179	-79	-1940	-1256	-343	-1940	-1256	-598
0,5591	-1931	-833	-631	-1466	-1247	-87	-2019	-1350	-365	-2019	-1350	-631
0,5118	-2039	-926	-665	-1505	-1317	-95	-2098	-1447	-387	-2098	-1447	-665
0,4646	-2149	-1025	-699	-1545	-1389	-103	-2179	-1548	-410	-2179	-1548	-699
0,4174	-2261	-1130	-735	-1585	-1463	-112	-2261	-1653	-433	-2261	-1653	-735
0,3701	-2374	-1239	-772	-1626	-1539	-120	-2344	-1762	-457	-2374	-1762	-772
0,3229	-2488	-1354	-809	-1667	-1617	-130	-2428	-1874	-482	-2488	-1874	-809
0,2757	-2603	-1474	-848	-1708	-1697	-139	-2512	-1991	-507	-2603	-1991	-848
0,2285	-2720	-1600	-887	-1750	-1778	-148	-2598	-2112	-533	-2720	-2112	-887
0,1812	-2838	-1731	-928	-1793	-1862	-158	-2685	-2236	-560	-2838	-2236	-928
0,1340	-2958	-1868	-969	-1836	-1948	-168	-2773	-2365	-588	-2958	-2365	-969
0,1340	-2958	-1868	-969	-1836	-1948	-168	-2773	-2365	-588	-2958	-2365	-969
0,1005	-2958	-1967	-969	-1836	-2009	-168	-2773	-2458	-588	-2958	-2458	-969
0,0670	-2958	-2066	-969	-1836	-2071	-168	-2773	-2551	-588	-2958	-2551	-969
0,0335	-2958	-2165	-969	-1836	-2132	-168	-2773	-2644	-588	-2958	-2644	-969
0	-2958	-2264	-969	-1836	-2194	-168	-2773	-2737	-588	-2958	-2737	-969

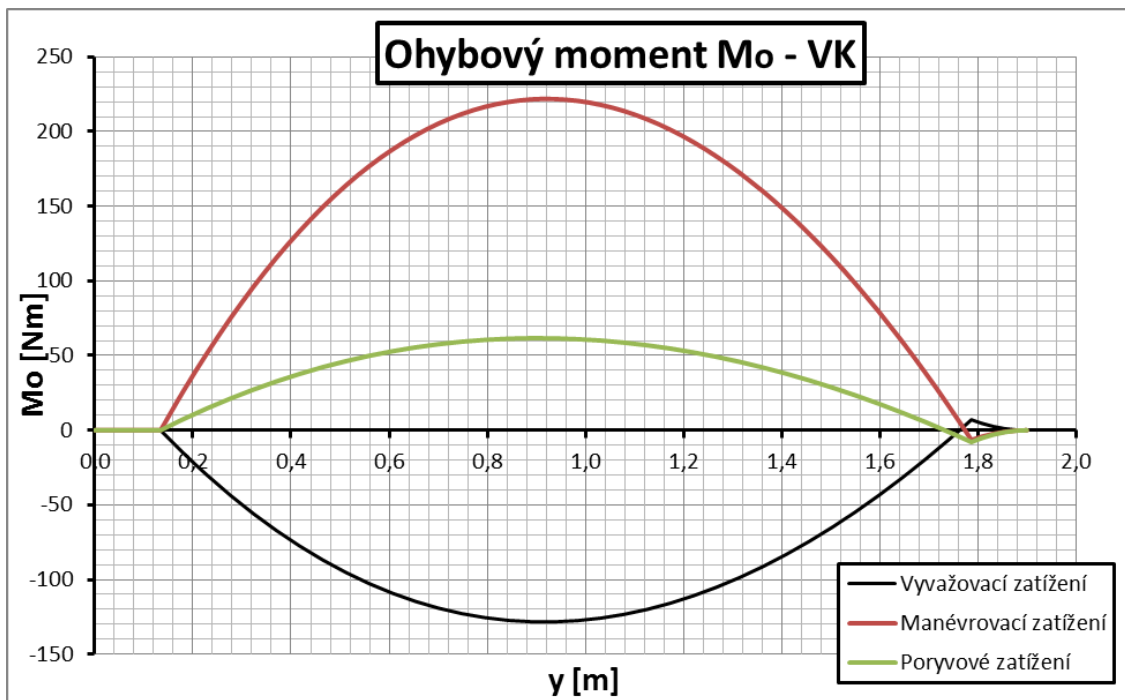
Tab. 7.2 Maximální provozní zatížení stabilizátoru

7.7. Průběhy zatížení VOP

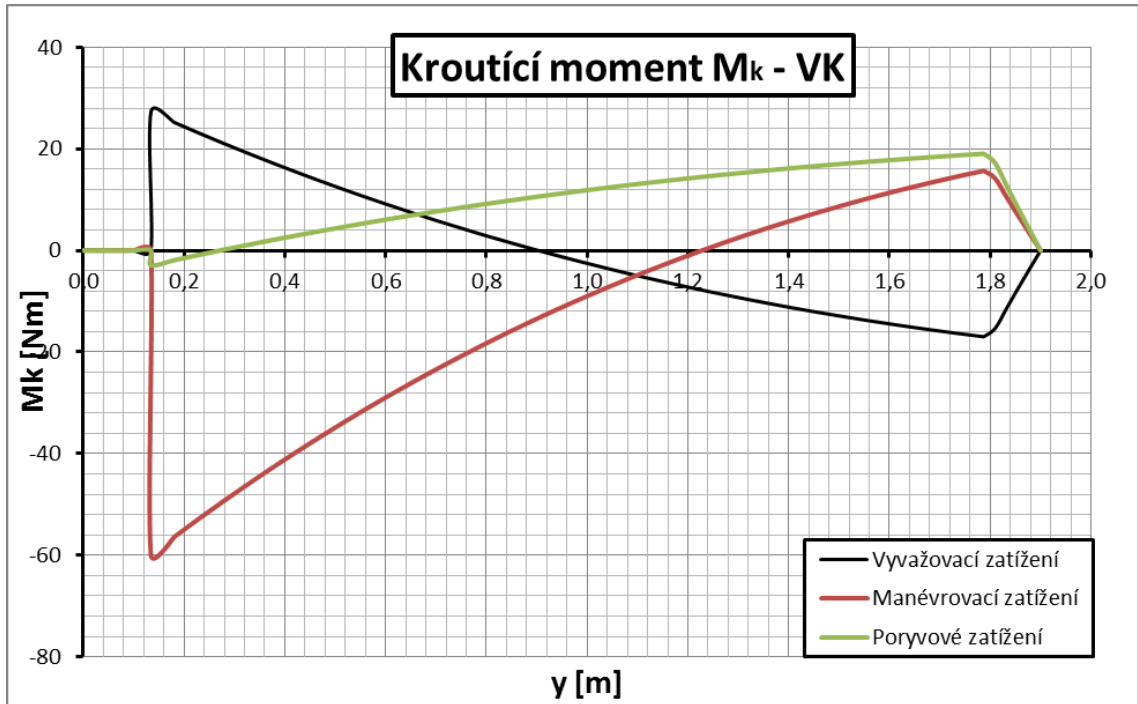
7.7.1. Průběhy zatížení výškového kormidla



Obr. 7.6 Průběh posouvající síly na výškovém kormidle

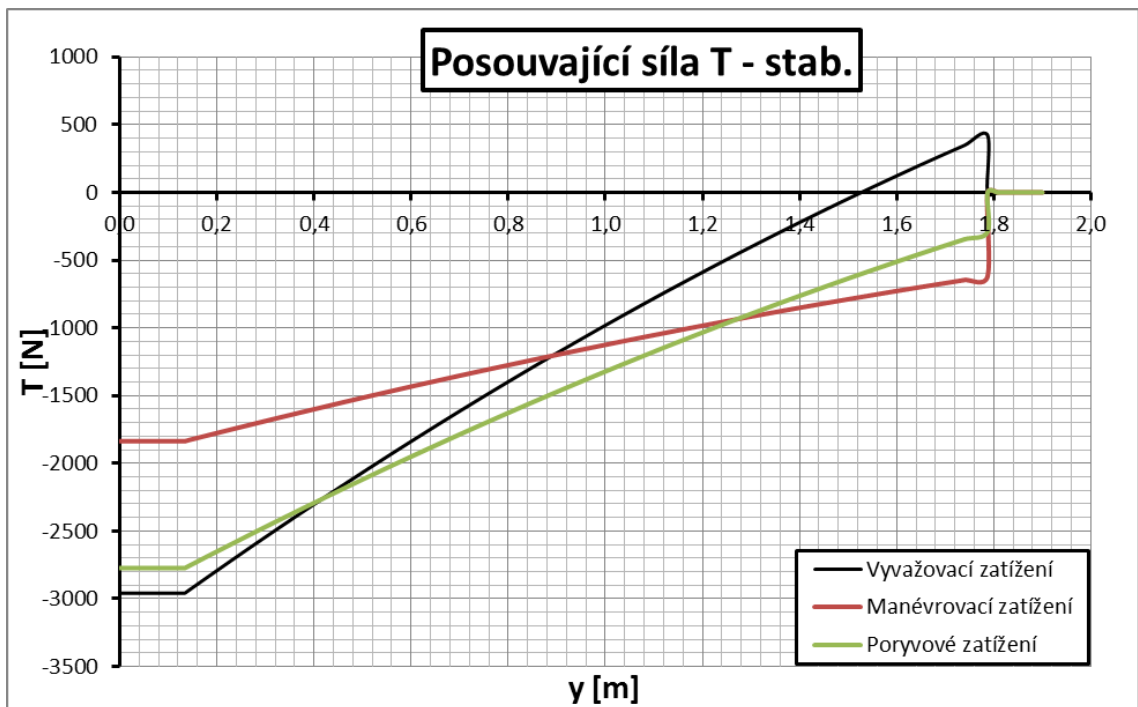


Obr. 7.7 Průběh ohybového momentu na výškovém kormidle

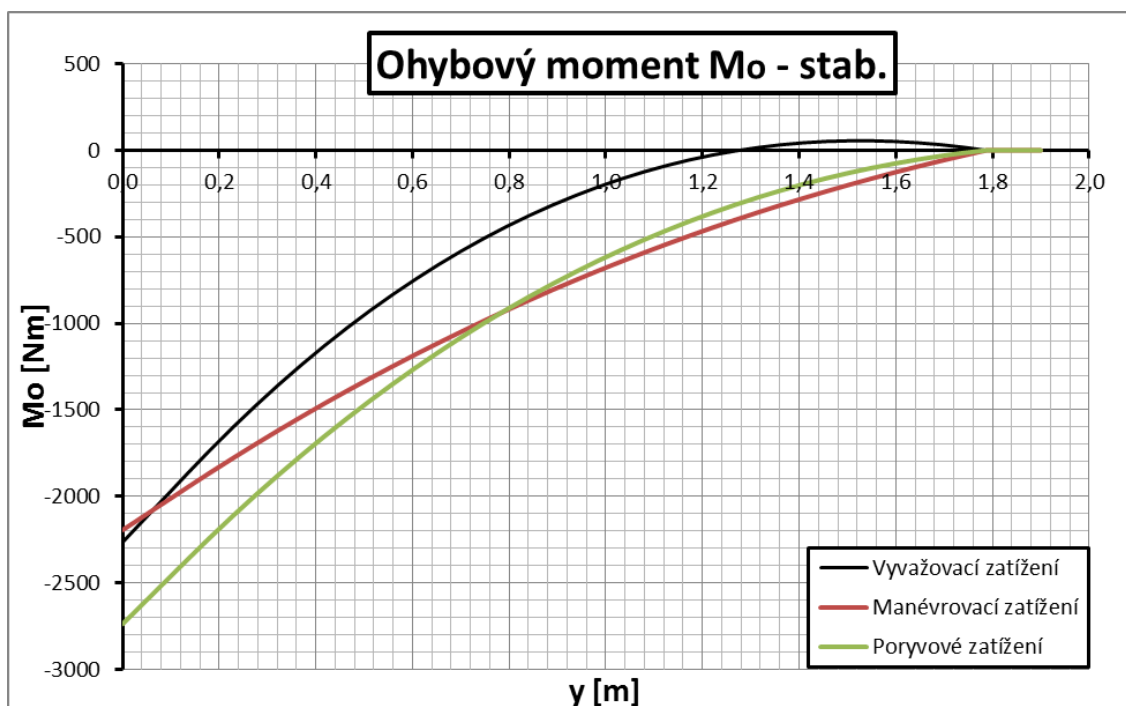


Obr. 7.8 Průběh krouťícího momentu na výškovém kormidle

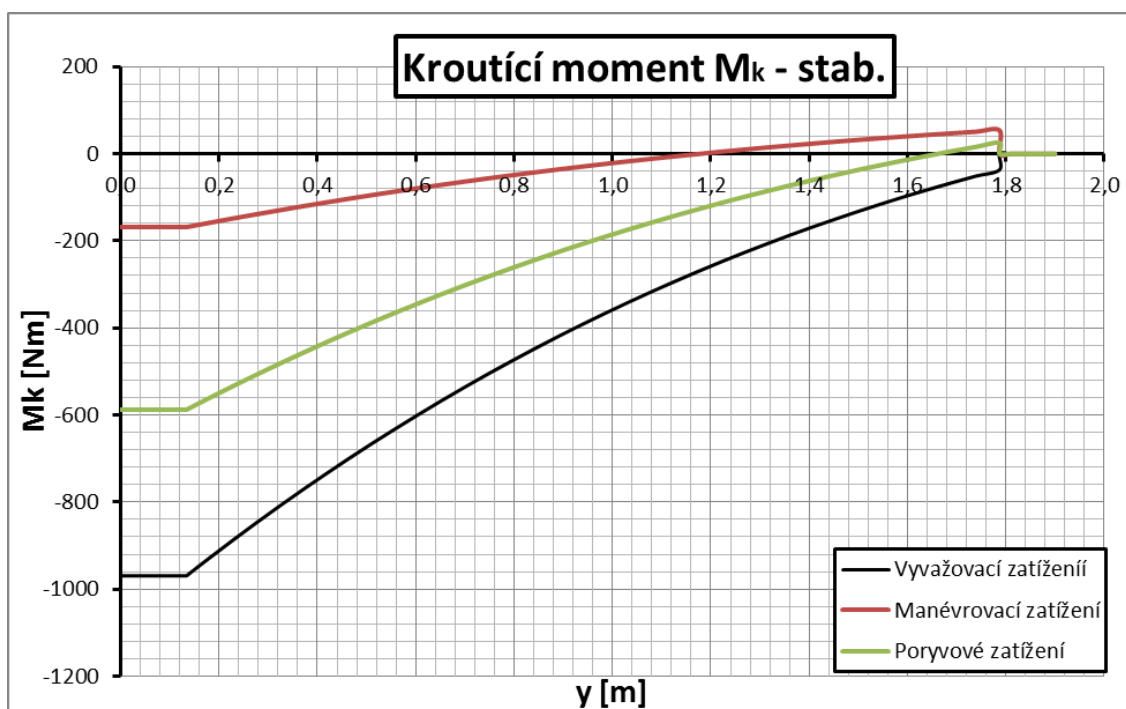
7.7.2. Průběhy zatížení stabilizátoru



Obr. 7.9 Průběh posouvající síly na stabilizátoru



Obr. 7.10 Průběh ohybového momentu na stabilizátoru



Obr. 7.11 Průběh kroutícího momentu na stabilizátoru

8. Součinitel bezpečnosti

Veškerá vypočtená zatížení VOP je třeba vynásobit součinitelem bezpečnosti definovaným předpisem CS-23 [1]:

CS 23.303 Součinitel bezpečnosti

Pokud není stanoveno jinak, musí být používán součinitel bezpečnosti hodnoty 1,5.

Součinitel bezpečnosti stanovený v CS 23.303 musí být násoben nejvyššími příslušnými zvláštními součiniteli bezpečnosti stanovenými v CS 23.621 až 23.625 pro každou část konstrukce, jejíž pevnost:

- (1) Je nejistá;
- (2) Se pravděpodobně zhorší během provozu před běžnou plánovanou výměnou;
- (3) Má značný rozptyl v důsledku nejistot ve výrobním procesu nebo v kontrolních postupech. [1]

Z důvodu použití kompozitních materiálů, bude součinitel bezpečnosti vynásoben zvyšujícím součinitelem zahrnujícím vliv prostředí, stárnutí, vnitřních defektů a rozptylu mechanických vlastností. Zvyšující součinitel bezpečnosti f_K bude stanoven dle literatury [6] následujícím způsobem:

$$f_K = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \quad , \text{kde}$$

- k_1 - je vliv stárnutí materiálu (degradace mechanických vlastností matrice). Podle požadované životnosti a povrchové ochrany $k_1 = 1,15 - 1,6$
- k_2 - vliv prostředí (teplota a vlhkost) $k_2 = 1,0 - 1,2$
- k_3 - vliv vnitřních defektů při výrobě, závislí na použitých defektoskopických metodách $k_3 = 1,0 - 2,0$
- k_4 - vliv rozptylu mechanických hodnot vytvrzeného kompozitu. Závisí na počtu vzorků a zkušebních metodách, jakož i na technologickém zvládnutí výrobku $k_4 = 1,0 - 1,7$ [6]

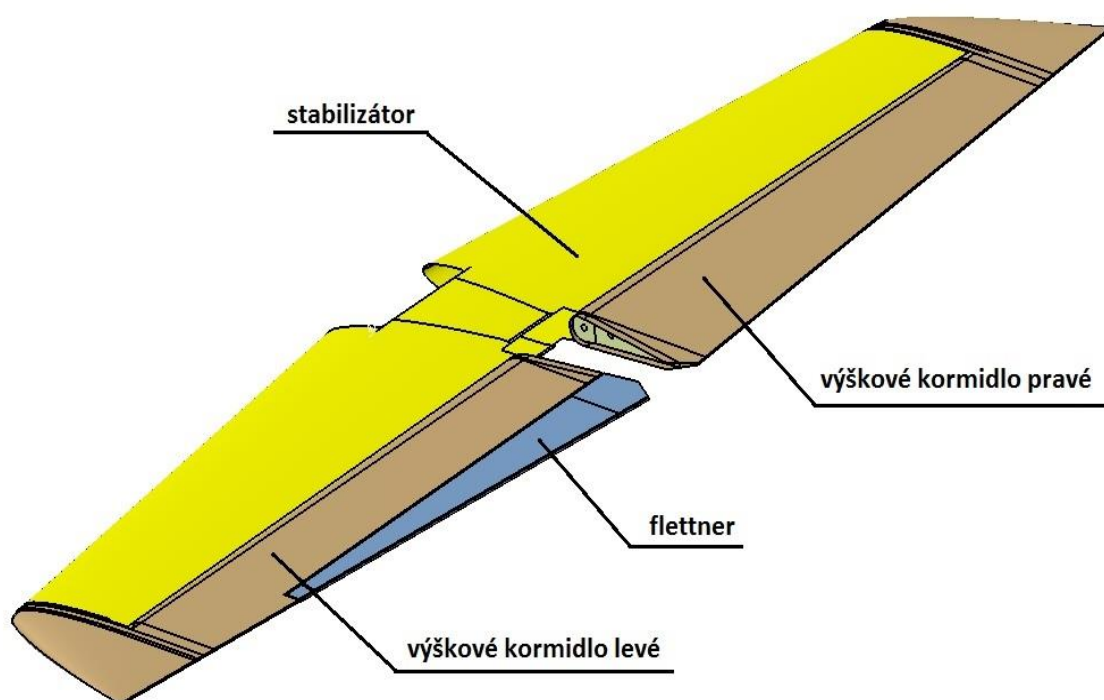
Pro běžné díly leteckých konstrukcí z uhlíkových kompozitů, defektoskopicky kontrolovatelných s vyhovující povrchovou ochranou a malým rozptylem mechanických vlastností se hodnota zvyšujícího součinitele bezpečnosti $f_K = 1,2 - 1,3$. Oprávněnost aplikace konkrétního k_i je vázána na schválení dohlížejícího úřadu. Zavedeným standardem v kategorii ultralehkých letadel se stává užití zvyšujícího součinitele bezpečnosti $f_K = 1,25$. [6]

Výsledný součinitel bezpečnosti: $f = f_K \cdot f_b = 1,25 \cdot 1,5 = 1,875$

9. Návrh konstrukce VOP

Firmou Evekter spol. s.r.o. byl poskytnut systémový výkres a hrubý model ploch VOP. Na konstrukci VOP ze strany zadavatele nebyly vzneseny žádné konkrétní požadavky na volbu materiálu, použité technologie nebo konstrukční uspořádání. Jediné požadavky jsou:

- zachování vnějšího tvaru VOP z důvodu aerodynamického zatížení,
- zachování polohy závěsů pro uchycení VOP na trupu letounu.

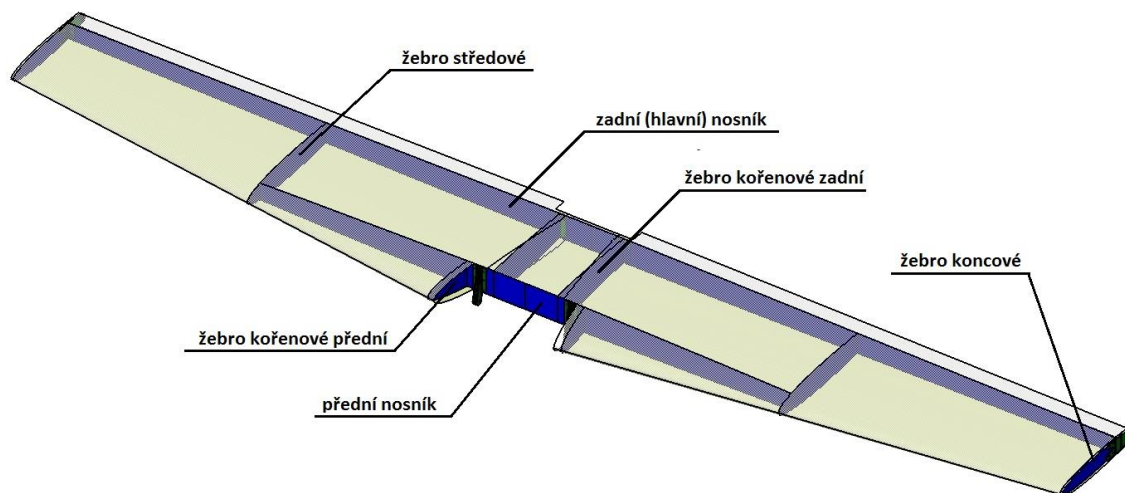


Obr. 9.1 Systémový model VOP

Z důvodu časové náročnosti je detailně řešen návrh konstrukce stabilizátoru a pravého výškového kormidla VOP. Také závěsy na VOP a řízení VK je převzato z kovové verze VOP od firmy Evekter s menšími úpravami, které jsou řešeny pouze schématickou formou. Tyto závěsy firma Evekter poskytla ve formě modelů v programu CATIA.

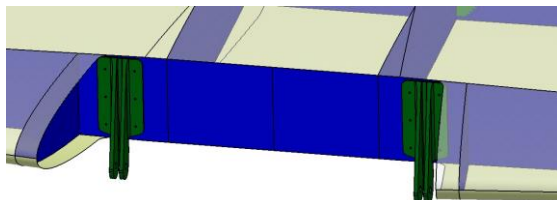
9.1. Návrh konstrukce stabilizátoru

Z obr. 9.2 můžeme vidět, že konstrukce stabilizátoru se skládá z potahu, zadního (hlavního) nosníku, předního nosníku a osmi žeber.

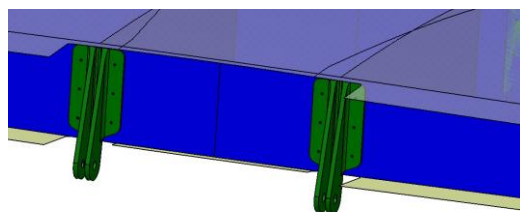


Obr. 9.2 Systémový model stabilizátoru

Stabilizátor je uchycen za pomoci čtyř závěsů (dva na zadním nosníku a dva na předním nosníku) k trupu letounu. Závěsy budou připevněny šroubovými spoji (obr. 9.7).

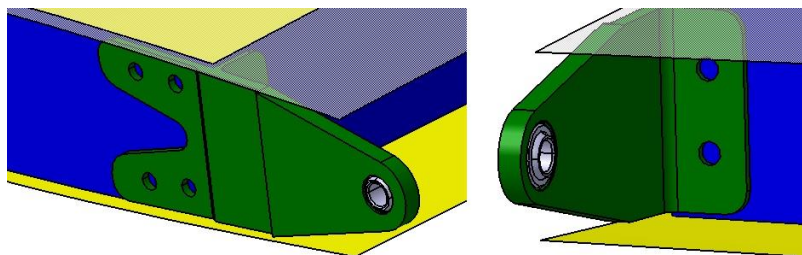


Obr. 9.3 Detail předního uchycení stabilizátoru k trupu letounu



Obr. 9.4 Detail zadního uchycení stabilizátoru k trupu letounu

Na koncových žebrech a zadním nosníku jsou umístěny závěsy stabilizátor-VK (obr. 9.5), který je opatřen kloubovým ložiskem pro pozdější nasazení VK a jeho pohyb kolem osy otáčení. Závěsy budou připevněny šroubovými spoji.

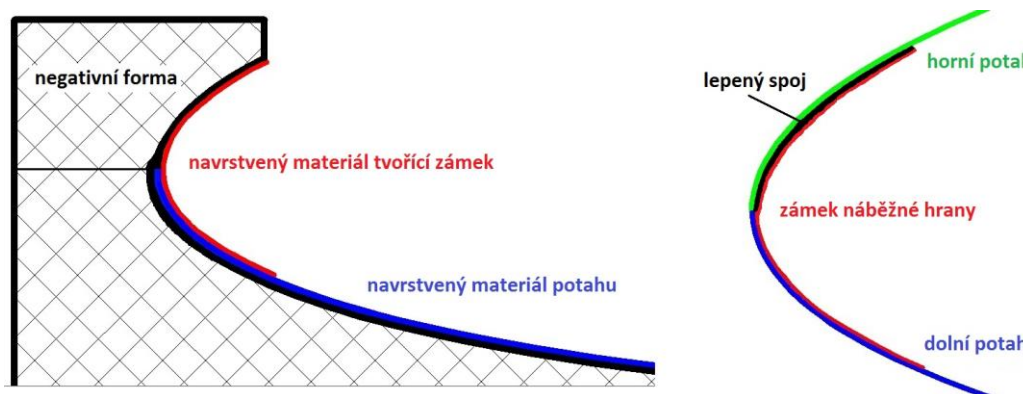


Obr. 9.5 Detail závěsu stabilizátor-VK

Všechny části stabilizátoru (potah horní, potah dolní, nosník přední, nosník zadní a jednotlivá žebra) budou vyrobeny zvolenou technologií mokré laminace v negativních formách s následným vakuovým vytvrzováním působícího atmosferického tlaku. Potahy a nosníky budou sendvičového typu s pěnovým jádrem. Vrstvení jednotlivých částí stabilizátoru je rozebráno v kapitole č. 10.

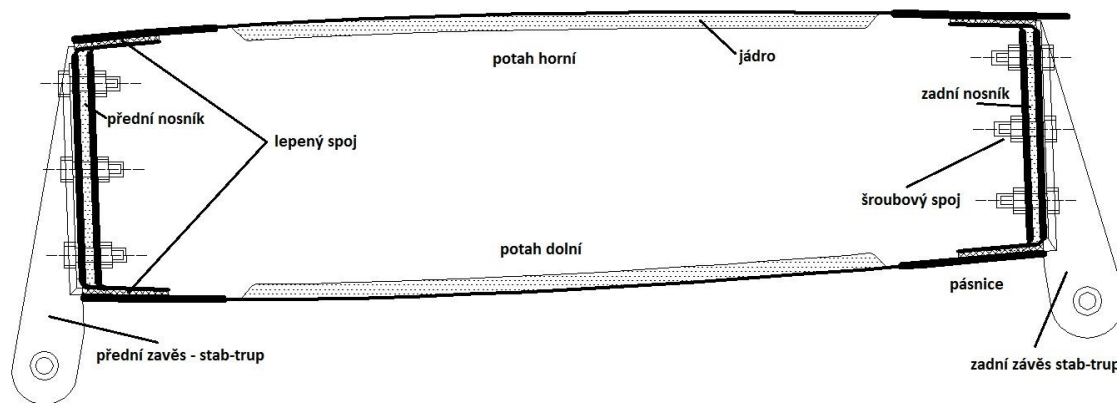
Při kompletaci stabilizátoru bude postupováno následovně:

Po dokončení výroby, vytvrzení a vyvrtání potřebných děr k namontování závěsů u všech částí se ke spodnímu potahu postupně přilepí jednotlivé vnitřní konstrukční části v tomto pořadí: přední nosník, žebra středová, žebra kořenová zadní, zadní nosník, žebra koncová a žebra kořenová přední. Tyto části budou přilepeny lepidlem o tloušťce 2 mm a lepenou plochou budou celé plochy lemů těchto částí. Bude použito epoxidové lepidlo zahuštěné bavlnou s označením L-285 a tvrdidlem L-285 (doba zpracovatelnosti asi 50 minut) Dalším krokem bude namontování dvou závěsů na předním nosníku, dvou závěsů na zadním nosníku pro uchycení stabilizátoru k trupu letounu a dvou závěsů na koncovém a zadním nosníku pro uchycení výškových kormidel. Další fází kompletace je přilepení horního potahu. Kromě ploch lemů vnitřních částí je potah horní přilepen k potahu spodnímu tzv. zámkem na náběžné hraně stabilizátoru. Zámek je tvořen vrstvou o šířce 5 cm po celé délce náběžné hrany stabilizátoru, která se vytvoří při výrobě dolní části potahu ve speciálně upravené negativní formě (obr. 9.6 vlevo). Posledním krokem je nanesení nátěru.



Obr. 9.6 Schéma zámku náběžné hrany stabilizátoru

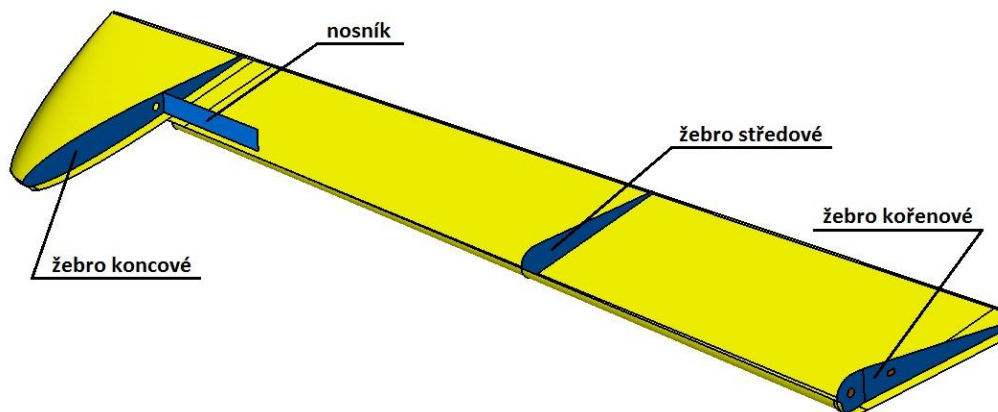
Schématický náčrt konstrukce stabilizátoru v místě zadního kořenového žebra můžeme vidět na obrázku 9.7.



Obr. 9.7 schéma konstrukčního řezu stabilizátoru

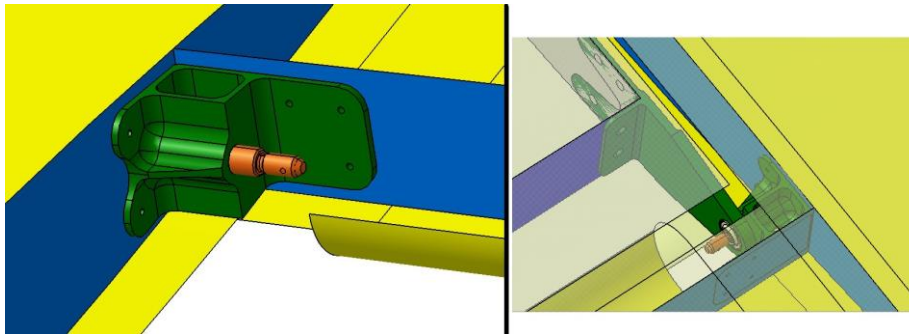
9.2. Návrh konstrukce VK

Z obr. 9.6 můžeme vidět, že konstrukce pravého výškového kormidla se skládá z potahu, nosníku a tří žebér.



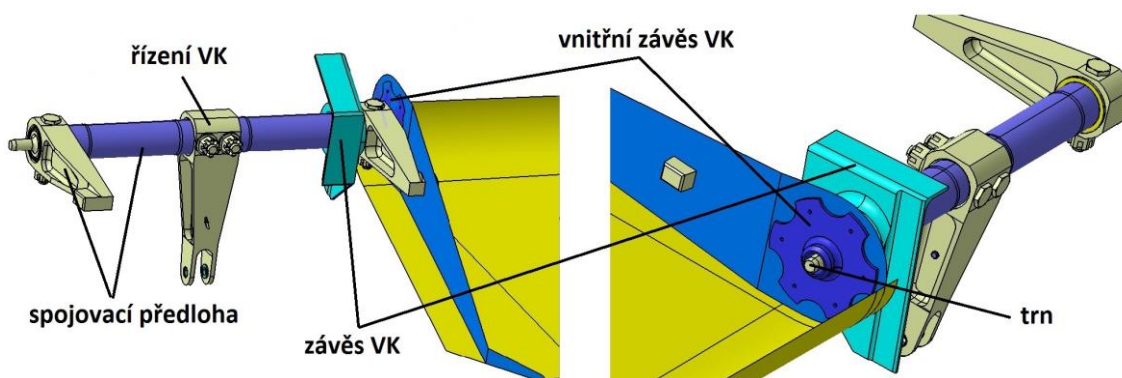
Obr. 9.8 Systémový model pravého výškového kormidla

Na koncovém žebře a nosníku je umístěn vnější závěs VK (obr. 9.9 vlevo), za pomoci kterého je VK uchyceno ke stabilizátoru (obr. 9.9 vpravo). Závěs bude připevněn šroubovými spoji. Tento závěs je opatřen vlisovaným čepem (obr. 9.9), pomocí kterého se kompletní VK usadí do kloubového ložiska na závěsu stabilizátor-VK.



Obr. 9.9 Detail vnějšího závěsu VK

Obě kormidla jsou propojena spojovací předlohou (obr. 9.10), která je vsazena do pouzder vnitřních závěsů VK a kořenového žebra. Spojovací předloha prochází závěsy VK, které jsou uchyceny ke kýlu letounu. Vnitřní závěsy VK budou připevněny šroubovými spoji na kořenová žebra.



Obr. 9.10 Detail závěsu a vnitřního závěsu VK

Návrh materiálového vrstvení jednotlivých částí VK-P je rozebráno v kapitole č. 10.

Při výrobě a kompletaci pravého výškového kormidla bude postupováno obdobným způsobem jako u stabilizátoru s několika rozdíly:

- Na koncovém žebře VK budou vyvrtány otvory pro umístění vyvažovacího závaží v podobě šroubových spojů. Určení polohy a velikosti této hmoty je obsaženo v následující podkapitole 9.2.1.
- Potah horní bude přilepen pomocí lemů a tří zámků: zámek na náběžné hraně, odtokové hraně a na rohovém odlehčení.

Zkompletované a nalakované VK bude nasazeno poměrně jednoduchým způsobem. Prakticky stačí kormidlo nasunout čepem do kloubového ložiska na vnější straně stabilizátoru (obr. 9.9) a na trn na předloze směrem k trupu (obr. 9.10). Na nalisovaný čep se pak umístí korunová matice se závlačkou, a tím je kormidlo pojištěno proti vysunutí.

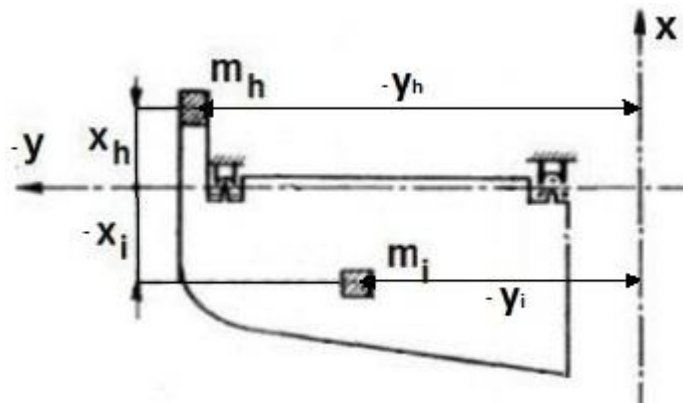
9.2.1. Hmotové vyvážení

Účel hmotového vyvažování řídicích ploch:

Křídélka, výškové a směrové kormidlo, případně pomocné vyvažovací plošky jsou zavěšeny na pevné části draku tak, že na svých závěsech mohou kývat okolo své osy otáčení. Při pohybech letounu se zrychlením, jako jsou prudké manévry, průlet turbulencí nebo při pružném rozkmitání části letounu vznikají setrvačné síly, které působením na pohyblivou řídicí plochu mohou způsobit její nežádoucí vychýlování. Vychýlené kormidlo pak vyvolá změnu aerodynamických sil a jsou-li tyto změny periodické, mohou vzniklé parazitní síly za nepříznivých okolností vyvolat samobuzené nebezpečné kmitání křídel, ocasních ploch nebo i trupu letounu. Vyvážené řídicí plochy toto nebezpečí významně snižují (nevylučují je však zcela).

Řídicí plocha vyvážená staticky obecně není současně vyvážená dynamicky, což platí i naopak. Poněvadž jako prevence proti nebezpečí aeroelastickým jevů jsou významná obě vyvážení, usilujeme o to, aby byly alespoň v nejnútnejším rozsahu splněny podmínky jak statického tak dynamického vyvážení. [7]

Při určení hmotového vyvážení bylo postupováno dle literatury [7]:



Obr. 9.11 Schéma statického a dynamického vyvážení na levém výškovém kormidle

Z obrázku 9.11 vyplývá, že y souřadnice vyvažovací hmoty a jednotlivých hmot na levém výškovém kormidle budou nabývat záporných hodnot a naopak na pravém výškovém kormidle budou nabývat kladných hodnot. Hmoty nacházející se před osou otáčení VK (osa y na obr. 9.11) budou nabývat kladných hodnot x a naopak hmoty za osou otáčení budou nabývat záporných hodnot x.

Protože je pravé výškové kormidlo propojeno s levým výškovým kormidlem spojovací předlohou, působí jako celek, a proto při určení hmotového vyvážení VK budeme postupovat dle vztahů pro současné vyvážení dvěma hmotami:

Rovnice statického vyvážení: $m_{h1} \cdot x_{h1} + m_{h2} \cdot x_{h2} + \sum_i m_i \cdot x_i = 0$

Rovnice dynamického vyvážení: $m_{h1} \cdot x_{h1} \cdot y_{h1} + m_{h2} \cdot x_{h2} \cdot y_{h2} + \sum_i m_i \cdot y_i \cdot x_i = 0$

Kde:

m_{h1}	-	hmotnost vyvažovací hmoty VK-P [g]
m_{h2}	-	hmotnost vyvažovací hmoty VK-L [g]
x_{h1}	-	vzdálenost vyvažovací hmoty VK-P od osy otáčení VK (osa y) [mm]
x_{h2}	-	vzdálenost vyvažovací hmoty VK-L od osy otáčení VK (osa y) [mm]
y_{h1}	-	vzdálenost vyvažovací hmoty VK-P od osy symetrie VK (osa x) [mm]
y_{h2}	-	vzdálenost vyvažovací hmoty VK-L od osy symetrie VK (osa x) [mm]
m_i	-	hmotnost jednotlivých hmot VK [g]
x_i	-	vzdálenost hmoty od osy otáčení VK (osa y) [mm]
y_i	-	vzdálenost hmoty od osy symetrie VK (osa x) [mm]

Z důvodu konstrukčního uspořádání, pro umístění hmotových vyvážení výškového kormidla bylo zvoleno místo na koncových žebrech VK, které se nachází ve vzdálenosti $y = 1\ 811$ mm a $x = 320$ mm pro VK-P a ve vzdálenosti $y = -1\ 805$ mm a $x = 320$ mm pro VK-L.

Z rovnice statického vyvážení vyjádříme hmotnost vývažku VK-P m_{h1} a dosadíme do rovnice dynamického vyvážení:

$$\left(\frac{-\sum_i m_i \cdot x_i - m_{h2} \cdot x_{h2}}{x_{h1}} \right) \cdot x_{h1} \cdot y_{h1} + m_{h2} \cdot x_{h2} \cdot y_{h2} + \sum_i m_i \cdot y_i \cdot x_i = 0$$

$$\left(\frac{745811 - m_{h2} \cdot 320}{320} \right) \cdot 320 \cdot 1805 + m_{h2} \cdot 320 \cdot (-1805) + 113324268 = 0$$

$$\rightarrow \quad \mathbf{m_{h2} \approx 1\ 240\ g}$$

Výslednou hmotnost vývažku m_{h2} následně dosadíme do rovnice statického vyvážení a tím zjistíme hmotnost vývažku VK-P m_{h1} :

$$\mathbf{m_{h1} \approx 1\ 100\ g}$$

Podrobný výpočet hmotového vyvážení je obsažen v příloze č. 5.

Vývažek na levém výškovém kormidle vyšel o 140 g těžší, protože levé kormidlo má větší konstrukční hmotnost (flettner + servo a jeho zástavba v konstrukci).

Souhrn výsledků:

	m [g]	x [mm]	y [mm]
vývažek VK-P	1 100	320	1 805
vývažek VK-L	1 240	320	-1 805

Tab. 8.1 Souhrn výsledků hmotového vyvážení VK

Z výsledků vyplývá, že na levé výškové kormidlo musíme umístit vyvažovací hmotu o velikosti 1 240 g a na pravé výškové kormidlo hmotu o velikosti 1100 g v podobě šroubovaných závaží. Po kompletaci a nástřiku se kormidla dovyváží za pomoci přidavných plíšků, které také budou vhodně umístěny na koncových žebrech.

Podle CS 23.659: [1]

Nosná konstrukce a připevnění koncentrovaných závaží hmotového vyvážení použité u řídicích ploch musí být navrženy pro:

- a) 24 g kolmo k rovině řídicí plochy;
- b) 12 g dopředu a dozadu; a
- c) 12 g rovnoběžně s osou závěsu.

Z uvedeného vyplývá, že pravé výškové kormidlo bude podrobena pevnostní kontrole pro nekritičtější případ zatížení od hmotového vyvážení, a to: 24 g kolmo k rovině řídicí plochy. Tato vzniklá síla od hmotového vyvážení bude umístěna na koncovém žeburu ve vzdálenosti 320 mm od osy otáčení kormidla a bude mít velikost:

$$F = 24 \cdot g \cdot m_{h1} \cdot f = 24 \cdot 9,81 \cdot 1,1 \cdot 1,5 = \mathbf{389 \text{ N}}$$

Kde: g - gravitační zrychlení [m/s²]
m_{h1} - hmotnost vyvažovací hmoty VK-P [kg]
f - součinitel bezpečnosti [-]

10. Návrh vrstvení VOP

10.1. Použité materiály

Pro návrh VOP jsou uvažovány vláknové kompozitní materiály vyztužené uhlíkovými vlákny s polymerní (epoxidovou) matricí. Z důvodu technologie výroby je první vrstva tvořena ze skleněné keprové tkaniny Interglas 92071. Z uhlíkových vrstev byly zvoleny keprové tkaniny Interglas 98121, 98131, 98141 a jednosměrná tkanina Interglas 98340. V tab. 10.1 jsou uvedeny materiálové vlastnosti těchto vrstev. Za předpokladu použití technologie mokré laminace při výrobě kompozitů bude počítáno s objemovým podílem vláken 35%.

		Interglas				
		92071	98340	98121	98131	98141
materiál		sklo	uhlík	uhlík	uhlík	uhlík
typ tkaniny		kepr	jednosměrný	kepr	kepr	kepr
q tkaniny (suché)	[g/m ²]	80	170	90	163	200
objemový podíl vláken	[%]	35	35	35	35	35
tloušťka prosycené vrstvy	[mm]	0,088	0,21	0,15	0,26	0,32
hmotnost prosycené vrstvy	[g/m ²]	143	287	197	347	434
E ₁	[MPa]	16600	77000	39470	39470	39470
E ₂	[MPa]	16600	3400	39470	39470	39470
μ	[1]	0,2	0,28	0,037	0,037	0,037
G ₁₂	[MPa]	3800	2870	1620	1620	1620
G ₂₃	[MPa]	1818	2870	1620	1620	1620
G ₁₃	[MPa]	1818	2870	1620	1620	1620
σ _{Pt1}	[MPa]	95	420	146	146	146
σ _{Pt2}	[MPa]	95	50	146	146	146
σ _{Pd1}	[MPa]	95	420	146	146	146
σ _{Pd2}	[MPa]	95	200	146	146	146
τ _{P12}	[MPa]	50	100	100	100	100

Tab. 10.1 Materiálové vlastnosti skleněné a uhlíkových vrstev [6]

Téměř celá konstrukce je navrhována z kompozitních materiálů sendvičového typu. Použití lehkého jádra výrazně zvyšuje ohybovou tuhost kompozitu při malém nárůstu hmotnosti. Jako materiál jádra sendvičů je zvolena pěna Airex C70.75 s materiálovými vlastnostmi uvedenými v tab. 10.2.

Airex C70.75		
ρ	[kg/m ³]	80
E	[MPa]	66
μ	[1]	0,1
G	[MPa]	30
σ_{Pt}	[MPa]	2
σ_{Pd}	[MPa]	1,45
τ_p	[MPa]	1,2

Tab. 10.2 Materiálové vlastnosti pěny Airex C70.75 [7]

V místech konstrukce, kde je vysoká intenzita zatížení, jako například v místě uchycení stabilizátoru k trupu nebo uchycení VK ke stabilizátoru, bylo nutno použít jádro s mnohem vyššími pevnostními charakteristikami, zejména pevností ve smyku a tlaku. Z důvodu dostupných dat k potřebným pevnostním kontrolám, byla zvolena dubová překližka. Materiálové charakteristiky dubové překližky jsou uvedeny v tab. 10.3. V případě sériové výroby může být překližka nahrazena deskou příslušné tloušťky z uhlíkového kompozitu s kvazitropní skladbou. Tyto desky jsou dostupné na trhu nebo vyrobitelné na zakázku.

Dubová překližka		
ρ	[kg/m ³]	800
E_1	[MPa]	10000
E_2	[MPa]	10000
μ	[1]	0,35
G_{12}	[MPa]	1000
G_{23}	[MPa]	600
G_{13}	[MPa]	600
σ_{Pt1}	[MPa]	75
σ_{Pt2}	[MPa]	75
σ_{Pd1}	[MPa]	55
σ_{Pd2}	[MPa]	55
τ_{P12}	[MPa]	18

Tab. 10.3 Materiálové vlastnosti dubové překližky [7]

10.2. Návrh vrstvení stabilizátoru VOP

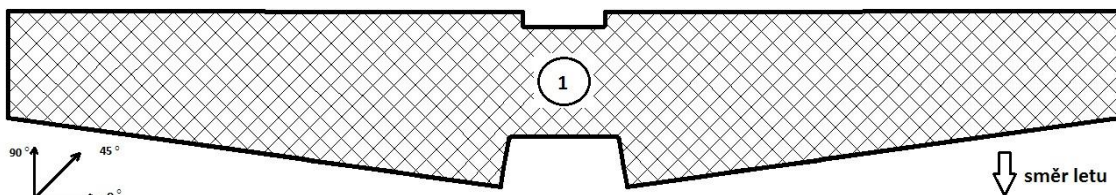
Vrstvy jsou vždy uvedeny v pořadí, v jakém jsou kladeny do negativní formy. Potah horní a dolní je totožný. Plochy vrstev u žeber a nosníku jsou uvedeny včetně lemů.

10.2.1. Potah

POTAH								
vrstva č.	počet vrstev	S [m ²]	mat.	t [mm]	tkanina/jádro	orientace [°]	epoxid [g/m ²]	m [g]
1	1	1,601	92071	0.088	80 g/m ²	± 45	63	228,943
2	1	1,601	98131	0.26	163 g/m ²	± 45	184	555,547
3,4,5	3	0,064	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	83,328
6,7,8	3	0,031	98141	0,32	200 g/m ²	± 45	234	40,362
9	1	1,129	C70.75	5	80 kg/m ³	-	-	451,6
10	1	1,601	98121	0.15	90 g/m ²	± 45	107	315,397
11	1	0,064	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	27,776
12,13	2	0,178	98340	0.21	170 g/m ²	0	117	102,172
14,15,16	3	0,117	98340	0.21	170 g/m ²	0	117	100,737
17,18,19,2	4	0,09	98340	0.21	170 g/m ²	0	117	103,32
21,22	2	0,08	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	69,44
celkem (potah horní + dolní)								4157,244

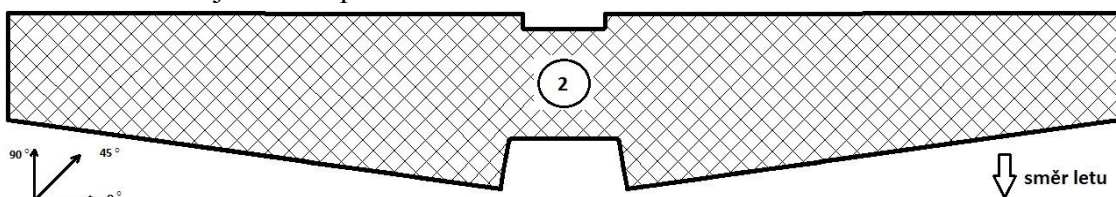
Tab. 10.4 Vrstvení potahu stabilizátoru

Vrstva č. 1 – vnější technologická vrstva potahu ze skleněné keprové tkaniny



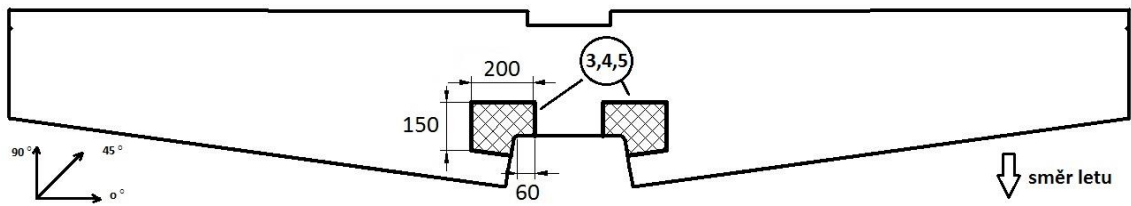
Obr. 10.1 Vrstvení potahu stabilizátoru - vrstva č. 1

Vrstva č. 2 – vnější vrstva potahu



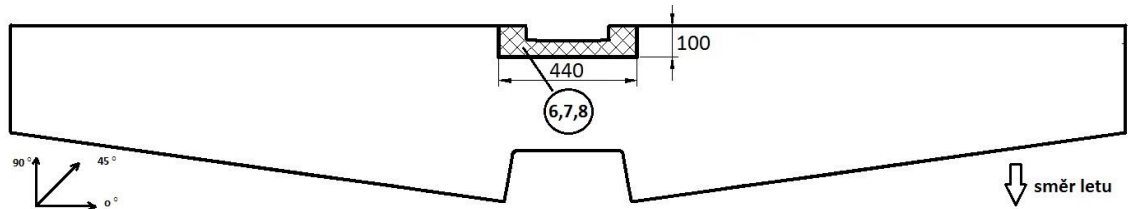
Obr. 10.2 Vrstvení potahu stabilizátoru - vrstva č. 2

Vrstvy č. 3, 4 a 5 – přední výztuhy potahu – vrstvy č. 4 a 5 se postupně zužují o 30 mm na každé straně (tzn. vrstva č. 4 – 120 x 170, vrstva č. 5 – 90 x 140)



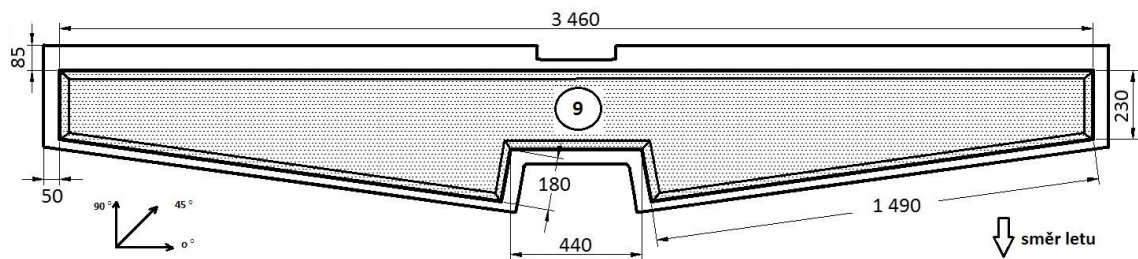
Obr. 10.3 Vrstvení potahu stabilizátoru – přední výztuhy, vrstvy č. 3, 4, 5

Vrstvy č. 6, 7 a 8 – zadní výztuhy potahu – vrstvy č. 7 a 8 se postupně zužují o 20 mm na každé straně



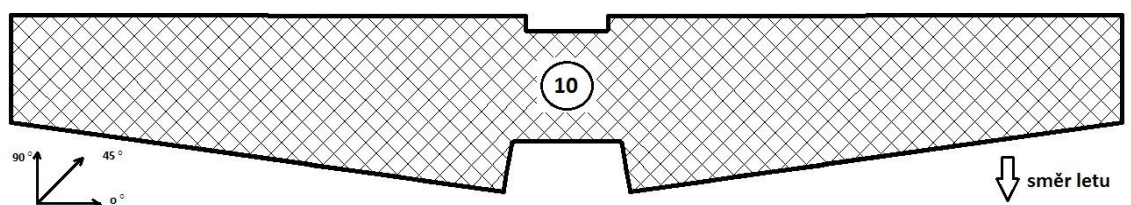
Obr. 10.4 Vrstvení potahu stabilizátoru – zadní výztuhy, vrstvy č. 6, 7, 8

Vrstva č. 9 – jádro potahu – okraje jádra jsou seříznuty pod úhlem 50°



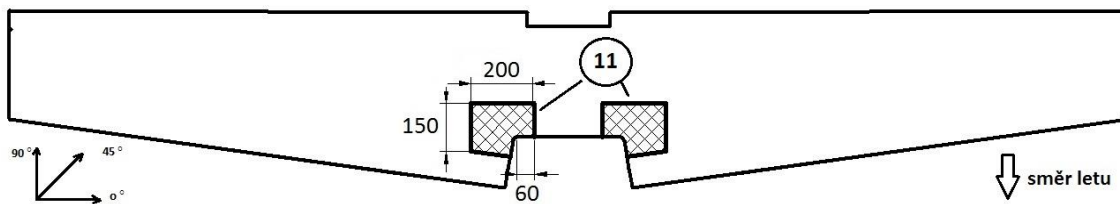
Obr. 10.5 Vrstvení potahu stabilizátoru – jádro, vrstva č. 9

Vrstva č. 10 – závěrná vrstva jádra



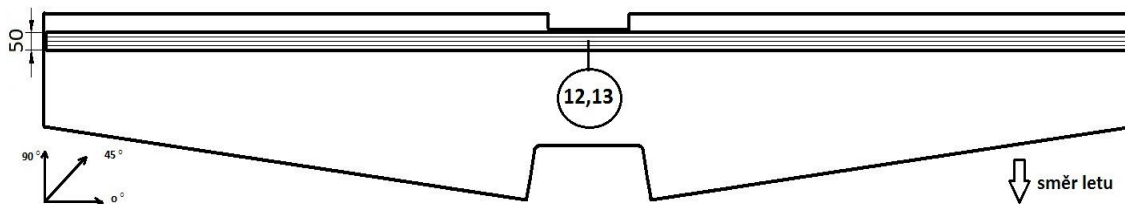
Obr. 10.6 Vrstvení potahu stabilizátoru – závěrná vrstva jádra, vrstva č. 10

Vrstva č. 11 – přední výztuha potahu



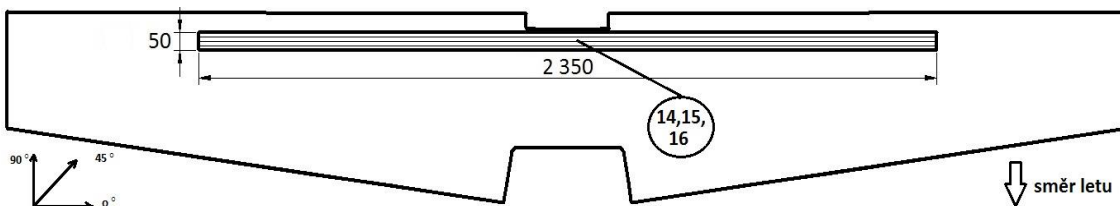
Obr. 10.7 Vrstvení potahu stabilizátoru – přední výztuha, vrstva č. 11

Vrstvy č. 12 a 13 – zadní pásnice



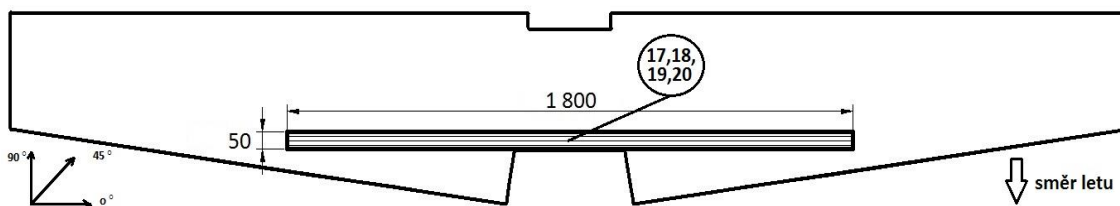
Obr. 10.8 Vrstvení potahu stabilizátoru – zadní pásnice, vrstvy č. 12, 13

Vrstvy č. 14, 15 a 16 – zadní pásnice



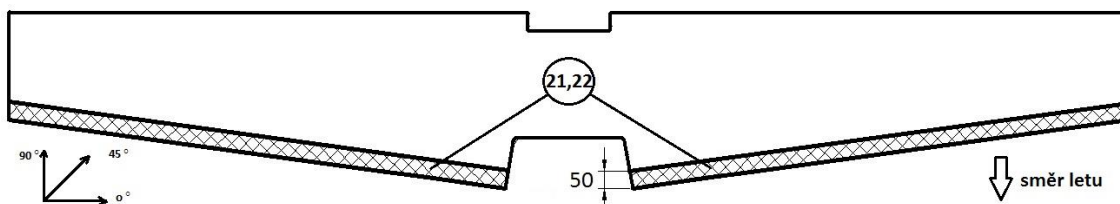
Obr. 10.9 Vrstvení potahu stabilizátoru – zadní pásnice, vrstvy č. 14, 15, 16

Vrstvy č. 17, 18, 19 a 20 – přední pásnice



Obr. 10.10 Vrstvení potah stabilizátoru – přední pásnice, vrstvy č. 17, 18, 19, 20

Vrstvy č. 21 a 22 – zámek náběžné hrany stabilizátoru



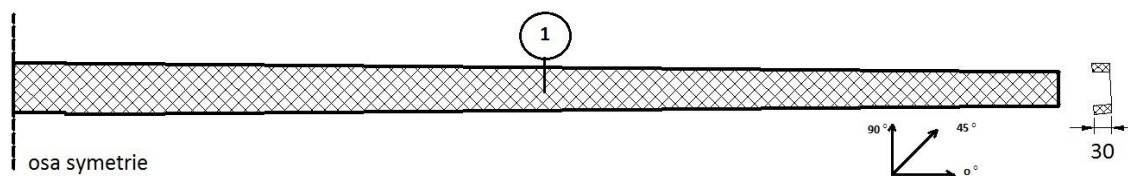
Obr. 10.11 Vrstvení potahu stabilizátoru – zámek náběžné hrany, vrstvy č. 21, 22

10.2.2. Zadní (hlavní) nosník

ZADNÍ (HLAVNÍ) NOSNÍK								
vrstva č.	počet vrstev	S [m ²]	mat.	t [mm]	tkanina/jádro	orientace [°]	epoxid [g/m ²]	m [g]
1	1	0,46	98131	0.26	163 g/m ²	± 45	184	159,62
2,3	2	0,053	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	46,004
4	1	0,226	C70.75	3	80 kg/m ³	-	-	54,24
4	1	0,02	překližka	3	800 kg/m ³	-	-	48
5	1	0,46	98131	0.26	163 g/m ²	± 45	184	159,62
6,7	2	0,053	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	46,004
celkem								513,488

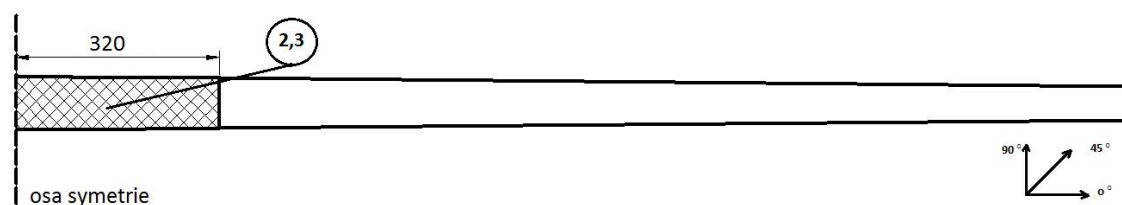
Tab. 10.5 Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru

Vrstva č. 1 – vnější vrstva zadního nosníku



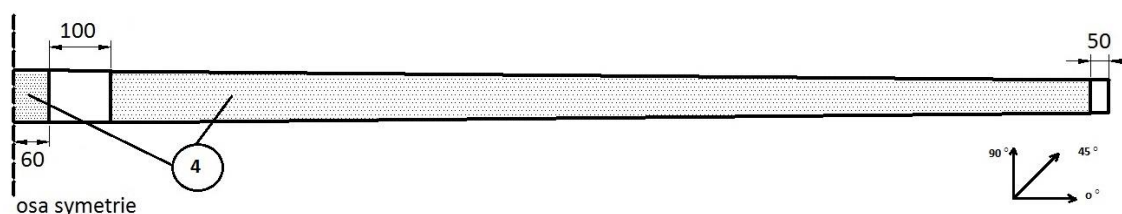
Obr. 10.12 Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru - vrstva č. 1

Vrstvy č. 2 a 3 – výztuhy zadního nosníku



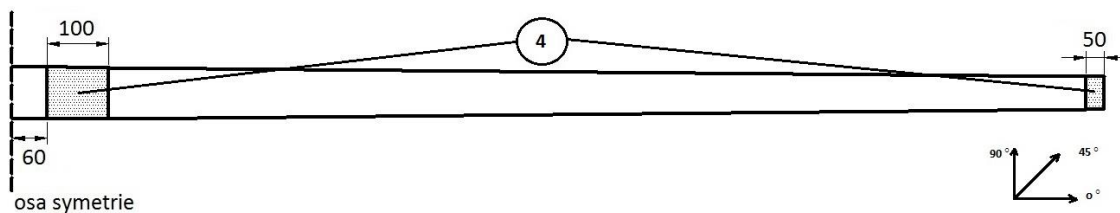
Obr. 10.13 Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru - výztuhy, vrstvy č. 2, 3

Vrstva č. 4 – jádro zadního nosníku – pěna Airex C70.75



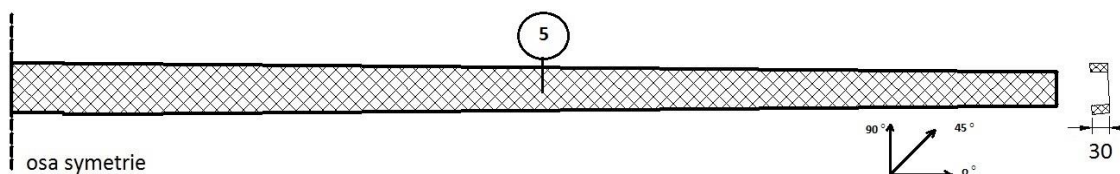
Obr. 10.14 Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru – jádro – Airex C70.75, vrstva č. 4

Vrstva č. 4 – jádro zadního nosníku – dubová překližka (místa uchycení závěsů)



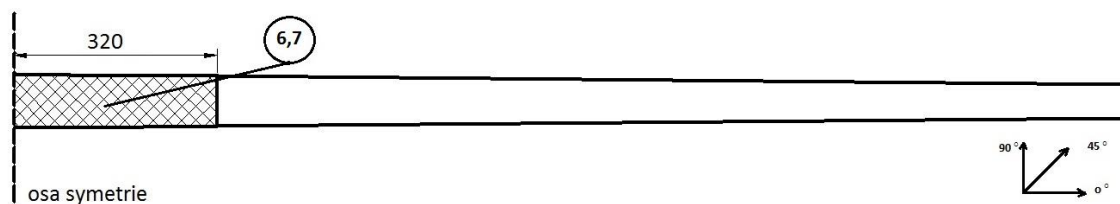
Obr. 10.15 Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru – jádro - překližka, vrstva č. 4

Vrstva č. 5 – závěrná vrstva jádra zadního nosníku



Obr. 10.16 Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru – závěrná vrstva jádra, vrstva č. 5

Vrstvy č. 6 a 7 – výztuhy zadního nosníku



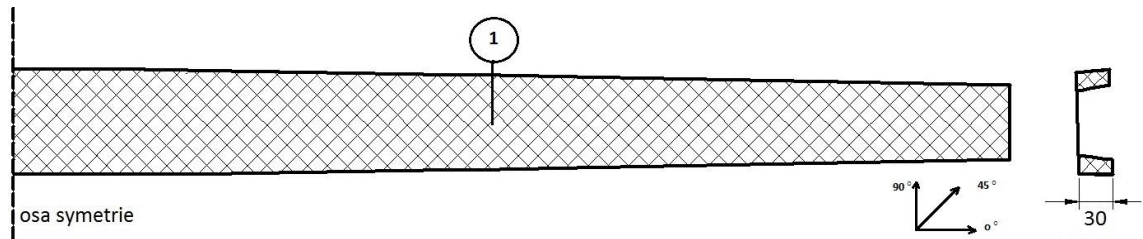
Obr. 10.17 Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru - výztuhy, vrstvy č. 6, 7

10.2.3. Přední nosník

PŘEDNÍ NOSNÍK								
vrstva č.	počet vrstev	S [m ²]	mat.	t [mm]	tkanina/jádro	orientace [°]	epoxid [g/m ²]	m [g]
1	1	0,248	98131	0.26	163 g/m ²	± 45	184	86,056
2,3,4	2	0,057	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	74,214
5	1	0,124	C70.75	3	80 kg/m ³	-	-	29,76
5	1	0,016	překližka	3	800 kg/m ³	-	-	38,4
6	1	0,248	98131	0.26	163 g/m ²	± 45	184	86,056
7,8,9	2	0,057	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	74,214
celkem								388,7

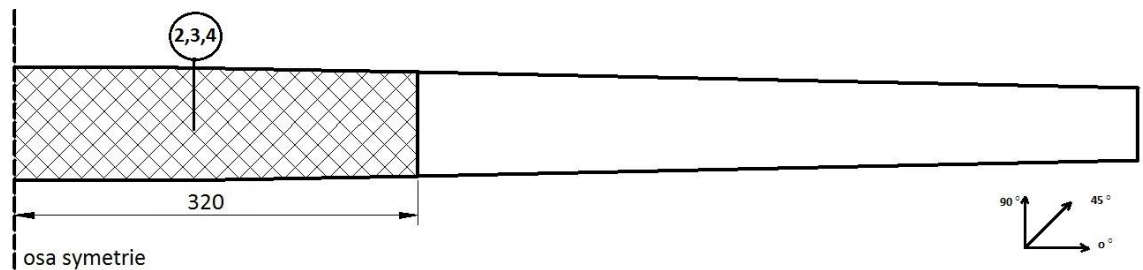
Tab. 10.6 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru

Vrstva č. 1 – vnější vrstva předního nosníku



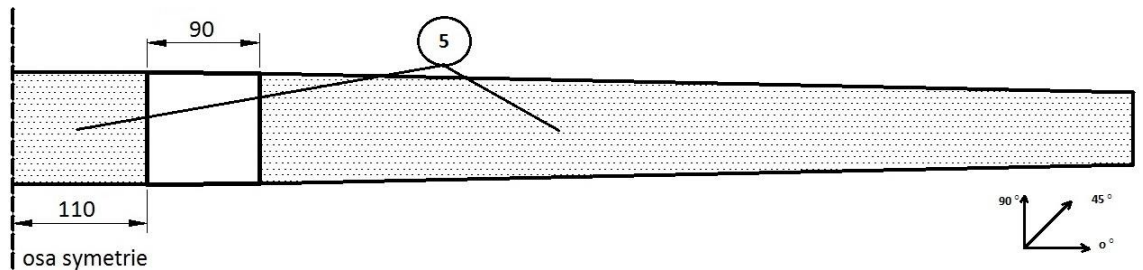
Obr. 10.18 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru - vrstva č. 1

Vrstvy č. 2, 3 a 4 – výztuhy předního nosníku



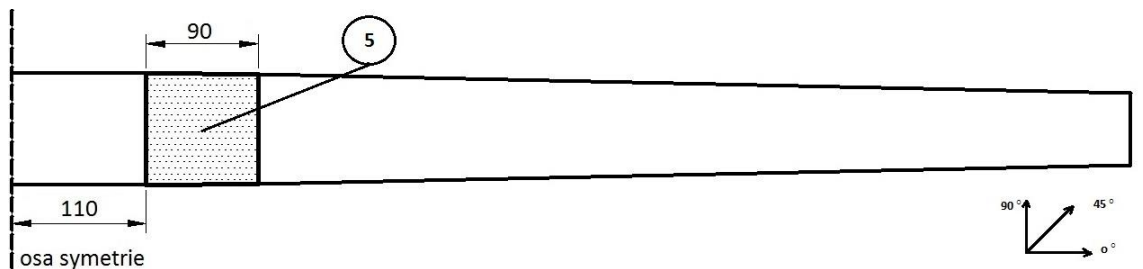
Obr. 10.19 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru - výztuhy, vrstvy č. 2, 3, 4

Vrstva č. 5 – jádro předního nosníku – pěna Airex C70.75



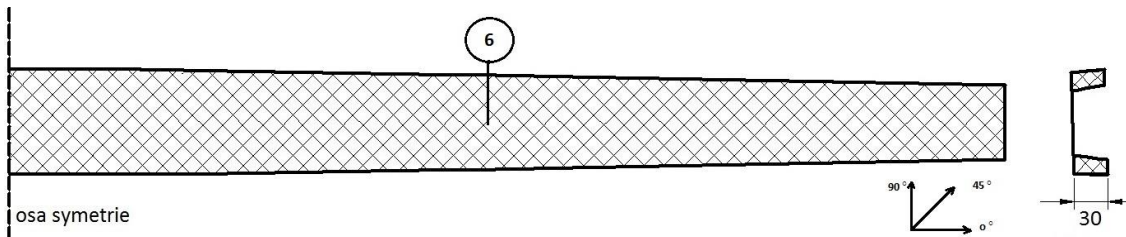
Obr. 10.20 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru – jádro - Airex C70.75, vrstva č. 5

Vrstva č. 5 – jádro předního nosníku – dubová překližka (místa uchycení závěsů)



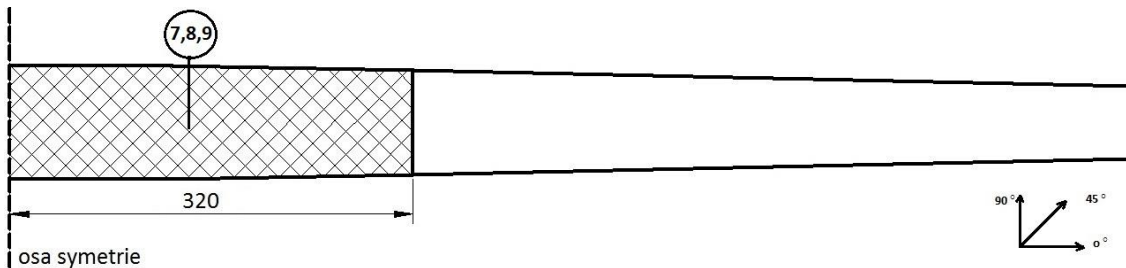
Obr. 10.21 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru – jádro - překližka, vrstva č. 5

Vrstva č. 6 – závěrná vrstva jádra předního nosníku



Obr. 10.22 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru – závěrná vrstva jádra, vrstva č. 6

Vrstvy č. 7, 8 a 9 – výztuhy předního nosníku



Obr. 10.23 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru – výztuhy, vrstvy č. 7, 8, 9

10.2.4. Žebro kořenové přední

ŽEBRO KOŘENOVÉ PŘEDNÍ								
vrstva č.	počet vrstev	S [m ²]	mat.	t [mm]	tkanina [g/m ²]	orientace [°]	epoxid [g/m ²]	m [g]
1,2,3,4	4	0,036	98131	0.26	163	± 45	184	49,968
celkem								49,968

Tab. 10.7 Vrstvení předního kořenového žebra stabilizátoru

10.2.5. Žebro kořenové zadní

ŽEBRO KOŘENOVÉ ZADNÍ								
vrstva č.	počet vrstev	S [m ²]	mat.	t [mm]	tkanina [g/m ²]	orientace [°]	epoxid [g/m ²]	m [g]
1,2,3,4	4	0,104	98131	0.26	163	± 45	184	144,352
celkem								144,352

Tab. 10.8 Vrstvení zadního kořenového žebra stabilizátoru

10.2.6. Žebro středové

ŽEBRO STŘEDOVÉ								
vrstva č.	počet vrstev	S [m2]	mat.	t [mm]	tkanina [g/m2]	orientace [°]	epoxid [g/m2]	m [g]
1,2,3,4	4	0,104	98131	0.26	163	± 45	184	144,352
celkem								144,352

Tab. 10.9 Vrstvení středového žebra stabilizátoru

10.2.7. Žebro koncové

ŽEBRO KONCOVÉ								
vrstva č.	počet vrstev	S [m2]	mat.	t [mm]	tkanina [g/m2]	orientace [°]	epoxid [g/m2]	m [g]
1,2,3,4	6	0,064	98131	0.26	163	± 45	184	133,248
celkem								133,248

Tab. 10.10 Vrstvení koncového žebra stabilizátoru

10.3. Návrh vrstvení pravého výškového kormidla VOP

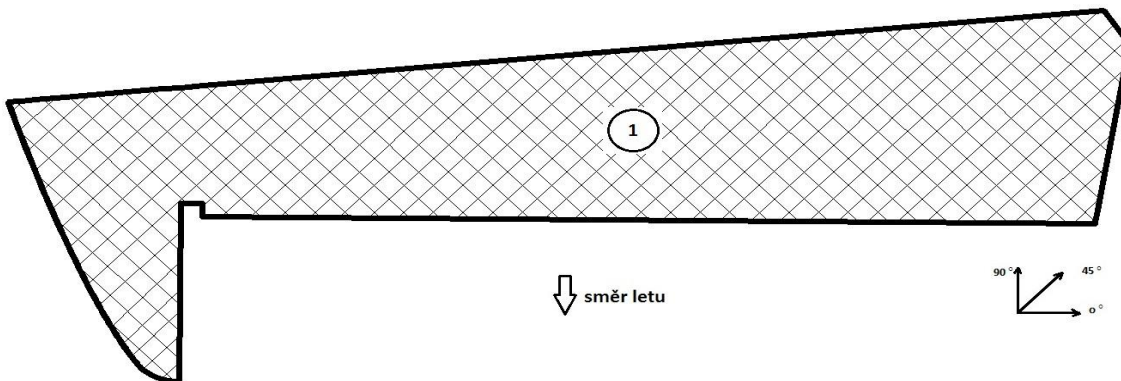
Vrstvy jsou vždy uvedeny v pořadí, v jakém jsou kladeny do formy. Potah horní a dolní je totožný. Plochy vrstev u žebor a nosníku jsou uvedeny včetně lemů.

10.3.1. Potah

POTAH								
vrstva č.	počet vrstev	S [m2]	mat.	t [mm]	tkanina/jádro	orientace [°]	epoxid [g/m2]	m [g]
1	1	0,734	92071	0.088	80 g/m ²	± 45	63	104,962
2	1	0,734	98131	0.26	163 g/m ²	± 45	184	254,698
3,4	2	0,017	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	14,756
5	1	0,449	C70.75	3	80 kg/m ³	-	-	107,76
6	1	0,734	98121	0.15	90 g/m ²	± 45	107	144,598
7,8,9	3	0,084	98340	0.21	170 g/m ²	0	117	72,324
10,11	2	0,078	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	67,704
12,13	2	0,08	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	69,44
14,15	2	0,05	98141	0.32	200 g/m ²	± 45	234	43,4
celkem (potah horní + dolní)								1759,284

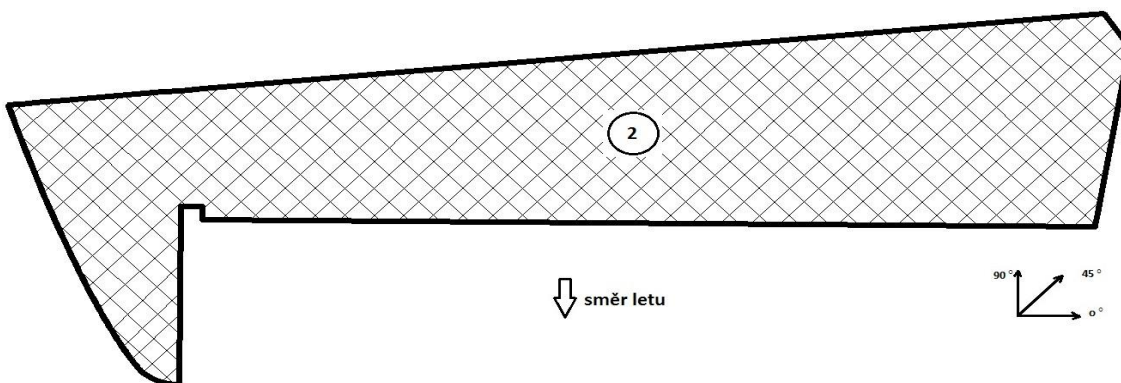
Tab. 10.11 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla

Vrstva č. 1 - vnější technologická vrstva potahu ze skleněné keprové tkaniny



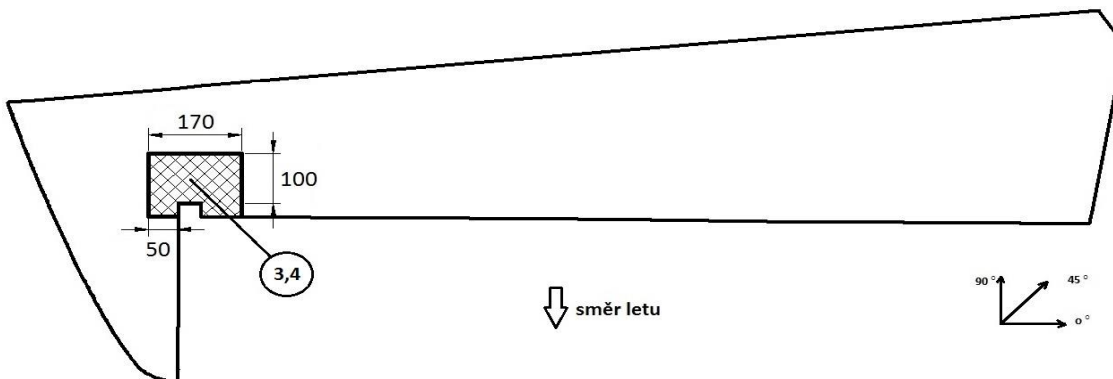
Obr. 10.24 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla - vrstva č. 1

Vrstva č. 2 – vnější vrstva potahu



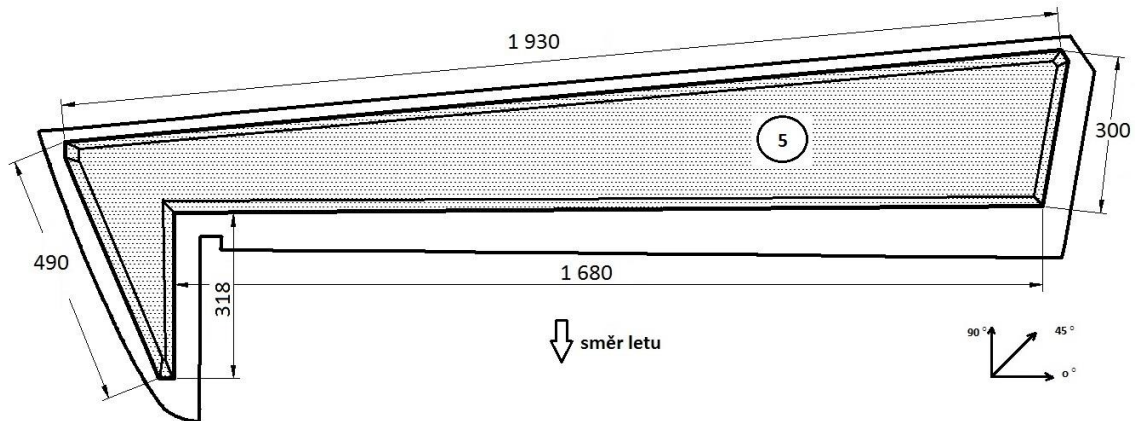
Obr. 10.25 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla - vrstva č. 2

Vrstvy č. 3 a 4 – výztuhy potahu



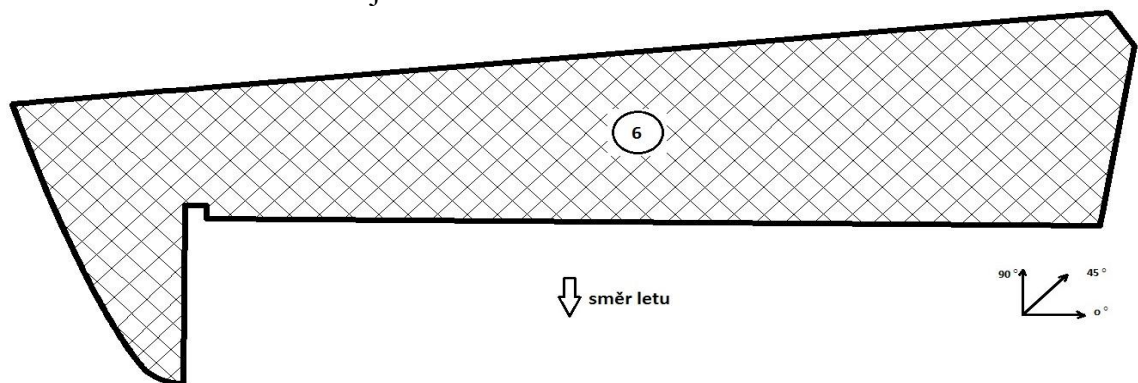
Obr. 10.26 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla - výztuhy, vrstvy č. 3, 4

Vrstva č. 5 – jádro potahu - okraje jádra jsou seříznuty pod úhlem 50°



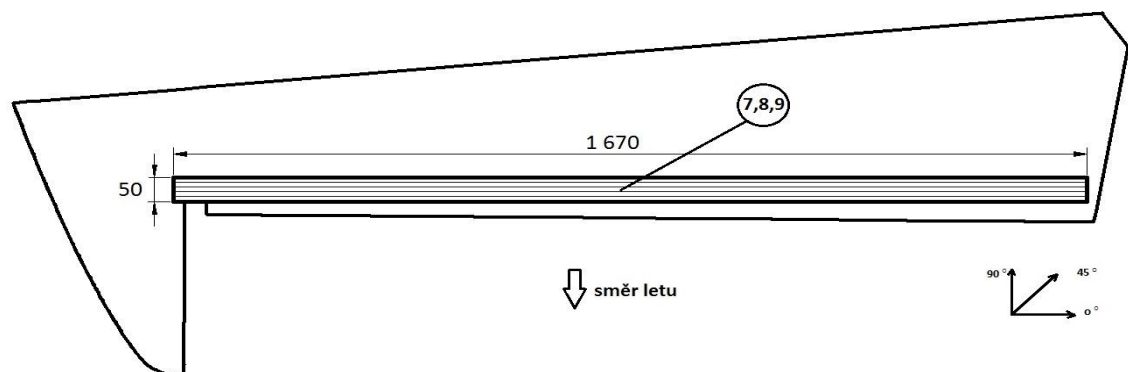
Obr. 10.27 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla – jádro – Airex C70.75, vrstva č. 5

Vrstva č. 6 – závěrná vrstva jádra



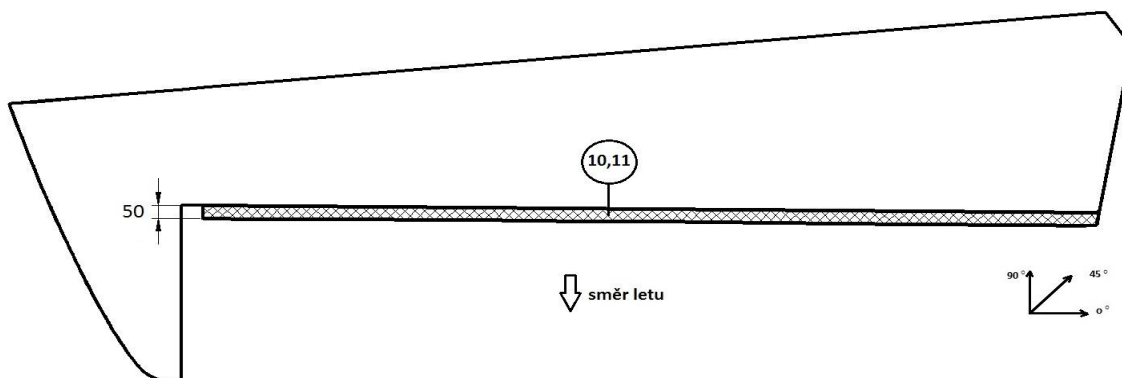
Obr. 10.28 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla – závěrná vrstva jádra, vrstva č. 6

Vrstvy č. 7,8 a 9 – pásnice



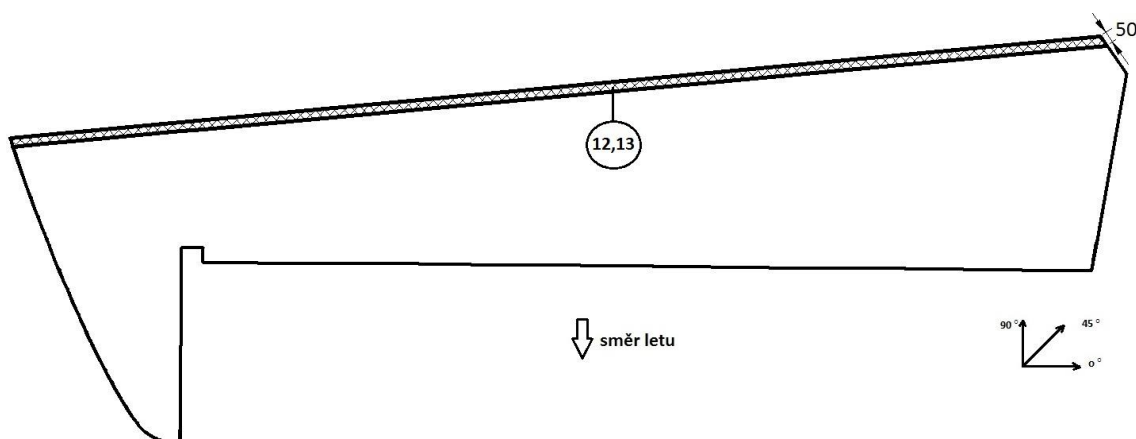
Obr. 10.29 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla - pásnice, vrstvy č. 7, 8, 9

Vrstvy č. 10 a 11 – zámek náběžné hrany VK-P



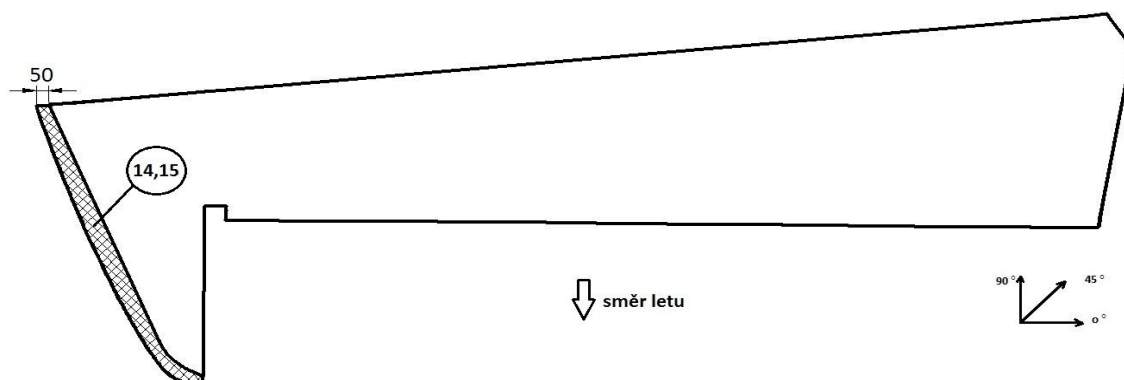
Obr. 10.30 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla – zámek náběžné hrany, vrstvy č. 10, 11

Vrstvy č. 12 a 13 – zámek odtokové hrany VK-P



Obr. 10.31 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla – zámek odtokové hrany, vrstvy č. 12, 13

Vrstvy č. 14 a 15 – zámek rohového odlehčení VK-P



Obr. 10.32 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla – zámek roh. odlehčení, vrstvy č. 14, 15

10.3.2. Nosník

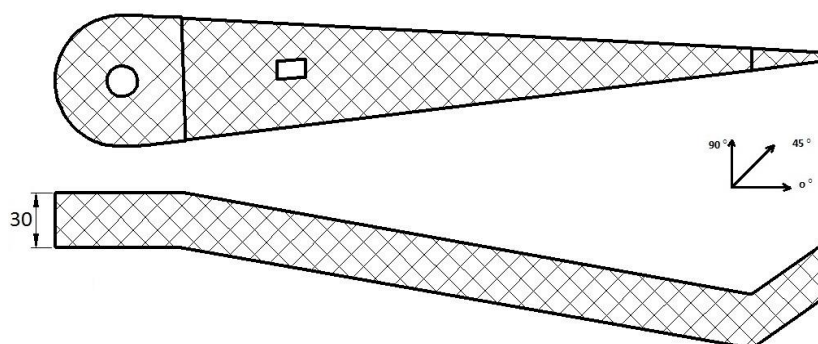
NOSNÍK								
vrstva č.	počet vrstev	S [m2]	mat.	t [mm]	tkanina [g/m2]	orientace [°]	epoxid [g/m2]	m [g]
1,2,3,4,5,6	6	0,023	98131	0.26	163	± 45	184	47,886
celkem								47,886

Tab. 10.12 Vrstvení nosníku pravého výškového kormidla

10.3.3. Žebro kořenové

ŽEBRO KOŘENOVÉ								
vrstva č.	počet vrstev	S [m2]	mat.	t [mm]	tkanina [g/m2]	orientace [°]	epoxid [g/m2]	m [g]
1,2,3,4,5,6	6	0,044	98131	0.26	163	± 45	184	91,608
celkem								91,608

Tab. 10.13 Vrstvení kořenového žebra pravého výškového kormidla



Obr. 10.33 Vrstvení kořenového žebra pravého výškového kormidla, vrstvy č. 1, 2, 3, 4, 5, 6

10.3.4. Žebro středové

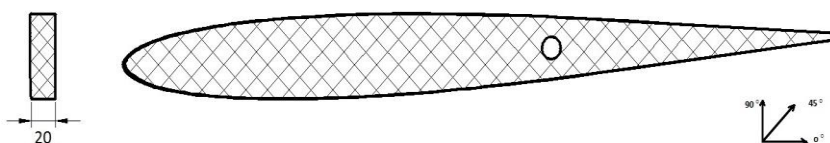
ŽEBRO STŘEDOVÉ								
vrstva č.	počet vrstev	S [m2]	mat.	t [mm]	tkanina [g/m2]	orientace [°]	epoxid [g/m2]	m [g]
1,2,3,4	4	0,034	98131	0.26	163	± 45	184	47,192
celkem								47,192

Tab. 10.14 Vrstvení středového žebra pravého výškového kormidla

10.3.5. Žebro koncové

ŽEBRO KONCOVÉ								
vrstva č.	počet vrstev	S [m ²]	mat.	t [mm]	tkanina [g/m ²]	orientace [°]	epoxid [g/m ²]	m [g]
1,2,3,4,5,6	6	0,047	98131	0.26	163	± 45	184	97,854
celkem								97,854

Tab. 10.15 Vrstvení koncového žebra pravého výškového kormidla



Obr. 10.34 Vrstvení koncového žebra pravého výškového kormidla, vrstvy č. 1, 2, 3, 4, 5, 6

11. Hmotnostní rozbor VOP

Plochy jednotlivých konstrukčních částí stabilizátoru a pravého výškového kormidla včetně lemů pro lepené spoje byly stanoveny za pomoci programu CATIA. Pomocí programu Microsoft Excel a gramáže prosycených jednotlivých vrstev (tabulka 10.1 až 10.3) byla vypočtena hmotnost stabilizátoru a pravého výškového kormidla VOP. Hmotnost levého výškového kormidla byla stanovena na základě odhadovaných hmotností konstrukčních částí dle pravého výškového kormidla, ke kterým byla připočtena odhadovaná hmotnost flettneru, servo mechanismu flettneru a jeho náhonu.

11.1. Hmotnost stabilizátoru

stabilizátor				
	S [m²]	t [mm]	ρ [g/cm³]	m [g]
lepené spoje	0,49	2	1,3	1274
barva	3,32	160 g/m ²		531,2

Tab. 11.1 Hmotnost lepených spojů a nátěru stabilizátoru

Celková hmotnost stabilizátoru		
část	hmotnost [g]	hmotnost [kg]
potah	4157,244	4,157
zadní (hlavní) nosník	513,488	0,495
přední nosník	388,700	0,319
žebra kořenová přední	99,936	0,100
žebra kořenová zadní	288,704	0,289
žebra středová	288,704	0,289
žebra koncová	266,496	0,266
závěsy STAB-trup	304,032	0,304
závěsy STAB-VK	178,762	0,179
lepené spoje	1274,000	1,274
barva	531,200	0,531
Celkem	8291,266	8,291

Tab. 11.2 Celková hmotnost stabilizátoru

11.2. Hmotnost VK-P

VK-P				
	S [m2]	t [mm]	ρ [g/cm3]	m [g]
lepené spoje	0,282	2	1,3	733,2
barva	1,92	160 g/m2		307,2

Tab. 11.3 Hmotnost lepených spojů a nátěru VK-P

Celková hmotnost VK-P		
část	hmotnost [g]	hmotnost [kg]
potah	1759,284	1,759
nosník	47,886	0,048
žebro kořenové	91,608	0,092
žebro středové	47,192	0,047
žebro koncové	97,854	0,098
hmotové vyvážení	1100	1,1
závěs VK-STAB	34,667	0,035
závěs VK-vnitřní	23,994	0,024
lepené spoje	733,200	0,733
barva	307,200	0,307
Celkem	4242,884	4,243

Tab. 11.4 Celková hmotnost VK-P

11.3. Hmotnost VK-L – odhad

Odhad hmotnosti VK-L		
část	hmotnost [g]	hmotnost [kg]
VK-L	2043,824	2,044
hmotové vyvážení	1240	1,24
flettner	500,000	0,500
servo flettneru a jeho náhon	800,000	0,800
závěs VK-vnější	34,667	0,035
závěs VK-vnitřní	23,994	0,024
lepené spoje	800	0,8
barva	307,200	0,307
Celkem	5749,684	5,750

Tab. 11.5 Odhad hmotnosti VK-L

11.4. Celková hmotnost VOP

Celková hmotnost VOP		
část	hmotnost [g]	hmotnost [kg]
stabilizátor	8291,266	8,291
VK-P	4242,884	4,243
VK-L odhad	5749,684	5,750
celkem	18283,835	18,284

Tab. 11.6 Celková hmotnost VOP

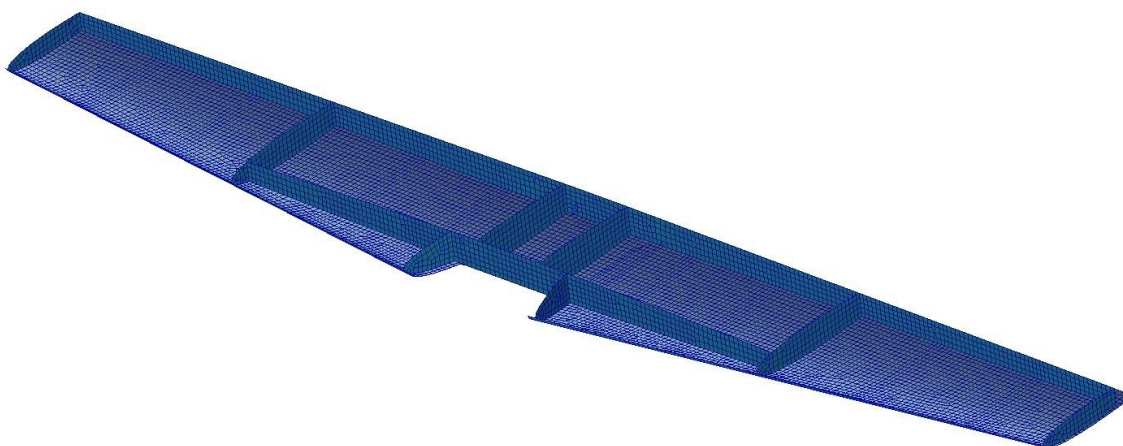
Z výsledné vypočítané hmotnosti 18,3 kg kompozitní konstrukce VOP vyplývá, že její celková hmotnost je oproti stávající kovové VOP (asi 23,15 kg) lehčí zhruba o **3,85 kg**.

12. Pevnostní kontrola

Pevnostní kontrola bude provedena za pomoci programů MSC Patran/Nastran a COMPOST. Předtím, než se stabilizátor a pravé výškové kormidlo podrobí pevnostní kontrole, je zapotřebí vymodelovat MKP modely těchto konstrukcí.

Síť MKP modelu stabilizátoru a pravého výškového kormidla byla vytvořena v modulu Advanced Meshing Tools programem CATIA. Je tvořena z plošných trojúhelníkových a čtyřúhelníkových elementů (TRI3 a QUAD4). Globální velikost elementů byla zvolena 15 mm. Následně byly odděleně importovány kompletní sítě stabilizátoru a pravého výškového kormidla do pre/post-processoru MSC Patran.

12.1. MKP model stabilizátoru

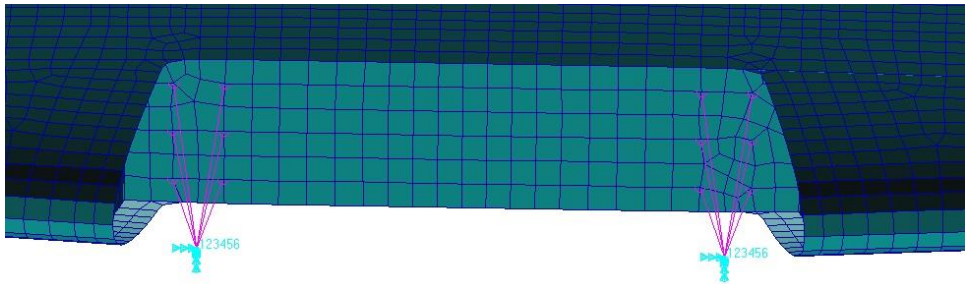


Obr. 12.1 MKP síť stabilizátoru

K provedení MKP výpočtu je nezbytné, aby všechny elementy modelu měly definované své vlastnosti podle příslušného vrstvení kompozitního materiálu. Za pomoci modulu Laminate Modeler bylo definováno vrstvení na všech částech modelu, jak je uvedeno v kapitole 10.2. Materiálový model uhlíkových a skleněných vrstev a dubové překližky byl zvolen jako lineárně elastický 2D ortotropní. Materiálový model pěny AIREX C70.75 byl zvolen jako izotropní.

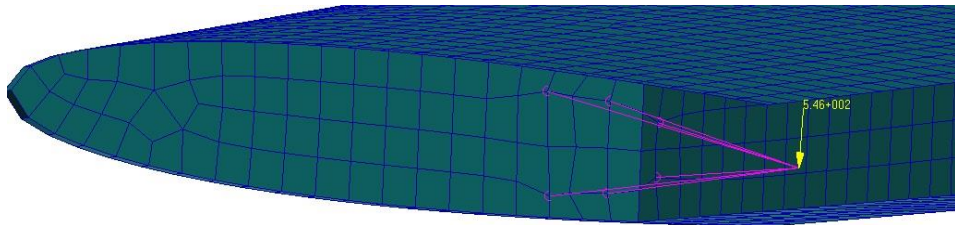
Stabilizátor je uchycen k trupu za pomoci čtyř závěsů (dva jsou přichyceny k přednímu nosníku a dva k zadnímu nosníku). Toto vetknutí bylo vytvořeno pomocí MPC prvků typu RBE2. Jsou odebrány všechny stupně volnosti (obr. 12.2).

Rozdíl mezi RBE 2 prvky a RBE 3 prvky je podstatný. Prvky RBE 3 rozvádí zavedené síly do jednotlivých uzlů, které působí nerovnoměrně rozloženými silami k uchyceným elementům a okolním elementům. Obecně řečeno elementy chycené těmito uzly jsou tahány jednotlivě směrem působící zavedené síly, která je rozdělena rovnoměrně do všech uzlů tohoto prvku. Naopak RBE 2 prvky působí na všechny chycené elementy jako jeden vyztužený celek. RBE 2 prvky se používají převážně při modelování závěsů.



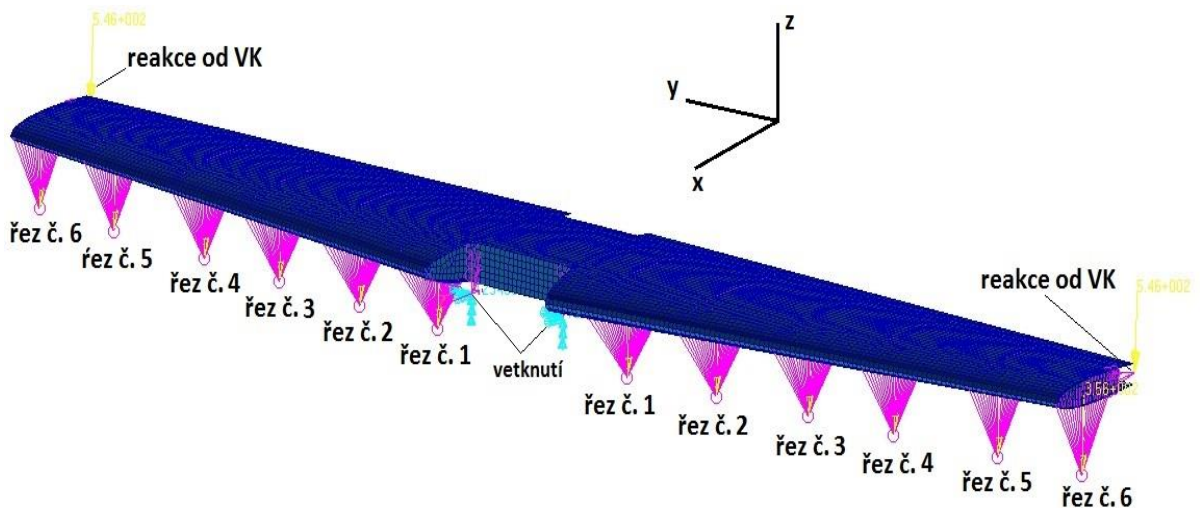
Obr. 12.2 Vetknutí stabilizátoru k trupu letounu pomocí RBE2 prvků

Závěsy pro uchycení výškového kormidla, které jsou umístěny na koncových žebrech a zadním nosníku, byly vymodelovány také za pomoci MPC prvků typu RBE2 a následně do nich byly zavedeny reakce od VK, které jsou uvedeny v přílohách 2 - 4.



Obr. 12.3 RBE2 prvek závěsu stabilizátor - VK

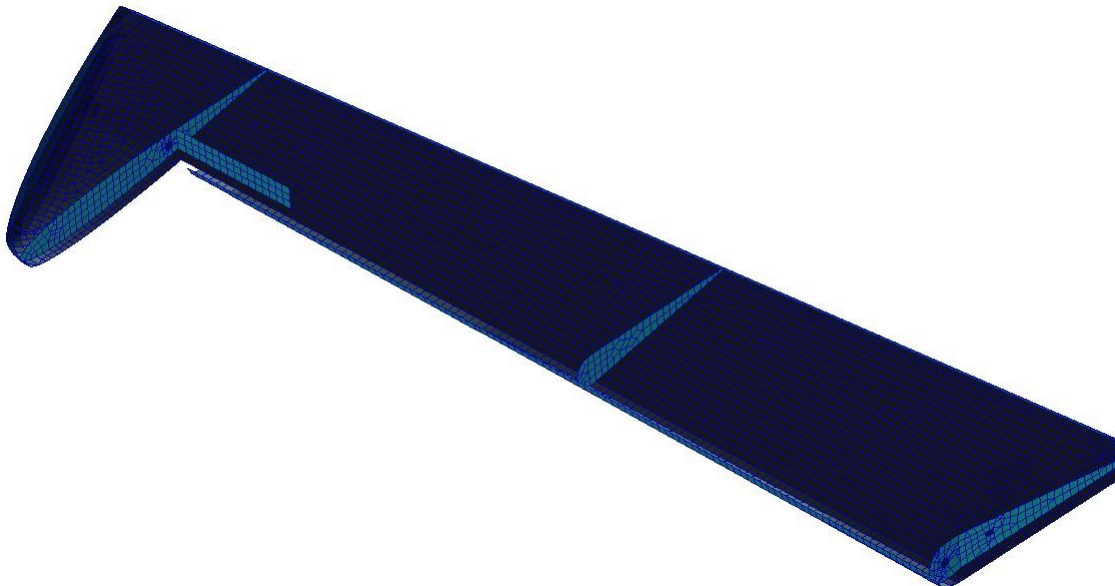
Zatížení stabilizátoru je vytvořeno pomocí náhradního modelu rozložení zatížení po rozpětí ve dvanácti řezech (obr. 12.4). Určení těchto modelů zatížení pro všechny případy zatížení je uvedeno v příloze č. 6. Tyto náhradní modely zatížení byly vytvořeny za pomoci MPC prvků typu RBE3. Příklad celkového MKP modelu stabilizátoru pro případ zatížení od poryvu je zobrazen na obr. 12.4



Obr. 12.4 Celkový MKP model stabilizátoru pro případ zatížení od poryvu

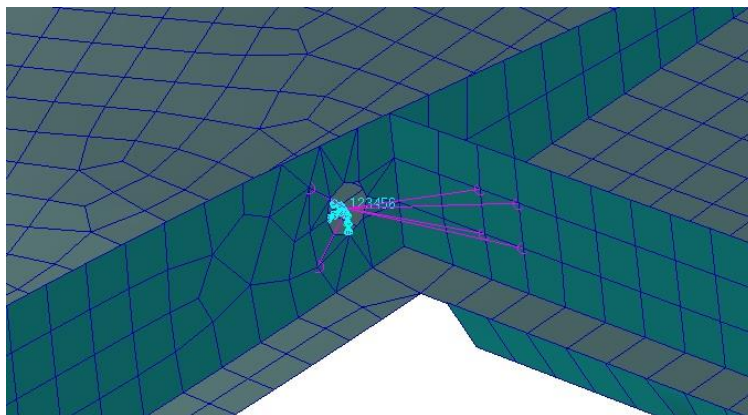
12.2. MKP model VK-P

Při vrstvení kompozitních materiálů bylo postupováno stejným způsobem jako u stabilizátoru se skladbou uvedenou v kapitole 10.3.

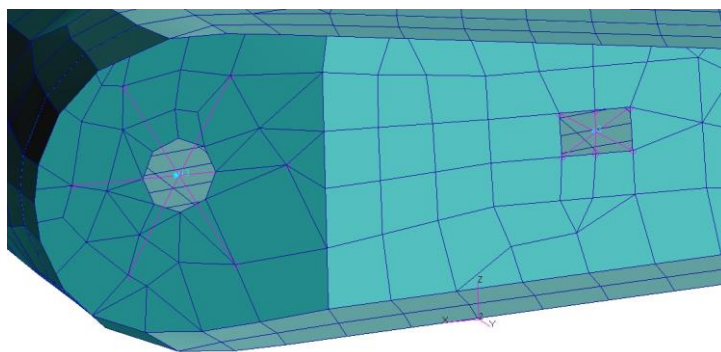


Obr. 12.5 MKP síť pravého výškového kormidla

Výškové kormidlo je uchyceno vnějšími závěsy ke stabilizátoru a závěsy k trupu jak je zmíněno v kapitole 9.2. Uchycení je vytvořeno pomocí MPC prvků typu RBE2. U vetknutí vnějšího závěsu VK jsou odebrány všechny stupně volnosti (obr. 12.6). Vetknutí vnitřního závěsu VK má odebrány stupně volnosti v posunu ve směru osy x a z (obr. 12.7 vlevo) a u vetknutí RBE2 prvku uchycení páky ovládání VK jsou odebrány stupně volnosti v posunu ve směru osy z (obr. 12.7 vpravo).

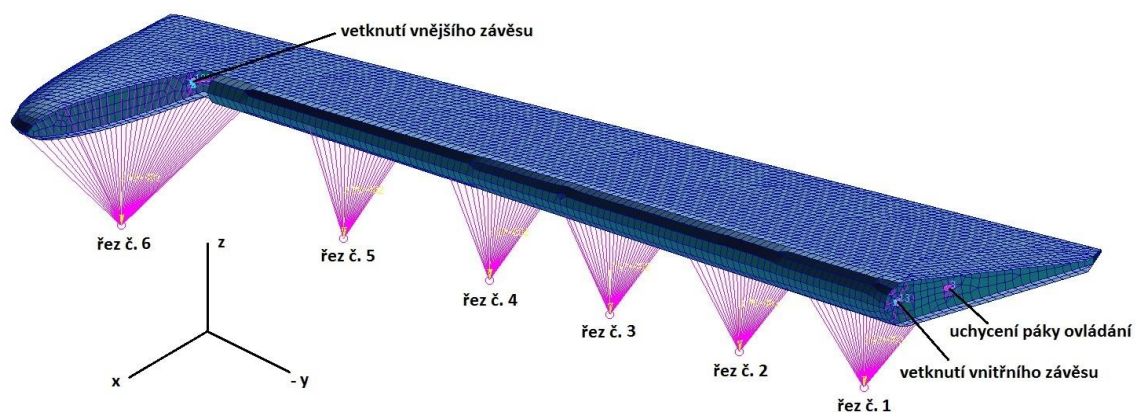


Obr. 12.6 vetknutí a RBE2 prvek vnějšího závěsu pravého výškového kormidla



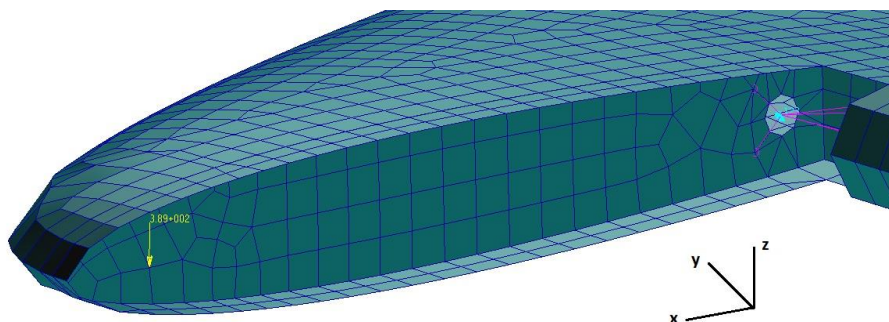
Obr. 12.7 vetknutí a RBE2 prvky páky ovládání a vnitřního závěsu pravého výškového kormidla

Zatížení VK-P bylo vytvořeno stejným způsobem jako u stabilizátoru. Určení náhradních modelů rozložení zatížení po rozpětí pro všechny případy zatížení je uvedeno v příloze č. 6. Celkový MKP model VK-P pro případ zatížení od manévru je zobrazen na obrázku 12.8.



Obr. 12.8 Celkový MKP model pravého výškového kormidla pro případ zatížení od manévru

Jak je patrné z obrázku 12.9 síla od hmotového vyvážení VK-P pro případ zatížení 24 g kolmo k rovině řídicí plochy o velikosti 389 N byla umístěna na koncovém žebru VK-P ve vzdálenosti 320 mm a směřující ve směru osy $-z$.



Obr. 12.9 MKP model síly pro případ zatížení od hmotového vyvážení (24 g kolmo k rovině řídicí plochy)

12.3. Souhrn případů zatížení pro pevnostní kontrolu stabilizátoru

MKP model stabilizátoru bude podroben pevnostní analýze v programu MSC Patran/Nastran a COMPOST pro tři případy zatížení: vyvažovací zatížení, zatížení od manévru a zatížení od poryvu. Tyto zatížení byly vytvořeny pomocí náhradních modelů rozložení zatížení po rozpětí v 6 symetrických řezech (obr. 12.4). Velikosti sil působících v těchto řezech a reakce od VK pro jednotlivé případy zatížení jsou uvedeny v tab. 12.1 – 12.3.

12.3.1. Příklad č. 1 - Vyvažovací zatížení

Letová konfigurace: $V_D = 390$ km/h, $n = 3,8$, $m = 925$ kg, přední centráž

Hodnota provozního vyvažovacího zatížení VOP: $F_{vyv.} = -5236$ N

Vyvažovací zatížení vychází jako nejkritičtější případ na kroutící moment.

Hodnoty početního zatížení ($f = 1,875$)							
	řez č. 1	řez č. 2	řez č. 3	řez č. 4	řez č. 5	řez č. 6	Reakce od VK
Fz [N]	-1500	-1200	-1125	-1125	-938	-469	950

Tab. 12.1 Velikosti sil náhradního modelu vyvažovacího zatížení po rozpětí stabilizátoru

12.3.2. Příklad č. 2 – Zatížení od manévru

Letová konfigurace: $V_D = 390$ km/h, $\Delta n = 2,8$, $m = 925$ kg, $\delta_{VK} = 30^\circ$, přední centráž

Hodnota provozního zatížení od manévru VOP: $F_{man.} = -4840$ N

Zatížení od manévru společně se zatížením od poryvu vycházejí jako nejkritičtější případy na ohybový moment.

Hodnoty početního zatížení ($f = 1,875$)							
	řez č. 1	řez č. 2	řez č. 3	řez č. 4	řez č. 5	řez č. 6	Reakce od VK
Fz [N]	-525	-431	-431	-394	-338	-169	-1163

Tab. 12.2 Velikosti sil náhradního modelu zatížení od manévru po rozpětí stabilizátoru

12.3.3. Příklad č. 3 – Zatížení od poryvu

Letová konfigurace: $V_D = 390 \text{ km/h}$, $n = 3,8$, $m = 925 \text{ kg}$, $U = -7,62 \text{ m/s}$, přední centráž

Hodnota provozního zatížení od poryvu VOP: $F_{\text{poryv}} = -5878 \text{ N}$

Zatížení od manévru společně se zatížením od poryvu vycházejí jako nejkritičtější případy na ohybový moment.

Hodnoty početního zatížení ($f = 1,875$)							
	řez č. 1	řez č. 2	řez č. 3	řez č. 4	řez č. 5	řez č. 6	reakce od VK
Fz [N]	-1125	-844	-844	-844	-675	-356	-546

Tab. 12.3 Velikosti sil náhradního modelu zatížení od poryvu po rozpětí stabilizátoru

12.4. Souhrn případů zatížení pro pevnostní kontrolu VK-P

MKP model VK-P bude podroben pevnostní analýze v programu MSC Patran/Nastran a COMPOST pro dva případy zatížení: zatížení od manévru a zatížení od hmotového vyvážení VK-P (obr. 12.9).

12.4.1. Příklad č. 1 – Zatížení od manévru

Letová konfigurace: $V_D = 390 \text{ km/h}$, $\Delta n = 2,8$, $m = 925 \text{ kg}$, $\delta_{VK} = 30^\circ$, přední centráž

Hodnota provozního zatížení od manévru VOP: $F_{\text{man.}} = -4840 \text{ N}$

Zatížení od manévru v porovnání s vyvažovacím zatížením a zatížením od poryvu vychází jako nejkritičtější. Toto zatížení bylo vytvořeno pomocí náhradního modelu rozložení zatížení po rozpětí v 6 řezech (obr. 12.8). Velikosti sil působících v těchto řezech pro případ zatížení od manévru jsou uvedeny v tab. 12.4.

Hodnoty početního zatížení ($f = 1,875$)						
	řez č. 1	řez č. 2	řez č. 3	řez č. 4	řez č. 5	řez č. 6
Fz [N]	-1125	-844	-844	-844	-675	-356

Tab. 12.4 Velikosti sil náhradního modelu zatížení od manévru po rozpětí VK-P

12.4.2. Příklad č. 2 – Zatížení od hmotového vyvážení – 24 g kolmo k rovině řídicí plochy

Zatížení od hmotového vyvážení bylo vytvořeno silou o velikosti 389 N, která byla umístěna na koncové žebro VK-P ve vzdálenosti 320 mm od osy otáčení kormidla (obr. 12.9). Určení vyvažovací hmoty na VK-P je uvedeno v kapitole 9.2.1.

13. Vyhodnocení výsledků

MKP model stabilizátoru i MKP model pravého výškového kormidla byl podroben statické lineární napěťově-deformační analýze v řešiči MSC Nastran. Stabilizátor byl testován pro tři případy zatížení a to: vyvažovací zatížení – vyhodnoceno jako největší kroutící moment, poryvové a manévrovací zatížení – pro největší ohybový moment. Pravé výškové kormidlo bylo testováno pro případ zatížení od manévru, které vychází jako nejkritičtější a pro případ zatížení od hmotového vyvážení. Výsledkem této analýzy jsou osová napětí v hlavním materiálovém směru, smyková napětí v rovině laminátu a po tloušťce. Dále maximální a minimální osová napětí v elementu a maximální smykové napětí. Hodnoty jsou vypočteny pro všechny vrstvy laminátu. Pro každou vrstvu elementu je rovněž vypočteno interlaminární smykové napětí.

Výsledky analýzy zahrnují také hodnoty součinitelů poruchy (FI – failure index) podle zvoleného poruchového kritéria. Pokud součinitel poruchy přesahuje hodnotu 1, mělo by v daném elementu dojít k poruše.

Post-processing v MSC Patran umožňuje grafickou reprezentaci výsledků MKP analýzy včetně součinitelů poruchy. Výsledky je možné zobrazit pro každou vrstvu zvlášť nebo pro celý laminát. V druhém případě zobrazená hodnota odpovídá vždy nejvyšší hodnotě poruchového kritéria v daném elementu. Zobrazení nejvyšších hodnot umožňuje poměrně rychle určit kritická místa konstrukce. Co však tímto postupem není možné zjistit, je typ poruchy, ke které došlo, a v jaké vrstvě k této poruše došlo. K dohledání těchto informací by bylo nutné vyhodnotit napětí ve všech vrstvách modelu a jednotlivých směrech. Tento postup je však v případě modelů složených z mnoha vrstev pracný a časově náročný.

MSC Patran neumožňuje výpočet poruchových kritérií pro sendvičové struktury. Nabízí pouze kritéria pro kompozitní materiály bez jádra. Konstrukce VOP je však z většiny tvořena právě sendvičovými kompozitními materiály, proto by bylo vhodné součinitele poruchy sendvičových kritérií znát.

Z výše uvedených důvodů byl pro podrobnější vyhodnocení konstrukce použit software COMPOST (Composite Postprocessor).

13.1. Způsob vyhodnocení programem COMPOST [9]

Program COMPOST je post-processed MKP řešičů a umožňuje podrobnější analýzu MKP elementů kompozitních konstrukcí včetně poruchových kritérií pro sendvičové struktury.

Program COMPOST obsahuje tři základní nástroje pro hodnocení konstrukce [9]:

1) Report

Zobrazí základní informace o zvolených elementech:

- druh materiálu, orientace vrstev, tloušťky vrstev

- výsledná napětí v každé vrstvě (tři normálová napětí a dvě smyková napětí po tloušťce)
- výše uvedené informace zobrazí ve formě grafu s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách zvolených elementů [9]

2) Analysis

Zobrazí základní informace o zvolených elementech.

- zobrazí druh materiálu, orientaci vrstev, tloušťky vrstev
- výsledná napětí v každé vrstvě (tři normálová napětí dvě smyková napětí po tloušťce)
- vypočte tři poruchová kritéria pro laminát, pokud se jedná o sendvičovou konstrukci, vypočte také poruchová kritéria pro tento typ konstrukce
- výše uvedené informace zobrazí ve formě grafu s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách zvolených elementů [9]

3) Min/Max

Tento nástroj slouží k nalezení elementů, kde bylo překročeno některé z poruchových kritérií. Zobrazí seznam těchto elementů sestupně podle součinitele poruchy. Zároveň zobrazí, ve které vrstvě k poruše došlo a o jaký typ poruchy se jednalo. [9]

COMPOST umožňuje vypočítat součinitele poruchy následujícího poruchového kritéria laminátů [9]:

1) Kritérium maximálního napětí

Kritérium maximálního napětí je neinteraktivní poruchové kritérium. Výsledkem jsou tři na sobě závislé součinitele poruchy – ve směru vláken (FI_1), kolmo na směr vláken (FI_2) a ve smyku (FI_{12})

$$FI_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_{p1}} \quad FI_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{p2}} \quad FI_{12} = \frac{\tau_{12}}{\tau_p}$$

Maximální dovolená napětí σ_{p1} a σ_{p2} jsou závislá na napětích σ_1 a σ_2 . Pokud jsou napětí σ_1 a σ_2 tahová, potom σ_{p1} a σ_{p2} musí být maximální dovolená napětí v tahu (σ_{pt1} a σ_{pt2}), v případě, že jsou napětí tlaková, musí být použita maximální dovolená napětí v tlaku (σ_{pd1} a σ_{pd2}). [9]

Mimo jiné program COMPOST umožňuje určení součinitelů poruch dle kritérií Tsai-Wu, Tsai-Hill a Hashin. Tyto kritéria hodnotí konstrukci velmi přísně. Protože používáme značně poddimenzovaná data materiálů, nebude s těmito kritérii při vyhodnocování pevnostních analýz počítáno.

2) Kritérium Tsai-Wu

Kritérium Tsai-Wu je interaktivní poruchové kritérium. Součinitel poruchy je vyjádřen následující rovnicí: [9]

$$FI = F1\sigma_1 + F2\sigma_2 + F11\sigma_1^2 + F22\sigma_2^2 + F66\tau_{12}^2 + 2F12\sigma_1\sigma_2$$

Kde:

$$F1 = \frac{1}{\sigma_{Pd1}} + \frac{1}{\sigma_{Pt1}} \quad F2 = \frac{1}{\sigma_{Pd2}} + \frac{1}{\sigma_{Pt2}} \quad F11 = \frac{1}{\sigma_{Pd1} \cdot \sigma_{Pt1}}$$

$$F22 = \frac{1}{\sigma_{Pd2} \cdot \sigma_{Pt2}} \quad F66 = \frac{1}{\tau_p^2} \quad F12 = \frac{1}{2 \cdot \sigma_{Pd1} \cdot \sigma_{Pt1}}$$

3) Kritérium Tsai-Hill

Tsai-Hill je obdobně jako Tsai-Wu interaktivní poruchové kritérium. Pro součinitel poruchy platí:

$$FI = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{P1}^2} - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_{P1}^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{P2}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_p} \right)^2$$

Stejně jako u kritéria maximálního napětí jsou maximální dovolená napětí σ_{P1} a σ_{P2} závislá na napětích σ_1 a σ_2 . [9]

4) Kritérium Hashin

Kritérium Hashin je interaktivní poruchové kritérium. Výsledkem hodnocení jsou tři součinitele poruchy – součinitel poruchy vláken v tahu (F_C), součinitel poruchy vláken v tlaku (F_T) a součinitel poruchy matrice (F_M). Pro tyto součinitele platí: [9]

$$F_C = \frac{\sigma_1}{\sigma_{Pd1}}$$

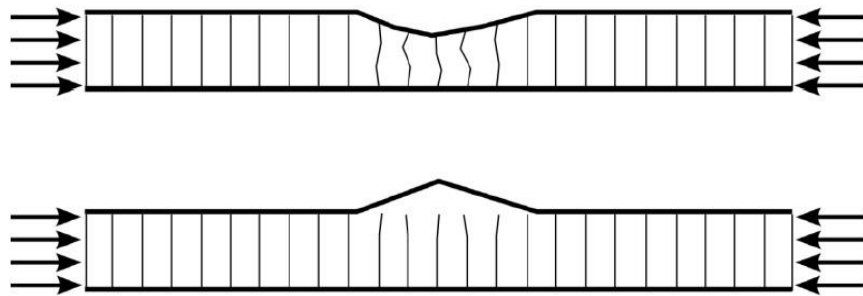
$$F_T = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{Pt1}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_p} \right)^2$$

$$F_M = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{Pt2}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_p} \right)^2$$

V programu COMPOST jsou definována poruchová kritéria těchto sendvičových poruch [9]:

1) Stabilitní porucha potahu

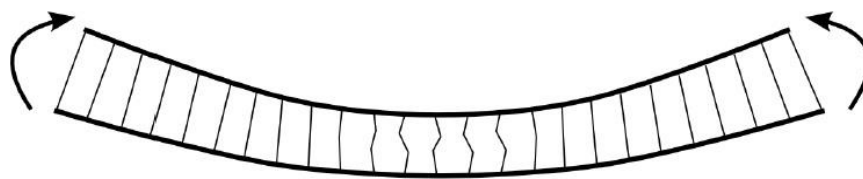
Stabilitní porucha potahu (wrickling) se projevuje lokálním vybočením potahu sendviče, který je vystaven tlakovému zatížení. Konstrukce, ve kterých dojde k wricklingu, velice rychle ztrácejí stabilitu, často s fatálními důsledky pro konstrukci. Důvodem je velice omezená schopnost konstrukce přenést zatížení v případě, že došlo k wricklingu. Tento problém lze obvykle vyřešit zvýšením stability potahu a zlepšením adheze mezi potahem a jádrem sendviče. [9]



Obr. 13.1 Stabilitní porucha potahu [9]

2) Ohybové drcení jádra

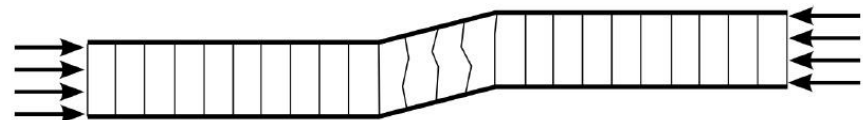
K ohybovému drcení jádra (flexural core crushing), jak z názvu poruchového kritéria plyne, obvykle dochází při ohybu, kdy ohybový moment je příliš vysoký a pevnost jádra v tlaku nedostatečná. [9]



Obr. 13.2 Ohybové drcení jádra [9]

3) Smyková porucha

Smyková porucha (shear crimping) je stabilitní poruchou. Jedná se o formu antisymetrického wricklingu. Obvykle je způsobena nízkou tloušťkou a smykovou pevností jádra sendvičové konstrukce. [9]



Obr. 13.3 Smyková porucha [9]

14. Vyhodnocení MKP analýz

Konstrukce stabilizátoru a pravého výškového kormidla budou zhodnoceny jako celek pomocí post-processingu v MSC Patran. Budou především určena kritická místa konstrukce.

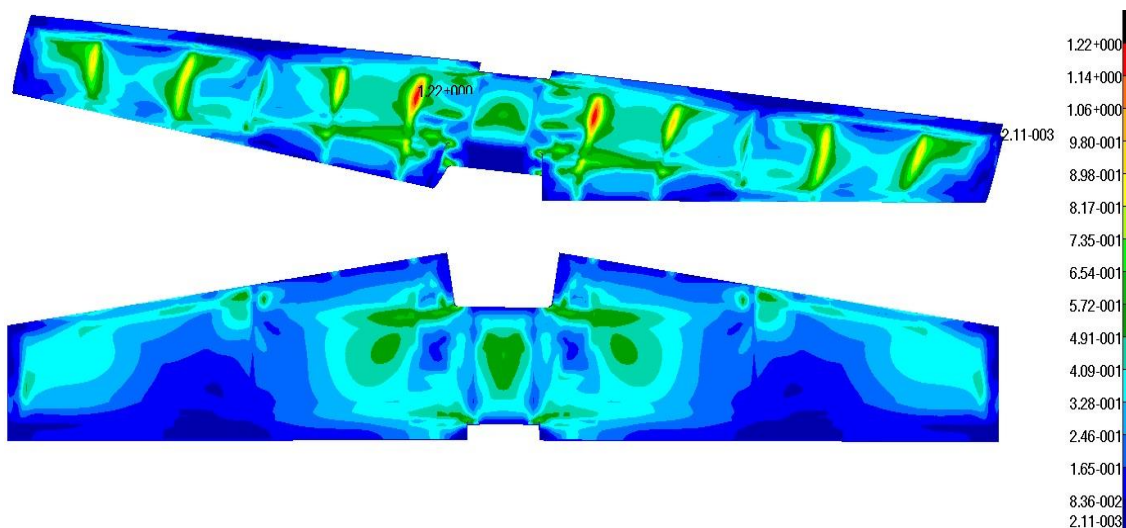
Hodnotící kritéria:

- maximální hodnota součinitele poruchy v daném elementu podle poruchového kritéria Max-Stress.
- zamezení výskytu sendvičových poruch

Pro jednotlivé případy zatížení byly všechny části konstrukce zhodnoceny programem COMPOST. Byl použit nástroj Min/Max pro nalezení nejkritičtějších elementů každé části. Elementy, které byly programem vyhodnoceny jako porušené (součinitel poruchy přesáhl hodnoty 1), budou zobrazeny na MKP sítích a bude přiložena tabulka s alespoň jedním porušeným elementem v dané oblasti. V tabulce bude uvedeno v jakém místě a ve které vrstvě k poruše došlo, o jaký typ materiálu se jedná, podle jakého kritéria k poruše došlo a velikost součinitele poruchy pro toto kritérium. Také bude přiložen komentář, proč k této poruše došlo a zda s touto poruchou bude uvažováno pro případné úpravy vrstvení dané narušené konstrukční části.

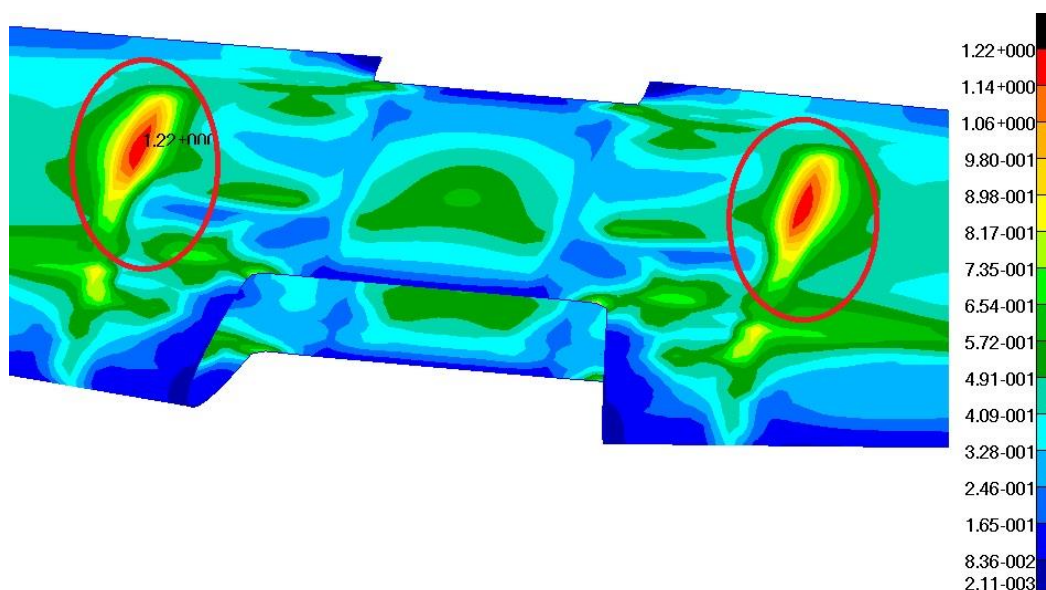
14.1. Vyhodnocení MKP analýz stabilizátoru

14.1.1. Příklad č. 1 - Vyvažovací zatížení – největší krouťící moment



Obr. 14.1 Maximální součinitele poruchy, stabilizátor – vyvažovací zatížení

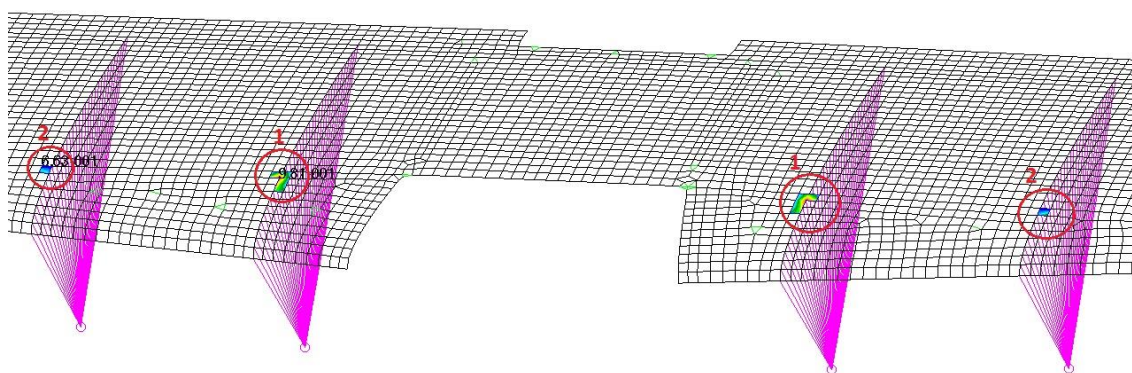
Podle výsledků v MSC Patran (obr. 14.1) došlo k poruchám elementů v oblastech zavedení náhradních modelů vyvažovacího zatížení na horním potahu, konkrétně v řezech č. 1.



Obr. 14.2 Detail maximálních součinitelů poruchy na horním potahu stabilizátoru - vyvažovací zatížení

V této oblasti (obr. 14.2 a 14.3) došlo k poruchám z důvodu zavedení náhradních modelů vyvažovacího zatížení pomocí RBE3 prvků (obr. 12.4), které rozvádí zavedené síly do jednotlivých uzlů na horním potahu. Tyto uzly mají nevýhodu v tom, že působí nerovnoměrně rozloženými silami k uchyceným elementům a okolním elementům. (obecně řečeno elementy chycené těmito uzly jsou tahány jednotlivě směrem působící zavedené síly). Tyto poruchy nebudeme brát dále v úvahu, protože by za provozních podmínek neměly nastat.

Program COMPOST vyhodnotil sendvičové poruchy na horním a dolním potahu, což je patrné z obrázků 14.3 a 14.4.

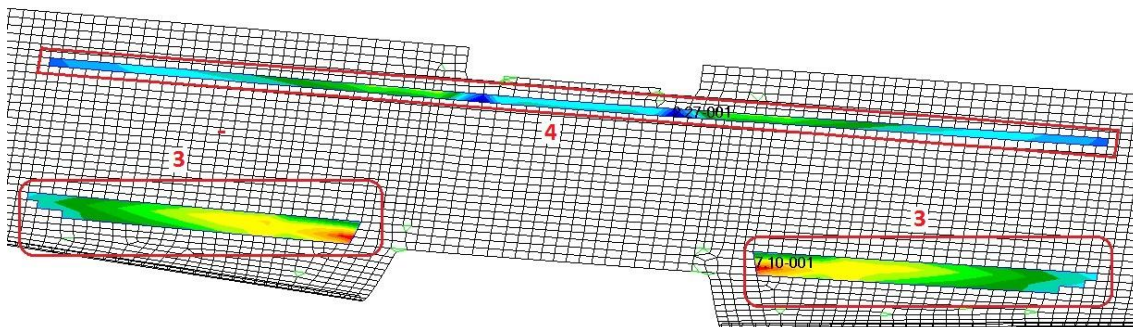


Obr. 14.3 Porušené sendvičové elementy na horním potahu stabilizátoru – vyvažovací zatížení

Příklady porušených elementů v oblastech č. 1 a 2 dle kritérií programu COMPOST jsou uvedeny v tabulce 14.1.

oblast poruchy	číslo vrstvy	materiál	druh poruchy	součinitel poruchy
1	10	C-kepr-90 g/m ²	Max stress – N1	1,001
1	9	C70.75-5mm	Sandwich failure Wrinkling Top side	1,027
2	10	C-kepr-90 g/m ²	Max stress - N2	1,062
2	9	C70.75-5mm	Sandwich failure Wrinkling Top side	1,090

Tab. 14.1 Příklady porušených elementů na horním potahu stabilizátoru – vyvažovací zatížení



Obr. 14.4 Porušené sendvičové elementy na dolním potahu stabilizátoru – vyvažovací zatížení

Příklady porušených elementů v oblastech č. 3 a 4 dle kritérií programu COMPOST jsou uvedeny v tabulce 14.2.

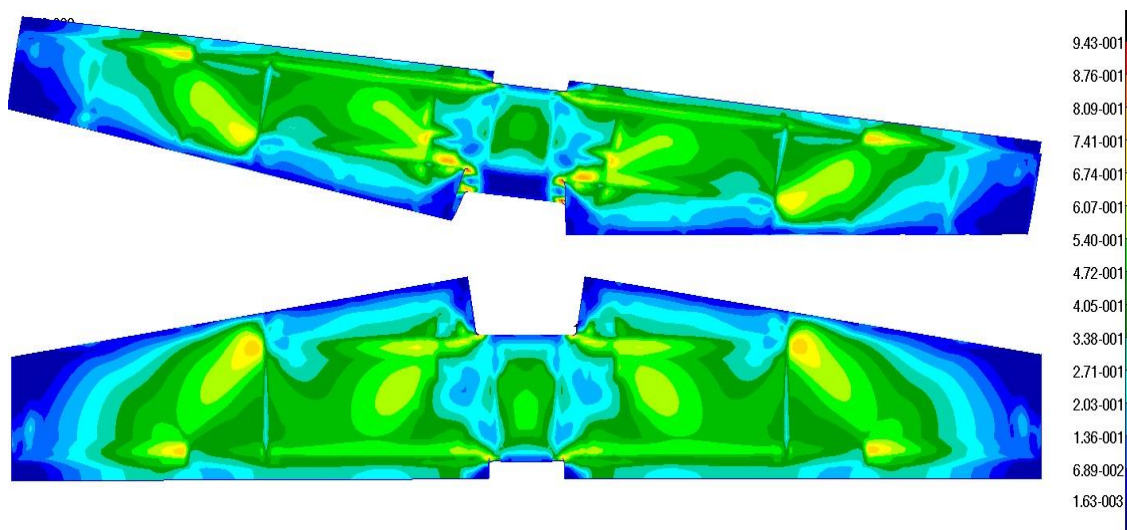
oblast poruchy	číslo vrstvy	materiál	druh poruchy	součinitel poruchy
3	9	C70.75-5mm	Sandwich failure Core Crimping	1,812
4	9	C70.75-5mm	Sandwich failure Core Crimping	1,583

Tab. 14.2 Příklady porušených elementů na dolním potahu stabilizátoru – vyvažovací zatížení

Vyhodnocené poruchy v oblastech č. 3 a 4 (obr. 14.4) na dolním potahu se nacházejí v místě předního a zadního nosníku a pásnic, se kterými program COMPOST nepočítá. Program COMPOST v těchto oblastech vyhodnotil sendvičové poruchy Core Crimping (smyková porucha). Z praktického hlediska by k těmto smykovým poruchám nemělo dojít, protože se v těchto místech nachází stojina s lemy, která zabrání vzniku této poruchy.

Výsledné hodnoty (zobrazené ve formě grafů) poruchových oblastí 1 - 4 z programu COMPOST s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách vybraných elementů jsou uvedeny v příloze č. 7.

14.1.2. Případ č. 2 - Zatížení od manévru – ohybový moment

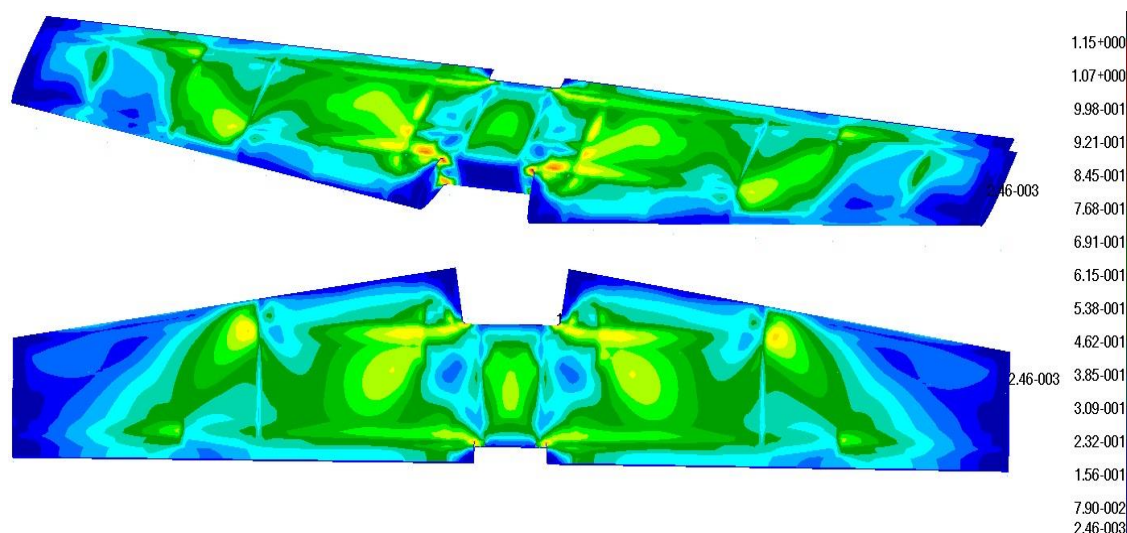


Obr. 14.5 Maximální součinitele poruchy, stabilizátor – zatížení od manévru

U zatížení od manévru program MSC Patran nevyhodnotil žádné poruchy elementů.

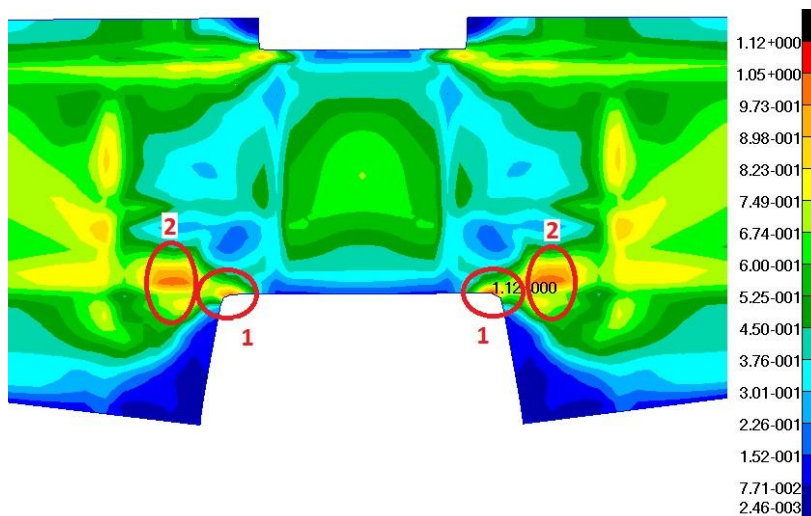
Obdobně jako u předchozího vyvažovacího zatížení program COMPOST vyhodnotil sendvičové poruchy Core Crimping na spodním potahu stabilizátoru (obr. 14.4), se kterými nebude uvažováno.

14.1.3. Případ č. 3 - Zatížení od poryvu – ohybový moment



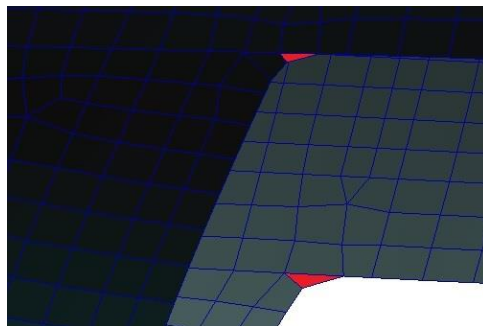
Obr. 14.6 Maximální součinitele poruchy, stabilizátor – zatížení od poryvu

Podle výsledků v MSC Patran, jak je patrné z obrázků 14.6 až 14.8, došlo k poruchám elementů na předním nosníku v místech uchycení závěsů (obr. 14.8) a v oblastech předního zaoblení horního potahu (obr. 14.7).



Obr. 14.7 Detail maximálních součinitelů poruchy na horním potahu stabilizátoru – zatížení od poryvu

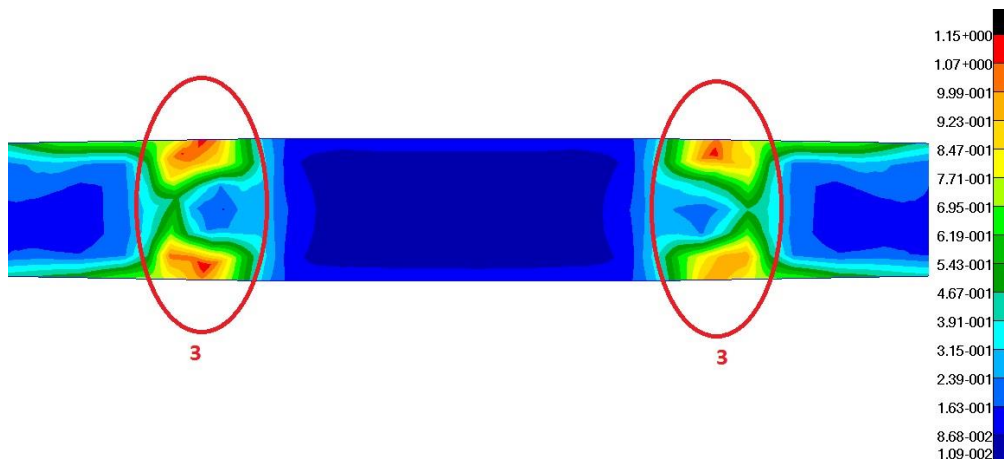
Program COMPOST v místě poruchy č. 1 vyhodnotil poruchy pouze v jednom elementu a to ve všech vrstvách, kromě vnější skleněné technologické vrstvy. Tyto výsledky mohou být zapříčiněny zaoblením konstrukce a špatnými rozměry daného elementu v MKP síti (obr. 14.8). Poruchy v oblasti č. 2 nebudeme brát dále v úvahu, protože byla narušena pouze skleněná vnější vrstva, která splňuje funkci technologickou. Příklady porušených elementů v oblastech č. 1 a 2 dle kritérií programu COMPOST jsou uvedeny v tabulce 14.3.



Obr. 14.8 Detail elementů MKP sítě stabilizátoru v místě zaoblení

oblast poruchy	číslo vrstvy	materiál	druh poruchy	součinitel poruchy
1	2	C-kepr-163 g/m ²	Max stress – N1	1,132
1	3	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N1	1,126
1	4	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N1	1,118
1	5	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N1	1,111
1	10	C-kepr-90 g/m ²	Max stress – N1	1,105
1	11	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N1	1,100
2	1	Sklo-kepr-80 g/m ²	Max stress – S12	1,208

Tab. 14.3 Příklady porušených elementů na horním potahu stabilizátoru – zatížení od poryvu



Obr. 14.9 Detail maximálních součinitelů poruchy na předním nosníku stabilizátoru – zatížení od poryvu

Program MSC Patran vyhodnotil poruchy v oblastech uchycení závěsů na předním nosníku (obr. 14.9). Vzhledem k tomu, že se porušené elementy nacházejí přímo v oblasti zavedených MPC prvků (obr. 12.2), je třeba hodnoty součinitelů poruchy brát s určitou rezervou. Určité zesílení tohoto místa však bude nutné. Vhodnou úpravou by mohlo být zesílení tloušťky jádra sendviče nebo přidání další vrstvy do této oblasti.

Příklad porušeného elementu v oblasti č. 3 dle kritérií programu COMPOST je uveden v tabulce 14.4.

oblast poruchy	číslo vrstvy	materiál	druh poruchy	součinitel poruchy
3	1	C-kepr-163 g/m ²	Max stress – N1	1,146
3	2	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N1	1,137
3	3	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N1	1,127
3	4	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N1	1,118
3	6	C-kepr-163 g/m ²	Max stress – N1	1,020
3	7	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N1	1,011
3	8	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N2	1,014
3	9	C-kepr-200 g/m ²	Max stress – N2	1,038

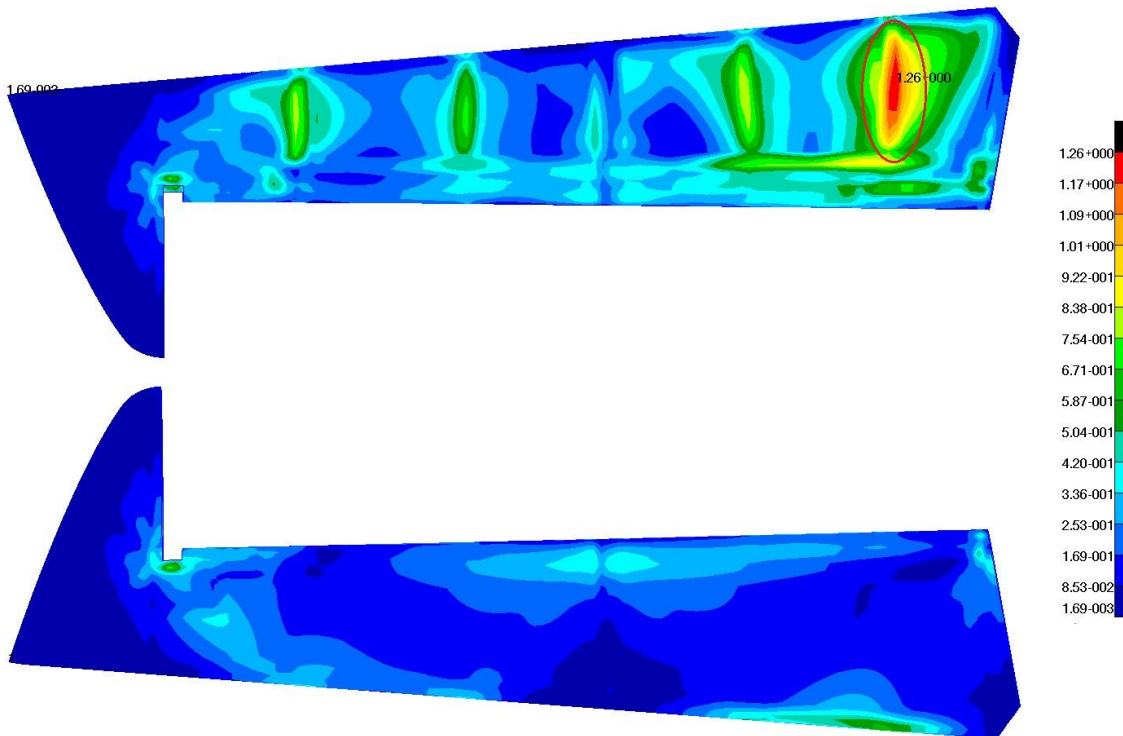
Tab. 14.4 Příklad porušeného elementu na předním nosníku stabilizátoru – zatížení od poryvu

Program COMPOST stejně jako u předchozích dvou případů zatížení vyhodnotil sendvičové poruchy crimping na horním a dolním potahu v místech předního a zadního nosníku, což nebudeme uvažovat.

Výsledné hodnoty (zobrazené ve formě grafů) poruchových oblastí 1 - 3 z programu COMPOST s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách vybraných elementů jsou uvedeny v příloze č. 8.

14.2. Vyhodnocení MKP analýzy VK-P

14.2.1. Příklad č. 1 - Zatížení od manévru – nejkritičtější zatížení



Obr. 14.10 Maximální součinitele poruchy, VK-P – zatížení od manévru

Obdobně jako u stabilizátoru, podle výsledků v MSC Patran, jak je patrné z obrázku 14.10, došlo k poruchám elementů na horním potahu, a to v oblasti zavedení náhradních modelů zatížení od manévru. Příklad porušeného elementu dle kritérií programu COMPOST je uveden v tabulce 14.5.

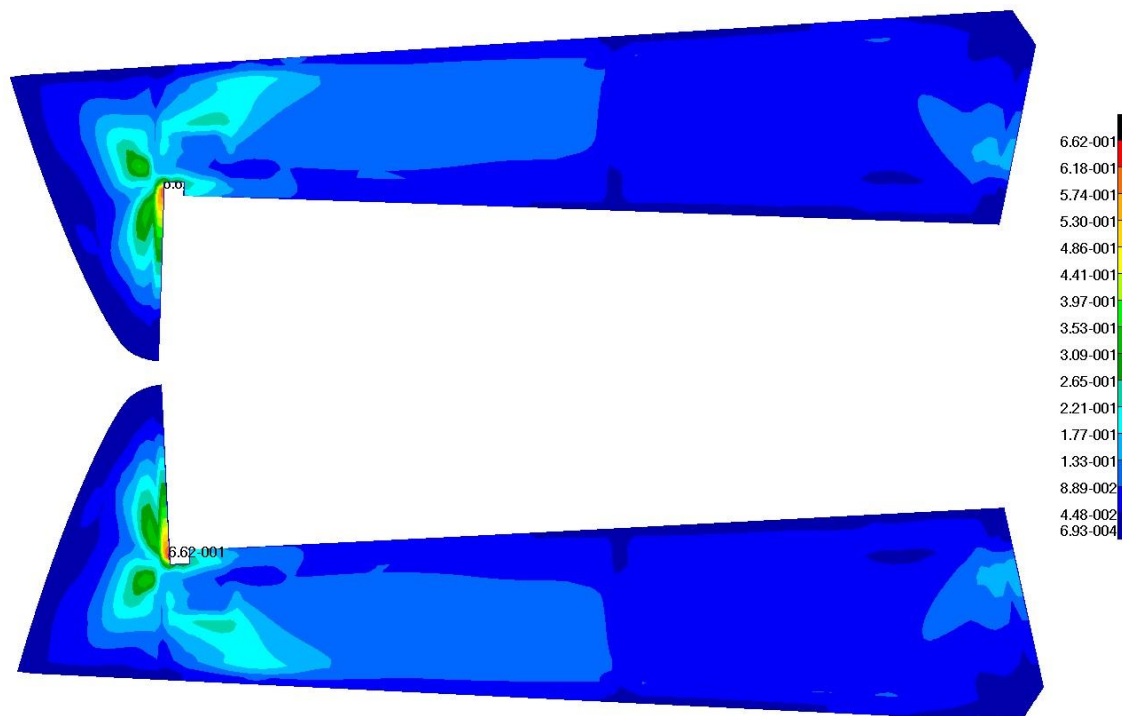
číslo vrstvy	materiál	druh poruchy	součinitel poruchy
6	C-kepr-90 g/m ²	Max stress - N1	1,396

Tab. 14.5 Příklad porušeného elementu na horním potahu VK-P – zatížení od manévru

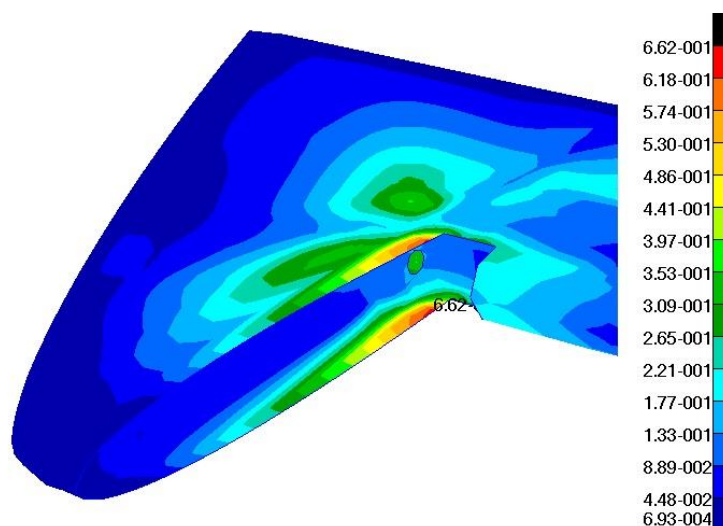
Program COMPOST nevyhodnotil žádné sendvičové poruchy.

Výsledné hodnoty (zobrazené ve formě grafů) poruchové oblasti z programu COMPOST s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách vybraných elementů jsou uvedeny v příloze č. 9.

14.2.2. Příklad č. 2 – Zatížení od hmotového vyvážení VK-P - 24 g kolmo k rovině řídicí plochy



Obr. 14.11 Maximální součinitele poruchy, VK-P – zatížení od hmotového vyvážení



Obr. 14.12 Detail rohového odlehčení VK-P – zatížení od hmotového vyvážení

U zatížení od hmotového vyvážení program MSC Patran a ani program COMPOST nevyhodnotily žádné poruchy elementů (obr. 14.11 a 14.12).

14.3. Celkové zhodnocení

Po vyhodnocení všech případů zatížení je možné stanovit obecný závěr ohledně navržené konstrukce.

MKP model stabilizátoru byl testován ve třech případech zatížení, a to: vyvažovací zatížení, zatížení od manévru a zatížení od poryvu.

U analýzy vyvažovacího zatížení se objevily poruchy pouze na horním potahu v oblasti zavedení náhradního modelu zatížení po rozpětí za pomoci MPC prvku typu RBE 3 (obr. 14.2). Prvky RBE 3 rozvádí zavedené síly do jednotlivých uzlů na horním potahu, které působí nerovnoměrně rozloženými silami k uchyceným elementům a okolním elementům (obecně řečeno elementy chycené těmito uzly jsou tahány jednotlivě směrem působící zavedené síly). Tyto poruchy by za provozních podmínek neměly nastat.

Ve všech třech případech zatížení program COMPOST vyhodnotil sendvičové poruchy typu Crimping (smykové poruchy) na horním a dolním potahu v oblastech pásnic, tedy předního a zadního nosníku (obr. 14.4). Z praktického hlediska by k těmto smykovým poruchám nemělo dojít, protože se v těchto místech nacházejí stojiny s lemy, které zabrání vzniku této poruchy.

U případu zatížení od poryvu se objevila porucha na horním potahu v oblasti předního výřezu (zaoblení) stabilizátoru. Dle výsledků v programu COMPOST byla vyhodnocena porucha v této oblasti pouze v jednom elementu, která bude zapříčiněna špatnými rozměry tohoto elementu a chybou v MKP síti (obr. 14.8).

Celkově je materiálová skladba stabilizátoru dostatečná, až na některé oblasti, kterým při dalším podrobnějším návrhu bude nutné věnovat zvýšenou pozornost. Jsou to oblasti na předním a zadním nosníku v místech uchycení závěsů (obr. 14.9). Vzhledem k tomu, že se tyto elementy nachází přímo v oblasti zavedení MPC prvků (obr. 12.2), je třeba hodnoty součinitelů poruchy brát s určitou rezervou. Určité zesílení tohoto místa však zřejmě bude nutné. Vhodnou úpravou by mohlo být zesílení tloušťky jádra sendviče nebo přidání další vrstvy do této oblasti.

Model pravého výškového kormidla vyhověl v obou testovaných případech zatížení. Objevila se pouze malá oblast porušených elementů na horním potahu VK-P u případu zatížení od manévru (obr. 14.9). Obdobně jako u stabilizátoru tyto poruchy vznikly důsledkem zavedení MPC prvku typu RBE 3 náhradního modelu zatížení od manévru po rozpětí (obr. 14.10).

15. Závěr

V rámci této diplomové práce byl proveden základní konstrukční návrh kompozitního stabilizátoru a pravého výškového kormidla VOP letounu VUT 100.

Bylo definováno, co jsou to kompozitní materiály a jakými technologickými metodami se dají vyrábět. Následně byly vybrány kompozitní materiály pro jednotlivé části konstrukce VOP s nejvhodnější technologií výroby těchto kompozitních částí. Dle předpisu CS-23 bylo vypočteno zatížení VOP a jeho průběh po rozpětí pro případy zatížení: vyvažovací, od manévru a od poryvu. Z těchto vypočítaných zatížení byly vybrány nejkritičtější případy pro pevnostní kontrolu. V programu CATIA byl vytvořen systémový model stabilizátoru a pravého výškového kormidla a také byla vytvořena MKP síť těchto modelů v modulu Advanced Meshing Tools. MKP síť stabilizátoru a pravého výškového kormidla byly odděleně importovány do programu MSC Patran. V programu MSC Patran bylo těmto modelům definováno vetknutí, vrstvení kompozitních materiálů jednotlivých částí a byly vytvořeny modely náhradních zatížení po rozpětí pro následnou MKP analýzu v programech MSC Nastran a COMPOST. MKP model stabilizátoru byl podroben analýze pro tři případy zatížení, a to: vyvažovací zatížení – největší kroutící moment, zatížení od manévru a od poryvu pro největší ohybové momenty. MKP model pravého výškového kormidla byl podroben analýze pro dva případy zatížení, a to: zatížení od manévru – nejkritičtější zatížení a zatížení od hmotového vyvážení (24g kolmo k rovině řídicí plochy). Bylo provedeno zhodnocení výsledků těchto analýz a určení kritických míst konstrukce. Byl proveden hmotnostní rozbor VOP, kde výsledná hmotnost navrhované kompozitní VOP vyšla 18,284 kg.

Při porovnání současné kovové VOP (asi 23,15 kg) letounu VUT 100 a navrhované kompozitní VOP, vychází hmotnostní úspora **3,85 kg** v případě kompozitní VOP. Z důvodu dostupných dat, v této diplomové práci bylo počítáno se značně poddimenzovanými materiálovými vlastnostmi zvolených kompozitů při objemovém podílu vláken 35 %. Kdybychom měli k dispozici naměřená data vlastností (prokázaná zkouškami) zvolených materiálů a uvažovali s větším objemovým podílem vláken, kterého se z praktického hlediska dá docílit, dalo by se dosáhnout ještě větších hmotnostních úspor.

16. Seznam použitých zdrojů

- [1] *Předpis CS-23*. Evropská agentura pro bezpečnost letectví, 12. 02. 2009.
- [2] *Předpis CS-VLA*. Evropská agentura pro bezpečnost letectví, 5. 03. 2009.
- [3] *Základní geometrická data letounu VUT 100*. Brno : Letecký ústav
- [4] Kořínek, Zdeněk. *Kompozity*. [Online] 13. 3. 2011. <http://www.volny.cz/zkorinek/>.
- [5] Klement, Josef. Poznámky z předmětu *Letecké materiály a Technologie výroby letadel I a II. Kompozitní materiály a Výroba částí z kompozitních materiálů, Výroba sendvičových konstrukcí*. Brno : Letecký ústav
- [6] Doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D. *Kompozitní konstrukce v letectví*. Brno : Letecký ústav, 2011.
- [7] Slavětínský, Dušan. *O letadlech*. [Online] duben a květen 2010. <http://slavetind.cz>
- [8] *R&G Faserverbundwerkstoffe*. [Online] <http://www.r-g.de/>.
- [9] Michal Mališ, Petr Špaček a Pavel Schoř. *COMPOST v 1.45 User Guide*. Brno : Letecký ústav, 2012
- [10] *DA 40 Series Airplane Maintenance Manual*. Wien: Diamond Aircraft Industries.
- [11] Donald H. Middleton. *Composite Material in Aircraft Structures*. Singapore: Longman Singapore Publisher, 1990. str. 379
- [12] Michael Chun-Yung Niu. *Composite Airframe Structures*. Hong Kong : Conmilit Press Ltd., 2005. str. 664
- [13] Baker, Alan. *Composite Materials for Aircraft Structuree*. Reston : American Institute of Aeronautics and Astrnautics, 2004. ISBN 1-56347-540-5.

17. Seznam použitých symbolů a zkratek

$a_{kř}$	sklon vztlakové čáry křídla	[1/rad]
a_{VOP}	sklon vztlakové čáry VOP	[1/rad]
C_{Lmax-0}	maximální součinitel vztlaku letounu, klapky 0°	[1]
$C_{Lmax-40}$	maximální součinitel vztlaku letounu, klapky 40°	[1]
C_{Lmin}	minimální součinitel letounu	[1]
C_m	součinitel klopivého momentu	[1]
C_{mKT}	součinitel klopivého momentu křídlo-trup	[1]
C_{SAT}	střední aerodynamická tětíva	[m]
C_{SGT}	střední geometrická tětíva	[m]
E	modul pružnosti v tahu	[Mpa]
F	síla	[N]
g	tíhové zrychlení	[m/s ²]
G	modul pružnosti ve smyku	[Mpa]
K_g	zmírňující součinitel poryvu	[1]
L_{tr}	délka trupu	[m]
L_{VOP}	rameno VOP	[m]
l_{VOP}	rozpětí VOP	[m]
m	hmotnost	[kg]
m_{VOP}	hmotnost VOP	[kg]
n	násobek zatížení	[1]
q	plošná hustota	[kg/m ²]
$S_{kř}$	plocha křídla	[m ²]
S_{VOP}	plocha VOP	[m ²]
U_{de}	odvozená intenzita poryvů	[m/s]
V_A	návrhová obratová rychlost	[km/h]
V_C	návrhová cestovní rychlost	[km/h]
V_D	návrhová rychlost strmého sestupného letu	[km/h]
V_F	návrhová rychlost s vysunutými vztlakovými klapkami	[km/h]
V_G	rychlost v bodě “G“ obratové obálky	[km/h]
V_S	pádová rychlost	[km/h]
V_{SF}	pádová rychlost s vysunutými vztlakovými klapkami	[km/h]

$\overline{x_T}$	poloha těžiště vztažena k délce střední aerodynamické tětivě	[-]
$\overline{x_{ASb,VOP}}$	poloha aerodynamického středu kombinace křídlo-trup vztažena k délce střední aerodynamické tětivě	[-]
x_{CG}	podélná vzdálenost těžiště letounu za aerodynamickým středem letounu bez vodorovné ocasní plochy	[m]
δ_{max}	výchylka VK nahoru	[°]
δ_{min}	výchylka VK dolů	[°]
μ	Poissonovo číslo	[1]
ρ	hustota	[kg/m ³]
σ_1	napětí ve směru vláken	[Pa]
σ_2	napětí kolmo na směr vláken	[Pa]
σ_{Pt1}	mez pevnosti v tahu ve směru vláken	[Pa]
σ_{Pd1}	mez pevnosti v tlaku ve směru vláken	[Pa]
σ_{Pt2}	mez pevnosti v tahu kolmo na směr vláken	[Pa]
σ_{Pd2}	mez pevnosti v tlaku kolmo na směr vláken	[Pa]
τ_{12}	smykové napětí v rovině laminátu	[Pa]
$\tau_{2,3}, \tau_{13}$	smykové napětí po tloušťce laminátu	[Pa]
τ_p	mez pevnosti ve smyku	[Pa]

Zkratky:

FI	-	failure index (součinitel poruchy)
MKP	-	metoda konečných prvků
VK-L	-	levé výškové kormidlo
VK-P	-	pravé výškové kormidlo
VOP	-	vodorovná ocasní plocha

Další zkratky jsou vysvětleny v textu.

18. Seznam obrázků

Obr. 2.1 Letoun VUT 100 Cobra	15
Obr. 2.2 Muška letounu VUT 100 Cobra	17
Obr. 2.3 Použitý souřadnicový systém	18
Obr. 2.4 Celkový náhled [3]	19
Obr. 4.1 Vazba tkanin a) plátěná, b) keprová, c) saténová, d) splývavost – vlevo plátěná, vpravo keprová [5]	22
Obr. 4.2 Schéma sendvičového materiálu a jeho vlastnosti [5]	26
Obr. 5.1 Schéma mokré laminace [5]	27
Obr. 5.2 Schéma navíjení vláken [4]	28
Obr. 5.3 Schéma výroby sendvičového panelu pultruzí [4]	28
Obr. 5.4 Schéma RTM [4]	29
Obr. 5.5 Schéma vrstvení prepregové technologie [5]	29
Obr. 5.6 Schéma vytvrzování v autoklávu [4]	30
Obr. 6.1 Obálka zatížení	36
Obr. 6.2 Schéma vyvažovacího zatížení VOP	37
Obr- 6.3 Schéma zatížení VOP od manévru	40
Obr. 6.4 Podmínky obrátového zatížení [2]	40
Obr. 6.5 Schéma zatížení VOP od poryvu	43
Obr. 7.1 OBRÁZEK A7 Dodatku A předpisu CS-23, Rozložení zatížení stabilizátoru a výškového kormidla nebo kýlové plochy a směrového kormidla [1]	47
Obr. 7.2 Geometrie VOP [3]	48
Obr. 7.3 Poměrné rozložení vyvažovacího zatížení VOP po hloubce	49
Obr. 7.4 Poměrné rozložení zatížení VOP od manévru po hloubce	50
Obr. 7.5 Poměrné rozložení zatížení VOP od poryvu po hloubce	51
Obr. 7.6 Průběh posouvající síly na výškovém kormidle	54
Obr. 7.7 Průběh ohybového momentu na výškovém kormidle	54
Obr. 7.8 Průběh kroučícího momentu na výškovém kormidle	55
Obr. 7.9 Průběh posouvající síly na stabilizátoru	55
Obr. 7.10 Průběh ohybového momentu na stabilizátoru	56
Obr. 7.11 Průběh kroučícího momentu na stabilizátoru	56
Obr. 9.1 Systémový model VOP	58

Obr. 9.2	Systémový model stabilizátoru	59
Obr. 9.3	Detail předního uchycení stabilizátoru k trupu letounu	59
Obr. 9.4	Detail zadního uchycení stabilizátoru k trupu letounu	59
Obr. 9.5	Detail závěsu stabilizátor-VK	60
Obr. 9.6	Schéma zámku náběžné hrany stabilizátoru	60
Obr. 9.7	schéma konstrukčního řezu stabilizátoru	61
Obr. 9.8	Systémový model pravého výškového kormidla	61
Obr. 9.9	Detail vnějšího závěsu VK	62
Obr. 9.10	Detail závěsu a vnitřního závěsu VK	62
Obr. 9.11	Schéma statického a dynamického vyvážení na levém výškovém kormidle	63
Obr. 10.1	Vrstvení potahu stabilizátoru - vrstva č. 1	68
Obr. 10.2	Vrstvení potahu stabilizátoru - vrstva č. 2	68
Obr. 10.3	Vrstvení potahu stabilizátoru – přední výztuhy, vrstvy č. 3, 4, 5	69
Obr. 10.4	Vrstvení potahu stabilizátoru – zadní výztuhy, vrstvy č. 6, 7, 8	69
Obr. 10.5	Vrstvení potahu stabilizátoru – jádro, vrstva č. 9	69
Obr. 10.6	Vrstvení potahu stabilizátoru – závěrná vrstva jádra, vrstva č. 10	69
Obr. 10.7	Vrstvení potahu stabilizátoru – přední výztuha, vrstva č. 11	70
Obr. 10.8	Vrstvení potahu stabilizátoru – zadní pásnice, vrstva č. 12, 13	70
Obr. 10.9	Vrstvení potahu stabilizátoru – zadní pásnice, vrstva č. 14, 15, 16 ...	70
Obr. 10.10	Vrstvení potah stabilizátoru – přední pásnice, vrstva č. 17, 18, 19, 20	70
Obr. 10.11	Vrstvení potahu stabilizátoru – zámek náběžné hrany, vrstva č. 21, 22	70
Obr. 10.12	Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru - vrstva č. 1	71
Obr. 10.13	Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru - výztuhy, vrstvy č. 2, 3	71
Obr. 10.14	Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru – jádro – Airex C70.75, vrstva č. 4	71
Obr. 10.15	Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru – jádro - překližka, vrstva č. 4	72
Obr. 10.16	Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru – závěrná vrstva jádra, vrstva č. 5	72

Obr. 10.17 Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru	
- výztuhy, vrstvy č. 6, 7	72
Obr. 10.18 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru - vrstva č. 1	73
Obr. 10.19 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru	
- výztuhy, vrstvy č. 2, 3, 4	73
Obr. 10.20 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru	
- jádro - Airex C70.75, vrstva č. 5	73
Obr. 10.21 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru	
- jádro - překližka, vrstva č. 5	73
Obr. 10.22 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru	
- závěrná vrstva jádra, vrstva č. 6	74
Obr. 10.23 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru	
- výztuhy, vrstvy č. 7, 8, 9	74
Obr. 10.24 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla - vrstva č. 1	76
Obr. 10.25 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla - vrstva č. 2	76
Obr. 10.26 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla	
- výztuhy, vrstvy č. 3, 4	76
Obr. 10.27 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla	
- jádro – Airex C70.75, vrstva č. 5	77
Obr. 10.28 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla	
- závěrná vrstva jádra, vrstva č. 6	77
Obr. 10.29 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla	
- pásnice, vrstvy č. 7, 8, 9	77
Obr. 10.30 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla	
- zámek náběžné hrany, vrstvy č. 10, 11	78
Obr. 10.31 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla	
- zámek odtokové hrany, vrstvy č. 12, 13	78
Obr. 10.32 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla	
- zámek roh. odlehčení, vrstvy č. 14, 15	78
Obr. 10.33 Vrstvení kořenového žebro pravého výškového kormidla,	
vrstvy č. 1, 2, 3, 4, 5, 6	79
Obr. 10.34 Vrstvení koncového žebra pravého výškového kormidla,	
vrstvy č. 1, 2, 3, 4, 5, 6	80
Obr. 12.1 MKP síť stabilizátoru	84

Obr. 12.2 Vetknutí stabilizátoru k trupu letounu pomocí RBE2 prvků	85
Obr. 12.3 RBE2 prvek závěsu stabilizátor – VK	85
Obr. 12.4 Celkový MKP model stabilizátoru pro případ zatížení od poryvu	85
Obr. 12.5 MKP síť pravého výškového kormidla	86
Obr. 12.6 vetknutí a RBE2 prvek vnějšího závěsu pravého výškového kormidla	86
Obr. 12.7 vetknutí a RBE2 prvky páky ovládání a vnitřního závěsu pravého výškového kormidla	87
Obr. 12.8 Celkový MKP model pravého výškového kormidla pro případ zatížení od manévru	87
Obr. 12.9 MKP model síly pro případ zatížení od hmotového vyvážení (24 g kolmo k rovině řídicí plochy)	87
Obr. 13.1 Stabilitní porucha potahu [9]	93
Obr. 13.2 Ohybové drcení jádra [9]	93
Obr. 13.3 Smyková porucha [9]	93
Obr. 14.1 Maximální součinitele poruchy, stabilizátor – vyvažovací zatížení ...	94
Obr. 14.2 Detail maximálních součinitelů poruchy na horním potahu stabilizátoru - vyvažovací zatížení	95
Obr. 14.3 Porušené sendvičové elementy na horním potahu stabilizátoru – vyvažovací zatížení	95
Obr. 14.4 Porušené sendvičové elementy na dolním potahu stabilizátoru – vyvažovací zatížení	96
Obr. 14.5 Maximální součinitele poruchy, stabilizátor – zatížení od manévru ...	97
Obr. 14.6 Maximální součinitele poruchy, stabilizátor – zatížení od poryvu	97
Obr. 14.7 Detail maximálních součinitelů poruchy na horním potahu stabilizátoru – zatížení od poryvu	98
Obr. 14.8 Detail elementů MKP sítě stabilizátoru v místě zaoblení	98
Obr. 14.9 Detail maximálních součinitelů poruchy na předním nosníku stabilizátoru – zatížení od poryvu	99
Obr. 14.10 Maximální součinitele poruchy, VK-P – zatížení od manévru	100
Obr. 14.11 Maximální součinitele poruchy, VK-P – zatížení od hmotového vyvážení	101
Obr. 14.12 Detail rohového odlehčení VK-P – zatížení od hmotového vyvážení	101

19. Seznam tabulek

Tab. 4.1 Přibližné složení a vlastnosti skleněných vláken [5]	23
Tab. 4.2 základní vlastností některých uhlíkových vláken [5]	23
Tab. 6.1 Konstanty k výpočtu zatížení VOP	31
Tab. 6.2 Základní vstupní hodnoty pro výpočet zatížení VOP [2]	31
Tab. 6.3 Body z centrážního diagramu použité k výpočtu zatížení VOP	32
Tab. 6.4 Výsledné hodnoty obálky zatížení	35
Tab. 6.5 Výsledné hodnoty vyvažovacího zatížení VOP – část 1/2	38
Tab. 6.6 Výsledné hodnoty vyvažovacího zatížení VOP – část 2/2	39
Tab. 6.7 Kombinace normálových a úhlových zrychlení [1]	39
Tab. 6.8 Výsledné hodnoty zatížení VOP od manévru	42
Tab. 6.9 Zatížení VOP od poryvu, vyvažovací zatížení pro $n = 1$	44
Tab. 6.10 Výsledné hodnoty zatížení VOP od poryvu	45
Tab. 6.11 Výsledné provozní hodnoty zatížení VOP	46
Tab. 7.1 Maximální provozní zatížení výškového kormidla	52
Tab. 7.2 Maximální provozní zatížení stabilizátoru	53
Tab. 8.1 Souhrn výsledků hmotového vyvážení VK	65
Tab. 10.1 Materiálové vlastnosti skleněné a uhlíkových vrstev [6]	66
Tab. 10.2 Materiálové vlastnosti pěny Airex C70.75 [7]	67
Tab. 10.3 Materiálové vlastnosti dubové překližky [7]	67
Tab. 10.4 Vrstvení potahu stabilizátoru	68
Tab. 10.5 Vrstvení zadního (hlavního) nosníku stabilizátoru	71
Tab. 10.6 Vrstvení předního nosníku stabilizátoru	72
Tab. 10.7 Vrstvení předního kořenového žebra stabilizátoru	74
Tab. 10.8 Vrstvení zadního kořenového žebra stabilizátoru	74
Tab. 10.9 Vrstvení středového žebra stabilizátoru	75
Tab. 10.10 Vrstvení koncového žebra stabilizátoru	75
Tab. 10.11 Vrstvení potahu pravého výškového kormidla	75
Tab. 10.12 Vrstvení nosníku pravého výškového kormidla	79
Tab. 10.13 Vrstvení kořenového žebra pravého výškového kormidla	79
Tab. 10.14 Vrstvení středového žebra pravého výškového kormidla	79
Tab. 10.15 Vrstvení koncového žebra pravého výškového kormidla	80
Tab. 11.1 Hmotnost lepených spojů a nátěru stabilizátoru	81

Tab. 11.2 Celková hmotnost stabilizátoru	81
Tab. 11.3 Hmotnost lepených spojů a nátěru VK-P	82
Tab. 11.4 Celková hmotnost VK-P	82
Tab. 11.5 Odhad hmotnosti VK-L	82
Tab. 11.6 Celková hmotnost VOP	83
Tab. 12.1 Velikosti sil náhradního modelu vyvažovacího zatížení po rozpětí stabilizátoru	88
Tab. 12.2 Velikosti sil náhradního modelu zatížení od manévru po rozpětí stabilizátoru	88
Tab. 12.3 Velikosti sil náhradního modelu zatížení od poryvu po rozpětí stabilizátoru	89
Tab. 12.4 Velikosti sil náhradního modelu zatížení od manévru po rozpětí VK-P	89
Tab. 14.1 Příklady porušených elementů na horním potahu stabilizátoru – vyvažovací zatížení	96
Tab. 14.2 Příklady porušených elementů na dolním potahu stabilizátoru – vyvažovací zatížení	96
Tab. 14.3 Příklady porušených elementů na horním potahu stabilizátoru – zatížení od poryvu	98
Tab. 14.4 Příklad porušeného elementu na předním nosníku stabilizátoru – zatížení od poryvu	99
Tab. 14.5 Příklad porušeného elementu na horním potahu VK-P – zatížení od manévru	100

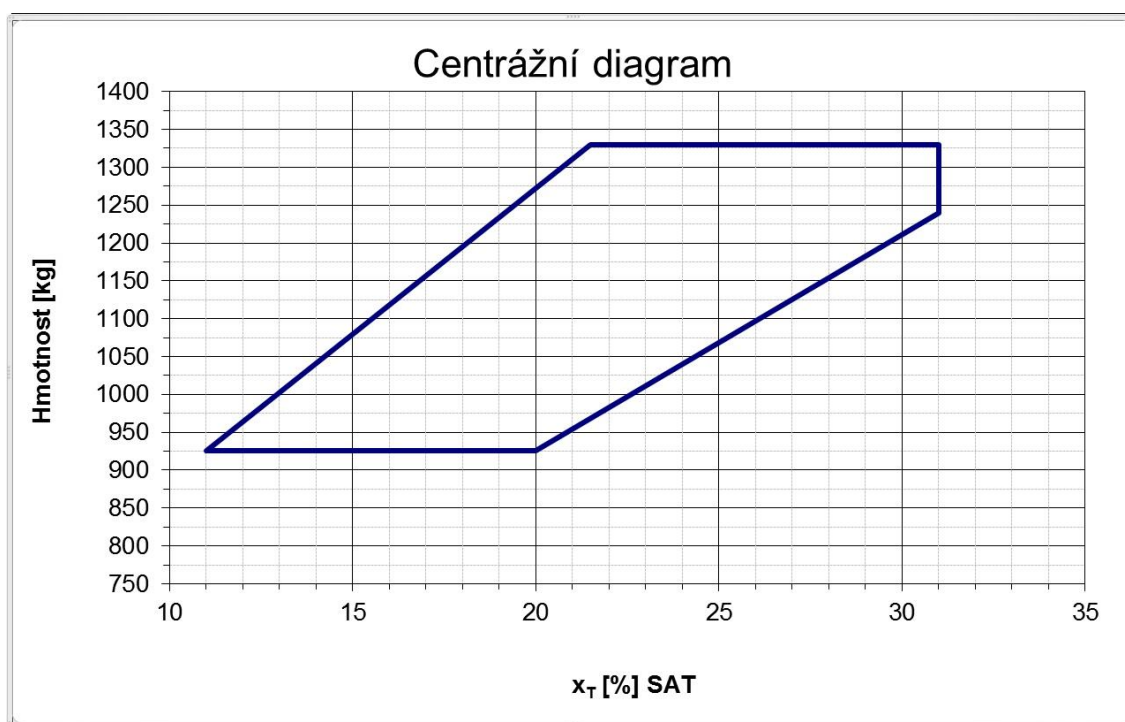
Seznam příloh

Příloha č. 1 - Centrážní diagram	114
Příloha č. 2 - Hodnoty průběhů vyvažovacího zatížení VOP	115
Příloha č. 3 - Hodnoty průběhů zatížení VOP od manévru	118
Příloha č. 4 - Hodnoty průběhů zatížení VOP od poryvu	121
Příloha č. 5 - Podrobný výpočet hmotového vyvážení VK	124
Příloha č. 6 - Určení náhradních modelů rozložení zatížení po rozpětí1	126
Příloha č. 7 - Stabilizátor - případ zatížení č. 1 – vyvažovací zatížení	137
Výsledné grafické hodnoty poruchových oblastí 1 - 4 z programu COMPOST s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách vybraných elementů.	
Příloha č. 8 - Stabilizátor - případ zatížení č. 3 – zatížení od poryvu	141
Výsledné grafické hodnoty poruchových oblastí 1 - 3 z programu COMPOST s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách vybraných elementů.	
Příloha č. 9 - VK - případ zatížení č. 1 – zatížení od manévru	144
Výsledné grafické hodnoty poruchové oblasti z programu COMPOST s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách vybraných elementů.	

Přílohy

Příloha č. 1 – Centrážní diagram

Centrážní diagram byl poskytnut firmou Evektro spol, s.r.o.



Centrážní diagram

Příloha č. 2 - Hodnoty průběhů vyvažovacího zatížení VOP

Žlutá barva značí rozsah rohového odlehčení VK a modrá barva označuje polohu závěsů.

				Spojitě zatížení		
y [m]	c [m]	C _{STAB} [m]	C _{VK} [m]	q [N.m ⁻¹]	q _{STAB} [N.m ⁻¹]	q _{VK} [N.m ⁻¹]
1.9000	0.5620	-	0.5620	-1088.229	-	1088.229
1.8774	0.5672	-	0.5672	-1098.321	-	1098.321
1.8548	0.5724	-	0.5724	-1108.412	-	1108.412
1.8322	0.5776	-	0.5776	-1118.503	-	1118.503
1.8096	0.5828	-	0.5828	-1128.594	-	1128.594
1.7870	0.5881	0.3528	0.2352	-1138.686	0.000	1138.686
1.7870	0.5881	0.3528	0.2352	-1253.693	-1544.550	290.857
1.7398	0.5989	0.3594	0.2396	-1276.901	-1573.141	296.241
1.6925	0.6098	0.3659	0.2439	-1300.108	-1601.733	301.625
1.6453	0.6207	0.3724	0.2483	-1323.316	-1630.325	307.009
1.5981	0.6316	0.3790	0.2526	-1346.523	-1658.916	312.393
1.5509	0.6425	0.3855	0.2570	-1369.731	-1687.508	317.777
1.5036	0.6534	0.3920	0.2613	-1392.938	-1716.100	323.162
1.4564	0.6643	0.3986	0.2657	-1416.146	-1744.691	328.546
1.4092	0.6751	0.4051	0.2701	-1439.353	-1773.283	333.930
1.3619	0.6860	0.4116	0.2744	-1462.561	-1801.875	339.314
1.3147	0.6969	0.4181	0.2788	-1485.768	-1830.466	344.698
1.2675	0.7078	0.4247	0.2831	-1508.976	-1859.058	350.082
1.2203	0.7187	0.4312	0.2875	-1532.183	-1887.650	355.466
1.1730	0.7296	0.4377	0.2918	-1555.391	-1916.241	360.851
1.1258	0.7405	0.4443	0.2962	-1578.598	-1944.833	366.235
1.0786	0.7513	0.4508	0.3005	-1601.806	-1973.424	371.619
1.0313	0.7622	0.4573	0.3049	-1625.013	-2002.016	377.003
0.9841	0.7731	0.4639	0.3092	-1648.221	-2030.608	382.387
0.9369	0.7840	0.4704	0.3136	-1671.428	-2059.199	387.771
0.8897	0.7949	0.4769	0.3180	-1694.636	-2087.791	393.155
0.8424	0.8058	0.4835	0.3223	-1717.843	-2116.383	398.540
0.7952	0.8167	0.4900	0.3267	-1741.051	-2144.974	403.924
0.7480	0.8275	0.4965	0.3310	-1764.258	-2173.566	409.308
0.7007	0.8384	0.5031	0.3354	-1787.466	-2202.158	414.692
0.6535	0.8493	0.5096	0.3397	-1810.673	-2230.749	420.076
0.6063	0.8602	0.5161	0.3441	-1833.881	-2259.341	425.460
0.5591	0.8711	0.5227	0.3484	-1857.088	-2287.932	430.844
0.5118	0.8820	0.5292	0.3528	-1880.296	-2316.524	436.229
0.4646	0.8929	0.5357	0.3571	-1903.503	-2345.116	441.613
0.4174	0.9037	0.5422	0.3615	-1926.711	-2373.707	446.997
0.3701	0.9146	0.5488	0.3659	-1949.918	-2402.299	452.381
0.3229	0.9255	0.5553	0.3702	-1973.126	-2430.891	457.765
0.2757	0.9364	0.5618	0.3746	-1996.333	-2459.482	463.149
0.2285	0.9473	0.5684	0.3789	-2019.541	-2488.074	468.533
0.1812	0.9582	0.5749	0.3833	-2042.748	-2516.666	473.918
0.1340	0.9691	0.5814	0.3876	-2065.956	-2545.257	479.302
0.1340	0.9691	0.5814	0.3876	-2065.956	-2545.257	479.302
0.1005	0.9768	0.5861	0.3907	0.000	0.000	0.000
0.0670	0.9845	0.5907	0.3938	0.000	0.000	0.000
0.0335	0.9922	0.5953	0.3969	0.000	0.000	0.000
0.0000	1.0000	0.6000	0.4000	0.000	0.000	0.000

Průběh spojitěho vyvažovacího zatížení VOP na VK a stabilizátoru

VK													
Spojité zatížení									Celkové zatížení				
y [m]	ΔT [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	poloha výslednice k ose otáčení [m]	ΔMk [Nm]	Mk [Nm]	Reakce v závěsech [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	
1.9000	0	0	0	0	-0.150	0	0		0	0	0	0	
1.8774	25	25	0	0	-0.151	-4	-4		25	0	0	-4	
1.8548	25	50	1	1	-0.153	-4	-8		50	1	1	-8	
1.8322	25	75	1	3	-0.154	-4	-11		75	1	3	-11	
1.8096	25	100	2	5	-0.155	-4	-15		100	2	5	-15	
1.7870	26	126	3	7	-0.063	-2	-17		126	3	7	-17	
1.7870	0	126	0	7	0.041	0	-17	-422	-297	0	7	-17	
1.7398	14	140	6	13	0.043	1	-16		-283	-14	-7	-16	
1.6925	14	154	7	20	0.044	1	-16		-269	-13	-20	-16	
1.6453	14	168	8	28	0.046	1	-15		-254	-12	-32	-15	
1.5981	15	183	8	36	0.047	1	-14		-240	-12	-44	-14	
1.5509	15	198	9	45	0.049	1	-14		-225	-11	-55	-14	
1.5036	15	213	10	55	0.050	1	-13		-210	-10	-65	-13	
1.4564	15	228	10	65	0.051	1	-12		-194	-10	-74	-12	
1.4092	16	244	11	76	0.053	1	-11		-179	-9	-83	-11	
1.3619	16	260	12	88	0.054	1	-10		-163	-8	-91	-10	
1.3147	16	276	13	101	0.056	1	-10		-147	-7	-99	-10	
1.2675	16	292	13	114	0.057	1	-9		-130	-7	-105	-9	
1.2203	17	309	14	129	0.059	1	-8		-113	-6	-111	-8	
1.1730	17	326	15	144	0.060	1	-7		-97	-5	-116	-7	
1.1258	17	343	16	159	0.062	1	-6		-79	-4	-120	-6	
1.0786	17	360	17	176	0.063	1	-4		-62	-3	-123	-4	
1.0313	18	378	17	193	0.065	1	-3		-44	-3	-126	-3	
0.9841	18	396	18	212	0.066	1	-2		-26	-2	-127	-2	
0.9369	18	414	19	231	0.067	1	-1		-8	-1	-128	-1	
0.8897	18	433	20	251	0.069	1	0		10	0	-128	0	
0.8424	19	451	21	272	0.070	1	2		29	1	-127	2	
0.7952	19	470	22	293	0.072	1	3		48	2	-125	3	
0.7480	19	490	23	316	0.073	1	4		67	3	-123	4	
0.7007	19	509	24	340	0.075	1	6		87	4	-119	6	
0.6535	20	529	25	364	0.076	2	7		106	5	-115	7	
0.6063	20	549	25	390	0.078	2	9		126	5	-109	9	
0.5591	20	569	26	416	0.079	2	11		147	6	-103	11	
0.5118	20	589	27	443	0.080	2	12		167	7	-95	12	
0.4646	21	610	28	472	0.082	2	14		188	8	-87	14	
0.4174	21	631	29	501	0.083	2	16		209	9	-78	16	
0.3701	21	652	30	531	0.085	2	17		230	10	-67	17	
0.3229	21	674	31	563	0.086	2	19		251	11	-56	19	
0.2757	22	696	32	595	0.088	2	21		273	12	-43	21	
0.2285	22	718	33	628	0.089	2	23		295	13	-30	23	
0.1812	22	740	34	663	0.091	2	25		317	14	-16	25	
0.1340	23	762	35	698	0.092	2	27		340	16	0	27	
0.1340	0	762	0	698	0.092	0	0	-340	0	0	0	0	
0.1005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.0670	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.0335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Průběh vyvažovacího zatížení VOP na výškovém kormidle

Stabilizátor													
Spojité zatížení									Celkové zatížení				
y [m]	ΔT [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	poloha výslednice k hl. nosníku [m]	ΔMk [Nm]	Mk [Nm]	Reakce v závěsech [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	
1.9000													
1.8774													
1.8548													
1.8322													
1.8096													
1.7870	0	0	0	0	0,187	0	0		0	0	0	0	
1.7870	0	0	0	0	0,187	0	0	422	422	0	0	-37	
1.7398	-74	-74	-2	-2	0,192	-14	-14		349	18	18	-51	
1.6925	-75	-149	-5	-7	0,196	-15	-29		274	15	33	-66	
1.6453	-76	-225	-9	-16	0,201	-15	-44		198	11	44	-81	
1.5981	-78	-303	-12	-28	0,205	-16	-60		120	7	52	-97	
1.5509	-79	-382	-16	-44	0,210	-17	-77		41	4	55	-113	
1.5036	-80	-462	-20	-64	0,214	-17	-94		-40	0	55	-131	
1.4564	-82	-544	-24	-88	0,219	-18	-112		-121	-4	52	-149	
1.4092	-83	-627	-28	-116	0,224	-19	-130		-204	-8	44	-167	
1.3619	-84	-711	-32	-147	0,228	-19	-150		-289	-12	32	-186	
1.3147	-86	-797	-36	-183	0,233	-20	-170		-375	-16	17	-206	
1.2675	-87	-884	-40	-223	0,237	-21	-190		-462	-20	-3	-227	
1.2203	-88	-973	-44	-266	0,242	-21	-212		-550	-24	-27	-248	
1.1730	-90	-1062	-48	-315	0,246	-22	-234		-640	-28	-55	-271	
1.1258	-91	-1154	-52	-367	0,251	-23	-257		-731	-32	-88	-293	
1.0786	-93	-1246	-57	-424	0,256	-24	-280		-824	-37	-124	-317	
1.0313	-94	-1340	-61	-485	0,260	-24	-305		-918	-41	-165	-342	
0.9841	-95	-1435	-66	-550	0,265	-25	-330		-1013	-46	-211	-367	
0.9369	-97	-1532	-70	-620	0,269	-26	-356		-1109	-50	-261	-393	
0.8897	-98	-1630	-75	-695	0,274	-27	-383		-1207	-55	-316	-420	
0.8424	-99	-1729	-79	-774	0,278	-28	-410		-1307	-59	-375	-447	
0.7952	-101	-1830	-84	-858	0,283	-28	-439		-1407	-64	-439	-476	
0.7480	-102	-1932	-89	-947	0,288	-29	-468		-1509	-69	-508	-505	
0.7007	-103	-2035	-94	-1041	0,292	-30	-498		-1613	-74	-582	-535	
0.6535	-105	-2140	-99	-1139	0,297	-31	-529		-1717	-79	-660	-566	
0.6063	-106	-2246	-104	-1243	0,301	-32	-561		-1823	-84	-744	-598	
0.5591	-107	-2353	-109	-1351	0,306	-33	-594		-1931	-89	-833	-631	
0.5118	-109	-2462	-114	-1465	0,310	-34	-628		-2039	-94	-926	-665	
0.4646	-110	-2572	-119	-1584	0,315	-35	-663		-2149	-99	-1025	-699	
0.4174	-111	-2683	-124	-1708	0,320	-36	-698		-2261	-104	-1130	-735	
0.3701	-113	-2796	-129	-1837	0,324	-37	-735		-2374	-109	-1239	-772	
0.3229	-114	-2910	-135	-1972	0,329	-38	-772		-2488	-115	-1354	-809	
0.2757	-115	-3026	-140	-2112	0,333	-38	-811		-2603	-120	-1474	-848	
0.2285	-117	-3143	-146	-2258	0,338	-39	-850		-2720	-126	-1600	-887	
0.1812	-118	-3261	-151	-2409	0,342	-40	-891		-2838	-131	-1731	-928	
0.1340	-120	-3380	-157	-2566	0,347	-41	-932		-2958	-137	-1868	-969	
0.1340	0	-3380	0	-2566	0,347	0	-932	0	-2958	0	-1868	-969	
0.1005	0	-3380	-113	-2679	0,350	0	-932		-2958	-99	-1967	-969	
0.0670	0	-3380	-113	-2793	0,353	0	-932		-2958	-99	-2066	-969	
0.0335	0	-3380	-113	-2906	0,357	0	-932		-2958	-99	-2165	-969	
0.0000	0	-3380	-113	-3019	0,360	0	-932		-2958	-99	-2264	-969	

Průběh vyvažovacího zatížení VOP na stabilizátoru

Příloha č. 3 - Hodnoty průběhů zatížení VOP od manévru

				Spojitě zatížení		
y [m]	c [m]	C _{STAB} [m]	C _{VK} [m]	q [N.m ⁻¹]	q _{STAB} [N.m ⁻¹]	q _{VK} [N.m ⁻¹]
1.9000	0.5620	-	0.5620	-1005.999	-	-1005.999
1.8774	0.5672	-	0.5672	-1015.327	-	-1015.327
1.8548	0.5724	-	0.5724	-1024.656	-	-1024.656
1.8322	0.5776	-	0.5776	-1033.985	-	-1033.985
1.8096	0.5828	-	0.5828	-1043.314	-	-1043.314
1.7870	0.5881	0.3528	0.2352	-1052.642	0.000	-1052.642
1.7870	0.5881	0.3528	0.2352	-1052.642	-555.795	-496.847
1.7398	0.5989	0.3594	0.2396	-1072.128	-566.084	-506.044
1.6925	0.6098	0.3659	0.2439	-1091.614	-576.372	-515.242
1.6453	0.6207	0.3724	0.2483	-1111.100	-586.661	-524.439
1.5981	0.6316	0.3790	0.2526	-1130.586	-596.949	-533.636
1.5509	0.6425	0.3855	0.2570	-1150.071	-607.238	-542.834
1.5036	0.6534	0.3920	0.2613	-1169.557	-617.526	-552.031
1.4564	0.6643	0.3986	0.2657	-1189.043	-627.815	-561.228
1.4092	0.6751	0.4051	0.2701	-1208.529	-638.103	-570.426
1.3619	0.6860	0.4116	0.2744	-1228.014	-648.392	-579.623
1.3147	0.6969	0.4181	0.2788	-1247.500	-658.680	-588.820
1.2675	0.7078	0.4247	0.2831	-1266.986	-668.969	-598.017
1.2203	0.7187	0.4312	0.2875	-1286.472	-679.257	-607.215
1.1730	0.7296	0.4377	0.2918	-1305.958	-689.546	-616.412
1.1258	0.7405	0.4443	0.2962	-1325.443	-699.834	-625.609
1.0786	0.7513	0.4508	0.3005	-1344.929	-710.123	-634.807
1.0313	0.7622	0.4573	0.3049	-1364.415	-720.411	-644.004
0.9841	0.7731	0.4639	0.3092	-1383.901	-730.700	-653.201
0.9369	0.7840	0.4704	0.3136	-1403.387	-740.988	-662.398
0.8897	0.7949	0.4769	0.3180	-1422.872	-751.277	-671.596
0.8424	0.8058	0.4835	0.3223	-1442.358	-761.565	-680.793
0.7952	0.8167	0.4900	0.3267	-1461.844	-771.854	-689.990
0.7480	0.8275	0.4965	0.3310	-1481.330	-782.142	-699.188
0.7007	0.8384	0.5031	0.3354	-1500.816	-792.431	-708.385
0.6535	0.8493	0.5096	0.3397	-1520.301	-802.719	-717.582
0.6063	0.8602	0.5161	0.3441	-1539.787	-813.008	-726.780
0.5591	0.8711	0.5227	0.3484	-1559.273	-823.296	-735.977
0.5118	0.8820	0.5292	0.3528	-1578.759	-833.585	-745.174
0.4646	0.8929	0.5357	0.3571	-1598.244	-843.873	-754.371
0.4174	0.9037	0.5422	0.3615	-1617.730	-854.162	-763.569
0.3701	0.9146	0.5488	0.3659	-1637.216	-864.450	-772.766
0.3229	0.9255	0.5553	0.3702	-1656.702	-874.739	-781.963
0.2757	0.9364	0.5618	0.3746	-1676.188	-885.027	-791.161
0.2285	0.9473	0.5684	0.3789	-1695.673	-895.316	-800.358
0.1812	0.9582	0.5749	0.3833	-1715.159	-905.604	-809.555
0.1340	0.9691	0.5814	0.3876	-1734.645	-915.893	-818.752
0.1340	0.9691	0.5814	0.3876	-1734.645	-915.893	-818.752
0.1005	0.9768	0.5861	0.3907	0.000	0.000	0.000
0.0670	0.9845	0.5907	0.3938	0.000	0.000	0.000
0.0335	0.9922	0.5953	0.3969	0.000	0.000	0.000
0.0000	1.0000	0.6000	0.4000	0.000	0.000	0.000

Průběh spojitěho zatížení VOP od manévru na VK a stabilizátoru

VK												
Spojité zatížení								Celkové zatížení				
y [m]	ΔT [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	poloha výslednice k ose otáčení [m]	ΔMk [Nm]	Mk [Nm]	Reakce v závěsech [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	Mk [Nm]
1.9000	0	0	0	0	-0.150	0	0		0	0	0	0
1.8774	-23	-23	0	0	-0.151	3	3		-23	0	0	3
1.8548	-23	-46	-1	-1	-0.153	4	7		-46	-1	-1	7
1.8322	-23	-69	-1	-2	-0.154	4	11		-69	-1	-2	11
1.8096	-23	-93	-2	-4	-0.155	4	14		-93	-2	-4	14
1.7870	-24	-116	-2	-7	-0.063	1	16		-116	-2	-7	16
1.7870	0	-116	0	-7	0.041	0	16	620	503	0	-7	16
1.7398	-24	-140	-6	-13	0.043	-1	15		480	23	17	15
1.6925	-24	-164	-7	-20	0.044	-1	14		456	22	39	14
1.6453	-25	-189	-8	-28	0.046	-1	12		431	21	60	12
1.5981	-25	-214	-10	-38	0.047	-1	11		406	20	79	11
1.5509	-25	-239	-11	-48	0.049	-1	10		381	19	98	10
1.5036	-26	-265	-12	-60	0.050	-1	9		355	17	115	9
1.4564	-26	-291	-13	-73	0.051	-1	7		328	16	132	7
1.4092	-27	-318	-14	-88	0.053	-1	6		302	15	146	6
1.3619	-27	-345	-16	-103	0.054	-1	5		275	14	160	5
1.3147	-28	-373	-17	-120	0.056	-2	3		247	12	172	3
1.2675	-28	-401	-18	-139	0.057	-2	1		219	11	183	1
1.2203	-28	-429	-20	-158	0.059	-2	0		190	10	193	0
1.1730	-29	-458	-21	-179	0.060	-2	-2		162	8	201	-2
1.1258	-29	-487	-22	-201	0.062	-2	-4		132	7	208	-4
1.0786	-30	-517	-24	-225	0.063	-2	-6		102	6	214	-6
1.0313	-30	-547	-25	-250	0.065	-2	-8		72	4	218	-8
0.9841	-31	-578	-27	-277	0.066	-2	-10		42	3	221	-10
0.9369	-31	-609	-28	-305	0.067	-2	-12		11	1	222	-12
0.8897	-32	-641	-30	-334	0.069	-2	-14		-21	0	222	-14
0.8424	-32	-672	-31	-365	0.070	-2	-16		-53	-2	220	-16
0.7952	-32	-705	-33	-398	0.072	-2	-18		-85	-3	217	-18
0.7480	-33	-738	-34	-432	0.073	-2	-21		-118	-5	212	-21
0.7007	-33	-771	-36	-468	0.075	-2	-23		-151	-6	205	-23
0.6535	-34	-805	-37	-506	0.076	-3	-26		-185	-8	197	-26
0.6063	-34	-839	-39	-546	0.078	-3	-29		-219	-10	188	-29
0.5591	-35	-873	-40	-588	0.079	-3	-31		-254	-11	177	-31
0.5118	-35	-908	-42	-632	0.080	-3	-34		-289	-13	164	-34
0.4646	-35	-944	-44	-678	0.082	-3	-37		-324	-14	150	-37
0.4174	-36	-979	-45	-726	0.083	-3	-40		-360	-16	133	-40
0.3701	-36	-1016	-47	-776	0.085	-3	-43		-396	-18	116	-43
0.3229	-37	-1052	-49	-828	0.086	-3	-46		-433	-20	96	-46
0.2757	-37	-1090	-51	-882	0.088	-3	-50		-470	-21	75	-50
0.2285	-38	-1127	-52	-938	0.089	-3	-53		-508	-23	52	-53
0.1812	-38	-1165	-54	-996	0.091	-3	-56		-546	-25	27	-56
0.1340	-38	-1204	-56	-1056	0.092	-4	-60		-584	-27	0	-60
0.1340	0	-1204	0	-1056	0.092	0	-60	584	0	0	0	0
0.1005	0	0	-	-	-	-	-		-	-	-	-
0.0670	0	0	-	-	-	-	-		-	-	-	-
0.0335	0	0	-	-	-	-	-		-	-	-	-
0.0000	0	0	-	-	-	-	-		-	-	-	-

Průběh zatížení VOP od manévru na výškovém kormidle

Stabilizátor												
Spojité zatížení								Celkové zatížení				
y [m]	ΔT [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	poloha výslednice k hl. nosníku [m]	ΔMk [Nm]	Mk [Nm]	Reakce v závěsech[N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	Mk [Nm]
1.9000												
1.8774												
1.8548												
1.8322												
1.8096												
1.7870	0	0	0	0	0,119	0	0		0	0	0	0
1.7870	0	0	0	0	0,119	0	0	-620	-620	0	0	54
1.7398	-26	-26	-1	-1	0,122	-3	-3		-646	-30	-30	51
1.6925	-27	-53	-2	-3	0,125	-3	-7		-673	-31	-61	47
1.6453	-27	-81	-3	-6	0,128	-4	-10		-701	-32	-93	44
1.5981	-28	-109	-4	-10	0,132	-4	-14		-729	-34	-127	40
1.5509	-28	-137	-6	-16	0,135	-4	-18		-757	-35	-162	36
1.5036	-29	-166	-7	-23	0,138	-4	-22		-786	-36	-199	32
1.4564	-29	-196	-9	-32	0,142	-4	-26		-815	-38	-237	28
1.4092	-30	-226	-10	-42	0,145	-4	-30		-845	-39	-276	24
1.3619	-30	-256	-11	-53	0,148	-5	-35		-876	-41	-316	19
1.3147	-31	-287	-13	-66	0,152	-5	-39		-906	-42	-358	15
1.2675	-31	-318	-14	-80	0,155	-5	-44		-938	-44	-402	10
1.2203	-32	-350	-16	-96	0,158	-5	-49		-970	-45	-447	5
1.1730	-32	-382	-17	-113	0,161	-5	-54		-1002	-47	-494	0
1.1258	-33	-415	-19	-132	0,165	-5	-60		-1035	-48	-542	-6
1.0786	-33	-448	-20	-152	0,168	-6	-65		-1068	-50	-591	-11
1.0313	-34	-482	-22	-174	0,171	-6	-71		-1102	-51	-643	-17
0.9841	-34	-516	-24	-198	0,175	-6	-77		-1136	-53	-695	-23
0.9369	-35	-551	-25	-223	0,178	-6	-83		-1171	-54	-750	-29
0.8897	-35	-586	-27	-250	0,181	-6	-90		-1206	-56	-806	-36
0.8424	-36	-622	-29	-279	0,185	-7	-96		-1242	-58	-864	-42
0.7952	-36	-658	-30	-309	0,188	-7	-103		-1278	-60	-923	-49
0.7480	-37	-695	-32	-341	0,191	-7	-110		-1315	-61	-985	-56
0.7007	-37	-732	-34	-374	0,195	-7	-117		-1352	-63	-1048	-63
0.6535	-38	-770	-35	-410	0,198	-7	-125		-1390	-65	-1112	-71
0.6063	-38	-808	-37	-447	0,201	-8	-133		-1428	-67	-1179	-79
0.5591	-39	-847	-39	-486	0,204	-8	-140		-1466	-68	-1247	-87
0.5118	-39	-886	-41	-527	0,208	-8	-149		-1505	-70	-1317	-95
0.4646	-40	-925	-43	-570	0,211	-8	-157		-1545	-72	-1389	-103
0.4174	-40	-966	-45	-615	0,214	-9	-166		-1585	-74	-1463	-112
0.3701	-41	-1006	-47	-661	0,218	-9	-174		-1626	-76	-1539	-120
0.3229	-41	-1047	-48	-710	0,221	-9	-183		-1667	-78	-1617	-130
0.2757	-42	-1089	-50	-760	0,224	-9	-193		-1708	-80	-1697	-139
0.2285	-42	-1131	-52	-813	0,228	-10	-202		-1750	-82	-1778	-148
0.1812	-43	-1173	-54	-867	0,231	-10	-212		-1793	-84	-1862	-158
0.1340	-43	-1216	-56	-923	0,234	-10	-222		-1836	-86	-1948	-168
0.1340	0	-1216	0	-923	0,234	0	-222	0	-1836	0	-1948	-168
0.1005	0	-1216	-41	-964	0,237	0	-222		-1836	-62	-2009	-168
0.0670	0	-1216	-41	-1005	0,239	0	-222		-1836	-62	-2071	-168
0.0335	0	-1216	-41	-1046	0,241	0	-222		-1836	-62	-2132	-168
0.0000	0	-1216	-41	-1086	0,244	0	-222		-1836	-62	-2194	-168

Průběh zatížení VOP od manévru na stabilizátoru

Příloha č. 4 - Hodnoty průběhů zatížení VOP od poryvu

				Spojitě zatížení		
y [m]	c [m]	C _{STAB} [m]	C _{VK} [m]	q [N.m ⁻¹]	q _{STAB} [N.m ⁻¹]	q _{VK} [N.m ⁻¹]
1.9000	0.5620	-	0.5620	-1221.676	-	-1221.676
1.8774	0.5672	-	0.5672	-1233.004	-	-1233.004
1.8548	0.5724	-	0.5724	-1244.333	-	-1244.333
1.8322	0.5776	-	0.5776	-1255.662	-	-1255.662
1.8096	0.5828	-	0.5828	-1266.991	-	-1266.991
1.7870	0.5881	0.3528	0.2352	-1278.319	0.000	-1278.319
1.7870	0.5881	0.3528	0.2352	-1278.319	-1133.869	-144.450
1.7398	0.5989	0.3594	0.2396	-1301.983	-1154.859	-147.124
1.6925	0.6098	0.3659	0.2439	-1325.646	-1175.848	-149.798
1.6453	0.6207	0.3724	0.2483	-1349.309	-1196.838	-152.472
1.5981	0.6316	0.3790	0.2526	-1372.973	-1217.827	-155.146
1.5509	0.6425	0.3855	0.2570	-1396.636	-1238.816	-157.820
1.5036	0.6534	0.3920	0.2613	-1420.300	-1259.806	-160.494
1.4564	0.6643	0.3986	0.2657	-1443.963	-1280.795	-163.168
1.4092	0.6751	0.4051	0.2701	-1467.626	-1301.785	-165.842
1.3619	0.6860	0.4116	0.2744	-1491.290	-1322.774	-168.516
1.3147	0.6969	0.4181	0.2788	-1514.953	-1343.763	-171.190
1.2675	0.7078	0.4247	0.2831	-1538.616	-1364.753	-173.864
1.2203	0.7187	0.4312	0.2875	-1562.280	-1385.742	-176.538
1.1730	0.7296	0.4377	0.2918	-1585.943	-1406.732	-179.212
1.1258	0.7405	0.4443	0.2962	-1609.607	-1427.721	-181.886
1.0786	0.7513	0.4508	0.3005	-1633.270	-1448.710	-184.559
1.0313	0.7622	0.4573	0.3049	-1656.933	-1469.700	-187.233
0.9841	0.7731	0.4639	0.3092	-1680.597	-1490.689	-189.907
0.9369	0.7840	0.4704	0.3136	-1704.260	-1511.679	-192.581
0.8897	0.7949	0.4769	0.3180	-1727.923	-1532.668	-195.255
0.8424	0.8058	0.4835	0.3223	-1751.587	-1553.657	-197.929
0.7952	0.8167	0.4900	0.3267	-1775.250	-1574.647	-200.603
0.7480	0.8275	0.4965	0.3310	-1798.913	-1595.636	-203.277
0.7007	0.8384	0.5031	0.3354	-1822.577	-1616.626	-205.951
0.6535	0.8493	0.5096	0.3397	-1846.240	-1637.615	-208.625
0.6063	0.8602	0.5161	0.3441	-1869.904	-1658.604	-211.299
0.5591	0.8711	0.5227	0.3484	-1893.567	-1679.594	-213.973
0.5118	0.8820	0.5292	0.3528	-1917.230	-1700.583	-216.647
0.4646	0.8929	0.5357	0.3571	-1940.894	-1721.573	-219.321
0.4174	0.9037	0.5422	0.3615	-1964.557	-1742.562	-221.995
0.3701	0.9146	0.5488	0.3659	-1988.220	-1763.551	-224.669
0.3229	0.9255	0.5553	0.3702	-2011.884	-1784.541	-227.343
0.2757	0.9364	0.5618	0.3746	-2035.547	-1805.530	-230.017
0.2285	0.9473	0.5684	0.3789	-2059.210	-1826.520	-232.691
0.1812	0.9582	0.5749	0.3833	-2082.874	-1847.509	-235.365
0.1340	0.9691	0.5814	0.3876	-2106.537	-1868.499	-238.039
0.1340	0.9691	0.5814	0.3876	-2106.537	-1868.499	-238.039
0.1005	0.9768	0.5861	0.3907	0.000	0.000	0.000
0.0670	0.9845	0.5907	0.3938	0.000	0.000	0.000
0.0335	0.9922	0.5953	0.3969	0.000	0.000	0.000
0.0000	1.0000	0.6000	0.4000	0.000	0.000	0.000

Průběh spojitěho zatížení VOP od poryvu na VK a stabilizátoru

VK												
Spojitě zatížení								Celkové zatížení				
y [m]	ΔT [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	poloha výslednice k ose otáčení [m]	ΔMk [Nm]	Mk [Nm]	Reakce v závěsech [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	Mk [Nm]
1.9000	0	0	0	0	-0.150	0	0		0	0	0	0
1.8774	-28	-28	0	0	-0.151	4	4		-28	0	0	4
1.8548	-28	-56	-1	-1	-0.153	4	8		-56	-1	-1	8
1.8322	-28	-84	-2	-3	-0.154	4	13		-84	-2	-3	13
1.8096	-29	-112	-2	-5	-0.155	4	17		-112	-2	-5	17
1.7870	-29	-141	-3	-8	-0.063	2	19		-141	-3	-8	19
1.7870	0	-141	0	-8	0.041	0	19	291	150	0	-8	19
1.7398	-7	-148	-7	-15	0.043	0	19		143	7	-1	19
1.6925	-7	-155	-7	-22	0.044	0	18		136	7	6	18
1.6453	-7	-162	-7	-29	0.046	0	18		129	6	12	18
1.5981	-7	-170	-8	-37	0.047	0	18		122	6	18	18
1.5509	-7	-177	-8	-45	0.049	0	17		114	6	23	17
1.5036	-8	-184	-9	-54	0.050	0	17		107	5	29	17
1.4564	-8	-192	-9	-63	0.051	0	17		99	5	33	17
1.4092	-8	-200	-9	-72	0.053	0	16		91	4	38	16
1.3619	-8	-208	-10	-82	0.054	0	16		83	4	42	16
1.3147	-8	-216	-10	-92	0.056	0	15		75	4	46	15
1.2675	-8	-224	-10	-102	0.057	0	15		67	3	49	15
1.2203	-8	-232	-11	-113	0.059	0	14		59	3	52	14
1.1730	-8	-241	-11	-124	0.060	-1	14		51	3	55	14
1.1258	-9	-249	-12	-136	0.062	-1	13		42	2	57	13
1.0786	-9	-258	-12	-148	0.063	-1	13		33	2	59	13
1.0313	-9	-267	-12	-160	0.065	-1	12		25	1	60	12
0.9841	-9	-275	-13	-173	0.066	-1	12		16	1	61	12
0.9369	-9	-285	-13	-186	0.067	-1	11		7	1	62	11
0.8897	-9	-294	-14	-200	0.069	-1	10		-2	0	62	10
0.8424	-9	-303	-14	-214	0.070	-1	10		-12	0	61	10
0.7952	-9	-312	-15	-228	0.072	-1	9		-21	-1	61	9
0.7480	-10	-322	-15	-243	0.073	-1	8		-31	-1	59	8
0.7007	-10	-332	-15	-259	0.075	-1	8		-40	-2	58	8
0.6535	-10	-341	-16	-275	0.076	-1	7		-50	-2	56	7
0.6063	-10	-351	-16	-291	0.078	-1	6		-60	-3	53	6
0.5591	-10	-361	-17	-308	0.079	-1	5		-70	-3	50	5
0.5118	-10	-371	-17	-325	0.080	-1	5		-80	-4	46	5
0.4646	-10	-382	-18	-343	0.082	-1	4		-91	-4	42	4
0.4174	-10	-392	-18	-361	0.083	-1	3		-101	-5	38	3
0.3701	-11	-403	-19	-380	0.085	-1	2		-112	-5	33	2
0.3229	-11	-413	-19	-399	0.086	-1	1		-122	-6	27	1
0.2757	-11	-424	-20	-419	0.088	-1	0		-133	-6	21	0
0.2285	-11	-435	-20	-439	0.089	-1	-1		-144	-7	15	-1
0.1812	-11	-446	-21	-460	0.091	-1	-2		-155	-7	8	-2
0.1340	-11	-457	-21	-481	0.092	-1	-3		-166	-8	0	-3
0.1340	0	-457	0	-481	0.092	0	-3	166	0	0	0	0
0.1005	0	0	-	-	-	-	-		-	-	-	-
0.0670	0	0	-	-	-	-	-		-	-	-	-
0.0335	0	0	-	-	-	-	-		-	-	-	-
0.0000	0	0	-	-	-	-	-		-	-	-	-

Průběh zatížení VOP od poryvu na výškovém kormidle

Stabilizátor												
Spojité zatížení								Celkové zatížení				
y [m]	ΔT [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	poloha výslednice k hl. nosníku [m]	ΔMk [Nm]	Mk [Nm]	Reakce v závěsech [N]	T [N]	ΔMo [Nm]	Mo [Nm]	Mk [Nm]
1.9000												
1.8774												
1.8548												
1.8322												
1.8096												
1.7870	0	0	0	0	0,166	0	0		0	0	0	0
1.7870	0	0	0	0	0,166	0	0	-291	-291	0	0	25
1.7398	-54	-54	-1	-1	0,170	-9	-9		-345	-15	-15	16
1.6925	-55	-109	-4	-5	0,174	-10	-19		-400	-18	-33	7
1.6453	-56	-165	-6	-12	0,178	-10	-29		-456	-20	-53	-3
1.5981	-57	-222	-9	-21	0,183	-10	-39		-513	-23	-76	-14
1.5509	-58	-280	-12	-33	0,187	-11	-50		-571	-26	-101	-25
1.5036	-59	-339	-15	-47	0,191	-11	-61		-630	-28	-130	-36
1.4564	-60	-399	-17	-65	0,195	-12	-73		-690	-31	-161	-48
1.4092	-61	-460	-20	-85	0,199	-12	-85		-751	-34	-195	-60
1.3619	-62	-522	-23	-108	0,203	-13	-98		-813	-37	-232	-72
1.3147	-63	-585	-26	-134	0,208	-13	-111		-876	-40	-272	-85
1.2675	-64	-649	-29	-163	0,212	-14	-124		-940	-43	-315	-99
1.2203	-65	-714	-32	-196	0,216	-14	-138		-1005	-46	-361	-113
1.1730	-66	-780	-35	-231	0,220	-15	-153		-1071	-49	-410	-128
1.1258	-67	-847	-38	-269	0,224	-15	-168		-1138	-52	-462	-143
1.0786	-68	-915	-42	-311	0,229	-16	-183		-1206	-55	-517	-158
1.0313	-69	-984	-45	-356	0,233	-16	-199		-1275	-59	-576	-174
0.9841	-70	-1054	-48	-404	0,237	-17	-216		-1345	-62	-638	-191
0.9369	-71	-1125	-51	-455	0,241	-17	-233		-1416	-65	-703	-208
0.8897	-72	-1196	-55	-510	0,245	-18	-251		-1488	-69	-771	-225
0.8424	-73	-1269	-58	-568	0,249	-18	-269		-1561	-72	-843	-244
0.7952	-74	-1343	-62	-630	0,254	-19	-288		-1634	-75	-919	-262
0.7480	-75	-1418	-65	-695	0,258	-19	-307		-1709	-79	-998	-282
0.7007	-76	-1494	-69	-764	0,262	-20	-327		-1785	-83	-1080	-301
0.6535	-77	-1571	-72	-836	0,266	-20	-347		-1862	-86	-1166	-322
0.6063	-78	-1649	-76	-912	0,270	-21	-368		-1940	-90	-1256	-343
0.5591	-79	-1727	-80	-992	0,274	-22	-390		-2019	-93	-1350	-365
0.5118	-80	-1807	-83	-1076	0,279	-22	-412		-2098	-97	-1447	-387
0.4646	-81	-1888	-87	-1163	0,283	-23	-435		-2179	-101	-1548	-410
0.4174	-82	-1970	-91	-1254	0,287	-23	-459		-2261	-105	-1653	-433
0.3701	-83	-2053	-95	-1349	0,291	-24	-483		-2344	-109	-1762	-457
0.3229	-84	-2136	-99	-1448	0,295	-25	-507		-2428	-113	-1874	-482
0.2757	-85	-2221	-103	-1551	0,300	-25	-533		-2512	-117	-1991	-507
0.2285	-86	-2307	-107	-1658	0,304	-26	-559		-2598	-121	-2112	-533
0.1812	-87	-2394	-111	-1769	0,308	-27	-586		-2685	-125	-2236	-560
0.1340	-88	-2481	-115	-1884	0,312	-27	-613		-2773	-129	-2365	-588
0.1340	0	-2481	0	-1884	0,312	0	-613	0	-2773	0	-2365	-588
0.1005	0	-2481	-83	-1967	0,315	0	-613		-2773	-93	-2458	-588
0.0670	0	-2481	-83	-2050	0,318	0	-613		-2773	-93	-2551	-588
0.0335	0	-2481	-83	-2133	0,321	0	-613		-2773	-93	-2644	-588
0.0000	0	-2481	-83	-2216	0,324	0	-613		-2773	-93	-2737	-588

Průběh zatížení VOP od poryvu na stabilizátoru

Příloha č. 5 – Podrobný výpočet hmotového vyvážení VK

hmoty před osou otáčení kormidla								
typ hmoty	Počet vrstev	S [m ²]	gramáž [g/m ²]	m [g]	x [mm]	y [mm]	m . x [g.mm]	m . x . y [g.mm ²]
VK-P zámek náběžné hrany	2	0,078	347	54,132	26,219	929,396	1419,286908	1319079,575
VK-L zámek náběžné hrany	2	0,078	347	54,132	26,219	-929,396	1419,286908	-1319079,575
VK-P žebro koncové	4	0,047	347	65,236	80,267	1800,86	5236,298012	9429839,638
VK-L žebro koncové	4	0,047	347	65,236	80,267	-1800,86	5236,298012	-9429839,638
celkem							10693,02	0

Určení hmotového vyvážení VK – hmoty před osou otáčení VK

Lepené spoje								
místo spoje	S [m ²]	t [mm]	gramáž [g/cm ³]	m [g]	x [mm]	y [mm]	x . m [g.mm]	m . x . y [g.mm ²]
VK-P zámek náběžné hrany	0,078	2	1,3	202,8	26,219	929,396	5317,2132	4941796,679
VK-L zámek náběžné hrany	0,078	2	1,3	202,8	26,219	-929,396	5317,2132	-4941796,679
VK-P zámek odtokové hrany	0,08	2	1,3	208	-290,048	1098,543	-60329,984	-66275081,613
VK-L zámek odtokové hrany	0,08	2	1,3	208	-290,048	-1098,543	-60329,984	66275081,613
VK-P zámek rohového odlehčení	0,05	2	1,3	130	-96,75	1959,042	-12577,5	-24639850,755
VK-L zámek rohového odlehčení	0,05	2	1,3	130	-96,75	-1959,042	-12577,5	24639850,755
VK-P lem žebra koncového	0,02	2	1,3	52	56,13	1795,916	2918,76	5241847,784
VK-L lem žebra koncového	0,02	2	1,3	52	56,13	-1795,916	2918,76	-5241847,784
VK-P lem žebra středového	0,0185	2	1,3	48,1	-137,42	884,964	-6609,902	-5849525,314
VK-L lem žebra středového	0,0185	2	1,3	48,1	-137,42	-884,964	-6609,902	5849525,314
VK-P lem žebra kořenového	0,0225	2	1,3	58,5	-167,055	125,569	-9772,7175	-1227150,364
VK-L lem žebra kořenového	0,0225	2	1,3	58,5	-167,055	-125,569	-9772,7175	1227150,364
VK-P lem nosníku	0,0125	2	1,3	32,5	-35,591	1693,497	-1156,7075	-1958880,681
VK-L lem nosníku	0,0125	2	1,3	32,5	-35,591	-1693,497	-1156,7075	1958880,681
celkem							-164421,6756	0

Určení hmotového vyvážení VK – hmoty lepených spojů

hmoty za osou otáčení kormidla								
typ hmoty	počet vrstev	S [m²]	gramáž [g/m²]	m [g]	x [mm]	y [mm]	x . m [g.mm]	m . x . y [g.mm²]
VK-P potah horní (dolní)vnější vrstva	2	0,734	143	209,924	-114,948	1036,798	-24130,34395	-25018292,35
VK-L potah horní (dolní)vnější vrstva	2	0,734	143	209,924	-114,948	-1036,798	-24130,34395	25018292,35
VK-P potah horní (dolní)vnější vrstva	2	0,734	347	509,396	-114,948	1036,798	-58554,05141	-60708723,39
VK-L potah horní (dolní)vnější vrstva	2	0,734	347	509,396	-114,948	-1036,798	-58554,05141	60708723,39
VK-P výztuha potahu menší	2	0,017	434	14,756	-54,919	1755,988	-810,384764	-1423025,921
VK-L výztuha potahu menší	2	0,017	434	14,756	-54,919	-1755,988	-810,384764	1423025,921
VK-P jádro AIREX 3 mm	2	0,449	80	71,84	-155,048	1030,587	-11138,64832	-11479346,16
VK-L jádro AIREX 3 mm	2	0,449	80	71,84	-155,048	-1030,587	-11138,64832	11479346,16
VK-P závěrná vrstva jádra	2	0,734	197	289,196	-114,948	1036,798	-33242,50181	-34465759,39
VK-L závěrná vrstva jádra	2	0,734	197	289,196	-114,948	-1036,798	-33242,50181	34465759,39
VK-P pásnice	6	0,084	287	144,648	-29,924	970,022	-4328,446752	-4198688,575
VK-L pásnice	6	0,084	287	144,648	-29,924	-970,022	-4328,446752	4198688,575
VK-P zámek odtokové hrany	2	0,08	347	55,52	-290,048	1098,543	-16103,46496	-17690348,71
VK-L zámek odtokové hrany	2	0,08	347	55,52	-290,048	-1098,543	-16103,46496	17690348,71
VK-P zámek rohového odlehčení	2	0,05	347	34,7	-96,75	1959,042	-3357,225	-6576944,778
VK-L zámek rohového odlehčení	2	0,05	347	34,7	-96,75	-1959,042	-3357,225	6576944,778
VK-P žebro středové	4	0,034	347	47,192	-123,986	890,159	-5851,147312	-5208451,44
VK-L žebro středové	4	0,034	347	47,192	-123,986	-890,159	-5851,147312	5208451,44
VK-P žebro kořenové	4	0,044	347	61,072	-149,735	122,308	-9144,61592	-1118459,684
VK-L žebro kořenové	4	0,044	347	61,072	-149,735	-122,308	-9144,61592	1118459,684
VK-P žebro kořenové výztuha	2	0,01	434	8,68	-42,481	129,917	-368,73508	-47904,95539
VK-L žebro kořenové výztuha	2	0,01	434	8,68	-42,481	-129,917	-368,73508	47904,95539
VK-P nosník	4	0,023	347	31,924	-20,603	1692,855	-657,730172	-1113441,81
VK-L nosník	4	0,023	347	31,924	-20,603	-1692,855	-657,730172	1113441,81
VK-L flettner	-	-	-	500	-283,152	-605,5	-141576	85724268
VK-L servo flettneru	-	-	-	800	-120	-460	-60000	27600000
VK-P barva	-	1,57	0,16	251,2	-114,948	1036,798	-28874,9376	-29937477,55
VK-L barva	-	1,57	0,16	251,2	-114,948	-1036,798	-28874,9376	29937477,55
celkem							-86624,8128	113324268

Určení hmotového vyvážení VK – hmoty za osou otáčení VK

$$\sum m_i \cdot x_i = -745\,811 \text{ [g.mm]}$$

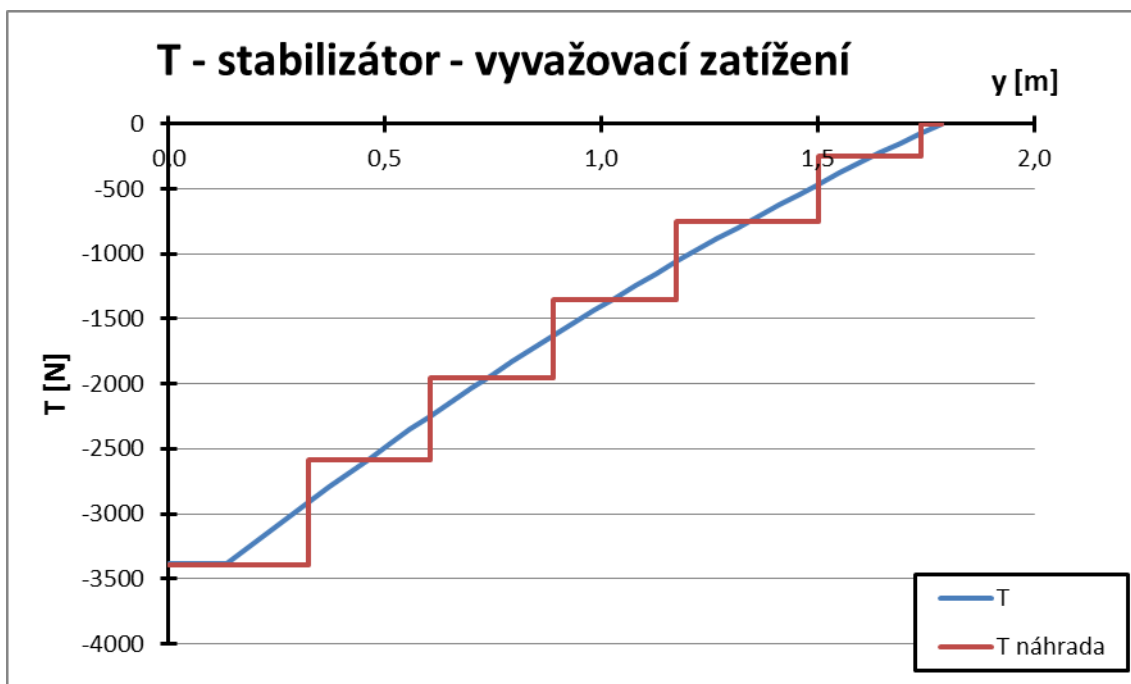
$$\sum m_i \cdot x_i \cdot y_i = 113\,324\,268 \text{ [g.mm}^2\text{]}$$

Příloha č. 6 – Určení náhradních modelů rozložení zatížení po rozpětí

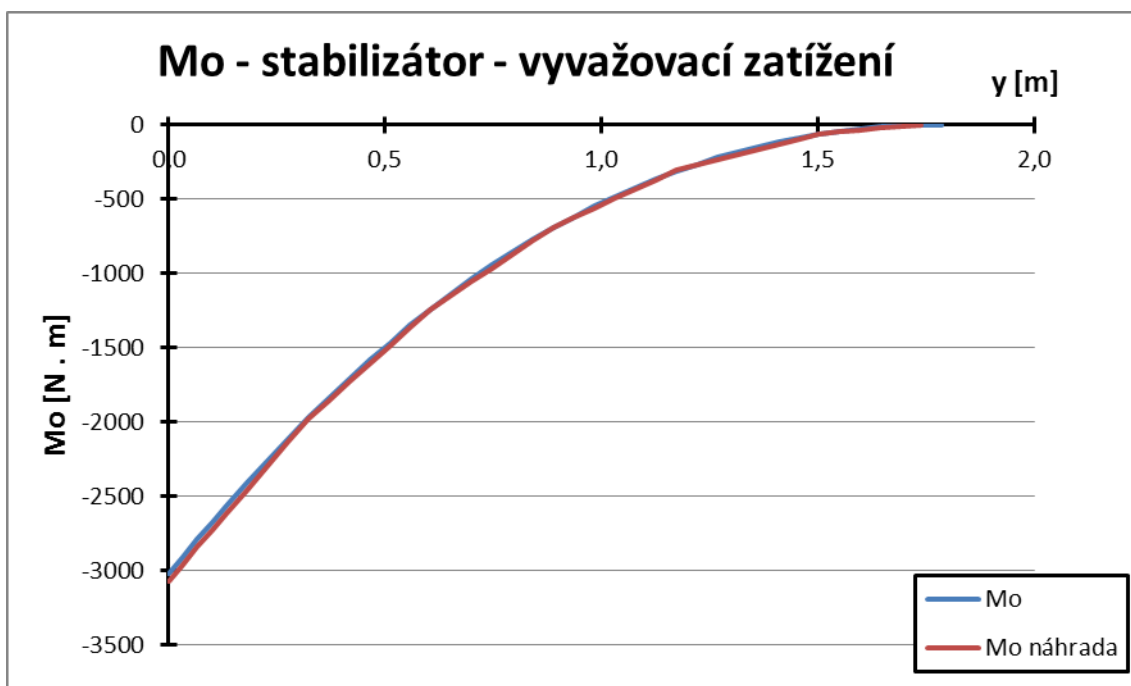
Žlutá barva značí řezy pro zavedení náhradních sil a modrá barva označuje velikost této náhradní síly v daném řezu

Stabilizátor - vyvažovací zatížení								
Provozní								Početní (k = 1,875)
y [m]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	Rameno MK [m]	T náhrada [N]	Mo náhrada [Nm]	Mk náhrada [Nm]	T [N]
1,7870	0	0	0	0,187		0	0	
1,7870	0	0	0	0,187		0	0	
1,7398	-74	-2	-14	0,192		0	0	
1,7398	-74	-2	-14	0,192	-250	0,000	-47,889	-469
1,6925	-149	-7	-29	0,196		-11,807	-47,889	
1,6453	-225	-16	-44	0,201		-23,614	-47,889	
1,5981	-303	-28	-60	0,205		-35,421	-47,889	
1,5509	-382	-44	-77	0,210		-47,229	-47,889	
1,5036	-462	-64	-94	0,214		-59,036	-47,889	
1,5036	-462	-64	-94	0,214	-500	-59,036	-155,097	-938
1,4564	-544	-88	-112	0,219		-94,457	-155,097	
1,4092	-627	-116	-130	0,224		-129,879	-155,097	
1,3619	-711	-147	-150	0,228		-165,300	-155,097	
1,3147	-797	-183	-170	0,233		-200,721	-155,097	
1,2675	-884	-223	-190	0,237		-236,143	-155,097	
1,2203	-973	-266	-212	0,242		-271,564	-155,097	
1,1730	-1062	-315	-234	0,246		-306,986	-155,097	
1,1730	-1062	-315	-234	0,246	-600	-306,986	-302,949	-1125
1,1258	-1154	-367	-257	0,251		-370,744	-302,949	
1,0786	-1246	-424	-280	0,256		-434,503	-302,949	
1,0313	-1340	-485	-305	0,260		-498,261	-302,949	
0,9841	-1435	-550	-330	0,265		-562,020	-302,949	
0,9369	-1532	-620	-356	0,269		-625,779	-302,949	
0,8897	-1630	-695	-383	0,274		-689,537	-302,949	
0,8897	-1630	-695	-383	0,274	-600	-689,537	-467,260	-1125
0,8424	-1729	-774	-410	0,278		-781,633	-467,260	
0,7952	-1830	-858	-439	0,283		-873,729	-467,260	
0,7480	-1932	-947	-468	0,288		-965,824	-467,260	
0,7007	-2035	-1041	-498	0,292		-1057,920	-467,260	
0,6535	-2140	-1139	-529	0,297		-1150,016	-467,260	
0,6063	-2246	-1243	-561	0,301		-1242,111	-467,260	
0,6063	-2246	-1243	-561	0,301	-640	-1242,111	-660,082	-1200
0,5591	-2353	-1351	-594	0,306		-1364,433	-660,082	
0,5118	-2462	-1465	-628	0,310		-1486,755	-660,082	
0,4646	-2572	-1584	-663	0,315		-1609,077	-660,082	
0,4174	-2683	-1708	-698	0,320		-1731,399	-660,082	
0,3701	-2796	-1837	-735	0,324		-1853,721	-660,082	
0,3229	-2910	-1972	-772	0,329		-1976,043	-660,082	
0,3229	-2910	-1972	-772	0,329	-800	-1976,043	-923,055	-1500
0,2757	-3026	-2112	-811	0,333		-2136,148	-923,055	
0,2285	-3143	-2258	-850	0,338		-2296,253	-923,055	
0,1812	-3261	-2409	-891	0,342		-2456,358	-923,055	
0,1340	-3380	-2566	-932	0,347		-2616,463	-923,055	
0,1340	-3380	-2566	-932	0,347		-2616,463	-923,055	
0,1005	-3380	-2679	-932	0,350		-2730,028	-923,055	
0,0670	-3380	-2793	-932	0,353		-2843,593	-923,055	
0,0335	-3380	-2906	-932	0,357		-2957,158	-923,055	
0,0000	-3380	-3019	-932	0,360		-3070,723	-923,055	

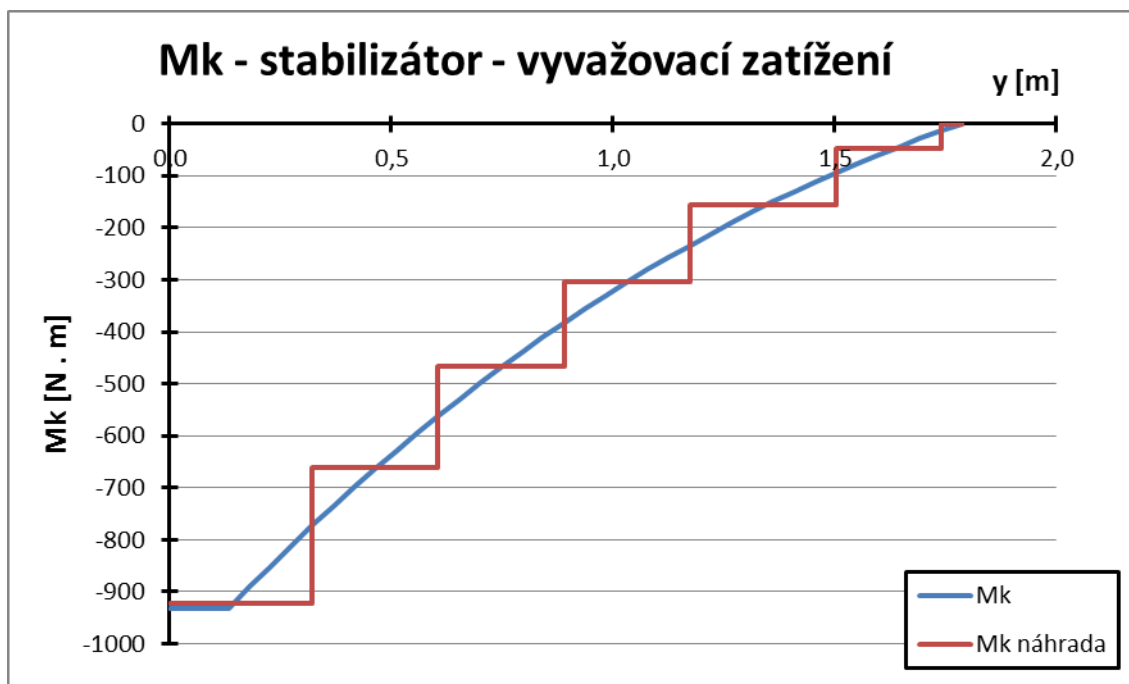
Model náhradního vyvažovacího zatížení po rozpětí na stabilizátoru



Průběh posouvající síly modelu náhradního vyvažovacího zatížení po rozpětí na stabilizátoru



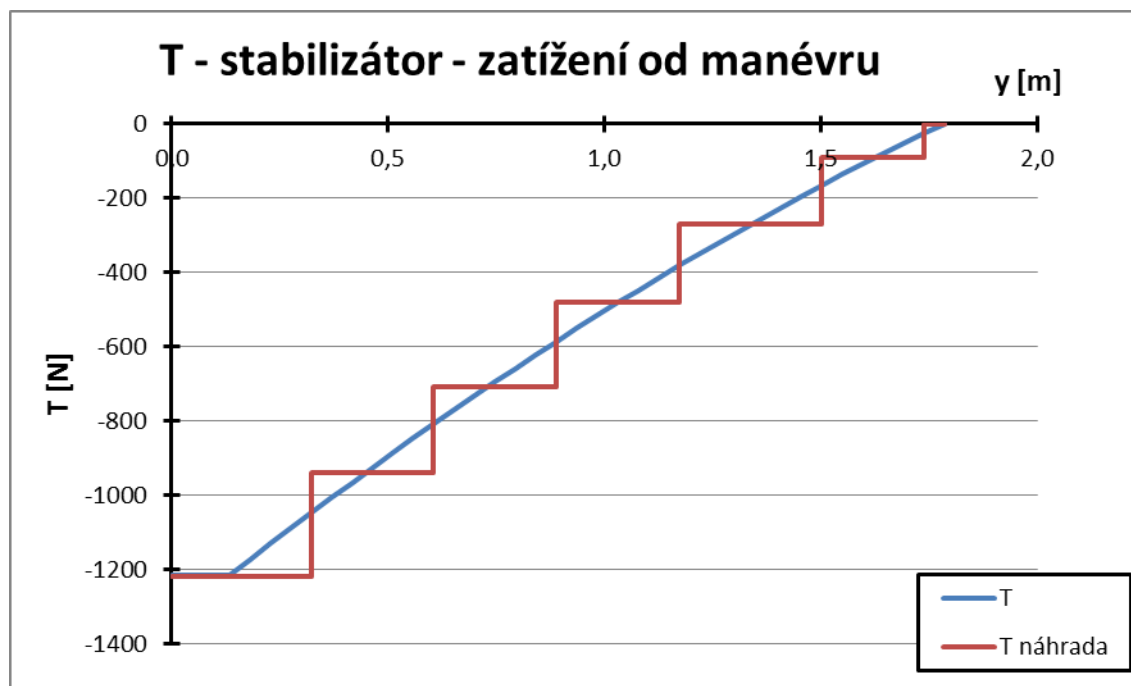
Průběh ohybového momentu modelu náhradního vyvažovacího zatížení po rozpětí na stabilizátoru



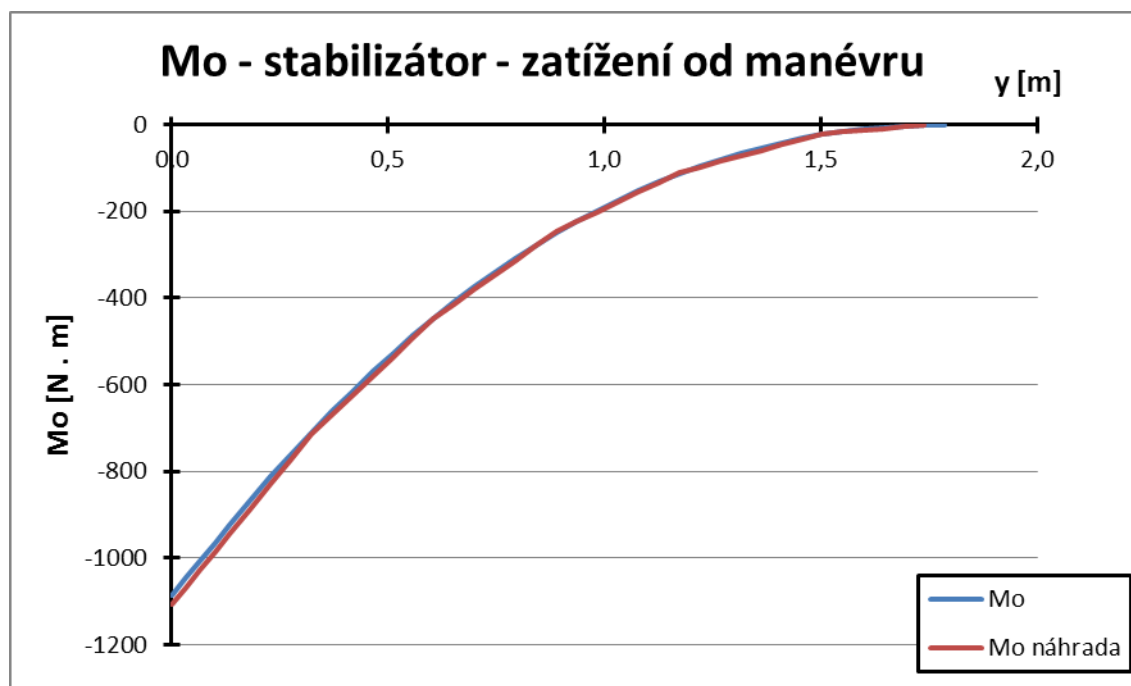
Průběh kroutícího momentu modelu náhradního vyvažovacího zatížení po rozpětí na stabilizátoru

Stabilizátor - zatížení od manévru								Počtení (k = 1,875)
Provozní								
y [m]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	Rameno MK [m]	T náhrada [N]	Mo náhrada [Nm]	Mk náhrada [Nm]	T [N]
1,7870	0	0	0	0,119		0	0	
1,7870	0	0	0	0,119		0	0	
1,7398	-26	-1	-3	0,122		0	0	
1,7398	-26	-1	-3	0,122	-90	0	-10,966	-169
1,6925	-53	-3	-7	0,125		-4,251	-10,966	
1,6453	-81	-6	-10	0,128		-8,501	-10,966	
1,5981	-109	-10	-14	0,132		-12,752	-10,966	
1,5509	-137	-16	-18	0,135		-17,002	-10,966	
1,5036	-166	-23	-22	0,138		-21,253	-10,966	
1,5036	-166	-23	-22	0,138	-180	-21,253	-35,871	-338
1,4564	-196	-32	-26	0,142		-34,005	-35,871	
1,4092	-226	-42	-30	0,145		-46,756	-35,871	
1,3619	-256	-53	-35	0,148		-59,508	-35,871	
1,3147	-287	-66	-39	0,152		-72,260	-35,871	
1,2675	-318	-80	-44	0,155		-85,011	-35,871	
1,2203	-350	-96	-49	0,158		-97,763	-35,871	
1,1730	-382	-113	-54	0,161		-110,515	-35,871	
1,1730	-382	-113	-54	0,161	-210	-110,515	-69,786	-394
1,1258	-415	-132	-60	0,165		-133,185	-69,786	
1,0786	-448	-152	-65	0,168		-155,854	-69,786	
1,0313	-482	-174	-71	0,171		-178,524	-69,786	
0,9841	-516	-198	-77	0,175		-201,194	-69,786	
0,9369	-551	-223	-83	0,178		-223,863	-69,786	
0,8897	-586	-250	-90	0,181		-246,533	-69,786	
0,8897	-586	-250	-90	0,181	-230	-246,533	-111,491	-431
0,8424	-622	-279	-96	0,185		-280,065	-111,491	
0,7952	-658	-309	-103	0,188		-313,598	-111,491	
0,7480	-695	-341	-110	0,191		-347,130	-111,491	
0,7007	-732	-374	-117	0,195		-380,662	-111,491	
0,6535	-770	-410	-125	0,198		-414,195	-111,491	
0,6063	-808	-447	-133	0,201		-447,727	-111,491	
0,6063	-808	-447	-133	0,201	-230	-447,727	-157,757	-431
0,5591	-847	-486	-140	0,204		-492,122	-157,757	
0,5118	-886	-527	-149	0,208		-536,517	-157,757	
0,4646	-925	-570	-157	0,211		-580,911	-157,757	
0,4174	-966	-615	-166	0,214		-625,306	-157,757	
0,3701	-1006	-661	-174	0,218		-669,701	-157,757	
0,3229	-1047	-710	-183	0,221		-714,096	-157,757	
0,3229	-1047	-710	-183	0,221	-280	-714,096	-219,633	-525
0,2757	-1089	-760	-193	0,224		-771,715	-219,633	
0,2285	-1131	-813	-202	0,228		-829,334	-219,633	
0,1812	-1173	-867	-212	0,231		-886,953	-219,633	
0,1340	-1216	-923	-222	0,234		-944,571	-219,633	
0,1340	-1216	-923	-222	0,234		-944,571	-219,633	
0,1005	-1216	-964	-222	0,237		-985,441	-219,633	
0,0670	-1216	-1005	-222	0,239		-1026,311	-219,633	
0,0335	-1216	-1046	-222	0,241		-1067,181	-219,633	
0,0000	-1216	-1086	-222	0,244		-1108,051	-219,633	

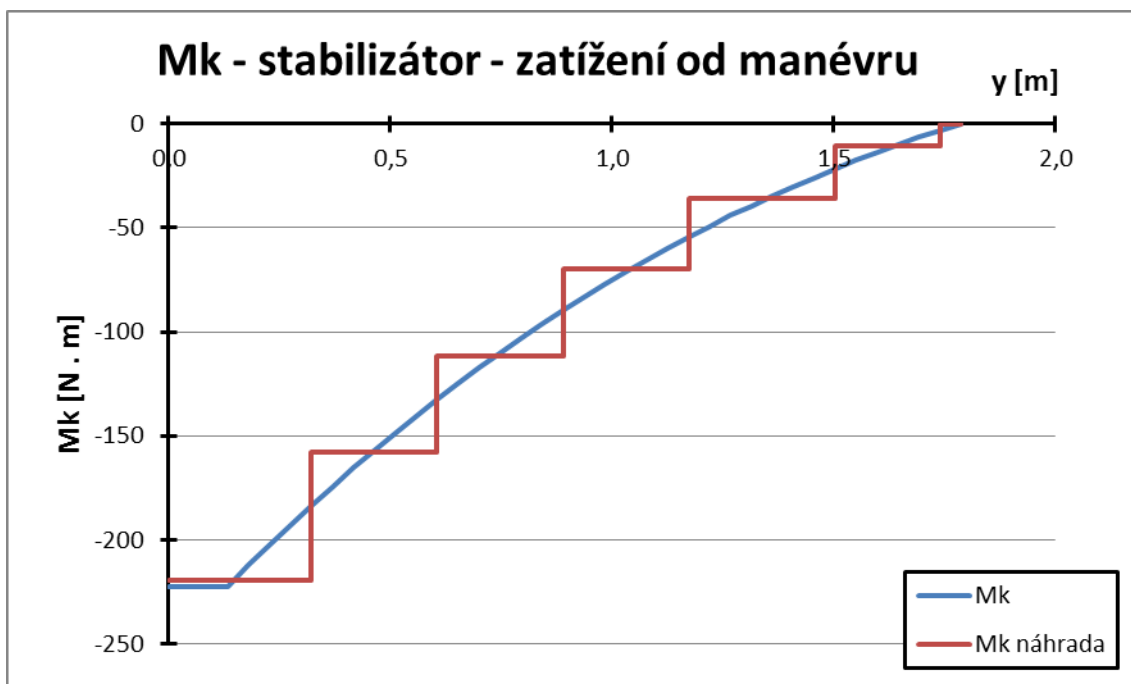
Model náhradního zatížení od manévru po rozpětí na stabilizátoru



Průběh posouvající síly modelu náhradního zatížení od manévru po rozpětí na stabilizátoru



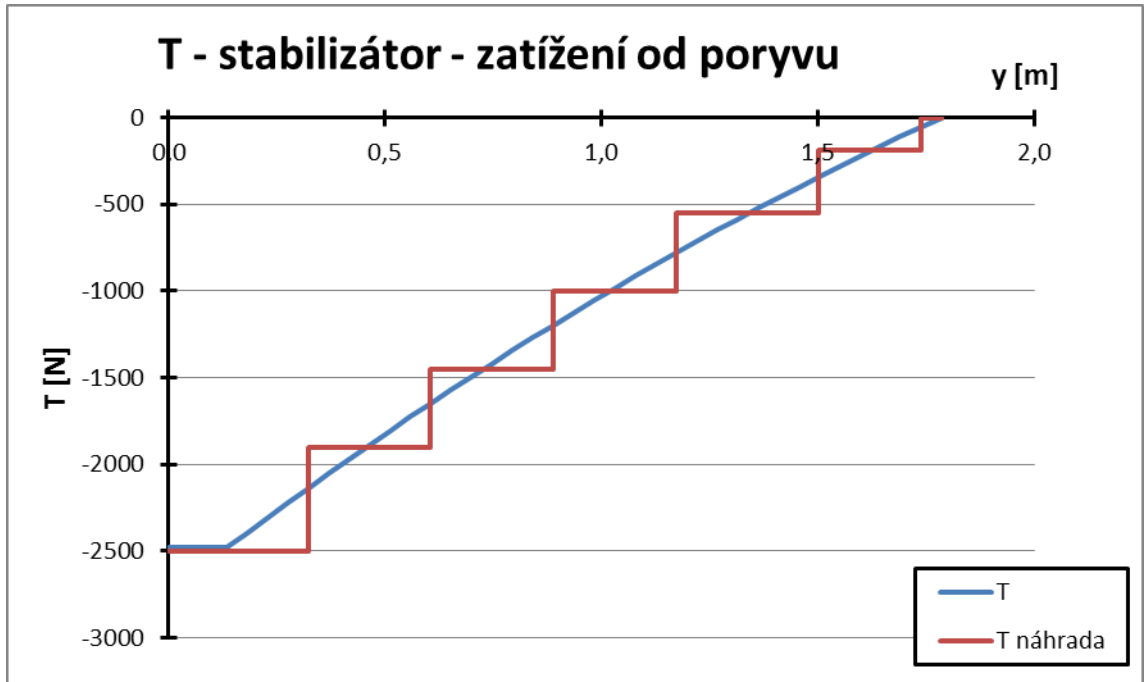
Průběh ohybového momentu modelu náhradního zatížení od manévru po rozpětí na stabilizátoru



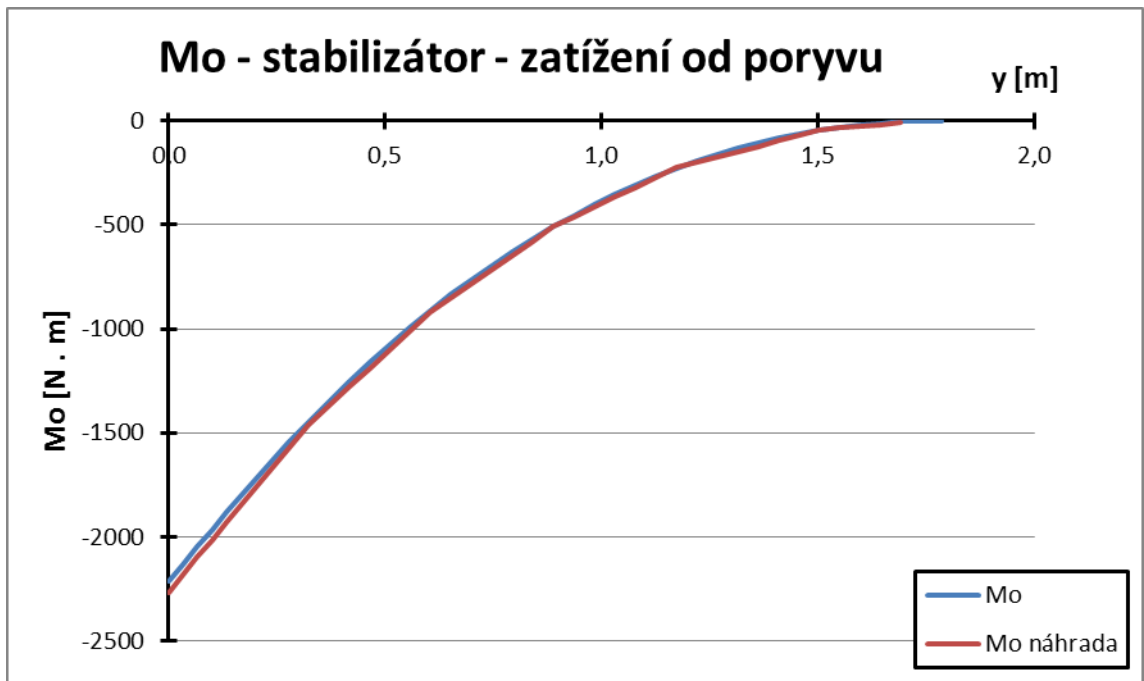
Průběh kroučícího momentu modelu náhradního zatížení od manévru po rozpětí na stabilizátoru

Stabilizátor - zatížení od poryvu								Početní (k = 1,875)
Provozní								
y [m]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	Rameno MK [m]	T náhrada [N]	Mo náhrada [Nm]	Mk náhrada [Nm]	T [N]
1,7870	0	0	0	0,166		0	0	
1,7870	0	0	0	0,166		0	0	
1,7398	-54	-1	-9	0,170		0	0	
1,7398	-54	-1	-9	0,170	-190	0	-32,299	-356
1,6925	-109	-5	-19	0,174		-8,973	-32,299	
1,6453	-165	-12	-29	0,178		-17,947	-32,299	
1,5981	-222	-21	-39	0,183		-26,920	-32,299	
1,5509	-280	-33	-50	0,187		-35,894	-32,299	
1,5036	-339	-47	-61	0,191		-44,867	-32,299	
1,5036	-339	-47	-61	0,191	-360	-44,867	-101,021	-675
1,4564	-399	-65	-73	0,195		-70,843	-101,021	
1,4092	-460	-85	-85	0,199		-96,819	-101,021	
1,3619	-522	-108	-98	0,203		-122,794	-101,021	
1,3147	-585	-134	-111	0,208		-148,770	-101,021	
1,2675	-649	-163	-124	0,212		-174,746	-101,021	
1,2203	-714	-196	-138	0,216		-200,721	-101,021	
1,1730	-780	-231	-153	0,220		-226,697	-101,021	
1,1730	-780	-231	-153	0,220	-450	-226,697	-200,091	-844
1,1258	-847	-269	-168	0,224		-273,926	-200,091	
1,0786	-915	-311	-183	0,229		-321,154	-200,091	
1,0313	-984	-356	-199	0,233		-368,383	-200,091	
0,9841	-1054	-404	-216	0,237		-415,611	-200,091	
0,9369	-1125	-455	-233	0,241		-462,840	-200,091	
0,8897	-1196	-510	-251	0,245		-510,069	-200,091	
0,8897	-1196	-510	-251	0,245	-450	-510,069	-310,447	-844
0,8424	-1269	-568	-269	0,249		-578,550	-310,447	
0,7952	-1343	-630	-288	0,254		-647,031	-310,447	
0,7480	-1418	-695	-307	0,258		-715,513	-310,447	
0,7007	-1494	-764	-327	0,262		-783,994	-310,447	
0,6535	-1571	-836	-347	0,266		-852,476	-310,447	
0,6063	-1649	-912	-368	0,270		-920,957	-310,447	
0,6063	-1649	-912	-368	0,270	-450	-920,957	-432,090	-844
0,5591	-1727	-992	-390	0,274		-1010,691	-432,090	
0,5118	-1807	-1076	-412	0,279		-1100,426	-432,090	
0,4646	-1888	-1163	-435	0,283		-1190,160	-432,090	
0,4174	-1970	-1254	-459	0,287		-1279,894	-432,090	
0,3701	-2053	-1349	-483	0,291		-1369,629	-432,090	
0,3229	-2136	-1448	-507	0,295		-1459,363	-432,090	
0,3229	-2136	-1448	-507	0,295	-600	-1459,363	-609,329	-1125
0,2757	-2221	-1551	-533	0,300		-1577,434	-609,329	
0,2285	-2307	-1658	-559	0,304		-1695,506	-609,329	
0,1812	-2394	-1769	-586	0,308		-1813,577	-609,329	
0,1340	-2481	-1884	-613	0,312		-1931,649	-609,329	
0,1340	-2481	-1884	-613	0,312		-1931,649	-609,329	
0,1005	-2481	-1967	-613	0,315		-2015,399	-609,329	
0,0670	-2481	-2050	-613	0,318		-2099,149	-609,329	
0,0335	-2481	-2133	-613	0,321		-2182,899	-609,329	
0,0000	-2481	-2216	-613	0,324		-2266,649	-609,329	

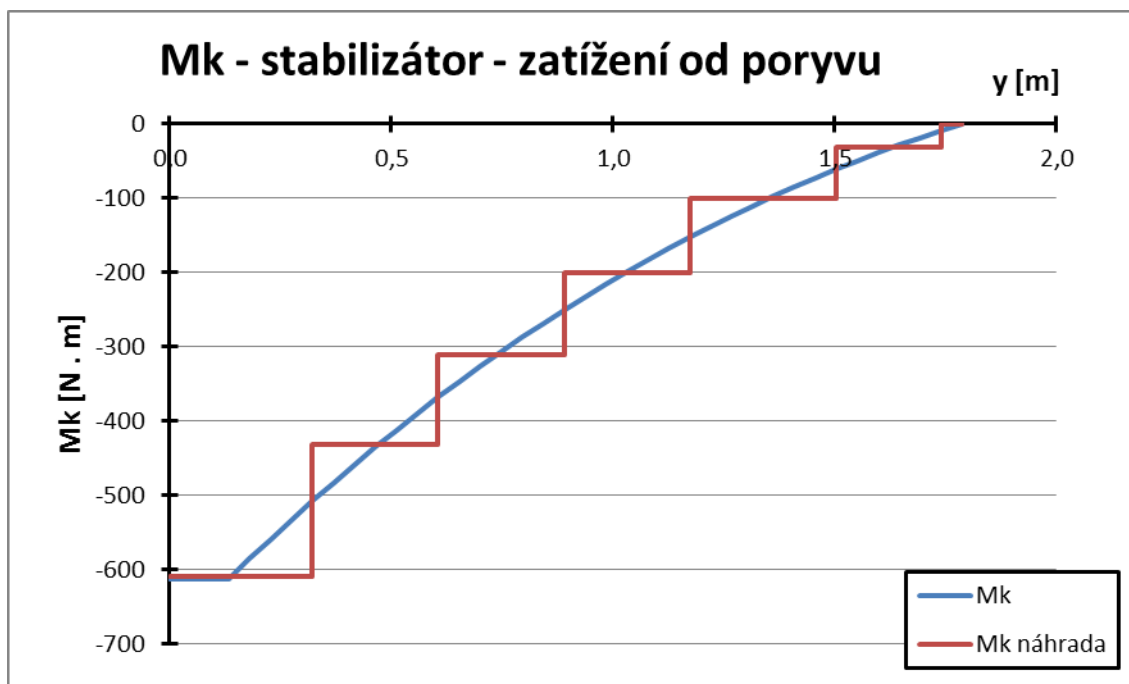
Model náhradního zatížení od poryvu po rozpětí na stabilizátoru



Průběh posouvající síly modelu náhradního zatížení od poryvu po rozpětí na stabilizátoru



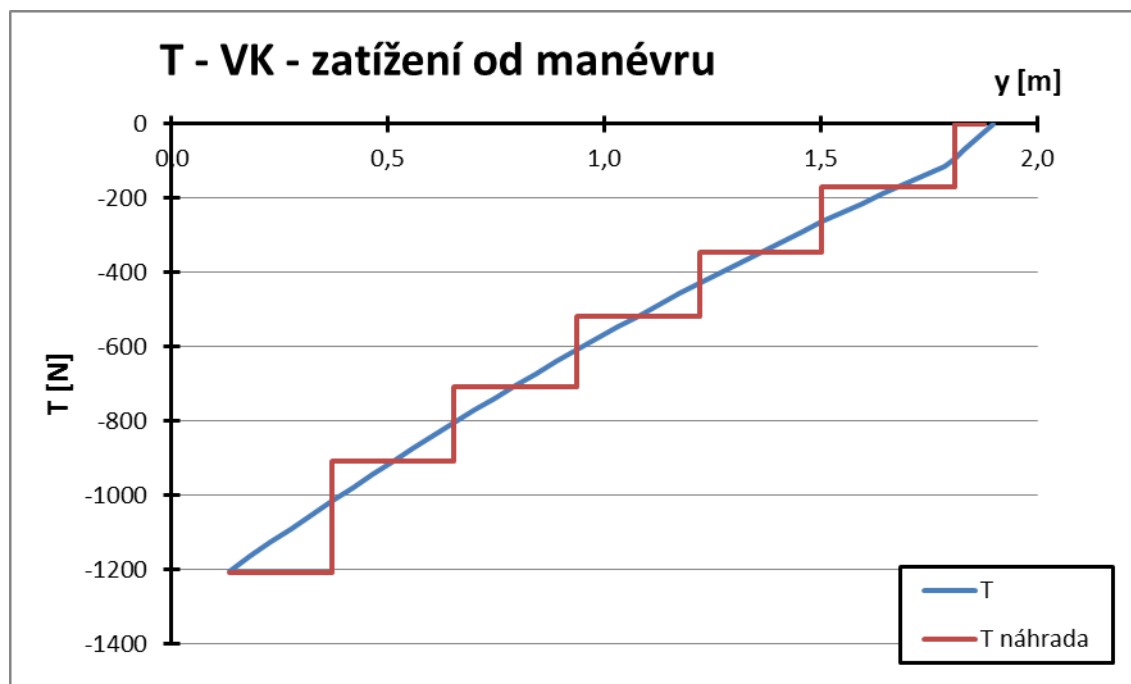
Průběh ohybového momentu modelu náhradního zatížení od poryvu po rozpětí na stabilizátoru



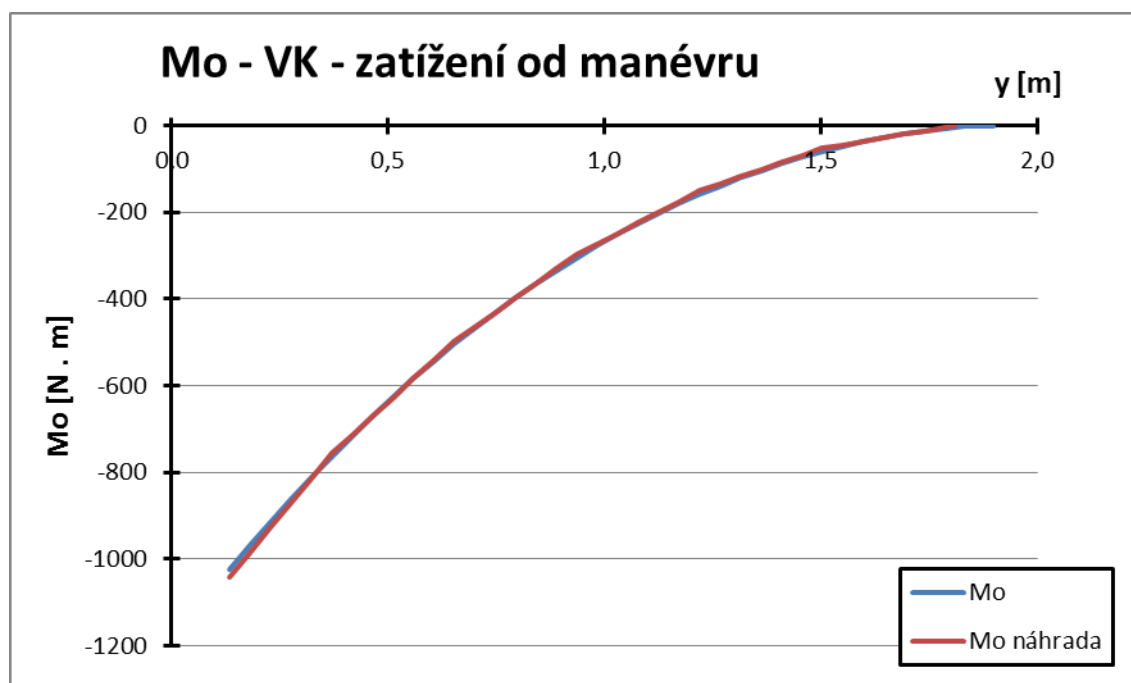
Průběh kroutícího momentu modelu náhradního zatížení od poryvu po rozpětí na stabilizátoru

VK-P - zatížení od manévru								Početní (k = 1,875)
Provozní								
y [m]	T [N]	Mo [Nm]	Mk [Nm]	Rameno MK [m]	T náhrada [N]	Mo náhrada [Nm]	Mk náhrada [Nm]	T [N]
1,9000	0	0	0	-0,150		0	0	
1,8774	-23	0	0	-0,151		0	0	
1,8548	-46	-1	0	-0,153		0	0	
1,8322	-69	-2	0	-0,154		0	0	
1,8096	-93	-4	0	-0,155		0	0	
1,8096	-93	-4	0	-0,155	-170	0	-26,422	-318,75
1,7870	-116	-7	0	-0,063		-3,842	-26,422	
1,7870	-116	-7	0	0,041		-3,842	-26,422	
1,7398	-140	-13	-14	0,043		-11,871	-26,422	
1,6925	-164	-20	-15	0,044		-19,900	-26,422	
1,6453	-189	-28	-15	0,046		-27,929	-26,422	
1,5981	-214	-38	-16	0,047		-35,957	-26,422	
1,5509	-239	-48	-17	0,049		-43,986	-26,422	
1,5036	-265	-60	-17	0,050		-52,015	-26,422	
1,5036	-265	-60	-17	0,050	-175	-52,015	-17,674	-328,125
1,4564	-291	-73	-18	0,051		-68,309	-17,674	
1,4092	-318	-88	-19	0,053		-84,603	-17,674	
1,3619	-345	-103	-19	0,054		-100,897	-17,674	
1,3147	-373	-120	-20	0,056		-117,191	-17,674	
1,2675	-401	-139	-21	0,057		-133,484	-17,674	
1,2203	-429	-158	-21	0,059		-149,778	-17,674	
1,2203	-429	-158	-21	0,059	-175	-149,778	-26,422	-328,125
1,1730	-458	-179	-22	0,060		-174,337	-26,422	
1,1258	-487	-201	-23	0,062		-198,896	-26,422	
1,0786	-517	-225	-24	0,063		-223,455	-26,422	
1,0313	-547	-250	-24	0,065		-248,014	-26,422	
0,9841	-578	-277	-25	0,066		-272,573	-26,422	
0,9369	-609	-305	-26	0,067		-297,131	-26,422	
0,9369	-609	-305	-26	0,067	-190	-297,131	-26,422	-356,25
0,8897	-641	-334	-27	0,069		-330,664	-33,627	
0,8424	-672	-365	-28	0,070		-364,196	-33,627	
0,7952	-705	-398	-28	0,072		-397,728	-33,627	
0,7480	-738	-432	-29	0,073		-431,261	-33,627	
0,7007	-771	-468	-30	0,075		-464,793	-33,627	
0,6535	-805	-505	-31	0,076		-498,325	-33,627	
0,6535	-805	-505	-31	0,076	-200	-498,325	-39,627	-375
0,6063	-839	-544	-32	0,078		-541,303	-39,627	
0,5591	-873	-584	-33	0,079		-584,281	-39,627	
0,5118	-908	-626	-34	0,080		-627,259	-39,627	
0,4646	-944	-670	-35	0,082		-670,237	-39,627	
0,4174	-979	-715	-36	0,083		-713,215	-39,627	
0,3701	-1016	-762	-37	0,085		-756,193	-39,627	
0,3701	-1016	-762	-37	0,085	-300	-756,193	-46,074	-562,5
0,3229	-1052	-811	-38	0,086		-813,340	-46,074	
0,2757	-1090	-862	-38	0,088		-870,486	-46,074	
0,2285	-1127	-914	-39	0,089		-927,633	-46,074	
0,1812	-1165	-968	-40	0,091		-984,779	-46,074	
0,1340	-1204	-1024	-41	0,092		-1041,926	-46,074	

Model náhradního zatížení od manévru po rozpětí na VK



Průběh posouvající síly modelu náhradního zatížení od manévru po rozpětí na VK

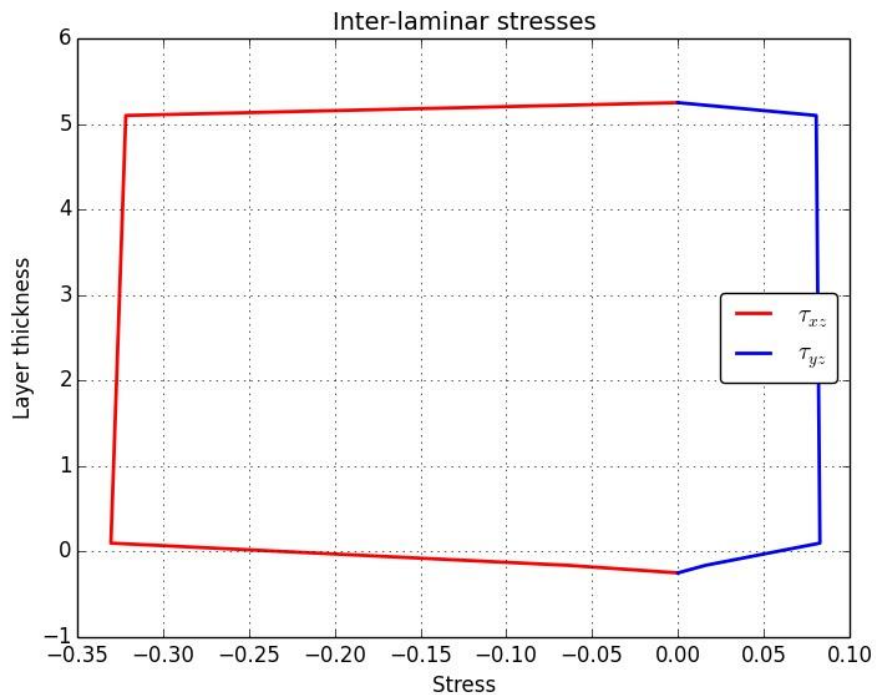
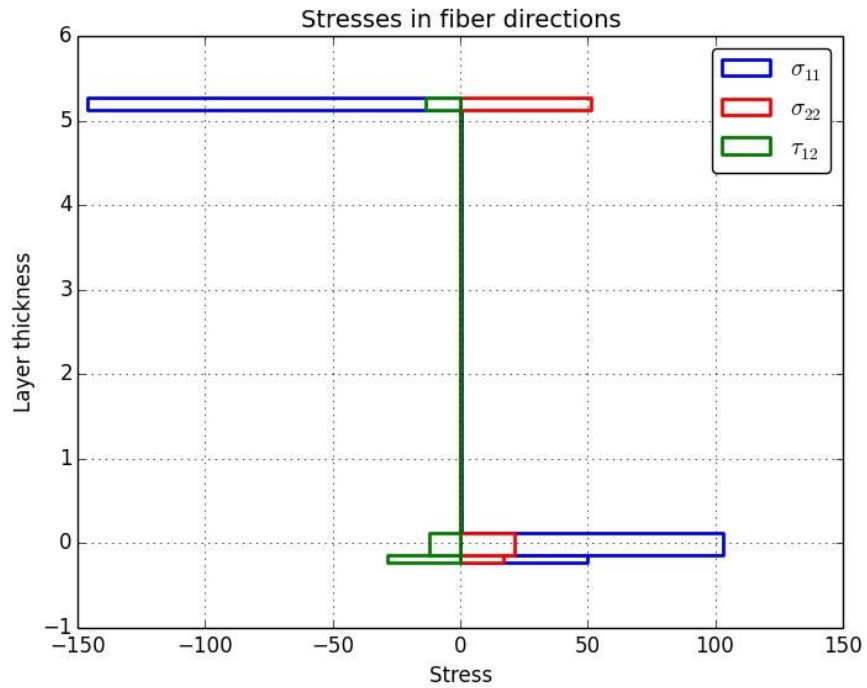


Průběh ohybového momentu modelu náhradního zatížení od manévru po rozpětí na VK

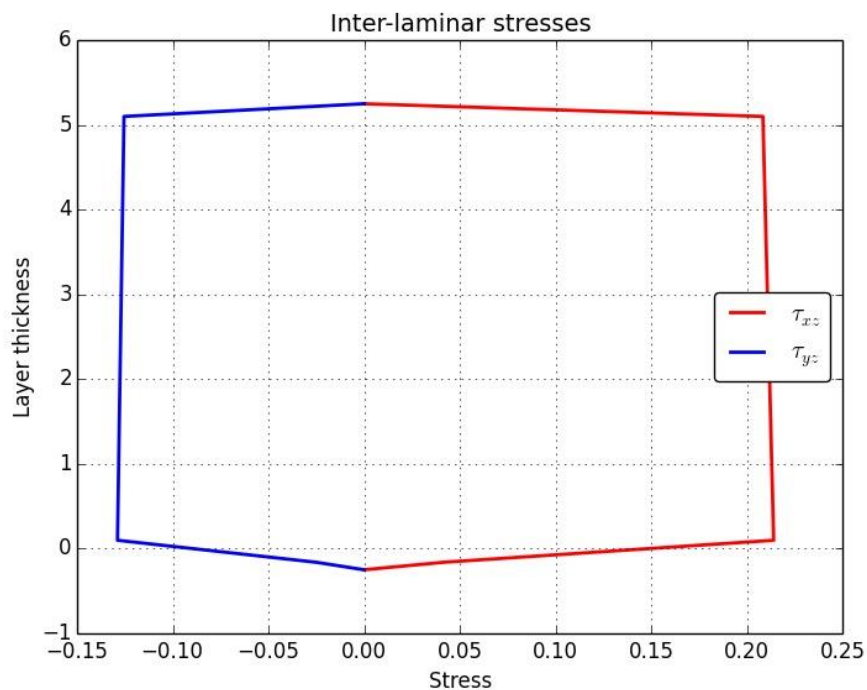
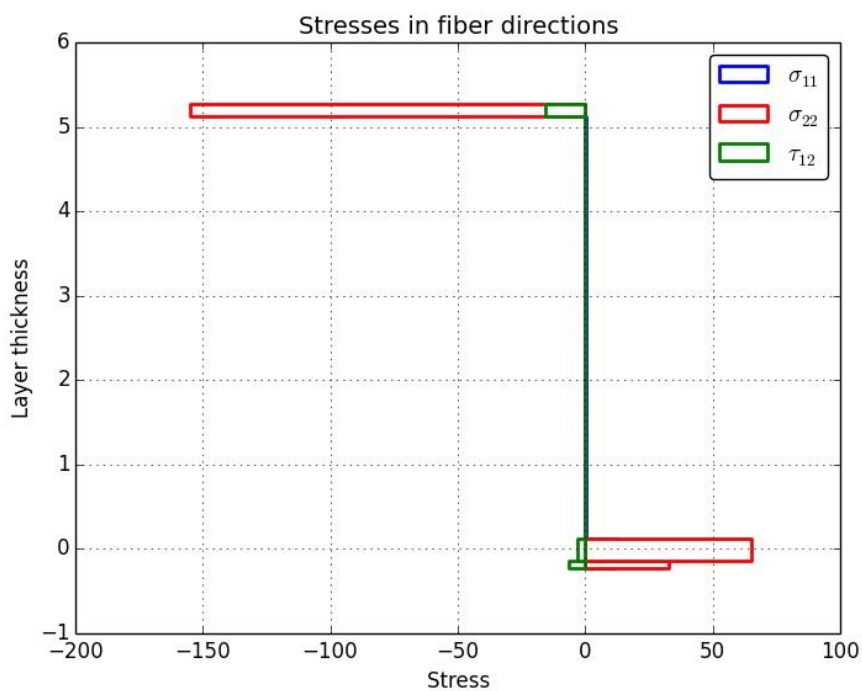
Příloha č. 7 – Stabilizátor - případ zatížení č. 1 – vyvažovací zatížení

Výsledné grafické hodnoty poruchových oblastí 1 - 4 z programu COMPOST s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách vybraných elementů:

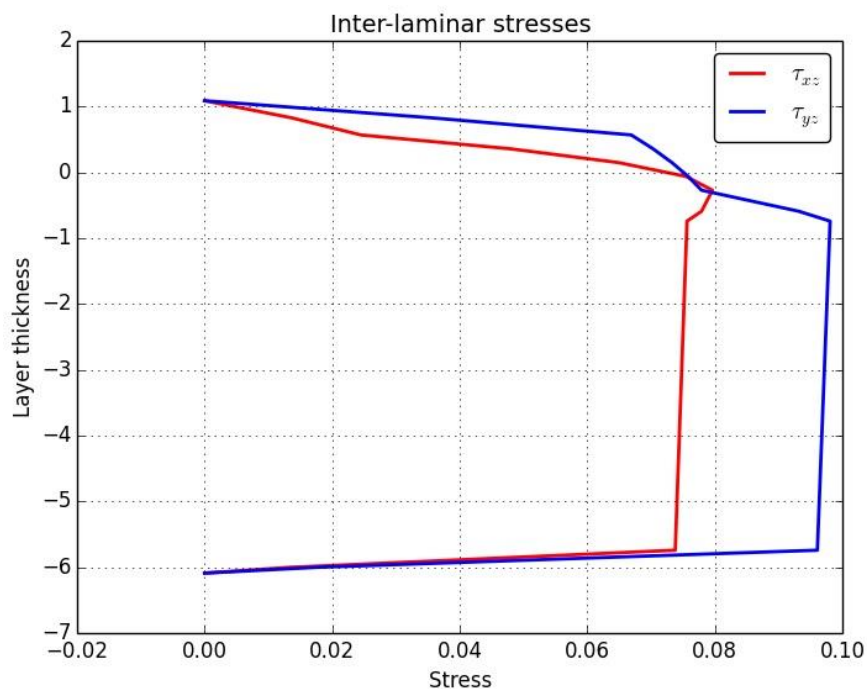
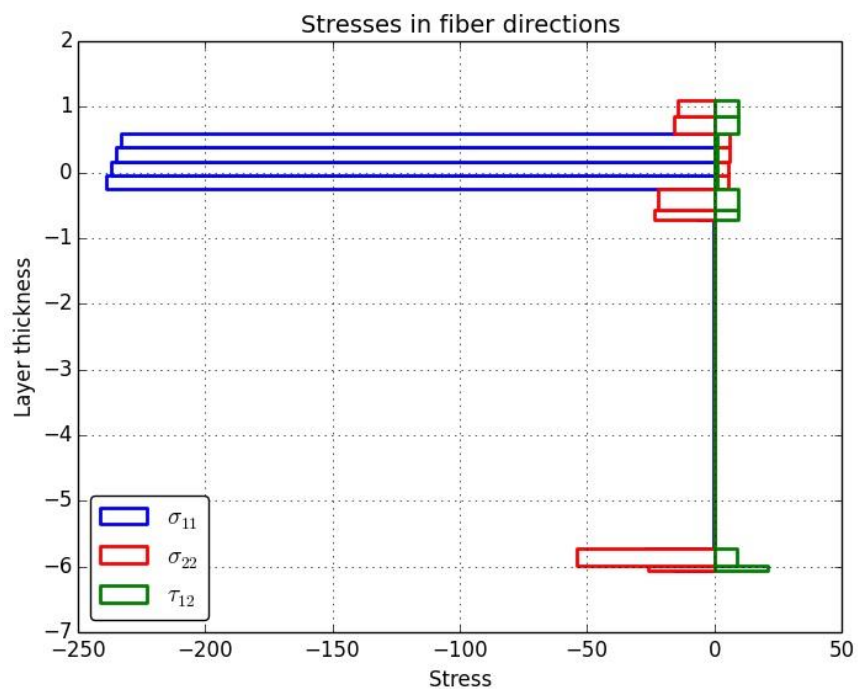
Poruchová oblast č. 1



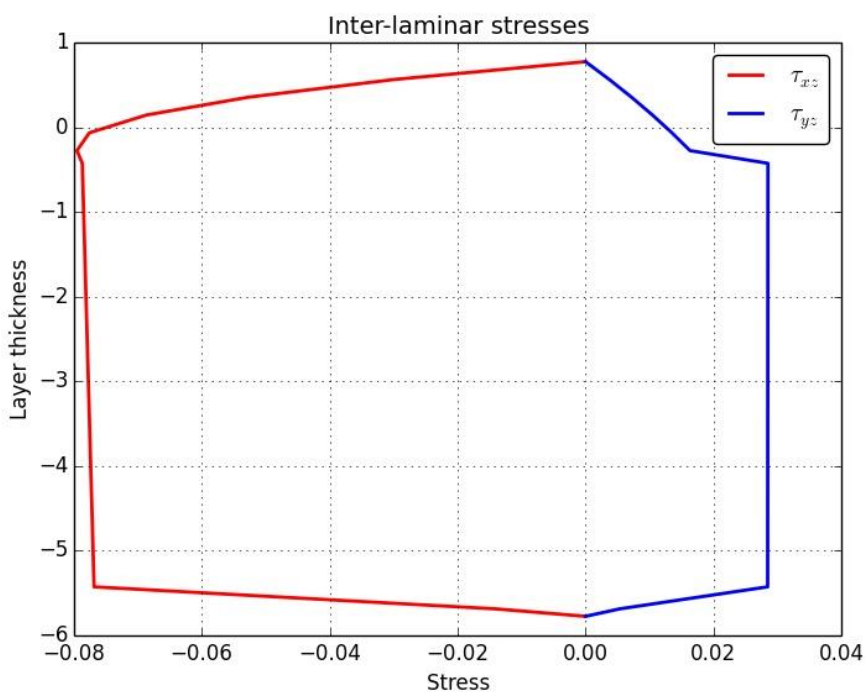
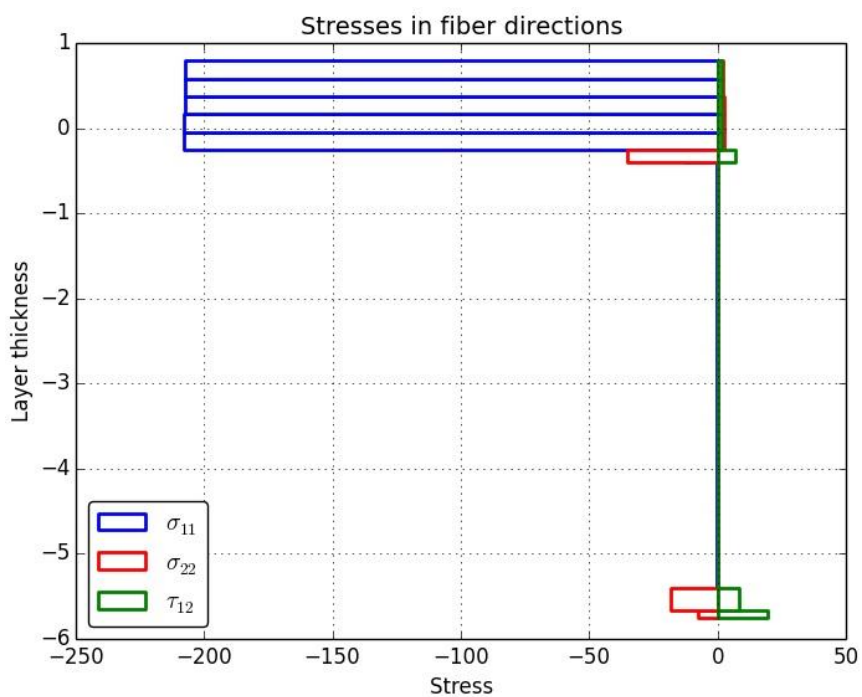
Poruchová oblast č. 2



Poruchová oblast č. 3



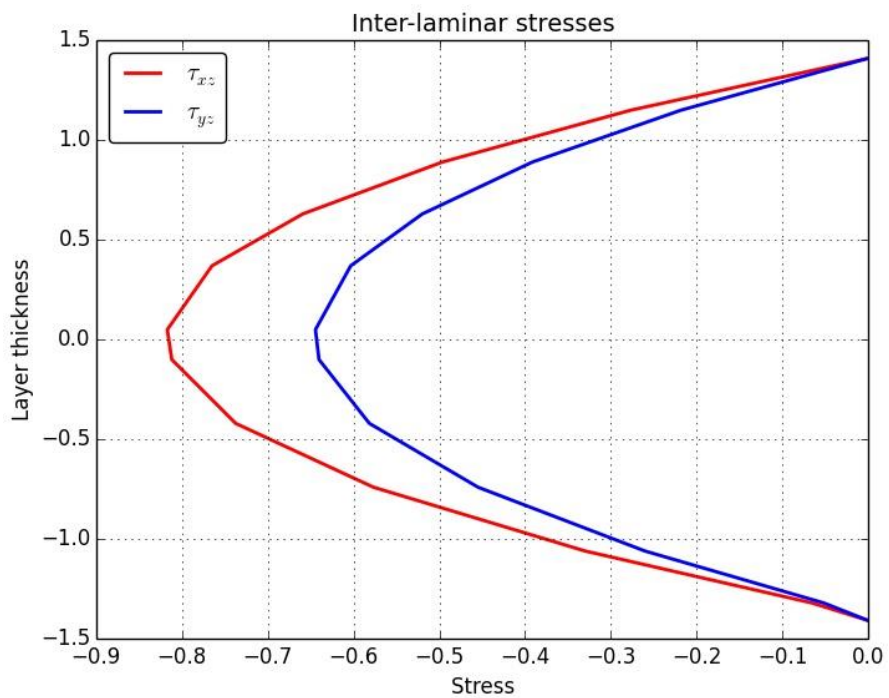
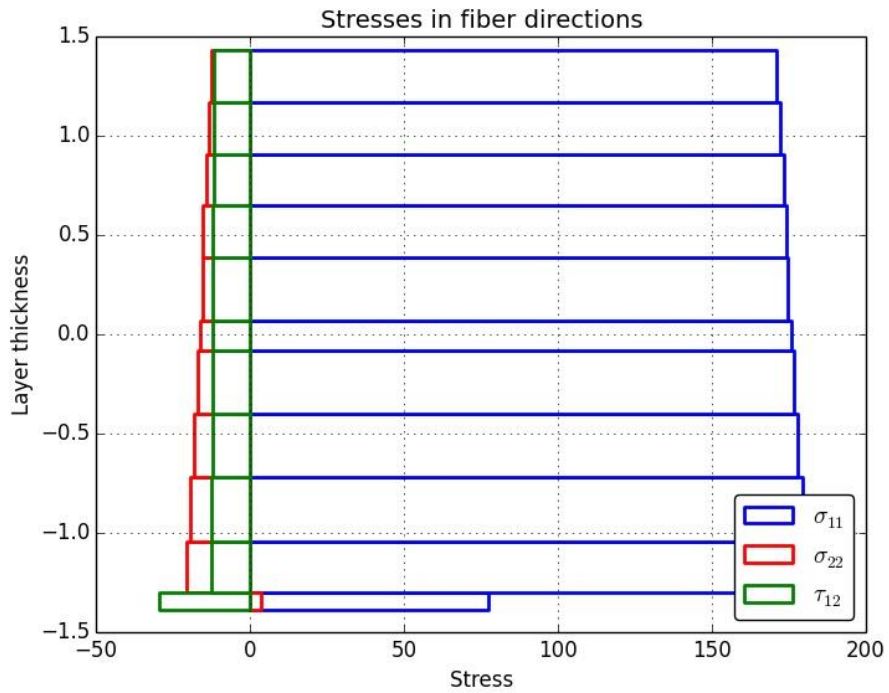
Poruchová oblast č. 4



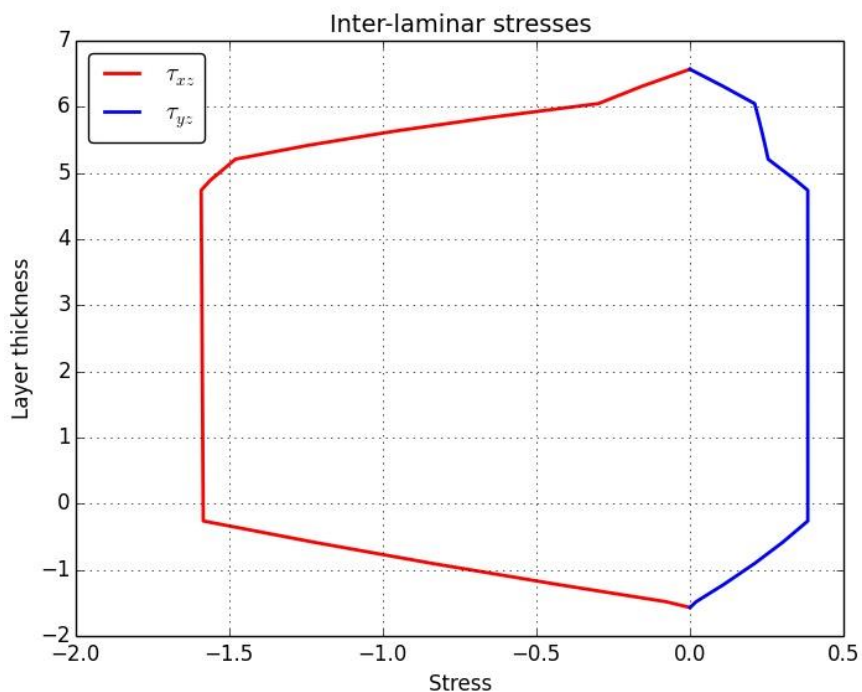
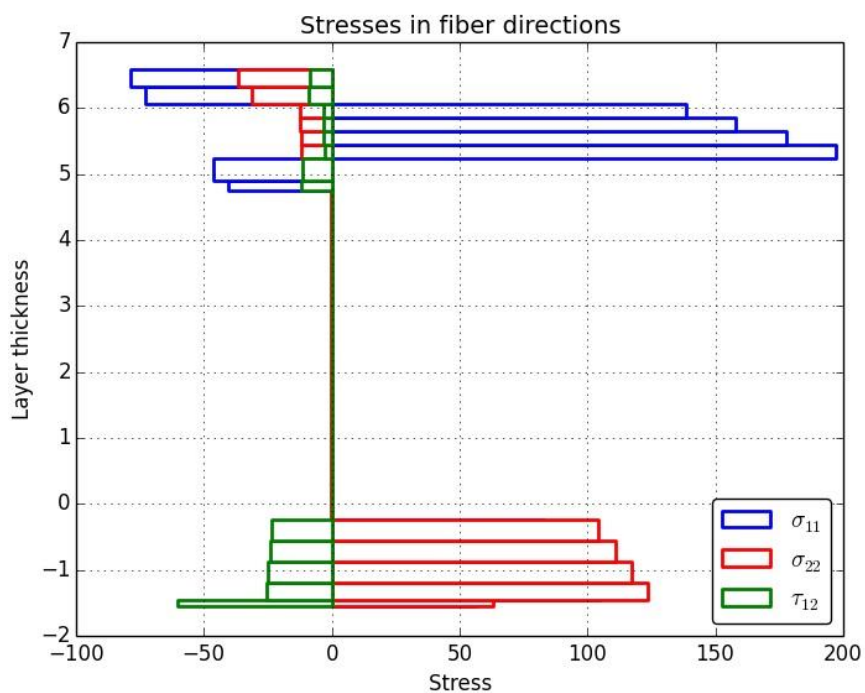
Příloha č. 8 – Stabilizátor - případ zatížení č. 3 – zatížení od poryvu

Výsledné grafické hodnoty poruchových oblastí 1 - 3 z programu COMPOST s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách vybraných elementů:

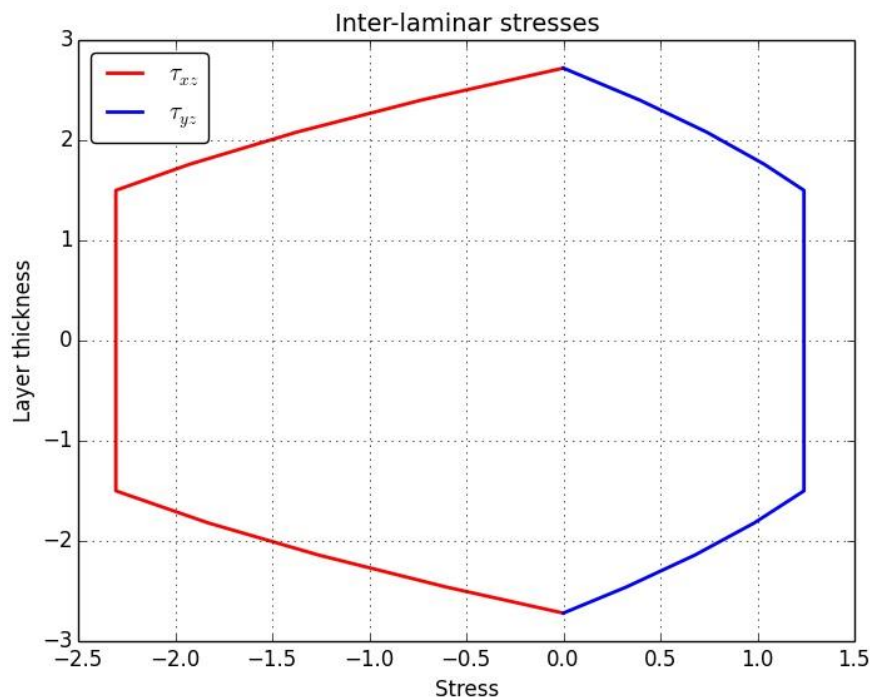
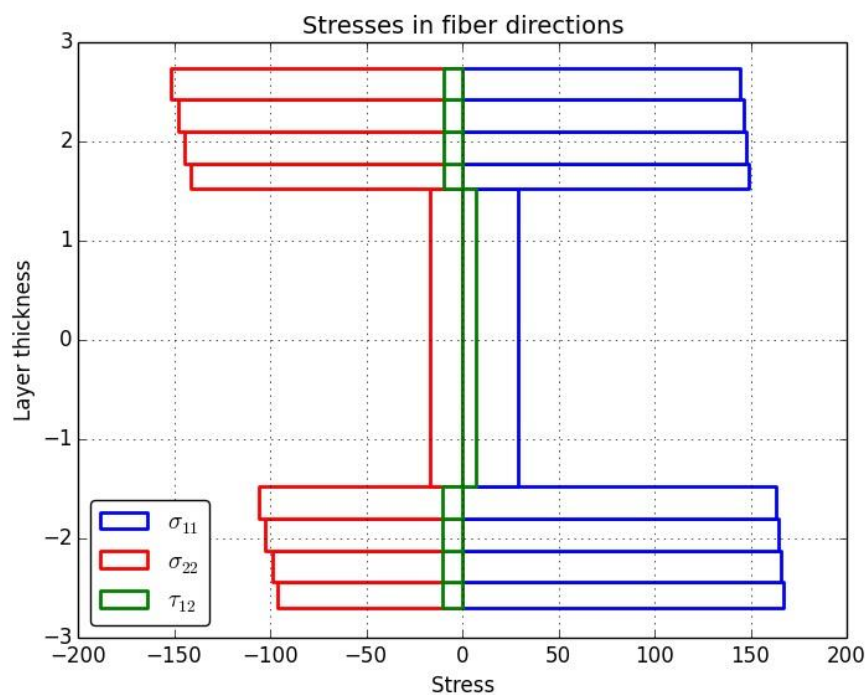
Poruchová oblast č. 1



Poruchová oblast č. 2



Poruchová oblast č. 3



Příloha č. 9 – VK - případ zatížení č. 1 – zatížení od manévru

Výsledné grafické hodnoty poruchové oblasti z programu COMPOST s vykreslenými normálovými a smykovými napětími ve všech vrstvách vybraných elementů:

